



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
“ZARAGOZA”**

**CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES EN LA  
INSTRUMENTACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

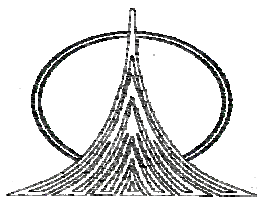
**INGENIERO QUÍMICO**

**P R E S E N T A N :**

**FERNANDO GERARDO SÁNCHEZ COSS**

**ERNESTO RAMÍREZ AVILA**

**ASESOR: I.Q. EDUARDO VÁZQUEZ ZAMORA**



**MÉXICO D.F.**

**2005**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

|              |   |
|--------------|---|
| Resumen..... | 1 |
|--------------|---|

|                   |   |
|-------------------|---|
| Introducción..... | 2 |
|-------------------|---|

## Capítulo 1

### Transmisores

|  |    |
|--|----|
| 1.1) Generalidades.....  | 3  |
| 1.2) Transmisores Neumáticos.....  | 4  |
| 1.2.1) Amplificación en dos etapas.....                                      | 5  |
| 1.2.2) Transmisor de Equilibrio de Movimientos.....                          | 7  |
| 1.3) Transmisores Electrónicos.....  | 8  |
| 1.3.1) Transmisor Electrónico Detector de Posición de Inductancia.....       | 9  |
| 1.3.2) Transmisor Electrónico tipo Transformador Diferencial.....            | 10 |
| 1.4) Transmisores Digitales.....   | 11 |
| 1.5) Comunicaciones entre Instrumentos de Proceso y Sistemas de Control..... | 18 |

## Capítulo 2

### Medición de Flujo, Nivel, Presión, Temperatura y Otras variables

|  |     |
|--|-----|
| 2.1 Medición de Flujo.....   | 23  |
| 2.2 Medición tipo Presión Diferencial.....   | 34  |
| 2.3 Placa de Orificio.....   | 36  |
| 2.4 Tubo Venturi.....  | 38  |
| 2.5 Tubo de Medición.....  | 39  |
| 2.6 Tubo Pitot.....  | 42  |
| 2.7 Factores a considerar en el dimensionamiento de Placas de Orificio.....  | 43  |
| 2.8 Especificaciones Técnicas.....   | 45  |
| 2.9 Comparación entre Instrumentos de Medición de Flujo.....   | 49  |
| 2.10 Medición de Nivel.....  | 51  |
| 2.11 Medición de Nivel de Líquidos.....  | 52  |
| 2.12 Medición de Nivel de Líquidos de Medida Directa.....  | 53  |
| 2.13 Medición de Nivel de Líquidos por Presión Hidrostática.....   | 63  |
| 2.14 Medición de Nivel por Características Eléctricas del Líquido.....   | 71  |
| 2.15 Especificaciones Técnicas.....  | 74  |
| 2.16 Típicos de Instalación.....   | 79  |
| 2.17 Medidores de Nivel de Sólidos.....  | 85  |
| 2.18 Detectores de Nivel de Punto Fijo.....  | 85  |
| 2.19 Detectores de Nivel Continuos.....  | 89  |
| 2.20 Comparación entre Instrumentos de Medición de Nivel de Líquidos de Medida Directa y Presión Hidrostática..... | 94  |
| 2.21 Comparación entre Instrumentos de Medición de Nivel por Características Eléctricas del Líquido.....           | 95  |
| 2.22 Comparación entre Instrumentos de Medición de Nivel de Sólidos.....   | 96  |
| 2.23 Medición de Presión.....  | 97  |
| 2.24 Elementos de Medida de Presión.....   | 99  |
| 2.25 Elementos Mecánicos.....  | 105 |
| 2.26 Clases de Manómetros, Fluidos de LLenado y Sellos Químicos.....   | 113 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.27 | Selección de Manómetros.....                                   | 120 |
| 2.28 | Especificaciones Técnicas.....                                 | 123 |
| 2.29 | Típicos de Instalación.....                                    | 124 |
| 2.30 | Comparación entre Instrumentos de Medición de Presión.....     | 127 |
| 2.31 | Medición de Temperatura.....                                   | 128 |
| 2.32 | Termómetros Bimetálicos.....                                   | 131 |
| 2.33 | Bulbos de Resistencia (RTD).....                               | 133 |
| 2.34 | Termopares.....  | 137 |
| 2.35 | Termopozos.....  | 144 |
| 2.36 | Termistores y Pirómetros de Radiación.....                     | 146 |
| 2.37 | Especificaciones Técnicas.....                                 | 147 |
| 2.38 | Típicos de Instalación.....                                    | 152 |
| 2.39 | Comparación entre Instrumentos de Medición de Temperatura..... | 156 |
| 2.40 | Otra clase de Instrumentos.....                                | 157 |
| 2.41 | Medición de Variables Físicas.....                             | 157 |
|      | 2.41.1 Peso y Velocidad.....                                   | 157 |
|      | 2.41.2 Medición de Densidad y Peso Específico.....             | 175 |
|      | 2.41.3 Medición de Humedad y Punto de Rocío.....               | 194 |
|      | 2.41.4 Medición de Viscosidad y Consistencia.....              | 207 |
|      | 2.41.5 Detección de LLama.....                                 | 224 |
| 2.42 | Medición de Variables Químicas.....                            | 230 |
|      | 2.42.1 Medición de Conductividad.....                          | 230 |
|      | 2.42.2 Medición de Ph.....                                     | 235 |
|      | 2.42.3 Medición de Concentración de Gases.....                 | 244 |

## Capítulo 3

### Válvulas de control

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 3.1  | Generalidades.....   | 247 |
| 3.2  | Cuerpo de la Válvula.....  | 248 |
| 3.3  | Partes Internas.....   | 249 |
| 3.4  | Tipos de Válvulas.....   | 251 |
| 3.5  | Características del Caudal y Curvas Características.....                         | 271 |
| 3.6  | Corrosión y Erosión en las Válvulas.....   | 274 |
| 3.7  | Servomotores.....  | 275 |
| 3.8  | Actuadores y tipos de Acciones en las Válvulas de Control.....                   | 276 |
| 3.9  | Accesorios.....  | 278 |
| 3.10 | Principios de dimensionamiento de Válvulas de Control, Coeficientes Kv o Cv..... | 279 |
| 3.11 | Consideraciones en el Flujo de Líquido y Vapor.....                              | 284 |
| 3.12 | Vaporización (flasheo) y Cavitación.....   | 285 |
| 3.13 | Ruido en Válvulas de Control.....  | 289 |
| 3.14 | Válvula de Control Digital.....  | 290 |

## Capítulo 4

### Diagramas de Tubería e Instrumentación

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 4.1 | Clasificación de Instrumentos.....   | 291 |
| 4.2 | Resumen de la norma ISA-S5.1-84 de Códigos de Identificación de Instrumentos.....                        | 295 |
| 4.3 | Significado de las letras y dibujos para representar instrumentos de acuerdo a la norma ISA-S5.1-84..... | 301 |
| 4.4 | Consideraciones generales para la elaboración de Diagramas de Tubería e Instrumentación.....             | 319 |
| 4.5 | Ejemplos de Control e Instrumentación Típica de Equipos.....   | 323 |

## Capítulo 5

### Lógica y Control de Procesos

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1   | Símbolos Lógicos para Operaciones Binarias.....                          | 327 |
| 5.1.1 | Resumen de norma ISA-S5.2-76.....  | 332 |
| 5.1.2 | Ejemplos de Diagramas Lógicos para Operaciones Binarias de Procesos..... | 341 |
| 5.2   | Características del Control de Procesos.....                             | 357 |
| 5.3   | Sistemas de Control Neumáticos y Eléctricos.....                         | 359 |
| 5.3.1 | Control Todo-Nada.....   | 359 |
| 5.3.2 | Control Flotante.....  | 362 |
| 5.3.3 | Control Proporcional.....  | 363 |
| 5.3.4 | Control Proporcional+Integral.....                                       | 366 |
| 5.3.5 | Control Proporcional+Derivativo.....                                     | 369 |
| 5.3.6 | Control Proporcional+Integral+Derivativo.....                            | 371 |
| 5.4   | Sistemas de Control Electrónicos y Digitales.....                        | 372 |
| 5.4.1 | Control Todo-Nada.....   | 373 |
| 5.4.2 | Control Proporcional.....  | 374 |
| 5.4.3 | Control Integral.....  | 376 |
| 5.4.4 | Control Derivativo.....  | 377 |
| 5.4.5 | Control Proporcional+Integral+Derivativo.....                            | 378 |
| 5.4.6 | Controladores Digitales.....   | 380 |
| 5.4.7 | Controlador Lógico Programable (PLC).....                                | 383 |
| 5.5   | Otras Clases de Control.....   | 413 |
| 5.5.1 | Control en Cascada.....  | 413 |
| 5.5.2 | Control de Relación.....   | 415 |
| 5.5.3 | Control Anticipativo.....  | 416 |
| 5.5.4 | Control Selectivo.....   | 419 |
| 5.6   | Instrumentos Auxiliares.....   | 420 |
| 5.7   | Seguridad Intrínseca.....  | 424 |
| 5.7.1 | Barreras de Seguridad.....   | 426 |
| 5.7.2 | Clasificación de Áreas Peligrosas.....                                   | 428 |
| 5.8   | Control por Computadora.....   | 457 |
| 5.8.1 | Control Digital Directo (DDC).....                                       | 458 |
| 5.8.2 | Control Supervisor.....  | 461 |
| 5.8.3 | Sistema de Control Distribuido (SCD).....                                | 463 |
| 5.9   | Factores de relevancia en el control de procesos.....                    | 499 |

## Capítulo 6

### Principales Actividades Realizadas por Instrumentación y Control en el Área de Diseño en la Ingeniería de Detalle de un Proyecto

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 6.1  | Criterios de Diseño.....                           | 504 |
| 6.2  | Índice de Instrumentos.....                        | 504 |
| 6.3  | Sumario de Instrumentos.....                       | 505 |
| 6.4  | Memorias de Cálculo.....                           | 505 |
| 6.5  | Especificaciones y Hojas de Datos.....             | 506 |
| 6.6  | Requisiciones para Cotización.....                 | 506 |
| 6.7  | Evaluación y Dictamen Técnico de Cotizaciones..... | 506 |
| 6.8  | Requisiciones para Compra.....                     | 507 |
| 6.9  | Revisión de Dibujos del Fabricante.....            | 507 |
| 6.10 | Diagramas de Lazos (loops).....                    | 507 |
| 6.11 | Diagramas Lógicos.....                             | 508 |
| 6.12 | Gráficos Dinámicos.....                            | 508 |
| 6.13 | Localización de Instrumentos.....                  | 508 |

|                              |                                     |            |
|------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 6.14                         | Rutas Eléctricas.....               | 509        |
| 6.15                         | Cedula de Conduit y Cable.....      | 509        |
| 6.16                         | Típicos de Instalación.....         | 509        |
| 6.17                         | Lista de Material.....              | 509        |
| 6.18                         | Interfaz con otras disciplinas..... | 509        |
| <br><b>Conclusiones.....</b> |                                     | <b>511</b> |
| <br><b>Anexo A.....</b>      |                                     | <b>513</b> |
| <br><b>Glosario.....</b>     |                                     | <b>519</b> |
| <br><b>Bibliografía.....</b> |                                     | <b>527</b> |

## RESUMEN

**E**n la actualidad las plantas de mayor capacidad de producción y complejas que abastecen la demanda de productos diversos para nuestra sociedad, deben su correcto funcionamiento en gran parte a la instrumentación. La instrumentación es el cerebro de los modernos procesos industriales, pues es a través de la instrumentación como se controla la calidad de los productos obtenidos y se logra mantener dentro del proceso las condiciones requeridas para que la operación sea eficiente y segura. Los instrumentos pueden detectar condiciones de operación y tomar acciones de control más rápidas y precisas que el operador humano, y verse retribuido esto, en beneficios económicos al ahorrar trabajo y reducir riesgos.

Dada la importancia que tiene la instrumentación en la operación y control de procesos industriales, el presente trabajo pretende proporcionar una visión global del conocimiento en instrumentación industrial, no aspira abarcar todos y cada uno de los detalles técnicos que forman parte de la instrumentación, ni colocar en un solo trabajo de esta índole toda la clase de instrumentos que existen, o todas las teorías de control que pueden aplicarse en la industria, o todas las formas de diseño en instrumentación. Pues es conveniente advertir que dicha información es sumamente extensa, para lo cual, en un trabajo de esta naturaleza, resultaría una empresa imposible de alcanzar. Por el contrario a esto, el trabajo, exponiendo en un lenguaje cuidadosamente explicativo los temas de mayor relieve que, sin extenderse profundamente en ninguno, ni dejando de lado los aspectos más importantes de cada uno de ellos, anhela establecer las bases sobre las cuales se erijan sólidamente los conocimientos fundamentales en esta área de la ingeniería.

Para llegar al entendimiento de la instrumentación industrial, es necesario comprender primeramente a los instrumentos en sí mismos y conocer el papel que desempeñan cada uno de ellos en la industria. Por ello, en el presente trabajo, se estudian los principios de operación, pues no es posible la especificación de ninguna clase de instrumento sin entender primeramente como funciona, esto va a la par también, con las características técnicas de diseño e instalación de los instrumentos principales empleados en la industria, bajo la consideración de que los procesos en general son extensamente variados y enfocados hacia la producción de muchos tipos de productos y, en todos los casos, resulta absolutamente necesario, en un momento dado, controlar y mantener constantes algunas magnitudes como son flujo, nivel, presión, temperatura, ph, conductividad, velocidad, humedad, punto de rocío, etc. Para esto es necesario el empleo de medidores de magnitudes, transmisores, controladores, válvulas de control, alarmas, interruptores, etc. El trabajo comprende también las clasificaciones, las simbologías en diagramas de tubería e instrumentación y las normas estándares que rigen la simbolización general de instrumentos. En el campo de la instrumentación un aspecto muy importante son los sistemas de control, en el trabajo se estudian los principales modos de control en base, en algunos casos, a la clase de señal empleada y en otros, al arreglo de los instrumentos de control como puede ser el control en cascada o el control de relación por ejemplo, o en base al sistema de control mismo como un conjunto, tal es el caso del controlador lógico programable y sin lugar a dudas el sistema de control distribuido. Algunos temas adjuntamente son tratados aquí, como son la lógica empleada en el control de procesos, los protocolos de comunicación entre los sistemas de control, la seguridad intrínseca y la clasificación de áreas peligrosas. El trabajo se complementa, al hacer en la parte final del mismo, una breve descripción de los documentos que son elaborados por instrumentación en lo que atañe al diseño en la parte de la ingeniería de detalle de un proyecto y al presentar un ejemplo sencillo de la forma de especificar técnicamente alguna cierta clase de instrumentos, como puede verse esto en el anexo A.

La conclusión más importante que surge de la realización de este trabajo y a partir de la cual se puede cernir cualquier otra clase de conclusión, es que no es posible la operación segura y efectiva de los actuales procesos industriales sin la intervención acertada y el empleo efectivo de la instrumentación. Por tal razón, el conocimiento de los instrumentos y los dispositivos de control es necesario para toda aquella persona cercana a los procesos de transformación utilizados en la industria, y no sólo para el especialista.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo intenta tener la virtud de permitir que todo aquel que practique la ingeniería y que este cercano a los procesos industriales, versado o no en el tema de instrumentación, pueda encontrar una guía de referencia que le posibilite expandir o cultivar más aun su propio conocimiento en la instrumentación industrial. Aún para el estudiante de ingeniería que ambiciona desempeñarse algún día profesionalmente dentro de los ámbitos de los mecanismos industriales, el trabajo proporciona un panorama claro de lo que implica la instrumentación industrial, y a la vez, suministra las herramientas básicas necesarias que deben de manejarse para poder ejercer satisfactoriamente como ingeniero en instrumentación, en caso de que esto sea su elección y se encuentre al alcance.

El trabajo fue dividido en seis capítulos y a continuación se describe de manera general el contenido de cada uno de ellos.

**Capítulo 1. Transmisores.** Se da una descripción de las clases más importantes de transmisores, a saber, neumáticos, eléctricos, electrónicos y electrónicos digitales; así como los protocolos de comunicación de mayor relevancia entre estos y los sistemas de control.

**Capítulo 2. Medición de flujo, nivel, presión, temperatura, y otras variables.** En este capítulo, se describen los principales elementos de medición para cada una de las variables de operación mencionadas arriba, abarcando principios teóricos, principio de funcionamiento de los instrumentos más comúnmente utilizados, así como especificaciones técnicas en el diseño e instalación de los mismos.

**Capítulo 3. Válvulas de control.** Se tratan los principales tipos de válvulas de control empleadas en la industria, la descripción de su estructura (cuerpo, partes internas y accesorios), aplicaciones, ventajas y desventajas, materiales comúnmente empleados en su construcción, criterios de selección de acuerdo a la característica de la válvula, instrucciones para instalación y mantenimiento, así como los factores que afectan en el correcto funcionamiento y dimensionamiento de las mismas.

**Capítulo 4. Diagramas de tubería e instrumentación.** Se muestra la clasificación de los instrumentos, así como las normas aplicables para la codificación y simbología de instrumentos para su representación en DTI's. Se abordan las consideraciones generales para la elaboración de los mismos y se presentan algunos ejemplos típicos de control e instrumentación.

**Capítulo 5. Lógica y control de procesos.** Se presentan los símbolos lógicos para operaciones binarias de procesos, se describe su utilización conforme a la normatividad aplicable, se proporcionan algunos ejemplos de elaboración de diagramas lógicos en aplicaciones de procesos, así como también se abordan las características principales de control de procesos en sistemas neumáticos, eléctricos, electrónicos y digitales con los principales modos de control empleados a nivel industrial (flotante, proporcional, PID, etc.). Se estudia el PLC como un controlador importante digital que se utiliza actualmente. Se mencionan las principales características así como requisitos que debe cubrir un SCD para su aplicación industrial poniendo énfasis en la seguridad intrínseca y en la clasificación de áreas peligrosas. Además, se describen las características de otros tipos de control (en cascada, control de relación, anticipativo, etc.), así como los principales factores que intervienen en la automatización de los procesos industriales.

**Capítulo 6. Principales actividades realizadas por instrumentación y control en el área de diseño en la ingeniería de detalle de un proyecto.** Se describen brevemente las características de los principales documentos que son elaborados por parte del departamento de instrumentación y control en la etapa mencionada del desarrollo de un proyecto.



## Transmisores

### 1.1 Generalidades

Los transmisores son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor, indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Los tipos de señales más usuales para transmisores en la industria son: la señal neumática, la electrónica y la digital.

Los transmisores neumáticos generan una señal neumática de 3-15 psi (libra por pulgada cuadrada) para el campo de medida de 0-100 % de la variable. Esta señal ha sido normalizada por la SAMA-Asociación de fabricantes de instrumentos (Scientific Apparatus Makers Association) y esta adoptada de forma general por fabricantes de transmisores y controladores neumáticos en los Estados Unidos. En países donde se utiliza el sistema métrico decimal, la señal para transmisores neumáticos es de 0.2-1 bar, que equivale aproximadamente el rango de 3-15 psi.

Los transmisores electrónicos generan una señal estándar de 4-20 mA c.c. y pueden cubrir distancias desde 200 metros a 1 km. En el mercado aún se pueden encontrar transmisores que envíen señales de 1-5 mA c.c., 10-50 mA c.c., 0.5 mA c.c., 0-20 mA c.c. y 1-5 volts c.c.; que fueron utilizadas antes de que se normalizara la señal de 4-20 mA c.c.; esta última señal no capta perturbaciones y emplea sólo dos hilos además de estar libre de corrientes parásitas. La alimentación de los transmisores puede realizarse con una unidad montada en el panel de control y utilizando el mismo par de hilos del transmisor.

De forma general, cuando se hace referencia a una señal neumática o electrónica, estas se interpretaran como de 3-15 psi (0.2-1 bar) para la neumática y 4-20 mA c.c. para la electrónica, salvo que se especifique otro tipo de señal.

El “cero vivo” para un transmisor neumático es de 3 psi (no de 0 psi) y para el transmisor electrónico es de 4 mA c.c. Esto presenta una clara ventaja al momento de calibrar este tipo de instrumentos, o si existe una falla en la operación del transmisor. Por ejemplo, considérese un transmisor neumático de temperatura con una campo de medida de 0-150 °C, cuando el bulbo esta a 0 °C y el transmisor envía una señal de salida de 1 psi, entonces esta descalibrado. Si el nivel mínimo estándar de salida fuera de 0 psi, no sería posible esta comprobación rápida y tendría que aumentarse la temperatura hasta detectarse presión en la salida.

La señal digital consiste en una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), el 1 representa el paso de una señal a través de un conductor y el 0 la ausencia de dicha señal. Por ejemplo, si la señal del microprocesador del transmisor es de 8 bits, entonces puede transferir 8 señales binarias simultáneamente, lo que para la señal analógica de 4-20 mA c.c. el valor binario de 4 sería 00000000 y el de 20 sería 11111111, lo que en decimal tendría una equivalencia de:

$$[(1 \times 2^0 = 1) + (1 \times 2^1 = 2) + (1 \times 2^2 = 4) + (1 \times 2^3 = 8) + (1 \times 2^4 = 16) + (1 \times 2^5 = 32) + (1 \times 2^6 = 64) + (1 \times 2^7 = 128)] = 255$$

Que son el número de celdas de memoria referidas al bus de datos del microprocesador; esto significa que puede almacenar hasta 255 datos o instrucciones con una precisión de hasta  $\pm 0.4\%$  que interpretara a través de su unidad de control; para un microprocesador de 16 bits serían 65535 con una precisión  $\pm 0.00152\%$ .

Esto representa una gran cantidad de información que puede manipular el transmisor digital a alta velocidad y precisión. La transmisión puede realizarse utilizando un simple par de hilos de cable calibre 16, 18, 20 o 22 AWG (American Wire Gauge, calibres estándares americanos para alambres) o fibra óptica. La transmisión por fibra óptica presenta las ventajas de: ser las líneas inmunes al ruido eléctrico (interferencias electromagnéticas), un aislamiento eléctrico total, un ancho de banda considerable, es de tamaño pequeño y poco peso. La experiencia demuestra que la transmisión por fibra óptica es bastante segura en cuanto a la calidad de esta. Los módulos de transmisión pueden trasladar datos con multiplexores transmitiendo simultáneamente.

El microprocesador posee las ventajas de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, fiabilidad, precio adecuado y capacidad de proporcionar información adicional a la estricta necesaria. En este punto la principal diferencia entre una señal analógica y digital es que la primera, es función continua de la variable medida, mientras que la segunda, representa la magnitud de la variable medida en forma de una serie de cantidades discretas codificadas en un sistema de notación. Desde 1983 con la aparición del primer transmisor digital, se han facilitado las comunicaciones entre el transmisor y el controlador o receptor, de forma digital gracias al microprocesador.

Además de esto, actualmente existen transmisores digitales con salida enteramente digital, lo cual facilita aun más la información entre el transmisor y el controlador o receptor, pues la transmisión es totalmente digitalizada. La desventaja de esto es que cada fabricante posee su propio protocolo de comunicaciones, por lo cual la interoperabilidad entre distintos protocolos es difícil, con lo que se fuerza al comprador a utilizar sistemas completos de control de un mismo fabricante para mayor facilidad y rendimiento. Este problema esta en vías de ser resuelto por los comités internacionales creados con el objetivo de normalizar esta clase de comunicaciones.

## **1.2 Transmisores neumáticos**

Los transmisores neumáticos se fundamentan en el principio del sistema tobera-obturador (fig. 1.1) que convierte el movimiento del elemento de medición, en una señal neumática.

Este mecanismo se basa en el principio de la caída de presión que tiene lugar en un estrangulamiento o restricción de una tubería cuando aumenta la velocidad del aire que pasa por la misma. De esta forma, si se tiene una pequeña tubería acabada en una boquilla o tobera, por donde sale aire comprimido a una cierta presión y se coloca una pequeña restricción antes de la tobera, al estorbar la salida del aire por la tobera acercándose una lámina se logra disminuir la velocidad, la presión entonces en ambos lados tiende a igualarse, mientras que si se aleja, la velocidad aumenta incrementándose la diferencia de presión a través de la restricción. Si se hace una toma de aire corriente abajo de la restricción, entonces se genera una señal neumática de presión variable proporcional a la separación del obturador. Si este obturador se une mecánicamente a un elemento de medida, como por ejemplo un tubo Bourdon, entonces se habrá diseñado un transmisor neumático de presión.

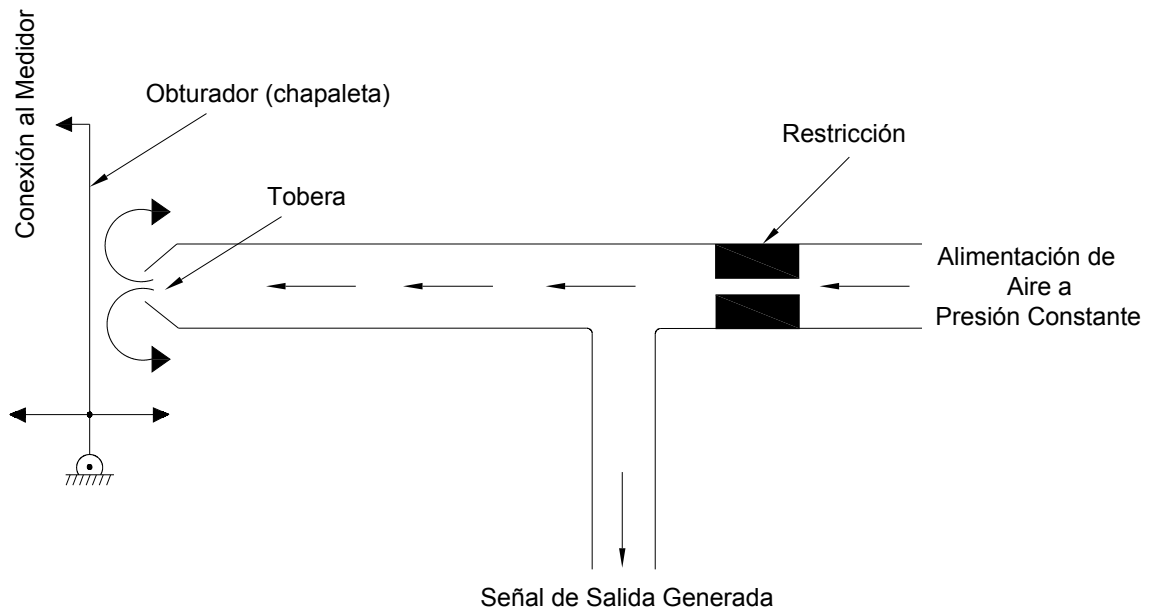


Fig. 1.1 Sistema tobera-obturador.

### 1.2.1 Amplificación en dos etapas

Si al sistema tobera-obturador se le acondiciona además una válvula piloto conectada a la presión posterior a la tobera, lo que se obtiene es un sistema de amplificación en dos etapas. Véase figura 1.2.

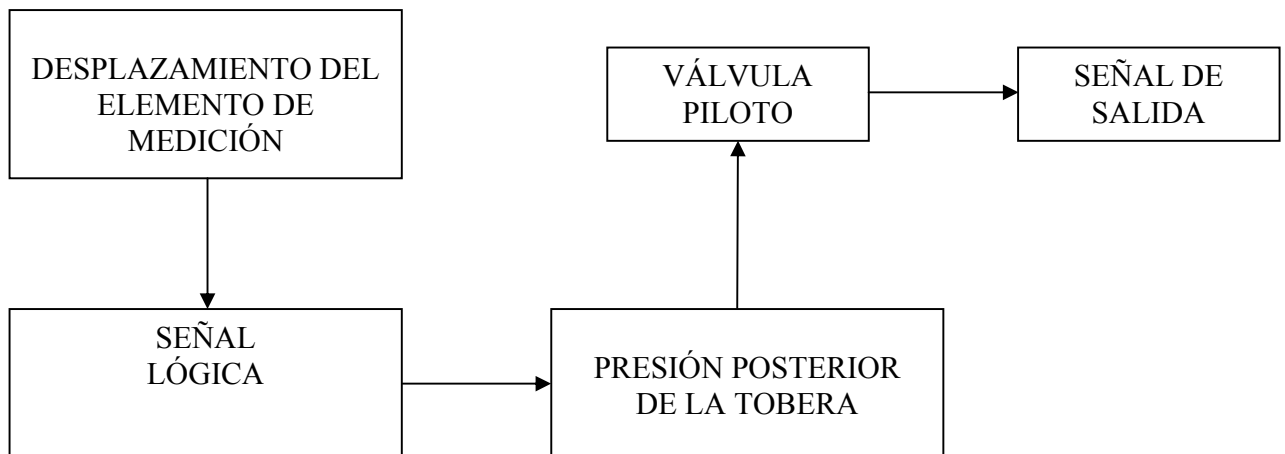


Fig. 1.2 Bloque de amplificación en dos etapas.

La válvula piloto (amplificador neumático) utilizada en el amplificador de dos etapas cumple las siguientes funciones:

- Aumento del flujo de aire suministrado, o del flujo de escape para conseguir tiempos de respuesta inferiores al segundo.
- Amplificación de la presión (ganancia) que suele ser en 4 o 5 veces aumentada para obtener así una señal neumática estándar de 3-15 psi.

En la válvula piloto con realimentación (fig.1.3) la presión posterior  $P_1$  de la salida en la tobera actúa sobre la membrana de superficie  $S_1$ , en tanto la presión  $P_0$  lo hace sobre la membrana  $S_2$ . El sistema móvil de las dos membranas tiende a un equilibrio y cuando este se establece se verifica la siguiente expresión:

$$P_1 S_1 = P_0 S_2$$

De donde se deriva la relación:

$$K_a = \frac{P_0}{P_1} = \frac{S_1}{S_2}$$

Que se conoce como el factor de amplificación o la ganancia de la válvula piloto.

En el equilibrio, al instante en que se presenta un aumento de la presión  $P_1$  de la tobera, el aire de alimentación entra en la válvula aumentando el valor de  $P_0$ . Al contrario, si  $P_1$  disminuye, el aire contenido en el receptor sale a través del orificio de escape, con lo cual  $P_0$  baja. Entre estos dos eventos se presenta una histéresis mecánica debido a las partes móviles del sistema.

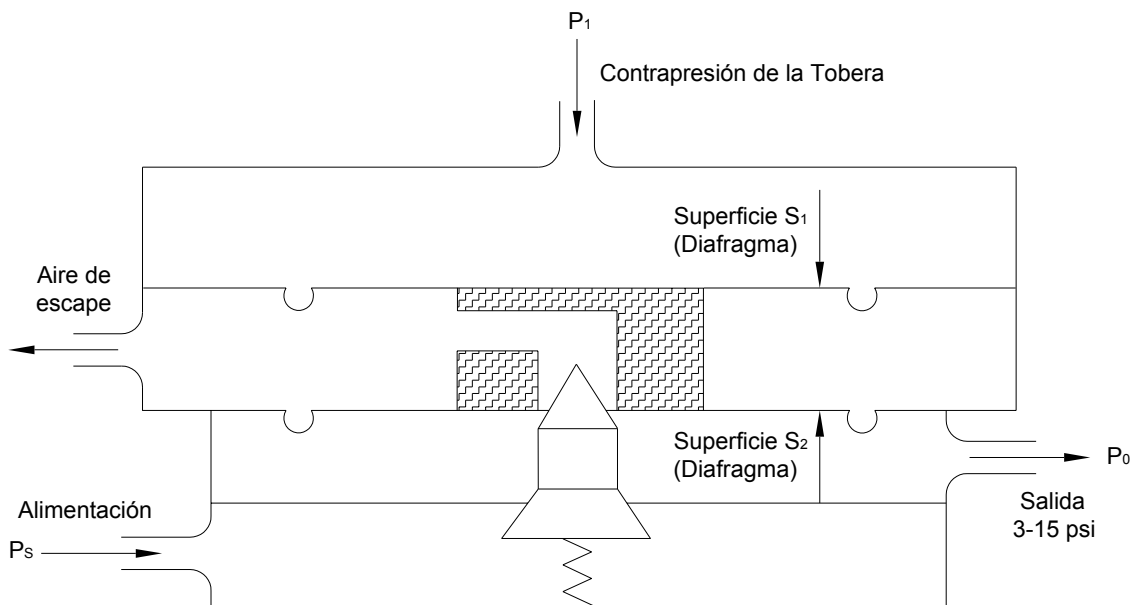


Fig.1.3 Funcionamiento de la válvula piloto con realimentación.

Este sistema presenta dos desventajas:

- 1) Las variaciones del aire de alimentación influyen en la señal de salida.
- 2) Las vibraciones que pueden existir en el proceso influyen en el juego mecánico del obturador y el elemento de medida, provocando pulsaciones en la señal de salida ya que la amplificación del sistema tobera-obturador es grande.

Estas desventajas se evitan disminuyendo la ganancia de la válvula piloto; esto se logra introduciendo una realimentación negativa de la señal posterior de la tobera  $P_1$  sobre el obturador, como se mostrara enseguida con el transmisor de equilibrio de movimientos.

### **1.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos**

Las desventajas del sistema anteriormente descrito, se evitan disminuyendo la ganancia del conjunto con la utilización de una realimentación negativa (contrarrestando el movimiento original del obturador) de la señal posterior de la tobera  $P_1$  sobre el obturador.

En la industria, en su momento, se emplearon tres tipos de transmisor neumático, los cuales son: transmisor de equilibrio de movimientos, transmisor de equilibrio de fuerzas y transmisor de equilibrio de momentos. Aquí ilustraremos únicamente el de equilibrio de movimientos, pues los otros dos se basan en esencia, en el mismo principio de operación que emplea el primero de estos.

El transmisor de equilibrio de movimientos (fig. 1.4) posee un fuelle de realimentación que estabiliza el movimiento del obturador de tal forma que el conjunto al llegar al equilibrio presenta una relación lineal entre la variable y la señal de salida (en el sistema tobera-obturador típico no se presenta esta linealidad). En esta clase de transmisores el material del obturador es una lámina de acero inoxidable, resistente para que no se doble, pero a la vez liviana para que pueda efectuar su funcionamiento correctamente. De esta forma, comparando el movimiento del elemento de medición asociado al obturador con fuelle de realimentación de la presión posterior a la tobera, logra la estabilización del conjunto.

El transmisor de equilibrio de movimientos se empleo en forma particular en la transmisión de presión y temperatura, donde los elementos de medida son tubos Bourdon y elementos de bulbo y capilar. En caso de que la fuerza no sea suficiente para que el transmisor responda rápido ante los cambios de la variable, se utiliza entonces un transmisor de equilibrio de fuerzas, en donde básicamente el elemento primario de medición genera una fuerza que se logra estabilizar con otra igual y opuesta producida por el transmisor, aunque estos movimientos son inapreciables.

Para la transmisión de flujo se empleo un transmisor de equilibrio de momentos, en donde el desequilibrio de fuerzas lo produce el caudal, generando un par al cual se opone un fuelle de realimentación llevando a un nuevo equilibrio que se traduce en una señal de salida del transmisor de presión de flujo.

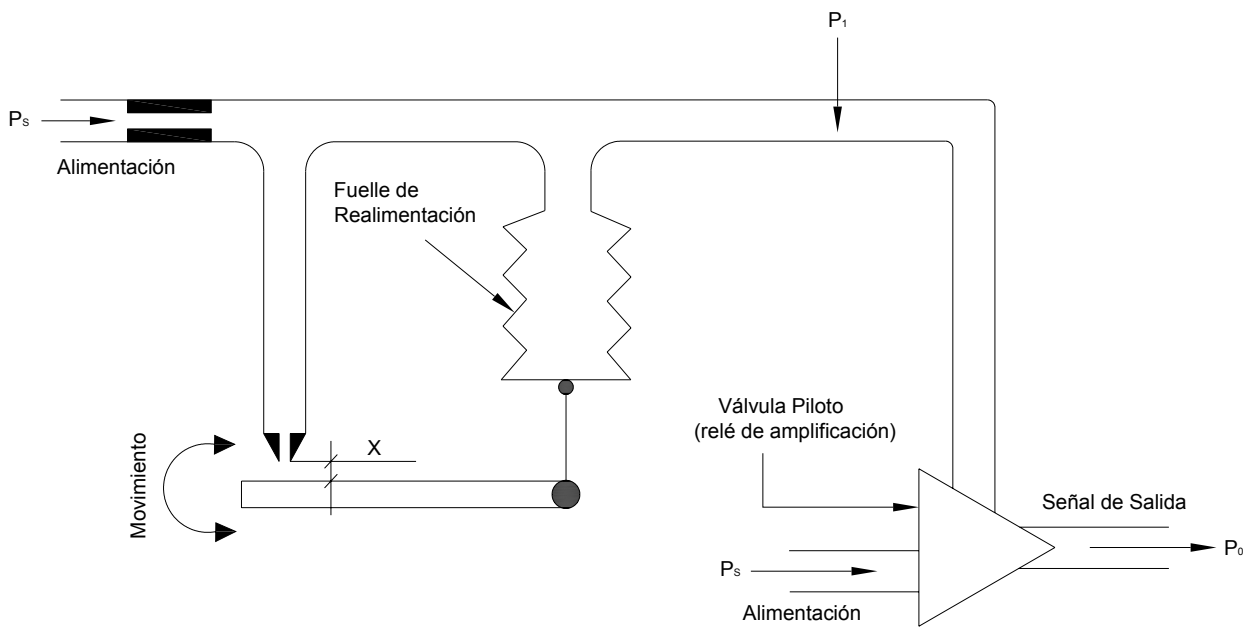


Fig. 1.4 Transmisor de equilibrio de movimientos.

### 1.3 Transmisores electrónicos

El transmisor electrónico utiliza el principio de equilibrio de fuerzas. Se caracteriza por una barra rígida apoyada en un punto sobre la cual actúan dos fuerzas en equilibrio:

- La fuerza ejercida por un elemento de medición mecánico, como es el tubo Bourdon por ejemplo.
- Una fuerza electromagnética procedente de una unidad magnética.

Cuando se desequilibra esta barra (ver fig. 1.5) se produce una variación relativa de la misma, excitando un detector de inductancia o un transformador diferencial. Un circuito de oscilación conectado con el detector, alimenta una unidad magnética, en donde se produce una fuerza que reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas, completando de esta forma un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de la variable del proceso.

Estos instrumentos presentan la desventaja de ser muy sensibles a vibraciones mecánicas, aunque en condiciones de funcionamiento normal poseen una precisión del orden aproximado de 0.5 % al 1 %.

### 1.3.1 Transmisor electrónico detector de posición de inductancia

El detector de posición de inductancia (fig. 1.5) está formado por dos piezas de ferrita, una en la barra de equilibrio de fuerzas y otra fijada rígidamente en el transmisor. Dentro contiene una bobina conectada a un circuito de oscilación (dispositivo electrónico que se emplea como amplificador de señal y modulador de la misma a una determinada frecuencia establecida por el circuito de inductancia). Al aumentar o disminuir el entrehierro, disminuye o aumenta respectivamente la inductancia en la bobina, lo que produce que la señal de salida del oscilador varíe (se module), produciendo una señal de 4-20 mA c.c. que a la vez alimenta a una unidad magnética para completar el círculo de realimentación, y reposicionar la barra.

Cuando existe una corriente que circula por un inductor y ésta aumenta o disminuye, aparecerá en el circuito una fem (fuerza electromotriz) autoinducida que se opone al cambio; de esta forma, si en un circuito la corriente aumenta de cero a máxima, el inductor responderá a esto generando una fuerza contraelectromotriz inducida. Bajo estas condiciones, en el circuito de la figura 1.5, la variación de corriente en el circuito produce una variación del campo magnético que induce una fuerza electromotriz dentro del mismo circuito.

La inductancia puede entenderse como una variación del cambio del flujo magnético con respecto al tiempo con relación a la variación del cambio de corriente con respecto al tiempo. La inductancia se expresa en Henrys. Se dice que un inductor determinado tiene una inductancia de un Henry (H) si una fem de un volt se induce por medio de una corriente que cambia con una rapidez de un amper por segundo; esto es:

$$1H = (1V)(A/s)$$

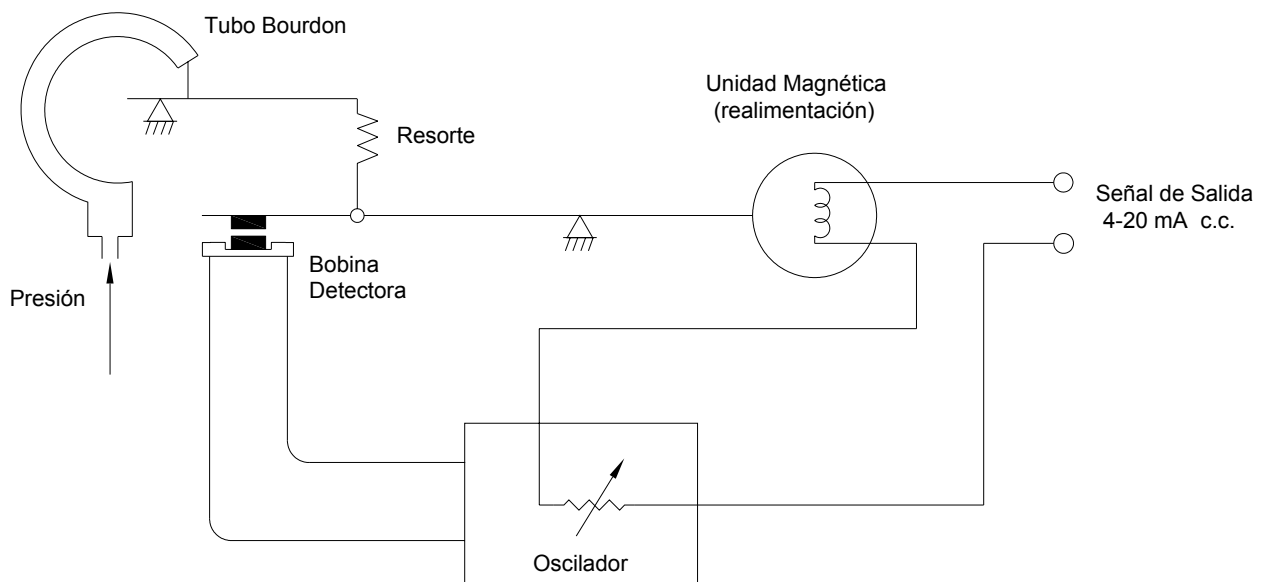


Fig. 1.5 Transmisor electrónico detector de posición de inductancia.

### 1.3.2 Transmisor electrónico tipo transformador diferencial

El transmisor electrónico de transformador diferencial (fig. 1.6), llamado LVDT (Linear Variable Differential Transformer), está construido con un núcleo magnético de tres o más polos bobinados. El bobinado central está conectado a una línea de alimentación y se denomina arrollamiento primario; los otros dos bobinados son idénticos, con el mismo número de espiras y en la misma disposición que el bobinado primario.

Al variar la presión, cambia por consecuencia la posición de la barra induciendo tensiones distintas en las dos bobinas; mayor en la bobina arrollada en el polo con mayor entrehierro y menor en la opuesta. De tal forma, que el transformador se cierra magnéticamente con la barra de equilibrio de fuerzas.

Las bobinas están conectadas en oposición y la señal de tensión diferencial producida es introducida en un amplificador que alimenta la unidad magnética de reposición de la barra de equilibrio.

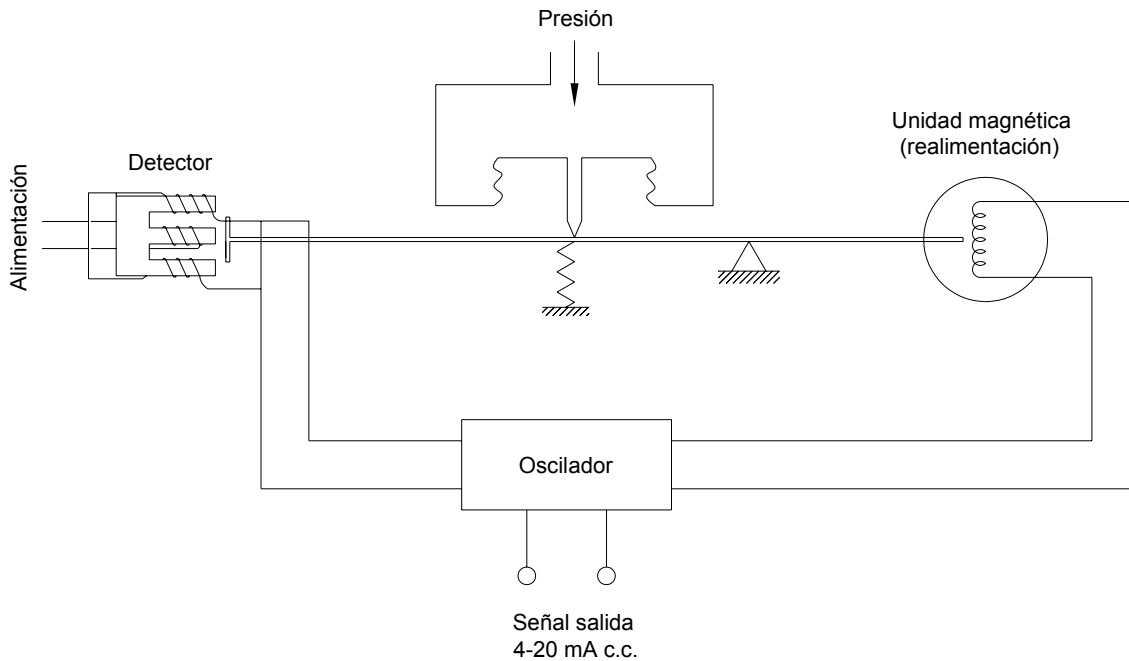


Fig. 1.6 Transmisor electrónico tipo transformador diferencial.



## 1.4 Transmisores digitales

La firma de productos Honeywell en el año de 1983 presentó en el mercado el primer transmisor digital inteligente (Smart Transmitter), el término “inteligente” es debido a que al elemento sensor se le añaden funciones adicionales a tan solo la medida de la variable, pues es el microprocesador el que dota de estas funciones al transmisor digital como se mostrara más adelante.

Existen dos tipos básicos de transmisor digital inteligente: el capacitivo y el de semiconductor. El capacitivo (fig. 1.7) se basa en la variación de capacidad en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La transmisión de presión del proceso se realiza a través de un fluido (aceite) que rellena el interior del condensador. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada en medio de las dos placas fijas. El desplazamiento del diafragma sensible es del orden de sólo 0.1mm como máximo. El amplificador electrónico transforma la variación de capacidad (capacitancia eléctrica) en señal analógica, después es convertida en digital para pasar al microprocesador, al salir de este es convertida a señal analógica de 4-20 mA c.c.

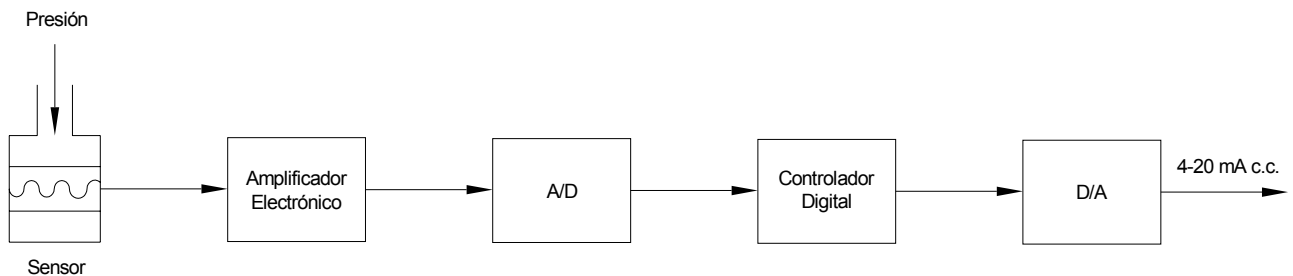


Fig. 1.7 Funcionamiento del transmisor digital del tipo capacitivo.

El otro tipo básico de transmisor es el de semiconductor (fig. 1.8), que esta construido por una película delgada de silicio en donde se encuentra un circuito de puente de Wheatstone. Un desequilibrio en el puente da lugar a una señal de salida de 4-20 mA c.c.

El transmisor de semiconductor aprovecha las propiedades eléctricas de los semiconductores al ser sometidos a tensiones. El diseño del semiconductor difundido es tal, que permite establecerse una zona sensible a los esfuerzos. Se comporta como un circuito dinámico de puente de Wheatstone. De esta forma, en una pastilla de silicio difundido, se encuentran embebidas las resistencias  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  y  $R_d$  del puente de Wheatstone.

En el puente de Wheatstone cuando no hay presión, las tensiones  $E_1$  y  $E_2$  son iguales y al aplicar la presión en el proceso  $R_b$  y  $R_c$  disminuyen su resistencia y  $R_a$  y  $R_d$  la aumentan, originando caídas de tensión distintas y creando una diferencia entre  $E_1$  y  $E_2$ , misma que se aplica a un amplificador de alta ganancia que controla un regulador de corriente variable.

Una corriente de 3-19 mA c.c. con 1 mA del puente produce una señal de salida de 4-20 mA c.c. La cual circula a través de una resistencia de realimentación  $R_{fb}$  y eleva  $E_1$  a una tensión equivalente a  $E_2$ , reequilibrando el puente.

Debido a que la caída de tensión producida a través de  $R_{fb}$  es proporcional a  $R_{2b}$ , esta resistencia fija el intervalo de medida (span) del transductor.

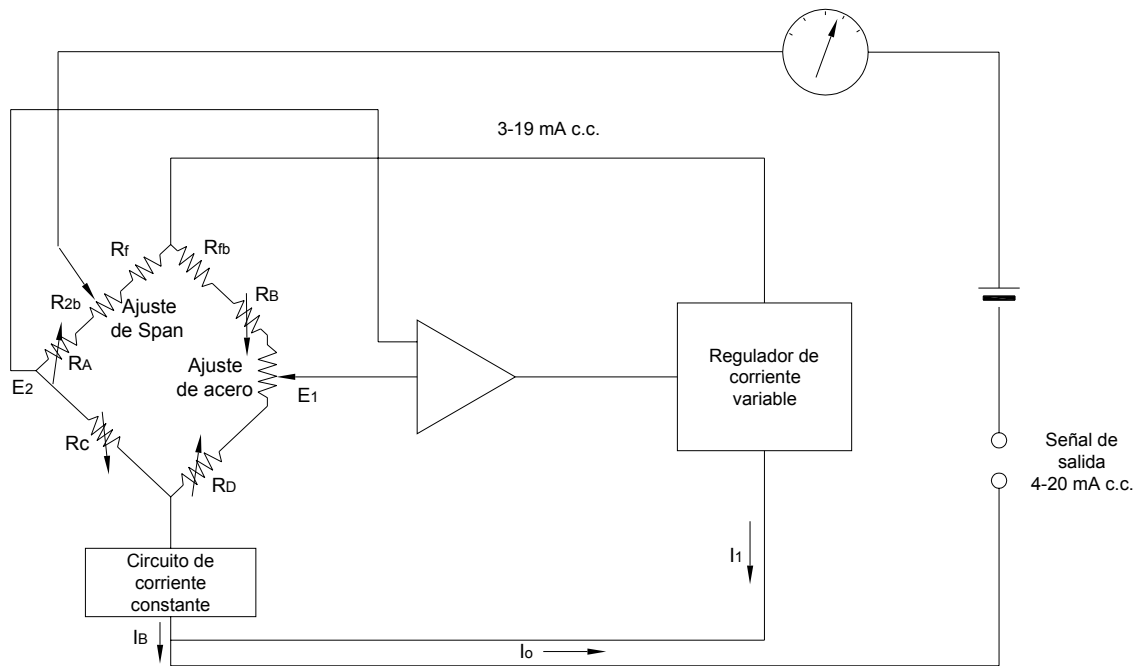


Fig. 1.8 Transmisor digital de puente de Wheatstone en silicio difundido.

Los transmisores tanto de flujo, nivel, presión y temperatura utilizan un suministro eléctrico de 24 volts c.d. y una salida de 4-20 mA c.c.; aunque también están los transmisores con salida digital directa, eliminando el uso de convertidores A/D (análogo-digital) del transmisor y el D/A (digital-analógico) del receptor.

El empleo del microprocesador logra la conversión de señal analógica a impulsos (señal digital) y calcula a través de datos preestablecidos en fábrica y almacenados en su memoria, un valor digital de salida que es transformado a señal analógica de 4-20 mA c.c. Con el uso de un comunicador portátil de teclado alfanumérico que puede conectarse en cualquier punto del cable de dos hilos entre el transmisor y el receptor, es posible configurar los parámetros del transmisor.

Las ventajas del transmisor digital son verdaderamente de resaltar sobre el transmisor electrónico analógico; su precisión en el lazo de control puede llegar a ser de alrededor de  $\pm 0.15\%$  o incluso de hasta el margen de  $\pm 0.075\%$ . Poseen un sistema de autodiagnóstico de sus partes internas electrónicas tal, que es posible que el transmisor por si mismo indique cuando existe un problema en el circuito, por lo que dará un informe de la naturaleza de este y a la vez, proporcionara la información necesaria para tomar las medidas adecuadas para la reparación de la falla o en definitiva la sustitución del instrumento.

El margen de medida o el rango también es mayor comparado con el electrónico analógico, pues debido a que el transmisor digital puede almacenar una gran cantidad de datos en una memoria conocida como PROM (Programmable Read Only Memory). Mediante un análisis de estos datos se consigue una relación “turndown”, que es la relación entre el nivel mínimo de la variable y el máximo medible, por lo que facilita ampliar el rango y, como consecuencia de esto, se logra reducir drásticamente el número de transmisores en “stock” (de existencia en almacén, de reserva en planta), pues se puede utilizar prácticamente un solo modelo para cubrir todos los diferentes rangos de medida de los transmisores que estaban en fabrica. En este punto, cabe hacer mención que entre más pequeño sea el campo de medida la precisión también se ira reduciendo, esto significa que el transmisor será menos preciso.

Empleando también los datos en la PROM y con la técnica “turndown” la calibración de estos instrumentos es sumamente sencilla; hasta antes de la aparición de los transmisores digitales el procedimiento de calibración y cambio de margen de medida era algo que debía realizarse en un taller de instrumentos, por lo cual también era necesario tener transmisores de repuesto para continuar con el proceso, tiempo en cual podían tener dificultades para la operación correcta del mismo.

Por el contrario, con el transmisor digital, bastará oprimir unas cuantas teclas desde una computadora en cuarto de control o, mediante una simple conexión en cualquier parte del alambrado del transmisor se conecta un comunicador portátil y se procede a la calibración. Mediante un cable de comunicaciones llamado RS-232 (nombre de la norma de transmisión de datos para modems y multiplexores RS-232) pueden conectarse uno o varios transmisores a una computadora, que con el software apropiado pueden configurar estos transmisores inteligentes. Esta configuración también puede realizarse con un comunicador portátil de teclado alfanumérico, que se puede conectar en un punto cualquiera del cable de dos hilos entre el transmisor y el receptor para poder leer los valores del proceso, configurar el transmisor, cambiar su campo de medida, diagnosticar averías, así como verificar la correcta comunicación entre los dispositivos (ver fig.1.9).

En el caso del transmisor digital con salida enteramente digital, este puede autocalibrarse, debido a que puede detectar cuando la variable medida se a salido del campo, por lo que simplemente ampliara su rango. Asimismo, la tecnología digital hoy día es tal, que los transmisores digitales con salida digital directa tienen la capacidad de conocer cuando el lazo de control PID no esta funcionando correctamente, detectando que parte del lazo esta fallando e indicando los lineamientos a seguir para su ajuste, o hasta incluso lo pueden corregir por si solos.

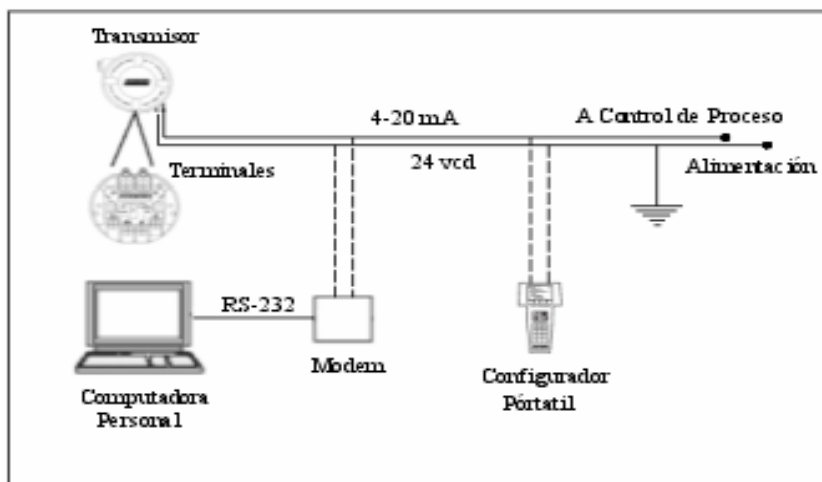


Fig. 1.9 Conexión de Computadora Personal y Configurador Portátil a Transmisor Inteligente.

En resumen, los transmisores digitales inteligentes son de dos tipos: el electrónico digital inteligente con señal de salida de 4-20 mA c.c. y el electrónico digital inteligente con señal de salida digital.

Los transmisores digitales con señal de salida de 4-20 mA c.c. presentan las siguientes ventajas sobre los electrónicos analógicos convencionales:

- a) Caracterización o linealización de la variable.
- b) Mejora la precisión al doble como mínimo (precisión del transmisor analógico convencional de hasta  $\pm 0.84\%$ , precisión del electrónico digital de hasta  $\pm 0.3\%$ ).
- c) Mejora la estabilidad en condiciones de trabajo diversas.
- d) Campos de medida más amplios.
- e) Mayor fiabilidad cuando la variable medida no cambia rápidamente.
- f) Bajo costo de mantenimiento.
- g) Calibración sin necesidad de desmontar.

Por su parte, el transmisor electrónico digital con salida digital ofrece las mismas ventajas que el electrónico digital con señal de salida 4-20 mA c.c. sobre el electrónico analógico, y más aún. Las ventajas que presenta el transmisor electrónico digital con señal de salida digital directa sobre el transmisor electrónico con señal de salida de 4-20 mA c.c. son las siguientes:

- a) Eliminación de convertidores A/D (analógico/digital) del transmisor y D/A (digital/analógico) del receptor (indicador, registrador o controlador).
- b) Precisión de hasta  $\pm 0.075\%$ .
- c) Menores desviaciones por variaciones en la temperatura ambiente de trabajo o por variaciones de tensión.
- d) Autodiagnóstico de funcionamiento del circuito (estado del instrumento).
- e) Reporte en línea de su desempeño.
- f) Alta capacidad de cálculo interno.
- g) Autocalibración y autoajuste del rango.
- h) Configuración usando información alfanumérica.
- i) Comunicación bidireccional desde el transmisor al sistema de control y del sistema de control al transmisor.

- j) Mayor velocidad al uso de variables múltiples y en la ejecución de cálculos (el transmisor digital inteligente con señal de salida de 4-20 mA c.c. pierde fiabilidad cuando la variable medida cambia rápidamente, por ejemplo la presión o el caudal, pues debido a la cantidad de cálculos que debía realizar el microprocesador, le impedía captar todos los valores de la variable, por lo que en esos casos era a veces mejor la utilización de un transmisor electrónico analógico convencional; con el transmisor digital de salida digital directa esto ya no es una inconveniencia).

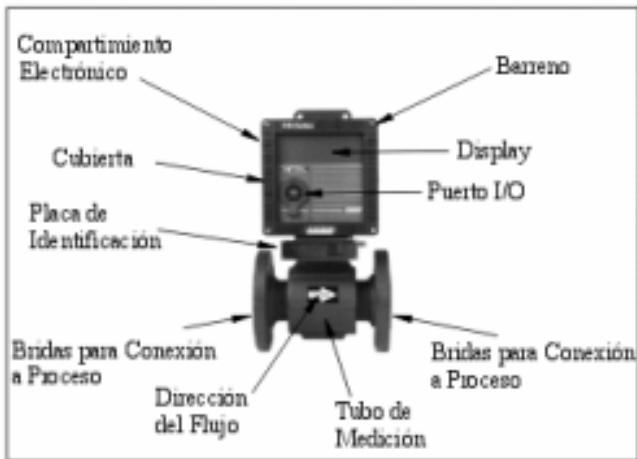
Por su parte, los transmisores digitales inteligentes con señal de salida de 4-20 mA c.c. pueden intercambiarse perfectamente con otros transmisores (de otras marcas) y no hay ningún problema. Sin embargo, la principal desventaja para el uso de transmisores digitales con señal de salida digital, son los protocolos de comunicación, pues cada fabricante tiene su propia señal protocolizada y aunque es posible la utilización de transmisores digitales de diferente protocolo de comunicación (empleando adaptadores apropiados) no es una práctica aconsejable, pues se pierde en rendimiento (performance del sistema) ya que ninguno de los transmisores ni el sistema de control podrán ser utilizados al 100% de su capacidad. Esto obliga a que aquellos que deseen emplear transmisores digitales con señal de salida digital compren no sólo todos los transmisores para la planta del mismo fabricante, si no también el sistema de control distribuido compatible, junto con todos los accesorios necesarios para la operación de este.

Los fabricantes aunque se han preocupado un poco por la falta de normalización en los protocolos de comunicación, pues cada día desarrollan sistemas más flexibles para que estos puedan tener interoperabilidad, en realidad por el momento, no es algo que les perjudique mucho, al contrario, con un manejo adecuado de su mercado pueden tener grandes beneficios económicos.

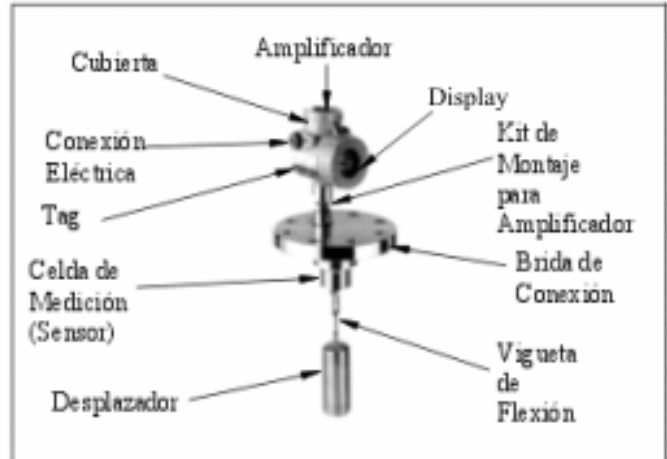
Es por ello que en la actualidad existe un comité internacional de normas IEC-65C que junto con los comités ISA SP-50, ISA SP-72 y EUROBOT tienen el propósito de investigar y desarrollar un estándar de comunicaciones. Por su parte, las firmas de instrumentos de control Emerson Process Management, Foxboro, Honeywell y Rousemount principalmente, tienen como objetivo estudiar y aplicar un lenguaje o protocolo de comunicaciones estándar para los sistemas de control distribuido, producto de ello se ha desarrollado una tecnología llamada "fieldbus". El protocolo de comunicación FIELDBUS FOUNDATION (protocolo enteramente digital basado en un "bus de campo") a logrado desplazar poco a poco al que durante muchos años fuera el estándar de comunicación para la transmisión analógica digital de 4-20 mA c.c., el protocolo HART (High Way-Addressable-Remote-Transducer) y también a demostrado ser mejor y más funcional que sus homólogos el MODBUS del Sensor Bus y el FIP (Factory Instrumentation Protocol) y PROFIBUS del Device Bus. Por lo que en breve, el protocolo de comunicación basado en un "bus de campo" FIELDBUS FOUNDATION por su aceptación en el mercado (debido a que disminuye costos de operación considerablemente) y su funcionalidad en la operación y control de procesos, esta en vías de desplazar por completo al analógico digital HART.

La figura 1.10 muestra algunos tipos de transmisores inteligentes analógicos-digitales con señal de salida 4-20 mA c.c., mientras que la tabla 1.1 presenta las características y una breve comparación de los transmisores neumáticos, electrónicos convencionales, electrónicos inteligentes con señal clásica de 4-20 mA c.c. y los electrónicos inteligentes digitales.

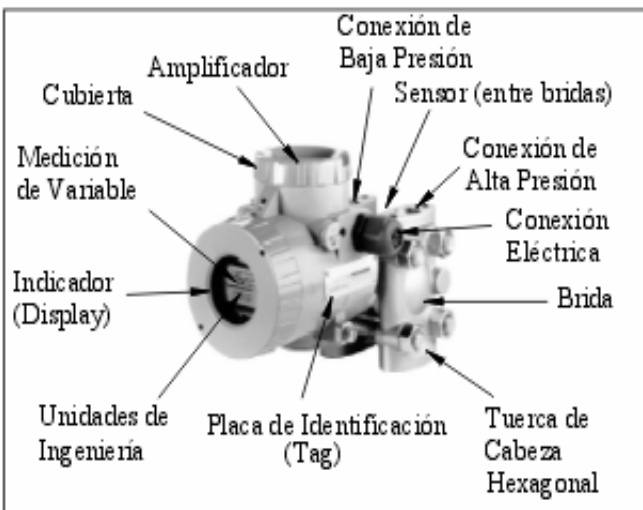
Para los transmisores inteligentes digitales con señal de salida digitalizada es prácticamente el mismo diseño de los analógicos-digitales, lo que cambia es la tarjeta lógica del microprocesador que en este caso sigue recibiendo los datos del sensor de la misma forma que el analógico-digital, sólo que esta señal ya no es convertida de D/A, si no que la señal de salida es solamente digital. En caso de que el lazo de control sea enteramente digital, la precisión será mucho mayor al eliminar el uso de convertidores A/D y D/A.



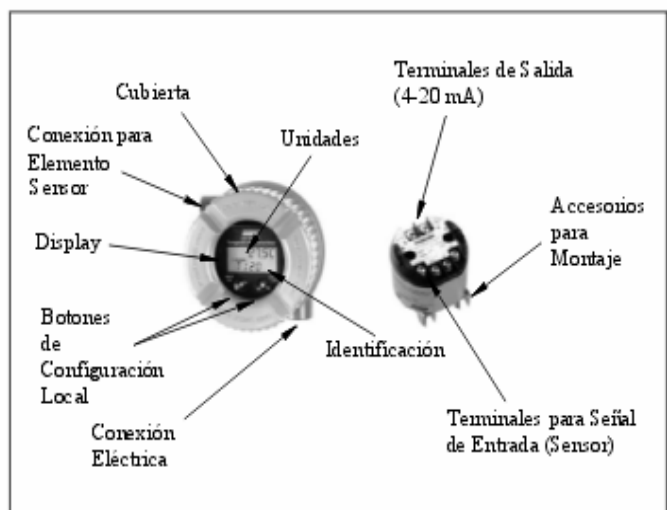
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1.10 Transmisor Electrónico Inteligente de Flujo Másico (a), Transmisor Electrónico Inteligente de Nivel tipo Desplazador (b), Transmisor Electrónico Inteligente de Presión Diferencial (c), Transmisor Electrónico Inteligente de Temperatura (d).

| Transmisor                                | Señal de Salida         | Ventajas   | Desventajas   |
|---|-------------------------|--|---|
| Neumático                                 | 3-15 psi<br>(0.2-1 bar) | -Rapidez.<br>-Sencillo.  | -Necesidad de aire limpio y seco.<br>-Mantenimiento caro.<br>-No guarda información.<br>-Limitación en distancias<br>-Sensible a vibraciones. |
| Electrónico Convencional                  | 4-20 mA c.c.            | -Rapidez   | -Sensible a vibraciones.<br>-No guarda información.   |
| Electrónico Inteligente Analógico Digital | 4-20 mA c.c.            | -Mayor precisión.<br>-Intercambiable.<br>-Estable, fiable.<br>-Campo de medida más amplio.<br>-Bajo costo de mantenimiento.<br>-Fácil calibración.<br>-Configuración y calibración mediante comunicador portátil.  | -Lento (para variables que cambian con mucha rapidez puede presentar problemas).  |
| Electrónico Inteligente Digital           | Digital                 | -Mayor precisión.<br>-Más estabilidad.<br>-Fiable.<br>-Autodiagnostico.<br>-Comunicación bidireccional.<br>-Configuración remota.<br>-Campo de medida más amplio.<br>-Bajo costo de mantenimiento.<br>-Menores desviaciones por variaciones en la temperatura ambiente y por variaciones en la tensión de alimentación.<br>-Autoajuste de campo de medida y calibración.<br>-No empleo de convertidores A/D y D/A.<br>-Reporte en línea de su estado.<br>-Autoajuste de lazo de control.<br>-Autocorrección de anomalías en su funcionamiento. | -Falta de normalización en las comunicaciones.<br><br>-No intercambiable con otras marcas.  |

Tabla 1.1 Características y comparación entre transmisores.

## 1.5 Comunicaciones entre instrumentos de proceso y sistemas de control

Las comunicaciones entre los instrumentos de proceso y el sistema de control se realizan con señales analógicas (neumáticas 3-15 psi), analógicas electrónicas (4-20 mA c.c.) analógica digital (señal protocolizada) y digital (basada en un “bus de campo”). La señal neumática fue la primera clase de señal que se uso, era adecuada porque en ese entonces no existían técnicas de seguridad industrial en atmósferas con peligro de explosión y la señal neumática no presenta ningún riesgo de explosión y es de fácil manejo e instalación. Aun y cuando los sistemas de control han evolucionado grandemente, la señal neumática no a dejado de existir, esta sigue siendo utilizada con gran eficacia, pues el 90% de las válvulas de control empleadas en la industria son operadas con señal neumática 3-15 psi.

Los perfeccionamientos en el campo de la electrónica evolucionaron a la par de las técnicas de seguridad en atmósferas peligrosas, lo cual dio lugar a la introducción de la instrumentación electrónica con la señal de 4-20 mA c.c., esta clase de señal (como se mostró anteriormente en la tabla de comparativa de transmisores) presenta ventajas considerables con respecto a la neumática, no obstante, el control de procesos era aun limitado y restrictivo, pues no era posible controlar todo un conjunto de transmisores a la vez y estos requerían de constante supervisión individual en campo para su calibración, configuración y mantenimiento, la descalibración y desconfiguración de uno de estos instrumentos representaba un problema serio para la operación adecuada y segura de la planta en cuestión, pues era necesario el desmontaje del instrumento para su reparación, con lo que se perdía tiempo en estabilizar la planta nuevamente por lo que el control del proceso no era del todo óptimo ni seguro. Además de esto, el rango de operación no era amplio para un solo modelo de transmisor, lo que suponía la utilización de diferentes transmisores para cada rango específico. Estas desventajas se hicieron notorias no sólo a nivel operación de la planta, si no también en rentabilidad.

La necesidad de obtener productos con cada vez mayor calidad y en gran escala dio lugar a un mayor desarrollo en la automatización de procesos industriales y este, nuevamente se vio apoyado en el desarrollo de la electrónica. Se observo que para tener una mayor productividad obteniendo un producto con calidad tal que fuera competente en el mercado a través de un proceso rentable, era necesario un control más preciso, más a fondo, con mayor conocimiento de causa mediante un seguimiento detallado, individual y global de los instrumentos de control.

Es entonces cuando se recurre a la electrónica, que había creado el microprocesador, el cual podía realizar muchos cálculos y almacenar grandes cantidades de información. Lo siguiente fue desarrollar transmisores que funcionaran en base a un microprocesador, con lo que la señal de estos cambiaba ahora a la forma analógico-digital; pero para que pudieran ser manejados a la vez en un conjunto considerable y que esto pudiera hacerse desde salas de operación con computadoras personales que mostraran las condiciones del proceso detalladamente y que pudiera realizarse modificaciones pertinentes al mismo, era necesario un lenguaje de programación adecuado que se llamaría protocolo de comunicaciones. El canal de comunicaciones sería un simple par de hilos utilizando la misma señal de 4-20 mA c.c.

Desde luego que esto no ocurrió repentinamente y a gran escala, se comenzó empleando una sola computadora que controlara un conjunto de transmisores mediante algoritmos de control, después se utilizaron dos o tres dependiendo del punto crítico que se controlaría, donde una realizaba las funciones de control y la otra (s) supervisaban su desempeño y estaban listas para entrar en operación por si la primera fallaba, sin embargo, dejar la operación del proceso en unas cuantas computadoras era un riesgo muy grande, pues aun y cuando los perfeccionamientos en la electrónica eran considerables siempre estaba presente la posibilidad de fallo de algunos de los componentes electrónicos, por lo que la solución fue la implementación



de una técnica que empleara no una ni unas cuantas computadoras para la operación del proceso, si no varias computadoras para el control de un número específico de variables, por lo que el riesgo estaba entonces “distribuido”, de ahí que a este sistema se le llamo Sistema de Control Distribuido y poseía las características de manejar grandes volúmenes de información, era capaz de implementar cualquier algoritmo de control hasta entonces desarrollado, la adquisición (entrada) de los datos desde campo y la respuesta (salida) a las válvulas de control era en “tiempo real” (esto es, con reloj en mano), empleaba a la vez varios monitores que registraban en pantalla al operador las variables controladas, las alarmas, etc, sin que esto repercutiera en la operación de la planta y al mismo tiempo permitía modificar las características de control de las variables de proceso; también permitía la configuración y el diagnostico de los transmisores en campo conectando en cualquier parte del par de hilos un configurador portátil alfanumérico.

Aunque se desarrollaron varios lenguajes de programación para la operación de estos sistemas, no cabe la menor duda de que el más importante por su nivel de desarrollo y eficacia, es el protocolo HART (fig. 1.11). El protocolo HART desarrollado inicialmente por Rosemount Inc., agrupa la señal digital sobre la analógica clásica de 4-20 mA c.c. La señal digital usa dos frecuencias individuales, 1200 y 2200 Hz, representando los dígitos 1 y 0 (el paso o no de una señal a través de un conductor) y formando una onda senoidal que se superpone sobre el lazo de corriente de 4-20 mA c.c. y es enviada secuencialmente a través de un par de hilos.

El protocolo HART soporta hasta 256 variables, los transmisores pueden comunicarse entre si y a la vez pueden conectarse hasta con 15 dispositivos intermedios de control como son los PLC (Controladores Lógicos Programables) o computadoras personales, esto desde luego es flexible a expandirse a un número mayor. Este protocolo de comunicación es bastante confiable y actualmente esta en uso en muchas plantas, aunque esta en camino de ser sustituido por otro protocolo de comunicación de alta tecnología llamada “fieldbus”.

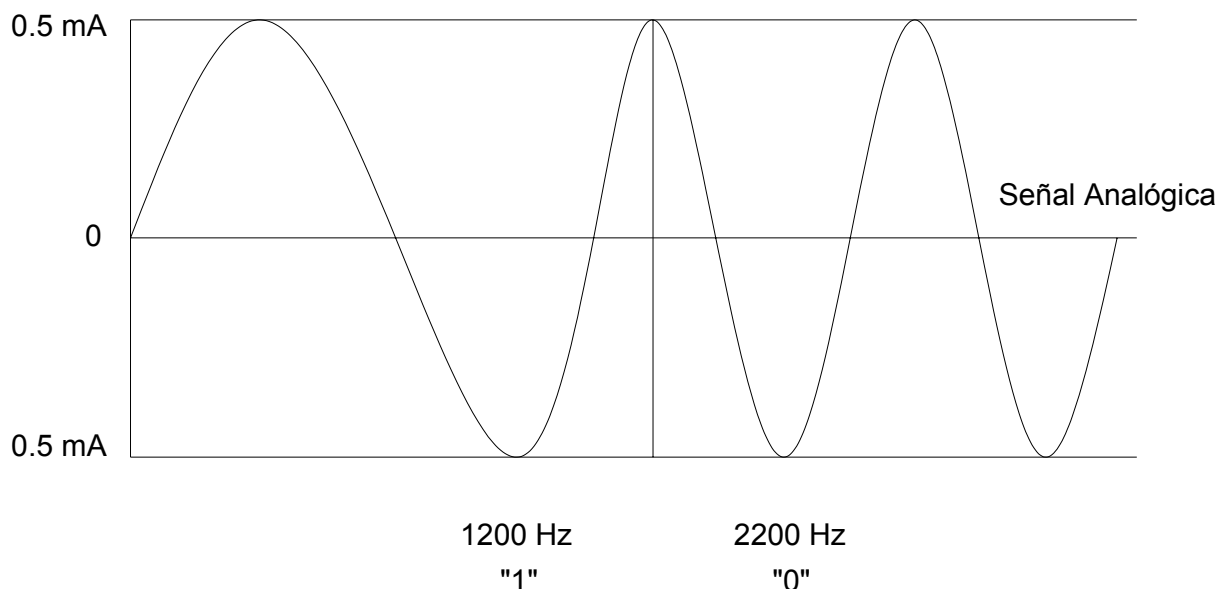


Fig. 1.11 Protocolo HART.

La tecnología “fieldbus” o “bus de campo” es un enlace de comunicación digital, bidireccional y multipunto entre dispositivos inteligentes de campo y sistemas de automatización. Existe tres tipos de bus: el SENSOR BUS, el DEVICEBUS y el FIELDBUS, el concepto de “bus” implica que en vez de enviar una señal por dispositivo en un par de hilos como es en el protocolo HART, el “bus” agrupa un conjunto de estas y las envía en un solo canal de comunicación que puede ser el mismo par de hilos que utiliza la instrumentación con señal clásica de 4-20 mA c.c.

El primer bus de campo utilizado y que resulto efectivo fue el MODBUS, este se caracterizaba por tener básicamente dos niveles de arquitectura interna, el primero es físico y especifica las condiciones del medio de transmisión, las características eléctricas, mecánicas, funcionales y la codificación de datos. La segunda es a nivel de enlace, este define el enlace lógico, el control de flujo de errores, la sincronización de la transmisión y el control de acceso. La principal limitación de esta tecnología es que su diseño estaba sólo a nivel de control lógico, no a nivel de control de procesos, es decir no era suficiente para implementarse en un sistema grande como es el control de procesos, por lo que actualmente es considerado un sistema que emplea dispositivos simples.

Debido a que la investigación en esta clase de tecnología fue profundizándose, se logro desarrollar un protocolo que tuviera un nivel adicional de arquitectura y no solamente fuera físico y de enlace, si no también de aplicación que contuviera los servicios y regulara la transferencia de mensajes entre el usuario y los diferentes instrumentos conectados al sistema de control, este protocolo se le llamo FIP (Factory Instrumentation Protocol) y utiliza sistemas de comunicación sincronizadas en tiempo y que garantiza una comunicación rápida en el control de procesos.

Posteriormente a este protocolo, se logro desarrollar el protocolo PROFIBUS que poseía también el nivel de arquitectura de aplicación FPI, sólo que el PROFIBUS se desarrollo un poco más e intento establecer comunicación no solo entre dispositivos de campo en un bus, si no comunicación entre los diferentes bus.

Las investigaciones y el desarrollo tecnológico del bus del sensor (Sensorbus) y el bus del dispositivo (Devicebus) permitieron que naciera el FIELBUS (Bus de campo). En el año de 1994 se creo la Fundación Fielbus (Fielbus Foundation) y agrupaba a las organizaciones World FIP (del protocolo FIP) y ISP (Interoperable Systems Project) del protocolo PROFIBUS. Esta organización fue creada con el propósito de definir un solo Fielbus internacional, abierto e interoperable conforme a las normas IEC (Comisión Internacional de Electrónica), ISA (Sociedad Americana de Instrumentación) y según los protocolos Europeos del World FIP y la ISP.

La tecnología Fielbus Foundation emplea dispositivos complejos y especifica dos estándares de capa física: la H1 y la HSE. La H1 es un fielbus de velocidad “baja” diseñado para conexión de dispositivos de campo. En un segmento H1 pueden canalizarse o “colgarse” hasta 16 de estos dispositivos, su velocidad es de 31.25 kbit/s, puede usar los mismos tipos de cable que la instrumentación de 4-20 mA c.c. y es posible su uso con Seguridad Intrínseca (técnica de seguridad que evita que el potencial eléctrico disponible en áreas clasificadas como peligrosas sea lo suficientemente bajo, tal que, no sea posible la ignición de los gases, vapores, o polvos potencialmente explosivos, presentes en las condiciones normales de operación). La HSE es un fielbus de alta velocidad usado principalmente para enlazar entre sí segmentos H1 y transferencia de información entre sistemas, esta basado en Ethernet a 100 Mhz y sólo permite comunicación entre Host (segmentos H1, segmentos de un bus), y no puede energizar dispositivos en campo.

El diseño de estas dos capas físicas permite que el Fielbus Foundation sea Interoperable entre dispositivos y del dispositivo al Host y a la vez puede utilizar productos de diferentes fabricantes (siempre y cuando sean en base a Fielbus Foundation); permite también la comunicación digital bidireccional y multipunto, con lo que los instrumentos de campo se vuelven servidores inteligentes de datos.

El Fieldbus Foundation es de fácil instalación, el cable y los materiales de instalación son de bajo costo, la forma de alambrear es esencialmente la misma que con la señal 4-20 mA c.c., es un sistema intrínsecamente seguro e interoperable entre los proveedores de Fieldbus.

La implementación de la tecnología Fieldbus Foundation representa además una reducción en el costo del alambrado del 20% al 80% con mano de obra incluida, reduce el proceso de ordenamiento (el empleo de gabinetes en cuarto de control) y reduce hasta en un 65% la utilización de barreras de seguridad intrínseca.

Sumado a esto, el protocolo Fieldbus Foundation es el sistema más eficaz para poner los dispositivos en línea más rápido y utiliza la información de los instrumentos inteligentes para predecir las fallas del equipo antes de que estas ocurran.

Por su funcionalidad, su fácil instalación y utilización, por su interoperabilidad y por reducir considerablemente costos, el protocolo de comunicaciones Filedbus Foundation esta muy cercano a ser el protocolo estándar de comunicaciones digital universal, utilizando tecnología de punta que desplazara sin lugar a dudas a la señal analógica-digital HART.

La figura 1.12 muestra un arreglo típico para protocolo Fieldbus Foundation, mientras que la figura 1.13 presenta una gráfica donde se observa la forma en como han ido evolucionando las señales de control, desde los controlados neumáticos hasta el sistema de control digital Fieldbus.

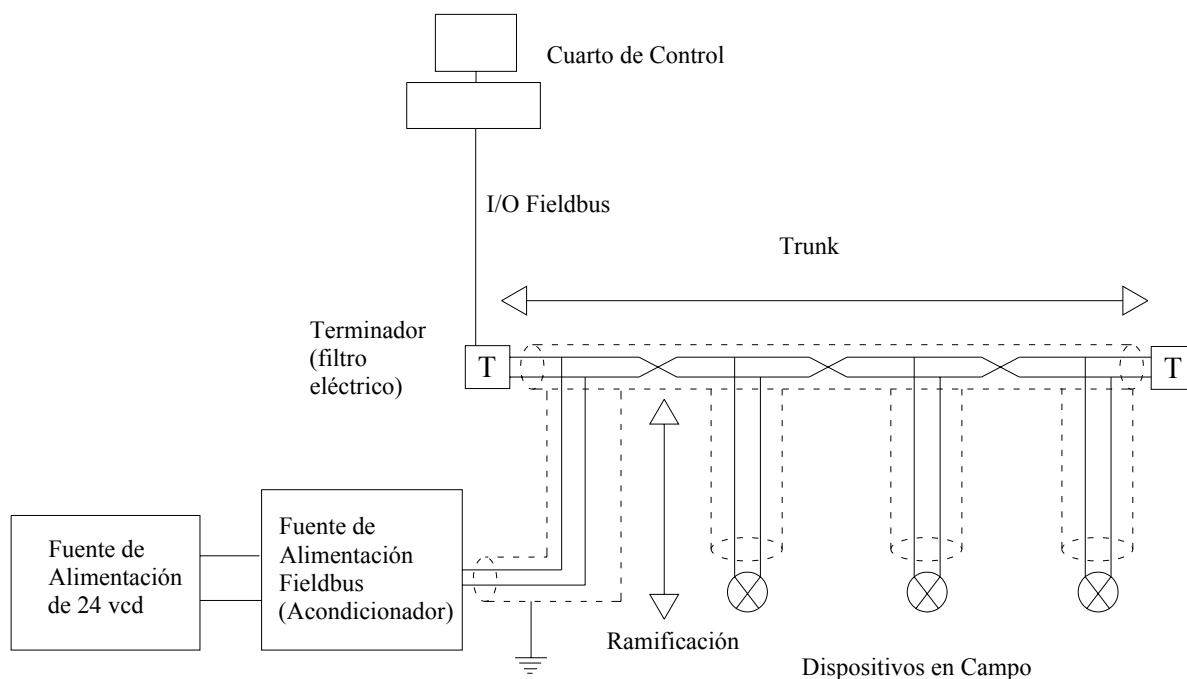


Fig. 1.12 Arreglo de un Segmento Fieldbus característico.

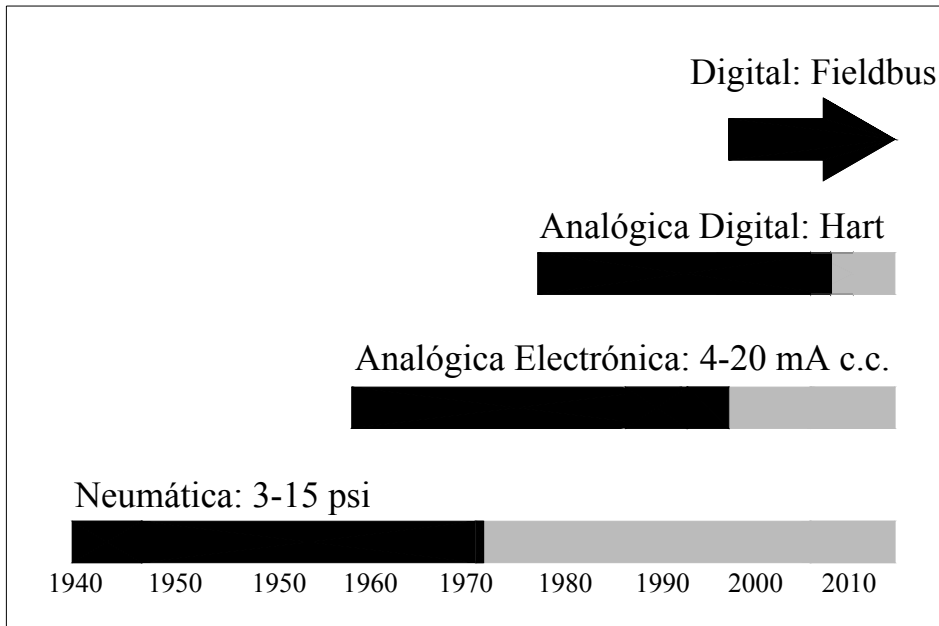


Fig.1.13 Evolución de las Señales de Control.

# Medición de Flujo, Nivel, Presión, Temperatura y Otras Variables

## 2.1 Medición de Flujo

Un elemento medidor de caudal es un dispositivo que sirve para determinar la cantidad de fluido que circula por una conducción por unidad de tiempo. Este valor se puede expresar en unidades de volumen o de masa.

La medición puede obedecer a distintos fines: Información, control automatizado de un proceso, operaciones de venta del producto, etc. Para cubrir estos fines existen en el mercado una gran variedad de dispositivos cuyo funcionamiento obedece a distintos principios; cada uno de ellos tiene una serie de ventajas y limitaciones que lo hacen más o menos recomendable para una aplicación determinada en función del fin que se persiga.

Actualmente, al menos un 75% de los medidores industriales de flujo en uso, son dispositivos de presión diferencial, siendo el más popular la placa de orificio.

A continuación, se describen en forma general los tipos de medidores más importantes, cada uno de ellos funcionan bajo distintos principios de operación y, como ya se mencionó, su elección dependerá de las características particulares de la aplicación para la cual es requerido. Los medidores son los siguientes:

- Medidores de flujo de presión diferencial
- Medidor de flujo de área variable
- Medidores de flujo tipo desplazamiento positivo
- Medidores de engranajes
- Medidor de flujo de turbina
- Medidor de caudal electromagnético
- Medición por impacto
- Medición por producción de torbellinos
- Medición por ultrasonidos
- Medición en canales abiertos

### Medidores de flujo de presión diferencial

En un medidor de flujo de presión diferencial el flujo se calcula mediante la medición de la caída de presión ocasionada por obstrucciones aplicadas al flujo. Los medidores de presión diferencial se basan en la ecuación de Bernoulli en donde la caída de presión y la consecuente señal de medición son una función del cuadrado de la velocidad de flujo.

Los tipos más comunes de medidores de presión diferencial son las siguientes:

- Placa de orificio
- Tubo Venturi
- Tobera
- Tubo Pitot

### Placa de orificio

La placa de orificio (fig. 2.1) consiste en una placa perforada que se instala en la tubería. La velocidad del flujo se mide mediante la diferencia en la presión encontrada aguas arriba y aguas abajo de la sección parcialmente estrechada de la tubería.

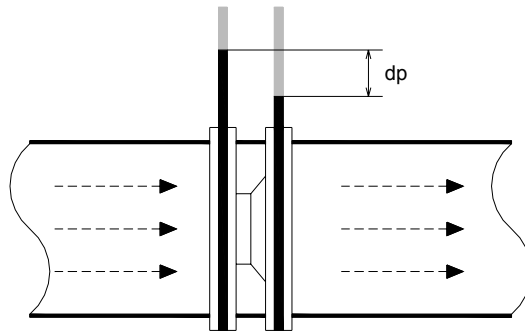


Fig. 2.1 Placa de orificio.

El orificio de la placa, como se muestra en la figura 2.2, puede ser: concéntrico, excéntrico y segmental con canto vivo, o de orificio en cuarto de círculo. Con el fin de evitar arrastres de sólidos o gases que pueda llevar el fluido, la placa incorpora, normalmente, un pequeño orificio de purga.

Las placas de orificio son sencillas, baratas y se pueden encontrar para casi cualquier aplicación y en cualquier material.

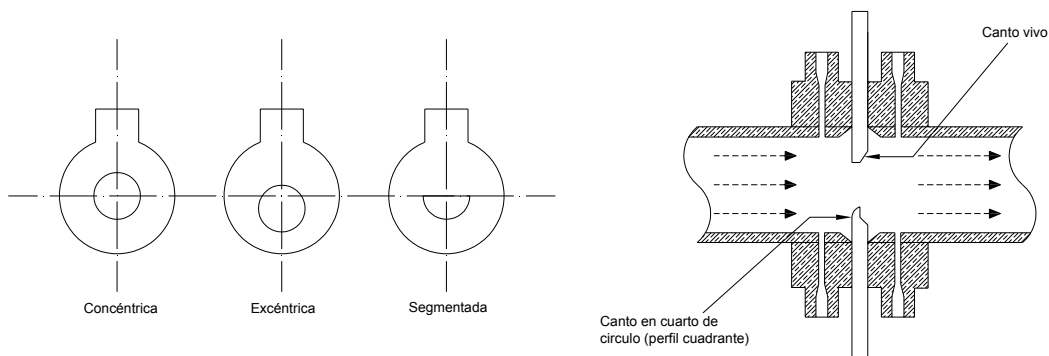


Fig. 2.2 Tipos comunes de placa de orificio.

## Tubo Venturi

Debido a su simplicidad, el tubo Venturi (cuyo diseño se basa en el efecto Venturi, el cual es el fenómeno que se produce en una canalización horizontal y de sección variable por la que circula un fluido incompresible, sin viscosidad y si la circulación se lleva a cabo en régimen permanente; su descubridor fue el físico italiano del siglo XIX, Giovanni Battista Venturi) se utiliza frecuentemente en aquellas aplicaciones en donde es necesario tener menores caídas de presión que aquellas que proporciona la placa de orificio.

En el tubo Venturi (fig. 2.3) la velocidad del fluido se mide mediante la reducción del área transversal a la dirección del flujo, generando una diferencia de presión. Después del área contraída el fluido pasa a través de una sección de salida en la cual cerca del 80 % de la presión se recupera.

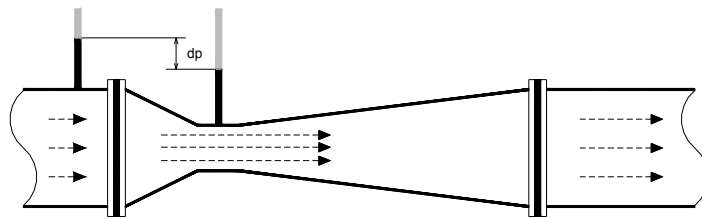


Fig. 2.3 Tubo Venturi.

## Tobera

Las toberas de flujo (fig. 2.4) se usan frecuentemente como elementos de medición para flujo de aire y de gases.

La pérdida de presión provocada por una tobera está muy cercana a la placa de orificio por lo que en su selección no deberá ser considerada esta como una ventaja sobre la placa. Sus tomas de presión se tienen que localizar en la tubería.

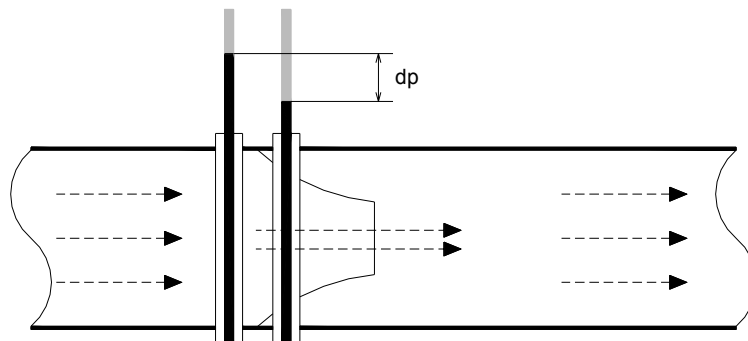


Fig. 2.4 Tobera de flujo.

## Tubo Pitot

Es uno de los medidores más exactos para medir la velocidad de un fluido dentro de una tubería. El equipo consta de un tubo cuya abertura está dirigida aguas arriba, de modo que el fluido penetre dentro de ésta y suba hasta que la presión aumente lo suficiente dentro del mismo y equilibre el impacto producido por la velocidad. El tubo de Pitot (llamado de esta forma en honor a su inventor Henri Pitot, físico e ingeniero naval francés del siglo XVIII) mostrado en la figura 2.5, mide las presiones dinámicas y con ésta se puede encontrar la velocidad del fluido.

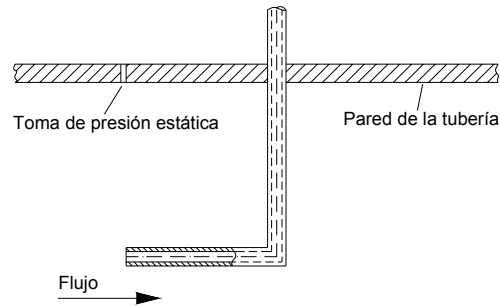


Fig. 2.5 Tubo Pitot.

## Medidor de flujo de área variable

### Rotámetro

Es un medidor de caudal en tuberías de área variable, de caída de presión constante. El Rotámetro (fig. 2.6) consiste de un flotador (indicador) que se mueve libremente dentro de un tubo vertical ligeramente cónico, con el extremo angosto hacia abajo. El fluido entra por la parte inferior del tubo y hace que el flotador suba hasta que el área anular entre él y la pared del tubo sea tal, que la caída de presión de este estrechamiento sea lo suficientemente para equilibrar el peso del flotador. El tubo es de vidrio y lleva grabado una escala lineal, sobre la cual la posición del flotador indica el gasto o caudal.

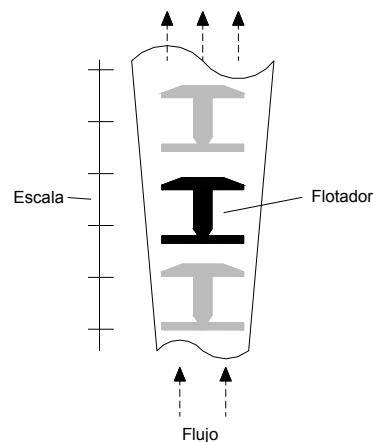


Fig. 2.6 Rotámetro.



## Medidores de flujo tipo desplazamiento positivo

Los medidores de desplazamiento positivo miden la cantidad de fluido que circula por un conducto, dividiendo el flujo en volúmenes separados y sumando los volúmenes que pasan a través del medidor.

En cada medidor, se pueden destacar tres componentes comunes:

- Cámara, que se encuentra llena de fluido.
- Desplazador, que, bajo la acción del fluido circulando, transfiere el fluido desde el final de una cámara a la siguiente.
- Mecanismo (indicador o registrador), conectado al desplazador, que cuenta el número de veces que el desplazador se mueve de una parte a otra en la cámara de trabajo.

En principio, los medidores de desplazamiento positivo para gases deberían ser similares a los utilizados para líquidos, sin embargo, en la práctica hay una diferencia importante. La energía de un fluido en movimiento es proporcional a su densidad, lo que significa que un gas no puede suministrar con facilidad la energía suficiente para hacer funcionar un medidor con una mecánica compleja. Por consiguiente, los medidores de desplazamiento positivo para gases tienen que tener una baja resistencia a la fricción.

Dentro de los diferentes tipos de medidores para líquidos los siguientes son los más comunes:

- Medidores de tipo pistón
- Medidores de paletas deslizantes

### Medidores de tipo pistón

Los medidores de tipo pistón se utilizan, habitualmente, para medidas precisas de pequeños caudales, siendo una de sus aplicaciones en unidades de bombeo de distribución de petróleo. En la figura 2.7 se aprecia una sección transversal de un medidor de pistón oscilante mostrando las cuatro etapas de su ciclo de funcionamiento.

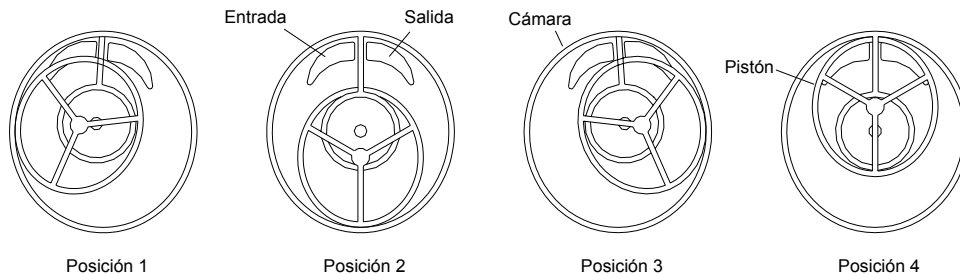


Fig. 2.7 Etapas de un medidor tipo pistón.

El pistón, cuando está en funcionamiento, oscila alrededor de un puente divisor, que separa la entrada de la salida de líquido. Al comienzo de un ciclo el líquido entra al medidor a través de la puerta de entrada A, en la posición 1, forzando al pistón a moverse alrededor del cilindro en la dirección mostrada en la figura, hasta que el líquido delante del pistón es forzado a salir a través de la puerta de salida B, en la posición 4, quedando el dispositivo listo para comenzar otro ciclo.

### Medidores de paletas deslizantes

Los medidores de paletas deslizantes son de costo elevado y se usan para medir líquidos, siendo instalados, generalmente, en camiones cisternas para la distribución de combustible para la calefacción.

En la figura 2.8 se muestra un medidor de paletas deslizantes, que consta de un rotor con unas paletas, dispuestas en parejas opuestas, que se pueden deslizar libremente hacia adentro y hacia afuera de su alojamiento. Mediante esta rotación el líquido se transfiere desde la entrada a la salida a través del espacio entre las paletas. Como éste es el único camino para el paso del líquido desde la entrada a la salida, contando el número de revoluciones del rotor, puede determinarse la cantidad de líquido que ha pasado.

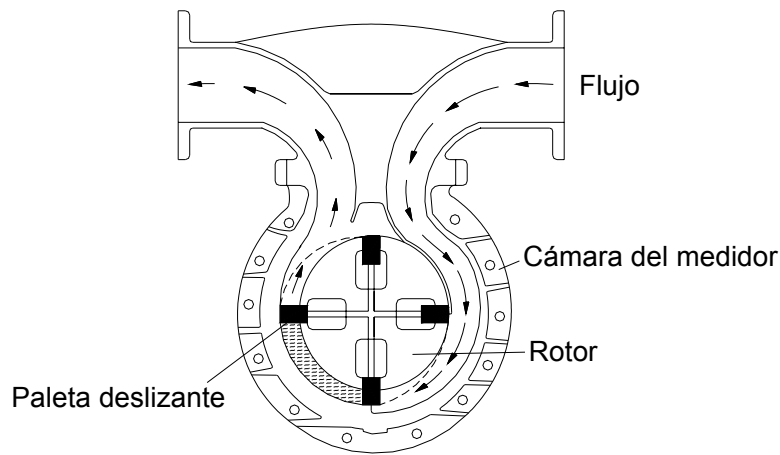


Fig. 2.8 Medidor de paletas deslizantes.

### Medidores de engranajes

Los medidores de engranajes encuentran aplicaciones para un amplio margen de clases de líquidos y condiciones de funcionamiento, aunque la precisión de la medida no es tan elevada.

Entre los más importantes medidores de engranajes se pueden destacar los siguientes:

- Medidores de rueda oval
- Medidores helicoidales

## Medidores de rueda oval

El medidor de rueda oval, que se muestra en la figura dispone de dos ruedas ovales que engranan entre sí y tienen un movimiento de giro debido a la presión diferencial creada por el flujo de líquido. La acción del líquido actúa de forma alternativa sobre cada una de las ruedas, dando lugar a un giro suave de un par prácticamente constante (ver fig. 2.9). Tanto la cámara de medida como las ruedas están mecanizadas con gran precisión, con el fin de conseguir que el deslizamiento entre ellas se produzca con el mínimo rozamiento, sin que se formen bolsas o espacios muertos y desplazando la misma cantidad de líquido en cada rotación. La principal ventaja de estos medidores es que la medida realizada es prácticamente independiente de variaciones en la densidad y en la viscosidad del líquido.

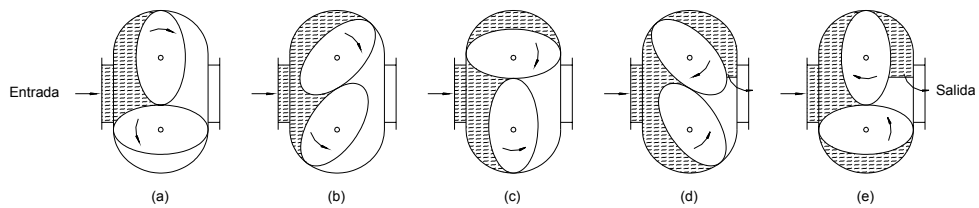


Fig. 2.9 Etapas de funcionamiento de un medidor de flujo tipo rueda oval.

## Medidores helicoidales

El funcionamiento es similar al de la rueda oval, una seria desventaja de los medidores helicoidales (ver fig. 2.10), está en la complejidad de sus mecanismos y engranajes y en los ajustes tan extremos que deben tener cada una de sus piezas. Esto demanda una gran atención en su mantenimiento y una gran limpieza del fluido a medir. Asimismo, su costo, dimensiones y peso en tamaños grandes hacen muy difícil su recomendación.

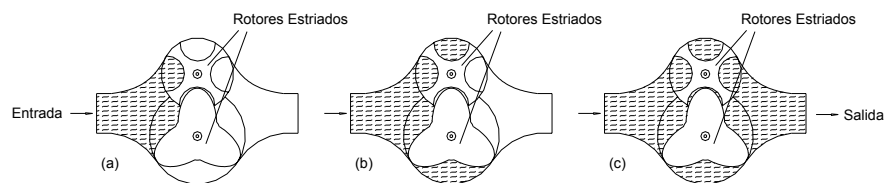


Fig. 2.10 Medidor de flujo tipo helicoidal (etapas).

## Medidor de flujo de turbina

Los medidores de flujo de turbina para gas y para líquido funcionan bajo el mismo principio. La figura 2.11 muestra la sección transversal de un medidor de turbina típico para líquidos. Consta de una longitud de tubería en el centro de la cual hay un rotor de paletas múltiple, montado sobre cojinetes, para que

pueda girar con facilidad, y soportado aguas arriba y aguas abajo por un dispositivo de centrado tipo cruceta que, habitualmente, incorpora un enderezador de la vena fluida. La energía cinética del fluido circulando hace girar el rotor con una velocidad angular que, en el margen lineal del medidor, es proporcional a la velocidad media axial del fluido y, por tanto, al caudal volumétrico.

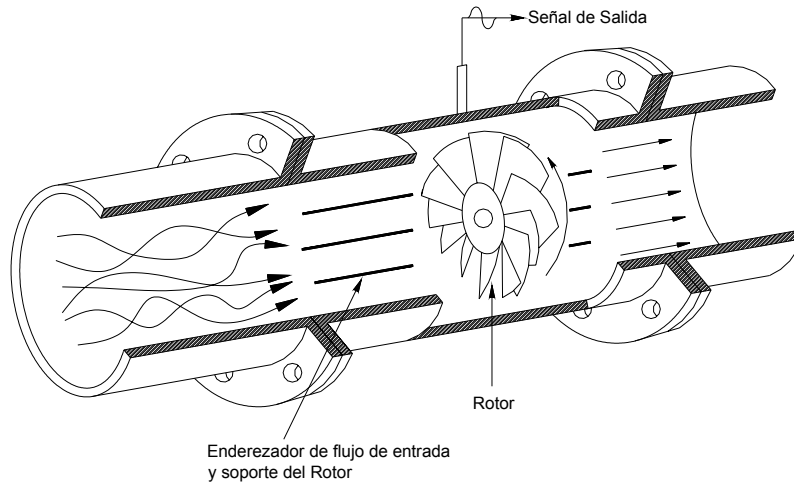


Fig. 2.11 Medidor de flujo de turbina.

### Medidor de caudal electromagnético

El medidor de caudal electromagnético utiliza el mismo principio básico que el electrogenerador, es decir, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se genera una fuerza electromotriz en el conductor, siendo su magnitud directamente proporcional a la velocidad media del conductor en movimiento. Si el conductor es una sección de un líquido conductor circulando por un tubo aislado eléctricamente, a través de un campo magnético y se montan los electrodos diametralmente opuestos en la pared de la tubería, tal como se muestra en la figura 2.12, la fuerza electromotriz generada a través de los electrodos es directamente proporcional a la velocidad.

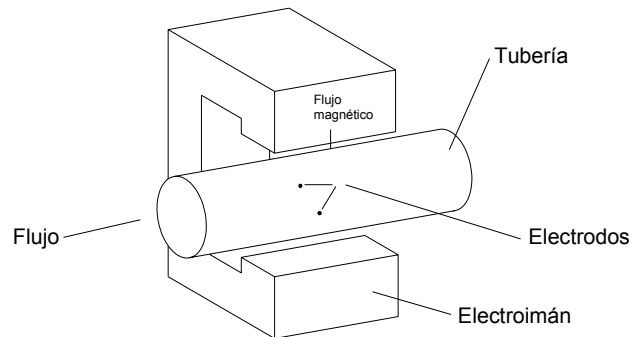


Fig. 2.12 Medidor de flujo tipo electromagnético.

## Medición por impacto

La medición por impacto (fig. 2.13) se efectúa introduciendo en el seno del fluido a medir una paleta que puede desplazarse en la dirección de la corriente. La fuerza que ejerce el fluido en movimiento sobre esta paleta, la desplaza en mayor o menor grado en función del caudal; por lo tanto, la medición de este desplazamiento será proporcional al caudal que circula.

Aunque este dispositivo se puede emplear con cualquier fluido, su utilización está prácticamente limitada a la medición de líquidos extremadamente viscosos o de alto punto de fusión: asfaltos, resinas, azufre fundido, melazas, etc.

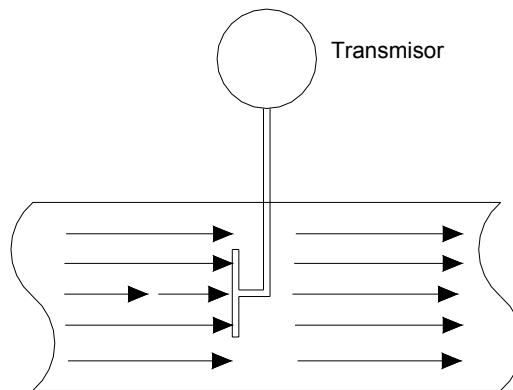


Fig. 2.13 Medidor de flujo por impacto.

## Medición por producción de torbellinos

Cuando un fluido en movimiento se encuentra en su camino con un obstáculo, las líneas de flujo intentan seguir el contorno de éste. Cuando el cuerpo no tiene un contorno aerodinámico el fluido no se puede adaptar a su forma y, entonces, se forman torbellinos aguas abajo del cuerpo en la zona de menor presión. Estos torbellinos se desprenden alternativamente de ambos lados; la frecuencia con que se desprenden de un lado u otro resulta ser proporcional a la velocidad del fluido.

La velocidad en ambos lados del obstáculo nunca es la misma; en efecto, cuando se desprende un torbellino, la velocidad del fluido aumenta en ese punto y como consecuencia disminuye la presión; en el lado opuesto ocurre lo contrario, por lo que en todo momento existe una diferencia de presiones a ambos lados del obstáculo, cuyo valor cambia con una frecuencia idéntica a la del momento del desprendimiento de los torbellinos.

Midiendo las variaciones de presión o las variaciones de velocidad del fluido a ambos lados del obstáculo se puede inferir el caudal. La figura 2.14 ilustra lo anterior.

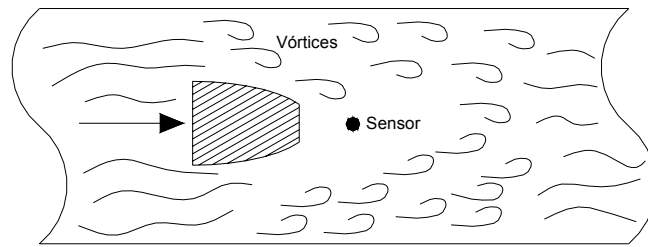


Figura 2.14 Medidor de flujo por torbellinos (vórtices).

### Medición por ultrasonidos

Existen distintos dispositivos que se basan en el efecto Doppler (el efecto Doppler es una variación aparente de la frecuencia de cualquier onda emitida, por ejemplo luz o sonido, cuando la fuente de la onda se acerca o se aleja del observador; el efecto toma su nombre del físico austriaco Christian Doppler, que formuló por primera vez este principio físico en 1842; el principio explica por qué, cuando una fuente de sonido de frecuencia constante avanza hacia el observador, el sonido parece más agudo, esto es de mayor frecuencia, mientras que si la fuente se aleja parece más grave) o en la recepción de ecos.

En ambos métodos se utiliza un elemento emisor que envía impulsos de ultrasonido a través del fluido en distintas direcciones. Los impulsos que viajan en el mismo sentido que el fluido, lo hacen a mayor velocidad que aquellos otros que viajan en sentido contrario. Una serie de sensores recogen estos impulsos y un circuito electrónico auxiliar procesa la información calculando el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del impulso; como las distancias entre el emisor y los sensores son fijas y conocidas, se puede obtener la velocidad a la que viajó el impulso que, a su vez, es función de la velocidad del fluido. La figura 2.15 muestra un esquema del principio de operación de la medición de flujo por ultrasonidos.

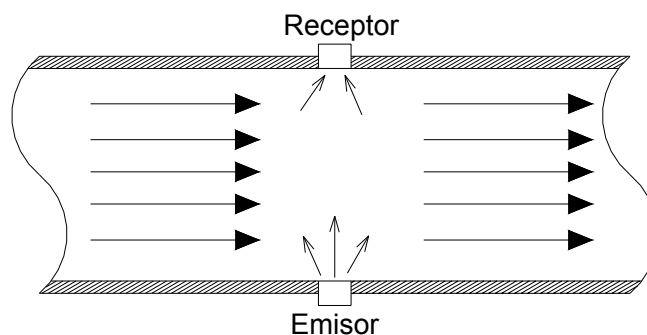


Fig. 2.15 Medidor de Flujo por Ultrasonidos.

## Medición en canales abiertos

Además de la utilización de los medidores de velocidad, tales como la medición del tiempo que tarda un flotador en pasar por dos puntos determinados, se utilizan otros métodos basados en el principio del rotámetro:

- Rebosaderos
- Canales de medición

### Rebosaderos

En un canal se coloca una represa cuyo rebosadero puede adoptar distintas formas. El líquido represado alcanzará distinta altura en función del caudal: a mayor caudal, mayor altura. Esta altura se mide en un tubo por cualquier método establecido para la medición de niveles. La figura 2.16 muestra un esquema de la medición en canal abierto con rebosadero.

La altura está relacionada con el caudal por ecuaciones que son función de la forma geométrica del área transversal en el canal.

Este método tiene dos inconvenientes: uno es que no haya bastante desnivel en el canal como para permitir represar el fluido; el otro es que el arrastre de sedimentos acabará anegando la represa.

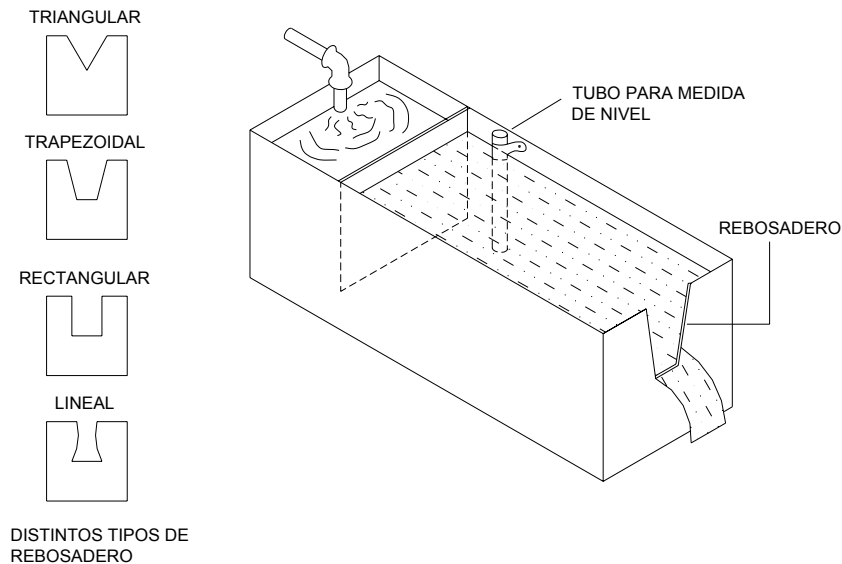


Fig. 2.16 Medición en canal abierto con rebosadero.

## Canales de medición

Los inconvenientes que presentan los rebosaderos se soslayan en los canales de medición. Existen distintos tipos que se diferencian por sus dimensiones y ángulos de entrada y salida. En la siguiente figura, se representa uno de ellos. Como se ve en la figura 2.17, consisten en esencialmente en intercalar una garganta para conseguir que las variaciones de caudal se reflejen en una variación apreciable de nivel en el tubo de medida.

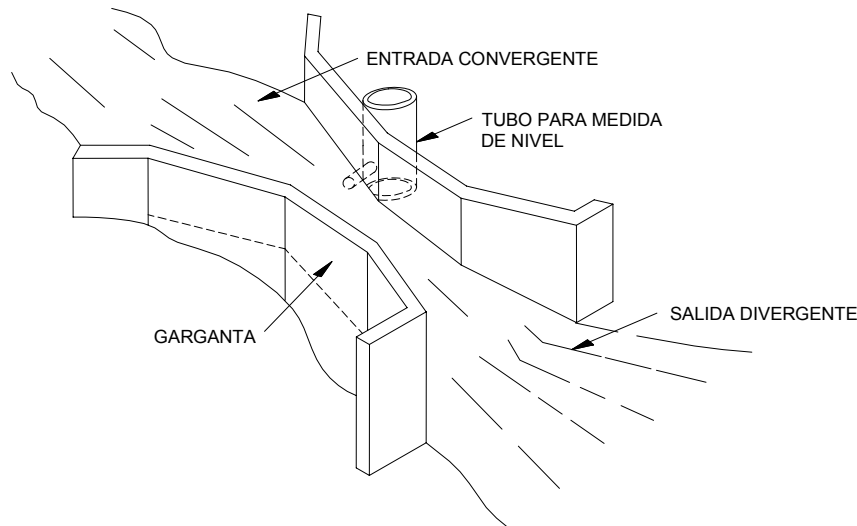


Fig. 2.17 Medición de Flujo en Canal Abierto con Garganta.

## 2.2 Medición tipo Presión Diferencial

Puesto que la medida de caudal volumétrico en la industria se realiza, generalmente, con instrumentos que generan una caída de presión diferencial al paso del fluido, se abordarán en este trabajo con mayor detalle los medidores de presión diferencial.

Estos medidores presentan una reducción de la sección de paso del fluido, dando lugar a que el fluido aumente su velocidad, lo que origina un aumento de su energía cinética y, por consiguiente, su presión tiende a disminuir en una proporción equivalente, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía, creando una diferencia de presión estática entre las secciones aguas arriba y aguas abajo del medidor.

En los dispositivos de medición de fluido que se basan en la ecuación de Bernoulli, la presión aguas abajo antes de la obstrucción será menor que la presión aguas arriba o después de la obstrucción.

El principio fundamental en que se basa la teoría de medición de flujo se conoce como la ecuación de continuidad, la que establece como varía la velocidad de flujo cuando varía el diámetro de la tubería (la conservación de la masa en el estado estacionario). Si aumenta el área transversal, disminuye la velocidad y viceversa.



Esto es:

$$A_a V_a = A_b V_b$$

De lo cual se deduce que si  $A_a > A_b$  entonces  $V_a < V_b$

De acuerdo con el teorema de Bernoulli (principio físico que implica la disminución de la presión de un fluido en movimiento cuando aumenta su velocidad; fue formulado en 1738 por el matemático y físico suizo Daniel Bernoulli, y anteriormente por Leonhard Euler; dicho teorema afirma que la energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo; de esto puede demostrarse que, como consecuencia de ello, el aumento de velocidad del fluido debe verse compensado por una disminución de su presión), la velocidad en la parte estrecha de la canalización tiene que ser mayor que en la ancha, y por estar ambas a la misma altura (en la misma línea), la presión en la parte ancha es mayor que en la estrecha. Por tanto, cuando un fluido incrementa su velocidad sin variar de nivel, su presión disminuye.

La forma de calcular el caudal que se obtiene en los medidores de este tipo, como ya se mencionó, tiene su fundamento en la aplicación del teorema de Bernoulli en una tubería horizontal (ver figura 2.18).

Esta ecuación tiene la forma:

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_0} = \frac{V_b^2}{2} + \frac{P_b}{\rho_0}$$

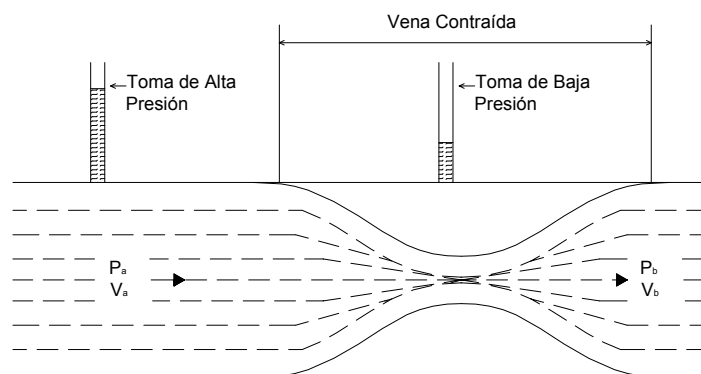


Fig. 2.18 Fundamento del Teorema de Bernoulli.

En donde  $P_a$  y  $P_b$ , son las presiones absolutas;  $V_a$  y  $V_b$  son las velocidades en la zona anterior a la placa donde el fluido llena todo el conducto y en la vena contraída respectivamente; y  $\rho_0$  la densidad del fluido, suponiendo que esta no varía en toda la longitud estudiada de la vena.

De la anterior ecuación se obtiene lo siguiente:

$$V_b^2 - \frac{A_b^2 V_b^2}{A_a^2} = 2 \left( \frac{P_a - P_b}{\rho_0} \right)$$

En la práctica, se consideran factores de corrección que consideran factores diversos, tales como la desigualdad de velocidades, la contracción de la vena del fluido, la rugosidad de la tubería, el estado físico del fluido, y otras. Sin embargo, el principio sigue siendo el mismo ya descrito.

La vena contraída es un área mínima del flujo que aparece justo aguas debajo de la restricción. Este punto es donde se encuentra la menor área de sección transversal y se ubica justo a una distancia del doble del diámetro del orificio de restricción. Debido al teorema de Bernoulli y a la ecuación de continuidad, la velocidad estará a su máximo y la presión en su mínimo en la vena contraída. Después del dispositivo de medición y de la vena contraída la velocidad desciende al mismo nivel que antes de la obstrucción. Aunque la presión vuelve a aumentar después de pasada la restricción, nunca vuelve a ser la misma que antes de entrar en la restricción. Esta pérdida de presión irrecuperable varía dependiendo del tipo de dispositivo instalado, lo que origina un criterio de selección entre uno y otro dispositivo.

La medición de un fluido utilizando una restricción en la línea de proceso se realiza con diferentes dispositivos los cuales se describen a continuación.

## 2.3 Placa de Orificio

Las guías para su instalación son publicadas por varias organizaciones profesionales (ISA, ANSI, API, ASME, AGA) y por fabricantes de diseños propios. Estas guías incluyen recomendaciones tales como:

- a) Cuando adicionalmente a la medición de flujo se requiere medir la temperatura o presión, el transmisor no deberá estar instalado en la tubería de proceso, sino conectado a una línea de paso del flujo apropiada mediante un acoplador Te. Esto con la finalidad de evitar distorsiones del perfil de velocidades.
- b) De forma similar, el termopozo utilizado para medir la temperatura deberá ser instalado a por lo menos 10 diámetros aguas abajo del elemento de medición.
- c) Con el fin de que se desarrolle completamente el perfil de velocidades (y que la caída de presión sea predecible), se requieren tramos de tubería recta aguas arriba y aguas abajo del elemento medidor. La cantidad o longitud de este tramo recto depende de la relación beta (de diámetros) y de la naturaleza de los componentes en la línea. Con la intención de reducir el requerimiento de tramo recto, se pueden instalar correctores de flujo aguas arriba del elemento de medición.
- d) El tamaño y orientación de las tomas de presión son función del tamaño de la tubería. El máximo diámetro recomendado para los orificios de las tomas de presión es de  $\frac{1}{4}$  '' para tuberías con diámetro menor a 2'',  $\frac{3}{8}$ '' para diámetros de 3'',  $\frac{1}{4}$ '' para tuberías con diámetros de 4'' a 8'' y  $\frac{3}{4}$ '' para tuberías mayores. Ambas tomas deben ser del mismo diámetro. Las conexiones a estos orificios deberán ser soldados a la superficie exterior de la tubería. Para tomas en la brida el tamaño será de  $\frac{1}{2}$ '' NPT.
- e) En servicios en donde el fluido de proceso pudiera taponar las tomas de presión o pudiera congelarse o gelatinizarse en las líneas principales, se pueden utilizar sellos químicos protectores. Los tamaños de las conexiones pueden ser mayores, y, debido al requerimiento de espacio, las tomas generalmente se instalan en la tubería o radiales.

- f) La frecuencia de inspección o reemplazo del elemento de medición depende de la naturaleza abrasiva o corrosiva del proceso, pues esto afecta el material de la placa, y como consecuencia en la exactitud total requerida. Esto puede disminuirse seleccionando un material resistente a tales efectos.

Para captar la presión diferencial que origina la placa de orificio, es necesario conectar dos tomas, una en la parte anterior y otra en la parte posterior de la placa. La disposición de las tomas, puede ser: en las bridas, en la vena contraída, y en la tubería. (ver fig. 2.19 a, b, y c).

Las tomas en la brida (“flange taps”) son bastante prácticas y se sitúan a 1” de la placa misma. Ver fig. 2.19 a.

En el caso de las tomas en la vena contraída (“vena contracta taps”, ver fig. 2.19 b), la toma antes de la placa se sitúa a  $1\varnothing$  de tubería de distancia de la placa, mientras que la toma posterior se debe situar en el punto de mínima presión, donde la vena alcanza su diámetro más pequeño que es aproximadamente  $\frac{1}{2}\varnothing$  de tubería dependiendo de la razón de diámetros.

Las tomas en la tubería (“pipe taps”, fig. 2.19 c) se sitúan a  $2\frac{1}{2}$  y 8 diámetros de tubería respectivamente, antes y después de la placa de orificio.

Así mismo, se conocen las tomas radiales (“radius taps”). Estas son parecidas a las tomas de vena contraída, solo que en estas se fijan siempre las tomas anterior y posterior a 1 y  $\frac{1}{2}$  diámetro de la tubería respectivamente.

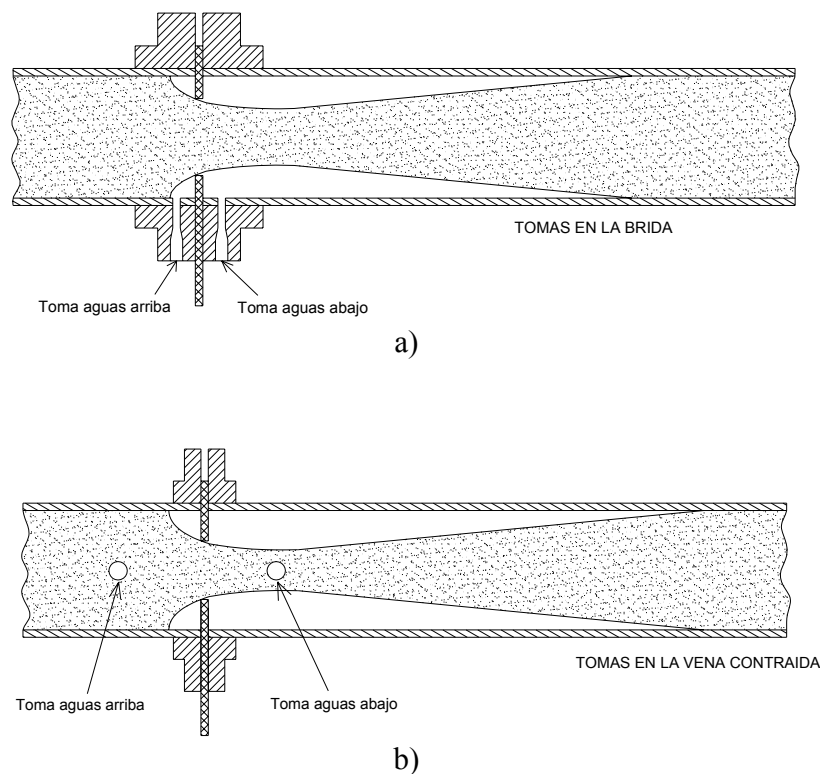


Fig. 2.19 Distintas tomas de presión diferencial para placa de orificio.

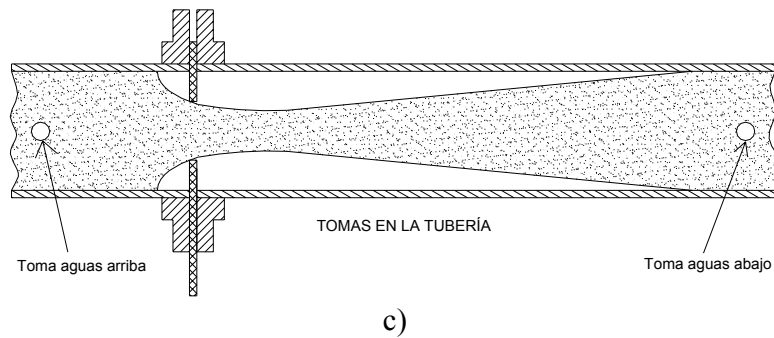


Fig. 2.19 Distintas tomas de presión diferencial para placa de orificio (continuación).

La placa de orificio es usada comúnmente en servicios de líquidos limpios, gases y vapores. Se encuentra disponible para tamaños de tubería de hasta 48", aunque de hasta 24" es el estándar de fabricación y presenta una caída de presión libre.

Las ecuaciones para determinar el flujo que se utilizan en la actualidad difieren unas de otras aún cuando las diversas organizaciones de estandarización trabajan para adoptar una ecuación única, aceptada universalmente.

La placa de orificio puede fabricarse en cualquier material aunque como mínimo debe ser acero inoxidable 304 fabricación estándar. El espesor de la placa (1/8" a 1/2") es función del tamaño de la línea, la temperatura del proceso, la presión, y la presión diferencial (cuando las condiciones de trabajo no son mayores a 50 kg/cm<sup>2</sup> o 350 °C, el estándar es 1/8"). La placa tradicional se constituye por un plato circular con orificio (con una paleta para su manejo) insertada en la línea entre dos bridas de una unión de orificio (orifice union). Este método de instalación tiene la desventaja que el proceso debe ser detenido cuando se requiere dar mantenimiento a la placa. En contraste, un orificio de medición (orifice fitting) permite que la placa sea removida del proceso sin despresurizar la línea ni detener el flujo. En estos conectores, se usa una placa sin paleta.

## 2.4 Tubo Venturi

Los tubos Venturi (fig. 2.20) están disponibles en tamaños de hasta 72" y pueden pasar de 25 a 50% más flujo que una placa de orificio con una caída en la presión igual. Además la pérdida en la recuperación raramente excede el 10% del diferencial. El costo inicial de un tubo Venturi es alto, así que estos son usados principalmente con flujos grandes o en aplicaciones más difíciles o demandantes.

Estos tubos no son sensibles a los efectos del perfil de velocidades y por lo tanto requieren menos tramo recto de tubería que la placa de orificio. La naturaleza geométrica, combinada con su acción de auto-escurrimiento del flujo a través del tubo, hace a este dispositivo inmune a la corrosión y erosión. Aún con el alto costo inicial, el costo total puede ser favorable debido a los ahorros en los costos de instalación, operación y mantenimiento.

El tubo Venturi clásico tiene un elemento de medición largo caracterizado por una entrada cónica y una salida divergente. La presión inicial es medida en la entrada y la presión estática en la sección de la garganta. Las tomas de presión son del tipo de cámara anular, lo cual proporciona una lectura promedio de la presión sobre el total de la circunferencia del elemento. El Venturi clásico está limitado en su aplicación para líquidos y gases limpios y no corrosivos.

En los Venturi de tipo corto, el ángulo de entrada se incrementa y la cámara anular es sustituida por tomas de tubería. Los Venturi de tipo corto mantienen muchas de las ventajas de los clásicos, además de que tienen un costo inicial reducido, menor longitud y menos peso. Las tomas de presión se localizan de  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  del diámetro de tubería aguas arriba del cono de entrada y en el centro de la sección de la garganta. Se pueden utilizar aros piezométricos con los tubos Venturi largos para compensar por distorsiones en el perfil de velocidades. En servicio para todos las tomas de tubería pueden ser purgadas o remplazadas con sellos químicos.

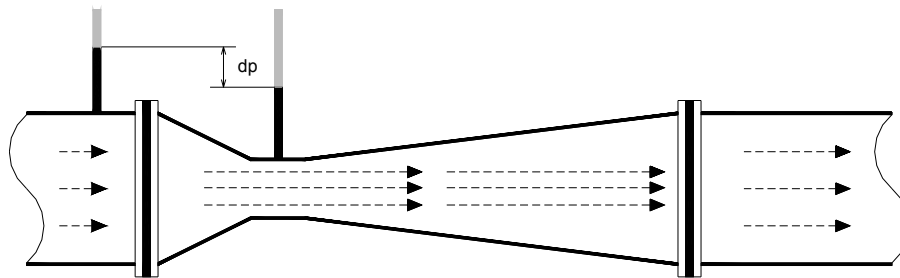


Fig. 2.20 Tubo Venturi.

## 2.5 Tubo de Medición

Como ya se había hablado anteriormente, el orificio de medición (orifice fitting, measure fitting, ver fig. 2.21) es un dispositivo de medición de flujo compuesto de una cámara alta y una baja independientes una de otra por un sello hermético; un bonete en la cámara alta puede removerse fácilmente para reemplazar la placa de orificio sin interrumpir la línea de flujo. El bonete de la cámara alta está asegurado por birlos y roldanas abiertas, que permiten removerlo sencillamente al aflojar las tuercas y remover las roldanas.

Un tornillo elevador de rosca sin fin proporciona una operación confiable y rápida. Un seguro se acciona al momento de colocar la placa en la caja porta placa y mediante un mecanismo transportador la placa de orificio es vuelta a su lugar; mediante unos tornillos centradores colocados a un lado de las tomas de presión diferencial se logra un ajuste horizontal en la línea, mientras que con otro tornillo que se encuentra unido al tornillo elevador se logra el ajuste vertical, de esta forma se logra que la placa de orificio esté centrada en el diámetro interior de flujo, con lo que la precisión es mayor en la medición.

Estos fittings de medición están diseñados para manejar flujo en un sentido u otro (flujo reversible), gracias a esto se elimina la posibilidad de una instalación inadecuada con respecto a la dirección del flujo. El material del cuerpo del fitting es acero inoxidable 304 como mínimo y el de los internos acero inoxidable 316, el mecanismo de aislamiento entre la cámara superior e inferior, preferentemente libre de grasa con doble sello para evitar fugas. La placa de orificio es de acero inoxidable 316 de igual forma. Aunque estos materiales son de fabricación estándar, no son los únicos con lo que podrían fabricarse estos equipos. Los tamaños oscilan desde las 2" hasta 48" con rangos de presión desde 125# hasta 2500#.

Las conexiones de los fittings de medición pueden ser bridas cara realzada (flanged raise face), combinación un extremo bridado R.F. y el otro cuello soldable (flangneck), o tipo cuello soldable (weldingneck).

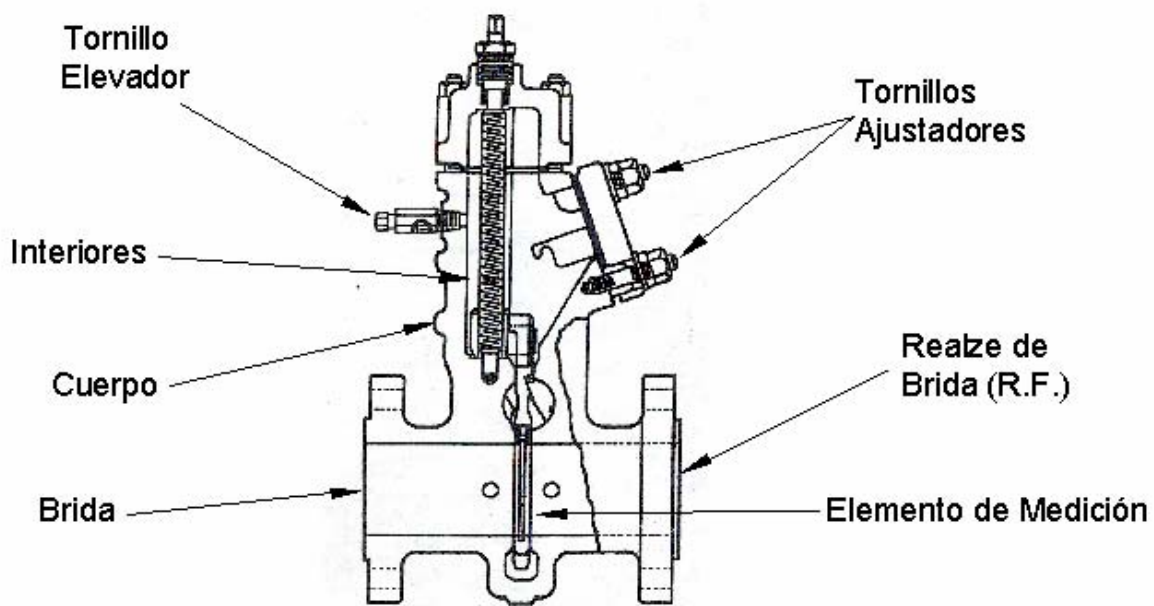


Fig. 2.21 Fitting de medición.

Ahora bien, si al fitting de medición se le acondiciona o se le une dos tubos de tubería sin costura en acero inoxidable por ejemplo, de forma tal que se cree una sección de tramo recto de tubería antes y después de la restricción, lo que se tiene como resultado es un tubo de medición.

Un tubo de medición consiste de un fitting de medición, con tomas de presión de 1/2" en bridas, un tramo de tubería aguas arriba del fitting y un tramo de tubería aguas abajo del mismo. En los casos en que las pérdidas de presión son considerables debido a las condiciones con válvulas, codos, curvas instalados en la cercanía del elemento primario de medición, se utilizan dispositivos llamados enderezadores de venas o correctores de flujo que dan un régimen laminar al fluido y permiten reducir el espacio recto necesario.

Debido a que los tubos de medición suelen tener una mayor aplicación al unir dos codos reductores, o después de una válvula de compuerta o un regulador, es común que se utilicen tubos de medición con enderezadores de venas. En estos casos las normas A.G.A (American Gas Association) establece las longitudes mínimas del tubo de medición en función del diámetro de tubería y la relación  $\beta$ . En estos dispositivos la velocidad del flujo es proporcional a la raíz cuadrada de la caída de presión.

Los tubos de medición existen en dos tipos de acuerdo a su diseño los cuales son:

- Tubo de medición de dos secciones
- Tubo de medición de tres secciones

### Tubos de medición de dos secciones

Los tubos de medición de dos secciones (fig. 2.22) son fabricados con tubo de medición especial o con tubería sin costura ASTM-106 o de material mas adecuado para las condiciones de servicio. Se diseñan conforma a las últimas especificaciones AGA, ASME, ASA (American Gas Association, American Society of Mechanical Engineers, American Standards Association). El orificio de las bridas se iguala al tubo en su diámetro interior quedando perfectamente alineado; en el caso de un fitting combinado, la unión de la brida con el tubo de baja presión es con soldadura tratada térmicamente.

Las dos secciones se componen por dos lados, uno de alta presión y otro de baja presión estando aguas arriba y aguas abajo respectivamente. En el lado de alta presión normalmente se dispone una toma de  $\frac{1}{2}$ " NPT con el objeto de instalar una válvula de purga y evitar así el sobreflujo. La longitud del tubo de alta presión estará determinado por lo que marca la norma AGA; esta longitud es más larga que la longitud de baja presión, y además de esto, el fabricante debe de recomendar una longitud un poco mas larga de lo que indica la norma pues esto facilita la disposición de las tomas. El lado de baja presión posee normalmente dos tomas, una de  $\frac{3}{4}$ " NPT y otra de  $\frac{1}{2}$ " NPT, separadas unas 6" una de otra; estas tomas permiten la medición de temperatura y tal vez presión de acuerdo a las necesidades del proceso. De igual forma, la longitud del tubo de baja presión debe ser especificada de acuerdo a los mismos criterios que el tubo de alta presión. Los extremos del tubo de medición pueden ser bridados o biselados para soldarse.

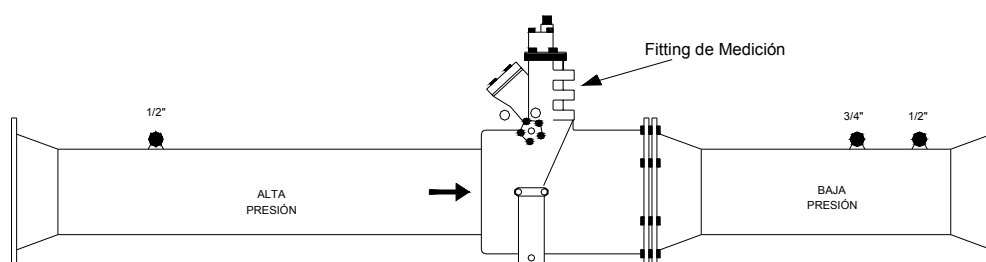


Fig. 2.22 Tubo de medición de dos secciones con fitting tipo flangneck extremos bridados.

## Tubo de medición de tres secciones

En estos tubos las tres secciones (ver fig. 2.23) están comprendidas por; lado de alta presión y lado de baja presión. El primero consta de dos secciones: La primera es un tramo de tubo tipo carrete y la segunda comprende otro tubo en cuyo extremo se encuentra la válvula portaorificio. En medio de estos dos tubos se localiza el corrector de flujo de tipo bridado sujeto entre las dos bridas de tipo RF (cara realzada). La segunda parte (baja presión) consta de un tubo tipo carrete.

El tubo de medición de tres secciones es posible removerlo completamente de la línea de inspección y/o limpieza y volverlo a su lugar sin dañar o mover el resto de la instalación.

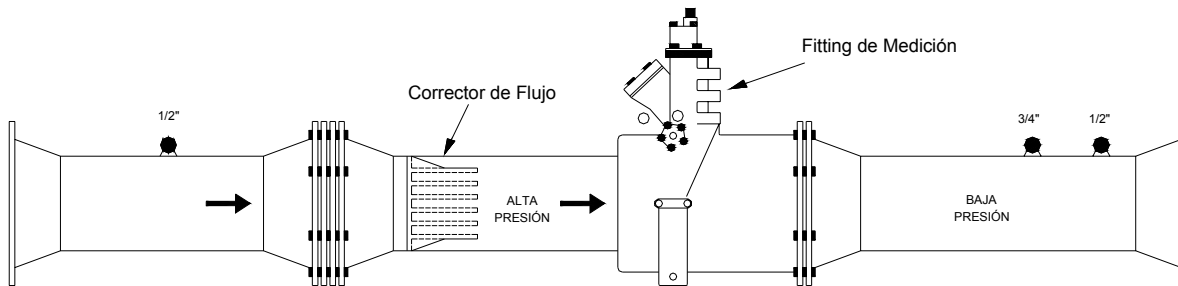


Fig. 2.23 Tubo de medición de tres secciones con fitting flangeck y corrector de flujo, extremos biselados.

## 2.6 Tubo Pitot

Si bien el tubo Pitot (ver fig. 2.24) es uno de los medidores de flujo más simples, es utilizado en un amplio rango de aplicaciones como la medición de la velocidad del aire en automóviles de carreras y jets de combate aéreo. En aplicaciones industriales se utilizan para medir flujo de aire en tuberías, ductos, y conductos de escape, y flujo de líquidos en tuberías, presas y canales abiertos. Mientras que su exactitud y su rangeabilidad son relativamente bajas, los tubos Pitot son sencillos, confiables, baratos, y adecuados para una variedad de condiciones ambientales, incluyendo altas temperaturas y un amplio rango de presiones.

Un tubo Pitot es una alternativa poco costosa a la placa de orificio. Su exactitud va desde 0.5% a 5% de escala total, la cual es comparable a la de la placa. La principal diferencia es que, mientras la placa de orificio mide el total de la corriente de flujo, el tubo Pitot detecta la velocidad del flujo en un solo punto de la corriente de flujo.

Básicamente este tubo mide dos presiones: la estática y la presión de impacto total. La presión estática es la presión de operación en la línea, ducto, o en el ambiente, aguas arriba del tubo Pitot. Esta es medida en ángulos rectos a la dirección del flujo, preferentemente en un punto con baja turbulencia. La presión de impacto total es la suma de la presión estática y cinética y se detecta a medida que la corriente de flujo se impacta en la apertura Pitot. Para medir la presión de impacto, la mayoría de los Pitot utilizan un tubo pequeño algunas veces en forma de "L" con la apertura apuntando directamente al flujo que va llegando.



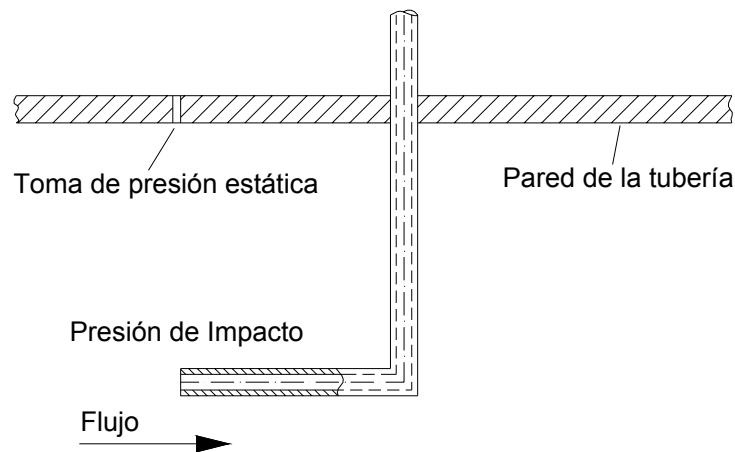


Fig. 2.24. Tubo Pitot.

## 2.7 Factores a considerar en el dimensionamiento de Placas de Orificio

Normalmente se usarán del tipo concéntricas de canto vivo para fluidos de proceso limpios que no lleven sólidos en suspensión.

En caso de que el vapor arrastre cantidades considerables de condensado o el líquido este próximo a las condiciones de evaporación, se recomienda usar una placa de orificio excéntrico; la cual es similar a la placa de orificio concéntrico, sólo que en este caso el orificio queda desplazado a lo largo del diámetro, de forma que casi quede tangente a la pared interna de la tubería.

Cuando el fluido arrastra sedimentos, se puede utilizar la placa de orificio segmentado; el radio de este orificio es del 98 por 100 del radio interno de la tubería y la cuerda del círculo también tiene el canto vivo en su cara de entrada.

El hecho de que el canto de entrada en los orificios de las placas sea vivo, es de la máxima importancia para la exactitud de la medida. Un desgaste incipiente de este canto, puede introducir errores considerables en la medición.

La placa de orificio de canto vivo introduce grandes errores con caudales bajos y viscosidades altas; en estas aplicaciones se recomienda usar la placa de orificio con canto en cuarto de círculo, cuyo radio de curvatura del borde de entrada es función del diámetro del orificio.

El coeficiente de dimensionamiento de la placa se define como la relación que existe entre el diámetro del orificio de la placa y el diámetro interior de la tubería. Esto es,  $\beta = (d/D)$ , en donde “ $\beta$ ” es el coeficiente de dimensionamiento de la placa, “ $d$ ” es el diámetro del orificio, y “ $D$ ” es el diámetro interior de la tubería.

El espesor de la placa de orificio, los criterios para el coeficiente de dimensionamiento de la placa de orificio, así como los demás factores inherentes a su diseño serán los siguientes:

| DIAMETRO NOMINAL DE TUBERIAS | ESPESOR DE PLACA |
|------------------------------|------------------|
| 2"                           | 1/8" (3 mm)      |
| 3"                           | 1/8" (3 mm)      |
| 6"                           | 1/8" (3mm)       |
| 8"                           | 1/8" (3 mm)      |
| 10"                          | 1/4" (6 mm)      |
| 12"                          | 1/4" (6 mm)      |
| 14"                          | 1/4" (6 mm)      |
| 16"                          | 3/8" (9.5 mm)    |
| 18"                          | 3/8" (9.5 mm)    |
| 20"                          | 3/8" (9.5 mm)    |
| 24"                          | 3/8" (9.5 mm)    |

- a) La relación  $\beta$  (d/D) para tomas en bridas deberá estar entre 0.15 a 0.7.
- b) La relación  $\beta$  (d/D) para tomas en tubería deberá estar entre 0.20 a 0.67.
- c) La relación  $\beta$  no deberá ser menor a 0.2 ó mayor de 0.7 para servicio de gas y vapor y 0.75 para líquidos.
- d) Las tomas en medidor serán horizontales para líquidos y vapor y superiores para gases.
- e) Las bridas porta orificio deberán tener un régimen mínimo de 300 libras ANSI. Alto régimen de bridas pueden ser usados cuando se requiera por especificación de tubería.
- f) Todos los orificios en servicios de líquidos deben tener un orificio de venteo de 1/8" de diámetro.
- g) Todos los orificios en servicio de gases ó hidrocarburos líquidos conteniendo trazas de agua deberán tener un orificio de dren de 1/8" de diámetro.
- h) La tolerancia en el diámetro del orificio deberá estar de acuerdo a la siguiente tabla:

| TAMAÑO DE ORIFICIO | TOLERANCIA  |
|--------------------|-------------|
| 0.25"              | +/- 0.0003" |
| 0.375"             | +/- 0.0004" |
| 0.5" Y MAYORES     | +/- 0.0005" |

- i) El material de la placa deberá ser de acero inoxidable 304 como mínimo; para fluidos corrosivos deberá ser acero inoxidable 316 u otro material de acero de aleación especial de acuerdo a la especificación de tuberías.
- j) Las tomas en bridas deberán ser de 1/2" NPT.

- k) El material de las bridas debe estar de acuerdo a lo indicado en la especificación de material de tuberías.
- l) La placa de orificio deberá diseñarse para que genere diferenciales que variarán desde 500 mm H<sub>2</sub>O, 1250 mm H<sub>2</sub>O, 2500 mm H<sub>2</sub>O y 5000 mm H<sub>2</sub>O, ó 50, 100, 150, 200, 250 hasta 400 pulg H<sub>2</sub>O.
- m) Para calcular el coeficiente de dimensionamiento de la placa ( $\beta$ ) y el diámetro del orificio de la placa se necesitarán los siguientes datos de proceso (no es objeto de este trabajo realizar el cálculo de ninguno de los elementos primarios de medición):

$Q_m$  o  $W_m$  = Flujo del proceso (Líquido: m<sup>3</sup>/hr; Vapores: kg/hr; Gas: m<sup>3</sup>/hr (a 0 °C y 1.033 kg/cm<sup>2</sup> abs, condiciones normales).

$P$  = Presión del fluido (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $T$  = Temperatura del fluido (°C)  
 $\mu$  = Viscosidad del fluido (cp)  
 $\rho$  = Densidad del fluido (kg/cm<sup>3</sup>)

$D$  = Diámetro de la tubería (pulg)  
 $G$  = Gravedad específica

## 2.8 Especificaciones Técnicas

### Especificaciones generales para Placas de Orificio

Requerimientos mínimos

- Las placas de orificio deberán ser de orificio concéntrico salvo que se especifique otro especial como segmental o excéntrico.
- Las placas de orificio de perfil cuadrante se usaran para fluidos viscosos.
- El acabado de la cara de entrada debe ser sin ralladuras ni asperezas.
- La superficie de la placa debe ser plana.
- Cuando no se especifique un perfil especial, los bordes de las placas deben ser un ángulo recto.
- En el caso que se requieran placas de perfil especial (cónicos o cuadrantes), estos deben ser comprobados mediante una plantilla y el rango de la placa debe estar maquinado convenientemente para representar el perfil especial usado.
- La tolerancia de maquinado máxima para el tamaño de los diámetros de orificio ( $d$ ) mayores o iguales a 1" será de 0.0005" por pulgada de diámetro nominal y para diámetros de orificio menores de 1" será de 0.0003" a 0.0005".
- El material mínimo para placas de 1 ½ " a 12", debe ser de acero inoxidable 304, para placas de 14" y mayores el material mínimo debe ser acero inoxidable 316.

- El espesor de las placas de orificio debe ser de 1/8" para placas de 8" y menores, para placas de 10" a 14" debe ser de 1/4", para mayores de 14" debe ser de 3/8".
- Para los casos en que las condiciones de presión y temperatura sean severas, o la diferencial de presión sea grande (mayor a 100" H<sub>2</sub>O) el espesor será otro y debe ser recomendado por el fabricante.
- Los cálculos deben ser realizados empleando las ecuaciones basadas en el A-ga-Report No. 3 y, en "Principies and Practices of Flow Meter Engineering" por L.K. Spink novena edición y enviados al contratista para su validación. El valor de la relación " $\beta$ " debe estar entre 0.3 y 0.7 Y la diferencial de presión del medidor debe ser de 100" de Agua de forma general como mínimo, pues es así como lo recomienda la ISA.
- Cuando los orificios de drene o venteo sean especificados, su localización será tangencial a la línea de conducción.
- Para las dimensiones de placas, mango, venteo, espesor, bisel, localización del venteo y orificios excéntrico o segmental; el fabricante debe apegarse a las recomendaciones AGA-Report No. 3, ASME Power Code Flow Measurement (capítulos 4 y 5) y al API RP. 551.
- Las placas deben marcarse permanentemente en el mango de la placa por el lado de la cara de entrada, 20 mm. arriba del diámetro exterior de la placa con la siguiente información:
  - a) Identificación (por el lado de salida).
  - b) Nombre del fabricante y modelo.
  - c) Diámetro del orificio en mm. (3 decimales).
  - d) Tamaño de la brida en pulgadas y su capacidad (rating).

## Especificaciones generales para Tubo Venturi

### Requerimientos mínimos

- El material mínimo de fabricación del tubo Venturi será acero inoxidable 316. Un material de mayor calidad deberá ser empleado en caso de que las condiciones del proceso así lo exijan.
- Las conexiones cuando sean bridadas deberán ser integrales al elemento de medición. La clase de las bridas (rating) deberá ser de acuerdo a sus bridas compañeras (contrabrida), de construcción de conforme al ASME B 16.5 última edición. En caso de que los extremos del tubo Venturi sean soldables deberán ser del tipo cuello soldable (welding neck). En ambos casos deberá de cumplirse con lo establecido en la especificación de tuberías. Las conexiones bridadas siempre serán más recomendables, aunque es posible que no en todos los casos se ameriten.
- La precisión del elemento de medición deberá ser como mínimo de  $\pm 1\%$ .
- Es responsabilidad del proveedor indicar los tramos de tubería recta disponible antes y después del tubo Venturi, conforme a las condiciones de proceso, de forma que esto no cause errores en la medición.

- Las tomas de presión serán una aguas arriba justo antes que el tubo tenga un ángulo de inclinación a la entrada y la otra será aguas abajo en la porción más estrecha del tubo, antes del ángulo de inclinación de salida.
- El ángulo de entrada (del cono) deberá ser de 21°, ángulos mayores podrían provocar errores en la medición y ángulos menores requerirían de un tubo más largo. El ángulo de salida no será mayor a los 9°, ni menor a los 7°, esto con el objeto de recuperar el máximo de presión. La longitud de la garganta del tubo es aproximadamente la mitad del diámetro del tubo Venturi.
- La relación “ $\beta$ ” deberá ser de entre 0.4 y 0.7 suministrando una baja pérdida de presión relativa a la diferencial producida.
- Los cálculos deberán realizarse en base al libro “Flow Measurement Engineering Handbook” de Richard W. Millar, ya que este procedimiento de cálculo es lo aceptable por ISA.
- Para el caso de fluidos viscosos será responsabilidad del proveedor indicar cual es el diseño más apropiado de acuerdo a las condiciones de operación.
- El equipo deberá de suministrarse con placa de acero inoxidable (no se aceptan uniones por adhesivo) fijada permanentemente con la siguiente información grabada a golpe:
  - a) Identificación.
  - b) Servicio
  - c) Nombre del fabricante y modelo
  - d) Relación “ $\beta$ ”
  - e) Tamaño de la brida en pulgadas y capacidad (rating, si así es el caso).

## Especificaciones generales para Tubo de Medición

### Requerimientos mínimos

- El material mínimo para un tubo de medición será de acuerdo a sus partes:
  - Fitting de medición: Acero inoxidable 304
  - Internos del fitting: Acero inoxidable 316
  - Elemento primario Acero inoxidable 304
  - Tubos de alta y baja presión ASTM-106 gr B (Acero al carbón)
- Materiales de mayor calidad serán empleados si así lo exigen las condiciones del proceso.
- Para los tubos de medición con extremos bridados, las bridas serán R.F (cara realzada) de acuerdo a las condiciones de proceso.
- La capacidad (rating) será de acuerdo al ASME B 16.5 última edición. En el caso de que sean de extremos soldables estos serán de tipo welding neck.
- El valor de  $\beta$  será de 0.15 a 0.75 como máximo conforma a la norma AGA.

- La longitud de tubo de alta y baja presión será conforme a AGA.
- El proveedor del equipo debe de recomendar la exactitud del tubo de medición de acuerdo a las condiciones de operación, tamaño de la línea y número de Reynolds.
- El proveedor recomendará el tipo de tubo de medición a instalarse (dos o tres secciones) de conforme con las necesidades de correcto funcionamiento.
- Los cálculos serán realizados de acuerdo con los procedimientos de cálculo del libro "Flow Measurement Engineering Handbook" de Richard W. Millar, aceptado por la ISA.
- El equipo deberá suministrarse con placa metálica permanentemente asegurada, con la siguiente información:

Identificación y servicio.

Nombre del fabricante y modelo.

Relación  $\beta$  y capacidad de las bridas si es el caso.

## **Especificaciones generales para Tubo Pitot**

### Requerimientos mínimos

- El material mínimo debe ser acero inoxidable 316, a menos que debido al tipo de fluido se especifique otro.
- La conexión al proceso debe ser de 1" NPT macho; a excepción de algunos casos especiales, los cuales deberán ser especificados.
- Las tomas de presión diferencial deben ser de ½ " NPT.
- Los cálculos deben ser realizados empleando las ecuaciones basadas en el Aga-Report No. 3 y, en "Principies and Practices of Flow Meter Engineering" por L.K. Spink novena edición, pues es así como lo recomienda la ISA.
- Para el cálculo de la diferencial debe considerarse el gasto máximo del medidor especificado, en las unidades correspondientes a las condiciones de temperatura y presión especificadas.
- La exactitud de cada tubo, deberá ser de 1.5% como mínimo.
- Para el caso en que se especifique indicadores, estos deben ser suministrados para montaje en yugo y con clasificación eléctrica adecuada para el área.
- La escala de los indicadores debe ser de 0-10 R.C. con el factor de escala correspondiente en las unidades especificadas y su identificación, a menos que se especifique otra cosa.
- Cuando se especifique el elemento solo (puede solicitarse transmisor también), el proveedor debe suministrar los dispositivos de conexión necesarios, hasta la válvula de corte.

- Para el caso que se solicite tubo Pitot y transmisor, se deberán proporcionar todos los accesorios de interconexión necesarios.
- Las válvulas de bloqueo y los accesorios de interconexión deben ser de acero inoxidable como mínimo.
- El tubo Pitot debe suministrarse con una placa metálica fija al tubo por medio de una cadena con la siguiente información:
  - a) Identificación y servicio.
  - b) Nombre del fabricante y modelo.
  - c) Flujo máximo medido y unidades.
  - d) Material del tubo.
  - e) Rango máximo de presión y temperatura

## 2.9 Comparación entre instrumentos de medición de flujo

| Características Generales  | A favor   | En contra   |
|--|---|---|
| <b>Placa de Orificio</b><br>Servicio: Líquidos y gases<br>Rango: 3:1<br>Exactitud: Buena<br>Señal: Cuadrática<br>Error: 3-4%<br>Pérdida permanente: 50-90%<br>Tramos rectos: 10-30 diámetros               | -Fácil instalación<br>-Bajo costo<br>-Precio independiente del tamaño de tubería<br>-Estático<br>-Aceptación universal<br>-No necesita calibrar | -Necesidad de tramos rectos de tubería<br>-Obstruye el paso<br>-La exactitud depende del grado de desgaste del canto<br>-Influyen la viscosidad y la densidad<br>-Alta pérdida irrecuperable de presión<br>-Necesita otro elemento auxiliar para determinar la medición |
| <b>Tubo Venturi</b><br>Servicio: Líquidos, gases y vapor de agua<br>Rango: 3:1<br>Exactitud: Buena<br>Señal: Cuadrática<br>Error: 1%<br>Pérdida permanente: 10-20%<br>Tramos rectos: 5-10 diámetros        | -Baja pérdida permanente de presión<br>-Elemento estático<br>-No necesita calibrar<br>-Auto-limpiable<br>-Bajo mantenimiento                    | -Necesidad de tramos rectos de tubería<br>-Tamaño grande<br>-Precio alto<br>-Influye la viscosidad<br>-Necesita otro elemento auxiliar para determinar la medición  |
| <b>Toberas y Tubos</b><br>Servicio: Líquidos, gases y vapor de agua<br>Rango: 3:1<br>Exactitud: Buena<br>Señal: Cuadrática<br>Error: 1.5%<br>Pérdida permanente: 30-70%<br>Tramos rectos: 10-30 diámetros  | -Baratos<br>-Pérdida permanente aceptable<br>-Estáticos<br>-Bajo mantenimiento<br>-Auto-limpiable   | -Datos experimentales son escasos<br>-Necesitan calibración<br>-Necesidad de tramos rectos<br>-Influenciados por condiciones de operación   |
| <b>Tubo Pitot</b><br>Servicio: Líquidos, gases y vapor de agua<br>Rango: 3:1<br>Exactitud: Mediana<br>Señal: Cuadrática<br>Error: 1%<br>Pérdida permanente: Despreciable<br>Tramos rectos: 20-30 diámetros | -Muy barato<br>-Puede ser bi-direccional<br>-Fácil instalación<br>-Pérdida permanente mínima  | -Medición puntual<br>-Sujeto a ensuciamiento<br>-Necesidad de tramos rectos<br>-Necesita otro elemento auxiliar para determinar la medición   |

Tabla 2.1 Características de los elementos de medición de flujo.

|  |  |  |
|--|--|--|
| <b>Rotámetro</b><br>Servicio: Líquidos y gases<br>Rango: 10:1<br>Exactitud: Mediana<br>Señal: Logarítmica<br>Error: 2%<br>Pérdida permanente pequeña<br>Tramos rectos: No  | -Barato en general<br>-Autosuficiente si es indicación local<br>-Casi auto-limpiable<br>-Puede leer másico<br>-Ideal caudales bajos<br>-Independiente de viscosidad<br>-Pérdida permanente constante<br>-Casi estático | -Instalación vertical solamente<br>-En gas necesita contrapresión<br>-Tamaño limitado por peso y precio  |
| <b>Desplazamiento positivo</b><br>Servicio: Líquidos y gases<br>Rango: 10:1<br>Exactitud: Muy buena<br>Señal: Lineal<br>Error: ½ %<br>Pérdida permanente: Baja<br>Tramos rectos: Despreciables                       | -Ideal para líquidos viscosos<br>-Ideal. para mezclas y operaciones de venta<br>-Pueden ser autónomos<br>-No necesita tramos rectos<br>-Posibilidad de lectura másica<br>-Gran variedad de rangos                      | -Desgaste mecánico<br>-Solo fluidos limpios<br>-Limitación de peso, tamaño y precio<br>-Mantenimiento<br>-Sobrevelocidad<br>-Propenso a daño por fluidos abrasivos   |
| <b>Medidor de ultrasonidos</b><br>Servicio: Líquidos<br>Rango: ± 40 pies/seg<br>Exactitud: Buena<br>Señal: Lineal<br>Error: 1%<br>Pérdida permanente: Despreciable<br>Tramos rectos: 5-10 diámetros                  | -Independiente del tamaño de la línea<br>-Paso diáfano de la de señal<br>-Sanitizado<br>-Bi-direccional<br>-Estático<br>-Pérdida permanente nula   | -En fase de desarrollo<br>-Necesita calibrar<br>-Necesita de tramos rectos<br>-Únicamente líquidos   |
| <b>Medidor de turbina</b><br>Servicio: Líquidos, gases y vapor de agua<br>Rango: 14:1<br>Exactitud: Excelente<br>Señal: Lineal<br>Error: ½ %<br>Pérdida permanente: Despreciable<br>Tramos rectos: 5-10 diámetros    | -Exactitud excelente<br>-Gran rango de caudales<br>-Mantenimiento bajo<br>-Ligero<br>-Fácil instalación<br>-Casi auto-limpiable  | -Necesita conversión de señal para determinar medición<br>-Necesita calibrar<br>-Influye viscosidad<br>-Solo fluidos limpios<br>-Necesita de tramos rectos<br>-Caro<br>-Necesita contrapresión<br>-Sujeto a desgaste<br>-Reynolds mínimo 10000 |
| <b>Electromagnético</b><br>Servicio: Líquidos<br>Rango: 30:1<br>Exactitud: Muy buena<br>Señal: Lineal<br>Error: 1%<br>Pérdida permanente: Nula<br>Tramos rectos: No necesarios                                       | -No influenciado por densidad ni viscosidad<br>-Pérdida permanente nula<br>-Bi-direccional<br>-Estático<br>-Sanitizado<br>-Auto-limpiable  | -Caro<br>-Voluminoso y pesado en tamaños grandes<br>-No funcional con gas ni fluidos no conductores<br>-Limitación por temperatura<br>-Necesita calibrar<br>-Necesita potencia eléctrica   |
| <b>Medidor de impacto</b><br>Servicio: Líquidos, gases y vapor de agua<br>Rango: 10:1<br>Exactitud: Mediana<br>Señal: Cuadrática lineal<br>Error: 2%<br>Pérdida permanente: Pequeña<br>Tramos rectos: 5-10 diámetros | -Barato<br>-Casi estático<br>-Ideal para fluidos muy viscosos<br>-Ideal para caudales bajos<br>-Instalación fácil  | -Necesita de tramos rectos<br>-Necesita calibrar   |
| <b>Medidor de torbellinos</b><br>Servicio: Líquidos, gases y vapor de agua<br>Rango: 20:1<br>Exactitud: Buena<br>Señal: Lineal<br>Error: 1%<br>Pérdida permanente: Baja<br>Tramos rectos: 5-10 diámetros             | -Precio razonable<br>-Mantenimiento bajo<br>-No necesita calibrar<br>-No influyen la viscosidad ni densidad<br>-Estático<br>-Instalación sencilla<br>-Independiente del tamaño del tubo                                | -No adecuado para líquidos sucios ni abrasivos<br>-No adecuado para líquidos viscosos<br>-Necesita tramos rectos<br>-Limitación de velocidad en líquidos por cavitación<br>-Necesidad de velocidad mínima                                      |

Tabla 2.1 Características de los elementos de medición de flujo (continuación).



## 2.10 Medición de nivel

Uno de los parámetros más comunes e importantes en todo tipo de industria, es la medida y control de nivel de producto en los recipientes, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas.

El uso de la electrónica con el microprocesador permite añadir inteligencia a distintas variables de proceso (flujo, presión temperatura, etc.) en donde la medición de nivel no es la excepción. El transmisor de nivel “inteligente” puede medir el nivel real (en ocasiones la creación de espuma flotando en el tanque produce errores en la medición por otros medios, el transmisor inteligente compensa o elimina la influencia de esto), elimina las falsas alarmas (producido por olas en la superficie del tanque ocasionadas por el agitador) y permite la fácil calibración del instrumento desde cualquier punto de la línea de transmisión.

El nivel se define como la altura de llenado de un material líquido o sólido, por ejemplo, en un tanque o recipiente. Generalmente, la posición de la superficie se mide relativa a un plano de referencia, usualmente el fondo del tanque. Si la superficie del producto no es plana, el nivel se define como la altura promedio del área que constituye la frontera o límite del material.

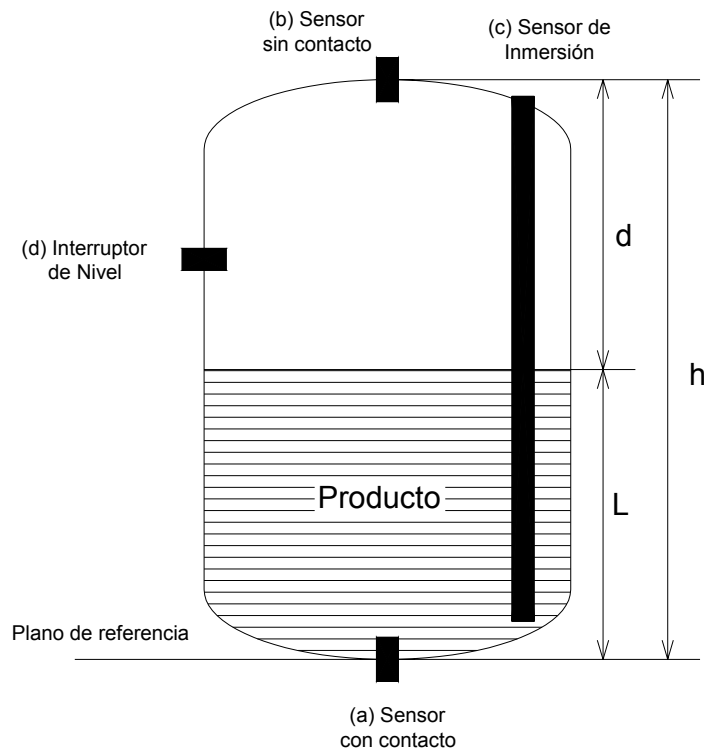


Fig. 2.25 Representación de un tanque con material líquido o sólido, el material a ser medido. El sensor de nivel su puede montar (a) teniendo contacto con el producto en el fondo, (b) sin tener contacto en la parte alta, (c) como un sensor intrusivo o de inmersión, o (d) a los lados como un interruptor de nivel.

Existen varios métodos modernos y clásicos para medir el nivel del producto en el proceso y en tanques de almacenamiento en la industria química, petroquímica, farmacéutica, del agua, alimentos; y en algunas otras aplicaciones. Típicamente, la altura de los tanques varían aproximadamente entre 0.5 m y 40 m.

Se pueden distinguir dos tipos de formas de medición de nivel en estos: (1) de medición continua de nivel (indicadores de nivel, LI), e (2) interruptores de nivel (LS) (por ejemplo para detectar un límite de la alarma para prevenir sobrellenado). La figura 2.25 muestra la forma principal de operación para la medición de nivel. Cada sistema continuo puede ser utilizado también como un interruptor programable. Muchos dispositivos de medición de nivel se montan en la parte superior del tanque y miden principalmente la distancia  $d$  entre su posición de montaje y la superficie del producto. Entonces se calcula en nivel,  $L$ , definiendo la altura del tanque como una constante,  $h$ , como se muestra en la figura 2.25, y expresado como:  $L = h - d$

En la selección correcta de un instrumento para la medición de nivel intervienen en mayor o menor grado los siguientes factores:

- a) Rango de medición.
- b) Naturaleza del fluido y condiciones de operación.

## 2.11 Medición de nivel de líquidos

Los instrumentos medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, ya sea la altura de líquido con respecto a una línea de referencia, la presión hidrostática, el desplazamiento producido en un flotador por el mismo líquido en el tanque contenedor o bien aprovechando características eléctricas del líquido.

Una de las principales razones que soportan la medición de nivel en la industria, es que diferentes materiales y diferentes fases del mismo material tienen diferentes densidades. Esta ley básica de la naturaleza puede ser utilizada para medir el nivel mediante la presión diferencial (aquella en el fondo del tanque relativa a aquella del vapor en el espacio o a la presión atmosférica) o mediante un flotador o desplazador que depende de la diferencia de densidades entre fases.

Los instrumentos de medida directa se dividen en:

- Sonda
- Cinta y plomada
- Vidrio de nivel
- Flotador y desplazador

Los dispositivos que miden la presión hidrostática son:

- Medidores manométricos
- Medidores de burbujeo (tubos de burbujeo)
- Medidores de presión diferencial de diafragma

Por su parte, los instrumentos que utilizan las características eléctricas del líquido para medir su nivel son los siguientes:

- Medidores conductivos
- Medidores capacitivos
- Medidores ultrasónicos
- Medidores de radiación
- Medidores de láser

## **2.12 Medición de nivel de líquidos de medida directa**

### **Sonda, Cinta y plomada**

El medidor de Sonda esta construido por una varilla graduada o regla con una longitud adecuada para ser introducida en el tanque, por lo que la medición de nivel estará determinada por la lectura directa de la longitud mojada. Para utilizar este método de medición, el tanque debe estar abierto a presión atmosférica. Una variante de este medidor es el tipo gancho, en donde a la varilla graduada se le adiciona un gancho en su extremo y se sumerge en el seno del fluido, se levanta y cuando el gancho rompe la superficie del líquido, entonces puede medirse el nivel en el tanque. El medidor de Cinta y plomada consiste en un carrete que desenrolla una cinta graduada en cuyo extremo esta una plomada. Este método es básicamente el mismo que el de sonda, sólo que el medidor de cinta se utiliza cuando es difícil que la varilla graduada tenga acceso al fondo del tanque.

Estos mecanismos tienen serias limitaciones y su empleo se limita a medición de nivel de líquidos en tanques a presión atmosférica y en condiciones completamente seguras de operación. Por ello, se han desarrollado otros métodos de medición para condiciones de operación más severas, como los que a continuación se describen.

### **Vidrios de nivel**

Este método es uno de los más antiguos y de los más simples para la medición continua de nivel de líquidos contenidos en un tanque. Se usa solamente cuando se requiere indicación local directa sobre el proceso y cuando el líquido es (apreciablemente) limpio. Las mirillas y los manómetros de vidrio consisten simplemente en un vidrio transparente o tubo plástico (transparente), adjunto al tanque; de tal manera que la cabeza del líquido en el tubo sea igual al nivel del líquido en el tanque. Una escala calibrada marcada en el tubo o colocada dentro de éste, proporciona un medio conveniente para la toma de lectura. La lectura del nivel se efectúa con un cristal a reflexión o bien por transparencia.

El más sencillo de estos vidrios de nivel es el tipo tubular, que no es otra cosa más que un simple tubo transparente de vidrio con válvulas para conexión al equipo y drene. El material del vidrio es de borosilicato, la longitud puede ser de hasta 72" soportando presiones de hasta 260 psig y 425 °F; las válvulas son en construcción de acero al carbón o acero inoxidable diseñadas para soportar presiones de hasta 4000 psig. Este es un dispositivo muy sencillo y presenta limitaciones para condiciones de operación más severas, además de que es frágil. Por ello en la práctica, sólo se emplea cuando la presión es inferior a los 4 Kg/cm<sup>2</sup> (aunque puede soportar más), con líquidos no inflamables, claros, no viscosos y con el accesorio de varillas de protección. Todo esto para un mejor funcionamiento del proceso.

Para condiciones de trabajo más difíciles el cristal es grueso, de sección rectangular y esta protegido por una armadura metálica. Su diseño consiste en un vidrio de nivel hecho a base de una caja metálica en acero inoxidable, con una mirilla plana (de cristal suficientemente grueso) en su parte lateral, sujeto con tornillos mediante abrazaderas y bridas adecuadas. Este tipo de vidrio de nivel puede ser de dos clases; de reflexión, cuando sólo lleva un cristal con unas muescas prismáticas a lo largo de la superficie interior y el fondo de la caja es sólido, o de transparencia, cuando también el fondo es de cristal, con lo que tenemos un cristal a cada lado de la cámara, en cuyo caso los cristales no necesitan muescas prismáticas en la parte interior.

En el caso de que la luz ambiente en la parte posterior no fuera suficiente, se emplean lámparas eléctricas con un soporte adecuado que se fija al instrumento. Cuando el aparato va instalado en un área con peligro de explosión, el alojamiento de la citada lámpara debe ser adecuado para la peligrosidad del ambiente.

Los vidrios de nivel de reflexión (reflex) se usan para medir fluidos limpios, incoloros y no viscosos. Su empleo es muy adecuado cuando exista una interfase liq-gas en el que el líquido sea transparente y no deje depósitos en el vidrio. Su diseño permite soportar presiones de trabajo de hasta 3000 psig a 100 °F.

Los vidrios de nivel de transparencia (transparent) se usan para servicios donde el fluido es coloreado o viscoso, así como para las interfases entre líquidos (fase aceitosa-fase acuosa). En el caso de vapor de agua o de fluidos corrosivos para el cristal, deben emplearse como protección láminas de mica transparente de espesor adecuado. Estos vidrios de nivel soportan presiones de trabajo de hasta 2000 psig a 100 °F y deben suministrarse con iluminadores adecuados a la clasificación eléctrica del área de instalación.

La figura 2.26 muestra un vidrio de nivel tipo reflex. Las conexiones, los accesorios y la forma de acotar las longitudes son iguales para el vidrio de nivel tipo transparente.

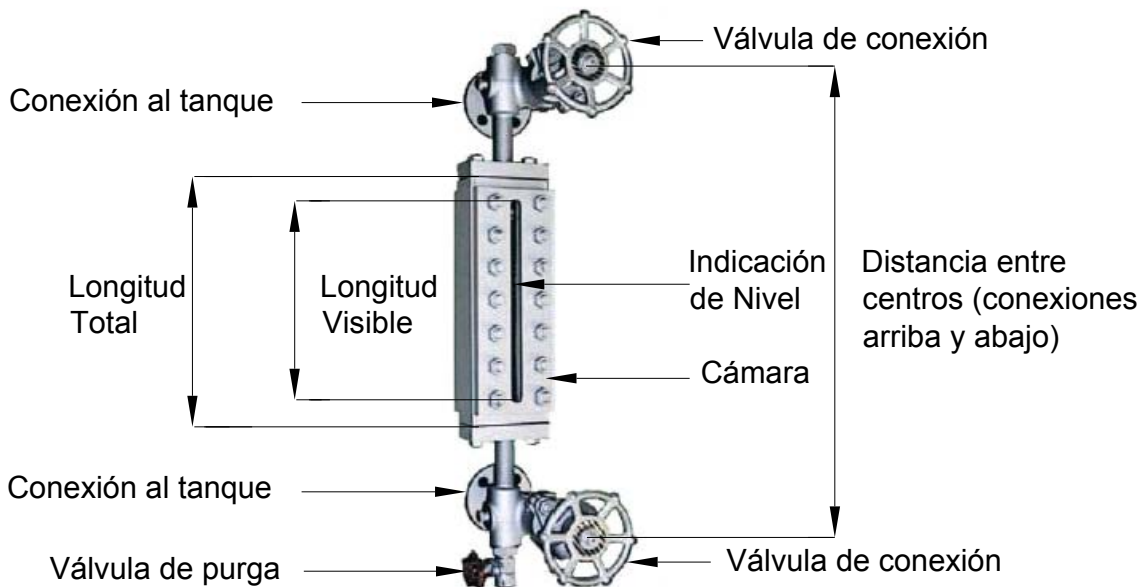


Fig. 2.26 Vidrio de nivel tipo reflex.

Cuando el fluido se encuentra a una temperatura muy baja, para evitar que la formación de hielo cubra el cristal impidiendo ver el nivel, se emplean unos bloques de plástico adecuado (generalmente una resina acrílica) que se adhiere al cristal a lo largo de él, con un espesor suficiente para que nunca sea cubierto por el hielo. El espesor de estos bloques dependerá de la temperatura, según se muestra a continuación:

| <b>Temperatura</b> | <b>Espesor</b> |
|--------------------|----------------|
| De 0 °C a 19 °C    | 38 mm          |
| De 20 °C a 49 °C   | 75 mm          |
| De 50 °C a 99 °C   | 150 mm         |
| Menos de 100 °C    | 200 mm         |

Para el caso de fluidos especialmente viscosos que fluirían difícilmente en el interior de las cajas normales, se debe emplear niveles con la caja más ancha; generalmente son de forma cilíndrica con un diámetro interior aproximado de 50 mm.

Por razones constructivas los vidrios de nivel se fabrican en tamaños de vidrio de una cierta visibilidad, los cuales son unidos en serie para completar en nivel deseado y formar secciones de determinada visibilidad. Estos tamaños se les llama por números y por motivos prácticos se han normalizado en nueve tamaños estándar como se indica a continuación:

| No. de vidrio | Visibilidad mm. |
|---------------|-----------------|
| 1             | 95              |
| 2             | 121             |
| 3             | 146             |
| 4             | 171             |
| 5             | 200             |
| 6             | 232             |
| 7             | 260             |
| 8             | 302             |
| 9             | 321             |

A veces el rango de nivel a medir puede ser tal, que se necesiten un número excesivo de secciones, lo cual supondría un instrumento con un peso excesivo, por lo que es adecuado construir varios de tamaño más pequeño y montarlos en el recipiente de forma que se solapen. En la práctica, un vidrio de nivel debe de ser de a lo más 4 secciones cubriendo una longitud visible de a lo más 1.4 metros; esto es porque aun y cuando puede diseñarse de fabricación un vidrio de nivel de 9 secciones que cubrieran una longitud visible de 3.2 metros, resultaría muy caro, pesado y poco práctico.

Por ello, si es requerida una mayor longitud, se usan vidrios de nivel traslapados con conexiones independientes. La tabla 2.2 muestra algunas longitudes visibles estándar en función de las secciones y las válvulas de conexión.

| Número. de vidrio | Número de secciones | Longitud Total | Longitud Visible | Tamaño del Vidrio | Conexiones arriba y bajo de ½" tipo unión hembra | Conexiones arriba y bajo de ¾" tipo unión hembra |
|-------------------|---------------------|----------------|------------------|-------------------|--|--|
| 1                 | 1                   | 133            | 95               | 95                | 279  | 295  |
| 3                 | 2                   | 368            | 330              | 146               | 514  | 530  |
| 6                 | 3                   | 810            | 771              | 232               | 956  | 971  |
| 7                 | 4                   | 1194           | 1156             | 260               | 1340   | 1356   |
| 7                 | 5                   | 1492           | 1454             | 260               | 1638   | 1654   |
| 8                 | 6                   | 2038           | 2000             | 302               | 2184   | 2200   |
| 8                 | 7                   | 2378           | 2340             | 302               | 2524   | 2540   |
| 8                 | 8                   | 2711           | 2680             | 302               | 2864   | 2880   |
| 9                 | 9                   | 3229           | 3191             | 321               | 3375   | 3391   |

Notas:

Esta tabla no presenta todos los valores posibles que existen en el mercado para el diseño de vidrios de nivel; sólo muestra algunos de estos. Para ver la tabla completa deberá consultarse con los proveedores de estos equipos, o en el catálogo Daniel Measurement and Control, Liquid Level Gages and Valves.

Especificaciones aplicables a Reflex y Transparent.

Longitudes en mm.

Tabla 2.2 Valores de longitud para vidrios de nivel.

Otro de los elementos fundamentales de un vidrio de nivel consiste en las válvulas de aislamiento o conexión con el recipiente; estas pueden ser de dos tipos, a saber: de cuerpo recto usadas en vidrios de cámara chica con conexiones laterales, o bien las llamadas "offset" (se les llama de esta forma porque las conexiones de las válvulas del indicador y del drene están descentradas 7/8" del centro de las conexiones del tanque) usadas para vidrios de cámara grande con conexiones arriba y abajo, que permiten una limpieza interna mecánica del vidrio de nivel, sin necesidad de desmontarlo. Normalmente estas válvulas especiales para niveles ópticos llevan incorporada una esfera de retención para evitar derrames en caso de rotura del cristal.

El conjunto nivel y válvulas deben escogerse de forma tal que sean capaces de resistir como mínimo 1.5 veces la presión máxima de trabajo o  $70 \text{ Kg/cm}^2$  a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  lo que sea mayor, en el recipiente, debiendo tener en cuenta que los niveles de transparencia son menos robustos que los de reflexión y que los límites de presión y temperatura de los mismos son menores que en uno equivalente del tipo reflexión, siendo necesario consultar los catálogos de los fabricantes para escoger el adecuado a cada necesidad.

Las válvulas están equipadas con check de bola de acero inoxidable, colocadas corriente arriba del asiento, las cuales instantáneamente cortan el fluido del medio indicado en caso de rompimiento del cristal del indicador. Con conexiones al recipiente y al medidor tipo unión sencilla (de ¾" macho al recipiente, ½" hembra al medidor y de ½" hembra al drene normalmente; conexiones NPT). La check de bola puede ser omitida, según se requiera. Las válvulas pueden ser con cuerpo e interiores en acero inoxidable. Los materiales usados deben estar de acuerdo, o exceder, los requerimientos de AISI, ASTM y/o API, ASME para las presiones recomendadas. Las válvulas pueden suministrarse con bridas, conexión soldada, prolongación ajustable, vástago sólido (sin unión) y conexión de unión esférica. El uso de las uniones esféricas en entradas y salidas con indicadores conectados arriba y abajo, es particularmente valioso, por

temor a que las conexiones del tanque no sean perfectamente paralelas. Para especificar un vidrio de nivel deberá de conocerse primero la distancia de centro a centro de las conexiones al tanque y en base a ello se conocerá la distancia visible. La figura 2.27 muestra una representación general de las conexiones para vidrios de nivel de cualquier tipo.

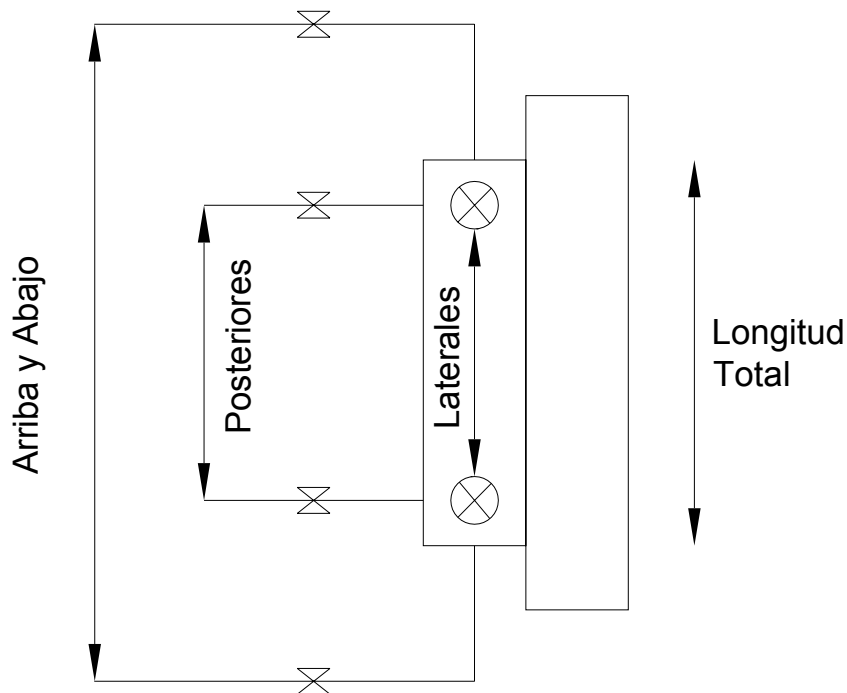


Fig. 2.27 Tipos y posición de conexiones para vidrios de nivel.

## Flotador

El flotador es un sencillo dispositivo para medir nivel cuando el volumen es grande, o cuando se desea detectar el nivel en un punto determinado del tanque. Estos se encuentran “nadando” en la superficie del líquido debido a la flotabilidad, ya que la densidad del flotador es menor a la densidad del líquido. La figura 2.28 (a) muestra el principio de operación, el contrapeso balancea al flotador que nada en la superficie del líquido, su posición representa el nivel. La posición del flotador puede ser observada visualmente (a), o transferida a una pantalla externa o a un transmisor de nivel (b). El flotador puede acoplarse al transmisor magnéticamente, como se muestra en la figura 2.28 (b), en donde se aprecia un interruptor de nivel que utiliza un relee de laminas magnéticamente acoplado con el flotador. También, un sensor lineal magnético puede determinar la posición del flotador. El flotador contiene un magneto que hace contacto con el interruptor de láminas dentro del tubo guía.

Si el flotador es muy plano, se llama sensor de placa. Esta placa es guiada mecánicamente, por ejemplo por un control servo, en la superficie hasta que se detecta un levantamiento. Para sólidos, se pueden utilizar flotadores perpendiculares especialmente moldeados. Aunque el flotador en sí puede tener formas muy variadas y de distintos materiales dependiendo del fluido a medirse.

El flotador conectado directamente tiene el inconveniente de que las partes móviles están expuestas al fluido y pueden romperse y de que el tanque no puede estar sometido a presión. Ya que el flotador puede agarrotarse en el tubo guía por un eventual depósito de sólidos o cristales que el líquido pueda contener, y si los tubos guía son muy largos, pueden dañarse cuando aparezcan olas bruscas en la superficie del líquido, o ante una caída brusca del nivel en el tanque. Pueden emplearse en tanques abiertos, a presión o a vacío sin ningún problema.

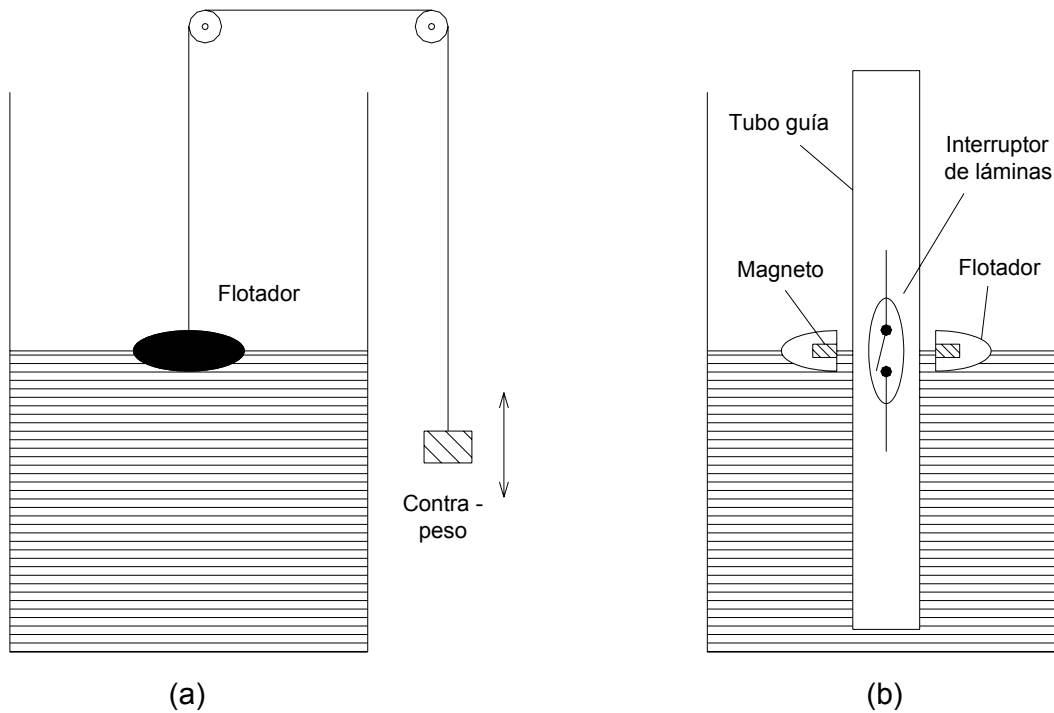


Fig. 2.28 Principio de operación e interruptor de nivel tipo flotador.

### Flotadores continuos

De los distintos diseños utilizados para la medición continua de nivel, el más antiguo y probablemente el más exacto en su tipo, es el medidor de tipo cinta. En este diseño, una cinta o cable conecta el flotador dentro del tanque a un tablero indicador o a un carrete indicador montado en el exterior del tanque. El flotador es guiado hacia arriba y abajo mediante alambres guía. Estos indicadores de nivel se usan en aplicaciones remotas autónomas o pueden ser suministrados con electrónica de transmisión de datos para su integración a los sistemas de control de la planta.

Para instalar el medidor de cinta, se requiere un orificio en la parte superior del tanque. Si se proporciona el mantenimiento adecuado, estos medidores son exactos hasta  $\pm 4$  pulgadas. Es importante mantener los alambres guías bajo tensión, limpios y libres de corrosión, y asegurarse de que la cinta nunca toca el tubo protector dentro del cual se desplaza. Si esto no es así, el flotador se puede atorar con los alambres guía o la cinta puede atorarse con el tubo (esto puede suceder si el nivel no cambia por periodos largos o si el tanque está ubicado en una región húmeda).



Otro indicador continuo es el de tipo magnético, el cual consiste de un flotador magnético que viaja arriba y abajo dentro de un tubo largo y no magnético (usualmente de acero inoxidable). El tubo se conecta a las boquillas bridadas a los lados del tanque. La columna del tubo se suministra con un indicador visual que consiste de elementos de placa triangular. Estos elementos se voltean (de verde a rojo, u otro color) cuando el magneto en el flotador alcanza su nivel.

### **Interruptores de nivel tipo flotador**

La fuerza de flotación disponible para operar un interruptor de tipo flotador (la flotación neta) es la diferencia entre el peso del fluido desplazado (flotación bruta) y el peso del flotador. Los flotadores se encuentran en formas esféricas, cilíndricas y en otras variedades. Pueden ser fabricados de acero inoxidable, teflón, monel, y otros varios materiales plásticos. Los rangos típicos de temperatura y presión son -40 °C a 80 °C (-40 °F a 180 °F) y hasta 150 psig para flotadores de plástico o de caucho, y -40 °C a 260 °C (-40 °F a 500 °F) y de hasta 750 psig para flotadores de acero inoxidable. Los tamaños estándar se encuentran disponibles desde 1 hasta 5 pulgadas de diámetro, y pueden soportar un máximo de presión de hasta 400 bar a 250°C.

Los flotadores deben ser siempre más ligeros que la gravedad específica mínima esperada para el fluido del proceso. Para líquidos limpios es suficiente una diferencia de 0.1 SG, mientras que para aplicaciones viscosas o “sucias” se recomienda una diferencia de al menos 0.3 SG. Esto proporciona fuerza adicional para vencer la resistencia debida a la fricción, y a la forma del material. En aplicaciones sucias, los flotadores deben tener accesibilidad para su limpieza.

Los flotadores pueden sujetarse a brazos mecánicos o palancas y pueden accionar mecanismos eléctricos, neumáticos o mecánicos. El interruptor en sí puede ser mercurio, contacto seco (no siempre energizado, de tipo láminas de acción rápida), sellado herméticamente, o neumático. El interruptor puede usarse para activar un display, anunciador, bomba o válvula. Los contactos eléctricos pueden ser clasificados como de servicio ligero (10-100 volt amp, v.a.) y de servicio pesado (hasta 15 A @ 120 V c.a.).

Una clase especial de flotador, es el desplazador, ya que en sí es un flotador restringido, y aunque no puede apreciarse directamente la medida de nivel como es el caso del flotador, si puede verse en un una pantalla en el exterior como un ángulo de desplazamiento o en un display en unidades de ingeniería al utilizarlo como transmisor. A continuación se mencionan las principales características de estos instrumentos.

### **Desplazador (flotador restringido)**

Los flotadores son dispositivos de balanceo de movimiento que se mueven arriba y abajo con el nivel del líquido. Los desplazadores son dispositivos de balance de fuerza (flotadores restringidos), cuyo peso aparente varía de acuerdo al principio de Arquímedes: “La fuerza de flotación ejercida sobre un cuerpo es igual al peso del fluido desplazado”. A medida que el nivel cambia alrededor del desplazador (estacionario y de diámetro constante), la fuerza de flotación varía en proporción y puede detectarse como una indicación de nivel. Cuando el nivel sube, el peso aparente del desplazador disminuye en proporción lineal con el nivel.

Tanto flotadores como desplazadores pueden ser encontrados como transmisores continuos de nivel así como interruptores puntuales. En aplicaciones industriales, los desplazadores son favorecidos frecuentemente ya que estos no requieren movimiento. Además, la fuerza puede ser detectada frecuentemente con mayor exactitud que la posición.

Sin embargo, este dispositivo presenta el inconveniente del riesgo de depósitos de sólidos que afecten la precisión de la medida y sólo es apto para medida de pequeñas diferencias de nivel (2 metros como máximo), aunque es el dispositivo de mayor confiabilidad empleado en la medición de nivel de 0-1.3 mts. Puede ser empleado en tanques abiertos o cerrados, a presión y a vacío.

El análisis matemático para conocer la fuerza de flotación del objeto y por ende el nivel, debe de considerar los siguientes factores: el producto en el tanque tiene un efecto debido a su densidad  $\rho$ , este efecto puede ser (1) el producir la flotabilidad de un sólido sumergido en el líquido, o (2) ejercer una fuerza debido a su peso. Considérese la figura 2.29. La sección transversal  $A$  del cuerpo es supuesta como constante a lo largo de su longitud  $b$ . El peso de la fuerza  $F_G$  debida a la gravedad  $g$  y la masa  $m$  es:

$$F_G = gm = gAb\rho_D$$

La fuerza de flotación  $F_B$  se calcula:

$$F_B = gAL_d\rho_L + gA(b - L_d)\rho_A$$

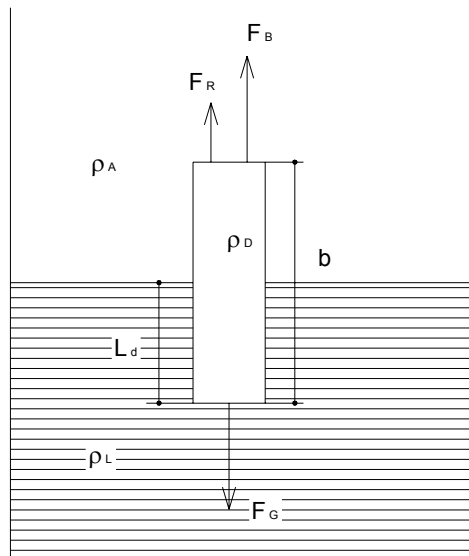


Fig. 2.29 Parámetros de un cuerpo sólido sumergido en un líquido.

Y la fuerza resultante a ser medida, se calcula:

$$F_R = F_G - F_B$$

De donde se obtiene como resultado el nivel,  $L_d$ , referenciado al límite inferior del desplazador:

$$L_d = \frac{b(\rho_D - \rho_A) - \frac{F_R}{gA}}{\rho_L - \rho_A}$$

Por ello, los desplazadores miden la flotabilidad de un cuerpo sólido que se sumerge parcialmente en el líquido, esto es, se mide el cambio en su peso. La densidad del cuerpo debería ser mayor a la del líquido, de otra manera, el rango de medición se vería limitado (hasta que el desplazador flotara en el líquido). En otra versión de este instrumento, un medidor servo mueve el desplazador arriba y abajo para detectar la interfase entre la atmósfera y el líquido, o entre dos líquidos diferentes, mediante la medición del cambio en la flotabilidad.

### Desplazadores continuos

Los desplazadores son populares como transmisores de nivel y como controladores locales de nivel, particularmente en la industria del petróleo, (refinería y petroquímica). Sin embargo, no son adecuados para servicio de tipo fangoso o lodoso debido a que al ser cubierto el desplazador cambia su volumen y por lo tanto su fuerza de flotación. Son mas exactos y confiables para servicios que involucren líquidos limpios de densidad constante. Deben ser provistos de compensación por temperatura, particularmente si las variaciones en la temperatura del proceso producen cambios significativos en la densidad del fluido de proceso. Aunque se debe garantizar el buen funcionamiento del instrumento en al menos un rango de -40 °C a 120 °C.

Cuando se usa como transmisor de nivel, el desplazador, el cual siempre es más pesado que el fluido de proceso, se suspende de un brazo de torque. Su peso aparente causa un desplazamiento angular del tubo de torque (un resorte de torsión, un sello de presión sin fricción). Este desplazamiento angular es proporcional al peso del desplazador.

El volumen estándar de un desplazador es de 100 pulgadas cúbicas, y las longitudes más comúnmente utilizadas son 14, 32, 48, 60, 72, 84, 96, 108 y 120 pulgadas, generalmente el de 14" es de satisfactoria la operación. En adición a los tubos de torque, la fuerza de flotación puede detectarse mediante otros sensores de fuerza, incluyendo instrumentos de resorte y de balance de fuerzas. Cuando la fuerza de flotación se balancea con un resorte, hay cierto movimiento, mientras que con un detector de balance de fuerzas, el desplazador se mantiene en una posición y solo varía el nivel sobre el desplazador.

Las unidades de desplazamiento se pueden encontrar disponibles con salidas tanto neumáticas como electrónicas y pueden también ser configuradas como controladores locales auto-contenidos. Cuando se utilizan para servicio en aguas, un desplazador de 100 pulgadas cúbicas generará una fuerza de flotación de 3.6 libras. Por esto, los tubos de torque estándar se calibran para un rango de fuerzas de 0 a 3.6 libras fuerza, y los tubos de torque de paredes delgadas para un rango de 0 a 1.8 libras fuerza.

Para las refinerías y otros procesos que son operados continuamente, la API recomienda que los desplazadores se instalen en tubos verticales externos con medidores de nivel y válvulas aisladoras. Esto es debido a que el equilibrio de pesos para este dispositivo, es muy sensible a vibraciones externas y perturbaciones en el proceso, para soslayar estos inconvenientes se prefiere instalarse afuera y no dentro del recipiente, además de esta forma es posible recalibrar o dar mantenimiento al desplazador sin tener que interrumpir el proceso.

## Interruptores tipo desplazador

Mientras que un flotador usualmente sigue el nivel del líquido, el desplazador permanece parcialmente o completamente sumergido. Como se muestra en la figura 2.30, el peso aparente del desplazador se reduce a medida que éste se va cubriendo por más líquido. Cuando el peso cae por debajo de la tensión del resorte, se activa el interruptor. Los interruptores tipo desplazador son más confiables que los flotadores normales en aplicaciones turbulentas, con sobrecargas, o espumosas. Es fácil cambiar su configuración ya que los desplazadores pueden ser movidos a cualquier lugar a lo largo del cable de suspensión (hasta 50 pies). Estos interruptores se pueden intercambiar entre tanques ya que las diferencias entre las densidades de los procesos pueden acomodarse cambiando la tensión del resorte de soporte.

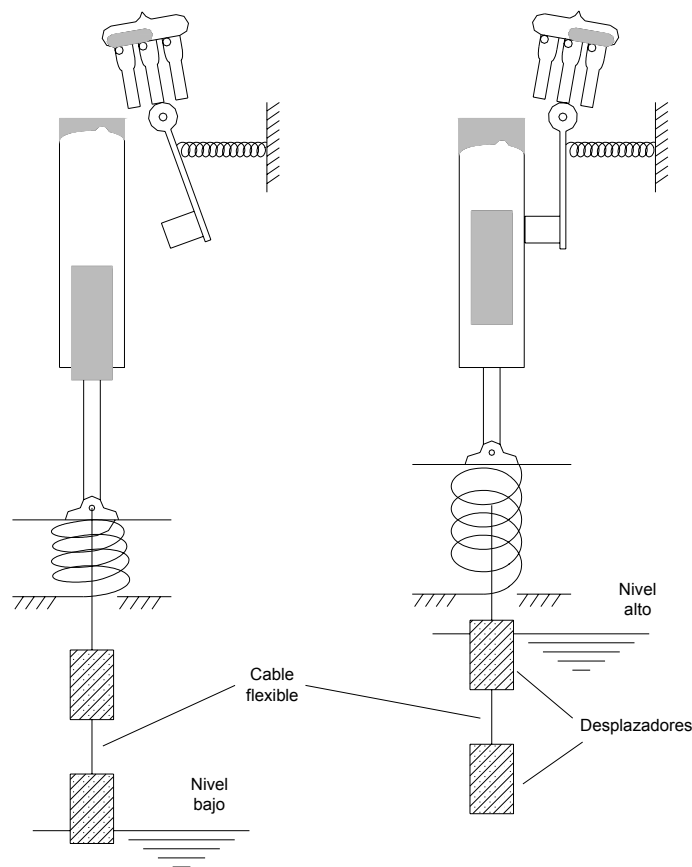


Fig. 2.30 Interruptor de nivel tipo desplazador.

La prueba de funcionamiento apropiado de un interruptor tipo flotador puede requerir el llenado del tanque hasta el nivel de actuación, mientras que el interruptor tipo desplazador puede probarse simplemente levantando la suspensión. Los interruptores de tipo desplazador se pueden encontrar con cajas de servicio pesado y bridas para aplicaciones de hasta 5000 psig a 150 °C (300 °F), adecuados para su uso en acumuladores hidráulicos, receptores de gas natural, purificadores de alta presión, y tanques de flasheo de hidrocarburos por ejemplo.

## Aplicaciones de interfase

Cuando se mide la interfase entre un líquido pesado y uno ligero (como aceite en agua), la conexión superior del desplazador se coloca dentro del lado ligero y la conexión inferior en el lado del líquido pesado. Si la salida de tal transmisor se ajusta a cero cuando la cámara esté llena con el líquido ligero, y a 100% cuando está lleno con la fase pesada, la salida corresponderá al nivel de la interfase. Naturalmente, cuando se está midiendo la interfase, es esencial que las dos conexiones de la cámara del desplazador se localicen en los dos lados de los diferentes líquidos y que la cámara esté siempre inundada. El diámetro del desplazador se puede cambiar para igualar la diferencia en las densidades de los líquidos, y la longitud del desplazador puede ser fijada para igualar el rango vertical de la variación del nivel de la interfase.

Los flotadores normales pueden utilizarse también para detección de la interfase si la diferencia de SG entre los dos líquidos de proceso es más que 0.05. En tales aplicaciones, se requiere que la densidad del flotador sea mayor que la del líquido ligero y menor que la del líquido pesado. Cuando se seleccione de tal forma, el flotador seguirá el nivel de la interfase, y, en servicios limpios, proporcionará un desempeño aceptable.

## 2.13 Medición de nivel de líquidos por presión hidrostática

### Medidores manométricos

La medición manométrica de nivel consiste en un manómetro conectado directamente en la parte inferior del tanque. De esta forma, el manómetro mide la presión debida a la altura del líquido que existe entre el nivel del tanque y el eje del instrumento. El peso del líquido estará determinado por:

$$P = h\rho g$$

Donde: P = presión del líquido en N/m<sup>2</sup>

h = la altura del líquido en m

$\rho$  = la densidad del líquido en kg/m<sup>3</sup>

g = la aceleración de la gravedad en m/seg<sup>2</sup>

Ajustando en el eje del instrumento como el nivel bajo hasta el nivel máximo, la pluma del manómetro se moverá dentro de un rango de 90° aproximadamente, lo cual es muy pequeño. Por lo mismo es necesario emplear elementos de medida de tipo fuelle. La medición por este método esta limitada a tanques abiertos y es influenciada por la densidad del fluido, sólo es útil en líquidos no corrosivos, que no coagulen ni tengan sólidos en suspensión; pues si fuera en caso contrario, el fuelle podría bloquearse perdiendo elasticidad.

### Medidores de burbujeo (tubos de burbujeo)

Los tubos de burbujeo proporcionan un sistema de medición sencillo y poco caro (aunque con menos exactitud,  $\pm 1-2\%$ ) para aplicaciones con fluidos corrosivos o de sólidos en suspensión, ya que en este sistema el fluido no entra en contacto con el medidor ni con la tubería de conexión; sin embargo no son recomendables para líquidos altamente viscosos. Los burbujeadores utilizan aire comprimido o un gas inerte (generalmente nitrógeno) introducido por medio de un tubo de inmersión hasta el nivel mínimo del tanque.

El flujo del gas se regula a una velocidad constante (generalmente alrededor de 500 cc/min). Un regulador de presión diferencial a través de un rotámetro mantiene el flujo constante, mientras que el nivel del tanque determina la contra presión.

De esta forma, se inyecta el aire comprimido o el gas inerte a través de la tubería de conexión y la presión necesaria para hacer salir burbujas es exactamente igual a la presión de la columna del líquido. Esto significa que la presión del aire en la tubería equivale a la presión hidrostática ejercida por la columna del líquido.

A medida que el nivel baja, la contrapresión se reduce proporcionalmente y se puede leer en un medidor de presión calibrado en porcentaje de nivel, o en un manómetro de fuelle o transmisor, que pueden ser colocados cualquiera de estos hasta una distancia de 200 metros. El tubo de inmersión debe tener un diámetro relativamente grande (alrededor de 2 pulgadas) para que así la caída de presión sea despreciable. El extremo inferior del tubo de inmersión debe colocarse lo suficientemente lejos del fondo del tanque para que no se pueda taponar con sedimentos o lodos. Como alternativa para ubicar el tubo de inmersión, este puede estar en una cámara externa conectada al tanque.

En tanques presurizados, se requieren dos tubos para medir el nivel. Las dos contra presiones de los dos tubos se pueden conectar a los dos lados de un manómetro en “u”, a un medidor de presión diferencial, o a una celda o transmisor d/p. La tubería neumática en un sistema de burbujeo debe estar inclinada hacia el tanque para que los vapores condensados se drenen de regreso si la presión de purga se pierde.

Los burbujeadores consumen gases inertes, los cuales pudieran acumularse y formar depósitos en el equipo de proceso. Estos también requieren mantenimiento para asegurar que siempre hay suministro para purga, y que el sistema está ajustado y calibrado adecuadamente. La figura 2.31 muestra el principio de operación de un tubo de burbujeo.

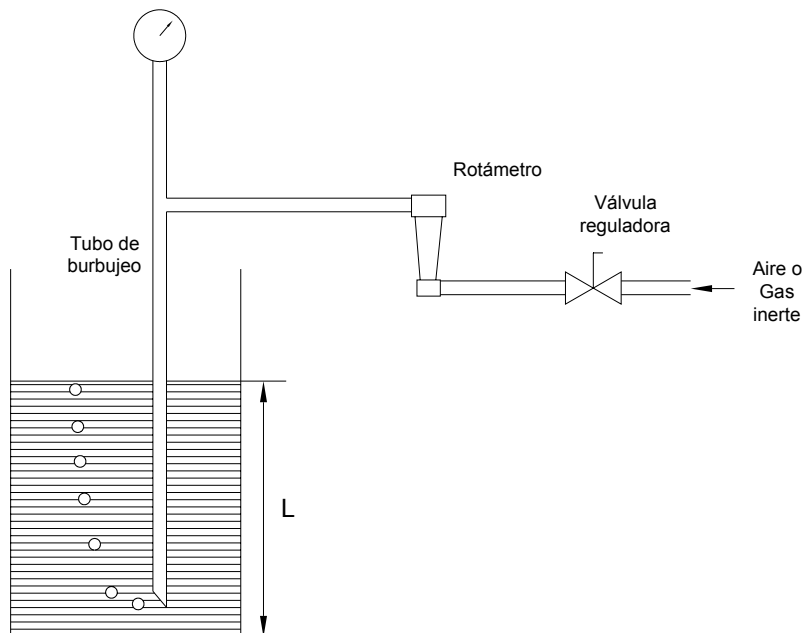


Fig. 2.31 Principio de operación de un tubo de burbujeo.

## Medidores de presión diferencial de diafragma

La medición por presión diferencial es un sistema de instrumentación clásico y muy popular. El sistema de medida puede ser de fuelles o de equilibrio de fuerzas (en el capítulo 1 se estudio en detalle el funcionamiento de esta clase de transmisor electrónico) mediante diafragmas de pequeño desplazamiento (transmisor de presión diferencial de diafragma) igual al que se emplea en la medición de caudal.

Cuando la medición se hace por fuelles, estos son contruidos con dos cámaras, una para la alta presión y otra para la baja. La alta presión comprime el fuelle correspondiente y con ello se acciona un mecanismo de palanca unión con un cable conectado a un eje exterior y cuyo movimiento actúa sobre el transductor neumático o eléctrico. Se adicionan además dos anillos de sello que cierran herméticamente el paso del líquido de llenado de un fuelle a otro, este líquido transmite hidráulicamente la presión en los fuelles y debe ser de características que no presente problemas con el fluido de proceso, del cual se medirá el nivel. Con estos sellos se protege contra sobrepresión al sistema de medición.

En la actualidad esto es algo obsoleto, por lo que la medición se realiza empleando por lo general diafragmas como elemento sensor en vez de fuelles. La construcción es exactamente igual al sistema de fuelles, sólo que en vez de estos, son colocados dos diafragmas que realizan la misma función que los fuelles, con la diferencia de que al utilizar diafragmas, el desplazamiento volumétrico es casi nulo, es decir, el movimiento del diafragma es muy pequeño, lo que hace que su construcción sea más sencilla, lo cual favorece el empleo de diafragmas en vez de fuelles.

No entraremos en más detalles por ahora sobre las características de ambos sistemas, pues esto se hará en detalle en la parte correspondiente a medición de presión.

Lo que corresponde a medición de nivel por presión diferencial hay que señalar que la forma más sencilla de medición se lleva a cabo en un tanque abierto a la atmósfera, en donde se coloca un medidor de presión diferencial de tipo diafragma, y mide la presión hidrostática en el fondo del tanque. El diafragma forma parte de un transmisor neumático, eléctrico o electrónico. El transmisor por lo tanto esta instalado con una brida al tanque y puede ser la instalación del tipo diafragma al ras con la brida exterior o al ras con la pared interior del tanque, siendo la segunda opción más recomendable, pues si se trata de líquidos muy viscosos y el diafragma esta al ras con la brida exterior pudiera haber algún punto o resquicio en donde el fluido no toque por completo al diafragma.

Es conveniente tomar en cuenta que se debe colocar el eje del diafragma del medidor en el nivel cero del líquido (ver figura 2.32), de esta forma, si el instrumento se calibra en el tanque, el 0% del medidor debe de comprobarse con el nivel más bajo en el borde inferior del diafragma (ya que entre los bordes inferior y superior la señal de salida del indicador no esta en proporción directa con el nivel del tanque).

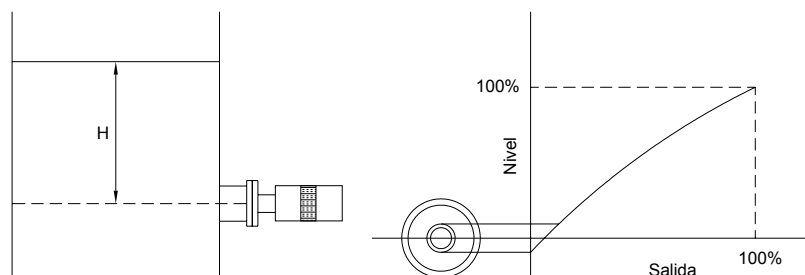


Fig. 2.32 Eje de referencia del transmisor de nivel instalado de acuerdo al nivel mínimo.

La otra forma de medición por presión diferencial requiere que el transmisor se instale por debajo de la toma de alta presión en el tanque, pues esta forma de medición se basa en columnas de presión del propio líquido. De ser posible, no por muy debajo, siendo esta localización no mayor a la altura máxima del nivel en el tanque, pues de lo contrario, la columna de líquido en la línea de alta presión sería mayor que la variación del nivel mismo, ocasionando una medición errónea del nivel en el tanque, siendo requerido un accesorio especial para corregir este error como se explicara más adelante.

De esta forma, se disponen de dos tomas, una superior y otra inferior. La conexión inferior es conectada a la parte de alta presión del transmisor correspondiente al nivel mínimo, mientras que la parte de baja presión se conecta a la parte superior del recipiente y corresponde al nivel máximo; esto es si el tanque es cerrado. En caso de que el recipiente sea abierto, la parte de baja presión se deja abierta a la atmósfera.

Observemos ambos casos conforme se describe en la figura 2.33, en el primero (a), el tanque es atmosférico, por lo tanto, cuando el nivel está al mínimo, en la conexión de alta presión existe aun una columna de líquido  $H$ , por lo que el medidor no indicara cero, provocando una medida incorrecta. Para corregir este error lo que se hace es compensar esta columna colocando otra exactamente igual en el lado de baja presión, o colocar un muelle ajustable que se oponga a la fuerza ejercida en el lado de alta presión, de tal forma que la anule y así el indicador pueda marcar cero en el nivel mínimo. Este muelle se suministra con el transmisor y se le llama de “elevación”. Este diseño debe utilizarse siempre que el tanque sea elevado y la instalación del transmisor sea muy debajo del nivel mínimo del líquido en el tanque. Esto es aplicable a tanques abiertos a la atmósfera o cerrados a presión.

Sin embargo, aun y que a elevación del tanque no sea mucha, ni el transmisor este instalado muy debajo del nivel mínimo, es recomendable de todas formas, que el transmisor tenga un muelle de elevación que se aplica en la barra de equilibrio en el transmisor y que produzca una fuerza igual al de la columna en la toma de alta presión a nivel mínimo, para garantizar una operación más satisfactoria.

En el caso de que el tanque este cerrado y a presión (figura 2.33 b) la toma de baja presión se conecta en la parte superior del recipiente (esto es debido a que si sólo se conectara un medidor de diafragma en la parte inferior como en el caso del tanque abierto, la lectura sería muy poco precisa al haber grande presión), como resultado se tendrá un transmisor de presión diferencial de diafragma con ambas tomas de presión con iguales presiones pudiendo realizar la medida correctamente; sin embargo, cuando los vapores por encima del líquido son condensables, la línea en la toma superior de baja presión se llena gradualmente con el condensado hasta llenar todo el tubo, en cuyo caso se tendría una columna de líquido adicional ( $H_2$ ) de mayor presión que la toma de alta presión ( $H_1$ ), produciendo que el transmisor indique nivel bajo cuando el nivel es alto y viceversa, debido a que la columna de presión en la toma de baja presión existe y produce una mayor presión que la toma de alta presión ( $H_1$ ) a nivel bajo, lo que llevaría a calibrar el instrumento de modo inverso: 0% a 3 psi, 100% a 15 psi, para el transmisor neumático y 0% a 4 mA, 100% a 20 mA para el electrónico.

Para corregir este inconveniente se utiliza un muelle llamado de “supresión” que se aplica a la barra de equilibrio del transmisor, de igual forma que el de elevación y que produce una fuerza igual a la diferencia entre el nivel mínimo y máximo, compensando la fuerza en el lado de baja presión.

Ambos muelles, tanto de “elevación” o de “supresión” son sencillamente un resorte ajustado a un cierto rango y que actúa sobre la barra de equilibrio de movimiento del transmisor. El resorte de elevación actúa en un sentido y el de supresión en el sentido opuesto. Los transmisores electrónicos en la actualidad están diseñados ya con este aditamento y puede ajustarse el resorte para que sea de elevación o de supresión según se requiera, o incluso tener ambos en su respectivo lado de presión.



El material del diafragma del transmisor de presión diferencial debe de ser adecuado principalmente para resistir la corrosión (acero inoxidable, inox. 316, monel, etc.). Cuando el fluido en el recipiente tenga la característica de dejar sólidos en la superficie del diafragma del transmisor, lo recomendable es recubrir el diafragma con teflón y evitar así un depósito gradual del material. Sin embargo, el movimiento del diafragma es muy pequeño y podría considerarse al sólido algo flexible, por lo cual la presión del líquido se transmite uniformemente a todo el diafragma; pero si una parte del diafragma queda rígido, el transmisor marcará erróneamente. Para evitarlo se emplea un transmisor de membranas de sello que responde no a la fuerza creada por el líquido sobre la membrana, si no a la presión transmitida.

El sistema de medida por presión diferencial también se le conoce como celda d/p y puede también emplearse en la medición de interfaces liq/liq y liq/vap, donde la amplitud está dada por la diferencia de presiones entre las dos tomas, una con el líquido menos denso y otra con el líquido más denso, pues básicamente lo que miden es la variación de densidad.

Desafortunadamente la medición por celdas d/p tiene el inconveniente de que pueden ser vulnerables a las variaciones de densidad en el fluido. Para entender esto es necesario conocer el principio de operación del transmisor de presión diferencial o celda d/p.

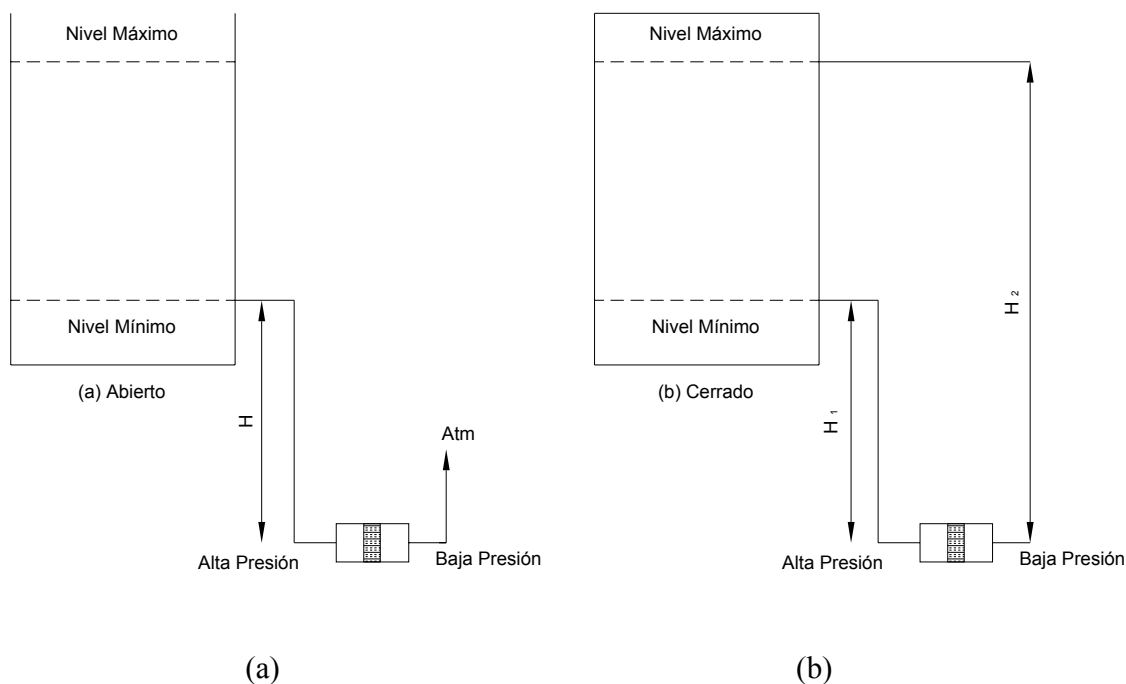


Fig. 2.33 Sistema abierto (a), y cerrado (b) en medición por presión diferencial.

El transmisor de nivel de presión diferencial funciona bajo el principio de que la diferencia entre las dos presiones (d/p) es igual a la altura del líquido (h) multiplicada por la gravedad específica (SG) del fluido, véase figura 2.34.

$$d/p = h(SG)$$

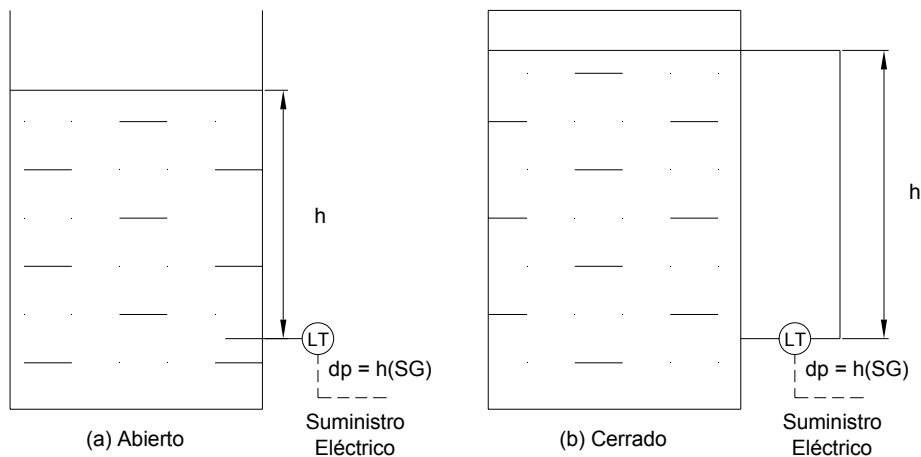


Fig. 2.34 Medición de nivel por presión diferencial.

Por definición, la gravedad específica es la densidad del líquido dividida por la densidad del agua pura a 20 °C a presión atmosférica. Un medidor de presión ó “celda d/p” puede proporcionar la indicación de nivel (con exactitud mejor a 1%) en rangos amplios, siempre y cuando la densidad del líquido sea constante. Cuando se usa una celda d/p en un tanque abierto a la atmósfera, esta cancelará los efectos de las variaciones en la presión barométrica ya que tanto el líquido en el tanque así como el lado de baja presión de la celda d/p están expuestas a la presión de la atmósfera. Por lo tanto, la lectura en la celda d/p representará el nivel en el tanque.

La presión hidrostática  $p$ , causada por el peso del producto ( $g\rho_L L$ ), se presenta en el fondo del tanque, además de la presión atmosférica  $p_0$ , la presión hidrostática por lo tanto puede evaluarse mediante la siguiente relación:

$$p = p_0 + g\rho_L L \Rightarrow L = \frac{p - p_0}{g\rho_L}$$

Un simple manómetro puede medir esta presión al fondo del tanque. En tanques de proceso a presión, la medición de presión diferencial se logra mediante la medición de la diferencia de la presión en el fondo y en lo alto del tanque, encima del líquido, como ya se había explicado antes. La figura 2.35 (a) muestra esta configuración con un sensor de presión diferencial. Debido a que la medición de la presión hidrostática es proporcional a la densidad, si la densidad cambia, se presentan errores en el nivel. Este problema puede resolverse usando más de una celda d/p instalada a diferentes alturas en el líquido. En la figura 2.35 (b) se muestra un arreglo vertical con tres sensores, las mediciones de  $p_1$  y  $p_2$  se usan para compensar la influencia de la variación de la densidad  $\rho_L$ , y para calcular el nivel.

Un sistema con esta configuración es denominado frecuentemente “medición hidrostática de tanque” (HTG, “hydrostatic tank gaging”).

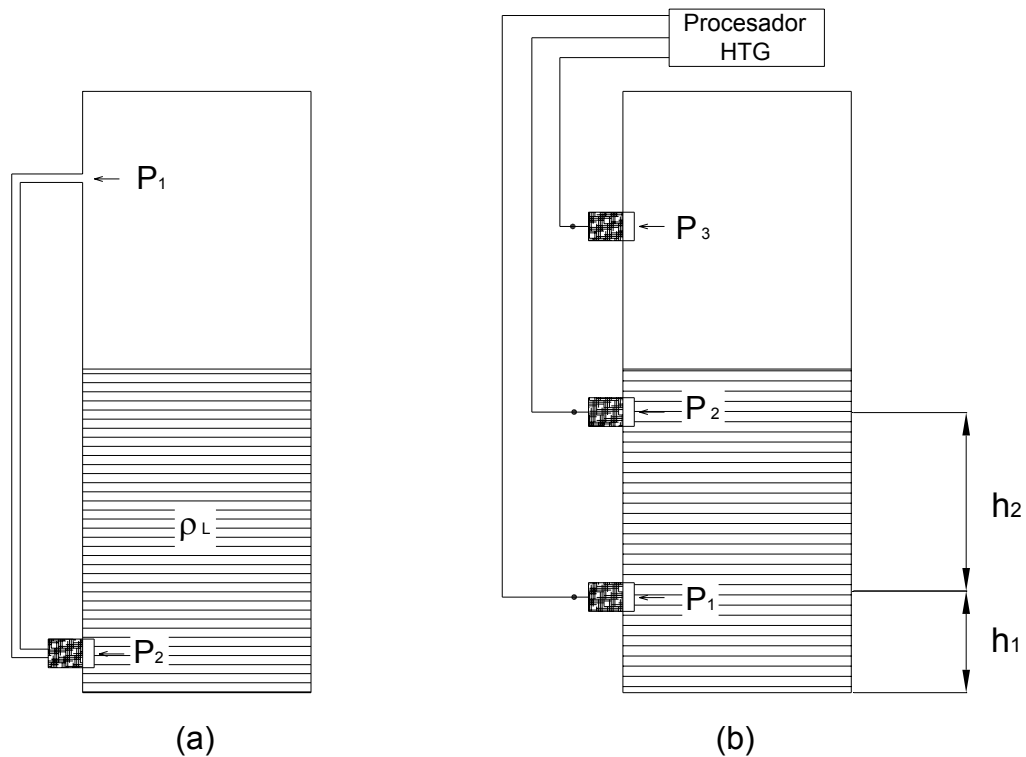


Fig. 2.35 Medición de nivel por medición de presión hidrostática. La presión en el fondo es proporcional al nivel. (a) la  $p_1$  puede ser considerada mediante una medición diferencial. El lado de baja presión del sensor de presión diferencial se conecta a la parte superior del tanque mediante un tubo delgado. (b) La medición diferencial dentro del líquido es llamada medición hidrostática de tanque (HTG) y se puede utilizar para compensar errores debidos a variaciones en la densidad del líquido. Las señales de los tres sensores se evalúan por medio de computadoras.

De esta forma, se instala una celda d/p en las locaciones inferior, media y superior del tanque. La densidad puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$\rho_l = \frac{P_1 - P_2}{h_2}$$

El nivel por lo tanto, puede calcularse por la expresión:

$$Nivel = \frac{P_1 - P_3}{\rho_l} + h_1$$

Al presente, los transmisores digitales inteligentes de presión diferencial poseen una compensación por temperatura, evaluando los cambios en la densidad del fluido y por consiguiente realizando los ajustes necesarios para la medición correcta de la presión hidrostática.

Otra variable que debe de considerarse en el diseño de esta clase de transmisores, es la posibilidad de que los vapores del líquido contenido en el recipiente sean condensables y pueden obtener la línea de compensación (línea de conexión para la toma de baja presión del transmisor al tanque), ocurriendo esto casi siempre cuando el fluido no es limpio.

Para ello se recomienda instalar un transmisor de presión diferencial unido por dos capilares a dos diafragmas conectados estos a la toma de alta y baja presión del tanque, y los capilares conectados a la toma de alta y baja presión respectivamente del diafragma en el transmisor. Para esto, los dos diafragmas deben de estar a la misma temperatura para evitar errores en la medición causada por las dilataciones del fluido contenido en los capilares, además de que la longitud de los capilares debe de ser la más corta posible.

La celda d/p puede ser de dos tipos: de balanceo de movimiento o de balanceo de fuerza. La celda de balanceo de movimientos es adecuada para locaciones remotas en donde no hay disponible aire para instrumentos o energía eléctrica. Si se usan fuelles como elementos sensores en una celda d/p de balanceo de movimiento, un incremento en la presión en cualquier lado causa que el correspondiente fuelle se contraiga. Los fuelles se conectan a un sistema de montaje que convierte el movimiento lineal de los fuelles en un movimiento rotacional el cual puede ser calibrado para indicar el nivel del tanque.

En la celda d/p de tipo balanceo de fuerza el elemento sensor (frecuentemente un diafragma) no se mueve. Se coloca una barra de fuerza para mantener en equilibrio las fuerzas que actúan sobre el diafragma. En celdas d/p neumáticas, esto se logra frecuentemente mediante el uso de un arreglo de boquilla y aletas que garantiza que la señal neumática de salida sea siempre proporcional a la presión diferencial a lo largo de la celda. La salida de la celda neumática es lineal y usualmente abarca desde 3 hasta 15 psig. En la celda electrónica, la presión en el diafragma es transmitida a un resorte, el cual aleja o acerca una barra de ferrita a una bobina conectada a un circuito oscilador. Al aumentar o disminuir la distancia entre la barra y la bobina, aumenta o disminuye respectivamente la inductancia de la bobina, modulando de esta forma la señal de salida del oscilador, que va de 4 a 20 miliamperios de corriente continua.

Cuando la celda es digital puede ser basada en dos tipos: en el tipo capacitivo o en el semiconductor. En el primer caso se mide la variación de capacidad en un condensador formado por dos placas, dentro de las cuales un diafragma muy sensible esta unido a las mismas y que se les aplica presión diferencial por medio de dos diafragmas externos. La presión es transmitida hidráulicamente por un fluido de proceso (aceite) que rellena el condensador. El movimiento del diafragma es de un máximo de 0.1 mm. La variación de capacidad es transformada por un circuito oscilador y otro demulador, que transforma la variación de capacidad en señal analógica 4-20 mA y a su vez la convierte en digital para ser dirigida a sala de control donde es acondicionada para convertirse de digital a analógica y convertirse en señal de transmisión de 4-20 mA c.c.

En el segundo caso, se aprovechan las propiedades eléctricas de los semiconductores al ser sometidos a tensiones. Para este diseño no se emplean diafragmas, si no que el semiconductor esta fabricado por una delgada película de silicio difundido. Con el silicio se forma una pastilla de silicio difundido en el que se hallan embebidas las resistencias de un puente de Wheatstone. El desequilibrio del puente originado por cambios en la variable da lugar a una señal de salida de 4-20 mA c.c. La descripción detallada de los transmisores digitales capacitivos y de semiconductores ya fue hecha en el capítulo 1.

## Fluidos de proceso difíciles

Cuando el fluido de proceso es un lodo, un polímero viscoso o de difícil manejo, el objetivo es aislar este proceso de la celda d/p. Un diafragma plano se puede unir con pernos a una válvula de bloqueo en la boquilla del tanque para que la celda d/p pueda ser removida para limpieza o reemplazo sin tener que quitar de servicio al tanque. Si es aceptable quitar de servicio al tanque cuando se requiera quitar la celda d/p, se puede considerar un diseño de diafragma extendido. En este caso, la extensión del diafragma llena la boquilla del tanque para que el diafragma sea descargado con la superficie interna del tanque.

Cuando pueda ocurrir taponado o corrosión en ambos lados de la celda, se dispone de sellos químicos, o sellos de presión de diafragma con líquidos de llenado como agua, glicol, alcohol y varios aceites. La exactitud de la medición de nivel se compromete cuando se utilizan estos sellos. La longitud de los tubos capilares debe ser tan corta como sea posible y los tubos deben estar protegidos contra el sol (para evitar efectos de evaporización). Si el sello tiene fuga, el mantenimiento de estos sistemas se hace usualmente con el fabricante debido a la complejidad del vaciado y relleno de estos sistemas.

La precisión de los instrumentos de presión diferencial es de  $\pm 0.5\%$  en los neumáticos,  $\pm 0.2\%$  a  $\pm 0.3\%$  en los electrónicos, y de  $\pm 0.15\%$  en los “inteligentes” con señal de salida de 4-20 mA c.c. y de  $\pm 0.1\%$  en los inteligentes que no tienen partes móviles dentro del tanque, se emplean en los tanques abiertos y cerrados a presión y a vacío, son de fácil limpieza, son exactos y confiables, admiten temperaturas del fluido hasta 120 °C y no son afectados por las fluctuaciones de presión. Sin embargo, en tanques cerrados presentan el inconveniente de la posible condensación de los vapores del tanque en el tubo de conexión al instrumento; este inconveniente se elimina fácilmente con el resorte de supresión.

Cuando se toman en cuenta todos los factores, las celdas d/p del tipo inteligente, se prefieren en la mayoría de las aplicaciones.

## 2.14 Medición de nivel por características eléctricas del líquido

### Medidor Conductivo

El diseño del medidor de nivel tipo conductivo se conforma por generalmente varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico. El relé es excitado cuando el líquido moja dichos electrodos, en ese momento se cierra un circuito electrónico y circula una corriente de un mínimo de 2 mA (se preferirá siempre una corriente baja, pues de esta forma no se daña al producto). El relé electrónico posee un temporizador de retardo. Este es un sistema de control de tiempo que se utiliza para abrir o cerrar el circuito en uno o más momentos determinados, de esta forma se evita el enclavamiento del relé ante una ola del líquido o ante una perturbación momentánea.

El líquido debe de ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico, y de esta forma pueda el relé diferenciar la separación entre el líquido y el vapor; además, la sensibilidad debe de ser ajustable al grado de que pueda detectar o diferenciar la presencia de espuma en el líquido si así fuera el caso.

La alimentación es con corriente alterna (220 V, 50 Hz) con lo cual se impide el fenómeno de oxidación en las sondas por causa de la electrólisis. Si la alimentación fuera con corriente continua la tensión de alimentación sería muy baja, con lo cual no podría impedirse la oxidación de los electrodos. La instalación de las sondas es vertical y el instrumento se utiliza como alarma o control de nivel bajo o alto.

Un ejemplo de este tipo de diseño puede verse fácilmente en el control del nivel del vidrio en fusión. En este caso se emplea una sola sonda instalada verticalmente. Un dispositivo electromecánico baja el electrodo hasta que entra en contacto con la superficie del vidrio fundido que, a las temperaturas de fusión, es conductor. Al momento que el electrodo entra en contacto con la superficie del vidrio fundido, se cierra el circuito y el electrodo se detiene y su posición es registrada (conociendo así su posición, se conoce el nivel en el tanque). Una vez hecho esto, el movimiento se invierte hasta romper el contacto eléctrico, para repetirse nuevamente el ciclo.

El instrumento de medición es práctico, sin partes en movimiento, su campo de medida es amplio aunque con la limitación de la longitud de los electrodos.

### **Medidor Capacitivo**

El medidor por capacidad eléctrica está formado por un circuito electrónico que se le conoce como puente de capacidades. Un electrodo es colocado dentro del tanque que contiene el fluido a medir su nivel dentro del mismo. Se conecta este electrodo a un condensador cuya capacidad varía con respecto al nivel mismo del fluido; la capacidad de este condensador es comparada con otro condensador conectado al circuito, y de cuya capacidad es conocida; la comparación entre ambos condensadores da como resultado una señal eléctrica que es función proporcional del nivel dentro del tanque.

El circuito es alimentado a una frecuencia alta de corriente alterna, de esta forma se disminuye la reactancia capacitiva del conjunto (en flujo de corriente alterna la reactancia es una medida de resistencia que se presenta al flujo de c.a.), también se disminuye en parte, el posible recubrimiento del electrodo con el producto.

El sistema es sencillo y se caracteriza principalmente por no tener partes móviles dentro del tanque, es ligero y presenta una buena resistencia a la corrosión, ya que en líquidos conductores el electrodo es recubierto con teflón.

### **Medidor Ultrasónico**

Este sistema se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción de su eco en un receptor; el tiempo que tarda la captación de eco, depende del nivel del líquido en el tanque. Los sensores ultrasónicos funcionan a una frecuencia de unos 20 KHz.; estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión, el medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del líquido.

La instalación puede ser superior, lateral o en el líquido, instalándose al fondo del tanque. En el caso de su uso como alarma, los sensores son instalados en montaje superior o lateral y estos se caracterizan por la vibración a una frecuencia de resonancia determinada, que es amortiguada cuando el líquido los moja; esto será entonces, una indicación del nivel dentro del tanque. En el caso de su uso como indicación continua de nivel, la instalación puede ser superior o en el fondo del tanque; en ambos casos, la fuente ultrasónica genera impulsos que son detectados por el receptor una vez que ha transcurrido el tiempo de ida y vuelta de la onda a la superficie del líquido.

El instrumento posee en sí mismo un sensor emisor de impulsos ultrasónicos y también un sensor receptor que recibe esta señal reflejada, enviando una señal en función del tiempo transcurrido, y por lo tanto, del nivel a un indicador electrónico local o en sala de control.

Aunque son instrumentos muy precisos y que son adecuados para todos los tipos de tanques y de fluidos o fangos, incluso pudiéndose construir a prueba de explosión, presentan el inconveniente de ser sensibles a las variaciones de densidad de los fluidos y de dar señales erróneas cuando la superficie del nivel del líquido esta llena de espuma, ya que se producen falsos ecos ultrasónicos.

Una variante y a la vez mejora de este sistema de medición de nivel, es el sistema de radar de microondas, en donde se emplea la propagación de una onda electromagnética que no es influida por la temperatura ni por las variaciones de densidad que puedan existir sobre el líquido. De esta manera, la formación de espuma sobre la superficie del líquido, no es ya un inconveniente, pues la espuma es transparente a esta clase de impulso. El funcionamiento es esencialmente el mismo que el sistema ultrasónico, sólo que en el sistema electromagnético se emite una frecuencia de 10 a 11 Ghz, enfocándose esta señal sobre el líquido por medio de una antena. La diferencia de frecuencias entre la señal de transmisión y de retorno es proporcional al tiempo empleado por las mismas, y por lo tanto, una vez más, del nivel.

### **Medidor de Radiación**

Este sistema se basa en la medición de nivel por la emisión de rayos gamma. Está diseñado con un emisor de rayos gamma montado verticalmente al lado del tanque y un contador Geiger montado también lateralmente pero al lado opuesto del emisor, y que transforma la radiación gamma en una señal eléctrica de corriente continua. Este detector es un tubo de cámara iónica con amplificador de corriente continua o incluso alterna.

La transmisión de los rayos gamma es inversamente proporcional a la masa del líquido en el tanque; por lo tanto, la radiación captada por el receptor es inversamente proporcional al nivel del líquido; al respecto, hay que mencionar que las paredes del tanque absorben gran parte de la radiación y al detector llega sólo un pequeño porcentaje de la misma, aunque con este porcentaje es suficiente para hacer la medición.

El instrumento posee además compensación por temperatura para linealización de la señal de salida y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación.

La fuente radiactiva pierde su radiactividad en función exponencial del tiempo, esto es, la vida media; por ejemplo, para el americio 241 es de 248 años, para el cesio 137 es de 33 años y para el cobalto 60 es de 5 1/2 años.

La precisión del instrumento es buena y puede emplearse para todo tipo de líquidos ya que no está en contacto con el proceso. Su principal desventaja es la necesidad de un blindaje y un adecuado manejo y señalamiento incluso de la utilización de este dispositivo, de conforme con los estándares de protección para el uso de material radiactivo.

Esta clase de sistemas se emplea en medida de nivel de tanques con acceso difícil o peligroso, que impiden el empleo de otros sistemas de medición. Un ejemplo de ello es un reactor de polimerización en donde típicamente, la presión y la temperatura dentro del reactor son sumamente elevadas.

Se debe estar conciente de que este sistema además de ser de muy alto precio, es de manejo delicado, por lo cual la instalación y la operación no debe ofrecer peligro alguno de contaminación radiactiva, siendo necesario señalar adecuadamente las áreas donde están instalados estos instrumentos y realizar inspecciones periódicas de seguridad dentro de esta área.

## **Medidor Láser**

Existen condiciones de proceso para las cuales la medida de nivel debe de ser sin contacto con el fluido y a la mayor distancia posible debido a las temperaturas extremas del proceso. Tal es el caso de la medición de metal fundido; en estas condiciones encuentra su aplicación, el medidor de rayo láser.

Este sistema consiste en un rayo láser enviado a través de un tubo de acero y que es enviado por reflexión con un espejo sobre la superficie del metal fundido. El sistema mide el tiempo que transcurre entre el impulso emitido y el impulso recibido de retorno por un fotodetector de alta resolución. Este tiempo es directamente proporcional a la distancia del aparato emisor a la superficie del metal fundido.

El fotodetector es en si mismo una fotorresistencia, el cual es un componente que disminuye sensiblemente su resistencia cuando es expuesto a la luz (láser), mientras que cuando permanece en la oscuridad su resistencia es muy elevada. Por lo tanto su resistencia es inversamente proporcional a la energía recibida.

El fotodetector esta compuesto típicamente de sulfuro de cadmio debidamente encapsulado y con una cubierta de resina transparente y aislante, de tal forma que cuando los fotones inciden sobre la superficie de dicho material, imprimen a los electrones suficiente energía como para elevar su conductividad.

El sistema es controlado por un microprocesador que convierte este tiempo a la distancia a la superficie del metal en fusión, esto es, al nivel.

## **2.15 Especificaciones Técnicas**

### **Especificaciones generales para interruptor de nivel tipo flotador**

#### Requerimientos mínimos

- La conexión a proceso será de 3" 150Lb ANSI R.F.
- La brida y el sensor serán de acero inoxidable. El tamaño del desplazador deberá ser de 2.5" (63.5 mm) y la longitud de la varilla de 18" (457.2).
- La forma del interruptor será SPDT, carga inductiva.
- La alimentación eléctrica será de 24 VCD, 2 hilos.
- La cubierta deberá ser adecuada para seguridad intrínseca y los contactos abrirán al punto de ajuste.
- El instrumento deberá ser suministrado con placa de acero inoxidable fija en forma permanente, con identificación y servicio grabados a golpe.



## Especificaciones generales para interruptor de nivel desplazador externo

### Requerimientos mínimos

- El desplazador deberá ser del tipo magnético o tubo de torsión con caja a prueba de intemperie (NEMA 4X), adecuada para su uso en seguridad intrínseca en áreas Clase 1 Div 1.
- El acabado de la caja deberá ser tropicalizado.
- El interruptor deberá ser del tipo micro-seco SPDT a prueba de vibración.
- Los contactos del interruptor deben tener una capacidad mínima de 1 Amp. @ 24 VCD, carga inductiva.
- La diferencial del interruptor deberá ser fija.
- El ajuste del punto de disparo deberá ser interno con un rango de 0-100%.
- Las conexiones a proceso serán laterales, bridas de 1 ½" 150Lb ANSI R.F.
- La conexión para el drene debe de ser de ¾" NPT, debiendo de proporcionar tapón.
- El tamaño de la conexión al conduit debe de ser de ¾" NPTF, o bien proporcionar conector adecuado para conexión.
- El material del cuerpo será de acero inoxidable 316 y del desplazador acero inoxidable, con un tamaño de 14".
- Los interiores deberán ser de acero inoxidable.
- El material del tubo de torsión deberá ser de inconel 600.
- La cédula correspondiente al cuerpo del desplazador deberá ser adecuada para cubrir la presión máxima de operación.
- El instrumento debe de suministrarse con una placa metálica permanentemente asegurada con la siguiente información:
  - a) Identificación y Servicio.
  - b) Material del desplazador.
  - c) Punto de disparo.

## Especificaciones generales para transmisor de nivel tipo celda d/p cell

### Requerimientos mínimos

- El funcionamiento deberá estar basado en el principio de balance de fuerzas.
- El transmisor deberá ser del tipo inteligente.
- El elemento sensor deberá ser un diafragma.
- El material del diafragma deberá ser de acero inoxidable 316
- El régimen del cuerpo será de 1500 psig (105.5 Kg/cm<sup>2</sup> man.)
- La conexión a proceso deberá ser de ½" NPT
- La cubierta deberá ser adecuada para uso con seguridad intrínseca.
- El suministro eléctrico deberá ser de 24 VCD, 2 hilos.
- El material de la cubierta deberá ser adecuado para ambientes corrosivos (cubierta tropicalizada).
- El tamaño de la conexión al conduit será de ½" NPT.
- Deberá operar satisfactoriamente en un rango de 36 a 135°C.
- La señal de salida será de 4-20 mA c.c.
- Deberá tener autodiagnóstico.
- Deberá ser inmune a señales de radiofrecuencia, interferencias eléctricas, magnéticas, altos voltajes y polaridad invertida.
- Deberá suministrarse con indicador local digital en unidades de ingeniería.
- Deberá tener protección contra sobrerango de 30%.
- Deberá de suministrarse con yugo de montaje en acero al carbón para tubería donde se instale.
- La exactitud deberá ser de  $\pm 0.1\%$  del span ó mejor.
- La repetibilidad deberá ser de  $\pm 0.1$  del span ó mejor.
- La banda muerta deberá ser de  $\pm 0.25$  de span ó mejor.
- Deberá de tener rangos de ajuste de supresión y elevación de cero de 100% del span máximo.

- El error máximo por variaciones de la temperatura ambiente deberá ser de  $\pm 0.3\%$  del span máximo.
- El error máximo por suministro eléctrico deberá ser de  $0.005\%$  del span calibrado por volt.
- El transmisor de nivel con rango de supresión será usado cuando el rango de medición exceda los 1.2 m ó cuando el desplazador no es satisfactorio.

### **Especificaciones generales para interruptor de nivel tipo radiofrecuencia**

#### Requerimientos mínimos

- El interruptor será de cámara externa con conexiones laterales de 1 ½" 150Lb ANSI R.F.
- El sensor deberá de ser de acero inoxidable 316, con recubrimiento de teflón.
- La forma del interruptor será SPDT, carga inductiva.
- La alimentación eléctrica será de 24 VCD, 2 hilos.
- La cubierta deberá ser adecuada para seguridad intrínseca.
- Los contactos abrirán al punto de ajuste.
- El instrumento deberá ser suministrado con placa de acero inoxidable fija en forma permanente, con identificación y servicio grabados a golpe.

### **Especificaciones generales para vidrios de nivel**

#### Requerimientos mínimos

- Los vidrios de nivel para temperatura de operación arriba de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  deben ser del tipo cámara chica; para temperaturas inferiores deben ser del tipo cámara grande con conexiones bridadas.
- Las conexiones para vidrios de cámara chica deben ser laterales de ½" NPT, a excepción de los que por necesidades de diseño se especifiquen diferente.
- Las conexiones para vidrios de cámara grande, deben ser arriba y abajo de 1 ½" bridadas.
- Los empaques de las cámaras deben ser de teflón, debiendo el proveedor del equipo recomendar el empaque para temperaturas mayores a  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Las válvulas para vidrios de cámara chica y conexiones laterales, deben ser del tipo ángulo, de construcción recta con conexiones al recipiente y al vidrio de ¾" NPT macho.
- Las válvulas para vidrio de cámara grande, deben ser bridadas, de compuerta y se suministrarán solamente en el caso en que así se especifique.

- Las válvulas para vidrio de cámara chica deben ser con volante manual para cierre uniforme y conexiones tipo unión roscada, con bonete tipo unión y válvula de retención (check) de bola.
- Los vidrios de nivel deben suministrarse con extensiones anticongelantes cuando la temperatura de operación sea menor a 0 °C.
- Cuando la temperatura de operación sea mayor a 230 °C, o en servicio con líquidos corrosivos los vidrios deben de proporcionarse con mica de protección de material adecuado.
- Los vidrios del tipo transparente deben suministrarse con iluminadores a prueba de explosión (NEMA 7) adecuados para áreas Clase 1, División 1 y Grupos B, C y D, con lámparas desmontables de 50W y adecuadas para operar con 120 V 60 Hz.
- Los vidrios del tipo tubular deben suministrarse con varillas de protección.
- Se utilizarán vidrios de nivel reflex cuando exista una interfase liquido-gas, en donde el líquido sea transparente y no deje depósitos en el vidrio. Estos indicadores preferentemente deberán ser usados en aplicaciones de servicio limpio incluyendo C<sub>4</sub> e hidrocarburos pesados. Ellos también pueden ser usados en C<sub>3</sub> e hidrocarburos ligeros.
- Se usarán vidrios de nivel transparente en servicios de generación de vapor, para líquidos no transparentes y cuando exista una interfase líquida (fase aceitosa-fase acuosa). Todos los vidrios de este tipo se suministrarán con iluminadores adecuados a la clasificación eléctrica del área de instalación.
- Se usarán vidrios de nivel tubular sólo para servicios a presiones menores a 4.0 Kg/cm<sup>2</sup> manométricas con líquidos no inflamables ni peligrosos.
- Todos los vidrios de nivel, exceptuando los que tengan conexiones con brida, deberán suministrarse con válvulas de paso, las cuales a su vez tendrán válvulas de retención integrales (de bola y anillo).
- Las conexiones NPT arriba y abajo deberán ser ¾" NPTM al recipiente y ½" NPTF al indicador y drenaje.
- Cada vidrio de nivel deberá estar formado por un máximo de cuatro secciones, las cuales a su vez cubrirán un máximo de 14 m de longitud visible. Cuando se requiera cubrir una longitud mayor se utilizarán vidrios traslapados con conexiones independientes.
- La clasificación por presión de los vidrios de nivel deberán estar de acuerdo a la máxima presión de trabajo del recipiente en que se hace la instalación, los cuerpos y los vidrios deberán resistir un mínimo de 1.5 la presión máxima en el recipiente o 70 kg/cm<sup>2</sup> a una temperatura de 50 °C lo que sea mayor.

- Todos los vidrios de nivel deben suministrarse con una placa metálica permanentemente asegurada con la siguiente información:
  - a) Identificación y servicio.
  - b) Nombre del fabricante y modelo.
  - c) Distancia entre centros de válvulas.

## 2.16 Típicos de instalación

En el área de diseño, los típicos de instalación tienen determinados lineamientos estandarizados por el departamento de instrumentación y control y en base a los cuales se determina su elaboración para todos los instrumentos, además de que se indica que empleo deberá de darse a estos documentos. A continuación se enuncian los más comunes y debe de hacerse la indicación de que estos lineamientos son válidos para toda clase de instrumentos que sean instalados en campo, ya sean de flujo, nivel, presión, etc.

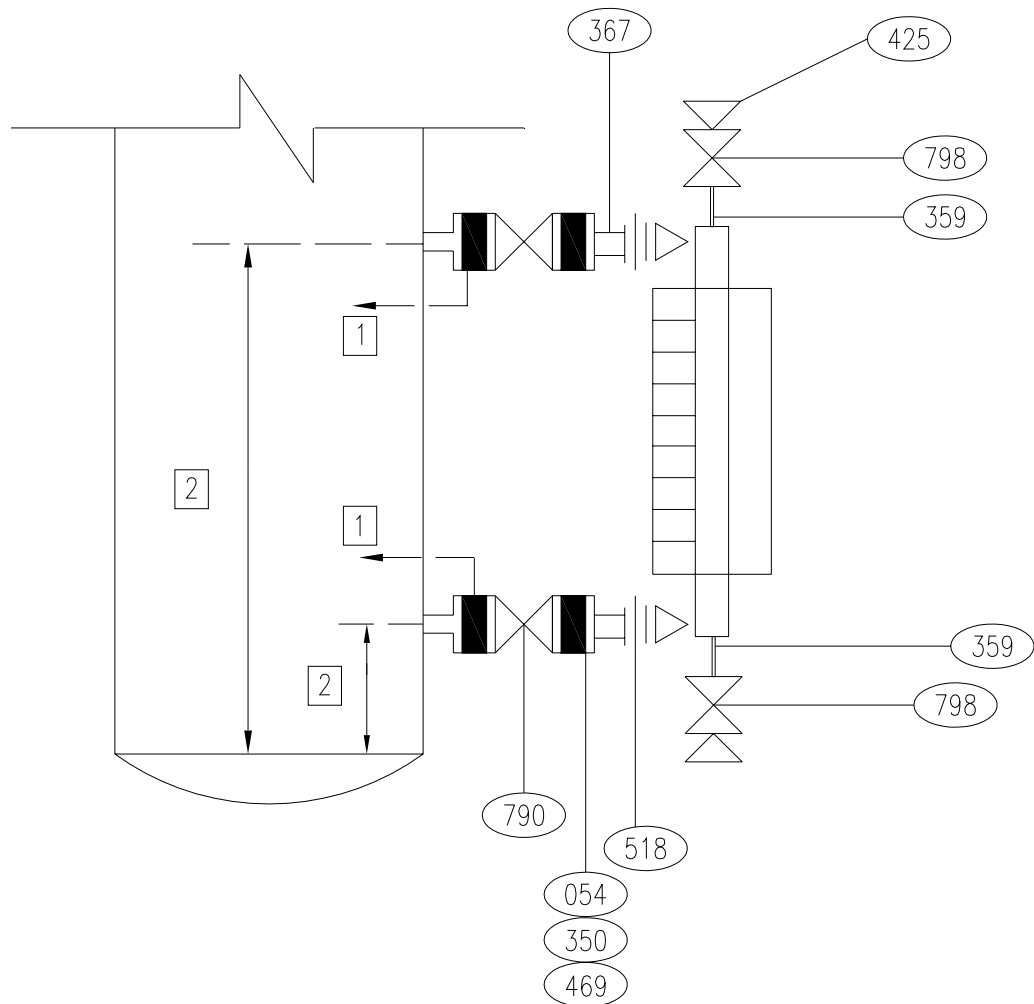
Los típicos de instalación que se muestren en el presente capítulo serán sólo de los elementos de medición primarios básicos para cada variable, dado que este es el alcance perseguido. Se iniciara con la variable nivel para continuar con las siguientes más adelante.

En la variable flujo no se muestran los típicos de instalación dado que estos normalmente se elaboran para los transmisores de flujo y se incluye ahí al elemento de medición primario, (por ejemplo para la placa de orificio), lo que para transmisores, está fuera del alcance. O en su defecto, la instalación del elemento es entre bridas (las cuales son dadas normalmente con el elemento), no requiriendo ningún otro material o accesorio para su instalación, motivo por el cual normalmente no se elaboran típicos de instalación.

Los lineamientos son los siguientes:

- a) Los dibujos mostraran la forma física de soportar los instrumentos y la manera como se conectan al proceso, indicando en su caso, el suministro de aire y la conexión de salida.
- b) Los dibujos tendrán una lista de material que es necesario adquirir para cada instrumento que se instale como lo indique el mencionado típico.
- c) Habrá un solo típico para todos los instrumentos que se instalen en la misma forma y con el mismo material. La hoja tendrá en su margen derecho una lista con las identificaciones de todos los instrumentos que deben instalarse en la misma forma y con los mismos materiales indicados.
- d) Todo instrumento instalado en campo tendrá su dibujo típico de instalación correspondiente.
- e) A partir de los dibujos típicos de instalación y cuando se disponga de la totalidad de los mismos, se hará una lista que sea el resumen de los materiales de instalación requeridos, la cual será turnada al departamento de compras para su adquisición.

## TÍPICO DE INSTALACIÓN PARA VIDRIO DE NIVEL INSTALADO EN COLUMNA



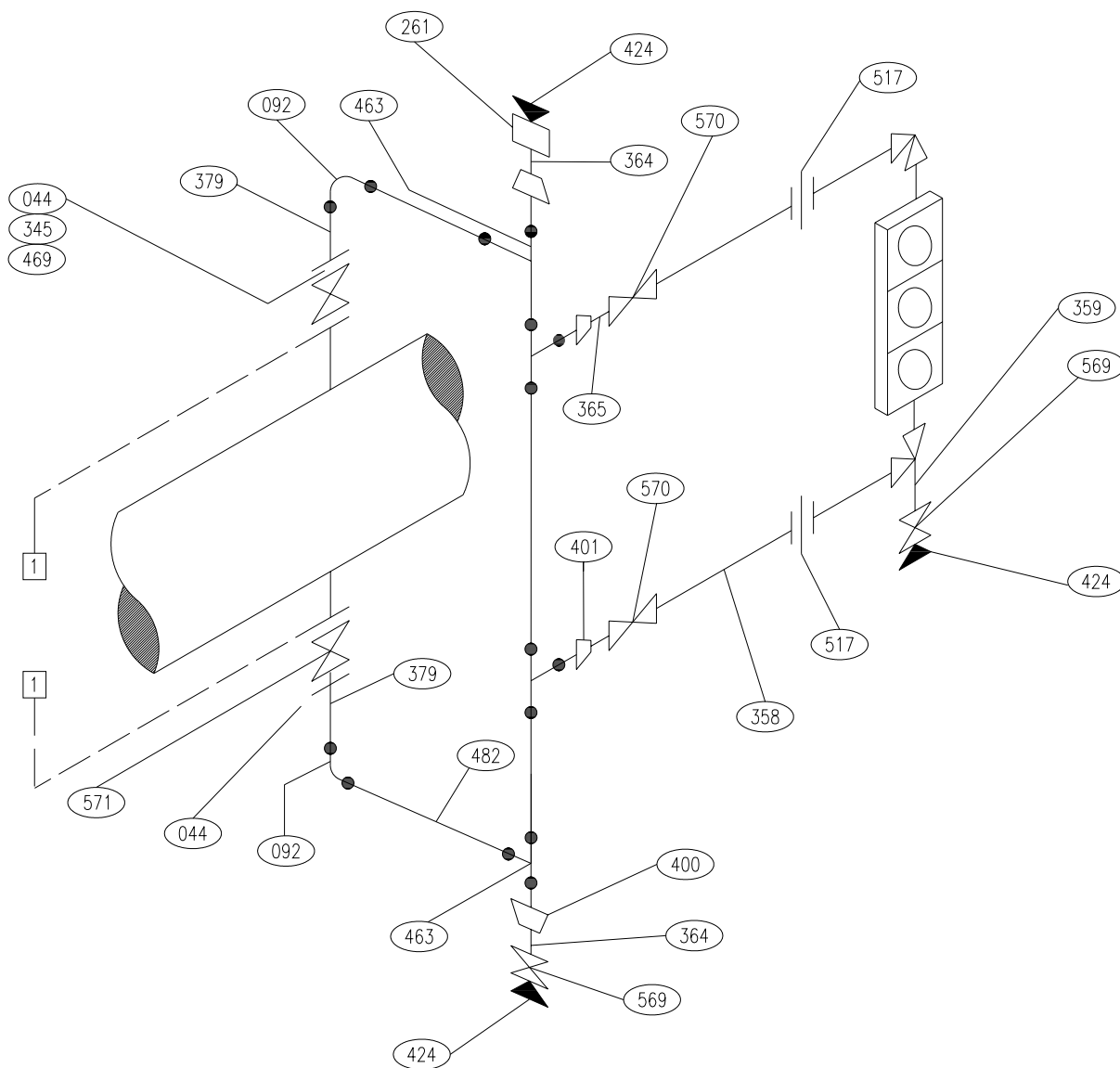
1 POR DEPARTAMENTO MECANICO

2 DISTANCIA DEFINIDA POR DISEÑO DEL RECIPIENTE

Descripción del material necesario para la instalación del instrumento en la hoja siguiente.

| MATERIAL REQUERIDO PARA LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |           |               |   |
|--|-----------|---------------|---|
| PARTIDA  | CANTIDAD  | TAMAÑO        | DESCRIPCION   |
| 054  | 2 PIEZAS  | 1" Ø X ¾" Ø   | BRIDA REDUCTORA DE EMBUTIR PARA SOLDAR (S.W.) 150 Lb ANSI, CARA REALZADA (R.F.) ACERO INOXIDABLE ASTM A-182 GR. F-304   |
| 350  | 4 PIEZAS  | 1" Ø          | EMPAQUE PARA BRIDAS DE 150 Lb ANSI, CARA REALZADA, DE ACERO INOXIDABLE CON RELLENO DE TEFLON DE 3/16" DE ESPESOR  |
| 359  | 2 PIEZAS  | ½" Ø X 3" L   | NIPLE EXTREMOS ROSCADOS CED 160 SIN COSTURA DE AC. INOX. ASTM A-312 GR TP-304   |
| 367  | 2 PIEZAS  | ¾" Ø X 3" L   | NIPLE CON UN EXTREMO ROSCADO CED 160 SIN COSTURA DE AC. INOX. ASTM 312 GR TP-304  |
| 425  | 2 PIEZAS  | ½" Ø          | TAPON MACHO SÓLIDO ROSCADO, CABEZA HEXAGONAL 3000 LIBRAS ANSI DE ACERO INOXIDABLE ASTM A-182 GR F-304   |
| 469  | 16 PIEZAS | ½" Ø X 2 ½" L | ESPARRAGO DE ACERO DE ALEACION ASTM A-193 GR. B7 CON DOS TUERCAS HEXAGONALES DE ACERO AL CARBON ASTM A-194 PARA BRIDAS DE 150 Lb ANSI, CARA REALZADA  |
| 518  | 2 PIEZAS  | ¾" Ø          | TUERCA UNION ROSCADA 3000 Lb ANSI, DE ACERO INOXIDABLE ASTM A-182 GR F-304  |
| 798  | 2 PIEZAS  | ½" Ø          | VALVULA TIPO MACHO, CLASE 150 Lb ANSI, ROSCADA, CUERPO DE ACERO INOX. 316 INTERIORES DE ACERO INOX 316, CAMISA DE TEFLON, BONETE ATRONILLADO, DIAGRAMA Y EMPAQUE METALICO FLEXIBLE DE ACERO INOX 304. A PRUEBA DE FUEGO                 |
| 790  | 2 PIEZAS  | 1" Ø          | VALVULA TIPO MACHO, BRIDADA, CLASE 150 Lb ANSI, CARA REALZADA, CUERPO DE ACERO INOX. 316 INTERIORES DE ACERO INOX 316, CAMISA DE TEFLON, BONETE ATRONILLADO, DIAGRAMA Y EMPAQUE METALICO FLEXIBLE DE ACERO INOX. 304, A PRUEBA DE FUEGO |

## TÍPICO DE INSTALACIÓN PARA VIDRIO DE NIVEL INSTALADO EN EQUIPO HORIZONTAL



1 POR DEPARTAMENTO MECANICO

Descripción del material necesario para la instalación del instrumento en las dos hojas siguientes.



| MATERIAL REQUERIDO PARA LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |          |             |  |
|--|----------|-------------|--|
| PARTIDA  | CANTIDAD | TAMAÑO      | DESCRIPCION  |
| 044  | 2 PIEZAS | 1" Ø        | BRIDA DE EMBUTIR PARA SOLDAR (S.W.), 150Lb ANSI CARA REALZADA (R.F) DE AC AL CARBON FORJADO ASTM A-105                         |
| 092  | 2 PIEZAS | 1" Ø        | CODO DE 90° DE EMBUTIR PARA SOLDAR (S.W.), 3000Lb ANSI DE AC AL CARBON FORJADO ASTM A-105                                      |
| 261  | 1 PIEZA  | ½"Ø         | COPE ROSCADO 3000Lb ANSI DE AC AL CARBON FORJADO ASTM A-105  |
| 345  | 4 PIEZAS | 1" Ø        | EMPAQUE PARA BRIDA CLASE 450Lb, ANSI CARA REALZADA, MATERIAL COMPRIMIDO SUAVE SIN ASBESTO DE FIBRA SINTETICA, 1/16" DE ESPESOR |
| 359  | 1 PIEZA  | ½" Ø X 3" L | NIPLE DE EXTREMOS ROSCADOS. CED 160. SIN COSTURA DE AC AL CARBON ASTM A-106 GR. B  |
| 358  | 2 PIEZAS | ¾" Ø X 3" L | NIPLE DE EXTREMOS ROSCADOS. CED 160. SIN COSTURA DE AC AL CARBON ASTM A-106 GR. B  |
| 364  | 2 PIEZAS | ½" Ø X 3" L | NIPLE CON UN EXTREMO ROSCADO. CED 160. SIN COSTURA DE AC AL CARBON ASTM A-106 GR. B  |
| 365  | 2 PIEZAS | ¾" Ø X 3" L | NIPLE CON UN EXTREMO ROSCADO CED 160. SIN COSTURA DE AC AL CARBON ASTM A-106 GR. B   |
| 379  | 2 PIEZAS | ½" Ø 3" L   | NIPLE EXTREMOS PLANOS, CED. 160, SIN COSTURA DE ACERO AL CARBON ASTM A-106 GR. B   |
| 400  | 2 PIEZAS | 1" X ½"     | INSERTO REDUCCION DE EMBUTIR P/SOLDAR (S.W.), 3000 Lb. ANSI DE ACERO AL CARBON FORJADO ASTM A-105                              |
| 401  | 2 PIEZAS | 1" X ¾"     | INSERTO REDUCCION DE EMBUTIR P/SOLDAR (S.W.), 3000 Lb. ANSI DE ACERO AL CARBON FORJADO ASTM A-105                              |
| 424  | 3 PIEZAS | ½"Ø         | TAPON MACHO SÓLIDO ROSCADO, CABEZA HEXAGONAL, 3000 Lb, ANSI DE ACERO AL CARBON FORJADO ASTM A-105                              |

| MATERIAL REQUERIDO PARA LA INSTALACION DEL INSTRUMENTO |           |             |  |
|--|-----------|-------------|--|
| PARTIDA  | CANTIDAD  | TAMAÑO      | DESCRIPCION  |
| 463  | 4 PIEZAS  | 1" Ø        | TE RECTA NORMAL DE EMBUTIR PARA SOLDAR (S.W.), 3000 Lb ANSI DE AC AL CARBON FORJADO ASTM A-105   |
| 469  | 16 PIEZAS | ½"Ø X 2 ½"L | ESPARRAGO DE AC. AL CARBON ASTM A-193 GR. B7 CON DOS TUERCAS HEXAGONALES DE AC. AL CARBON ASTM A-194, PARA BRIDAS 150 Lb. ANSI RF  |
| 482  | 2 METROS  | 1" Ø        | TUBO CED. 80 SIN COSTURA DE AC AL CARBON ASTM A-106 GR. B.   |
| 517  | 2 PIEZAS  | ¾" Ø        | TUERCA UNION ROSCADA 3000 Lb ANSI DE AC AL CARBON FORJADO ASTM A-105, CON ASIENTOS INTEGRALES DE AC. INOXIDABLE  |
| 569  | 2 PIEZAS  | ½"Ø         | VALVULA DE COMPUERTA, CLASE 800 Lb ANSI, ROSCADA, CUERPO DE AC AL CARBON FORJADO ASTM A-105 INTERIORES DE ACERO INOXIDABLE 316 ASIENTO RENOVABLE BONETE ATORNILLADO, VASTAGO SALIENTE, YUGO Y ROSCA EXTERIOR |
| 570  | 2 PIEZAS  | ¾" Ø        | VALVULA DE COMPUERTA, CLASE 800 Lb ANSI, ROSCADA, CUERPO DE AC AL CARBON FORJADO ASTM A-105 INTERIORES DE ACERO INOXIDABLE 316 ASIENTO RENOVABLE BONETE ATORNILLADO, VASTAGO SALIENTE, YUGO Y ROSCA EXTERIOR |
| 571  | 2 PIEZAS  | 1" Ø        | VALVULA DE COMPUERTA, CLASE 800 Lb ANSI, ROSCADA, CUERPO DE AC AL CARBON FORJADO ASTM A-105 INTERIORES DE ACERO INOXIDABLE 316 ASIENTO RENOVABLE BONETE ATORNILLADO, VASTAGO SALIENTE, YUGO Y ROSCA EXTERIOR |

## 2.17 Medidores de nivel de sólidos

Con cierta frecuencia, es necesario medir el nivel de material sólido en algún tipo particular de procesos. Entre estos se encuentran por ejemplo: nivel de “chips” de madera en fábricas de papel, tanques de materia prima sólida, tanques de almacenamiento de jabón, tanques de almacenamiento de cal, silos, etc.

En los procesos continuos, la industria ha ido exigiendo el desarrollo de instrumentos capaces de medir el nivel de sólidos en puntos fijos o de forma continua, en particular en los tanques o silos destinados a contener materias primas o productos finales.

Los detectores de nivel de punto fijo proporcionan una medida en uno o varios puntos fijos determinados. Los diseños más empleados son los siguientes:

- Diafragma
- Cono suspendido
- Varilla flexible
- Medidor conductivo
- Paletas rotativas

Por su parte, los medidores de nivel continuo proporcionan una medida continua del nivel desde el punto más bajo, hasta el punto más alto. Los dispositivos más empleados son los siguientes:

- Sondeo electromecánico
- Medidor de báscula
- Medidor capacitivo
- Medidor de presión diferencial
- Medidor de nivel de ultrasonido
- Medidor de nivel de radiación

## 2.18 Detectores de nivel de punto fijo

### Detector de diafragma

El detector de diafragma (fig. 2.36) consiste en una membrana flexible que puede entrar en contacto con el producto dentro del tanque y que contiene en su interior un conjunto de palancas con contrapeso que se apoyan sobre un microswitch. Cuando el nivel del sólido alcanza el diafragma lo fuerza venciendo el contrapeso y actuando sobre el microswitch. Este puede accionar una alarma o actuar automáticamente sobre un transportador o maquinaria asociados al depósito.

El material del diafragma puede ser de tela, goma, neopreno o fibra de vidrio. El medidor de diafragma tiene la ventaja de su bajo costo, puede emplearse en tanques cerrados sometidos a baja presión o vacío gracias a una línea neumática que iguala presiones a ambos lados de la membrana y trabaja bien con materiales de muy diversa densidad. Tiene la desventaja de no admitir materiales granulares de tamaños superiores a unos 80 mm de diámetro. Su exactitud es de  $\pm 50$  mm.

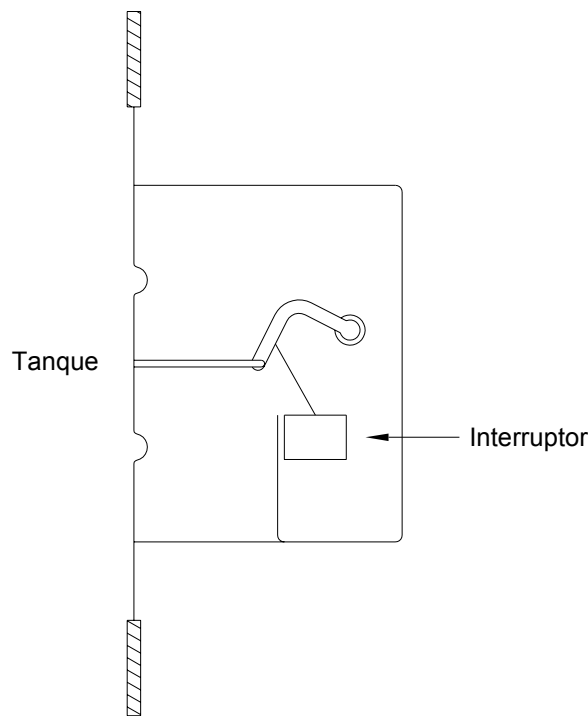


Fig. 2.36 Medidor de diafragma.

### Cono suspendido

El medidor de nivel de sólidos por cono suspendido (fig. 2.37) consiste en un microswitch montado dentro de una caja NEMA 4X con un cabezal de goma colocado en medio y en la parte inferior de la caja; desde el cabezal, esta suspendida una varilla que termina en cono. Cuando el nivel de sólidos alcanza el cono, el interruptor es excitado.

El cabezal de goma permite una flexibilidad en la posición del cono, gracias a esto, el instrumento puede actuar como alarma de alto o bajo nivel. Aunque es conveniente proteger al instrumento cuando se manejen materiales pesados que en su caída, desde la boca de descarga del tanque podrían dañarlo.

El instrumento es de bajo costo y necesita estar protegido mecánicamente cuando se emplee como nivel de baja o de niveles intermedios y se utiliza sólo en tanques abiertos. Su precisión es de  $\pm 50$  mm. Sus aplicaciones típicas son en alarma y control de nivel en carbón, granos y caliza.

### Varilla flexible

La varilla flexible (fig. 2.38) consiste en una varilla de acero conectada a un diafragma donde está contenido un interruptor. Cuando los sólidos presionan, aunque sólo sea ligeramente en la varilla, el interruptor se cierra y actúa sobre una alarma. La caja del interruptor es clasificación NEMA 4X ó 7. El aparato se emplea como alarma de alto nivel estando dispuesto en la parte superior del tanque. Para impedir que la simple caída del producto pueda causar una falsa alarma, se incorpora un relé de retardo.

El instrumento se emplea en tanques abiertos como alarma de nivel alto, tiene una exactitud de  $\pm 25$  mm, se utiliza para materiales tales como carbón y puede trabajar hasta temperaturas máximas de 300 °C.

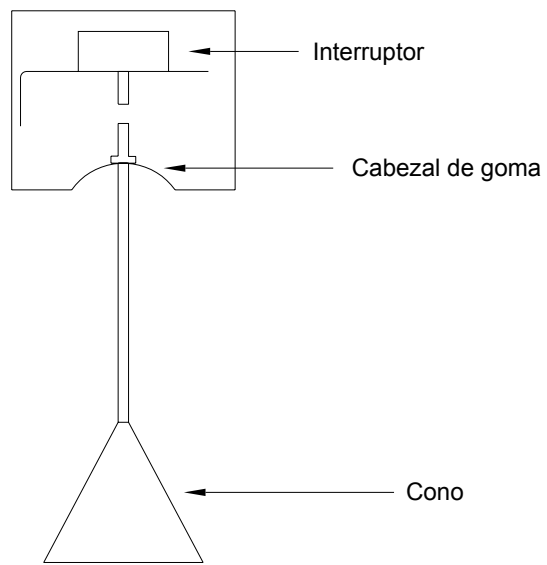


Fig. 2.37 Medidor de cono suspendido.

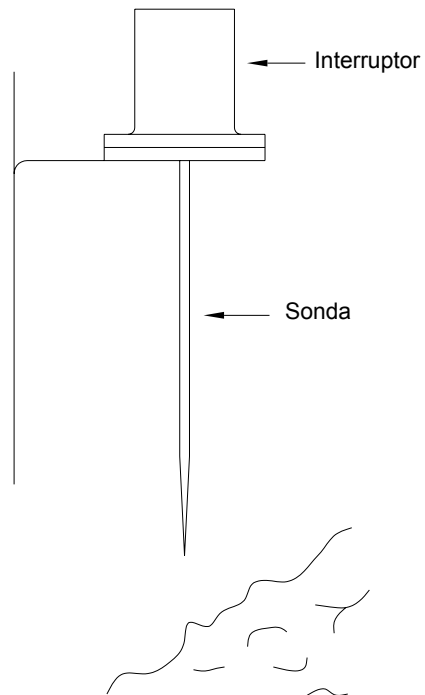


Fig. 2.38 Varilla flexible.

## Medidor Conductivo

El medidor conductivo (fig. 2.39) está conformado por un electrodo dispuesto en el interior de unas placas puestas a tierra y dejando el circuito eléctrico abierto.

En el momento de que el nivel de sólidos alcanza el electrodo se cierra el circuito y la pequeña corriente que se origina es amplificada actuando sobre un relé de alarma.

Los sólidos deben de tener una conductividad eléctrica apreciable para poder excitar el circuito eléctrico; al respecto, la conductividad eléctrica del material debe de ser de entre 1 a  $1.4 \times 10^{-7}$  mho (la unidad mho es el inverso de la resistividad, siendo la resistividad definida como ohm/metro).

El aparato puede utilizarse en tanques abiertos y a presión, pudiendo operar a temperaturas de hasta 300 °C. Solo puede emplearse como alarma de alto nivel o nivel intermedio. Su instalación puede ser horizontal o vertical.

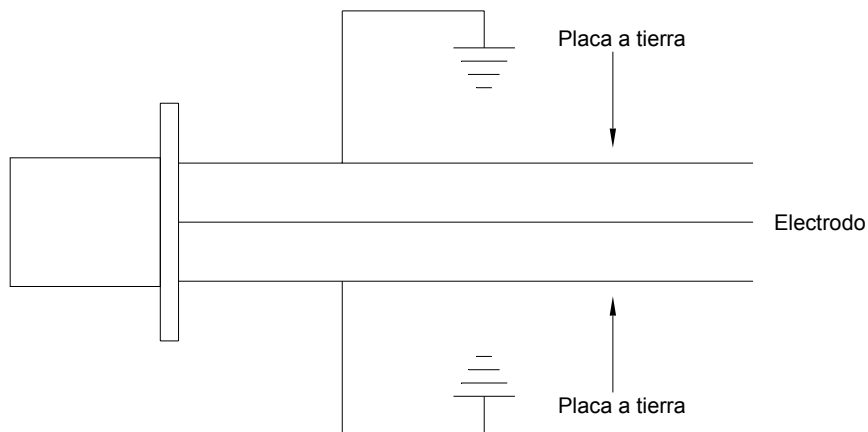


Fig. 2.39 Dispositivo de medición conductivo.

## Paletas rotativas

Las paletas rotativas (fig. 2.40) consisten en un eje vertical, dotado de paletas, que gira continuamente a baja velocidad accionado por un motor síncrono. Cuando el producto sólido llega hasta las paletas, las inmoviliza, con lo que el soporte del motor y la caja de engranajes empiezan a girar en sentido contrario.

En su giro, el soporte del motor actúa consecutivamente sobre dos interruptores, el primero excita el equipo de protección (por ejemplo, una alarma) y el segundo desconecta la alimentación eléctrica del motor con lo cual éste queda bloqueado. Cuando el producto baja de nivel y deja las paletas al descubierto, un resorte vuelve el motor a su posición inicial liberando los dos microswitches. De este modo, el motor se excita con los que las palas vuelven a girar, y la alarma queda desconectada.

El eje de las palas puede ser flexible o rígido para adaptarse así a las diversas condiciones de trabajo dentro del silo (caída de producto, deslizamientos del mismo, etc.).

Estos aparatos son adecuados en tanques abiertos o a baja presión (máximo 10 kg/cm<sup>2</sup>), tienen una precisión de 25 mm y se emplean preferentemente como detectores de nivel de materiales granulares y carbón. Pueden trabajar con materiales de muy diversa densidad y su construcción puede ser NEMA 7.

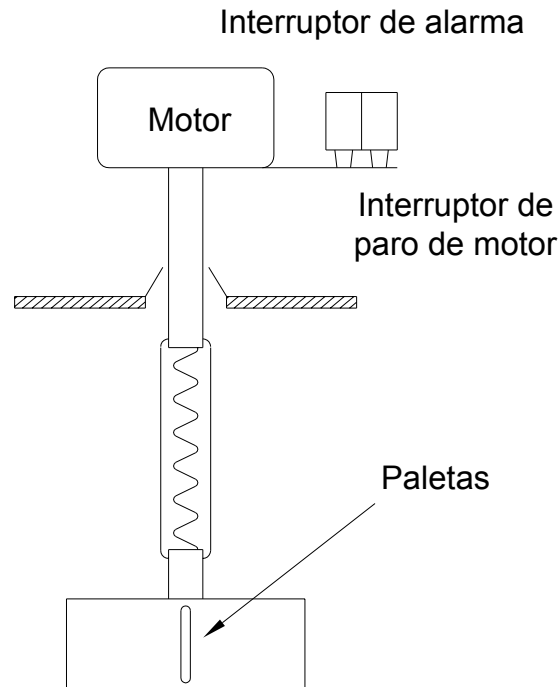


Fig. 2.40 Medidor de paletas rotativas.

## 2.19 Detectores de nivel continuos

### Sondeo electromecánico

La medición de nivel de sólidos por sondeo electromecánico (fig. 2.41) consiste en un peso móvil sostenido desde la parte superior de la tolva gracias a un sistema de poleas. Mediante el uso de un programador/detector instalado externamente, se excita un motor que acciona el sistema de poleas, con lo cual se establece un ciclo de trabajo del peso móvil.

El peso móvil baja suavemente en el interior del silo hasta que choca con el lecho del material; en ese instante se acciona el detector, con lo que el cable se afloja y el programador invierte el sentido del movimiento del peso, con lo que este asciende, hasta llegar a la parte superior de la tolva donde se detiene, para repetir nuevamente el ciclo.

Un indicador externo señala el punto donde el peso ha invertido su movimiento, indicando así, el nivel en aquel momento.

Este instrumento es el más sencillo para la medición de nivel de sólidos, pero su construcción debe de ser sólida, esto es, robusto mecánicamente para evitar la posible rotura del conjunto dentro de la tolva.

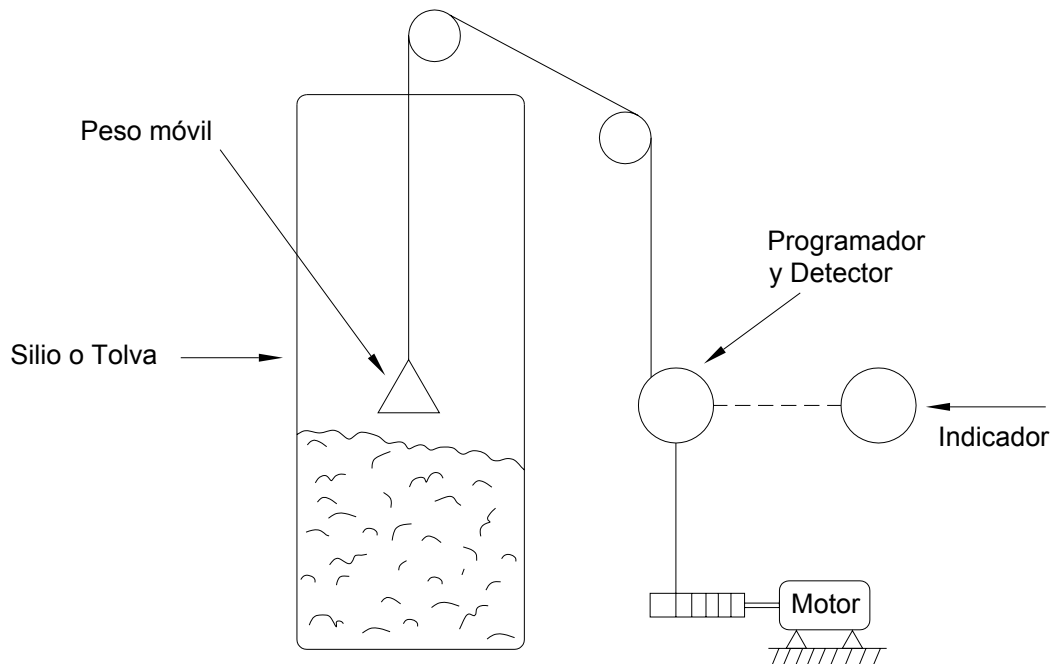


Fig. 2.41 Medición de nivel de sólidos por sondeo electromecánico.

### Medidor tipo báscula

El medidor de nivel de tipo báscula (fig. 2.42) mide el nivel de sólidos indirectamente a través del peso del conjunto tolva más producto; como el peso de la tolva es conocido, es fácil determinar el peso del producto y por lo tanto el nivel. Así, se puede obtener el peso  $F$  del tanque completo, dependiente del nivel  $L$ :

$$F = F_0 + gAL\rho_{\text{sólido}}$$

En donde  $F_0$  es el peso del tanque vacío y  $A$  es el área transversal, la cual se supone como constante a lo largo de la altura del tanque. Con el fin de medir  $F$  correctamente, es necesario aislar la totalidad del tanque en forma mecánica. Para mediciones precisas, se debe considerar la flotabilidad en el aire:

$$F = F_0 + gAL(\rho_{\text{sólido}} - \rho_{\text{aire}}) \quad L = \frac{F - F_0}{gA(\rho_{\text{sólido}} - \rho_{\text{aire}})}$$

La tolva se apoya en una plataforma de carga actuando sobre la palanca de una báscula o bien carga sobre otros elementos de medida neumáticos, hidráulicos o eléctricos.

Este método tiene desventajas severas cuando el tanque no está dentro de un edificio. Afuera, las fuerzas del aire y el peso de la lluvia pueden causar errores.



El sistema es relativamente caro, en particular en el caso de grandes tolvas, pudiendo trabajar a altas presiones y temperaturas. Su exactitud depende del sensor utilizado pudiendo variar de  $\pm 0.5\%$  a  $\pm 1\%$ .

Más adelante en la parte correspondiente a medición de variables físicas se profundizara mayormente en el tema.

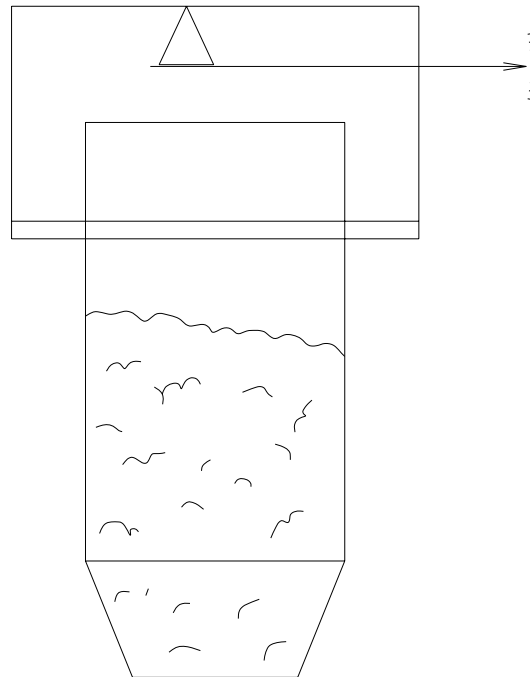


Fig. 2.42 Medidor de nivel de báscula.

### Medidor capacitivo

El funcionamiento del medidor de nivel de sólidos capacitivo es igual al descrito anteriormente en el punto 2.14 referente a la medición de nivel por características eléctricas del líquido.

Lo que diferencia al medidor capacitivo de nivel de sólidos con el otro, es que puede presentar mayor margen de error debido a que los sólidos presentan mayor adherencia en la varilla capacitiva; además de que la lectura está también influenciada por las variaciones de densidad del sólido.

La medición por este método se encuentra limitada a materiales en forma granular o en polvo que sean buenos aislantes y con condiciones de proceso de hasta 50 bar y 150 °C. La precisión alcanzada con este aparato es buena, de  $\pm 15$  mm aproximadamente.

Debido a las condiciones del proceso, la varilla del medidor se encuentra aislada y situada verticalmente en el tanque; el aseguramiento mecánico es adecuado para resistir la caída del producto y las fuerzas generadas producidas por los deslizamientos internos.

## **Medidor de presión diferencial**

Este tipo de instrumento se emplea en la medición y control continuo del nivel de lechos fluidizados. El funcionamiento es simple, ya que consiste en dos orificios de purga de aire situados en el tanque. Un orificio se encuentra por abajo y el otro por encima del lecho fluidizado; de esta forma, un transmisor electrónico mide la presión diferencial posterior de los dos orificios, donde dicha presión diferencial depende del nivel del lecho fluidizado. La temperatura máxima de operación es de 300 °C y es bastante funcional en cuanto a la respuesta.

## **Medidor de nivel de sólidos de ultrasonidos**

La medición de nivel de sólidos por ultrasonidos (fig. 2.43) consiste en un emisor de ultrasonidos que envía un haz horizontal a un receptor colocado al otro lado del tanque. Mientras el nivel de sólidos no intercepta el haz, el sistema permanece en oscilación (producido por un circuito oscilador excitador) enclavado este con un relé; pero cuando los sólidos interceptan los impulsos de ultrasonido entonces el sistema deja de oscilar y el relé es desexcitado y actúa sobre una alarma o sobre la maquinaria de descarga del depósito.

Esto es posible gracias a que la mayor parte de la superficie de los productos sólidos reflejan en mayor o menor grado los impulsos ultrasónicos.

Instalando el instrumento de forma vertical la medición se convierte en continua, ya que puede medirse el tiempo que transcurre desde que un impulso ultrasónico sale de la fuente emisora para viajar hasta la superficie del producto, donde es reflejado hacia el receptor localizado en la propia fuente. La fuente es en si misma un emisor y un receptor, por lo tanto, la señal reflejada es recibida por el receptor y esta llega como una señal que es función del tiempo transcurrido, por lo tanto, del nivel.

El sistema puede emplearse para la mayor parte de sólidos con mucho polvo, mucha humedad, opacos o transparentes. Aunque hay que señalar que en el caso de que la superficie del material sólido no se distingue apreciablemente, se pueden producir falsos ecos de ultrasonido. Por ello es siempre recomendable desarrollar un perfil de la superficie del material sólido mediante la computadora y tomar ello en cuenta al momento de realizar la medición.

La precisión de estos instrumentos es de  $\pm 0.15 \%$  a  $\pm 1\%$ , pudiendo ser su diseño a prueba de explosión para trabajar a temperatura máxima de 150 °C.

En el caso de que el producto sea muy viscoso como lo es el asfalto, el sistema de medición ideal es un radar de microondas ubicado en la parte superior del tanque, como el utilizado en la medición de líquidos bajo este método. La precisión de este instrumento es de  $\pm 2 \text{ mm}$  y su campo de medida de hasta 40 metros.

## **Medidor de nivel de radiación**

El instrumento que mide el nivel de sólidos por radiación (fig. 2.44) es de igual funcionamiento que el descrito anteriormente en la medición de nivel de líquidos.

Esta construido también por una fuente radiactiva de rayos gamma, colocando la fuente emisora en la parte externa e inferior del tanque y el detector en la parte superior del mismo. La radiación de esta forma atraviesa el lecho de sólidos.

Las condiciones de operación pueden ser de hasta 1300 °C y 130 bar, es adecuado para casi toda clase de materiales corrosivos o peligrosos excepto para aquellos que pudiera afectar la radiación. Sin embargo, el sistema es de alto costo debido a los requerimientos de seguridad que son inherentes al manejo de dispositivos radiactivos.

La precisión de este instrumento es de  $\pm 1\%$  y puede también utilizarse como un detector de punto fijo, pues sólo habría que instalar la fuente emisora y el detector horizontalmente en un mismo plano.

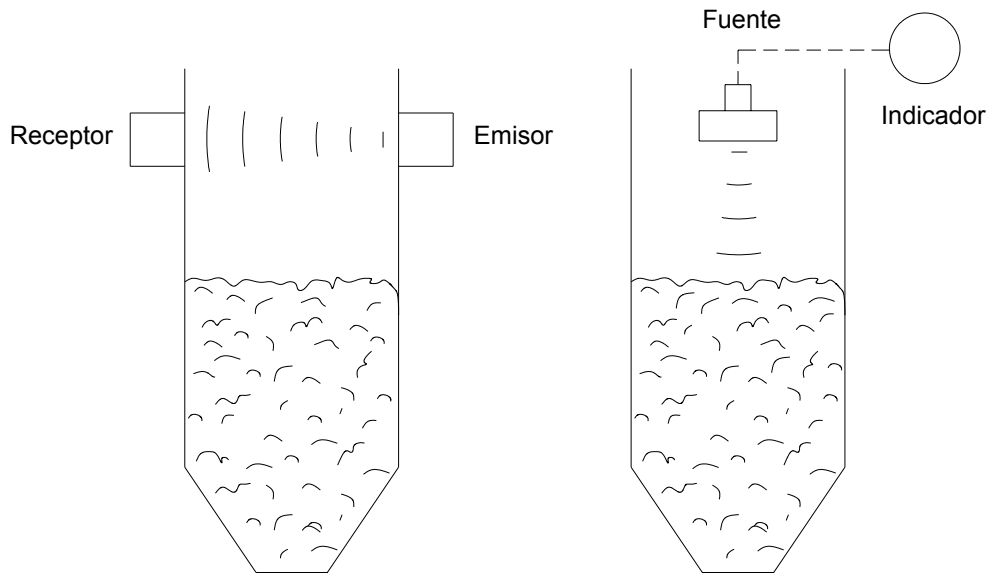


Fig. 2.43 Medición de nivel de sólidos por ultrasonidos.

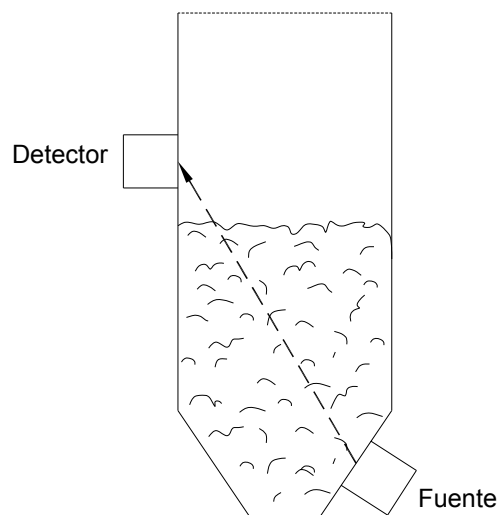


Fig. 2.44 Medición de nivel de sólidos por radiación.

## 2.20 Comparación entre instrumentos de medición de nivel de líquidos de medida directa y presión hidrostática

| Instrumento                      | Intervalo de medida             | Precisión % escala | Presión máxima de trabajo en bar | Temperatura máxima del fluido °C | Ventajas  | Desventajas  |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|--|
| Sonda                            | Limitado                        | 0.5 mm             | Atmosférica                      | 60                               | -Barato<br>-Preciso   | -Manual<br>-Requiere que no existan olas<br>-Sólo tanques abiertos           |
| Vidrio de Nivel                  | Limitado                        | 0.5 mm             | 200                              | 200                              | -Seguro<br>-Preciso   | -Sin transmisión   |
| Flotador                         | 0.10 mts                        | ± 1-2%             | 400                              | 250                              | -Sencillo e Independiente de la naturaleza del líquido          | -Posibilidad de agarrotamiento   |
| Desplazador                      | 0-2 mts                         | ± 0.5%             | 100                              | 170                              | -Fácil limpieza<br>-Robusto<br>-Posibilidad de medir interfases | -Riesgo de depósitos de sólidos<br>-Limitado campo de trabajo                |
| Manométrico                      | Limitado a la altura del tanque | ± 1%               | Atmosférica                      | 60                               | -Barato   | -Sólo tanques abiertos<br>-Necesidad de fluidos limpios                      |
| Tubo de Burbujeo                 | Limitado a la altura del tanque | ± 1%               | 400                              | 200                              | -Barato<br>-Versátil  | -Requiere mucho mantenimiento<br>-Posibilidad de contaminarse con el líquido |
| Presión diferencial de diafragma | 0-3 mts                         | ± (0.15% a 0.5%)   | 150                              | 200                              | -Preciso<br>-Posibilidad de medir interfases                    | -Posibilidad de taponamiento del diafragma                                   |

Tabla 2.3 Características de los instrumentos de medición de nivel de líquidos de medida directa y presión hidrostática.

## 2.21 Comparación entre instrumentos de medición de nivel por características eléctricas del líquido

| Instrumento | Intervalo de medida | Precisión % escala | Presión máxima de trabajo en bar | Temperatura máxima del fluido °C | Ventajas   | Desventajas   |
|-------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Conductivo  | Limitado            | -----              | 80                               | 200                              | -En líquidos conductores muy adecuado  | -Necesidad de líquido conductor                                   |
| Capacitivo  | Limitado            | ± 1%               | 250                              | 400                              | -Sencillo<br>-Resistente a la corrosión<br>-Fácil de limpiar   | -Recubrimiento de electrodos por material contenido en el líquido |
| Ultrasónico | 0-30 mts            | ± 1%               | 400                              | 200                              | -Aplicable a todo tipo de tanques y líquidos   | -Sensible a la densidad   |
| Radar       | 0-30 mts            | ± 2.5 mm           | -----                            | -----                            | -Aplicable a todo tipo de tanques y líquidos y con formación de espuma                                 | -Afectado por la constante dieléctrica del líquido                |
| Radiación   | 0-2.5 mts           | ± 0.5-2%           | -----                            | 150                              | -Aplicable a todo tipo de tanques y líquidos y con formación de espuma<br>-Sin contacto con el líquido | -Empleo de fuente radiactiva                                      |
| Láser       | 0-2 mts             | ± 0.5-2%           | -----                            | 1500                             | -Aplicable a todo tipo de tanques y líquidos y con formación de espuma<br>-Sin contacto con el líquido | -Empleo delicado  |

Tabla 2.4 Características de los instrumentos de medición de nivel de líquidos por características eléctricas del líquido.

## 2.22 Comparación entre instrumentos de medición de nivel de sólidos

| Tipo                    | Punto fijo |       | Continuo | Precisión % de la escala | Temp. max. de servicio °C | Tanques  |          | Ventajas   | Desventajas  |
|-------------------------|------------|-------|----------|--------------------------|---------------------------|----------|----------|--|--|
|                         | Alto       | Bajo  |          |                          |                           | Abiertos | Cerrados |  |  |
| Diafragma               | Sí         | Sí    | No       | 50 mm                    | 60                        | Sí       | Sí       | -Barato<br>-Sensible a materiales de variada densidad                                      | -Necesidad de que el material sea > 80 mm<br>-Tanques a baja presión       |
| Cono suspendido         | Sí         | Sí    | No       | 50 mm                    | 60                        | Sí       | No       | -Barato  | -Necesidad de protección   |
| Varilla flexible        | Sí         | No    | No       | 25 mm                    | 300                       | Sí       | No       | -Muy sensible  | -Requiere relé de retardo<br>-Sólo aplicable a nivel alto                  |
| Conductivo              | Sí         | Sí    | No       | 25 mm                    | 300                       | Sí       | Sí       | -Tanques a presión   | -Requiere conductividad de materiales                                      |
| Paletas rotativas       | Sí         | Sí    | No       | 25 mm                    | 60                        | Sí       | No       | -Uso con materiales a prueba de explosión  | -Sólo tanques abiertos o a baja presión                                    |
| Sondeo electro-mecánico | -----      | ----- | Sí       | ± 1%                     | 60                        | Sí       | No       | -Sencillo  | -Solidez mecánica media  |
| Báscula                 | -----      | ----- | Sí       | ± 1%                     | 900                       | Sí       | Sí       | -Preciso y seguro a altas Presiones y temp.  | -Costo elevado   |
| Capacitivo              | -----      | ----- | Sí       | 15 mm                    | 150                       | Sí       | Sí       | -Bajo costo  | -Solo para materiales aislantes<br>-Se adhiere el producto                 |
| Presión diferencial     | -----      | ----- | Sí       | -----                    | 300                       | Sí       | Sí       | -Rápida respuesta  | -Taponeo del orificio de purga   |
| Ultrasonidos            | Sí         | Sí    | Sí       | ± 1%                     | 150                       | Sí       | Sí       | -Material opaco o claro<br>-A prueba de explosión  | -Costo medio   |
| Radiación               | Sí         | Sí    | Sí       | ± 1%                     | 1300                      | Sí       | Sí       | -Tanques cerrados<br>-Productos corrosivos y peligrosos<br>-Altas presiones y temperaturas | -Costo elevado<br>-Fuente radiactiva<br>-Necesidad de supervisión continua |

Tabla 2.5 Características de los instrumentos de medición de nivel de sólidos.

## 2.23 Medición de Presión

La presión se define como el valor de la fuerza que un fluido ejerce perpendicularmente sobre una unidad de superficie. No solo esta presión es debida al fluido por si mismo, si no que también es debida a la presión atmosférica y esta, se transmitirá uniformemente a través del volumen del fluido. Por lo tanto, en un sistema cualquiera se verificará la siguiente expresión: Presión absoluta = Presión Manométrica + Presión atmosférica; donde la presión absoluta es la que existe dentro del sistema y es ejercida por el fluido que lo contiene, mientras que la presión manométrica es la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica.

Las unidades en las que se expresa la presión pueden ser el pascal (Pa), el bar, atmósferas (Atm) , kilogramo por centímetro cuadrado ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) y libra por pulgada cuadrada (psi), por mencionar las mas comunes. El pascal es igual a  $1\text{N}/\text{m}^2$ , siendo el newton la fuerza aplicada a un cuerpo cuya masa es 1kg y que lo acelera a  $1\text{m}/\text{s}^2$ . Como el Pascal es una unidad muy pequeña también se emplea el bar ( $\text{bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1.02 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ ), el kilopascal ( $1 \text{ Kpa} = 10^{-2} \text{ bar}$ ), el Megapascal ( $1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$ ), el Gigapascal ( $1 \text{ GPa} = 10,000 \text{ bar}$ ) y el  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ . Otras unidades que también existen en la medición de presión son la pulgada de columna de agua (in  $\text{H}_2\text{O}$ ), la pulgada de columna de mercurio (in Hg), los centímetros de columna de agua (cm  $\text{H}_2\text{O}$ ) y los milímetros de columna de mercurio (mm Hg). La tabla 2.6 muestra las unidades con las que se mide la presión y sus equivalencias.

De esta forma la presión absoluta en un sistema estará determinada por la suma de la presión manométrica y la atmosférica. Es decir, en la lectura de un manómetro de tubo en U (por ejemplo), lo que en realidad se mide es la diferencia de presiones entre la presión que hay en el sistema donde se hace la medición y la atmosférica; a esto se le conoce como presión manométrica o relativa si la diferencia es positiva, si la diferencia es negativa entonces se le conoce como presión de vacío y esto quiere decir simplemente que la presión en el sistema esta por debajo de la atmosférica. La presión diferencial por su parte, es solo la diferencia de presión entre dos puntos determinados. La presión atmosférica es la presión que ejerce la atmósfera terrestre medida con un barómetro, a nivel del mar, esta presión se aproxima a los 760 mm Hg de mercurio absolutos o 14.7 psia; estos valores representan el estándar de presión atmosférica. En la presión relativa al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuirá o aumentará respectivamente la lectura hecha. La presión de vacío se expresa comúnmente en milímetros de mercurio, (mm. Hg), milímetros de columna de agua (mm  $\text{H}_2\text{O}$ ) o en pulgadas de columna de agua (in  $\text{H}_2\text{O}$ ). Las variaciones de la presión atmosférica influyen considerablemente en las lecturas de vacío.

Con la posible excepción de la temperatura, la presión es probablemente la variable más importante que debe ser medida y controlada en los procesos industriales. Las razones para medir y controlar la presión en un sistema son a saber, las más importantes:

- a) Protección a los equipos
- b) Protección a personal
- c) Obtener un producto dentro de ciertas especificaciones

El campo de aplicación de los medidores de presión es amplio y abarca desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones de miles de bar.

| Psi      | Atms     | in H <sub>2</sub> O | mmH <sub>2</sub> O | cmH <sub>2</sub> O | Kg/cm <sup>2</sup> | in Hg    | mmHg (Torr) | cm Hg   | m bar  | bar      | Pa (N/m <sup>2</sup> ) | KPa    | MPa      |
|----------|----------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|-------------|---------|--------|----------|------------------------|--------|----------|
| 1        | 0.0681   | 27.71               | 703.8              | 70.38              | 0.0704             | 2.036    | 51.715      | 5.17    | 68.95  | 0.0689   | 6895                   | 6.895  | 0.0069   |
| 14.7     | 1        | 407.2               | 10,343             | 1,034.3            | 1.033              | 29.92    | 760         | 76      | 1013   | 1.013    | 101,325                | 101.3  | 0.1013   |
| 0.0361   | 0.00246  | 1                   | 25.4               | 2.54               | 0.00254            | 0.0735   | 1.866       | 0.187   | 2.488  | 0.00249  | 248.8                  | 0.249  | 0.00025  |
| 0.001421 | 0.000097 | 0.0394              | 1                  | 0.1                | 0.0001             | 0.00289  | 0.0735      | 0.00735 | 0.098  | 0.000098 | 9.8                    | 0.0098 | 0.00001  |
| 0.01421  | 0.000967 | 0.3937              | 10                 | 1                  | 0.001              | 0.0289   | 0.735       | 0.0735  | 0.98   | 0.00098  | 98                     | 0.098  | 0.0001   |
| 14.22    | 0.968    | 394.1               | 100,010            | 1,001              | 1                  | 28.96    | 735.6       | 73.56   | 980.7  | 0.981    | 98,067                 | 98.07  | 0.0981   |
| 0.4912   | 0.03342  | 13.61               | 345.7              | 34.57              | 0.0345             | 1        | 25.4        | 2.54    | 33.86  | 0.0339   | 3386                   | 3.386  | 0.00339  |
| 0.01934  | 0.001316 | 0.536               | 13.61              | 1,361              | 0.00136            | 0.0394   | 1           | 0.1     | 1.333  | 0.001333 | 133.3                  | 0.1333 | 0.000133 |
| 0.1934   | 0.01316  | 5.358               | 136.1              | 13.61              | 0.0136             | 0.394    | 10          | 1       | 13.33  | 0.01333  | 1333                   | 1.333  | 0.00133  |
| 0.0145   | 0.000987 | 0.4012              | 10.21              | 1.021              | 0.00102            | 0.0295   | 0.75        | 0.075   | 1      | 0.001    | 100                    | 0.1    | 0.0001   |
| 14.504   | 0.987    | 401.9               | 10,210             | 1021               | 1.02               | 29.53    | 750         | 75      | 1000   | 1        | 100,000                | 100    | 0.1      |
| 0.000145 | 0.00001  | 0.00402             | 0.102              | 0.0102             | 0.00001            | 0.000295 | 0.0075      | 0.00075 | 0.01   | 0.00001  | 1                      | 0.001  | 0.000001 |
| 0.14504  | 0.00987  | 4.019               | 102.07             | 10.207             | 0.012              | 0.295    | 7.5         | 0.75    | 10     | 0.01     | 1,000                  | 1      | 0.001    |
| 145.04   | 9.869    | 4019                | 102,074            | 10,207             | 10.2               | 295.3    | 7500        | 750     | 10,000 | 10       | 1,000,000              | 1,000  | 1        |

Para utilizar el cuadro:

- Buscar la columna con las unidades que se desean convertir.
- Bajar en la columna hasta encontrar el número "1".
- Moverse horizontalmente en la misma hilera hasta la columna con las unidades a las cuales se quieren convertir.
- Multiplicar el número de esa casilla por la cantidad que se quiere convertir para obtener su equivalencia.

Ejemplo: 15 psi a bar: (15) (0.0689) = 1.0335 bar.

Fuente: Catálogo de productos Wika, Pressure and Temperature.

Tabla 2.6 Unidades de presión y sus equivalencias.



## 2.24 Elementos de Medida de Presión

Los elementos de medida de presión se dividen en tres grupos:

- Mecánicos (incluye a los neumáticos)
- Electromecánicos
- Electrónicos

Los elementos mecánicos son aquellos que comúnmente en el lazo de control forman el elemento primario de medición, y aun con los sofisticados avances en la electrónica y su aplicación en la automatización de procesos, estos elementos primarios siguen siendo ampliamente utilizados, ya que la medición local de la variable siempre es importante.

Los elementos neumáticos son del tipo:

- Sistema tobera-obturador
- Equilibrio de movimientos

Ambos diseños son descritos en detalle en el capítulo anterior correspondiente a transmisores.

Los elementos electromecánicos por su parte son aquellos del tipo:

- Equilibrio de fuerzas
- Resistivos
- Magnéticos
- Capacitivos
- Extensiométricos
- Piezoeléctricos

Los elementos de equilibrio de fuerzas también son estudiados en el capítulo de transmisores.

Finalmente, los elementos electrónicos son del tipo:

- Mecánicos
- Térmicos
- Ionización

Debido a que los elementos (también conocidos como transductores) neumáticos, electromecánicos y electrónicos, forman un conjunto con el transmisor (es decir, que el transmisor posee en si mismo alguno de estos dispositivos y funciona bajo su principio), no serán estudiados en el presente capítulo, pues el estudio de los más importantes se realizó ya en el capítulo anterior, y sólo nos limitaremos a describir ahora las características más importantes de cada uno de estos elementos. Estas serán resumidas en la tabla 2.7 para los elementos electromecánicos, mientras que la de los electrónicos en la tabla 2.8.

Como el objeto principal de nuestro estudio es la medición local de la variable (presión en este caso), estudiaremos más a fondo a los elementos mecánicos, dándole una mayor prioridad al más importante de estos, el cual es el manómetro.

## Descripción de elementos electromecánicos

### Resistivos

Este tipo de transductor se basa en la deformación que sufre un elemento elástico como un tubo Bourdon o una cápsula debido a la presión aplicada y que dicha deformación varía la resistencia óhmica de un potenciómetro (el instrumento más preciso para medir una fuerza electromotriz es el potenciómetro, que mide esta magnitud al compararla con una fuerza electromotriz variable y de valor conocido, opuesta a la que se quiere medir). El transductor resistivo consta entonces de un muelle de referencia, el elemento de presión y un potenciómetro de precisión. El elemento de presión es sostenido por el muelle de referencia y su movimiento se transmite a un brazo móvil aislado que se apoya sobre un potenciómetro de precisión, mismo que a su vez esta conectado a un puente de Wheatstone (este es un circuito eléctrico, que está formado por tres resistencias conocidas y una desconocida, conectadas a una fuente de corriente continua y a un galvanómetro; variando el valor de una de las resistencias conocidas, el puente se puede ajustar a cualquier valor de la resistencia desconocida, que se calcula a partir de los valores de las otras resistencias; su nombre fue dado en honor a Charles Wheatstone, físico e inventor británico del siglo XIX quien fue el primero en aplicar el instrumento a la medición de resistencias de circuitos eléctricos). El transductor resistivo es un dispositivo simple pero su señal es lo bastante potente que no necesita ser amplificada, sin embargo, es sensible a vibraciones y su estabilidad es baja con el tiempo. El rango de medida depende del elemento de medición que utilice y que por lo general oscila entre 0.1 a 300 Kg/cm<sup>2</sup>; la precisión de estos elementos es del orden de 1-2%.

### Magnéticos

Los transductores magnéticos se dividen en dos tipos:

- De inductancia variable
- De reluctancia variable

### Transductor de inductancia variable

Los transductores de inductancia variable se basan en el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina, lo cual aumenta la inductancia de esta. El desplazamiento del núcleo es debido a la presión que se ejerce sobre el elemento de medición (Bourdon, fuelle, cápsula, etc.) el cual esta sostenido por un fuelle de referencia. La porción metálica del núcleo que se desplaza dentro de la bobina es casi proporcional al aumento de inductancia en la bobina. Debido a que el devanado de la bobina se alimenta de una corriente alterna, la f.e.m. de autoinducción generada se opone a la f.e.m. de alimentación. De esta forma al ir penetrando el núcleo móvil dentro de la bobina la corriente en el circuito presente se va reduciendo por el aumento de la f.e.m. autoinducida. Estos transductores no producen rozamiento en la medición, tienen una respuesta lineal y su precisión es del orden de  $\pm 1\%$ .

## **Transductor de reluctancia variable**

Los transductores de reluctancia variable consisten en un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. El circuito se alimenta de una fuerza constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura, varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación en el flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina, la cual es proporcional al grado de desplazamiento de la bobina móvil; el desplazamiento de esta bobina, como en el caso anterior, es debido a la presión ejercida sobre el elemento de medición. Estos transductores tienen alta sensibilidad a las vibraciones, una estabilidad media en el tiempo, son sensibles a la temperatura y su precisión es de  $\pm 0.5\%$ .

## **Capacitivos**

Estos se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La placa que es móvil está situada entre dos placas fijas, por lo que de esta forma se logra tener dos condensadores uno de capacidad fija y el otro variable que pueden compararse en circuitos de puente de Wheatstone alimentados con corriente alterna. Los transductores capacitivos tienen una señal de salida débil, son sensibles a las variaciones de temperatura, aunque su margen de medida es amplio, de entre 0.5 a 600 bar con una precisión del orden de 0.2% a 0.5%. La principal desventaja es que su señal de salida es débil, por lo que precisan de amplificadores de señal en la salida, lo que puede introducir errores en la medición.

## **Extensiométricos**

Esta clase de transductores se basan en la variación de longitud y de diámetro, como consecuencia de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia se somete a una tensión mecánica debido a la presión.

Los hay de dos tipos:

- Galgas extensiométricas cementadas
- Galgas extensiométricas sin cementar

## **Galgas extensiométricas cementadas y sin cementar**

Las galgas cementadas se forman por varios bucles de hilo muy fino de resistencia que se encuentran pegados a una hoja base flexible de plástico, papel o cerámica; mientras que las galgas sin cementar los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil. En ambos casos, la aplicación de la presión, actúa sobre los hilos modificando la resistencia de los mismos. La galga (cementada o sin cementar) forma parte de un puente de Wheatstone y cuando está sin tensión tiene una resistencia eléctrica determinada. Al aplicar al circuito una tensión nominal se origina una pequeña corriente que circula por la resistencia y crea una caída de tensión en la misma con lo que el puente se equilibra. De esta forma, al existir cualquier variación de presión que mueva al diafragma del transductor, cambiaría la resistencia de la galga y desequilibraría al puente. El intervalo de medida de estos transductores varía entre 0.6 a 10,000 bar con una precisión de  $\pm 0.5\%$ ; no son prácticamente afectados por la temperatura ni tampoco influidos por campos magnéticos, tienen alta sensibilidad a vibraciones y su estabilidad es dudosa a lo largo del tiempo.

## **Piezoeléctricos**

Estos transductores son materiales de cuarzo o titanato de bario, que al deformarse por acción de la presión generan una señal eléctrica. Son capaces de soportar temperaturas de 150 °C en servicio continuo y 230 °C en servicio intermitente; su respuesta a la variación de presión es lineal, son sensibles a los cambios de temperatura y su señal de salida es débil por lo que necesitan amplificadores de señal.

## **Descripción de elementos electrónicos de medición de presión**

Estos transductores son empleados para la medición de gases en alto vacío y son muy sensibles. A continuación se describen.

## **Mecánicos**

Los transductores mecánicos son de fuelle y diafragma cuyo funcionamiento se describirá más adelante y solo nos limitaremos a decir ahora que no son adecuados para la medición de alto vacío; esto es debido a que las fuerzas del gas en alto vacío son muy pequeñas, con lo que estos dispositivos no alcanzan a sentir. Pueden también acoplarse a transductores eléctricos tipo galga extensiométrica o capacitivos.

## **Térmicos**

Estos transductores se basan en el principio de la proporcionalidad entre la energía disipada desde la superficie caliente de un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas ambiente cuando el gas está a bajas presiones absolutas.

Se dividen en tres tipos:

- Termopar
- Pirani
- Bimetálico

## **Termopar**

El tipo termopar posee un filamento que lleva un termopar: Cuando pasa una corriente constante a través del filamento, su temperatura es inversamente proporcional a la presión absoluta del gas. La fuerza electromotriz generada por el termopar indica la temperatura del filamento y por lo tanto señala el vacío en el ambiente. Para que exista compensación por la temperatura ambiente se emplea una segunda unidad contenida dentro de un tubo sellado al vacío. La señal de salida diferencial de los dos termopares es proporcional a la presión. Estos transductores son de bajo costo, larga duración y confiabilidad; no obstante tienen el inconveniente de ser sensibles a la composición del gas, su escala es no lineal y presentan riesgo de combustión si se expone a la presión atmosférica cuando el filamento está caliente. Su intervalo de medida es de 0.5 a  $10^{-3}$  mm Hg.

## **Pirani**

El tipo pirani emplea un puente Wheatstone que compara las resistencias de dos filamentos de tungsteno, uno está sellado en alto vacío en un tubo y el otro en contacto con el gas medido, por lo que pierde calor por conducción; en este filamento la variación de su resistencia refleja la presión medida. Este tipo de transductor es de sencillo funcionamiento y puede estar a la presión atmosférica sin peligro de combustión; sin embargo, tiene el inconveniente de que su calibración depende del gas medido y es además altamente no lineal. Su intervalo de medida es de 2 a  $10^{-3}$  mm Hg.

## **Bimetálico**

El tipo bimetálico utiliza una espiral bimetálica que está calentada por una fuente de tensión estabilizada, la espiral está contenida en una cámara que se conecta al vacío donde se efectuara la medición. Cualquier cambio en la presión produce una deflexión en la espiral, que a su vez, está conectada a un índice que señala en la escala correspondiente el vacío. El intervalo de medida para este dispositivo es de 1 a  $10^{-3}$  mm Hg.

## **Ionización**

Estos transductores se basan en la formación de iones que se producen en la colisión que existe entre moléculas y electrones (partículas alfa en el tipo de radiación), la velocidad de formación de estos iones (la corriente iónica) varía directamente con la presión.

Se dividen en dos tipos:

- Filamento caliente
- Cátodo frío

### **Filamento caliente**

El transductor de filamento caliente consiste en un tubo electrónico adaptado para la medición en el vacío, con un filamento de tungsteno rodeado por una rejilla en forma de bobina, la cual a su vez está envuelta en una placa colectora. Los electrones que emite el filamento hacia la rejilla positiva, pasan a través de ella y en su camino hacia la placa colectora de carga negativa algunos colisionan con moléculas del gas. Esto forma una corriente positiva la cual es, función del número de iones y por lo tanto constituye una medida de la presión del gas. Esta clase de transductor es muy delicado y debe ser manejado con cuidado, ya que el filamento puede quemarse si es sometido a presiones superiores a  $10^{-3}$  mm Hg abs. Tienen el inconveniente de ser sensibles a la composición del gas, aunque son capaces de medir vacíos extremadamente altos, con un margen de medida  $10^{-3}$  a  $10^{-13}$  mm Hg.

### **Cátodo frío**

Los de cátodo frío están basados en el principio de la medida de una corriente iónica producida por una descarga de alta tensión. En un tubo electrónico al vacío se descarga 2000 volts de tensión; los electrones se desprenden del cátodo y toman un movimiento en espiral al irse desplazando a través de un campo magnético (que es aplicado al tubo) en su camino hacia el ánodo.

El movimiento en espiral provoca que el camino libre medio entre electrones sea mayor que la distancia entre electrodos, por lo tanto aumenta la posibilidad de colisiones con las moléculas del gas presente y de este modo la descarga catódica se mantiene a una presión más baja, esto es a un vacío más alto. Este dispositivo no puede vaciarse de gases tan rápidamente como el filamento caliente, pero es más robusto y no presenta el problema de la combustión del filamento. Su campo de medida es de  $10^{-2}$  a  $10^{-7}$  mm Hg.

| Transductores           | Intervalo de medida en bar | Precisión en % de toda la escala | Estabilidad en el tiempo | Temp. max. de servicio en °C | Error de cero por influencia de la temp. ambiente | Nivel señal de salida | Sensibilidad a vibraciones |      |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|---|-----------------------|----------------------------|------|
| Equilibrio de fuerzas   | 2-6000                     | 0.5                              | Media<br>A<br>Mala       | 65                           | 0.9-2.3%  | 10 V                  | Alta                       |      |
| Resistivos              | 0-0.1<br>a<br>0-300        | 1                                | Mala                     | 80                           | 0.7-3.0%  | 10 V                  | Alta                       |      |
| Magnéticos              | Inductancia variable       | 0-0.1<br>a<br>0-300              | 0.5                      | Media                        | 80  | 0.9-2.3%              | 0-5 V                      | Alta |
|                         | Reluctancia variable       | 0-0.1<br>a<br>0-300              | 1                        | Media                        | 80  | 0.6-2.4%              | 0-5 V                      | Alta |
| Capacitivos             | 0.05-5<br>a<br>0.05-600    | 1                                | Media<br>A<br>Buena      | 150                          | 0.5-1.9%  | 0-5 V                 | Media                      |      |
| Galgas Extensiométricas | Cementadas                 | 0-0.5<br>a<br>0-3000             | 0.5                      | Mala                         | 120   | 0.5-2.4%              | 35 mA                      | Alta |
|                         | Sin cementar               | 0-0.01<br>a<br>0-600             | 1                        | Mala                         | 120   | 0.5-2.4%              | 35 mA                      | Alta |
| Piezoeléctricos         | 0.1-600                    | 1                                | Mala                     | 90                           | 1-4.8%  | 600mV/bar             | Baja                       |      |

Tabla 2.7 Elementos de medida de presión electromecánicos.

| Transductores | Margen en torrs    | Escala               | Precisión   |      |
|---------------|--------------------|----------------------|-------------|------|
| Mecánicos     | 760-5              | Lineal               | 1 %         |      |
| Térmicos      | Termopar           | $0.5-10^{-3}$        | Logarítmica | Alta |
|               | Pirani             | $2-10^{-3}$          | Logarítmica | Alta |
|               | Bimetal            | $1-10^{-3}$          | Logarítmica | Alta |
| Ionización    | Filamento caliente | $10^{-3} - 10^{-13}$ | Logarítmica | Alta |
|               | Cátodo frío        | $10^{-2} - 10^{-7}$  | Logarítmica | Alta |

Tabla 2.8 Elementos de medida de presión electrónicos.

## 2.25 Elementos Mecánicos

Los elementos mecánicos se dividen en dos grupos; el primeros los forman aquellos dispositivos de medida directa que cuantifican la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y alturas conocida como es el caso del barómetro de cubeta o el manómetro en U. Los elementos de medición de presión mecánicos más conocidos son los siguientes:

- Barómetro de cubeta
- Manómetro de tubo en “U”
- Tubo Bourdon en “C”
- Elemento en espiral
- Elemento helicoidal
- Diafragma
- Fuelle
- Medidores de presión absoluta

### Barómetro de cubeta

Este es un dispositivo muy sencillo y que es empleado para medir la presión atmosférica. El principio de operación se muestra en la figura 2.45.

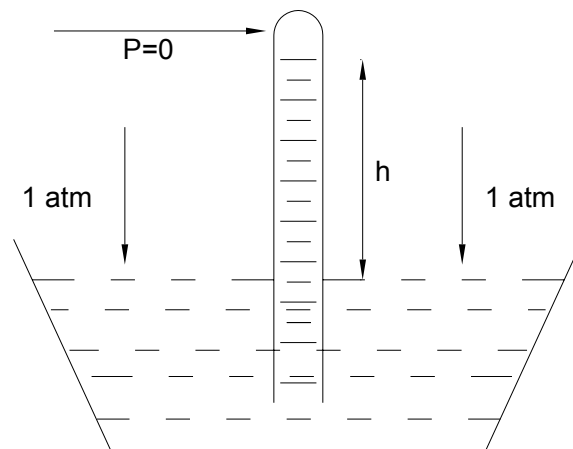


Fig.2.45 Barómetro.

Un tubo de vidrio de unos 85 cm de altura, cerrado en un extremo, se llena de mercurio. El extremo abierto se tapa y el tubo se invierte en una cubeta de mercurio. Si no se tapa el extremo abierto, el mercurio fluye hacia afuera del tubo hasta que la presión ejercida por la columna de mercurio equilibra exactamente la presión atmosférica que actúa sobre el mercurio de la cubeta. Puesto que la presión en el tubo sobre la columna de mercurio es cero, la altura de la columna por arriba del nivel de mercurio en la cubeta indica la presión atmosférica. Al nivel del mar una presión atmosférica de  $14.7 \text{ lb/in}^2$  hará que el nivel de mercurio en el tubo se establezca a una altura de 76 cm.

Esto quiere decir que la presión atmosférica a nivel del mar es equivalente a la presión que ejercería una columna de 76 cm de Hg de altura. Las variaciones en la presión atmosférica hacen que el líquido del tubo suba o baje ligeramente. A nivel del mar no suele caer por debajo de los 737 mm ni subir más de 775 mm. Cuando el nivel del mercurio se lee en una escala graduada y se hacen las correcciones adecuadas según la altitud y latitud, la temperatura (debido a la dilatación o contracción del mercurio) y el diámetro del tubo (por los efectos de capilaridad), la lectura del barómetro de mercurio puede tener una precisión de hasta 0.1 mm. Aunque puede utilizarse agua en vez de mercurio, esto no resultaría práctico, pues se tendría que construir un tubo muy alto.

Además de estos dos líquidos también pueden utilizarse el aceite de vaselina y el tetrabroruro de acetileno, aunque el mercurio es el que casi siempre se utiliza. Para predecir el tiempo es imprescindible averiguar el tamaño y la forma de las masas continentales; esto puede realizarse efectuando observaciones barométricas en una serie de puntos distintos; como la presión atmosférica no es una cantidad constante si no que varía con el lugar, altura, posición geográfica y condiciones metereológicas, se ha observado en la previsión del tiempo que, las altas presiones traen consigo buen tiempo, mientras que las bajas presiones trae lluvia o viento. Es por ello que el barómetro encuentra su principal aplicación en los pronósticos meteorológicos, y sólo cuando se desea una gran precisión en la medida de bajas presiones puede ser empleado para fines industriales, como es el caso del manómetro de tubo en U que se explica a continuación.

### Manómetro de tubo en “U”

Un aparato muy común para medir la presión manométrica es el manómetro de tubo abierto (fig. 2.46)

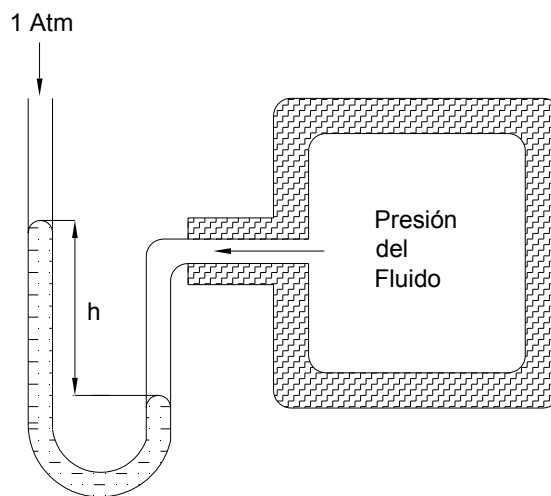


Fig. 2.46 Manómetro de tubo en U. La presión se mide por la altura  $h$  de la columna de mercurio.

El manómetro consiste en un tubo de forma de U que contiene mercurio. Cuando ambos extremos están abiertos, el mercurio busca su propio nivel ya que se ejerce una atmósfera de presión en cada uno de los extremos abiertos. Cuando uno de los extremos se conecta a una cámara presurizada, el mercurio se eleva en el tubo abierto hasta que las presiones se igualan. La diferencia entre los dos niveles de mercurio es una medida de la presión manométrica: la diferencia entre la presión absoluta en la cámara y la presión atmosférica en el extremo abierto.



Estos elementos de medida de presión se usan para medida directa de presiones, pero resulta incomodo la lectura, ya que hay que hacerla como diferencia de las lecturas en las dos ramas. También son empleados para medir bajas presiones y se desea una alta precisión.

Para este sistema se verifica una expresión muy sencilla:

$$P - P_a = h \delta$$

Donde:

P = Presión del proceso Kg/cm<sup>2</sup>

P<sub>a</sub> = Presión atmosférica Kg/cm<sup>2</sup>

h = Diferencia de nivel en las dos ramas, cm

δ = Densidad del líquido, Kg/cm<sup>3</sup>

O sencillamente se tomará la medida como una diferencia de altura de columna de mercurio.

El otro grupo de elementos mecánicos son los elásticos como el tubo Bourdon, el espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle, a continuación se describen cada uno de ellos.

### **Tubo Bourdon en “C”**

El tubo Bourdon en “C” (fig. 2.47) es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo de 250°, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, este tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora. La deformación del tubo Bourdon en “C” es bastante compleja para enunciarse en una “ley de deformación” y sólo ha sido determinada empíricamente a través de numerosas observaciones y ensayos en varios tubos.

Los manómetros de tubo Bourdon en “C” se utilizan ampliamente en todas las ramas de la industria. La construcción es sencilla pero rígida, y la operación no requiere suministro de corriente. El elemento del tubo Bourdon en “C” (también conocido como movimiento), esta directamente expuesto al medio que se va a medir y esta normalmente construido de bronce fosforoso, acero inoxidable, acero inox 304, acero inox. 316, bronce o aleaciones especiales como hastelloy (aleación de níquel, molibdeno y cromo), monel (aleación de níquel, cromo y hierro), esto desde luego, dependerá de su aplicación.

De esta forma el movimiento en el extremo del tubo Bourdon en “C” se transmite mediante un eslabón al mecanismo, el mecanismo convierte el movimiento lineal del extremo de tubo Bourdon en “C” en movimiento rotacional que a su vez hace que la aguja indique la presión medida.

Los manómetros de tubo Bourdon en “C” están diseñados para medir presión (comúnmente la expresión “medir presión” se refiere a que se medirá una presión manométrica positiva) y vacío, son adecuados para los medios gaseosos y líquidos limpios que no taponen. Este elemento de medición mecánico es el más comúnmente empleado en la industria, por ello mas adelante se hablara con mayor detalle de su diseño, selección e instalación, así como los factores técnicos ligados a estos instrumentos de medida de presión. Este elemento de medición de presión fue inventado por el ingeniero francés Eugene Bourdon.

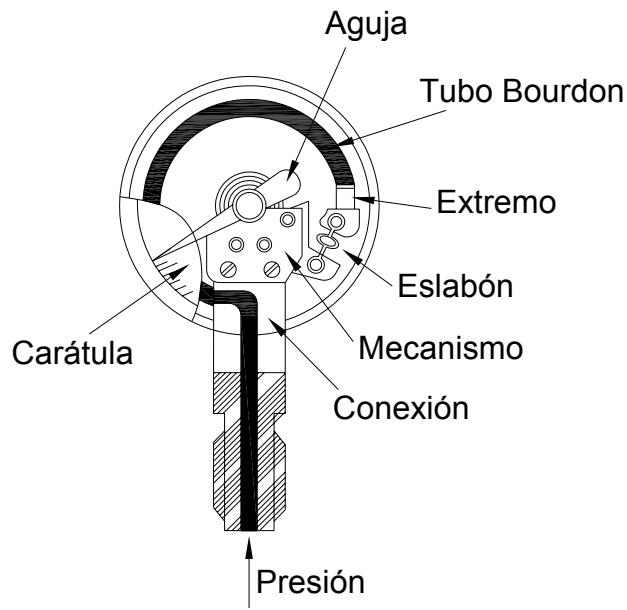


Fig. 2.47 Manómetro de tubo Bourdon en "C".

### Elemento en espiral

Este elemento es un tubo Bourdon arrollado en forma de espiral alrededor de un eje común; de esta forma, en vez de tener un solo arco en forma de "C" se tiene varios arcos que forman una espiral (fig. 2.48). Un cambio de la presión dada, causa un movimiento mucho mayor que en el tubo Bourdon en "C" y se mejora la sensibilidad del elemento. Al igual que el Bourdon en "C" también es adecuado para medición de vacío y los materiales de construcción son iguales a los del tubo Bourdon en "C".

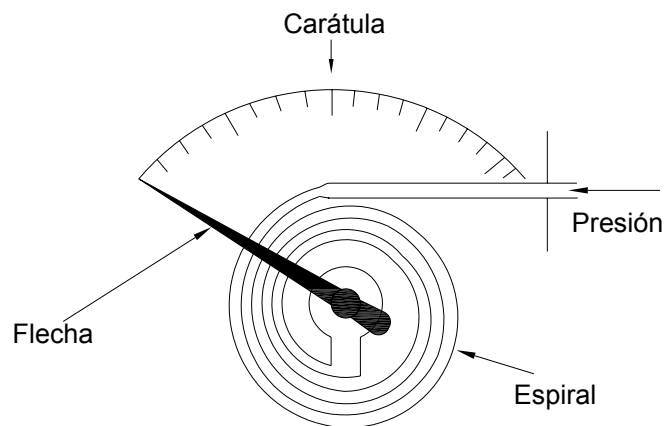


Fig. 2.48 Tubo Bourdon en espiral.

## Elemento helicoidal

Este se diseña arrollando más de una espira en forma de hélice. Aumenta considerablemente el movimiento, produciendo mayor ampliación que la espiral. Normalmente se instala un eje central dentro del elemento y se toma el movimiento desde este eje. El rango de la espiral depende del diámetro de la misma, del espesor de pared, del número de espiras y del material de fabricación. Para elementos de bajas presiones suelen tener 2 o 3 espiras y para altas presiones hasta 20. Los materiales de construcción son iguales a los del tubo Bourdon en “C”. La figura 2.49 muestra la descripción de este elemento.

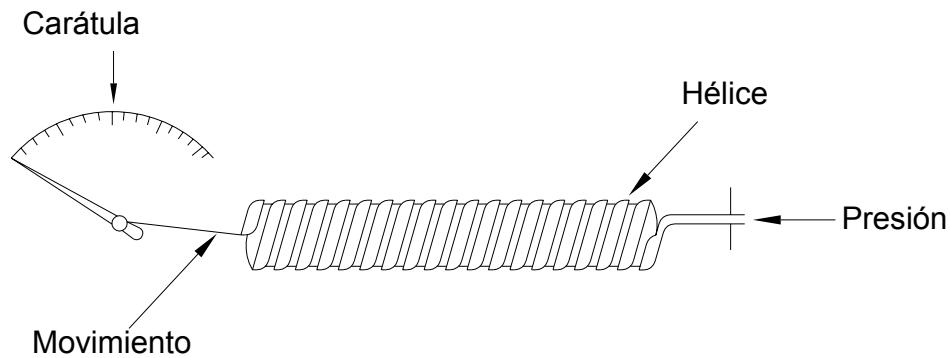


Fig. 2.49 Tubo Bourdon en hélice.

## Diafragma

El elemento de diafragma consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que al aplicar presión, cada cápsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos son amplificadas por un juego de palancas. El sistema está diseñado de forma que, al aplicar presión el movimiento se aproxima a una relación lineal en el intervalo de medida. La sensibilidad de la cápsula aumenta con su diámetro que suele variar entre 25 mm y 150 mm. Se emplean diferentes materiales para mejorar las características elásticas del diafragma, tales como aleación de níquel o inconel o acero inoxidable, estos últimos son empleados para temperaturas de operación extremas (-100 a 500 y -200 a 300 °C), o cuando la corrosión del fluido de proceso lo exija.

Al respecto existen manómetros de diafragma que combinan un sello químico con un manómetro en una sola unidad compacta y económica. Esta clase de manómetros son construidos para resistir medios corrosivos y altamente viscosos; pueden medir presiones de 0–5” de H<sub>2</sub>O y hasta 0–600 psi (se aclara que al mencionar un rango de operación indicando que elemento podrá trabajar dentro de ese rango, significa que estos rangos son comerciales, aunque de acuerdo a las características del proceso, tal vez sea necesario un diseño especial del elemento de medida y esto incluye al rango) contrario al diafragma como elemento individual que se utiliza para la medición con mucha precisión de bajas presiones.

De esta forma, al utilizarse el diafragma como elemento mecánico, el fluido ejercerá una fuerza en el diafragma y una varilla de empuje soldada a la parte superior del diafragma transmitirá la deflexión del diafragma al mecanismo lateral de la varilla de empuje en un movimiento de rotación de la aguja indicadora.

Aunque en ocasiones es mejor unir varios diafragmas, pues el movimiento de uno solo puede ser muy pequeño, por lo cual, al unir varios de estos elementos en cápsulas, se mejorara el funcionamiento. Véase figura 2.50.

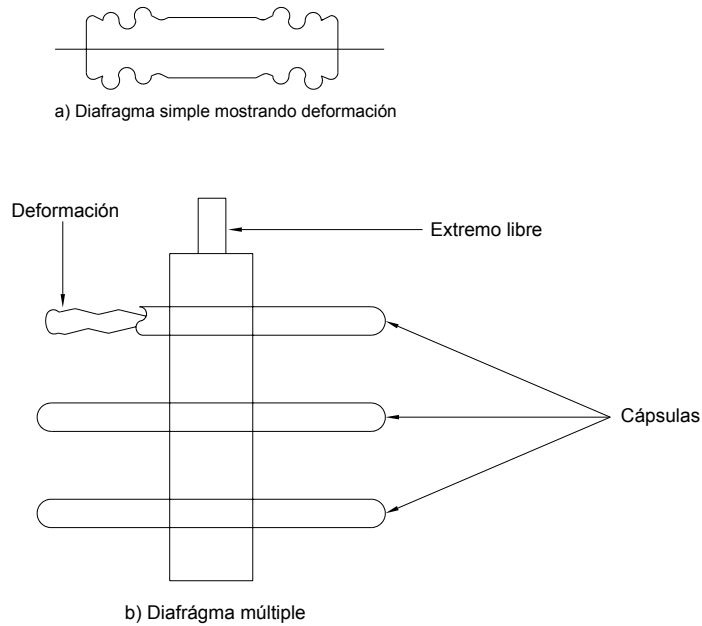


Fig. 2.50 Tipos de diafragmas.

## Fuelle

El fuelle por su parte (fig. 2.51) es parecido al diafragma compuesto, pero de una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable. Este es un elemento elástico formado a partir de un tubo fino de acero inoxidable; debido a que su movimiento al aplicar presión es considerable se debe utilizar un muelle de acero inoxidable calibrado que restrinja ese movimiento oponiéndose a él, de esta manera el fuelle utilizará solo una pequeña parte de su movimiento y se obtendrá mayor precisión. Los elementos de fuelle se caracterizan por su larga duración demostrada en ensayos en los que ha soportado sin deformación alguna millones de ciclos de flexión. El muelle está diseñado para mantener fija su constante de fuerza por unidad de compresión. Esta clase de elementos se emplean en la medición de bajas presiones. Los materiales más empleados en su fabricación son el bronce fosforoso, cobre, acero inoxidable y monel, aunque esto dependerá de su aplicación.

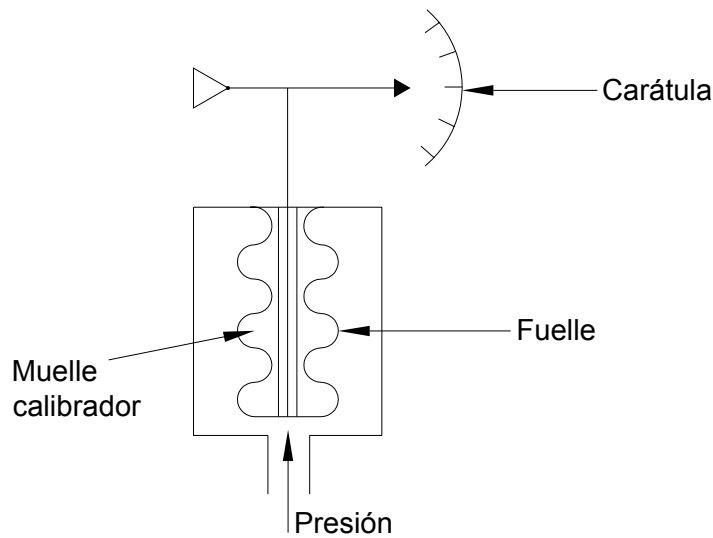


Fig. 2.51 Fuelle.

### Medidores de Presión Absoluta

Esta clase de elementos consiste en un conjunto de fuelle y muelle opuesto a un fuelle sellado al vacío absoluto. El movimiento resultante de la unión de los dos fuelles equivale a la presión absoluta del fluido. Véase figura 2.52.

El sistema puede estar diseñado de dos formas:

- a) Actuando sobre una palanca.
- b) Actuando de forma opuesta.

El fuelle (A) detecta los cambios en la presión atmosférica y los compensa actuando sobre la palanca o transmitiendo un movimiento que se opone al del fuelle (B). En el fuelle (A) se ha hecho vacío y se ha sellado (este fuelle puede compensar variaciones en la presión atmosférica de hasta 100 mm Hg), en el fuelle (B) se aplica la presión P.

El doble fuelle se utiliza para la medida exacta y el control preciso de bajas presiones, a las que puede afectar las variaciones en la presión atmosférica. Por ejemplo, en el caso de emplear un vacuómetro para el mantenimiento de una presión absoluta de 50 mm de Hg en una columna de destilación, el punto de consigna sería de 710 mm, con una presión atmosférica de 760 mm. Si la presión atmosférica cambiase a 775 mm el vacuómetro indicaría:  $710 + 15 = 725$  mm, con lo cual la presión absoluta en la columna sería controlada a  $50 + 15 = 65$  mm, esto es un 30 % más de la deseada. Sin embargo con el doble fuelle el punto de ajuste estará en función de la compensación hecha por el fuelle de vacío(A). Con lo cual en la presión en la columna del caso anterior puede ser correctamente controlada. Los materiales empleados para la fabricación de los fuelles, es el latón, bronce fosforoso, cobre, acero inoxidable y monel.

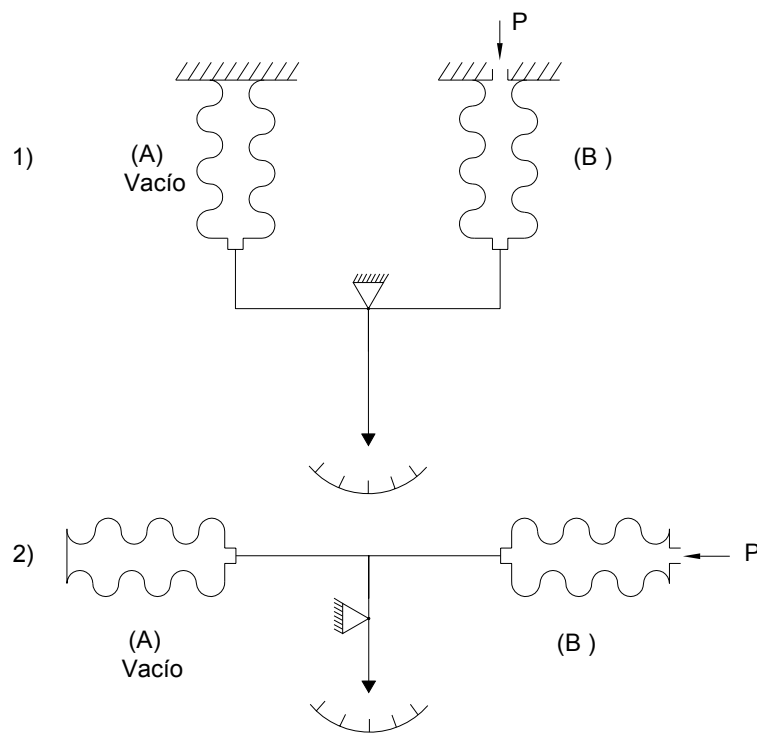


Fig. 2.52 Doble Fuelle.

## Sellos Químicos

Finalmente dentro de los elementos mecánicos de medición de presión están los sellos químicos (que aunque no podrían clasificarse estrictamente dentro del grupo de los elásticos su principal función es proteger a uno de ellos, el cual es el manómetro) también conocidos como sellos volumétricos de diafragma. Estos se utilizan cuando se requiere la medición de presiones de fluidos corrosivos o, cuando la temperatura del proceso es demasiado alta.

Esta clase de sellos son materiales especiales que entran en contacto directo con el fluido e impide que este toque al sensor de presión.

Debido a la gran importancia que representan los sellos químicos, más adelante se estudiará en detalle sus principios de operación y los puntos de relevancia que determinan la selección de un conjunto de sello químico.

## **2.26 Clases de Manómetros, Fluidos de Llenado y Sellos Químicos**

### **Clases de Manómetros**

Los tipos de manómetros que son empleados en la industria, se enlistan a continuación:

- Manómetros estándar
- Manómetros industriales y de acero inoxidable
- Manómetros llenos de líquido
- Manómetros de proceso
- Manómetros de prueba de precisión
- Manómetros de diafragma
- Manómetros para baja presión

### **Manómetros estándar**

Esta clase de manómetros están diseñados para un servicio confiable y prolongado. Algunas aplicaciones típicas son en bombas, sistemas hidráulicos, neumáticos y compresores además de muchas otras en donde el medio no corroe al sensor de medición que es usualmente de bronce. El elemento mecánico de medición es un tubo Bourdon en “C” y puede medir presiones de hasta 5000 psi y en rangos compuestos desde 1-30 in Hg y 0.5–15, 30, 60, 100, 160, o 200 psi, en la medición de presión puede indicar desde 0.2 a 10, 15 psi, 1–60 psi, 2–100, 160 Psi, 5–200, 300 psi, 10–400, 600 psi, 20–800, 1500 psi, 50–3000 psi y de 100–5000 psi.

En la configuración de carátula el espaciamiento entre números (cifras) impresas en la carátula y el espaciamiento entre las marcas del tick (graduaciones impresas en la carátula) variara según sea el rango de presión, pues por ejemplo para un rango de 800 psi el espaciamiento entre números podría ser de 200 psi y el espaciamiento entre las marcas del tick podría ser de 20 psi.

Los manómetros estándar no son adecuados si el tubo Bourdon en “C” va estar sometido a altas vibraciones o pulsaciones, o a fluidos corrosivos o altamente viscosos.

### **Manómetros industriales y de acero inoxidable**

Los manómetros industriales están diseñados para servicio en condiciones más pesadas de trabajo, a diferencia de los manómetros estándar que su rango es hasta 5,000 psi, los industriales tienen rango de hasta 15,000 psi. Para ambos casos pueden ser rangos compuestos igualmente su caja es de acero inoxidable 304 y el sensor es un tubo Bourdon en espiral hecho de bronce; su grado industrial de da estas características además de hacerlos muy exactos y de larga vida útil. Su precisión es de  $\pm 1.0\%$  de span.

Los manómetros de acero inoxidable son también de diseño industrial de alta calidad, solo que estos son ideales para ambientes más fuertes, pueden medir hasta 20,000 psi; provee una mayor resistencia a medios más corrosivos debido a que las partes en contacto con el proceso son de acero inoxidable 316, con caja de acero también inoxidable pero 304. Algunos están diseñados para poder ser llenados de líquido en campo. La precisión de los manómetros de grado industrial es de  $\pm 1\%$  de span.

Los manómetros industriales de alta calidad son ideales para plantas químicas y petroquímicas, exploración y producción de petróleo, generación de energía y cualquier otra aplicación que requiera instrumentación de medición de presión de alta calidad y de larga duración.

### **Manómetros llenos de líquido**

Cuando el manómetro va a estar sometido a vibración o pulsación, lo adecuado es utilizar un manómetro lleno de líquido; el más común es la glicerina, aunque no es el único. La glicerina líquida pura al igual que los otros tipos de líquidos, amortigua el tubo Bourdon en "C" además de que reduce el desgaste del mecanismo prolongando la vida útil del manómetro. Las partes en contacto con el proceso pueden ser de bronce o de acero inoxidable generalmente; su precisión es de hasta  $\pm 1.0\%$  de span y son típicos empleándose en compresores de aire, prensas hidráulicas, bombas y motores industriales, y cualquier otro sistema en donde se genere una fuerte vibración. Los rangos de medición pueden ser de hasta 5,000 psi, 10,000 psi, 15,000 psi, o 20,000 psi, aunque en estos dos últimos rangos son normalmente construidos en acero inoxidable 316 para las partes que están en contacto con el proceso. Al igual que casos anteriores, los rangos pueden ser compuestos o para medir presión.

### **Manómetros de proceso**

Son específicamente diseñados para las industrias químicas y de procesamiento del petróleo; tienen la construcción, materiales y procesos de fabricación para resistir las condiciones circundantes más difíciles. Están fabricados para funcionar durante años con servicio exacto, al mismo tiempo que resisten la vibración, los medios corrosivos y una amplia gama de temperaturas. Las partes en contacto con el proceso pueden ser de bronce, acero inoxidable 316 o de monel. Pueden estar secos o llenos de líquido para vibración; en caso de que se adquiera uno seco, existe la posibilidad de que en campo pueda llenarse de líquido. Su precisión es de hasta 0.5% de span y pueden tener un rango de hasta 20,000 Psi. La configuración de la carátula estándar para un tamaño de 4 1/2" puede ser en rango compuesto o solo para medir presión relativa positiva.

### **Manómetros de prueba de precisión**

Esta clase especial de manómetros son extremadamente sensibles y altamente precisos, son excelentes para talleres de instrumentos, talleres de reparación y calibración de manómetros de laboratorios de prueba y otras aplicaciones que exigen resultados de alta precisión y consistentes, poseen agujas ajustables con borde de navaja para asegurar lecturas precisas; las partes en contacto con el proceso pueden ser de bronce o de acero inoxidable 316, tienen además un mecanismo de baja fricción que permite una vida útil prolongada y niveles consistentes de precisión, la cual es de hasta  $\pm 0.25\%$  de span. Las configuraciones de carátula para el tamaño de 6", 8 1/2" y 10" son similares a las de manómetros de proceso.

### **Manómetros de diafragma**

Este es un diseño particular de manómetro representan una alternativa confiable y de bajo costo del sistema convencional de un sello químico separado y un manómetro. El manómetro de diafragma combina el sello químico con un manómetro en una sola unidad compacta. Cumplen con las funciones inherentes al uso del sello químico y además pueden ser llenados de líquido para sistemas de vibración o pulsación. El mecanismo es sencillo: el fluido ejerce presión sobre el diafragma (en el sello químico) y una varilla soldada a la parte superior del diafragma transmite la deflexión de este al mecanismo, el cual emplea el movimiento lateral de la varilla en movimiento de rotación de la aguja.



Las partes en contacto con el proceso pueden ser desde acero al carbón o de acero inoxidable 316, hasta monel u otro especial con una precisión de hasta 1.5% de span. Su rango de presión puede ser desde 1–10 in H<sub>2</sub>O, 3–15 in H<sub>2</sub>O, 5–30 in H<sub>2</sub>O, 10–100 in H<sub>2</sub>O y 20–200 in H<sub>2</sub>O, o desde 1-10 psi, 3-15 psi, 5-30 psi, 10-100 psi, 20-200 psi y 50-600 psi. También existen en rangos compuestos. La mayor ventaja de este diseño de manómetros es que es más barato que el adquirir un sello químico y adaptarlo al manómetro, pero su desventaja es el rango de presión que es notablemente inferior al del sello químico.

### **Manómetros para baja presión**

Los manómetros para vacío son muy sensibles y altamente precisos, pueden medir presiones desde 15” H<sub>2</sub>O a 200” H<sub>2</sub>O, es común que tengan caja de acero inoxidable 304, con partes en contacto con el proceso de bronce o de acero inoxidable 316; poseen tornillo de recalibración en la carátula y funcionan con una precisión de hasta 1.5% de span. Las escalas de carátula puede ser doble (en in H<sub>2</sub>O y mm H<sub>2</sub>O) o en otra cualquiera estándar para vacío.

### **Fluidos de Llenado**

Estos líquidos al utilizarse para llenar un manómetro presentan las siguientes ventajas:

- 1) El líquido absorbe la vibración y las subidas bruscas de presión.
- 2) El líquido lubrica todos los elementos móviles reduciendo en gran parte el desgaste del mecanismo.
- 3) El líquido es no acuoso y el manómetro está herméticamente sellado, por esta razón, funciona en ambientes corrosivos y son inmunes a la penetración de la humedad.

Los manómetros llenos de líquido aumentan la confiabilidad e integridad del sistema de medición por periodos largos en condiciones extremas de operación.

### **Selección del líquido correcto y rangos de operación permisibles**

El tipo de líquido utilizado para llenar el manómetro varía de acuerdo a la aplicación. Aunque la glicerina pura permite el mejor funcionamiento en la mayoría de las aplicaciones, cada uno tiene sus propios requerimientos, por ejemplo:

- Si en la línea o el equipo donde se instale el manómetro puede estar sometido a muy bajas temperaturas se debe utilizar un manómetro lleno de aceite de silicona. Este tiene una baja viscosidad a -60 °C.

Ya que mientras mayor es la viscosidad del líquido, mayor es su capacidad de amortiguamiento. La razón de esto es que el amortiguamiento cambia en proporción de la viscosidad dependiente de la temperatura del líquido de llenado. El grado adecuado de amortiguamiento depende de los requerimientos de operación que debe cumplir el manómetro como, el tiempo de respuesta de la aguja, presiones extremas, vibración y cambios de presión.

El rango de temperatura en que la operación del manómetro no se afecta por el líquido de llenado es muy importante conocerlo. En temperaturas por encima del valor nominal máximo, el líquido puede deteriorarse, en temperaturas por debajo del valor nominal mínimo, el líquido se puede solidificar (congelar). La tabla 2.9 muestra los valores nominales de temperatura para estos líquidos.

| Líquido de llenado                     | Rango de operación permisible      |
|--|------------------------------------|
| Glicerina<br>1118 Centistokes a 68 °F  | -4° F a 140 °F<br>-20 °C a 60 °C   |
| Silicona<br>50 Centistokes a 77 °F     | -58 °F a 392 °F<br>-50 °C a 200 °C |
| Halocarbon<br>4.2 Centistokes a 68 °F. | -40 °F a 400 °F<br>-40 °C a 204 °C |

Fuente: Catálogo de productos Surex, instrumentos para la medición de presión y temperatura.

Tabla 2.9 Valores nominales de temperatura ambiente permisibles para líquidos de llenado.

Esta tabla presenta solo los más usuales porque en realidad existe una extensa variedad de líquidos llenables de sistema; ya que por ejemplo, si la aplicación implica vacío o rangos compuestos, la glicerina no es adecuada; si la temperatura es muy baja, el líquido adecuado es el aceite de silicona de 4 centistokes a 77 °F (25 °C), que tiene un rango de operación de -130 a 170 °F cuando la presión absoluta es menor a 1 atm y de -130 a 356 °F cuando la presión absoluta es mayor o igual a 1 atm; o si la temperatura es muy alta, lo adecuado es utilizar un aceite de temperatura alta de 39 centistokes a 77 °F, con un rango de operación de 14 a 212 °F y 14 a 392 °F (200 °C) cuando la presión absoluta es inferior a 1 atm o de -4 a 572 °F y -4 a 750 °F (399 °C) cuando la presión absoluta es mayor o igual a 1 atm; si el medio es muy oxidante emplear halocarbon, y si se trata de procesamiento de alimentos, utilizar glicerina/agua, o sólo glicerina, aceite vegetal o aceite de silicona grado alimento. Por ello es importante consultar las tablas de productos que los fabricantes distribuyen, y si se tiene un caso especial o una duda respecto a la utilización de algún producto, no vacilar en preguntar con la asistencia técnica.

## Sellos Químicos

Los sellos químicos (ver fig. 2.53), también llamados sellos de diafragma, se utilizan para aislar los manómetros y los transmisores de los medios muy viscosos y/o corrosivos. Los cuerpos de los sellos químicos estándar y los diafragmas están hechos de acero inoxidable; no obstante, hay una variedad de materiales, desde acero al carbón hasta hastelloy para satisfacer las exigencias de la mayoría de las aplicaciones. Los sellos químicos pueden funcionar en aplicaciones de presión desde 10" H<sub>2</sub>O hasta 20,000 psi, con temperatura del medio de -130 °F a 750 °F (-90 °F – 399 °C).

Algunas aplicaciones típicas que tienen los sellos químicos son:

- a) El medio es corrosivo y puede dañar un elemento sensible como un tubo Bourdon o un diafragma de un transmisor.
- b) El medio es altamente viscoso o tiende a cristalizarse o polimerizarse y puede atascar la entrada de presión de un manómetro o transmisor.

- c) El medio no es homogéneo o contiene materia suspendida como pulpa que puede atascar la entrada de la presión de un manómetro o un transmisor.
- d) La temperatura del medio es demasiado alta para que un manómetro estándar pueda operar adecuadamente.
- e) El medio es toxico o peligroso y puede contaminar el medio ambiente. Un sello químico adecuado puede dar mayor protección.
- f) La aplicación requiere alta protección de sobrepresión. Un sello químico con una superficie de diafragma contorneado puede permitir protección contra presión excesiva y protege al instrumento.

El principio de operación de estos dispositivos se basa en instalar directamente o conectando el sello químico por medio de una capilar o torre de enfriamiento al manómetro convencional, para un mejor funcionamiento en temperaturas altas. Un diafragma dentro del sello químico separa al manómetro del fluido.

Cualquier parte del sello químico (diafragma o cuerpo inferior) que se expone al fluido, se selecciona de materiales resistentes a la presión, la temperatura y el posible ataque químico por el fluido. El sello químico esta lleno de líquido transmisor o líquido llenable del sistema que puede ser silicona, halocarbon, o algún otro que dependerá de la clase de fluido de proceso y la temperatura y presión del mismo. La presión aplicada por el medio de presión, se transmite hidráulicamente al elemento de presión del manómetro generando de este modo una lectura de presión en el mismo.

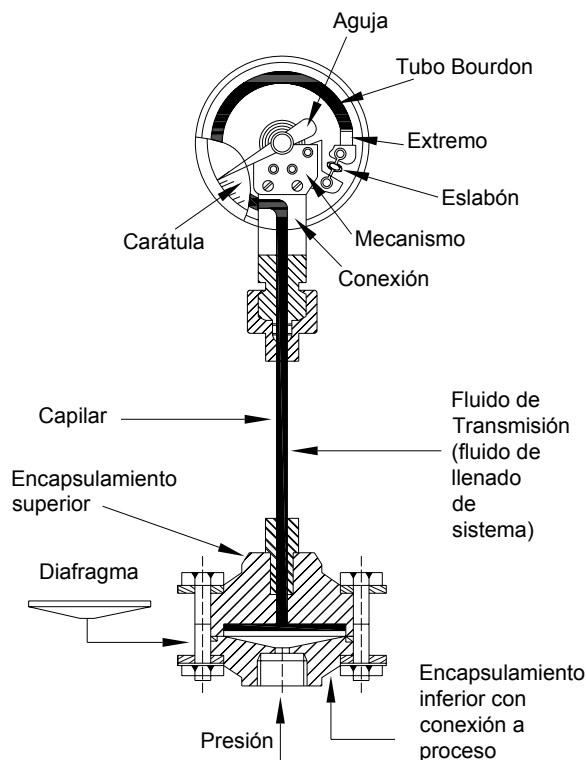


Fig. 2.53 Manómetro con Sello Químico y Capilar.

## **Selección de un conjunto de Sello Químico**

Cuando se selecciona un conjunto de sello químico se deben de tener en cuenta varios detalles para obtener la seguridad y la operación correcta, los cuales se describen a continuación.

### **Composición del proceso**

Como el diafragma y el cuerpo inferior del sello químico pueden estar expuestos al fluido, es crítico seleccionar los materiales de estos componentes que sean compatibles con el fluido. Existirán siempre tablas del fabricante para ayudar a la selección de estos materiales. Debe tenerse en cuenta si el fluido es muy denso o contiene sólidos en suspensión.

### **Temperatura**

Cada sistema de medición de sello químico (sello químico, manómetro y capilar si es el caso) esta lleno de una cantidad de líquido a una temperatura aproximada de 70 °F (20 °C) Esta temperatura denomina la temperatura del líquido llenable. El líquido llenable se expandirá o se contraerá de acuerdo con los cambios de temperatura, esto a su vez hace que la temperatura en el elemento sensor suba o baje, lo cual podría provocar un error en la medición, por ello es importante especificar las temperaturas del líquido del proceso y del medio ambiente cuando se selecciona el sistema de sello químico. Se sugiere una torre de enfriamiento o línea capilar para proteger al instrumento de presión de temperaturas por encima de 212 °F (100 °C).

### **Rango de presión**

La fuerza en el sello químico requerida para impulsar cada sistema de medición de sello químico (sello químico, instrumento de presión y capilaridad, según sea el caso) deben ser mayor que la fuerza requerida para mover el elemento sensor de presión. Normalmente mientras más bajo sea el rango de presión, más grande debe de ser el diafragma que se requiere para mover el sistema. Por el contrario, para rangos de presión mayores, son suficientes diafragmas menores.

### **Tipo de manómetro**

Como ya se dijo antes, el sello químico debe dar suficiente fuerza de impulso para permitir que el instrumento de presión alcance la escala completa. Por lo general, los manómetros de tamaño más pequeño son mayormente adecuados para aplicaciones de presión baja, ya que se requiere menos fuerza en la parte del sello químico para impulsar el instrumento.

### **Posición de montaje**

La posición de montaje es importante para los sistemas de sello químico que incluyen una línea capilar. La diferencia de nivel entre el sello químico y el manómetro hace que la presión hidrostática actúe sobre el elemento sensor. Para evitar esto es recomendable calibrar el sistema de sello químico para compensar el error causado por la presión hidrostática, una vez que se conoce la diferencia de nivel entre el sello químico y el manómetro.

## **Tiempo de respuesta**

El tipo de respuesta es el tiempo que demora el instrumento de presión en indicar 90% del valor de una variación súbita de la presión, es especialmente importante en manómetros que incluyen una línea capilar. El tiempo de respuesta aumenta significativamente en sistemas con líneas capilares largas. En aplicaciones que requieran líneas capilares largas, los tiempos de respuesta se pueden reducir utilizando capilares de diámetros más pequeños y reduciendo la viscosidad del líquido llenable del sistema.

## **Conexión al proceso**

La mayoría de conexiones al proceso son roscadas NPT.

## **Torre de enfriamiento y capilar**

La torre de enfriamiento es un dispositivo adecuado para proteger instrumento de presión de la temperatura alta de proceso. La circulación de aire por el protector capilar perforado reduce la temperatura del líquido llenable del sistema. Debe ser utilizado con sello químico para efecto máximo.

La torre de enfriamiento se recomienda para temperatura de proceso por encima de los de 212 °F (100 °C), se instala directamente entre el instrumento de presión y el sello de diafragma. Se recomienda con silicona para líquido llenable de sistema. Su construcción es totalmente como mínimo en acero inoxidable.

El capilar (o sifón) de acero inoxidable se recomienda para temperaturas de proceso por encima de 212 °F (100 °C) y hasta 750 °F (399 °C). Se instala directamente entre el instrumento de presión y el sello del diafragma para mejor funcionamiento. Se recomienda llenado del sistema con silicona, aunque podría ser de otro que transmita hidráulicamente la presión al instrumento de medición. Su construcción total es en acero inoxidable.

El capilar se debe seleccionar con la longitud más corta posible, ya que las condiciones de temperatura ambiente pueden afectar en gran manera la precisión y el tiempo de respuesta del instrumento de presión. La longitud estándar en cinco pies. La instalación normalmente requiere soporte y un adaptador de manómetro para montaje en la superficie. Cualquier diferencia de nivel entre el instrumento de presión y el sello del diafragma puede producir un error de indicación de presión. La diferencia de nivel se puede compensar durante la calibración del ensamble del sello del diafragma, si se da esta diferencia. El adaptador de manómetro permite un área para sujeción en la línea capilar para soporte del manómetro, su material es de acero inoxidable 316; mientras que el soporte de manómetro permite montaje en la pared del instrumento de presión al adaptador de manómetro, el material es también de acero inoxidable 316 o de aluminio.

## **Líquido llenable del sistema que contiene el Sello Químico**

Existe una amplia variedad de líquidos llenables de sistema, que permiten temperaturas desde -130 °F a 750 °F (-90 °C-399 °C). Es muy importante conocer la compatibilidad química del líquido llenable del sistema con el fluido del proceso. Por ejemplo, en aplicaciones de procesamiento de alimentos debe seleccionarse un líquido no tóxico, o un líquido especial para medios muy oxidantes como el oxígeno y el cloro. La tabla 2.10 muestra las características de los líquidos llenables de sistema más comerciales.

| Líquido llenable                                    | Rango adecuado de temperatura |              | Aplicación                       |
|---|-------------------------------|--------------|----------------------------------|
|   | Pabs <15 psi                  | Pabs ≥ 15psi |                                  |
|   | °F                            | °F           |                                  |
| Aceite de Silicona de 4 centistokes @ 77°F          | No adecuado                   | - 4 a 392    | Temperaturas Bajas               |
| Aceite de Temperatura alta de 39 cSt @ 77°F         | -130 a 176                    | -130 a 356   | Temperaturas Altas               |
| Halocarbón de 4 cSt @ 68°F                          | -40 a 176                     | -4 a 750     | Para servicio de oxígeno y cloro |
| Fluoroluble de 5 cSt @ 68°F                         | No adecuado                   | -40 a 392    | Para servicio de oxígeno y cloro |
| Glicerina de 1110 cSt @ 68°F                        | No adecuado                   | 60 a 462     | Alimentos                        |
| Glicerina / Agua de 88 cSt @ 68°F                   | No adecuado                   | 14 a 248     | Alimentos                        |
| Aceite Vegetal de 66 cSt @ 68°F                     | 14 a 200                      | 14 a 400     | Alimentos                        |
| Aceite de Silicona grado alimento de 350 cSt @ 68°F | No adecuado                   | 0 a 300      | Alimentos                        |
| Aceite de Silicona de 50 cSt @ 77°F                 | No adecuado                   | -4 a 392     | Estandar                         |

Fuente: Catálogo de productos Surex, instrumentos para medición de presión y temperatura.

Tabla 2.10 Especificaciones del líquido llenable del sistema.

## 2.27 Selección de Manómetros

Cuando se selecciona un manómetro de presión, es importante tener en cuenta los siguientes factores para obtener seguridad y precisión:

- Composición del fluido
- Temperatura del fluido
- Condiciones ambientales
- Rango de presión
- Condiciones que afectan el uso del sistema
- Método de instalación
- Precisión requerida

### Composición del fluido

Como el elemento sensor de un manómetro puede exponerse directamente al medio medido, se debe considerar las características de este medio. Puede ser corrosivo, puede solidificarse a varias temperaturas o puede contener sólidos que dejen depósitos dentro del elemento sensor. Para líquidos que no se solidifican bajo condiciones normales o no dejan depósitos, es aceptable un manómetro de tubo Bourdon. De otro modo debe utilizarse uno con sello químico.

Los materiales empleados para el elemento sensor son bronce (aleación de cobre), acero inoxidable 316, monel o alguno que amerite un diseño especial; en todo caso, dependerá de las condiciones del proceso.

### **Temperatura del fluido**

El vapor u otros medios calientes pueden elevar la temperatura de los componentes del manómetro por encima de los límites seguros de trabajo de las uniones selladas, entre otras cosas que se explicaran mas adelante. En estos casos se recomienda que se utilice un sifón o torre de enfriamiento o sello químico junto con el manómetro.

### **Condiciones ambientales**

El rango normal de temperatura ambiente de los manómetros es de  $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$  a  $160\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) para manómetros secos, para manómetros llenos de glicerina es de  $-4\text{ }^{\circ}\text{F}$  a  $140\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). El error producido por los cambios de temperatura es de  $\pm 0.3\%$  por cada  $18\text{ }^{\circ}\text{F}$  de aumento o disminución respectivamente, cuando la temperatura de referencia aproximada es de  $70\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). La instalación remota del manómetro utilizando un sello químico y línea capilar es una alternativa para aplicaciones con temperatura extrema. También se deben tener en cuenta los efectos de la humedad y el clima; los manómetros llenos de líquido evitan la acumulación de condensación. Para uso al aire libre se recomienda que los manómetros estén dentro de cajas de acero inoxidable.

### **Rango de presión**

Generalmente debe de seleccionarse un rango de presión dos veces la presión de trabajo. La presión de trabajo en todos los casos debe limitarse a  $75\%$  de rango del manómetro. De igual forma, donde se encuentra presión y pulsación alternantes, la presión de trabajo se debe limitar a  $2/3$  el rango del manómetro.

### **Condiciones que afectan el uso del sistema**

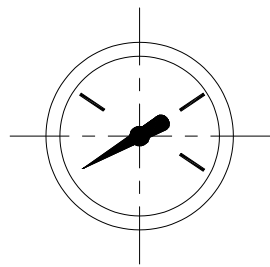
En aplicaciones que implican fluctuación o pulsación severa de la presión, se recomienda el uso de restrictores y/o amortiguadores. A estos manómetros se les llena de líquido que normalmente es glicerina, aunque también puede ser silicona o halocarbon. Estos líquidos además de permitir un correcto funcionamiento del sistema de medición prolonga la vida útil del instrumento.

### **Método de Instalación**

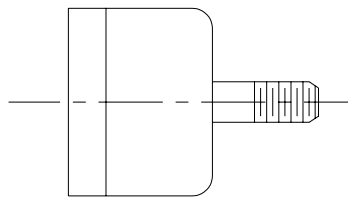
Los montajes para manómetros son los siguientes: CBM (montaje posterior central), LM (montaje inferior) LBM (montaje posterior inferior), o una CBM/UC con grapa en U, estas conexiones son roscadas estándar (NPT) normalmente. La figura 2.54 muestra estos tipos de montajes.

### **Precisión requerida**

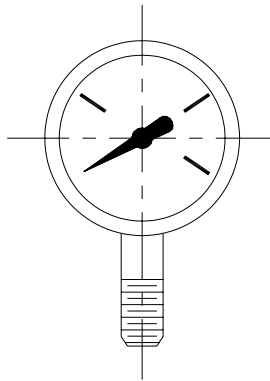
Los manómetros normalmente tienen una precisión de  $\pm 0.1\%$  a  $\pm 3\%$  de error en el span y por lo general entre más precisos sean, son más costosos y grandes. De aplicación industrial, un manómetro es suficiente que tenga una precisión de  $\pm 1\%$ .



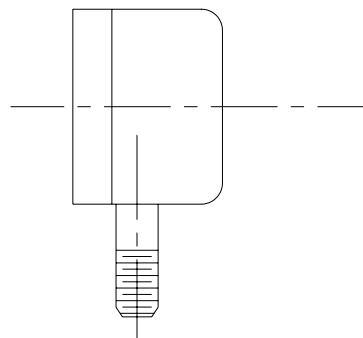
Montaje posterior central (CBM)  
vista frontal



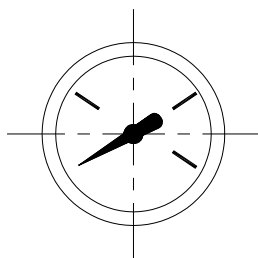
Montaje posterior central (CBM)  
vista lateral



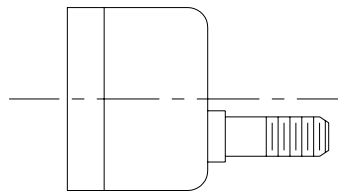
Montaje inferior (LM)  
vista frontal



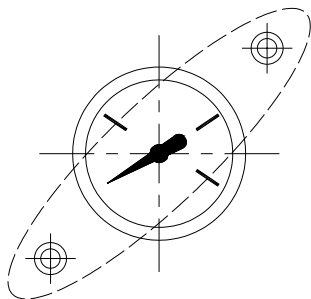
Montaje inferior (LM)  
vista lateral



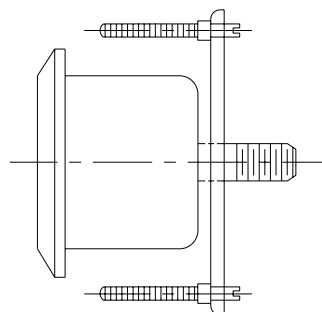
Montaje posterior inferior (LBM)  
vista frontal



Montaje posterior inferior (LBM)  
vista lateral



Montaje posterior central (CBM/UC)  
Con grapa en U (para montar en panel)  
vista frontal y posterior



Montaje posterior central (CBM/UC)  
Con grapa en U (para montar en panel)  
vista lateral

Fig. 2.54 Tipos de Conexión para Manómetro.



## 2.28 Especificaciones técnicas

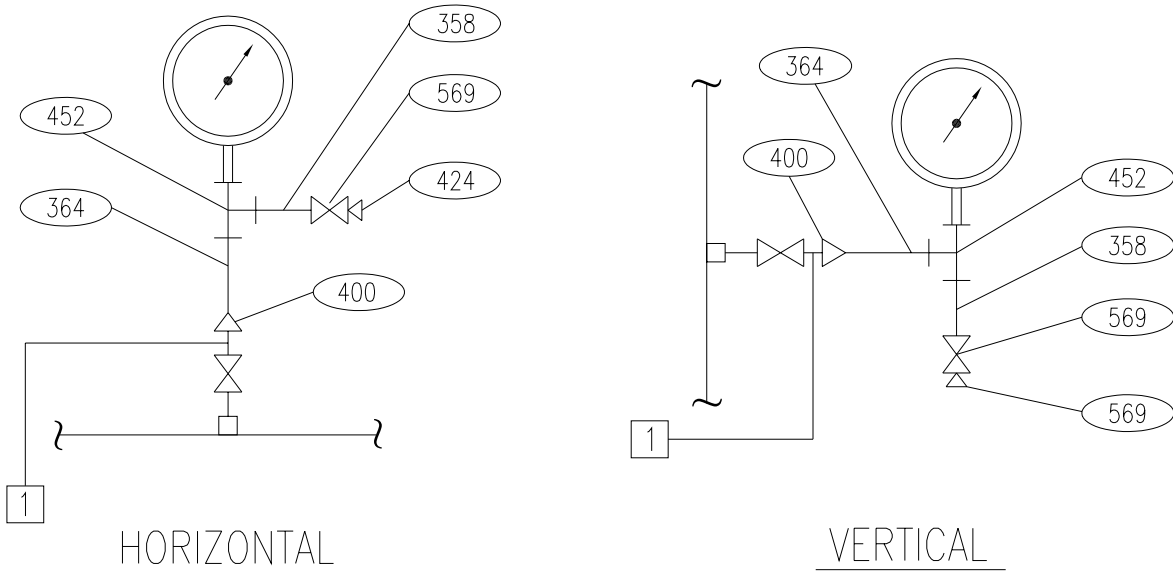
### Especificaciones generales para manómetros

#### Requerimientos mínimos

- Los manómetros deben ser adecuados para montaje local.
- La carátula debe de ser blanca con caracteres negros de 114 mm. (4 1/2") de diámetro y graduada en  $\text{kg/cm}^2$ .
- La caja debe ser de fenol con bisel roscado, a menos que se especifique otra.
- Los manómetros deben tener disco de seguridad de material elastomérico en la parte posterior y cubierta de la carátula de cristal inastillable.
- El elemento de presión debe de ser tubo Bourdon, salvo los casos de rango muy bajos en que podrá ser tipo fuelle.
- El material del elemento de presión debe ser de acero inoxidable, como mínimo, pudiendo especificarse un material mejor. El material de la conexión a proceso y del movimiento debe ser acero inoxidable como mínimo. La conexión al proceso debe ser 1/2" NPT, macho con localización inferior a menos que se especifique otra.
- El elemento de presión debe ser capaz de soportar un sobre- rango de 1.3 veces el rango de la escala sin dañarse. La exactitud mínima del ajuste de relación debe ser de  $\pm 1\%$  de la escala total.
- Cuando se requieran sellos de diafragma, estos deben suministrarse llenos de un líquido adecuado para el servicio y ensamblados al manómetro. El material del diafragma y de la conexión al proceso debe de ser de acero inoxidable, al menos que se especifique diferente, la parte posterior del diafragma debe ser removible para propósitos de limpieza, la parte posterior debe tener orificios de drenaje. Cuando así se requiera, los diafragmas deben tener conexiones para aceite de purga de 1/4" NPT hembra y serán suministrados con un tapón roscado de acero inoxidable.
- Cuando se requieran amortiguadores de pulsaciones (en descarga de bombas y compresores donde la línea esta sometida a continua pulsación) deben suministrarse con conexiones de 1/2" NPT e interiores de acero inoxidable 316.
- Cuando se requieran sifones (en líneas de servicio de vapor de agua o donde la temperatura del fluido sea mayor a 100 °C) deben ser del tipo espiral de tubo de 1/2" de acero al carbón, Cédula 80 sin costura, a menos que se especifique diferente.
- Todos los manómetros deben suministrarse con una placa metálica permanentemente asegurada, (no se aceptan uniones por adhesivo) con la siguiente información:
  - a) Identificación y servicio.
  - b) Nombre del fabricante y modelo

## 2.29 Típicos de instalación

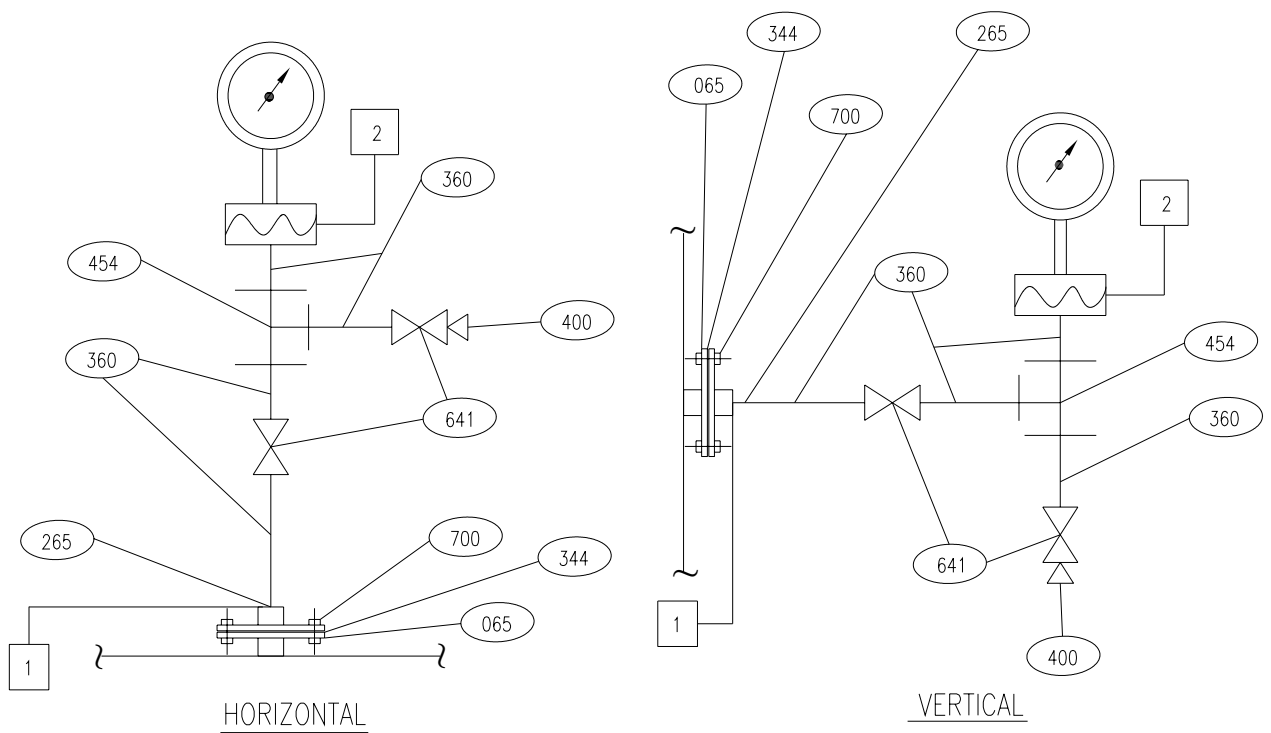
### TÍPICO DE INSTALACIÓN PARA MANÓMETRO CON VÁLVULA DE PURGA



1 POR DEPARTAMENTO DE TUBERIAS

| MATERIAL REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN DEL INSTRUMENTO |          |             |   |
|--|----------|-------------|---|
| PARTIDA  | CANTIDAD | TAMAÑO      | DESCRIPCIÓN   |
| 358  | 1 PZA    | ½" Ø X 3" L | NIPLE EXTREMOS ROSCADOS SIN COSTURA DE ACERO ASTM A-106 GR.B  |
| 364  | 1 PZA    | ½" Ø X 3" L | NIPLE CON UN EXTREMO ROSCADO SIN COSTURA DE ACERO ASTM A-106 GR.B   |
| 400  | 1 PZA    | ¾" X ½"     | INSERTO REDUCCION DE EMBUTIR PARA SOLDAR, 3000 LB DE ACERO ASTM A-105   |
| 424  | 1 PZA    | ½" Ø        | TAPON MACHO CABEZA HEXAGONAL 3000 LB ASTM A-105   |
| 452  | 1 PZA    | ½"Ø         | TE RECTA NORMAL ROSCADA 3000 LB ASTM A-105  |
| 569  | 1 PZA    | ½"Ø         | VALVULA DE COMPUERTA CLASE 800 ROSCADA CUERPO DE AC. AL CARBON A-105 INTERIORES DE AC. INOX. 316 ASIENTO RENOVABLE BONETE ATORNILLADO |

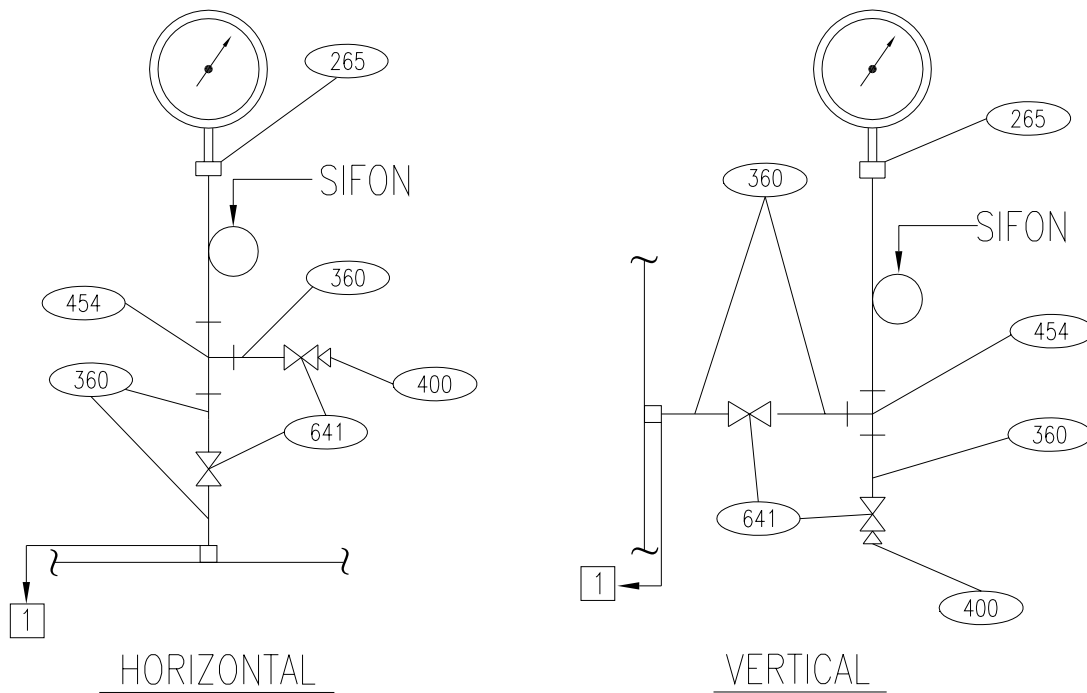
## TÍPICO DE INSTALACIÓN PARA MANÓMETRO CON VALVULA DE PURGA Y SELLO QUÍMICO



- 1 POR DEPARTAMENTO DE TUBERIAS
- 2 SELLO ENSAMBLADO CON EL INSTRUMENTO

| MATERIAL REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN DEL INSTRUMENTO |          |               |  |
|--|----------|---------------|--|
| PARTIDA  | CANTIDAD | TAMAÑO        | DESCRIPCIÓN  |
| 360  | 4 PIEZAS | ½" Ø X 3" L   | NIPLE EXTREMOS ROSCADOS  |
| 454  | 1 PIEZA  | ½" Ø          | TE RECTA NORMAL ROSCADA 3000 LB<br>ASTM A-105  |
| 641  | 2 PIEZAS | ½" Ø          | VALVULA DE COMPUERTA CLASE 800<br>ROSCADA CUERPO DE AC. AL CARBON A-105<br>INTERIORES DE AC. INOX. 316 ASIENTO<br>RENOVABLE BONETE ATORNILLADO |
| 400  | 1 PZA    | ½" Ø          | TAPON MACHO CABEZA HEXAGONAL 3000<br>LB ASTM A-105   |
| 065  | 1 PIEZA  | 1 ½" Ø        | BRIDA CIEGA DE ACERO INOXIDABLE  |
| 265  | 1 PIEZA  | 1" Ø          | COPE UN EXTREMO SOLDABLE Y EL OTRO<br>ROSCADO  |
| 344  | 1 PIEZA  | 1 ½" Ø        | EMPAQUE PARA BRIDA DE 1 ½"Ø 150#   |
| 700  | 4 PIEZAS | ½" Ø x 3 ½" L | ESPARRAGOS DE AC. AL CARBÓN ASTM CON<br>DOS TUERCAS HEXAGONALES DE ACERO   |

TÍPICO DE INSTALACIÓN PARA MANÓMETRO CON VÁLVULA DE PURGA Y SIFON



1 POR DEPARTAMENTO DE TUBERIAS

2 SIFON POR PROVEEDOR

| MATERIAL REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN DEL INSTRUMENTO |          |             |  |
|--|----------|-------------|--|
| PARTIDA  | CANTIDAD | TAMAÑO      | DESCRIPCIÓN  |
| 360  | 3 PIEZAS | ½" Ø X 3" L | NIPLE EXTREMOS ROSCADOS  |
| 454  | 1 PIEZA  | ½" Ø        | TE RECTA NORMAL ROSCADA 3000 LB<br>ASTM A-105  |
| 641  | 2 PIEZAS | ½" Ø        | VALVULA DE COMPUERTA CLASE 800<br>ROSCADA CUERPO DE AC. AL CARBON A-105<br>INTERIORES DE AC. INOX. 316 ASIENTO<br>RENOVABLE BONETE ATORNILLADO |
| 265  | 1 PIEZA  | ½ " L       | COPLER EXTREMOS ROSCADOS 3000 LB<br>DE AC. AL CARBON ASTM A-105  |
| 400  | 1 PZA    | ½" Ø        | TAPON MACHO CABEZA HEXAGONAL 3000<br>LB ASTM A-105   |

## 2.30 Comparación entre instrumentos de medición de presión

| Elemento de Medición | Precisión % | Campo de Medida    | Temp. max. de servicio (°C) | Presión estática máxima (bar) | Aplicación en tipo de presión a medir                                 | Características  |  |
|----------------------|-------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|---|--|--|
|                      |             |                    |                             |                               |   | A favor  | En contra  |
| Barómetro de cubeta  | 0.5 a 1     | 0.1 a 3 mts cda*   | Ambiente                    | 6                             | -Atmosférica<br>-Bajas presiones                                      | -Muy preciso<br>-Fácil diseño<br>-Fácil lectura<br>-Mayor aplicación en meteorología   | -Costoso<br>-Difícil de transportar<br>-Frágil<br>-Afectado por temperatura ambiente   |
| Tubo en U            | 0.5 a 1     | 0.2 a 1.2 mts cda  | Ambiente                    | 10                            | -Atmosférica<br>-Bajas presiones                                      | -Muy preciso<br>-Fácil diseño  | -Frágil<br>-Afectado por temperatura ambiente<br>-Incomodidad de lectura   |
| Bourdon en "C"       | 1           | 0.5 a 6000 bar     | 90                          | 6000                          | -Presión abs.<br>-Vacío<br>-Presión-vacío                             | -Bajo costo<br>-Construcción sencilla<br>-Margen amplio<br>-Buena precisión por su costo   | -Sensible a choques y vibraciones<br>-Necesidad de aditamentos especiales por arriba de los 100°C y en procesos con fluidos viscosos y corrosivos<br>-Poca precisión en el vacío |
| Bourdon en espiral   | 1           | 0.5 a 2500 bar     | 90                          | 2500                          | -Presión relativa<br>-Presión-vacío<br>-Vacío<br>-Presión abs.        | -Bajo costo<br>-Construcción sencilla<br>-Preciso en medición de vacío   | -Sensibilidad a choques y vibraciones  |
| Bourdon en hélice    | 1           | 0.5 a 5000 bar     | 90                          | 5000                          | -Presión dif.<br>-Presión relativa<br>-Presión abs.                   | -Bajo costo<br>-Construcción sencilla<br>-Amplio margen de alcance   | -Sensibilidad a choques y vibraciones  |
| Diafragma            | 1           | 500 mm cda a 2 bar | 90                          | 2                             | -Presión relativa<br>-Presión-vacío<br>-Vacío<br>-Presión abs.        | -Muy preciso en medición de vacío<br>-Construcción sencilla<br>-Mejora con la unión de varios  | -Sensibilidad a choques y vibraciones<br>-Movimiento pequeño<br>-Mayormente adecuado para vacío<br>-Bajo margen de medición  |
| Fuelle               | 1           | 100 mm cda a 2 bar | 90                          | 2                             | -Presión relativa<br>-Presión-vacío<br>-Presión abs.<br>-Presión dif. | -Adecuado para rangos bajos y medios   | -No adecuado para altas presiones<br>-Necesidad de resorte para mayor margen de medida   |
| Doble fuelle         | 1           | 6 a 760 mm Hg abs. | Ambiente                    | Atm.                          | -Presión relativa<br>-Presión-vacío<br>-Presión abs.<br>-Presión dif. | -Desarrollan mucha fuerza<br>-El dispositivo más adecuado para medición de vacío   | -Sólo trabaja bien a P y T ambiente<br>-No adecuado para altas presiones<br>-Necesidad de resorte para mayor margen de medida<br>-Necesitan compensación por temperatura**       |
| Sello Químico        | 0.5 a 1     | 0.3 a 680 bar      | 400                         | 680                           | -Presión relativa<br>-Presión abs.<br>-Vacío<br>-Presión-vacío        | -Adecuado para fluidos corrosivos, viscosos, no homogéneos, de alta temperatura y medios tóxicos<br>-Protección contra sobrepresión<br>-Ensamble completo con el medidor | -Implica costo adicional<br>-Necesidad de una cuidadosa selección  |

\* Metros de columna de agua

\*\* Sólo para diseños llenos de líquido transmisor; poca garantía de efectividad

Tabla 2.11 Características de los elementos de medición de presión.

## 2.31 Medición de Temperatura

### Generalidades

En un laboratorio científico el objetivo de una medición puede ser la exactitud sin importar el costo y tiempo. Un ejemplo podría ser el caso de la determinación del punto de fusión de un material nuevo. Sin embargo, en la industria el objetivo más común es encontrar una manera de medir la temperatura el cual cumpla con lo siguiente:

- a) La exactitud y velocidad de respuesta requerida por la aplicación.
- b) Una inversión inicial aceptable.
- c) Bajo costo de mantenimiento, lo cual implica larga duración y estabilidad de su calibración.

Los siguientes serían ejemplos de lo anterior:

Varios tipos de termopar pueden tener exactitud y costo inicial similares. El objetivo es seleccionar prioritariamente aquél que cumpla con los requerimientos del proceso y que tenga una mayor estabilidad y mayor tiempo de vida. La selección puede depender de la atmósfera que pudiera corroer o empobrecer el rendimiento del termopar.

En la formación de vidrio, por ejemplo, como en el moldeado de botellas, los cambios en la viscosidad requieren reajustes de la botella que las fabrica. La viscosidad está estrechamente relacionada con la temperatura, así que la medición de la temperatura es crítica. Debido a que el vidrio se funde a temperaturas muy altas para poder usar la mayoría de los metales y debido a que la mayoría de los materiales contaminarían el vidrio, es económicamente justificable especificar termopares de platino en tubos protectores o termómetros de radiación sofisticados, esto representa una inversión que la mayoría de las aplicaciones no justificaría.

Todas las mediciones de temperatura son indirectas, es decir la medición se efectúa mediante la medición de la expansión volumétrica (termómetros llenos de líquido), cambio en las dimensiones (termómetros bimetálicos), fuerza electromotriz, resistencia (Detector de Temperatura de Resistencia o RTD), energía radiada (termómetro de radiación), o alguna otra característica de un material que varía en forma predecible y reproducible con la temperatura.

No obstante, en la medición y control de los procesos industriales, el concepto de medición directa e indirecta de temperatura tiene un significado diferente. Una medición directa aquella cuando el elemento sensor se encuentra en contacto directo con el fluido o material del proceso. Una medición indirecta es una medición de alguna otra temperatura a partir de la cual se puede inferir la temperatura del producto.

Un ejemplo de medición directa de temperatura ocurre cuando es posible insertar el termómetro directamente dentro de una línea de proceso para sensar la temperatura de la corriente. Una medición indirecta se usa en el horneado de pan; se controla la temperatura del aire en el horno. No es práctico meter el termómetro dentro del pan ya que la calidad del mismo sería afectada.

## Escalas de temperatura

La escala Fahrenheit fue inventada por Daniel Gabriel Fahrenheit y fue publicada en 1724. Se estableció el punto de hielo para el agua como 32 °F, y el punto de vapor para el agua como 212 °F. Esta escala aún está siendo usada en forma extensa en Norteamérica y otros países de habla inglesa, aún cuando en esos países muchas industrias están lentamente adoptando la escala Celsius.

La escala Celsius se originó en 1742 por Anders Celsius de Uppsala, Suecia. El determinó el punto de hielo como 100 °C y el punto de vapor como 0 °C. Varios años después esto se revirtió. En la actualidad el punto de hielo es 0 °C y el punto de vapor es 100 °C.

La escala Kelvin se usa principalmente en trabajo científico, menos frecuentemente en mediciones industriales. El punto de hielo se define como 273.16 °K.

La escala Rankine es la análoga a la escala Kelvin, usando grados Fahrenheit. El punto de hielo es 491.69 °Rankine. El límite inferior de las escalas Kelvin y Rankine es cero grados. Por tanto, ambas escalas son llamadas escalas absolutas. En teoría, a 0 °K o 0° R, cesa todo movimiento molecular.

Para convertir de una escala a otra las siguientes expresiones son utilizadas:

$$\begin{aligned} ^\circ C &= ^\circ K - 273.16 & ^\circ F &= ^\circ R - 459.69 \\ ^\circ C &= \frac{5}{9} (^\circ F - 32) & ^\circ F &= \frac{5}{9} ^\circ C + 32 \\ ^\circ C &= \frac{5}{9} (^\circ R - 492) & ^\circ F &= \frac{9}{5} (^\circ K - 273) + 32 \\ ^\circ K &= ^\circ C + 273.16 & ^\circ R &= ^\circ F + 459.69 \\ ^\circ K &= \frac{5}{9} (^\circ F - 32) + 273 & ^\circ R &= \frac{9}{5} ^\circ C + 492 \\ ^\circ K &= \frac{5}{9} ^\circ R & ^\circ R &= 1.8 ^\circ K \end{aligned}$$

## Escala internacional de temperaturas de 1990

La escala internacional de temperatura de 1990 (EIT-90) fue adoptada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en su reunión de 1989, apareció el primero de enero de 1990. La temperatura en la EIT-90 se define en términos de 17 estados de equilibrio de fases de 15 sustancias puras (los cuales son llamados puntos fijos), instrumentos de interpolación, y ecuaciones que relacionan la propiedad medida de tales instrumentos.

La EIT-90 se define, en el intervalo de 0.65 °K a 5.0 °K, en términos de las relaciones de temperatura-presión de vapor de isótopos de  $^3\text{He}$  y  $^4\text{He}$ ; en el intervalo de 3.0 °K hasta el punto triple del neón (24.5561 °K), la temperatura se define por medio de un termómetro de gas de helio, el cual se calibra en tres temperaturas experimentalmente realizables que tienen asignados valores numéricos (puntos fijos definitorios) con procedimientos específicos de interpolación; en el intervalo comprendido entre 13.8033 °K (punto triple del hidrógeno en equilibrio) y 961.78 °C (punto de solidificación de la plata).

La temperatura se define por medio de termómetros de resistencia de platino calibrados en un conjunto específico de puntos fijos y usando procedimientos de interpolación determinados; a temperaturas superiores a 961.78 °C, la temperatura se define en términos de un punto fijo definitorio y la ley de radiación de Planck. La tabla 2.12 muestra los estados de equilibrio para definir la temperatura según la EIT-90.

| # P.F. | T <sub>90</sub> /K | t <sub>90</sub> /°C | Sustancia*              | Estado   | W <sub>r</sub> (T <sub>90</sub> ) |
|--------|--------------------|---------------------|-------------------------|----------|-----------------------------------|
| 1      | 3 a 5              | -270,15 a -268,15   | He                      | PV       |                                   |
| 2      | 13,8033            | -259,3467           | e-H <sub>2</sub>        | PT       | 0,001 190 07                      |
| 3      | ≈17                | ≈-256,15            | e-H <sub>2</sub> (o He) | PV(TGVC) |                                   |
| 4      | ≈20,3              | ≈-252,85            | e-H <sub>2</sub> (o He) | PV(TGVC) |                                   |
| 5      | 24,5561            | -248,5939           | Ne                      | PT       | 0,008 449 74                      |
| 6      | 54,3584            | -218,7916           | O <sub>2</sub>          | PT       | 0,091 718 04                      |
| 7      | 83,8058            | -189,3442           | Ar                      | PT       | 0,215 859 75                      |
| 8      | 234,3156           | -38,8344            | Hg                      | PT       | 0,844 142 11                      |
| 9      | 273,16             | 0,01                | H <sub>2</sub> O        | PT       | 1,000 000 00                      |
| 10     | 302,9146           | 29,7646             | Ga                      | PF       | 1,118 138 89                      |
| 11     | 429,7485           | 156,5985            | In                      | PS       | 1,609 801 85                      |
| 12     | 505,078            | 231,928             | Sn                      | PS       | 1,892 797 68                      |
| 13     | 692,677            | 419,527             | Zn                      | PS       | 2,568 917 30                      |
| 14     | 933,473            | 660,323             | Al                      | PS       | 3,376 008 60                      |
| 15     | 1234,93            | 961,78              | Ag                      | PS       | 4,286 420 53                      |
| 16     | 1337,33            | 1064,18             | Au                      | PS       |                                   |
| 17     | 1357,77            | 1084,62             | Cu                      | PS       |                                   |

\*Todas las sustancias excepto He son de composición isotópica natural.

e-H<sub>2</sub> Hidrogeno a la concentración de equilibrio de las formas moleculares ortho y para.

TGVC Termómetro de gas a volumen constante.

PV Presión de vapor.

PT Punto Triple (Temperatura en la cual las fases solidó, líquido y vapor están en equilibrio).

PS Punto de Solidificación a una presión de 101 325 Pa.

PF punto de fusión a una presión de 101 325 Pa.

Tabla 2.12 Estados de equilibrio para definir la temperatura de acuerdo a la EIT-90.

### Elementos primarios de medición de temperatura

La selección de la técnica de medición de temperatura se ve influenciada significativamente por la naturaleza del proceso: ya sea la necesidad de medir la temperatura del producto así como si es posible hacerlo. Es esencial entender el proceso y sus características antes de tratar de determinar que método de medición de temperatura se va a utilizar.

Los elementos primarios de medición de temperatura mas comúnmente utilizados en las aplicaciones industriales son los siguientes:

- Termómetros Bimetálicos
- Termómetros de Resistencia (Bulbos de Resistencia, RTD)
- Termopares
- Termopozos



Aunque su aplicación no es muy común, en el estudio de la termometría los pirómetros o termómetros de radiación así como los termistores son ampliamente tratados. Por ello y además de que estos cumplen con características muy especiales en su aplicación y diseño, más adelante, se hablara de ellos y se mencionaran solamente sus principales características de funcionamiento y algunas aplicaciones, pero sin entrar en más detalle, ya que su empleo se da sólo en condiciones muy particulares de proceso.

## **2.32 Termómetros bimetalicos**

Los termómetros bimetalicos funcionan debido a que la mayoría de los metales se expanden conforme su temperatura se incrementa pero no todos los metales se expanden en la misma cantidad. Si dos hilos de diferentes metales están ligados y son calentados, el hilo compuesto se doblara hacia el lado del metal con el menor coeficiente de expansión. Usualmente, uno de los hilos es de una aleación de níquel con un coeficiente de expansión muy bajo.

Si uno de los elementos unidos se enrolla en espiral o helicoidalmente, con uno de sus extremos fijado, el movimiento del extremo libre puede ser calibrado en términos de temperatura. Muchos termómetros domésticos así como indicadores de temperatura ambiente utilizan elementos bimetalicos.

En la industria, los elementos pueden estar fabricados con carátulas de 2 a 5 pulgadas con vástagos de hasta 24" en fabricación estándar y con rangos de operación de -10 °C hasta 500 °C.

Este tipo de termómetros no son los más exactos que existen pero son muy utilizados por ser adecuados para indicaciones locales de temperatura.

Un termómetro bimetalico puede ser usado para medir temperatura en cualquier zona de la carátula, pero se recomienda no utilizarlos en situaciones donde la lectura normal pueda llegar hasta los extremos del rango. Ningún termómetro bimetalico debe ser expuesto continuamente a temperaturas de proceso que excedan de 425 °C.

La temperatura en la caja no deberá ser mayor de 95 °C ya que de lo contrario podría sufrir deterioro en su color o incrementar la presión en el interior del instrumento y producir roturas en la cubierta de cristal.

Los termopozos deberán ser usados en cualquier aplicación donde el vástago del termómetro esté expuesto a fluidos a presión, corrosivos o de alta velocidad. Además el uso del termopozo permite retirar el termómetro de la línea de proceso para su reparación o recalibración, sin necesidad del paro del proceso o línea en la que esté instalado.

La caja debe tener ajuste externo y proveer un sello hermético en el instrumento. El material de fabricación debe ser acero inoxidable como estándar. Deben ser probadas contra fugas para proteger la integridad de las uniones.

Los elementos bimetalicos son fabricados cuidadosamente y sujetos a rigurosa inspección. Cada uno es tratado térmicamente para lograr una óptima estabilidad y una alta resistencia a sobretemperaturas.

La longitud del vástago del termómetro bimetálico deberá estar como mínimo sumergido 2 ½” para medición de líquidos y 4” en gas o vapor para proporcionar una medida correcta; aunque la recomendación es que en líquidos la longitud sea el 50% del diámetro de la línea y 75% para gas y vapor. Instalado en equipo la longitud puede alcanzar las 24” dependiendo de las dimensiones de este.

Es de gran importancia la propiedad que tienen de ser totalmente herméticos y libres de humedad en su interior, de tal forma que se evita el congelamiento en cualquier parte o mecanismo interno de los termómetros (lo cual podría ocurrir en servicios criogénicos), o el empañamiento de la cubierta de cristal (servicios en alta temperatura).

Se recomienda el uso de los termómetros bimetálicos con conexiones inferior o posterior cuando se conoce la posición en la cual será instalado el termómetro.

La conexión de ángulo variable se recomienda cuando no sea conocida la posición o localización final del instrumento de medición, ya que provee la posibilidad de poder girar la caja 360° o inclinarla 180° para mayor facilidad de lectura sin necesidad de ajustar la aguja indicadora. La figura 2.55 muestra un termómetro bimetálico de ángulo variable.

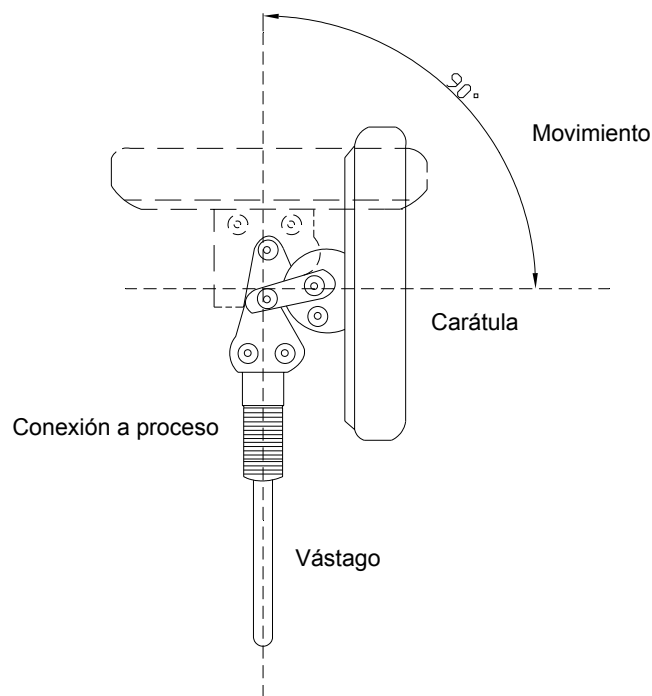


Fig.2.55 Termómetro bimetálico de ángulo variable.

### 2.33 Bulbos de resistencia (RTD)

La medición de temperatura a través de un bulbo de resistencia RTD (Resistance Temperature Detector), se basa en que la resistencia eléctrica de cualquier conductor varía cuando cambia su temperatura, por lo tanto para cada material conductor existe una relación definida entre temperatura y resistencia eléctrica.

La fuente de poder hace circular en el circuito una corriente eléctrica cuya intensidad es función de la resistencia del elemento, la cual, a su vez, es función de su temperatura.

El instrumento midiendo esta corriente, detecta la temperatura a la cual está expuesto el bulbo de resistencia (RTD).

La figura 2.56 presenta un RTD característico con aislamiento y detalle de los tres hilos de alambre resistivo, así como su funcionamiento eléctrico.

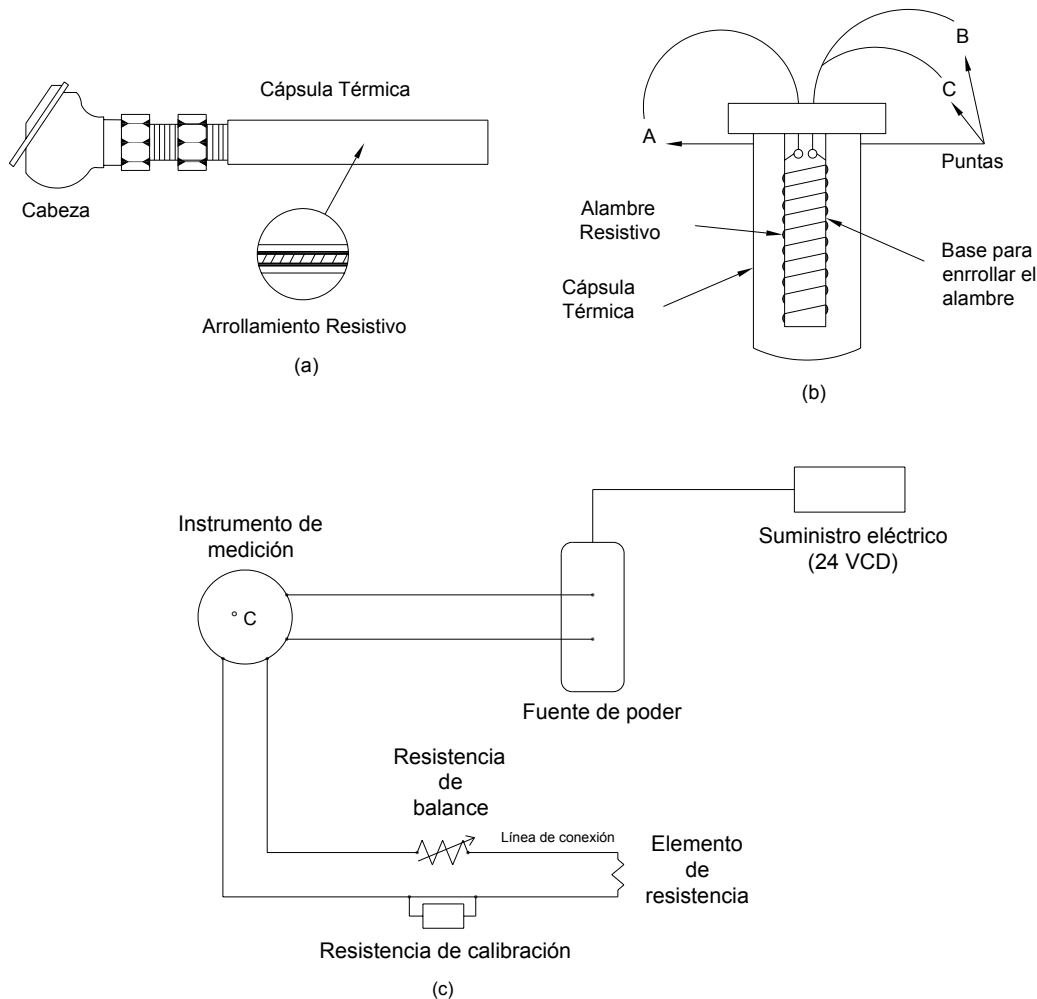


Fig. 2.56 RTD con cápsula (a), detalle del arrollamiento resistivo (b) y funcionamiento eléctrico (c).

La variación de resistencia eléctrica de un material, debido a su cambio de temperatura, se determina por su coeficiente de temperatura.

$$ct = \frac{R_{100} - R_0}{100 * R_0}$$

Para el Platino, la ecuación anterior se puede escribir:

$$ct = \frac{138.50 - 100}{100^2}$$

Y así, queda:

$$ct = 3.85E - 3$$

En donde  $R_0$  es la resistencia del elemento en ohmios a una temperatura de 0 °C y  $R_{100}$  es la resistencia del elemento en ohmios a una temperatura de 100 °C.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado “coeficiente de temperatura de resistencia” que expresa a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

La relación entre estos factores puede verse en la expresión lineal siguiente:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

En la que:

$R_0$  = resistencia en ohmios a 0 °C

$R_t$  = resistencia en ohmios a t °C

$\alpha$  = coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0° y 100°C es de 0,003850  $\Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (EIT-90).

Si la relación resistencia-temperatura no es lineal la ecuación general pasa a:

$$R_t = R_0 [1 + A*t + Bt^2 + C*(t - 100)*t^3] \text{ válida de } -200 \text{ a } 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

o bien

$$R_t = R_0 * (1 + At + Bt^2) \text{ válida de } 0 \text{ a } 850 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En donde A, B y C, son coeficientes de temperatura de la resistencia de valores:

$$A = 3,90802 \times 10^{-3}$$

$$B = -5,802 \times 10^{-7}$$

$$C = -4,27350 \times 10^{-12}$$

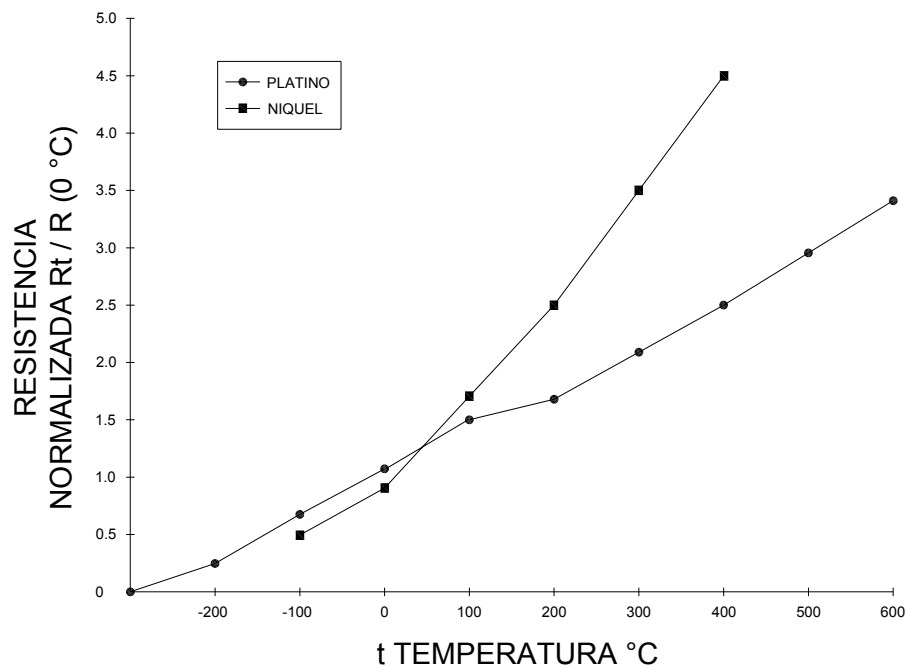
Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

- a) Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible.
- b) Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad).
- c) Relación lineal resistencia-temperatura.
- d) Rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).
- e) Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Los materiales que se usan normalmente en las sondas de resistencia son el Platino y el Níquel.

### Bulbos de resistencia (RTD) de platino y níquel

Por sus características eléctricas, su continuidad, su elevado coeficiente de temperatura y su resistencia a los ataques químicos, el platino y el níquel son los conductores idóneos para la fabricación de bulbos de resistencia (RTD), siendo el primero el más recomendable por su coeficiente de temperatura, mejor linealidad y rango más amplio como lo muestra la figura 2.57 de la relación que existe entre la Resistencia y la Temperatura entre los dos metales. Mientras que la tabla 2.13 presenta los datos de resistencia del platino también en función de la temperatura.



Fuente: Catálogo grupo pifusa, medición de temperatura.

Fig.2.57 Resistencia del Platino y el Níquel en función de la temperatura.

| °C                                   | ohms   | °C  | ohms   | °C  | ohms   | °C  | ohms   | °C  | ohms   |
|--------------------------------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| -100                                 | 60.25  | 30  | 111.67 | 160 | 161.04 | 290 | 208.15 | 420 | 253.9  |
| -90                                  | 64.30  | 40  | 115.54 | 170 | 164.76 | 300 | 212.02 | 430 | 257.32 |
| -80                                  | 68.33  | 50  | 119.40 | 180 | 168.46 | 310 | 215.57 | 440 | 260.72 |
| -70                                  | 72.33  | 60  | 123.24 | 190 | 172.16 | 320 | 219.12 | 450 | 264.11 |
| -60                                  | 76.33  | 70  | 127.07 | 200 | 175.84 | 330 | 222.65 | 460 | 267.49 |
| -50                                  | 80.31  | 80  | 130.89 | 210 | 179.51 | 340 | 226.17 | 470 | 270.86 |
| -40                                  | 84.27  | 90  | 134.70 | 220 | 183.17 | 350 | 229.67 | 480 | 274.22 |
| -30                                  | 88.22  | 100 | 138.50 | 230 | 186.82 | 360 | 233.17 | 490 | 277.56 |
| -20                                  | 92.16  | 110 | 142.29 | 240 | 190.45 | 370 | 236.65 | 500 | 280.9  |
| -10                                  | 96.09  | 120 | 146.06 | 250 | 194.07 | 380 | 240.13 | 510 | 284.22 |
| 0                                    | 100.00 | 130 | 149.82 | 260 | 197.69 | 390 | 243.59 | 520 | 287.53 |
| 10                                   | 103.90 | 140 | 153.58 | 270 | 201.29 | 400 | 247.04 | 530 | 290.83 |
| 20                                   | 107.79 | 150 | 157.31 | 280 | 204.88 | 410 | 250.48 | 540 | 294.11 |
| Coeficiente de temperatura = 0.00385 |        |     |        |     |        |     |        |     |        |

Fuente: Catálogo grupo pifusa, medición de temperatura.

Tabla 2.13 Temperatura vs Resistencia para el Platino.

Los bulbos de resistencia (RTD), se construyen con bobinas sensibles a la temperatura hechas de alambre muy fino de platino o níquel, encapsulados por diseño estándar en vidrio o cerámica, aunque también podrían encapsularse con papel o mica. Los bulbos de resistencia (RTD) de platino, son apropiados para medir temperaturas de -250 °C a +800 °C a diferencia de los de níquel que su rango es de 0 °C a + 180 °C.

El platino es el material más adecuado desde el punto de vista de precisión y estabilidad, aunque es más caro que el níquel. El níquel posee una resistencia elevada con mayor variación por grado, pero presenta la desventaja de la falta de linealidad en la relación resistencia-temperatura. Es por ello que se prefiere la utilización del Platino sobre el níquel, particularmente la del Platino 100 (su resistencia es de 100 ohmios a 0°C).

Los RTD's generan una señal analógica de resistencia en ohmios, cuya variación de resistencia se mide en un puente de Wheatstone dispuesto en montajes de dos, tres o hasta cuatro hilos. El montaje de dos hilos se emplea cuando no se requiere una medida exacta, mientras que el de cuatro hilos se emplea cuando si es necesaria una medición exacta y es utilizado en la calibración de patrones de resistencia en laboratorio. En la práctica industrial, aunque pueden emplearse sondas de resistencia de dos hilos lo más común es utilizar la de tres hilos (ver fig. 2.58).

La sonda de resistencia se conecta al puente con el circuito de tres hilos, si el puente se desequilibra (porque hay variación en la resistencia producida por un incremento en la temperatura) se genera una tensión continua, que con un convertidor y un transformador de entrada, se convierte en tensión alterna; esta se amplifica con un amplificador de tensión y uno de potencia para excitar un motor de equilibrio que mueve el brazo de un reóstato en la dirección que el puente de Wheatstone vuelva a equilibrarse. Este es un sistema autoequilibrado y a su vez el brazo móvil del reóstato genera la señal de salida de la sonda para los propósitos de indicación y control.

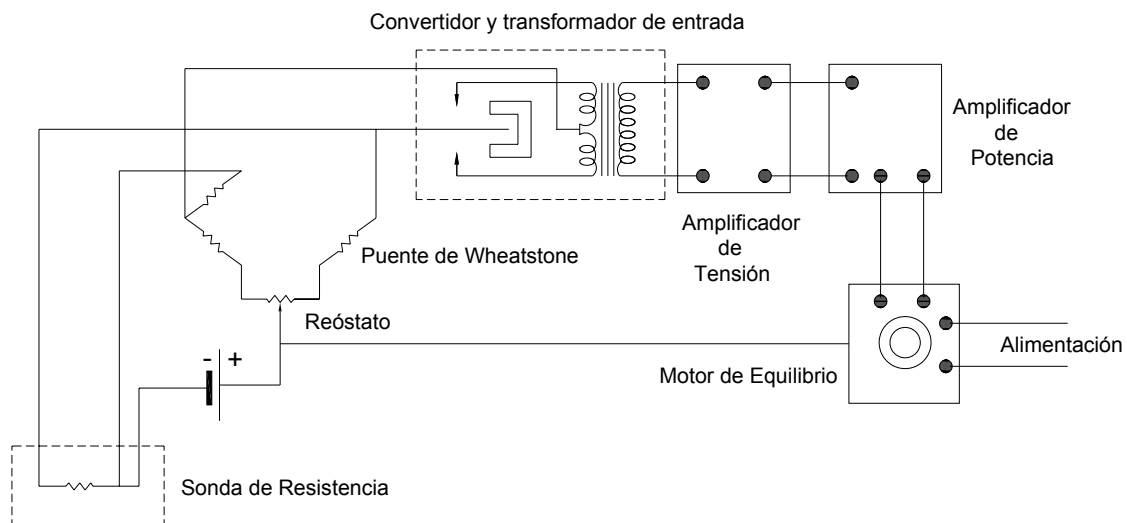


Fig. 2.58 Sistema de puente de Wheatstone de tres hilos para sonda de resistencia.

Algunas razones por las que se utilizan los bulbos de resistencia (RTD's) son las siguientes:

- Sensibilidad.** Con la más alta tecnología de construcción para reducir al mínimo el auto calentamiento y poder utilizar mayor corriente de circuito, se logra aumentar la sensibilidad.
- Estabilidad.** Las características de los materiales utilizados y la forma de construcción convergen en una alta estabilidad del bulbo de resistencia (RTD) que le permite operar en las condiciones mas adversas.
- Intercambiabilidad.** Debido a que la relación Resistencia-Temperatura de los elementos es repetitiva de una pieza a otra, es posible la producción en serie, garantizando la precisión de cada pieza.
- Linealidad.** Los bulbos de resistencia (RTD) conservan en todo su rango de aplicación una relación lineal entre resistencia y temperatura. Es por esto que la instrumentación puede ser más sencilla y puede prestarse más fácilmente a la aplicación de información digital.
- Exactitud.** Por las características antes mencionadas, además de su exactitud, cada vez más empresas están cambiando sus senderos de temperatura convencionales a bulbos de resistencia (RTD).

## 2.34 Termopares

Un termopar es quizás el más simple de todos los elementos de medida primarios. En su forma más sencilla, consiste en dos metales diferentes unidos en uno de sus extremos, en el cual se crea una f.e.m. (fuerza electromotriz). Cuando entre los dos extremos existe una diferencia de temperatura.

## Leyes de la termoelectricidad

En la figura 2.59 se muestra un esquema de un circuito de termopar ordinario consiste en dos alambres diferentes, como por ejemplo, el fierro y el constantano.

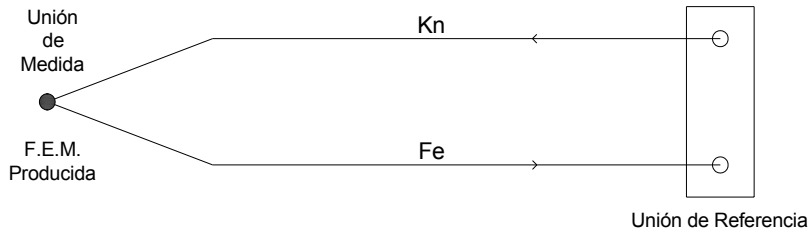


Fig. 2.59 Circuito de termopar ordinario.

Un extremo del alambre de fierro esta soldado a un extremo del alambre de constantano para formar la unión utilizada a la que durante tiempo se le llamó “Unión Caliente”.

La utilización de este termino para Unión Caliente se ha abandonado a favor de “Unión de Medida”, puesto que esta unión es la más fría de las dos uniones de referencia en el intervalo comprendido entre  $-310^{\circ}\text{C}$  y aproximadamente  $20^{\circ}\text{C}$ . También la denominación de Unión Fría se ha cambiado por unión de referencia.

Juntando un par de conductores de cobre y un hilo de manganina, para representar el conductor móvil de un instrumento de medida, se tiene un circuito cerrado en el que existe más de una unión de metales diferentes. Según se muestra en la figura 2.60.

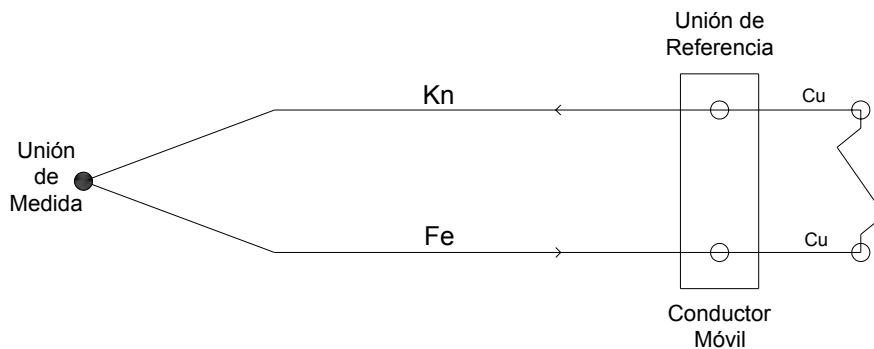


Fig. 2.60 Circuito cerrado para un par de conductores.

De acuerdo con las leyes de Termoelectricidad (electricidad generada por la aplicación de calor a la unión de dos materiales diferentes), en un circuito de este tipo, las diferencias de temperatura entre las uniones generan unas pequeñas fuerzas electromotrices. Las fuerzas electromotrices se originan no solamente en las uniones de metales diferentes, sino también entre una parte y otra de un alambre entre las que existe un gradiente de temperatura.



En 1821, Seebeck encontró que en un circuito cerrado de dos metales diferentes, circulaba una corriente eléctrica cuando las uniones de los metales se mantienen a diferentes temperaturas (ver fig. 2.61).

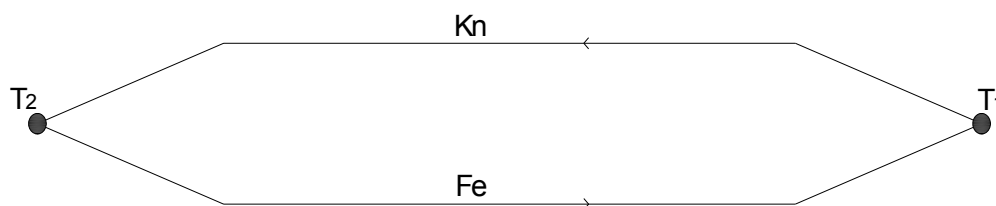


Fig. 2.61 Descubrimiento de Seebeck.

Si se unen por ambos extremos dos alambres de distinto material (este circuito se denomina termopar), y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, surge una diferencia de tensión que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría. Este fenómeno fue observado por primera vez por el físico alemán Thomas Seebeck, y se conoce como efecto Seebeck.

Para una pareja de materiales determinada, la diferencia de tensión es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas. Esta relación puede emplearse para la medida precisa de temperaturas mediante un termopar en el que una de las uniones se mantiene a una temperatura de referencia conocida (por ejemplo, un baño de hielo) y la otra se coloca en el lugar cuya temperatura quiere medirse. A temperaturas moderadas (hasta unos 260 °C) suelen emplearse combinaciones de hierro y cobre, hierro y constantán (una aleación de cobre y níquel), y cobre y constantán. A temperaturas mayores (hasta unos 1,650 °C) se utiliza platino y una aleación de platino y rodio.

Cuando se hace pasar una corriente por un circuito compuesto de materiales diferentes cuyas uniones están a la misma temperatura, se produce el efecto inverso. En este caso, se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra. Este fenómeno se conoce como efecto Peltier en honor al físico francés Jean Peltier, que lo descubrió en 1834.

Peltier dio a conocer que cuando se hace circular una corriente eléctrica a través de la unión de dos metales, la unión absorbe o libera calor. Si en un circuito termoeléctrico de dos metales diferentes, la corriente circula en la misma dirección que la corriente producida por el efecto Seebeck, se absorbe calor en la unión de medida y se libera en la unión de referencia.

No obstante, el efecto Peltier no produce una variación en la temperatura de la unión, cuando la única corriente que pasa por ella se debe a la f.e.m. térmica.

El físico británico Benjamín Thompson, descubrió que una corriente circula a lo largo de un alambre de cobre, cuya temperatura varía de un punto a otro, se libera calor, cuando la corriente circula en el mismo sentido que el calor y absorbe cuando la corriente circula en sentido opuesto. Lo contrario es cierto en un alambre de fierro, este efecto producido por una corriente que pasa por un conductor en el que existe un gradiente de temperatura se denomina “Efecto Thompson”.

El efecto Thompson tiene aun menos influencia sobre la temperatura de conductor que el efecto Peltier sobre la unión de medida. Como resultado de un gran numero de investigaciones en circuitos eléctricos en los que se hicieron medidas exactas de f.e.m., corrientes y resistencias se han formulado cierto número de leyes establecidas.

### Ley de los circuitos homogéneos

Por la sola aplicación de calor, una corriente eléctrica no puede ser mantenida en un circuito de un solo metal homogéneo, aunque su sección varíe. Cualquier corriente detectada de un circuito de este tipo cuando el alambre se calienta es prueba evidente de que el alambre no es homogéneo.

### Ley de los metales intermedios

La suma algebraica de las tensiones termoeléctricas en un circuito compuesto de un número cualquiera de metales en cero, si todo circuito se encuentra en una temperatura uniforme.

### Ley de las temperaturas intermedia y sucesiva

La f.e.m. generada en cualquier termopar de metales homogéneos con sus uniones a dos temperaturas  $T_1$  y  $T_3$  es la suma algebraica de la f.e.m. de termopar con una unión de  $T_1$  y la otra a cualquier otra temperatura  $T_2$  y la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a  $T_2$  y  $T_3$  como se aprecia en la figura 2.62.

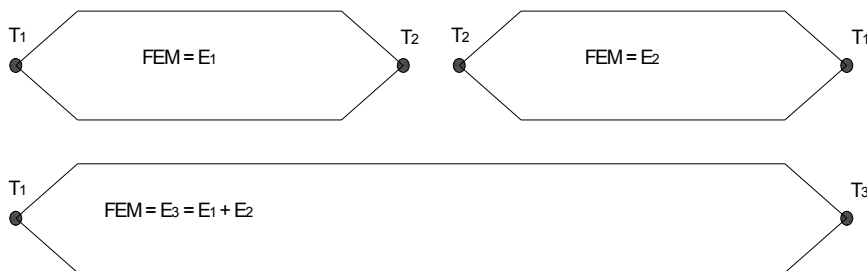


Fig.2.62 Ley de las temperaturas intermedias y sucesivas.

Las anteriores leyes fundamentales pueden ser y a menudo son, combinadas y enunciadas como siguen:

- La suma algebraica de las fuerzas termoeléctricas generadas en un circuito dado que contiene cualquier número de metales homogéneos diferentes, es únicamente función de las temperaturas de las uniones.
- Una aplicación práctica de las leyes de los metales intermedios se encuentra en el empleo de termopares comprendidos en lo que la unión de los alambres del termopar se hace a través de una vaina de acero inoxidable.
- En tanto que no existe diferencia de temperatura entre  $T_1$  y los puntos A y B, no se introduce error al conectar los alambres de cromel y alumel a través del tubo de acero inoxidable (ver fig. 2.64).

El termopar genera una f.e.m. que se expresa como señal analógica en mV (milivolts). La medición de esta fuerza electromotriz se mide en un circuito potenciométrico o galvanométrico. El circuito potenciométrico es igual al descrito anteriormente para los bulbos de resistencia, sólo que ahora la señal la reciben de un termopar. Como ya fue descrito el funcionamiento del circuito potenciométrico, se describirá ahora el del galvanométrico. El circuito galvanométrico (fig. 2.63) se basa en la desviación de una bobina móvil situada entre dos polos de un imán permanente al pasar a su través la corriente del elemento primario. El paso de esta corriente produce un campo magnético que se opone al del imán permanente, y la bobina móvil gira hasta que el par magnético correspondiente es equilibrado por el par de tensión. Una aguja indicadora que esta unida rígidamente a la bobina móvil se desplaza a lo largo de una escala graduada, calibrada en unidades de medición.

Por su parte la figura 2.64 muestra el arreglo estructural de un termopar (a) y el del ensamble de un termopar con termopozo (b) que es un elemento importante de protección para algunos elementos de medición primarios de temperatura, entre ellos el termopar.

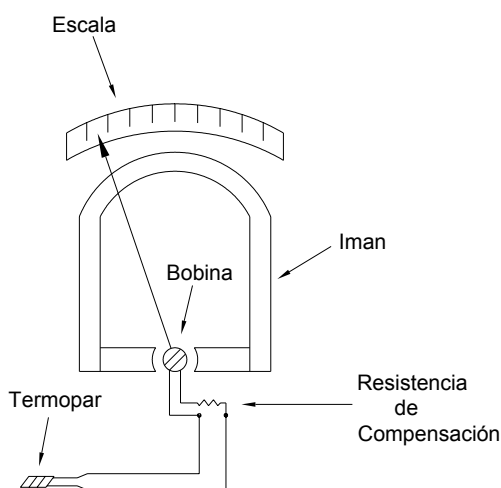


Fig. 2.63 Circuito Galvanométrico para medición de f.e.m. de un termopar.

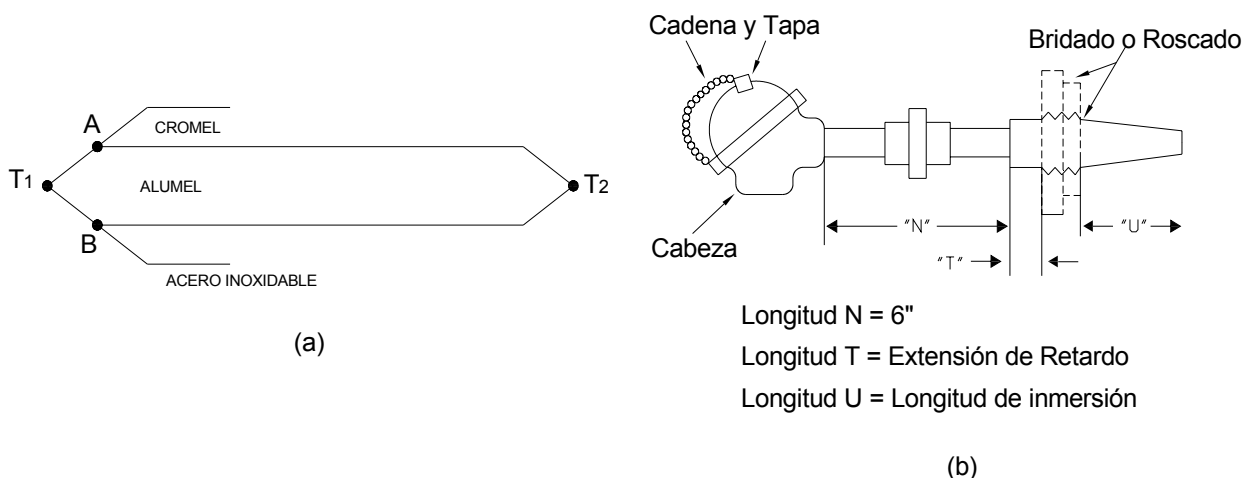


Fig. 2.64 Termopar: estructura interna (a), construcción con termopozo (b).

## Tipos de termopares

Los materiales para elementos de termopar de la tabla 2.14 son los utilizados con más frecuencia en los distintos procesos industriales. De forma general, para hacer la selección correcta de un termopar deberá tenerse en cuenta las condiciones de proceso, la longitud de servicio, la temperatura de operación, la atmósfera y el tiempo de respuesta, ya que en esto último, por ejemplo, los calibres delgados aumentan la velocidad de respuesta pero la vida del termopar es más corta, e inversamente. El código de identificación utilizado es determinado por la norma ANSI (American National Standard Institute).

| Tipo     | Polo Positivo                         | Polo Negativo                            | Rango Temp. °C | Aplicación  |
|----------|---------------------------------------|--|----------------|---|
| <b>J</b> | 99.5%Fe<br>0.5%Mn,Si,Ni,<br>Cu,Al,S,P | Constantán*<br>45%Ni<br>55%Cu            | -40 a 760      | Para atmósferas con escaso oxígeno, vacío, atmósfera reductora o inerte en atmósferas oxidantes funciona con tiempo corto de duración, en ese caso se recomienda usar calibres gruesos cerca del límite de temperatura, pues se oxida rápidamente el hilo del hierro por arriba de los 550°C, aplicable también para atmósferas sulfurosas con temperaturas máximas de 538°C. |
| <b>K</b> | Cromel*<br>10%Cr<br>90%Ni             | Alumel*<br>95%Ni<br>2%Mn<br>2%Al<br>1%Si | -40 a 1260     | Para atmósferas oxidantes o neutras, sujeto a fallas si se expone a azufre, normalmente la oxidación del cromo en el polo positivo en concentraciones bajas de oxígeno ocasionan descalibración en rangos entre 816 a 1038. No se recomienda en atmósferas reductoras a menos que se utilice un tubo protector**.   |
| <b>T</b> | 100%Cr                                | Constantán*<br>45%Ni<br>55%Cu            | -180 a 375     | Para atmósferas oxidantes, reductoras o inertes, así como vacío. Elevada resistencia a la corrosión por humedad atmosférica o condensación. Preferible usarse en intervalos de medida de -180 a 260.  |
| <b>E</b> | Cromel*<br>10%Cr<br>90%Ni             | Constantán*<br>45%Ni<br>55%Cu            | -40 a 900      | Recomendado para trabajo continuo en atmósfera oxidante y atmósfera inerte. Este termopar es el que proporciona mayor salida termoeléctrica (f.e.m. más alta por variación de temperatura)  |
| <b>R</b> | 87%Pt<br>13%Rh                        | 100%Pt                                   | 0 a 1600       | Ideal para altas temperaturas, se recomienda no cubrir con tubos protectores metálicos y aisladores crómicos, ya que a altas temperaturas continuas causaría cristalización o volatilización del Rodio, produciendo con esto una lectura errónea. Adecuado para atmósferas oxidantes, si la atmósfera es reductora debe de utilizarse un tubo de protección.                  |
| <b>S</b> | 90%Pt<br>10%Rh                        | 100%Pt                                   | 0 a 1600       | Adecuado en muy altas temperaturas, atmósferas oxidantes, no recomendable en atmósferas reductoras, pero si es el caso, debe de protegerse con un tubo de protección.   |
| <b>B</b> | 94%Pt<br>6%Rh                         | 60%Pt<br>40%Rh                           | 600 a 1700     | Adecuado en muy altas temperaturas desde el rango, atmósferas oxidantes, no recomendable en atmósferas reductoras, pero si es el caso, debe de protegerse con un tubo de protección.  |
| <b>C</b> | 95%W<br>5%Re                          | 74%W<br>26%Re                            | 0 a 2315       | Para aplicaciones en muy alta temperatura en atmósferas inertes o vacío.  |

\*El Cromel, el Alumel y el Constantán son aleaciones de Hoskins Co. y son usadas universalmente.

\*\*Existe una variedad de tubos protectores que van desde materiales de ac. al carbón con temp. max. de op. de 540° C, hasta la alumina (óxido de aluminio) con límite de temperatura de hasta 1900° C. Estos tubos son diferentes a los termopozos, aunque cumplen la misma función, los termopozos se utilizan en condiciones de proceso muy rigurosas. En la práctica industrial el ensamble completo con termopar se considera la protección con termopozo como se mostrara más adelante.

Tabla 2.14 Tipos de termopares y su aplicación.

## Aleación de metales

Las características de f.e.m. de los metales base pueden ser afectadas por el empleo de elementos aleados en metal base como sigue:

- a) Aleaciones que contienen elementos que son ligeramente solubles en el metal base y tienen propiedades termoeléctricas que son aproximadamente las mismas que las de dicho material base. Por ejemplo, azufre en el hierro.
- b) Aleaciones de elementos que son completamente solubles en el metal base y producen manifiestas diferencias en la f.e.m. en comparación con el metal base. Por ejemplo, magnesio en hierro.
- c) Aleaciones de elementos que son retenidos en soluciones sólidas metastables (tales como un temple) y tienen propiedades termoeléctricas, conforme a la base de metal puro, que están en función de la cantidad del elemento aleado retenido en la solución. Por ejemplo, carbón en hierro. Mas específicamente, el poder termoeléctrico del hierro aumentará cuando se une con un metal como el magnesio, el cual está delante del hierro en la tabla periódica.

Los factores siguientes son los que deben considerarse principalmente en el estudio de aleaciones para termoelementos:

- a) Los elementos aleados deben tener una solubilidad sólida razonable en el material base. Si esto no ocurre, el termoelemento resultante presentará efectos de histéresis en el calentamiento y enfriamiento y la aleación resultará de hecho inútil. El efecto de histéresis se encuentra en el alambre de cromel, debido al carbón.
- b) Los elementos aleados deben tener unos efectos de f.e.m. moderadamente fuertes de modo que la aleación tenga las características deseadas de temperatura f.e.m. Si estos efectos son demasiado pequeños, se obtiene muy poca corrección de la f.e.m.; si son demasiado grandes, serán difíciles de reproducir en condiciones comerciales.
- c) Los elementos aleados deben también mejorar la resistencia a la corrosión del metal base o al menos no deben disminuirla.

Finalmente se debe mencionar que al termopar puede adaptársele un cable de extensión y esto es adecuado en caso de que se requiera instalar un termopar a una distancia larga del instrumento receptor. Los cables de extensión para termopar son conductores con propiedades eléctricas similares a las del termopar, aunque con un límite de temperatura de 0-200° C, estos cables pueden utilizarse de la siguiente forma:

- a) Conductores J para termopares tipo J
- b) Conductores K para termopares tipo T o tipo K
- c) Conductores T para termopares tipo T
- d) Conductores E para termopares tipo E
- e) Conductores cobre-níquel termopares tipo R, S o B

Las conexiones deben de ser sin empalmes, de acuerdo al calibre requerido y la instalación no se recomienda que este próxima a fuentes de calor, pues podría aparecer el efecto Thompson. Ni tampoco se recomienda que el termopar en sí, se localice a una cercanía a motores eléctricos, ni a campos electromagnéticos, pues podrán aparecer tensiones no deseables que interfieran en la señal del termopar, ya que este es susceptible al ruido eléctrico industrial y puede además recoger radiación electromagnética. De aquí que sea requerido que los cables del termopar, y en general el cable para instrumentación, sea de diseño torcido y dentro de una funda metálica aislada básicamente.

## **2.35 Termopozos**

Un termopozo es un dispositivo de protección de los elementos primarios de medición de temperatura, que evita que éstos se dañen por acción de fluidos corrosivos, altas velocidades y presiones. Además, provee la facilidad de cambio del instrumento de medición sin necesidad de suspender o parar el proceso.

Los termopozos pueden ser seleccionados en varios tipos, dependiendo de la necesidad de aplicación y pueden ser roscados, bridados, soldables, etc.

Las principales características que se deben considerarse al emplear un termopozo son las siguientes:

- Material
- Tipo
- Conexión
- Extensión de retardo
- Longitud de inserción
- Diámetro interno

### **Material**

El material del termopozo deberá resistir adecuadamente el fluido del proceso a las condiciones de operación. Para obtener ayuda en la selección deberá consultarse la resistencia a la corrosión de los distintos materiales.

### **Tipo**

Pueden ser del tipo recto o cónico; el segundo se recomienda cuando las condiciones de operación son más severas (procesos de alta vibración, presión, temperatura o velocidad).

### **Conexión**

Los termopozos se suministran con dos tipos de conexión; roscados o bridados. El tipo roscado se recomienda cuando el fluido de proceso no sea corrosivo o peligroso, y las condiciones de presión y temperatura no excedan de 50 kg/cm<sup>2</sup> o 350 °C. Si estas condiciones de trabajo no se cumplen y son más severas, se recomienda el uso de termopozos tipo bridado. Los tamaños varían de acuerdo a las conexiones de proceso y las condiciones de operación.

### Extensión de retardo

Se pueden suministrar con o sin extensión de retardo “T”, según sean las necesidades de instalación o proceso donde serán usados. A esta extensión también se le llama “lagging extensión” (longitud adicional) que se emplea en caso de que la tubería o equipo lleve aislamiento. Esta es una longitud extendida entre la conexión al instrumento y la conexión del proceso para adaptar el instrumento. Su longitud estándar es de 3” (2” en caso de que la dimensión “U” sea de 2 ½”). Ver tabla 2.16.

### Longitud de inserción

Es la distancia “U” que está definida desde el final de la cuerda de conexión, o brida, hasta el extremo final del termopozo y que normalmente está sumergida en el fluido del proceso. Ver tabla 2.16.

### Diámetro interno

Se fabrican con diámetro interno de 6.6 mm (0.260”), con tolerancias mínimas para evitar el retraso de tiempo en la detección de temperaturas en el proceso.

La figura 2.65 muestra un termopozo roscado cónico con extensión de retardo y uno bridado.

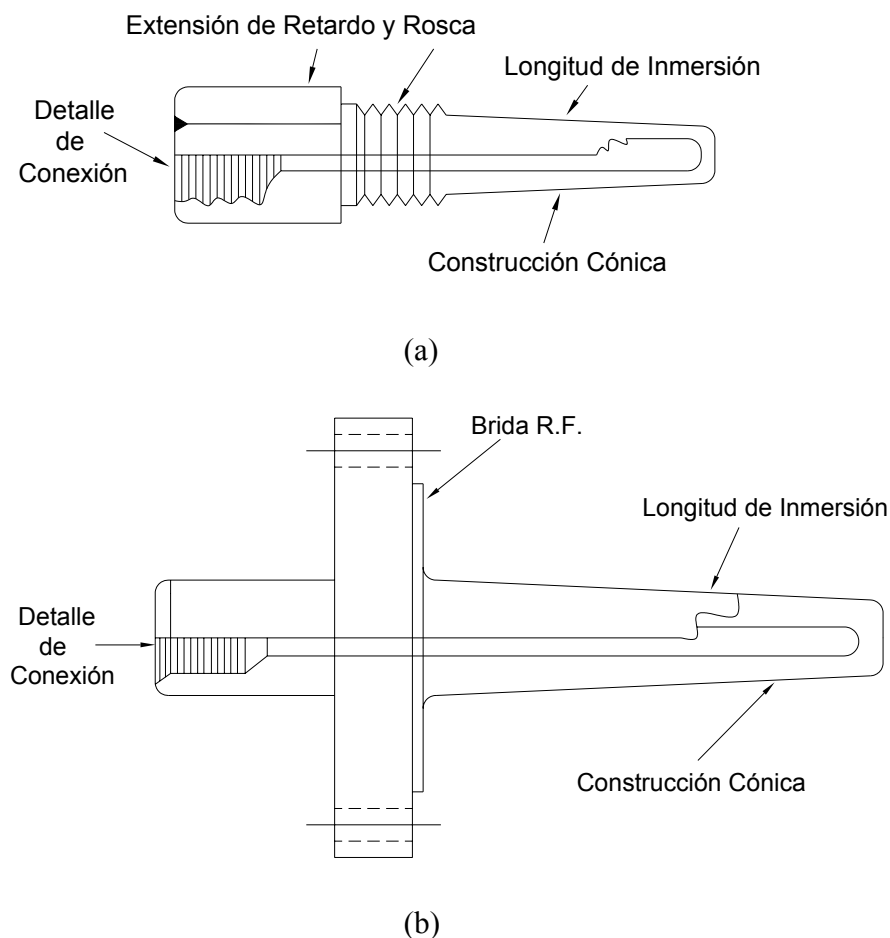


Fig. 2.65 Termopozo roscado cónico (a). Termopozo bridado cónico (b).

## 2.36 Termistores y Pirómetros de Radiación

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia elevado, por lo cual presentan variaciones extremadamente grandes para cambios relativamente pequeños de temperatura. Estos dispositivos se fabrican con óxido de níquel, manganeso, hierro, magnesio, cobalto y titanio principalmente. En intervalos amplios de temperatura (0°C a 400 °C por ejemplo), los termistores presentan características no lineales, aunque su sensibilidad es mayor que incluso una sonda de resistencia convencional. Los termistores se conectan normalmente a puentes de Wheatstone para medir su resistencia, pero se debe de asegurar que la corriente que circula por el circuito es lo suficientemente baja, con el objeto de que variación de resistencia del termistor sea por los cambios en la temperatura y no por la corriente que circula. Debido a que estos dispositivos permiten intervalos de medida de incluso 1°C con una precisión de hasta 0.005 °C y un tiempo de respuesta de aproximadamente 0.5 a 10 segundos y que además, son de pequeño tamaño encapsulado, encuentran su principal aplicación en la compensación y el control de temperatura, así como en la medición de temperatura diferencial.

Por su parte, los pirómetros de radiación miden la temperatura de un objeto sin entrar en contacto con el físicamente. Esto es posible debido a que fundamentan en la ley de Stefan-Boltzmann, la cual dice que la intensidad de energía radiante (J/s por unidad de área) emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin) del cuerpo; esto es:  $W=ET^4$ , donde E es el coeficiente de emisión definido para cada material. En la industria, las temperaturas que se miden abarcan longitudes de onda desde 0.1 micras para radiaciones ultravioletas hasta 12 micras para las radiaciones infrarrojas; por lo tanto, los pirómetros miden la temperatura de un cuerpo a distancia en función de su radiación. Los pirómetros que miden la temperatura de un cuerpo en función de su radiación luminosa que este emite (0.45 micras para el violeta a 0.75 micras para el rojo) y que es de hecho la radiación visible, se le llaman pirómetros ópticos y aquellos que miden toda la radiación emitida por el cuerpo (0.1 micras para la radiación ultravioleta hasta 12 micras para la radiación infrarroja) se le llaman pirómetros de radiación total.

Los pirómetros ópticos se basan en la desaparición de un filamento de una lámpara alimentada eléctricamente al compararlo visualmente con la imagen del objeto enfocado. Básicamente funcionan incidiendo la radiación del objeto y la de la lámpara sobre un fototubo, este envía una serie de señales en forma de impulsos de corriente continua que se acondiciona para modificar la corriente de alimentación de la lámpara hasta que coinciden en brillo la radiación del objeto y de la lámpara; de esta manera, la intensidad de corriente que pasa por la lámpara es función de la temperatura del objeto. La radiación del objeto será función del estado de la superficie del cuerpo emisor; por ejemplo para el cobre, su coeficiente de emisividad (que es una característica de un cuerpo para emitir energía radiante comparada con la de un cuerpo negro que absorbe todas las radiaciones y no emite ninguna) pasa de 0.10 a 0.85 si la superficie estrictamente pulida se recubre de momento con una ligera capa de óxido, por ello para todos los metales existe un valor de coeficiente observado y otro probable cuando se forma óxido en su superficie. Estos dispositivos deben tener una superficie de dirección perfectamente negra es decir que absorba todas las radiaciones y no refleje ninguna y con un juego de lentes parecido al de la cámara fotográfica pueden efectuar lectura de la radiación de objetos muy pequeños (de hasta 0.4 mm). Son adecuados para medición de temperatura por encima de los 700 °C.



Los pirómetros de radiación total poseen un lente de pyrex, sílice o fluoruro de calcio que concentra la radiación de un cuerpo en una termopila que esta formada por varios termopares de Pt-Pt/Rh pequeños y dispuestos en serie (aunque también podrían ser termistores). La radiación se enfoca hacia las uniones calientes de los termopares. Su tamaño pequeño los hace muy sensibles a las variaciones de energía radiante y además muy resistentes a choques y vibraciones. La parte de los termopares que esta expuesta a la radiación esta ennegrecida con la finalidad de que puedan comportarse como un cuerpo negro y proporcionen así una f.e.m. máxima. La f.e.m. que da la termopila depende de la diferencia de temperaturas entre la unión caliente (que es la radiación del objeto enfocado) y la unión fría, la cual es la propia del pirómetro y que esta afectada por la temperatura ambiente, además del tipo de lente que se utilice. Para realizar la compensación por temperatura se conecta una resistencia de níquel en paralelo con los bordes del conexión del pirómetro y se coloca en su interior de manera que su temperatura siempre es igual al cuerpo del pirómetro. Cuando aumenta la temperatura ambiente, aumenta la resistencia de la bobina de níquel, lo que compensa la pérdida de f.e.m. de la termopila que acompaña el calentamiento del cuerpo del pirómetro. Este tipo de dispositivos pueden medir temperaturas de hasta 5000 °C.

Puede parecer que esta clase de instrumentos son de difícil y delicado empleo; sin embargo, con la utilización del microprocesador y bajo las condiciones adecuadas para su utilización, pueden ser instrumentos sumamente precisos y que proporcionan un margen de medida muy amplio bajo situaciones muy controladas. No se debe olvidar que en la industria, las condiciones de trabajo para cualquier clase de proceso suelen ser repetitivas en más de una ocasión, lo que permite predecir cual es la mejor forma para la aplicación de un procedimiento.

## 2.37 Especificaciones técnicas

El diseño, la construcción e instalación de los siguientes equipos deberán ser conforme a los estándares y códigos que a continuación se mencionan.

- a) ANSI / ISA (American National Standard Institute/Instrument Society of America)
- b) API (American Petroleum Institute)
- c) NEC (National Electric Code)
- d) ASME (American Society of Mechanical Engineers)

### **Especificaciones generales para la selección de termómetros bimetálicos**

Requerimientos mínimos

- La brida de los termómetros bridados deberá estar de acuerdo a dimensiones y rangos de presión y temperatura de acuerdo a ANSI B16.5. Ver tabla 2.15.
- Los indicadores de temperatura locales serán tipo bimetálicos siempre y se utilizarán cuando la temperatura no sea mayor a 425 °C (800 °F).

- Carátula
  - El tamaño de la carátula debe ser de 127 mm (5”).
  - El color de la carátula, debe ser blanca con letras negras.
  - La cubierta debe ser de preferencia de vidrio inastillable.
  - La carátula deberá ser la adecuada para evitar el error de paralaje.
- Las cajas serán para todas las aplicaciones de acero inoxidable, hermético al polvo, vapor y a prueba de agua.
- La exactitud deberá ser de  $\pm 1\%$  del alcance máximo (span).
- Los termómetros serán provistos con un tornillo externo para su calibración, sin necesidad de abrir la caja.
- Las escalas serán directas y las unidades serán en °C.
- Los elementos de temperatura serán capaces de soportar sobre rangos arriba de 1.3 veces el rango máximo (escala lectura) sin que provoque deformaciones permanentes o descalibración del instrumento.
- Por ello, al seleccionar un termómetro el rango de mayor temperatura de operación deberá ser cubierto al 75% del alcance total de la medición, con lo cual el termómetro funcionara al 75% de su capacidad considerando como 100% el alcance máximo de medición indicado en la carátula.
- El diámetro del vástago no será menor a  $\frac{1}{4}$ ”.
- La longitud máxima del vástago no será mayor a 24”.
- Los termómetros serán instalados con termopozo para retirarlo fácilmente de la línea y la conexión del termómetro al termopozo será de  $\frac{1}{2}$ ” diámetro NPT.
- La carátula, la caja, el vástago y termopozo serán ensamblados y suministrados como una unidad completa. El elemento de medición, al ensamblarse, quedará firmemente en contacto con el fondo del termopozo.
- Termopozo
  - Todos los termómetros bimetálicos deberán suministrarse con termopozo.
  - El material del termopozo será de acero inoxidable 304 como mínimo.
  - El termopozo será del tipo cónico de barra perforada.

- La conexión al proceso será de 1" NPT siempre y cuando no se tengan temperaturas mayores a 350 °C y presiones mayores a 50 kg/cm<sup>2</sup>, se utilizarán termopozos bridados con tamaños de 1 ½" de diámetro cuando: las condiciones de presión y temperatura sean mayores a las indicadas anteriormente, se instalen en recipientes, el fluido sea corrosivo tóxico ó cuando la tubería sea de aleación o requiera prueba de impacto, en el caso de líneas de proceso.
- Si se tienen tuberías o recipientes con aislamiento los termopozos roscados serán suministrados con extensión de retardo con longitud de acuerdo a la "U". Ver tabla 2.16.
- Cada uno de los termómetros bimetálicos deberá ser suministrado con una placa de acero inoxidable fija en forma permanente con identificación y servicio grabados a golpe.

### **Especificaciones generales para sensores de temperatura tipo RTD**

#### Requerimientos mínimos

- Deberán suministrarse completamente ensamblados incluyendo termopozo, bridas y todos los accesorios para el montaje y ensamble de los transmisores a menos que se especifique otra cosa.
- Deberán ser alambre de platino con resistencia de 100 ohms  $\pm$  0.2 ohms a 0°C.
- El sistema deberá estar constituido de 3 conductores.
- Deberán estar basados en el cambio de resistencia eléctrica con temperatura.
- Las curvas de calibración deberán ser proporcionadas por el proveedor del equipo.
- El rango de temperatura deberá estar entre 150 °C a 800 °C.
- La exactitud deberá ser  $\pm$  0.003 °C.
- El tubo protector deberá ser de acero inoxidable 316 con un diámetro de ¼" exterior y conexión roscada de ½" NPTM.
- El material de la cabeza será de aluminio vaciado, anodizado.
- El material del termopozo deberá ser acero inoxidable 316 y su construcción deberá ser del tipo barra perforada con maquinado cónico a menos que se especifique diferente.
- El sensor deberá ser a prueba de vibración. El diámetro del conductor no será menor de 0.05 mm.
- La conexión del termopozo será 1 ½" 150 lb ANSI R.F para recipientes a presión y para tuberías con fluidos corrosivos, servicio de alta temperatura y el diámetro de la cuerda NPTF es ½".
- La longitud "U" deberá estar de acuerdo a lo requerido. Ver tabla 2.16.

- Cada uno de los RTD's deberá ser suministrado con una placa de acero inoxidable fija en forma permanente con identificación y servicio grabados a golpe.

## **Especificaciones generales para la selección de termopares**

### Requerimientos mínimos

- Debe suministrarse el ensamble completo: termopar, termopozo, niples de extensión con tuerca unión, aisladores internos y cabeza de conexiones a menos que se especifique otra cosa.
- Las uniones calientes deben ser torcidas y soldadas a tope.
- Los alambres del termopar deben tener aislamiento del tipo compactado (MgO).
- Las cabezas de los termopares deben suministrarse con su block terminal de porcelana sencillo, dúplex o según se especifique.
- El material de la cabeza debe ser aluminio vaciado, con conexiones de  $\frac{3}{4}$ " al conduit y  $\frac{1}{2}$ " al tubo.
- La cabeza debe ser a prueba de intemperie, la cabeza debe ser protegida con recubrimiento epóxico, con cubierta roscada unida al cuerpo por una cadena de acero inoxidable.
- El material de los niples y tuerca unión deben ser de acero al carbón galvanizado.
- La longitud de conexión de niples y unión entre cabeza y termopozo debe ser de 6".
- La construcción de los termopozos debe ser del tipo barra perforada, a menos que se especifiquen termopozos cerámicos.
- Cuando se especifiquen termopozos cerámicos, estos deben ser del tipo metal-cerámico, con el tubo protector de un material cerámico adecuado a las condiciones de operación y con la conexión (ya sea roscada o bridada) de acero inoxidable 316 como mínimo.
- El material mínimo de los termopozos debe ser acero inoxidable 316.
- Para termopozos roscados la conexión al proceso debe ser de 1" NPT.
- Para termopozos bridados el tamaño de la brida debe ser de 1  $\frac{1}{2}$ " del material y tipo especificado.
- Los termopozos de prueba deben ser suministrados con tapón roscado y cadena de acero inoxidable.
- La longitud "U" será de acuerdo a lo requerido. Ver tabla 2.16.
- Cada uno de los termopares deberá ser suministrado con una placa de acero inoxidable fija en forma permanente con identificación y servicio grabados a golpe.

## Especificaciones generales para la selección de termopozos

### Requerimientos mínimos

- Los elementos primarios de medición de temperatura deberán protegerse con termopozos de acero inoxidable 316. El material anterior deberá considerarse como mínimo ya que deberá además cumplir la especificación de tubería en caso de que ésta indique la utilización de otro material.
- La construcción de los termopozos deberá ser maquinado en barra, tipo cónico a menos que se especifique diferente.
- La longitud "U" deberá ser la adecuada conforme a lo requerido. Ver tabla 2.16.
- La conexión del termopozo será 1 ½" 150 Lb ANSI R.F para recipientes a presión y para tuberías con fluidos corrosivos o servicio de alta temperatura y el diámetro de la cuerda es ½" NPTF.
- Se deberá suministrar al termopozo de prueba un tapón protector fijo con cadena.
- Los termopozos deberán tener un diámetro exterior de 7/8", interior de 7/16" y espesor de 3/8".
- Cada uno de los termopozos deberá ser suministrado con una placa de acero inoxidable fija en forma permanente con identificación y servicio grabados a golpe.

| CLASE                      | 150 LBS |        |      |        |       |        | 300 LBS |        |       |        |       |        |
|----------------------------|---------|--------|------|--------|-------|--------|---------|--------|-------|--------|-------|--------|
| TAMAÑO NOMINAL             | 25      | (1)    | 38   | (11/2) | 51    | (2)    | 25      | (1)    | 38    | (11/2) | 51    | (2)    |
| DIAMETRO DE BRIDA          | 108     | (4.25) | 127  | (5)    | 152.4 | (6)    | 123.8   | (4.88) | 155.6 | (6.12) | 165.1 | (6.5)  |
| ESPESOR DE BRIDA           | 14.3    | (0.56) | 17.5 | (0.69) | 19.1  | (0.75) | 17.5    | (0.69) | 20.6  | (0.81) | 22.2  | (0.88) |
| DIAMETRO DE CARA REALZADA  | 50.8    | (2.0)  | 73   | (2.88) | 92.1  | (3.62) | 50.8    | (2.0)  | 73    | (2.88) | 92.1  | (3.62) |
| CANTIDAD DE TORNILLOS      | 4       |        | 4    |        | 4     |        | 4       |        | 4     |        | 8     |        |
| TAMAÑO DE TORNILLOS        | 12.7    | (1/2)  | 12.7 | (1/2)  | 15.9  | (5/8)  | 15.9    | (5/8)  | 19.1  | (3/4)  | 15.9  | (5/8)  |
| DIAM. DE CIRC. DE BARRENOS | 79.4    | (3.12) | 98.4 | (3.88) | 120.7 | (4.75) | 88.9    | (3.5)  | 14.3  | (4.5)  | 127   | (5)    |

Tabla 2.15 Dimensiones de Bridas cara Realzada (R.F.) conforme a ANSI B 16.5. Dim. en mm (pulg)

| *TERMOPOZO SIN EXTENSION                                   |              | *TERMOPOZO CON EXTENSION                                   |              |   |
|--|--------------|--|--------------|---|
| **LONGITUD "S"<br>(VASTAGO DEL<br>ELEMENTO DE<br>MEDICION) | LONGITUD "U" | **LONGITUD "S"<br>(VASTAGO DEL<br>ELEMENTO DE<br>MEDICION) | LONGITUD "U" | LONGITUD DE LA<br>EXTENSION DE<br>LA CONEXION "T" |
| 4"   | 21/2"        | 6"   | 21/2"        | 2"  |
| 6"   | 41/2"        | 9"   | 41/2"        | 3"  |
| 9"   | 71/2"        | 12"  | 71/2"        | 3"  |
| 12"  | 101/2"       | 15"  | 101/2"       | 3"  |
| 15"  | 131/2"       | 18"  | 131/2"       | 3"  |
| 18"  | 161/2"       | 24"  | 191/2"       | 3"  |
| 24"  | 221/2"       |  |              |   |

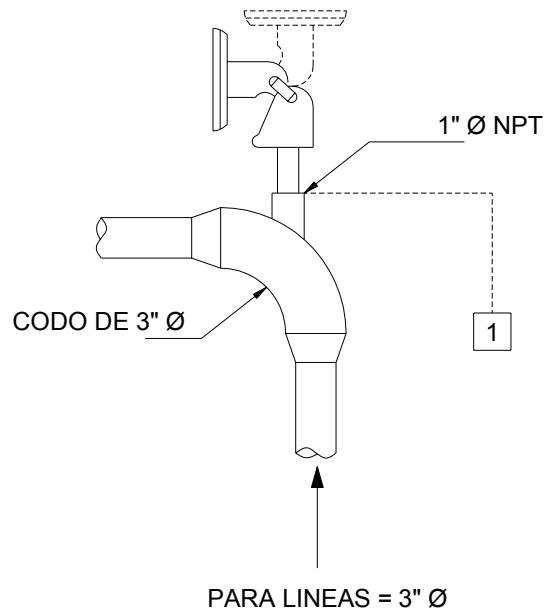
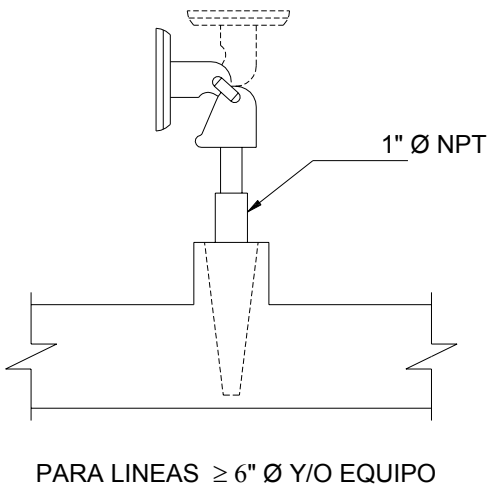
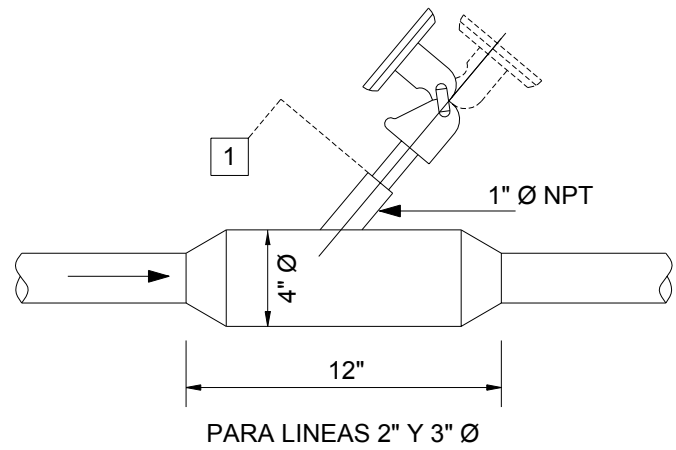
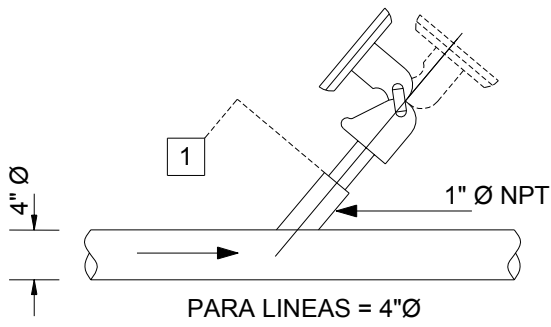
\*Para líquidos la longitud de inmersión será el 50% del diámetro de la línea, para gases y vapores será del 75%. Para instalación en equipos puede llegar a ser del hasta 22 ½".

\*\*Longitud del vastago del elemento de medición que se encuentra dentro del Termopozo.

Tabla 2.16 Dimensiones de Longitud "U" y extensión de retardo "T" para Termopozos.

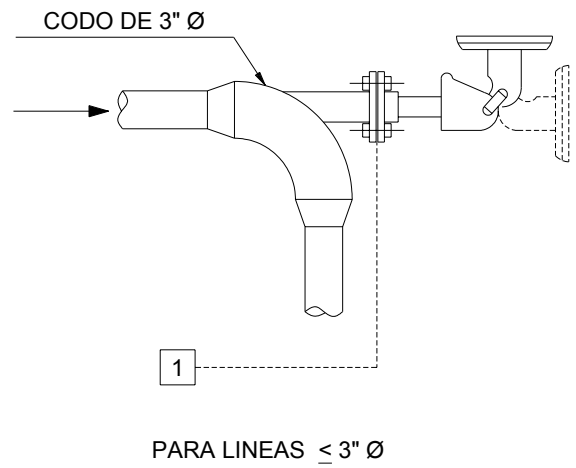
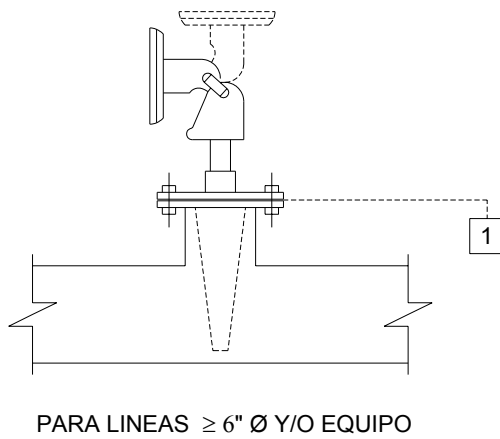
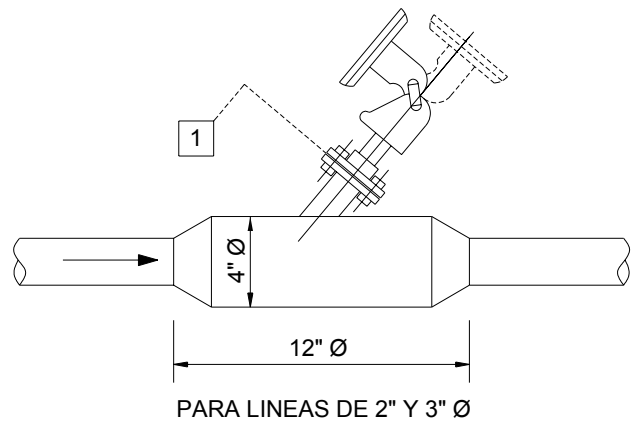
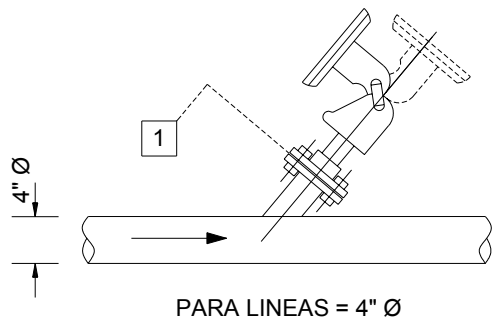
## 2.38 Típicos de Instalación

### TÍPICO DE INSTALACIÓN DE TERMÓMETROS BIMETÁLICOS ROSCADOS CON TERMOPOZO



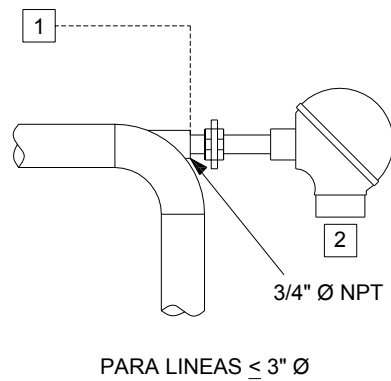
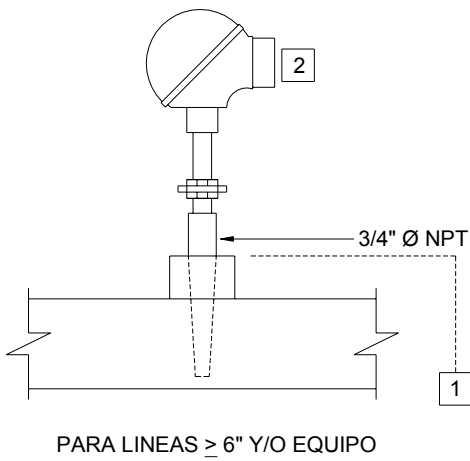
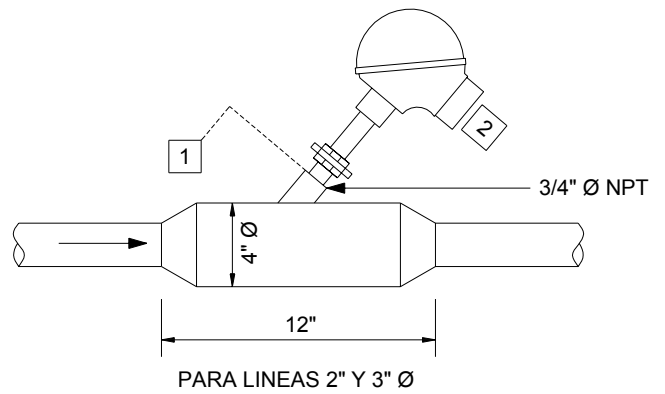
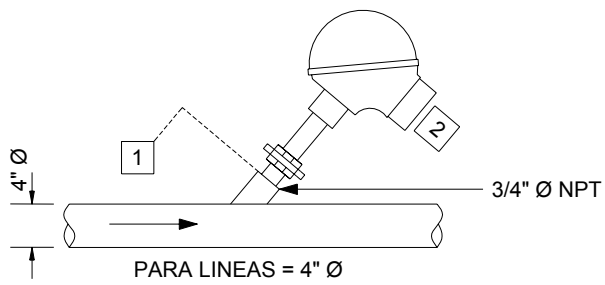
1 POR DEPARTAMENTO DE TUBERÍAS

TÍPICO DE INSTALACIÓN PARA TERMÓMETROS BIMETÁLICOS BRIDADOS CON TERMOPOZO.



1 EMPAQUES Y ESPARRAGOS POR DEPARTAMENTO DE TUBERÍAS

## TÍPICO PARA INSTALACIÓN DE RTD'S Y TERMOPARES ROSCADOS

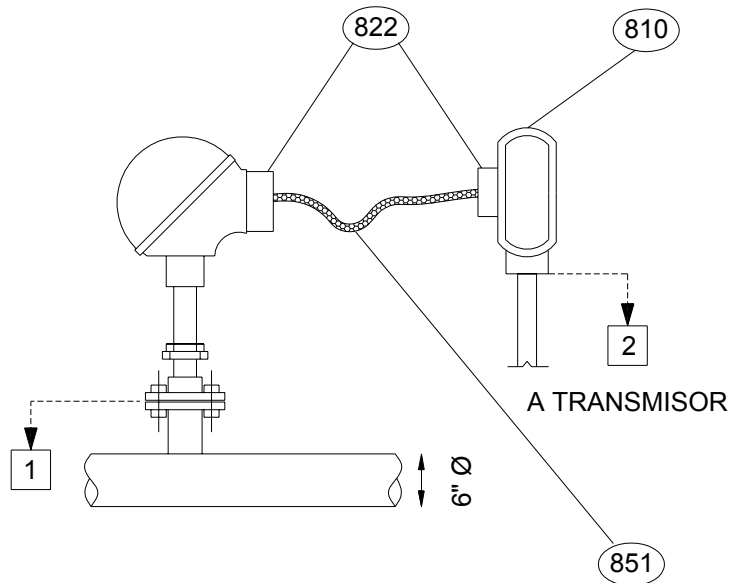


1 POR DEPARTAMENTO DE TUBERÍAS

2 CONEXIÓN ELÉCTRICA



## TÍPICO DE INSTALACIÓN DE RTD'S Y TERMOPARES BRIDADOS



PARA TUBERÍAS  $\geq 6"$  Ø Y/O EQUIPO

- 1 EMPAQUES Y ESPARRAGOS POR DEPARTAMENTO DE TUBERÍAS
- 2 CONEXIÓN ELÉCTRICA

| MATERIAL REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN DEL INSTRUMENTO |          |                  |  |
|--|----------|------------------|--|
| PARTIDA  | CANTIDAD | TAMAÑO           | DESCRIPCIÓN  |
| 810  | 1 PZA    | $\frac{3}{4}"$ Ø | CAJA REGISTRO PARA AREAS NO PELIGROSAS                         |
| 822  | 2 PZAS.  | $\frac{3}{4}"$ Ø | CONECTOR RECTO A PRUEBA DE LÍQUIDOS EN ALUMINIO LIBRE DE COBRE |
| 851  | 0.5 m.   | $\frac{3}{4}"$ Ø | TUBO CONDUIT CON RECUBRIMIENTO DE PVC                          |

## 2.39 Comparación entre instrumentos de medición de temperatura

| Elemento                                 | Linealidad<br>Precisión            | Temp.<br>máx.°C | Distancia máxima<br>al receptor  | Atmósfera<br>de trabajo                                      | Características   |   |
|--|------------------------------------|-----------------|--|--|---|---|
|  |                                    |                 |  |  | A favor   | En contra   |
| Bimetálico                               | Buena<br>± 1%                      | 500             | -----  | Depende<br>del material<br>del bulbo                         | -Económico  | -Medida Local   |
| Resistencia de<br>Níquel                 | Pobre<br>± 0.5 °C                  | 300             | < 300 m  | Protegido,<br>en líquidos<br>y atmósfera<br>corrosiva        | -Buena estabilidad<br>-Alcance estrecho   | -Bajo límite de temperatura<br>-Frágil  |
| Resistencia de<br>Platino                | Excelente<br>± 0.01 °C             | 950             | < 1500 m   | Protegido,<br>en líquidos<br>y atmósfera<br>corrosiva        | -Señal de salida mayor a la<br>de termopar y mejor<br>estabilidad<br>-Medidas de precisión<br>-Sensibilidad y respuesta<br>rápida                       | -Más caro que el termopar<br>o el termistor<br>-Frágil  |
| Resistencia de<br>Cobre                  | Buena<br>± 0.01 °C                 | 120             | -----  | Protegido,<br>en líquidos<br>y atmósfera<br>corrosiva        | -Barato   | -Baja resistividad<br>-Baja temperatura   |
| Termistor                                | Pobre<br>± 0.005 °C                | 400             | < 1500 m   | Cualquiera   | -Señal de salida mayor al<br>termopar y sonda de<br>resistencia<br>-Alcance estrecho<br>-Pequeño tamaño<br>-Sensibilidad excelente<br>-Respuesta rápida | -No lineal<br>-Alta deriva sin envejecer  |
| Termopar de:<br>Cobre-<br>Constantan (T) | Buena<br>0.4 -2%<br>(0.4-0.8 °C)   | 370             | < 1500 m con<br>instrumento<br>potenciométrico                                 | Oxidante y<br>reductora                                      | -Pequeño tamaño<br>-Respuesta rápida<br>-Alta resistencia a la<br>corrosión de humedad<br>-Bueno en bajas<br>temperaturas                               | -Alcance amplio<br>-Compensación unión fría<br>-Linealidad menor que<br>sonda de resistencia<br>-Baja temperatura<br>máxima |
| Termopar de<br>Hierro-<br>Constantan (J) | Buena<br>0.3 -0.5%<br>(1.1-2.2 °C) | 550             | < 1500 m con<br>instrumento<br>potenciométrico                                 | Reductora  | -Pequeño tamaño<br>-Respuesta rápida<br>-Bueno en atmósferas<br>reductoras<br>-Mas económico  | -Alcance amplio<br>-Compensación unión fría<br>-Linealidad menor que<br>sonda de resistencia                                |
| Termopar de<br>Cromel-Alumel<br>(K)      | Muy buena<br>0.8 %<br>(± 3 °C)     | 1100            | Galvanométricos<br>limitada por<br>resistencias<br>externas<br>(cable de ext.) | Oxidante   | -Pequeño tamaño<br>-Respuesta rápida<br>-Bueno en atmósferas<br>oxidantes<br>-Termopar más lineal   | -Alcance amplio<br>-Compensación unión fría<br>-Linealidad menor que<br>sonda de resistencia<br>-Más caro que T o J         |
| Termopar de<br>Pt-Pt / Rh<br>(R y S)     | Buena a<br>alta temp.<br>1-3 °C    | 1600            | Galvanométricos<br>limitada por<br>resistencias<br>externas<br>(cable de ext.) | Oxidante   | -Pequeño tamaño<br>-Respuesta rápida<br>-Bueno en atmósferas<br>oxidantes   | -Alcance amplio<br>-Compensación unión fría<br>-Linealidad menor que<br>sonda de resistencia<br>-Mas caro que K             |
| Pirómetro<br>óptico                      | *Pobre<br>1-3 °C                   | 6000            | Galvanométricos<br>limitada por<br>resistencias<br>externas<br>(cable de ext.) | El haz de<br>radiación<br>sin<br>interrumpir<br>con el lente | -Sin contacto físico<br>-Buena repetibilidad<br>-Respuesta rápida<br>-Más preciso<br>-Influido por la emisividad  | -Pobre linealidad<br>-Más caro que termopar<br>-Difícil determinar<br>temperatura exacta por<br>emisividad del cuerpo       |
| Pirómetro de<br>radiación total          | *Pobre<br>±0.5%                    | 5000            | Galvanométricos<br>limitada por<br>resistencias<br>externas<br>(cable de ext.) | El haz de<br>radiación<br>sin<br>interrumpir<br>con el lente | -Sin contacto físico<br>-Buena repetibilidad<br>-El más barato excepto<br>óptico  | -Pobre linealidad<br>-Más caro que termopar<br>-Difícil determinar<br>temperatura exacta por<br>emisividad del cuerpo       |

\* Varía con la cuarta potencia de la temperatura

Tabla 2.17 Características de los elementos de medición de temperatura.

## 2.40 Otra clase de instrumentos

En los procesos de transformación industriales existen otras variables además del flujo, nivel, presión y temperatura que resultan de interés conocer con el objeto de un mejor y mayor control de los procesos industriales. Esta clase de variables pueden dividirse en dos tipos: físicas y químicas.

## 2.41 Medición de variables físicas

Las variables físicas son aquellas que se encuentran relacionadas con efectos físicos, tales como el movimiento, la fuerza o bien, que mantienen una estrecha relación con las propiedades físicas del cuerpo. De entre las variables físicas destacan: el peso, la velocidad, la densidad, el peso específico, la humedad, el punto de rocío, la viscosidad y la consistencia.

### 2.41.1 Peso y Velocidad

La masa y el peso se usan frecuentemente en forma indistinta, sin embargo, son diferentes. La masa es una medida cuantitativa de la inercia de un cuerpo en reposo, o la cantidad de materia que posee un cuerpo. Como cantidad física, la masa es el producto de la densidad y el volumen.

El peso es una fuerza, dicha fuerza es aquella con la cual un cuerpo es atraído hacia la tierra. El peso es determinado por el producto de la masa y la aceleración de la gravedad. Por ello si:

$$m = v \cdot d$$

En donde:     m = masa  
                  v = volumen  
                  d = densidad

Entonces:

$$w = m \cdot g$$

En donde:     w = peso  
                  m = masa  
                  g = aceleración de la gravedad

La materialización de la unidad de masa es llamada peso; lo cual incrementa la confusión entre masa y peso. En el sistema internacional de unidades (SI), el sistema métrico moderno, la unidad de masa es llamada el kilogramo y la unidad de fuerza es llamada el Newton. En Norteamérica, el sistema acostumbrado designa al slug como la unidad de masa y la unidad de fuerza es llamada libra. Aún así, la gente utiliza la unidad de libra para referirse a la masa de un objeto debido a que, en los Estados Unidos, la libra se ha definido en términos del kilogramo a partir de 1893.

La fuerza de la gravedad que experimenta un objeto no es la misma en todos los lugares de la superficie terrestre, principalmente debido a la rotación de la Tierra. La fuerza de la gravedad que se mide es en realidad una combinación de la fuerza gravitatoria debida a la atracción terrestre y una fuerza centrífuga opuesta debida a la rotación de la Tierra. En el ecuador, la fuerza centrífuga es relativamente elevada, lo que hace que la gravedad que se mide sea relativamente baja; en los polos, la fuerza centrífuga es nula, con lo que la gravedad que se mide es relativamente elevada. En el uso corriente, el término fuerza de la gravedad significa en realidad una combinación de las fuerzas gravitatoria y centrífuga.

La gravedad suele medirse de acuerdo a la aceleración que proporciona a un objeto en la superficie de la Tierra. En el ecuador, la aceleración de la gravedad es de 9,7799 metros por segundo cada segundo, mientras que en los polos es superior a 9,83 metros por segundo cada segundo. El valor que suele aceptarse internacionalmente para la aceleración de la gravedad para efectos de hacer cálculos es de 9,80665 metros por segundo cada segundo. Por tanto, si no consideramos la resistencia del aire, un cuerpo que caiga libremente aumentará cada segundo su velocidad en 9,80665 metros por segundo.

Por lo cual entonces, la aceleración de la gravedad  $g$ , es la misma para todas las masas situadas en un mismo punto, pero varía ligeramente de un lugar a otro de la superficie terrestre. Por estos motivos, el peso de un objeto se puede determinar por un método comparativo (como se hace en una balanza de laboratorio) o por medición directa de la fuerza gravitatoria suspendiendo el objeto de un muelle o resorte calibrado en newtons (como se hace en una balanza de resorte). La deformación del muelle depende del valor de la aceleración de la gravedad del lugar donde se realiza la medida; por eso una balanza de resorte marca pesos diferentes para una misma masa (o cantidad de materia) en lugares con una aceleración de la gravedad diferente. Por ejemplo, cualquier objeto pesa algo más si está situado a nivel del mar que si está en la cima de una montaña, o si está cerca del polo que si está en el ecuador terrestre.

El peso es una medida de la fuerza gravitatoria ejercida sobre un objeto. En las proximidades de la Tierra, y mientras no haya una causa que lo impida, todos los objetos caen animados de una aceleración,  $g$ , por lo que están sometidos a una fuerza constante, que es el peso. Los objetos diferentes son atraídos por fuerzas gravitatorias de magnitud distinta.

Sin embargo, su masa es la misma. Si se compara el peso en la Tierra y en la Luna, las diferencias son muy notorias. Así, un objeto con 1 kilogramo de masa, que en la Tierra pesa unos 9,8 newtons (en un lugar donde  $g$  valga  $9,8 \text{ m/s}^2$ ), pesaría solamente 1,6 newtons con 0.163 kilogramos de masa en la Luna (donde  $g$  vale aproximadamente  $1,6 \text{ m/s}^2$ ).

El efecto de la aceleración de la gravedad sobre los cuerpos puede hacerse más palpable en experimentos en cámaras de vacío, en donde todos los cuerpos caen con la misma aceleración independientemente de su masa; o sencillamente, durante los vuelos espaciales, en donde la ausencia aparente de gravedad se le conoce como gravedad cero o microgravedad.

En la industria, es de interés particular el peso de sustancias para operaciones de inventario de materias primas, de productos finales o en la mezcla de ingredientes. Los métodos conocidos actualmente para medir el peso son los siguientes:

- Por comparación con otros pesos patrones (balanzas y básculas)
- Por la utilización de células de carga a base de galgas extensiométricas
- Por la utilización de células de carga hidráulicas
- Por la utilización de células de carga neumáticas

## Balanzas y básculas

Una balanza es un instrumento de medición utilizado para determinar la masa de un objeto mediante la medición de la fuerza ejercida por éste objeto en el soporte de la balanza dentro del campo gravitacional de la tierra. Así, se coloca un estándar o patrón de un valor conocido en uno de los platillos de la balanza, y entonces, se coloca el material desconocido en el segundo platillo, hasta que la fuerza gravitacional que actúa en el material desconocido iguala a aquella ejercida sobre el estándar.

La balanza de brazos iguales (fig. 2.66) fue probablemente el primer instrumento utilizado para la pesada. Es un dispositivo simple en el cual dos platillos se suspenden de un brazo en cuyo centro se encuentra un punto pivote y ambos platillos están a distancias iguales de este centro. Se coloca un patrón en un platillo y el objeto a ser medido se coloca en el segundo platillo; cuando el brazo se encuentra nivelado, el patrón y el objeto desconocido se igualan. Este método de medición en la actualidad aún tiene un amplio uso a lo largo del mundo.



Fig. 2.66 Balanza de brazos iguales.

La balanza de brazos (fig. 2.67) es un intento de tener mayor exactitud en la medición de peso. Esta balanza utiliza el mismo principio de operación que la balanza de brazos iguales. Sin embargo, normalmente, esta tiene sólo un platillo y el brazo está desfasado. En el brazo, se encuentran montados un grupo de pesos deslizables. A medida que los pesos se deslizan hacia el final del brazo, obtienen una ventaja mecánica debida a la inequidad con respecto al punto pivote de la balanza. Los pesos se mueven a lo largo del brazo hasta que la balanza alcanza el equilibrio. A lo largo del brazo se han marcado con ranuras posiciones las cuales corresponden a la fuerza aplicada por los pesos deslizables. Mediante la adición de las fuerzas indicadas por la posición de cada peso, se determina la masa de material desconocido. Este tipo de balanzas se encuentran disponibles en un amplio rango de exactitud, y capacidad de carga. Existen balanzas de brazo para medir en el rango de los miligramos y se fabrican escalas de brazo tan grandes que tienen una capacidad de pesar camiones y trenes. Sin embargo, la desventaja es que a medida que la carga se incrementa la resolución se ve disminuida.



Fig. 2.67 Balanza de brazo.

El siguiente paso en costo y exactitud es la celda de carga de extensómetro. Un extensómetro es un elemento o alambre de resistencia eléctrica que cambia su resistencia cuando la longitud del elemento cambia. El dispositivo se empalma a un cilindro de acero que se encogerá cuando esté comprimido y se estirará cuando esté tensionado. Debido a que el elemento está ligado al cilindro, la longitud del alambre cambiará junto con el cilindro. La resistencia eléctrica es proporcional a la longitud del elemento. Midiendo la resistencia de este elemento, es posible determinar la carga en la celda de carga. La resistencia eléctrica se convierte en una lectura en unidades de masa mediante circuitos eléctricos en el dispositivo de lectura.

La celda de carga de fuerza restaurativa es el corazón de la balanza electrónica (ver fig. 2.68). Esta celda utiliza el principio de la balanza de brazos iguales. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el punto de apoyo se encuentra desviado para que esta deje de ser una balanza de brazos iguales, ya que un lado se diseña para tener una ventaja mecánica. Este lado de la balanza se conecta a una bobina eléctrica. La bobina se encuentra suspendida en un campo magnético. El otro lado está conectado a un plato de pesaje. Conectado al brazo se encuentra un dispositivo de indicación de cero, que consiste de un fotodiodo y un LED que se utilizan para determinar cuando la balanza está en equilibrio. Cuando una carga se coloca en el platillo de pesaje, la balanza deja de estar en equilibrio. El circuito del fotodiodo detecta que la balanza ya no está en equilibrio y la corriente eléctrica en la bobina se incrementa para regresar la balanza al equilibrio. La corriente eléctrica es medida entonces a través de un resistor de precisión y convertida en lectura en unidades de masa y se muestra como lectura digital.



Fig. 2.68 Balanza electrónica.

La báscula clásica por su parte consiste sencillamente en una palanca apoyada en un punto de la que cuelgan en un extremo el peso a medir y en el otro con forma de rectángulo, dos pesos móviles, del cual uno es de ajuste basto y el otro de ajuste fino. La indicación en un fiel muestra cuando la báscula se encuentra ajustada. Existe de igual forma la báscula de palanca que tiene también el mismo principio de aplicación.

Las balanzas y las básculas son sencillas y de gran precisión, pudiendo alcanzar las balanzas una precisión del orden de  $\pm 0.002$  al 0.5 % y las básculas una precisión de  $\pm 0.1$  %. La balanza tiene un rango de aplicación desde gramos a 900 kilogramos, mientras que la báscula mide dentro de un rango desde gramos a varias toneladas. Ambos sistemas tienen la desventaja de una lenta velocidad de respuesta, además de que en ambientes industriales la presencia de polvo, suciedad, vapores y humedad son ambientes propicios para afectar a estos dispositivos a través de la corrosión, afectando al juego de palancas, particularmente a los puntos de apoyo y afectando la precisión de la pesada.

### **Técnicas de pesaje**

Existen muchas técnicas de pesaje utilizadas para reducir los errores en el proceso de pesaje. La más simple de estas técnicas se llama pesada por sustitución. Esta técnica se utiliza para eliminar algunos de los errores introducidos por el dispositivo de pesaje. En esta técnica, el patrón conocido y un objeto desconocido son pesados ambos en el mismo dispositivo, y se utiliza o se considera adecuada cuando los resultados en décimas de gramos se consideran aceptables.

Si se requieren resultados menores a décimas de gramos, los factores ambientales empiezan a causar errores significantes en el proceso de pesaje. Las diferencias de densidad entre el estándar y el objeto desconocido y la densidad del aire se combinan para causar errores significativos en éste proceso

Cuando se requieren mediciones muy precisas se utiliza la técnica de doble sustitución acoplada con una corrección por flotación por aire que proporciona resultados aceptables para prácticamente cualquier aplicación científica.

Cuando se requieren relativamente bajos órdenes de exactitud, es adecuado leer directamente los valores de masa o peso desde el instrumento de pesaje. A excepción de la balanza de brazos iguales y algunas balanzas de torsión, la mayoría de los instrumentos modernos de pesaje tienen capacidad de lecturas directas. Para la mayoría de las transacciones comerciales y para experimentos científicos sencillos, la lectura directa proporcionará resultados aceptables.

En el caso de balanzas de brazos iguales, la balanza tendrá un indicador y una escala, cuando se requiere una exactitud relativamente baja, el indicador y la escala se utilizan para indicar cuando la balanza está cerca del equilibrio. Lo anterior aplica también en el uso de balanzas de torsión. Sin embargo, las balanzas de brazos iguales de baja (por ejemplo 30 gramos) o de alta (por ejemplo 900 kilogramos) capacidad se usan también para aplicaciones de alta exactitud. Sólo las balanzas electrónicas de nueva generación son iguales o mejores en términos de exactitud y beneficio de otras características.

El pesaje es un proceso engañosamente sencillo. La mayoría de la gente ha realizado y usado mediciones de pesaje durante la mayoría de su vida. Parece tan sencillo como poner un objeto en un trato de pesaje y leer el resultado. Desafortunadamente, el proceso de pesaje es muy susceptible al error. Hay errores causados por imperfecciones en el instrumento de pesaje; errores causados por desviaciones en los estándares utilizados; errores causados por el método de pesaje; errores causados por el operador; y errores causados por factores ambientales. En el caso de la balanza de brazos iguales, cualquier diferencia entre las longitudes de los brazos resultará en una desviación en el resultado de la medición.

Prácticamente todos los dispositivos de medición tendrán algún grado de error causados por pequeñas cantidades de no linealidad en el dispositivo. Todos los estándares tienen alguna cantidad de desviación e incertidumbre. La masa es la única cantidad base en el sistema internacional de unidades (SI) definida en relación a un artefacto físico (el prototipo internacional del kilogramos se mantiene en Francia bajo la custodia del buró internacional de pesos y medidas). Todas las mediciones de pesaje se originan a partir del estándar internacional. Este prototipo es, por acuerdo internacional, exacto; sin embargo, en el último siglo, ha cambiado en su valor. Lo que no se sabe es la magnitud exacta o dirección de este cambio. Finalmente, los factores ambientales como la temperatura, la presión barométrica, y la humedad pueden afectar también el proceso de pesaje.

### Células de carga a base de galgas extensiométricas

Las células de carga con galgas extensiométricas consisten básicamente en una célula que contiene una pieza de elasticidad conocida (como el acero que tiene un módulo de elasticidad de  $2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ ) y que es capaz de soportar la carga sin exceder su límite de elasticidad. Junto con esta pieza se encuentra cementada una galga extensiométrica (recordar que la galga extensiométrica convierte la variable medida en una variación de resistencia debido a la deformación en los brazos de un puente de Wheatstone), formada por varias espiras de hilo pegado a un soporte. La tensión o la compresión a que el peso somete a la célula hacen variar la longitud del hilo metálico y hace variar por lo tanto su resistencia eléctrica.

Se emplean acondicionadores de señal, que no son otra cosa que puentes de Wheatstone que captan los pequeños cambios en la resistencia eléctrica y compensan los efectos de la temperatura (ya que este sistema se ve afectado por las variaciones de temperatura). El uso del microprocesador a este diseño eleva la precisión de la medida utilizando algoritmos de corrección de errores y facilita el ajuste y la calibración.

El diseño de células de carga por galgas extensiométricos tiene una precisión del orden de  $\pm 0.02$  a  $0.2 \%$ , con un rango de aplicación de 20 kg a 400 toneladas. Posee las ventajas de ser una instalación simple, con indicación a distancia y protegida contra la corrosión; sin embargo este sistema es caro y debe siempre de considerarse la compensación por temperatura. La figura 2.69 muestra un esquema de este tipo de dispositivo.

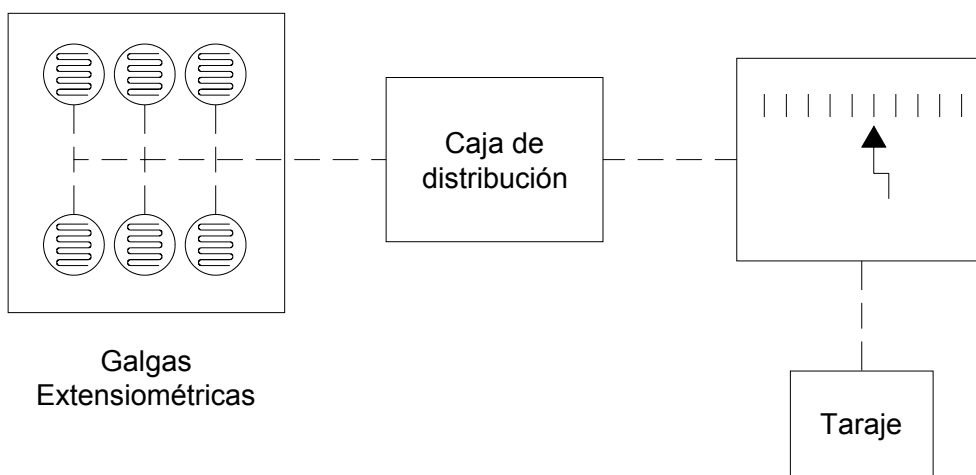


Fig. 2.69 Células de carga con galgas extensiométricas.



## Células de carga hidráulicas

Las células de carga hidráulicas (fig. 2.70) consisten en un pistón sobre el que se apoya la carga, misma que ejerce una presión sobre un fluido hidráulico. De acuerdo a la carga y conforme al área conocida del pistón se crea una presión en el aceite que puede leerse en un manómetro Bourdon; de esta forma se mide indirectamente la carga. Realizando la suma de presiones hidráulicas de varias células de carga y aplicándolas a un transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas se obtiene una señal eléctrica que puede leerse en un indicador digital y usarse en sistemas de pesaje electrónicos.

Este sistema tiene una capacidad de carga de 40 kg a 90 ton, admitiendo una sobrecarga del 40% con una velocidad de respuesta de menos de 2 segundos a una precisión de  $\pm 0.2\%$ . Presentan las ventajas además de ser resistentes a la vibración, son de instalación simple, su indicación es a distancia y pueden fabricarse a prueba de explosión. Sin embargo tiene las desventajas de ser caro, se ve afectado por la variación de la temperatura, requiere de continua calibración y requiere además de un transmisor electrónico para la suma de señales.

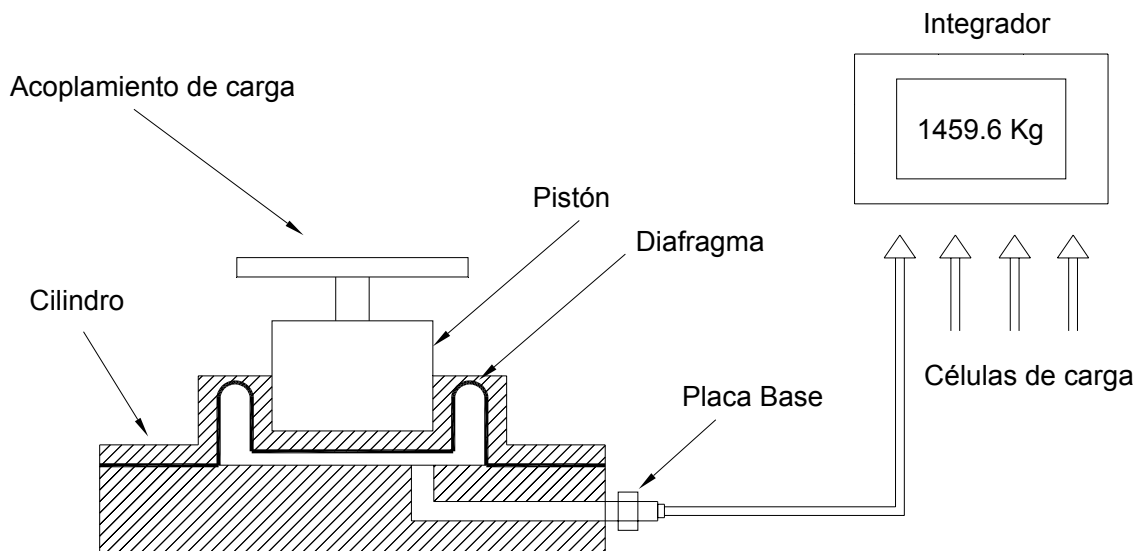


Fig. 2.70 Célula de carga hidráulica.

## Células de carga neumáticas

Las células de carga neumáticas (fig. 2.71) consisten en un transmisor neumático de carga en el que el peso situado en una plataforma de carga se compara con la deformación de un diafragma que se alimenta a una presión de taraje que es ajustable.

El equilibrio en el sistema se llega a través del conjunto tobera obturador y la cámara de realimentación del transmisor. La presión alcanzada en esta cámara indica el peso en un manómetro Bourdon conectado al inferior de la cámara.

Esta clase de sistema tiene una capacidad de carga de 10 kg a 10 ton con una precisión de  $\pm 0.2 \%$ , aunque presenta la ventaja de indicación a distancia, se debe de proveer siempre de aire comprimido para instrumentos y su mantenimiento requiere una calibración constante.

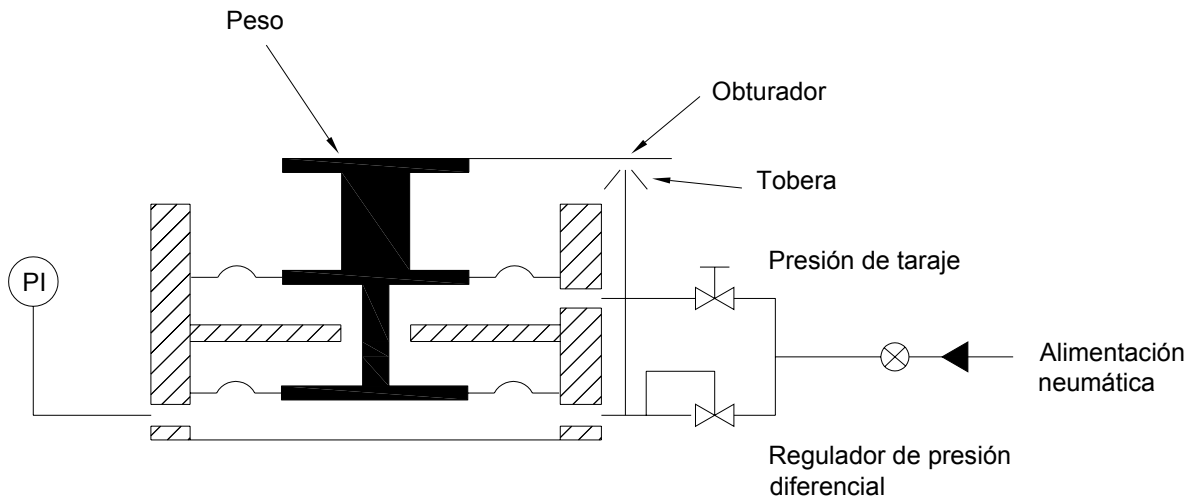


Fig. 2.71 Célula de carga neumática.

La tabla 2.18 muestra una breve comparación entre los instrumentos de medición de peso estudiados anteriormente.

| Instrumento           | Capacidad             | Precisión (%)   | Ventajas  | Desventajas   |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|---|---|
| Balanza               | Gramos a 900 Kg       | $\pm 0.002-0.5$ | -Simple, barata, precisa  | -Lenta velocidad de respuesta<br>-Afectada por corrosión  |
| Báscula               | Gramos a toneladas    | $\pm 0.1$       | -Simple, barata, precisa  | -Lenta velocidad de respuesta<br>-Afectada por corrosión  |
| Galga extensiométrica | 20 Kg a 400 toneladas | $\pm 0.02-0.2$  | -Instalación simple<br>-Indicación a distancia<br>-Protegida contra corrosión | -Alto precio  |
| Célula hidráulica     | 20 Kg a 90 toneladas  | $\pm 0.2$       | -Instalación simple<br>-Resistente a vibración<br>-Indicación a distancia     | -Alto precio<br>--Necesidad de compensación por temperatura<br>-Requiere continua calibración     |
| Célula neumática      | 10 Kg a 10 toneladas  | $\pm 0.2$       | -Indicación a distancia<br>-Buen acoplamiento en control neumático            | -Necesidad de aire de instrumentos<br>-Afectada por temperatura<br>-Requiere continua calibración |

Tabla 2.18 Instrumentos de medición de peso.

## **Medición de velocidad**

El problema de la medición de velocidad es de alguna manera diferente al que se presenta en la medición de otras cantidades en el sentido de que no hay un gran número de tipos de transductores así como de fabricantes de los cuales elegir dado un problema específico. Frecuentemente, el problema es tal que la persona debe utilizar su conocimiento de la medición de otras cantidades e ingeniárselas para desarrollar un método de medición de velocidad adecuado para el problema presente. La velocidad puede ser lineal o angular o rotacional.

### **Velocidad lineal**

La velocidad lineal de un objeto, se define como la razón de cambio de la posición del objeto con respecto al tiempo. Es una cantidad vectorial, esto significa que tiene dirección así como magnitud, y la dirección está asociada con la dirección del cambio en la posición. La magnitud de la velocidad es llamada rapidez y cuantifica que tan rápido se está moviendo un objeto. La velocidad lineal se mide en términos de, o en referencia a, algún objeto de referencia. Así, el velocímetro de un carro nos dice que tan rápido se está moviendo en relación a la tierra. Usualmente la velocidad lineal se identifica utilizando sólo el término velocidad. Las unidades comunes para medición de velocidad incluyen metros por segundo y millas por hora, pero cualquier combinación similar de unidades de longitud por unidades de tiempo es correcta.

### **Velocidad angular**

La velocidad rotacional (o velocidad angular) de un objeto se define como la razón de cambio con respecto al tiempo de la posición angular, y es una medida de que tan rápido un objeto está girando. Es completamente análoga a la velocidad lineal, pero para movimiento angular. Unidades comunes son revoluciones por minuto, pero cualquier unidad angular de medida por unidades de tiempo puede ser utilizada. La velocidad rotacional es una cantidad vectorial también, con la dirección del vector siendo la misma de la dirección del eje alrededor del cual el objeto está girando.

La medición de la velocidad angular se aplica frecuentemente a maquinaria de rotación tal como las bombas, motores, y generadores. La unidad de medición para aplicaciones de maquinaria de rotación más familiar es la revolución por minuto (r.p.m.). En la mayoría de los casos, la medición de r.p.m. involucra la generación de un tren de pulsos u ondas sinusoidales cuya frecuencia es proporcional a la velocidad angular. Las tecnologías de medición que utilizan trenes de pulso y ondas incluyen los tacómetros generadores de corriente alterna y directa, sensores ópticos, sensores de resistencia magnética variable o sensores de imanes rotatorios, básicamente.

### **Conversión de la velocidad lineal a rotacional**

Un generador rotacional de corriente directa puede utilizarse también para medir velocidades lineales mediante la colocación de una cremallera o sector dentado en el objeto móvil y dejando que esta cremallera conduzca al generador a través de un piñón diferencial. Este es el mismo principio mediante el cual un velocímetro convierte la velocidad lineal de un automóvil en una indicación angular en el tablero del carro.

Algunas aplicaciones de medición de velocidad incluyen:

- a) Controlar la velocidad a la cual se alimenta el material de entrada en un proceso. Si éste es alimentada muy rápido podría causarse un daño en la máquina, si éste fuese alimentado muy lentamente, podría haberse disminuido el nivel de la producción.

- b) Medición de la velocidad con la que se aproxima una herramienta robotizada a su destino.
- c) Monitoreo de la velocidad de un generador en una estación eléctrica.
- d) Medición de la velocidad de las llantas del automóvil con el fin de proporcionar retroalimentación al sistema de frenos.

En la industria, la medición de la velocidad se realiza por dos formas: mediante tacómetros mecánicos y con tacómetros eléctricos. El tacómetro mecánico detecta el número de vueltas del eje de la maquina por medios mecánicos únicamente, pudiendo a la vez, incorporar la medición del tiempo para determinar el número de revoluciones por minuto (r.p.m.). Los tacómetros eléctricos al igual que los mecánicos, captan la también la velocidad midiendo el número de vueltas del eje de una maquina, sólo que estos lo hacen por medios eléctricos.

### **Tacómetros mecánicos**

El más común de los tacómetros mecánicos es el clásico contador de revoluciones empleado para medir localmente la velocidad de rotación de toda clase de maquinas con dispositivo giratorio. Este tacómetro consiste en esencia en un eje elástico terminado en punta que se apoya sobre el centro de la pieza giratoria. El eje elástico al girar mueve a través de un tren de engranajes dos diales calibrados concéntricos.

Uno es exterior y el otro interior. Cada una de las divisiones del dial exterior representa una vuelta del eje giratorio, mientras que cada una de las divisiones del dial interior representa una revolución del dial exterior; conociéndose el tiempo de trabajo del contador, es fácil calcular la velocidad en r.p.m.

Otra clase de tacómetro mecánico es aquel conocido como centrífugo, en donde dos pesos rotativos y articulados a un eje giratorio aumentan su radio de giro debido a la acción de la fuerza centrífuga comprimiendo un resorte. La medida de compresión del resorte se lee en una escala que representa finalmente la velocidad de giro del eje de rotación.

La velocidad límite que pueden leer estos tacómetros mecánicos se encuentra alrededor de los 40,000 r.p.m. con una precisión de  $\pm 1\%$ .

### **Tacómetros eléctricos**

Para fines industriales los tacómetros eléctricos son los de preferencia en uso, ya que permiten la transformación directa de la señal para ser alimentada en un panel de control (por lo tanto controlada). Una aplicación típica la constituye la medida de la velocidad de giro del eje de una turbina en una central de energía.

Para entender adecuadamente el principio de funcionamiento de esta clase de instrumentos es necesario entender el significado de corriente continua y corriente alterna y como es originada cada una de ellas, además de conocer algunas de sus aplicaciones.

### **Corriente eléctrica**

Si dos cuerpos de carga igual y opuesta se conectan por medio de un conductor metálico, por ejemplo a un cable, las cargas se neutralizan mutuamente. Esta neutralización se lleva a cabo mediante un flujo de electrones a través del conductor, desde el cuerpo cargado negativamente al cargado positivamente (en

ingeniería eléctrica, se considera por convención que la corriente fluye en sentido opuesto, es decir, de la carga positiva a la negativa). En cualquier sistema continuo de conductores, los electrones fluyen desde el punto de menor potencial hasta el punto de mayor potencial (considérese analogía con flujo de fluidos en donde dos tanques conectados entre sí por una tubería y donde el fluido líquido circulara desde el tanque que tenga mayor nivel de líquido hasta el de menor nivel. Por lo que la diferencia de nivel se considera diferencia de potencial). Un sistema de esa clase se denomina circuito eléctrico. La corriente que circula por un circuito se denomina corriente continua (c.c.) si fluye siempre en el mismo sentido y corriente alterna (c.a.) si fluye alternativamente en uno u otro sentido.

El flujo de una corriente continua está determinado por tres magnitudes relacionadas entre sí. La primera es la diferencia de potencial en el circuito, que en ocasiones se denomina fuerza electromotriz (fem), tensión o voltaje. La segunda es la intensidad de corriente. Esta magnitud se mide en amperios; 1 amperio corresponde al paso de unos  $6.25 \times 10^{18}$  electrones por segundo por una sección determinada del circuito. La tercera magnitud es la resistencia del circuito. Normalmente, todas las sustancias, tanto conductores como aislantes, ofrecen cierta oposición al flujo de una corriente eléctrica, y esta resistencia limita la corriente. La unidad empleada para cuantificar la resistencia es el ohmio ( $\Omega$ ), que se define como la resistencia que limita el flujo de corriente a 1 amperio en un circuito con una fem de 1 voltio. La ley de Ohm, llamada así en honor al físico alemán Georg Simon Ohm, que la descubrió en 1827, permite relacionar la intensidad con la fuerza electromotriz. Se expresa mediante la ecuación  $e = I \times R$ , donde  $e$  es la fuerza electromotriz en voltios,  $I$  es la intensidad en amperios y  $R$  es la resistencia en ohmios. A partir de esta ecuación puede calcularse cualquiera de las tres magnitudes en un circuito.

### **Motores y generadores eléctricos**

Los motores y generadores eléctricos, son una clase de aparatos que se utilizan para convertir la energía mecánica en eléctrica, o a la inversa, con medios electromagnéticos. A una máquina que convierte la energía mecánica en eléctrica se le denomina generador, alternador o dinamo, y a una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica se le denomina motor.

Dos principios físicos relacionados entre sí sirven de base al funcionamiento de los generadores y de los motores. El primero es el principio de la inducción descubierto por el científico e inventor británico Michael Faraday en 1831. Si un conductor se mueve a través de un campo magnético, o si está situado en las proximidades de otro conductor por el que circula una corriente de intensidad variable, se establece o se induce una corriente eléctrica en el primer conductor. El principio opuesto a éste fue observado en 1820 por el físico francés André Marie Ampère. Si una corriente pasa a través de un conductor situado en el interior de un campo magnético, éste ejerce una fuerza mecánica sobre el conductor.

La máquina dinamoeléctrica más sencilla es la dinamo de disco desarrollada por Faraday, que consiste en un disco de cobre que se monta de tal forma que la parte del disco que se encuentra entre el centro y el borde quede situada entre los polos de un imán de herradura. Cuando el disco gira, se induce una corriente entre el centro del disco y su borde debido a la acción del campo del imán. El disco puede fabricarse para funcionar como un motor mediante la aplicación de un voltaje entre el borde y el centro del disco, lo que hace que el disco gire gracias a la fuerza producida por el campo magnético.

El campo magnético de un imán permanente sólo tiene fuerza suficiente como para hacer funcionar un dinamo pequeño o motor. Por ello, los electroimanes se emplean en máquinas grandes. Tanto los motores como los generadores tienen dos unidades básicas: el inductor, que crea el campo magnético y que suele ser un electroimán, y la armadura o inducido, que es la estructura que sostiene los conductores que cortan el campo magnético y transporta la corriente inducida en un generador, o la corriente de excitación en el caso

del motor. La armadura es por lo general un núcleo de hierro laminado, alrededor del cual se enrollan los cables conductores.

### **Generador y motor de corriente continua**

Si una armadura gira entre dos polos magnéticos fijos, la corriente en la armadura circula en un sentido durante la mitad de cada revolución, y en el otro sentido durante la otra mitad. Para producir un flujo constante de corriente en un sentido, o corriente continua, en esta clase de aparatos, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. Esto suele llevarse a cabo mediante una inversión de corriente con un conmutador, que es un anillo de metal partido montado sobre el eje de una armadura. Las dos mitades del anillo se aíslan entre sí y sirven como bornes de la bobina. Las escobillas fijas de metal o de carbón se mantienen en contacto con el conmutador, que al girar conecta eléctricamente la bobina a los cables externos. Cuando la armadura gira, cada escobilla esta en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador, cambiando la posición en el momento en el que la corriente invierte su sentido dentro de la bobina de la armadura. Así se produce un flujo de corriente de un sentido en el circuito exterior al que el generador esta conectado. Los generadores de corriente continua funcionan normalmente a voltajes bastante bajos para evitar las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a voltajes altos. El potencial más alto desarrollado para este tipo de generadores suele ser de 1.500 voltios.

El motor de corriente continua es similar en su construcción al generador y en realidad podría decirse que los motores de corriente continua son generadores de corriente continua que funcionan al revés. Ya que cuando la corriente pasa a través de la armadura de un motor de corriente continua, se genera un par de fuerzas debido a la acción del campo magnético, y por lo tanto la armadura gira. La función del conmutador y la de las conexiones de las bobinas del campo de los motores es exactamente la misma que en los generadores. La revolución de la armadura induce un voltaje en las bobinas de ésta. Este voltaje es opuesto al voltaje exterior que se aplica a la armadura, y de ahí que se conozca como voltaje inducido o fuerza contraelectromotriz. Cuando el motor gira más rápido, el voltaje inducido aumenta hasta que es casi igual al aplicado. La corriente entonces es pequeña, y la velocidad del motor permanecerá constante siempre que el motor no esté bajo carga y tenga que realizar otro trabajo mecánico que no sea el requerido para mover la armadura. Bajo carga, la armadura gira más lentamente, reduciendo el voltaje inducido y permitiendo que fluya una corriente mayor en la armadura.

Debido a que la velocidad de rotación controla el flujo de la corriente en la armadura, deben usarse aparatos especiales para arrancar los motores de corriente continua. Cuando la armadura está parada, ésta no tiene realmente resistencia, y si se aplica el voltaje de funcionamiento normal, se producirá una gran corriente, que podría dañar el conmutador y las bobinas de la armadura. El medio normal de prevenir estos daños es el uso de una resistencia de encendido conectada en serie a la armadura, para disminuir la corriente antes de que el motor consiga desarrollar el voltaje inducido adecuado. Cuando el motor acelera, la resistencia se reduce gradualmente.

La velocidad a la que funciona un motor depende de la intensidad del campo magnético que actúa sobre la armadura, así como de la corriente de ésta. Cuanto más fuerte es el campo, más bajo es el grado de rotación necesario para generar un voltaje inducido lo bastante grande como para contrarrestar el voltaje aplicado. Por esta razón, la velocidad de los motores de corriente continua puede controlarse mediante la variación de la corriente del campo.

## Generador (alternador) y motor de corriente alterna

Un generador simple sin conmutador producirá una corriente eléctrica que cambia de sentido a medida que gira la armadura y los cables del enrollado de la bobina cortan el campo magnético. Esta clase de corriente se le denomina alterna, ya que cambia de sentido cada media revolución y su valor va desde cero hasta su máximo. Este tipo de corriente alterna es ventajosa para la transmisión de potencia eléctrica, por lo que la mayoría de los generadores eléctricos son de este tipo. A veces, es preferible generar un voltaje tan alto como sea posible. Las armaduras rotatorias no son prácticas en este tipo de aplicaciones, debido a que pueden producirse chispas entre las escobillas y los anillos colectores, y a que pueden producirse fallos mecánicos que podrían causar cortocircuitos. Por tanto, los alternadores se construyen con una armadura fija en la que gira un rotor compuesto de un número de imanes de campo. El principio de funcionamiento es el mismo que el del generador de corriente alterna, excepto en que el campo magnético (en lugar de los conductores de la armadura) está en movimiento.

La corriente que se genera mediante estos alternadores aumenta hasta un pico, cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube otra vez a cero varias veces por segundo, dependiendo de la frecuencia para la que esté diseñada la máquina. Este tipo de corriente se conoce como corriente alterna monofásica. Sin embargo, si la armadura la componen dos bobinas, montadas a  $90^\circ$  una de otra, y con conexiones externas separadas, se producirán dos ondas de corriente, una de las cuales estará en su máximo cuando la otra sea cero. Este tipo de corriente se denomina corriente alterna bifásica. Si se agrupan tres bobinas de armadura en ángulos de  $120^\circ$ , se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica. Se puede obtener un número mayor de fases incrementando el número de bobinas en la armadura, pero en la práctica de la ingeniería eléctrica moderna se usa sobre todo la corriente alterna trifásica, con el alternador trifásico, que es la máquina dinamoeléctrica que se emplea normalmente para generar potencia eléctrica.

En lo que respecta a motores de corriente alterna existen dos tipos básicos de motores para funcionar con corriente alterna polifásica: los motores síncronos y los motores de inducción. El motor síncrono es en esencia un alternador trifásico que funciona a la inversa. Los imanes del campo se montan sobre un rotor y se excitan mediante corriente continua, y las bobinas de la armadura están divididas en tres partes y alimentadas con corriente alterna trifásica. La variación de las tres ondas de corriente en la armadura provoca una reacción magnética variable con los polos de los imanes del campo, y hace que el campo gire a una velocidad constante, que se determina por la frecuencia de la corriente en la línea de potencia de corriente alterna.

Por su parte, el más simple de todos los tipos de motores eléctricos es el motor de inducción de caja de ardilla que se usa con alimentación trifásica. La armadura de este tipo de motor consiste en tres bobinas fijas y es similar a la del motor síncrono. El elemento rotatorio consiste en un núcleo, en el que se incluye una serie de conductores de gran capacidad colocados en círculo alrededor del árbol y paralelos a él. Cuando no tienen núcleo, los conductores del rotor se parecen en su forma a las jaulas cilíndricas que se usaban para las ardillas. El flujo de la corriente trifásica dentro de las bobinas de la armadura fija genera un campo magnético rotatorio, y éste induce una corriente en los conductores de la jaula. La reacción magnética entre el campo rotatorio y los conductores del rotor que transportan la corriente hace que éste gire. Si el rotor da vueltas exactamente a la misma velocidad que el campo magnético, no habrá en él corrientes inducidas, y, por tanto, el rotor no debería girar a una velocidad síncrona. En funcionamiento, la velocidad de rotación del rotor y la del campo difieren entre sí de un 2 a un 5%. Esta diferencia de velocidad se conoce como caída.

Una vez entendido el funcionamiento de los dispositivos de corriente continua y alterna es posible que hablemos entonces de los tacómetros eléctricos, ya que basan su principio de funcionamiento en los mecanismos antes descritos.

Se distinguen tres tipos de tacómetros eléctricos, los cuales son:

- Tacómetro de corrientes parásitas
- Tacómetro de corriente continua
- Tacómetro de corriente alterna
- Tacómetro de frecuencia

### Tacómetro de corrientes parásitas

Con el tacómetro de corrientes parásitas (fig. 2.72) el eje de la maquina se hace girar dentro de una copa de aluminio. El giro del imán produce corrientes parásitas (corriente inducida en el cuerpo de una masa conductora por variación del flujo magnético) en el aluminio, creándose un par resistente proporcional a la velocidad. Un resorte frena el cabezal de aluminio quedando este en una posición que señala en un dial. Este es el funcionamiento del tacómetro eléctrico empleado en el automóvil.

Su diseño es sencillo y su campo de medida es de aproximadamente de 0-15,000 revoluciones por minuto.

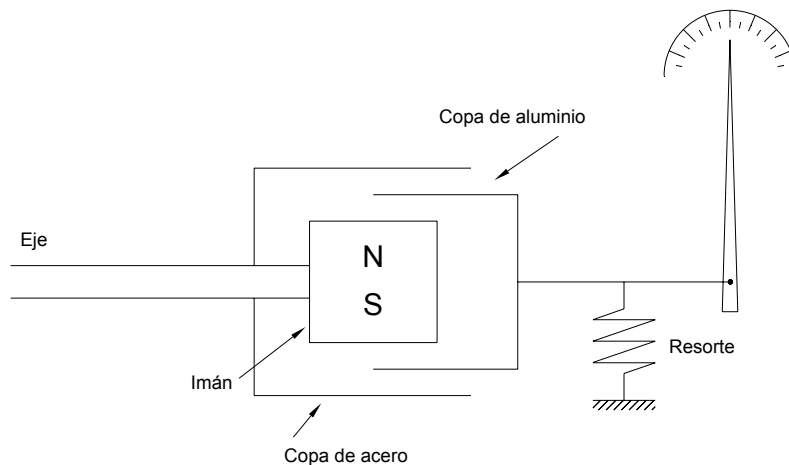


Fig. 2.72 Tacómetro eléctrico de corrientes parásitas.

### Tacómetro de corriente continua y alterna (AC/DC)

Un generador rotacional produce una señal de voltaje (DC) proporcional a la velocidad rotacional de la flecha de entrada. Un generador de corriente directa produce un nivel de voltaje proporcional a la velocidad, como se muestra en la figura 2.73. Un generador de corriente alterna produce una salida de voltaje (AC) con una frecuencia proporcional a la velocidad rotacional como se muestra en la figura 2.74. En un motor sencillo de dos fases, el voltaje (AC) se aplica a una fase del motor y la medición se toma en la otra. Las frecuencias típicas de operación son 60 Hz y 400 Hz. Esta frecuencia de la onda portadora debería ser de cinco a diez veces la respuesta de frecuencia requerida del tacómetro generador (AC).



La dirección del viaje es determinada por la fase de la señal con dirección opuesta y estando  $180^\circ$  fuera de fase. El generador básico de corriente directa (DC) se muestra en la fig. 2.75.

Tanto para el tacómetro de corriente continua, como para el de corriente alterna, la tensión eléctrica que se genera es proporcional a la velocidad en r.p.m. del eje de rotación. Mediante un voltímetro puede conocerse cual es la tensión generada, o alimentar esta tensión a un instrumento potenciométrico a través de una resistencia divisora de tensión.

La precisión alcanza por esta clase de tacómetros es de  $\pm 0.5\%$  para velocidades que llegan hasta los 6,000 r.p.m.

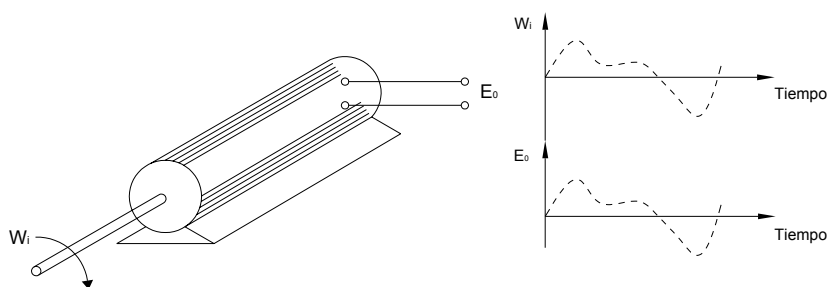


Fig. 2.73 Generador de corriente directa.

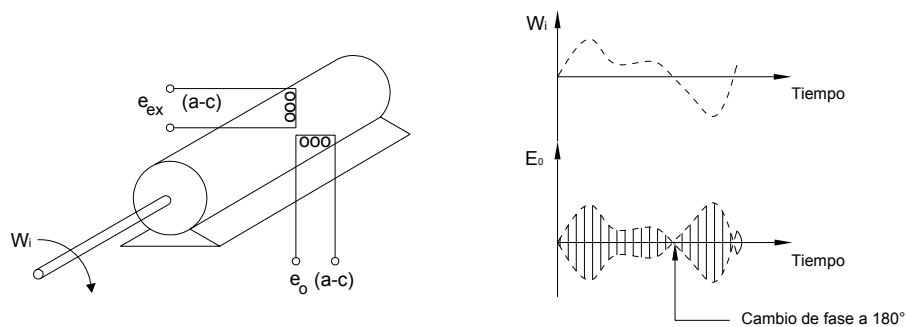


Fig. 2.74 Generador de corriente alterna.

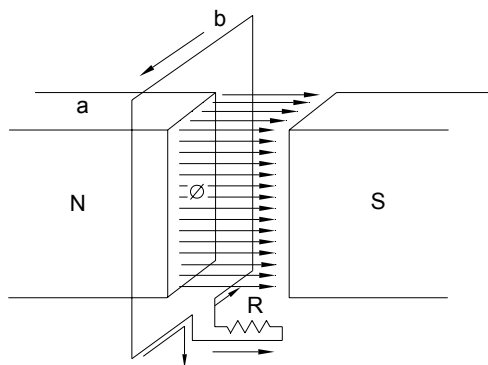


Fig. 2.75 Generador básico de corriente directa.

## Tacómetro de frecuencia

Mediante una técnica de medición de velocidad angular que utiliza pulsos generados por interacción electromecánica se puede diseñar esta clase de aparatos. Esto se realiza mediante un convertidor pulso-voltaje que entrega una salida de voltaje proporcional a la velocidad.

A través de imanes rotacionales que son sensores de velocidad, convierten el movimiento mecánico a voltaje (AC) sin una fuente externa de poder. Estos sensores producen un campo magnético que, cuando están en la proximidad de objetos ferrosos en movimiento, genera un voltaje.

Cuando un sensor magnético se monta en la proximidad de un objeto ferroso, como un diente de engrane en una flecha que gira, la frecuencia de la salida del voltaje es directamente proporcional a la velocidad rotacional del objeto. Un convertidor frecuencia-voltaje puede entonces convertir la señal a voltaje. Una unidad de conversión de voltaje a velocidad proporciona entonces la medición de velocidad.

Algunas aplicaciones típicas para los tacómetros de corriente directa, alterna y de frecuencia son la medición de r.p.m. de un motor, medición de sobre/baja velocidad, medición de velocidad de llantas, medición de velocidad de la flecha de una bomba y también se puede retroalimentar la señal para efectos de control.

## Otras técnicas de medición de velocidad

Aunque su aplicación no es de uso común en la industria, es importante también mencionar que existen otras técnicas de medición de velocidad, de entre ellas se destacan las siguientes:

### Método de interferencia de luz

Se pueden realizar mediciones de velocidad utilizando principios de interferencia de luz. La figura 2.76 muestra el fenómeno de la interferencia de luz. Un haz de luz monocromática se divide en dos. Uno de ellos se dirige a un espejo estacionario. El otro haz se dirige hacia un objetivo móvil. El observador ve la superposición de los haces de luz. A medida que el espejo se mueve en una dirección, la suma de las ondas de los dos rayos se reforzará y cancelarán entre ellas alternativamente. La cantidad de movimiento para un ciclo de variación de intensidad de luz es la longitud de onda de la luz utilizada. La frecuencia de estas transiciones de luz a oscuridad es proporcional a la velocidad del objeto móvil. Con las técnicas de interferometría se pueden alcanzar mediciones de alta exactitud.

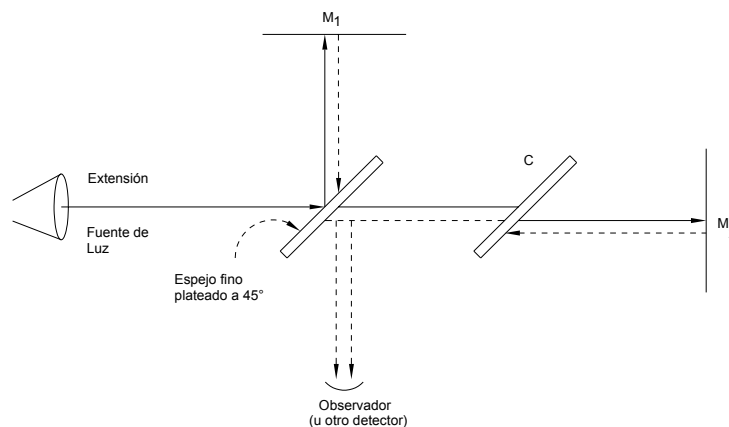


Fig. 2.76 Componentes básicos de un interferómetro.

## Sensor óptico

Los métodos ópticos para detección de velocidad angular emplean un emisor de luz y un detector de luz. Un diodo emisor de luz (LED) emparejado con un diodo sensitivo a la luz es el arreglo más común.

Se coloca un disco ranurado en el eje de una flecha giratoria. Cada ranura o hendidura permite el paso de la luz a través del disco. La figura 2.77 muestra un arreglo típico. El detector generará un tren de pulsos con una velocidad proporcional a la velocidad angular, es decir a la velocidad de giro.

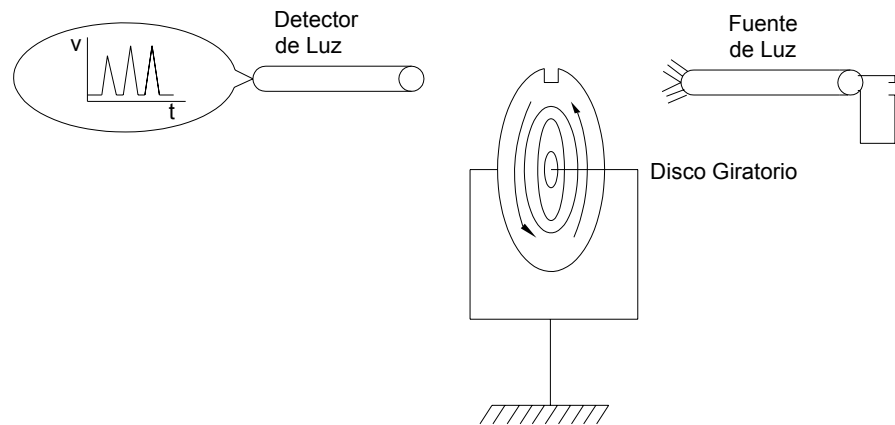


Fig. 2.77 Arreglo típico para sensor óptico.

## Efecto Wiegand

Este efecto es utilizado para medición de proximidad, tacometría, codificación de flechas rotatorias, y detección de velocidad en aplicaciones tales como sistemas remotos de medición, medición de velocidad de flecha, tacómetros, velocímetros, y otros dispositivos contadores.

La tecnología del efecto Wiegand emplea las propiedades magnéticas únicas del alambre ferromagnético de pequeño diámetro especialmente procesado. Causando que el campo magnético de este cable se revierta repentinamente se puede generar un pulso de voltaje uniforme. Este pulso es referido como el pulso Wiegand. Los sensores que utilizan este efecto requieren sólo unos pocos componentes sencillos para producir estos pulsos bien definidos de voltaje en respuesta a cambios en el campo magnético aplicado. Estos sensores consisten de un cable Wiegand de longitud corta, una bobina sensora, y campos magnéticos que alternan los cuales son generalmente derivados de pequeños imanes permanentes.

## Giroscopio

Un giroscopio mecánico es un dispositivo que consiste de una masa rotatoria, típicamente un disco o rueda, montada en una base de tal manera que su eje puede girar libremente en una o más direcciones y por lo tanto mantener su orientación independientemente de cualquier movimiento de la base. Es importante hacer una distinción inicial entre los giroscopios de velocidad angular y los integradores. Los de velocidad angular son utilizados para medir movimiento y como señales de entrada a sistemas de estabilización. Los de integración son utilizados como la base para sistemas de navegación de alta exactitud. Estos permiten a una plataforma estable mantener una posición fija con referencia.

El sensor de cambio angular más característico es el giroscopio que funciona bajo el principio del efecto MHD (magnetohidrodinámico). Éste sensor se utiliza para medir vibraciones angulares en el rango de frecuencias de 1 Hz a 1000 Hz. El principio de operación se muestra en la figura 2.78. Un imán permanente se adhiere a la cubierta exterior del sensor, dentro del mismo hay un fluido conductor. Cuando la cubierta gira, se produce un campo magnético móvil. El movimiento creado produce un voltaje proporcional a la velocidad relativa.

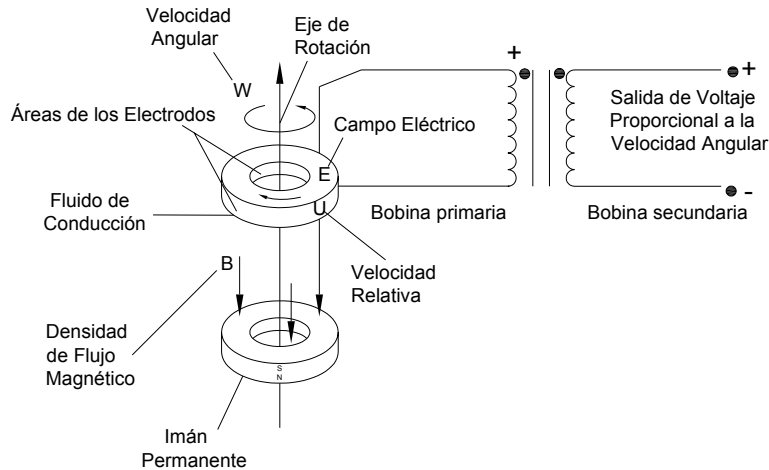


Fig. 2.78 Principio de operación del efecto MHD.

La tabla 2.19 muestra algunas características principales de los medidores de velocidad estudiados con anterioridad.

| Instrumento                       | Precisión (%) | Campo de medida                   | Ventajas  | Desventajas  |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---|--|
| Tacómetro mecánico                | $\pm 1$       | 0-40,000 r.p.m.                   | -Sencillo<br>-Señal de salida proporcional a la velocidad   | -No permite conversión directa de la señal<br>-Requiere medición conjunta del tiempo |
| Tacómetro de corrientes parásitas | $\pm 0.5$     | 0-15,000 r.p.m.                   | -Sencillo<br>-Permite conversión directa de la señal<br>-Uso de transductor de señal analógica o digital como convertidor de la velocidad de giro<br>-Señal de salida proporcional a la velocidad | -Puede verse afectado por campos electromagnéticos externos                          |
| Tacómetro de c.c.                 | $\pm 0.5$     | 0-6,000 r.p.m.                    | -Sencillo<br>-Permite conversión directa de la señal<br>-Uso de transductor de señal analógica o digital como convertidor de la velocidad de giro<br>-Señal de salida proporcional a la velocidad | -Puede verse afectado por campos electromagnéticos externos                          |
| Tacómetro de c.a.                 | $\pm 0.5$     | 0-6,000 r.p.m.                    | -Sencillo<br>-Permite conversión directa de la señal<br>-Uso de transductor de señal analógica o digital como convertidor de la velocidad de giro<br>-Señal de salida proporcional a la velocidad | -Puede verse afectado por campos electromagnéticos externos                          |
| Tacómetro de frecuencia           | $\pm 0.1$     | Limitado al dispositivo de medida | -Idem anterior, además:<br>-Sin contacto mecánico con el eje<br>-Muy preciso  | -Puede verse afectado por campos electromagnéticos externos                          |

Tabla 2.19 Instrumentos de medición de velocidad.

## 2.41.2 Medición de densidad y peso específico

La densidad es una parte significativa de la medición e instrumentación. Las mediciones de densidad se realizan por al menos dos razones importantes, una de ellas es para la determinación de masa y volumen de productos y la segunda es para determinar la calidad del producto. En muchas aplicaciones industriales, la medición de la densidad asegura el valor del producto.

Por definición, la densidad se define como la masa de un cuerpo por unidad de volumen, cuya expresión resulta en una relación básica:

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

En donde las unidades respectivas normalmente se expresan en  $\text{g/cm}^3$  o en  $\text{kg/cm}^3$ . Debido a que la densidad varía considerablemente con la presión y la temperatura en los gases, se especifica por lo tanto un valor base de la temperatura que en los líquidos es de  $0^\circ\text{C}$  ó  $15^\circ\text{C}$  y en los gases y vapores de  $0^\circ\text{C}$  para un valor estándar de presión de 1 atmósfera.

El peso específico, por su parte, se define como el peso de una sustancia por unidad de volumen; por lo tanto, si el peso se define como  $\text{Peso} = \text{masa} \times \text{aceleración de la gravedad}$  y la densidad =  $\text{masa}/\text{unidad de volumen}$ , entonces el peso específico se definirá como:

$\text{Peso específico} = (\text{densidad}) (\text{aceleración de la gravedad})$ ; por esta razón, la medición de la densidad infiere indirectamente conocer el peso específico de una sustancia.

### Densidad relativa

La densidad relativa de una sustancia es determinada mediante la relación entre la densidad de la sustancia de interés y la densidad de una sustancia estándar a determinadas condiciones. Esta relación es lógicamente adimensional y se le conoce también como gravedad específica SG (Specific Gravity).

La gravedad específica (densidad relativa) de líquidos, gases y vapores (la relación que se establece para los gases es la misma para los vapores) bajo condiciones de referencia están dadas por:

$$SG_{\text{liq}} = \frac{\text{densidad del líquido de interés; @ } 0^\circ\text{C ó } 15^\circ\text{C}}{\text{densidad del agua; @ } 4^\circ\text{C}}$$

$$SG_{\text{gas}} = \frac{\text{densidad del gas de interés}}{\text{densidad del aire}} ; @ 0^\circ\text{C y 1 atm.}$$

En los líquidos debido a que la densidad del agua a  $4^\circ\text{C}$  (se toma de referencia a  $4^\circ\text{C}$  porque es cuando el valor de la densidad del agua fase líquida es máximo en el intervalo de  $0\text{-}100^\circ\text{C}$ :  $1 \text{ g/cm}^3$ ) es de  $1 \text{ g/cm}^3$ , la densidad del líquido de interés (expresada también en  $\text{g/cm}^3$ ) y su densidad relativa (o gravedad específica), son numéricamente igual. Lo que equivale a decir que la densidad de un líquido de interés expresada en  $\text{g/cm}^3$  es igual a su densidad relativa adimensional.

Por ello en líquidos, se puede hablar de una densidad a un valor de referencia (0 °C ó 15 °C) y hablar a la vez del mismo valor numérico en densidad relativa al mismo valor de referencia.

Las condiciones de referencia de 0 °C y 1 atm de presión son conocidas como condiciones normales de operación (temperatura y presión normal, TPN); también son conocidas y empleadas otras condiciones de operación, las cuales son de 60 °F (15 °C) y 1 atm de presión, las cuales se les llama condiciones estándar de operación (temperatura y presión estándar, TPS).

De lo anterior es muy importante destacar que la medición de la densidad es estandarizada bajo condiciones de referencia, y como también es el caso de la medición de otras variables de proceso, existe más de una técnica para la medición de la densidad.

Algunas otras unidades de medida de densidad estándar que es importante conocer dada su amplia aplicación son las siguientes:

$$\text{Grados API} = \frac{141.5}{\text{densidad relativa a } 15^{\circ}\text{C}} - 131.5$$

Los grados API son un estándar reconocido por el American Petroleum Institute y es una medida empleada en productos del petróleo.

$$\text{Grados Baumé} = \frac{140}{\text{densidad relativa a } 15^{\circ}\text{C}} - 130 \quad (\text{Para líquidos más ligeros que el agua})$$

$$\text{Grados Baumé} = 145 - \frac{145}{\text{densidad relativa a } 15^{\circ}\text{C}} \quad (\text{Para líquidos más pesados que el agua})$$

Los grados Baumé son empleados en ácidos, jarabes, etc.

Finalmente están los Grados Brix, estos son empleados exclusivamente en la industria azucarera y representan el porcentaje de peso de azúcar en solución a 17.5 °C.

## Densidad de sólidos

La determinación de la densidad de un sólido es algo relativamente simple. Una vez que el volumen del sólido y su masa son conocidos, la densidad puede ser conocida empleando la definición:

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Sin embargo, en muchas aplicaciones los sólidos tienen diferentes constituyentes y son hechos de diferentes materiales con diferentes densidades. Sus volúmenes también pueden cambiar frecuentemente. En estos casos se emplean métodos más sofisticados conocidos como dinámicos, tales como del tipo de absorción radiactiva, ultrasonidos, etc., de los cuales se hablarán más adelante.

## Densidad de fluidos

Los fluidos pueden ser divididos en líquidos y gases. La medición de densidad de fluidos es mucho más compleja que para los sólidos. En este caso, se requieren muchas técnicas diferentes. Esto es principalmente debido a la complejidad en los procesos, variación de las densidades de los fluidos bajo diferentes condiciones de operación (los gases principalmente varían su densidad al cambiar las condiciones de operación de presión y temperatura), diversas características de los procesos y las propiedades mismas de los fluidos. Algunos de estos métodos son específicamente diseñados y aplicables únicamente para casos especiales. Otros son muy similares en principio y tecnología, además de ser aplicables a muchos y diferentes tipos de fluidos.

Dependiendo de la aplicación, la densidad de los fluidos puede ser medida ya sea en forma estática o en forma dinámica. En general, las mediciones de densidad estática para los fluidos están bien desarrolladas, son precisas y tienen mucha mayor resolución que la mayoría de las técnicas dinámicas. Los picnómetros y los areómetros son ejemplos de técnicas estáticas que pueden ser adaptadas para cubrir rangos pequeños de densidad con una alta resolución y exactitud. En general las mediciones de tipo estático se emplean en condiciones de laboratorio, y las mediciones de tipo dinámico se emplean para mediciones en tiempo real en donde las propiedades de los fluidos varían en el tiempo.

En muchas aplicaciones modernas, las densidades de los productos se obtienen mediante técnicas de muestreo. En las mediciones, existen dos conceptos básicos: mediciones de densidad estática y mediciones dinámicas de densidad (en línea). Dentro de cada concepto existen diversos métodos diferentes empleados. Estos métodos se basan en diferentes principios físicos. En muchos casos la misma aplicación y las características del proceso determinan el método más adecuado a ser utilizado. Generalmente los métodos estáticos están bien desarrollados, son bajos en costo, y son más exactos. Los muestreadores en línea (dinámicos) son caros, altamente automatizados, y usan por lo general dispositivos de procesamiento de señal basados en microprocesador. De cualquier modo, en la actualidad, existen métodos estáticos que también son computarizados, ofreciendo así facilidad de uso, flexibilidad, y características de autocalibración.

Por ello no se estudiarán los dispositivos de medición de densidad en base a su capacidad tecnológica, estableciendo la diferencia entre instrumentos estáticos o dinámicos, ya que esto sólo se refiere a si el dispositivo es externo al proceso (medición realizada en laboratorio) o si el dispositivo es parte del proceso (medición en línea), lo cual en todos los casos dependerá de la automatización del proceso, no cambiando el método en si mismo, si no la posibilidad de hacerlo estático o dinámico en el proceso.

Los instrumentos y métodos de medición de densidad que actualmente son empleados en la industria son los siguientes:

- Picnómetro
- Hidrómetro (areómetro)
- Presión diferencial (densímetro tipo columna)
- Método de desplazamiento
- Medidores inerciales (densímetros de elemento vibratorio)
- Medidor de Coriolis
- Densímetro tipo balanza
- Método de punto de ebullición
- Refractómetro
- Medidor radiactivo
- Densímetros de absorción

## Picnómetro

El picnómetro es un dispositivo que es fabricado como contenedor de volumen fijo que puede ser llenado con el líquido a medir. La densidad del fluido se mide mediante la pesada de la muestra. La versión más simple consiste de un contenedor en la forma de una botella con una tapa que contiene un hoyo de tubo capilar, como se muestra en la figura 2.79. El capilar se utiliza para determinar el volumen exacto de líquido, por lo tanto otorga alta resolución cuando se llena el picnómetro. La botella primero se pesa vacía, y luego con agua destilada para determinar el volumen de la misma. Entonces la botella se llena con el fluido de proceso y se pesa una vez más. La densidad se determina mediante la división de la masa por el volumen. La gravedad específica del líquido se encuentra mediante la relación de la masa del fluido con respecto a la masa del agua. Cuando se utilizan los picnómetros, para tener una buena exactitud en la medición, se debe tener un gran cuidado durante las mediciones; esto es, la botella debe ser limpiada después de cada medición, la temperatura debe de ser mantenida constante, y se deben de utilizar balanzas de precisión.

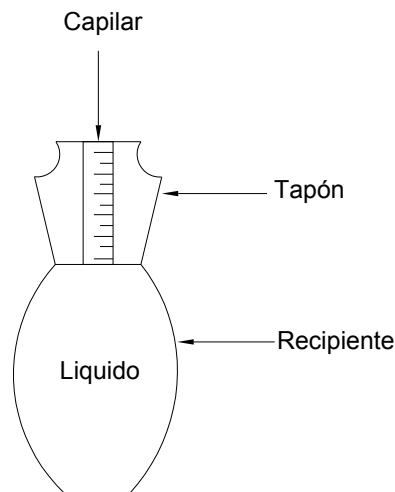


Fig. 2.79 Picnómetro.

Los picnómetros tienen que ser ligeros en peso, lo suficientemente fuertes para contener muestras, y necesitan no ser magnéticos para eliminar posibles efectos en la exactitud de la pesada. Se deben de utilizar balanzas de muy alta resolución para detectar las diferencias pequeñas en los pesos de gases y líquidos.

Aún cuando la mayoría de los picnómetros están fabricados en vidrio, estos también están hechos de metal para dar la suficiente fuerza para la medición de densidad de gases y líquidos a presiones extremadamente altas. En muchos casos, los picnómetros de metal son necesarios para tomar muestras en la línea de algunos procesos.

Los picnómetros tienen ventajas y desventajas. Las ventajas son que si estos son utilizados en forma correcta, son exactos; y pueden ser utilizados tanto para densidad como para medición de gravedad específica. Las desventajas incluyen lo siguiente:



- 1) Se debe tener mucho cuidado para resultados exactos.
- 2) La muestra debe ser tomada fuera de línea, con los consecuentes retrasos en el tiempo. Esto crea problemas para relacionar las muestras con el material que existe en el proceso en tiempo real.
- 3) Los picnómetros de alta precisión son caros. Estos requieren balanzas para pesar de alta precisión y condiciones controladas de laboratorio. Se deben de utilizar técnicas especializadas para tomar muestras en procesos presurizados y condiciones hostiles, tales como instalaciones en alta mar.
- 4) El buen desempeño de estos depende de la habilidad del operador.

### **Hidrómetro (areómetro)**

Los hidrómetros son los dispositivos mayormente utilizados para la medición de densidades de líquidos. Son tan comúnmente utilizados que sus especificaciones y procedimientos de uso se describen mediante normas nacionales e internacionales, tal como la ISO 387. El principio de flotación se utiliza como la principal técnica de operación, ya que los hidrómetros consisten en un flotador con lastre en su parte inferior y un vástago superior graduado. El volumen de una masa fija se convierte en una distancia lineal mediante un tubo en forma de bulbo sellado el cual contiene un tallo largo con una escala de medición, como se muestra en la figura 2.80. El bulbo está balastrado con grano de plomo y brea, cuya masa depende del rango de densidad del líquido a ser determinado. El bulbo simplemente se coloca dentro del líquido y la densidad se toma desde la escala, debido a que el instrumento se sumerge hasta que su peso se equilibra con el líquido que desaloja y se de hunde de forma inversamente proporcional a la densidad del líquido. La escala se gradúa en unidades de densidad tales como kilogramo por metro cúbico. Sin embargo, los fabricantes ofrecen una gran alternativa de escalas, tales como la gravedad específica, la gravedad API, los grados Brix, etc.

La transmisión a distancia de la densidad es posible si se incorpora un transductor de inductancia variable con la armadura fija en la parte inferior del flotador y con una bobina dispuesta al exterior del recipiente para transmitir eléctricamente.

Otra técnica consiste en colocar el hidrómetro con un flotador lastrado con una cadena y sujeta a un punto fijo del recipiente. El flotador se sumerge por completo dentro del líquido y se sumergirá más de acuerdo a la densidad del líquido haciendo que el peso efectivo de la cadena varíe proporcionalmente a esto. En el vástago del hidrómetro se acopla un transductor de movimiento que es por lo general un transformador diferencial. Al moverse el flotador, excita al transformador diferencial y genera una señal de corriente que es proporcional a la posición del flotador. Esta clase de instrumento también se le conoce como flotador balanceado por cadena, del cual se hablara con mayor detalle más adelante.

Estos dispositivos pueden considerarse como transmisores electrónicos de densidad que pueden ser instalados en el recipiente dando resultados buenos siempre y cuando el nivel del líquido permanezca constante, ya que en caso contrario será necesario considerar un diseño del recipiente con rebosadero.

Los hidrómetros pueden ser calibrados para diferentes rangos de tensión superficial y temperaturas y se pueden realizar correcciones por temperatura para las temperaturas tales como 15 °C, 20 °C, o 25 °C. La ISO 387 cubre un rango de densidades de 600 kg/m<sup>3</sup> a 2000 kg/m<sup>3</sup>.

La precisión de estos instrumentos es de  $\pm 1\%$  a  $\pm 3\%$ , para presiones y temperaturas máximas de servicio de 6-8 bar y 120-230 °C respectivamente.

Las viscosidades inferiores a 50 centipoises no influyen en la lectura; cuando la viscosidad es superior o con flujos altos es conveniente trabajar con un caudal intermitente para así captar la posición del flotador durante los periodos que pueden considerarse de flujo nulo.

El rango de medida de densidad relativa es de 0.5 a 4, disponen de compensación de temperatura y son adecuados para la medición de densidad de fluidos limpios.

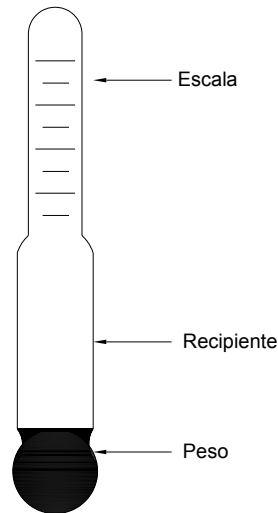


Fig. 2.80 Hidrómetro.

Las ventajas y desventajas de los hidrómetros pueden resumirse de la siguiente forma:

| Ventajas  | Desventajas  |
|---|--|
| Costo relativamente bajo y facilidad de uso.  | Alcance pequeño; por lo tanto, se requiere más de un hidrómetro para cubrir un rango significativo.  |
| Baja resolución para rangos pequeños.   | Son fabricados en vidrio y por lo tanto son frágiles. Las versiones en metal y plástico no son tan exactas para una técnica estática.  |
| Trazabilidad a estándares nacionales e internacionales.   | Cuando el fluido es una muestra fuera de línea no representa las condiciones exactas del proceso. Existen hidrómetros de presión para hidrocarburos de baja presión, pero esto adiciona la necesidad de determinar la presión en forma exacta. |
| En el caso del transmisor: compensación por temperatura, señal protocolizada, autodiagnóstico y mayor precisión en la medida. | Necesidad de fluidos limpios.  |

### Método de presión diferencial (densímetros del tipo columna)

Existen diferentes versiones de métodos de columnas. Como un ejemplo típico en la figura 2.81 se ilustra el método de columna. Se utiliza una columna conocida de líquido de muestra y agua de los respectivos tubos burbujeadores. Un dispositivo de medición de presión diferencial compara las diferencias de presión, proporcionales a las densidades relativas del líquido y el agua. Variando la profundidad de inmersión de los tubos, se puede mantener un amplio rango de mediciones. Ambas columnas deben ser mantenidas a la misma temperatura para evitar la necesidad de correcciones por los efectos en la temperatura.

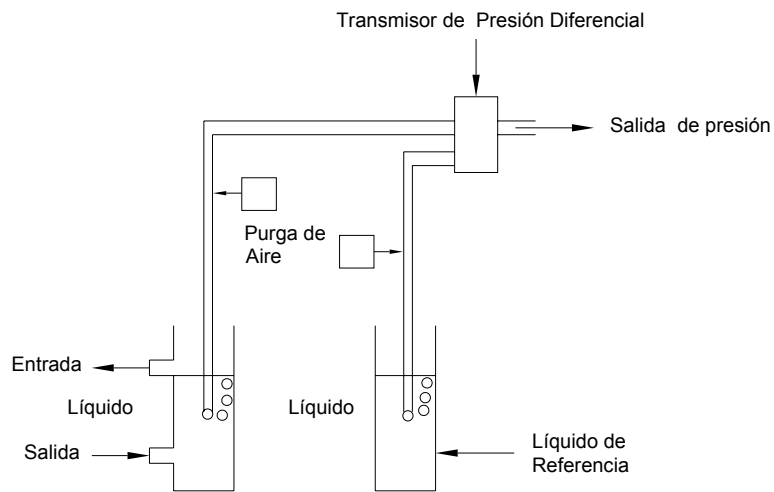


Fig. 2.81 Densímetro de columna de referencia.

Una forma simple y más ampliamente utilizada para la medición de densidades se logra mediante la instalación de dos tubos de burbuja, como se ilustra en la figura 2.82. Los tubos se colocan en el fluido de muestra de tal forma que el extremo de un tubo es más alto que el del otro. La presión requerida para burbujear aire dentro del fluido de ambos tubos es igual a la presión del fluido al extremo de los tubos de burbujeo. La salida de un tubo mayor a la del otro y las distancias entre ellas se fijan. De ahí, la diferencia de presión es igual al peso de la columna de líquido entre los extremos. Por lo tanto, la medición de presión diferencial es equivalente al peso de volumen constante de líquido, y se pueden realizar calibraciones para tener una relación directa con la densidad del líquido. Estos métodos son exactos dentro de 0.1% al 1% de gravedad específica. Debe ser utilizado con líquidos que no cristalizan o se asientan en la cámara de medición durante la medición.

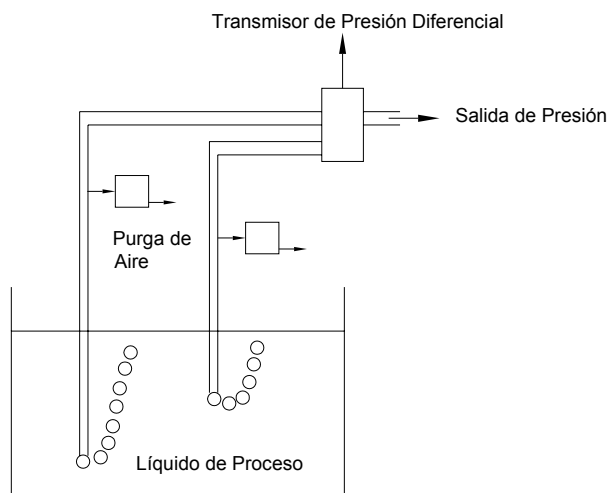
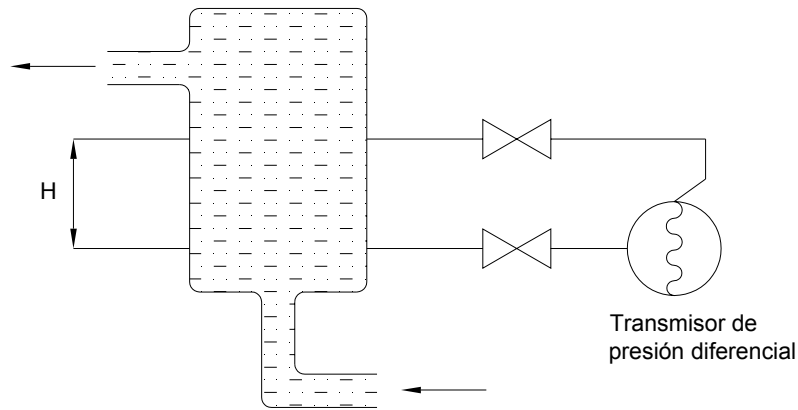


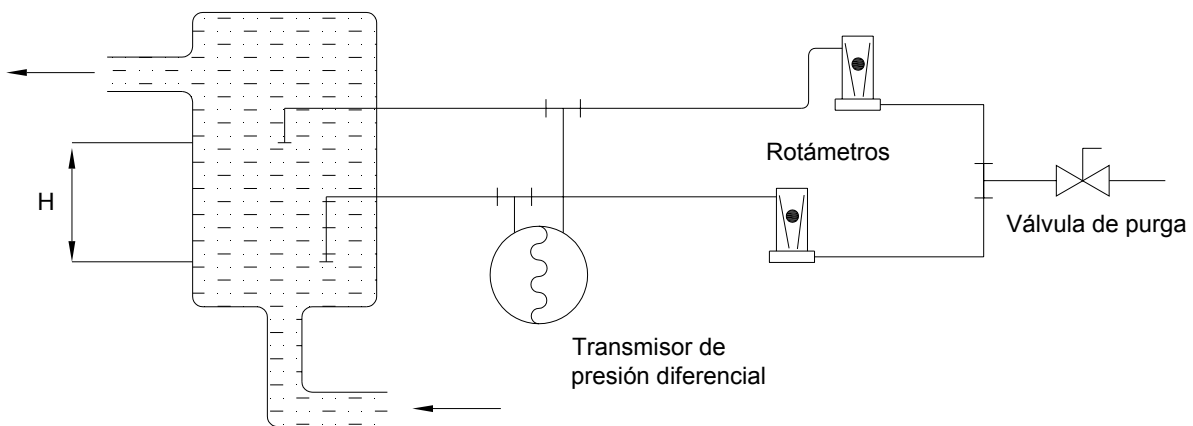
Fig. 2.82 Densímetro de columna de dos tubos.

La instalación también puede ser como se muestra en la figura 2.83 (a) en donde se fijan dos puntos en el tanque y se les conecta un instrumento de presión diferencial. Debido a que la diferencia de alturas es fija, la única variable que altera la presión diferencial es la densidad.

En el caso de que el fluido sea un poco sucio, muy viscoso o corrosivo, existe el riesgo de que las conexiones al instrumento de presión se obturen o se destruyan. En tal caso es recomendable una instalación con válvula de purga como se muestra en la figura 2.83 (b).



(a)



(b)

Fig. 2.83 Instalación típica para medición de densidad en tanques de proceso por presión diferencial (a), misma instalación provista con purga (b).

Estos instrumentos tienen una precisión de 0.5 a 1 % y pueden trabajar con presiones de hasta 300 bar y temperaturas de 170°C aproximadamente.

Al emplear esta técnica, es importante resaltar es que el nivel del líquido del cual se desea conocer su densidad debe de permanecer constante en el recipiente o tanque.

## Método de desplazamiento

El método de desplazamiento (ver fig. 2.84), consiste en un instrumento de desplazamiento o barra de torsión parecido al empleado en la medición de nivel de líquidos (la técnica es la misma en la utilizada en la medición de nivel de líquidos por desplazador). El flotador está totalmente sumergido en el líquido y está equilibrado exteriormente para que el par de torsión desarrollado represente directamente la densidad del líquido.

Con este método la precisión obtenida es de  $\pm 1\%$  con una amplitud de medida de densidad que puede llegar hasta los 0.005. La presión máxima de trabajo puede ser de hasta los  $40 \text{ kg/cm}^2$  y la temperatura máxima de operación de hasta los  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . El sistema es adecuado en líquidos limpios no siendo recomendable cuando el líquido es pegajoso o contiene sólidos en suspensión, ya que pueden adherirse al flotador y falsear la medida.

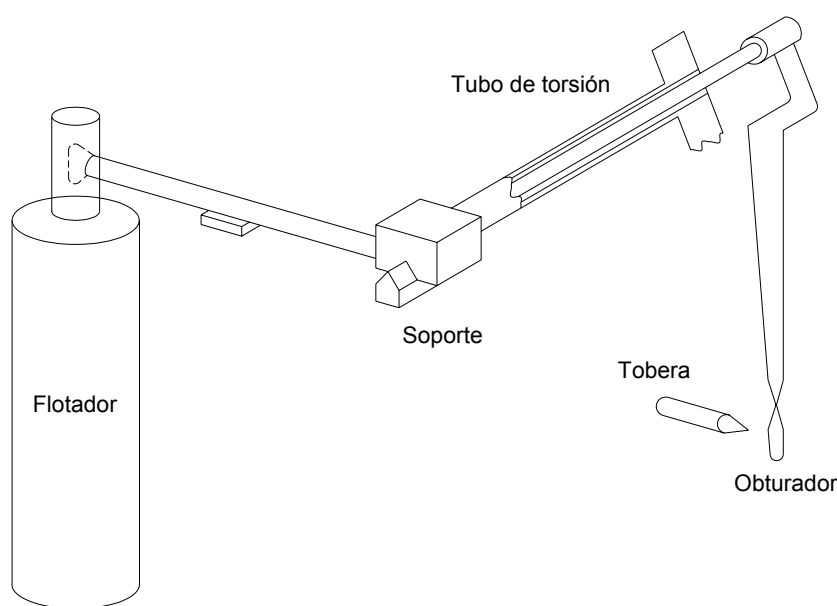


Fig. 2.84 Medición de densidad de líquidos por desplazamiento.

## Medidores inerciales (densímetros de elemento vibratorio)

Esta clase de medidor se basa en aprovechar la variación de la masa inercial (el significado de masa y de masa inercial es el mismo; ya que la masa es también una medida de la inercia que tiene un cuerpo, es decir, la resistencia del cuerpo a cambiar su movimiento; por ello se habla de masa inercial cuando esta se relaciona con su movimiento de acuerdo a la segunda ley de Newton, la cual dice que cuanto mayor es esa masa, menor es la aceleración que adquiere cuando se aplica una fuerza determinada sobre el cuerpo) de una masa inmersa en un fluido al entrar la misma en vibración dentro de una cámara de volumen constante. Las variaciones de la densidad del fluido contribuyen a una carga inercial de la masa, variando por lo tanto su masa efectiva. Dado que la frecuencia natural (la frecuencia natural es aquella en la que un sistema vibraría si se desvía de su posición de equilibrio y se deja mover libremente) de un elemento depende de su masa efectiva, en consecuencia, midiendo la frecuencia natural o resonancia de la masa inmersa, se tendrá una medida correlacionada de la densidad del fluido, la cual deberá ajustarse por temperatura.

Por ello, si un cuerpo que contiene o que está rodeado por un fluido se pone en resonancia a su frecuencia natural, entonces la frecuencia de oscilación del cuerpo variará a medida que las propiedades del fluido y las condiciones varíen. La frecuencia natural es directamente proporcional a la rigidez del cuerpo e inversamente proporcional a la masa combinada de cuerpo y el fluido. También es dependiente de la forma, tamaño, y elasticidad del material, esfuerzo inducido, masa, y distribución básica del cuerpo. Básicamente la relación del cuerpo puede ser igualada al movimiento de una masa sujeta a un resorte mecánico. De ahí, la expresión para la frecuencia puede ser escrita como:

$$\text{frecuencia de resonancia} = \sqrt{\left(\frac{K}{M + k\rho}\right)}$$

En donde K es la rigidez del sistema, M es la masa del transductor, k es la constante del sistema, y  $\rho$  es la densidad del fluido. Un factor común a todos los tipos de densímetros de elemento vibratorio es el problema de poner en vibración el elemento y mantener su resonancia natural. Para esto existen dos tipos de dispositivos que se combinan para tal fin. Los dispositivos piezoeléctricos (un dispositivo piezoeléctrico es aquel cuyo principio de operación se basa en el efecto piezoeléctrico; este es un efecto que presentan algunas sustancias cristalinas tales como el bario, el cuarzo o el titanio y que se caracteriza por la creación de una diferencia de potencial eléctrico entre las caras de un cristal cuando éste se somete a una presión mecánica; este efecto funciona también a la inversa: cuando se aplica un campo eléctrico a ciertas caras de una formación cristalina, ésta experimenta distorsiones mecánicas) los cuales tienen la ventaja adicional de ser de bajo costo y los dispositivos magnéticos los cuales presentan la ventaja es que son métodos de no-contacto y son confiables dentro del rango de temperaturas de -200 a 200 °C. Es conveniente mencionar que los medidores inerciales son adecuados para la medición de densidades tanto de líquidos como de gases. Aunque existen diferentes clases de instrumentos basados en este principio, en realidad son variaciones de los dos siguientes tipos de medidores que se mencionan a continuación.

### Densímetro de tubo de vibración

Estos dispositivos son adecuados para líquidos altamente viscosos o aplicaciones lodosas. El modo de operación de este tipo de medidores se basa en la vibración transversal de tubos como se muestra en la figura 2.85. El tubo y los mecanismos de accionamiento son forzados a vibrar en un plano gracias a una bobina excitadora. A medida que el líquido se mueve dentro del tubo, la densidad de la masa total del líquido se mide. La longitud del tubo es aproximadamente 20 veces mayor que el diámetro del tubo.

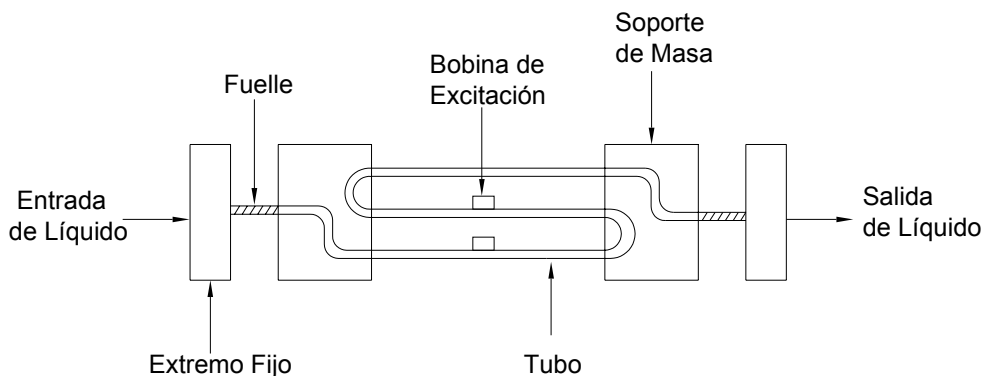


Fig. 2.85 Densímetro de tubo de vibración.

Uno de los principales problemas en el diseño es el conflicto en limitar el elemento vibratorio a una longitud finita y fijar los nodos en forma exacta. Se debe poner especial atención para evitar cualquier intercambio de energía vibracional afuera del tubo. El tubo sencillo tiene la desventaja de que presenta obstrucción al flujo, por lo tanto experimenta pérdidas de presión. El tubo doble (fig. 2.86), por otro lado, ofrece muy poco bloqueo (aunque en algunos casos el tubo es recubierto con el fluido a pesar de su vibración, lo que obliga a parar el proceso para limpiar el tubo) y puede ser fácilmente inspeccionado y limpiado. Su tamaño compacto es otra ventaja notable. En algunos densímetros del tubo doble se diseña para lograr un buen balanceo dinámico.

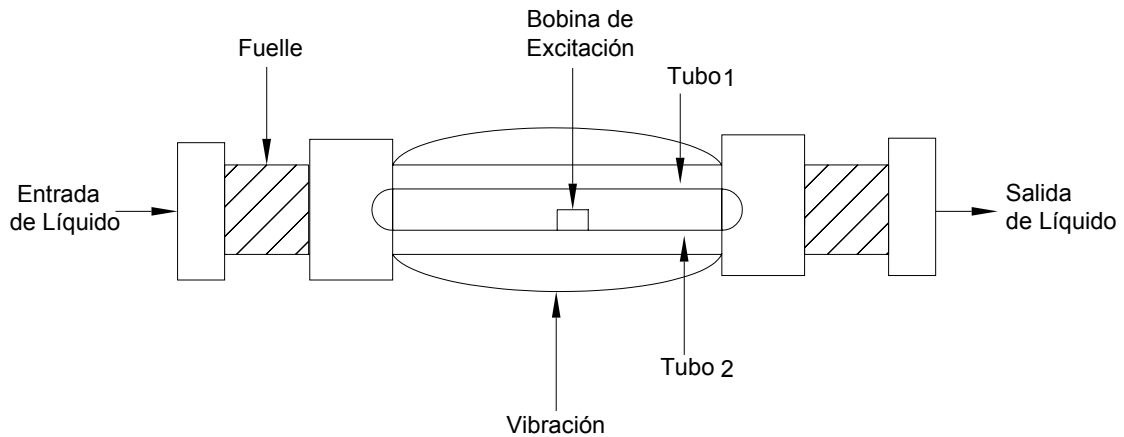


Fig. 2.86 Densímetro de vibración de doble tubo.

Los principales problemas de diseño para los sensores de tubo vibratorio están en compensar los efectos de presión y temperatura. Se utiliza un fuelle en ambos extremos de los tubos para aislar a los sensores de vibraciones externas. Algunos fabricantes modifican los tubos para minimizar los efectos por presión. En estos casos se requiere hacer correcciones sólo cuando es indispensable una alta exactitud. Usualmente el fabricante proporciona coeficientes de corrección por presión y temperatura para sus productos.

Una variante a esta clase de diseño que es importante mencionar es la del tubo en U. Se le nombra así por la forma en U que tiene. Esta acoplado con una armadura rígida situada dentro del campo de una bobina excitadora alimentada por una corriente pulsante. La vibración que el tubo experimenta es función de la masa del fluido (que puede ser líquido o gas) contenida en el tubo y, por lo tanto, de su densidad. La vibración además induce una corriente alterna en una bobina receptora, cuya corriente es convertida a c.c. para se transmitida a un controlador o registrador. Este instrumento es muy preciso ( $\pm 0.0001 \text{ g/cm}^3$ ), pudiendo trabajar a presiones de  $50 \text{ kg/cm}^2$  y temperaturas de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Densímetro de cilindro vibratorio

Este se logra fijando un cilindro de paredes delgadas con una relación longitud-diámetro de tres a uno, en donde, el espesor de las paredes del cilindro varía desde 25 micrómetros a 300 micrómetros, dependiendo del rango de densidad y el tipo de fluido usado. El cilindro puede ser excitado para vibrar mediante accionadores magnéticos montados ya sea adentro o afuera del mismo. El cilindro está fabricado de materiales magnéticos resistentes a la corrosión. Desafortunadamente este tipo de materiales requieren correcciones por temperatura.

El cambio en la frecuencia de resonancia se determina por la carga de la masa local del fluido en contacto con el cilindro. La curva de frecuencia contra densidad es no lineal y tiene una forma parabólica, por lo cual requiere linealización para tener resultados prácticos. El rango de frecuencia de resonancia varía desde 2 kHz a 5 kHz, dependiendo del rango de densidad para el instrumento. Los cilindros requieren exactitud en su fabricación y por lo tanto son muy caros para construir. Cada medidor necesita ser calibrado individualmente para diferentes temperaturas y densidades para cubrir aplicaciones específicas.

Este tipo de medidores son ideales para productos de gas licuado o líquidos refinados. Requieren limpieza regular, y no son adecuados para líquidos o lodos con alta viscosidad.

### Medidor de Coriolis

Los sistemas de medición coriolis (llamado así debido a que su funcionamiento se basa en el principio descubierto por el matemático francés del siglo XVIII Coriolis; dicho principio enuncia que la velocidad tangencial con la que se desplaza un objeto es el producto de la velocidad angular y el radio de giro; esto puede ser observado al inducir una vibración controlada en un bucle de forma del símbolo  $\Omega$ , que es el omega, ya que la vibración del tubo es perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, creando una fuerza de aceleración en la tubería de entrada del fluido y una fuerza de desaceleración en la tubería de salida del fluido, con lo que se genera un par cuyo sentido varía de acuerdo con la vibración y el ángulo de torsión del tubo, que es directamente proporcional a la masa instantánea del fluido circundante) son similares a los métodos de tubo vibratorio, pero con pequeñas variaciones en el diseño. Estos constan de un sensor y un transmisor procesador de señal. Cada sensor consiste de uno o dos tubos de flujo encerrados en una cubierta adecuadamente. Los tubos sensores se anclan a los puntos de entrada y salida del fluido con lo cual el extremo libre vibra, como se muestra en la figura 2.87.

Dentro de la carcasa, los tubos son vibrados a sus frecuencias naturales utilizando bobinas y circuitos de retroalimentación. Su frecuencia es una función de la geometría del elemento, material de construcción, y masa del montaje del tubo. La masa del tubo se compone de dos partes la masa del tubo misma y la masa del fluido dentro del tubo. La masa del tubo es fija para un sensor dado. La masa del fluido en el tubo es igual a la densidad del fluido multiplicada por su volumen. Debido a que el volumen del tubo es constante, la frecuencia de oscilación puede relacionarse directamente a la densidad del fluido. Por lo tanto para una geometría dada del tubo y el material de construcción, la densidad del líquido puede determinarse midiendo la frecuencia de resonancia de la vibración. El medidor Coriolis también es adecuado para la determinación de densidad de gases, además de que puede ser instalado en línea alta presión.

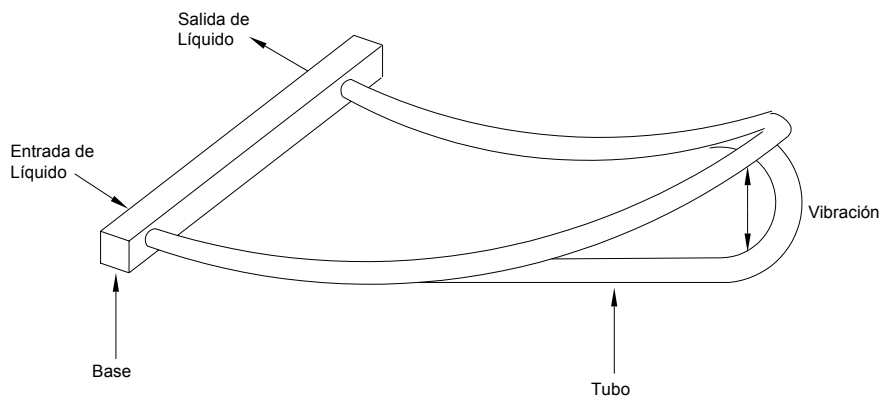


Fig. 2.87 Densímetro Coriolis.



## Densímetro tipo balanza

Los densímetros del tipo balanzas son adecuados para densidades de líquidos y gases. A continuación se mencionan cuatro de los más comúnmente utilizados.

### Tanque de flujo balanceado

En la figura 2.88 se muestra el tanque de volumen fijo utilizado para las mediciones. Mientras que el líquido está fluyendo continuamente a través del tanque, está siendo pesado automáticamente por una balanza sensitiva (un sistema de balanza de resortes ó un transmisor de balanza de fuerza neumática). Debido a que el volumen y el peso de líquido se conocen, la densidad o gravedad específica es determinada fácilmente en sus respectivas unidades. En el proceso de diseño, se debe de ejercitar un gran cuidado en las conexiones y en los extremos flexibles.

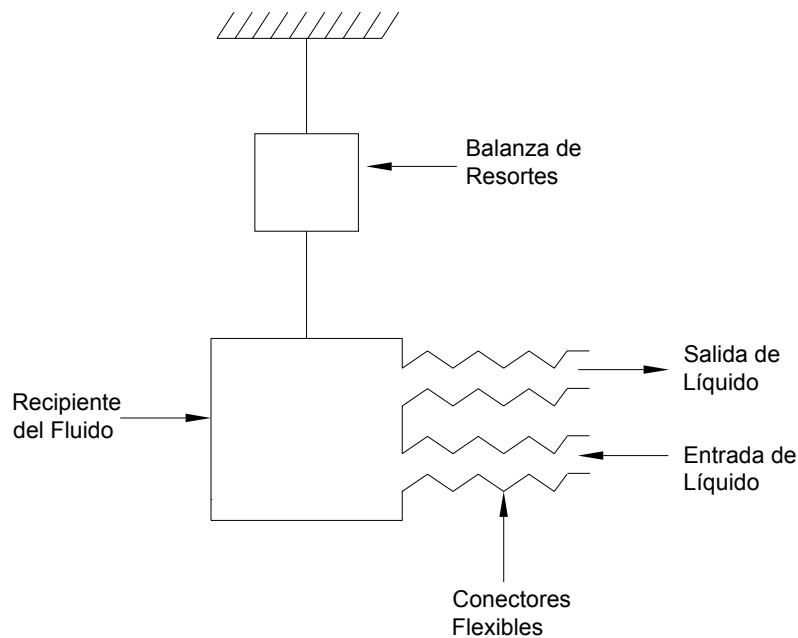


Fig. 2.88 Tanque de flujo balanceado.

### Flotador balanceado por cadena

En este sistema, se utiliza una plomada de volumen fijo, auto-centrada, sumergida, como se muestra en la figura 2.89. La plomada se localiza completamente bajo la superficie del líquido. En equilibrio, la plomada opera sin fricción y no es afectada por la contaminación en la superficie. Bajo condiciones de estado estacionario, la plomada adquiere una posición estable. El peso efectivo de la cadena en la plomada varía dependiendo de la posición de la plomada, la cual es una función de la densidad de líquido. La plomada contiene un núcleo transformador metálico que transmite cambios en la posición a ser medida por una bobina recolectora. La diferencia de voltaje, una función del desplazamiento de la plomada, se calibra como una medida de las variaciones en la gravedad específica. Un puente de termómetro de resistencia se utiliza para la compensación de los efectos por temperatura en la densidad.

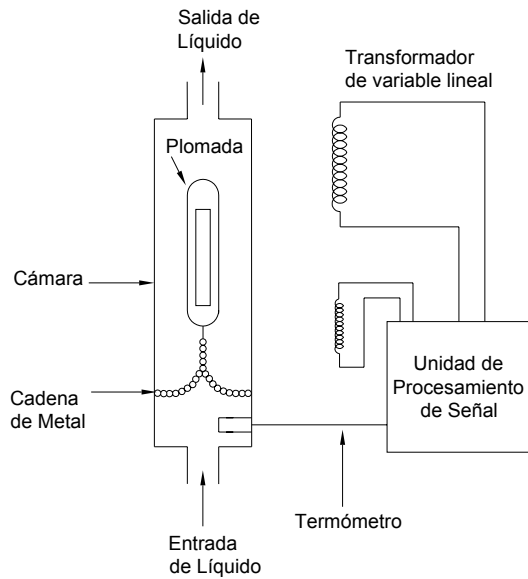


Fig. 2.89 Flotador balanceado por cadena.

### Balanza de gravedad específica de gases

Se pesa una columna alta de gas mediante el fondo flotante del tanque. Este peso se traduce en el movimiento de una aguja indicadora, la cual se mueve en una escala graduada en unidades de densidad o gravedad específica. Este método puede ser utilizado para cualquier medición de densidad de gases.

### Balanza de gas de flotación

En este instrumento, se monta un desplazador en un brazo de balanza en un tanque, como se muestra en la figura 2.90. El desplazador es balanceado por el aire, y la lectura del manómetro se anota a la presión exacta de balanceo. Entonces el aire es desplazado por el gas, y la presión se ajusta hasta que se restaura el balance anterior. La relación de la presión de aire contra la presión de gas es entonces la densidad del gas relativa al aire. Este método es comúnmente aplicado bajo condiciones de laboratorio y no es adecuado para mediciones continuas.

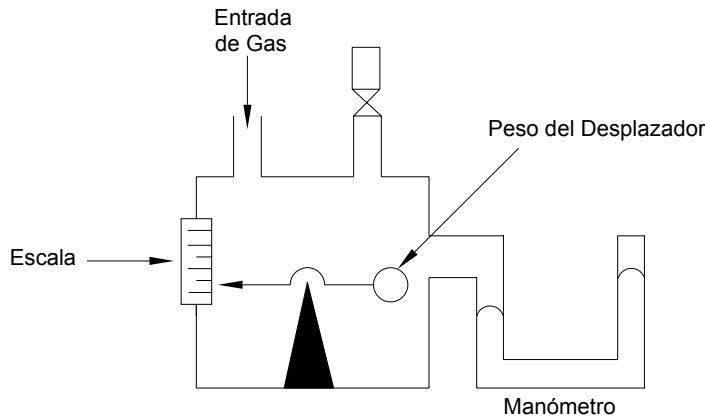


Fig. 2.90 Balanza de gas de flotación.

## Método de punto de ebullición

Este método es el empleado en los evaporadores de proceso. Se caracteriza por medir la diferencia de temperaturas entre el punto de ebullición del líquido que se está concentrando y el punto de ebullición del agua en las mismas condiciones de presión. La diferencia de temperaturas es función de la densidad del líquido y es medida con sondas de resistencia inmersas una en el líquido y otra en el agua, las cuales se conectan a un instrumento diferencial de puente de Wheatstone, cuya variación de resistencia equivale a una lectura de densidad. El agua a la misma presión que el líquido se obtiene con una purga de vapor conectada a una pequeña cámara de condensación donde está instalada la sonda de resistencia; la cámara de condensación está instalada en la tubería de salida de vapor del líquido. La figura 2.91 muestra un esquema de este principio de operación.

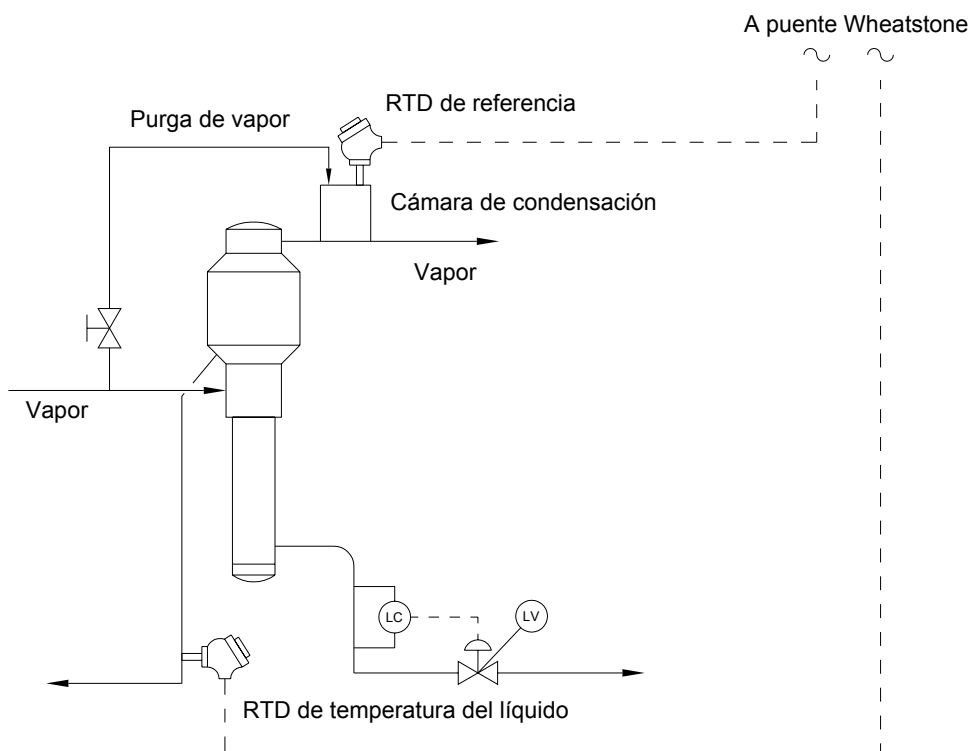


Fig. 2.91 Determinación de densidad por método de punto de ebullición.

## Refractómetro

Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado (desviado) en el segundo medio donde puede o no ser absorbido. La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios. El plano de incidencia se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal (es decir, la línea perpendicular a la superficie del medio) en el punto de incidencia. El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal.

El índice de refracción, de una sustancia o un medio transparente, es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en la sustancia o el medio transparente. Este número, mayor que la unidad y sin unidades, es una constante característica de cada medio y representa el número de veces que es mayor la velocidad de la luz en el vacío que en ese medio.

Los refractómetros son instrumentos esencialmente ópticos que operan bajo los principios de la refracción de la luz viajando en medios líquidos, de esta forma, al enfocar una fuente luminosa sobre un prisma rotativo o fijo (esto implica que barre o no al medio) de tal manera que el haz luminoso incida sobre un líquido de proceso con un ángulo determinado, tal que la reflexión de la luz pase a refracción, cuando el rayo luminoso incide con el ángulo crítico. En ese momento es detectado con una célula fotoeléctrica (basada en el efecto fotoeléctrico, en donde se liberan electrones en la superficie de un conductor metálico al absorber energía de la luz que incide sobre dicha superficie, los electrones liberados son de un polo de la célula, el cual es el cátodo y se mueven hacia el otro polo de la célula, que es el ánodo, bajo la influencia de un campo eléctrico, de esta forma, la luz se convierte en pulsos eléctricos) donde la señal será amplificada para su registro y/o control correspondiente. Un detector óptico básicamente está formado por 256 fotocélulas, a través de ellas, determina el ángulo crítico (refracción de la luz) mediante una relación entre una zona sombreada y una zona clara de la luz captada que es reflejada a través del prisma; esto es fácilmente apreciable gracias a que el voltaje producido en la zona sombreada es considerablemente menor al voltaje producido en la zona clara. El refractómetro básicamente compara el ángulo de incidencia con el ángulo de refracción de la luz de una longitud de onda específica.

Las fotocélulas envían trenes de impulsos, donde un número alto de impulsos corresponde a una zona clara de la imagen, por lo tanto definen la posición del borde sombreado. El microprocesador compensa las variaciones por temperatura, linealiza la señal y entrega como señal de salida las unidades de concentración del fluido.

Dependiendo de las características de las muestras, la medición del índice de refracción puede detectarse en una variedad de formas (por ejemplo, ángulo crítico, en forma colineal, y técnicas de desplazamiento). Usualmente se utiliza un cabezal sensor en línea, por el cual una ventana sensora (conocida como prisma) es humedecida por el producto a ser medido. En algunas versiones estos sensores deben ser instalados dentro de la tubería o en tanques. Estos son más efectivos en aplicaciones de procesos de reacción en donde toman lugar el agitado y mezclado de líquidos. Por ejemplo, los refractómetros pueden medir sólidos disueltos en forma exacta. Por ello, el índice de refracción puede relacionarse con la concentración de sólidos de un líquido y con esto, con la densidad.

Aunque esencialmente los refractómetros son utilizados en fluidos limpios empleando una fuente de luz normal, se pueden utilizar como fuentes diodos infrarrojos, láser, y otras luces, para cuando la medición se aplique a procesos que contienen sólidos en suspensión, alta turbulencia, colores fuertes, transparencia pobre, opacidad, y velocidades de flujo extremadamente altas.

Es conveniente mencionar que el prisma puede ser recubierto con de líquidos pegajosos o en algunos casos con sólidos en suspensión, por lo que es adecuado la limpieza periódica del prisma con vapor de agua intermitente.

Los refractómetros no son influidos por los sólidos no disueltos ni por el aire en disolución. La precisión alcanzada es de  $0.0001 \text{ g/cm}^3$ .

Los refractómetros son utilizados frecuentemente para el control de la adulteración de líquidos de uso común (aceites, vinos, y gasolina). También encuentran aplicación en pulpa y papel, alimento y bebida, azúcar, y otras industrias químicas. Un esquema de su funcionamiento se muestra en la figura 2.92.

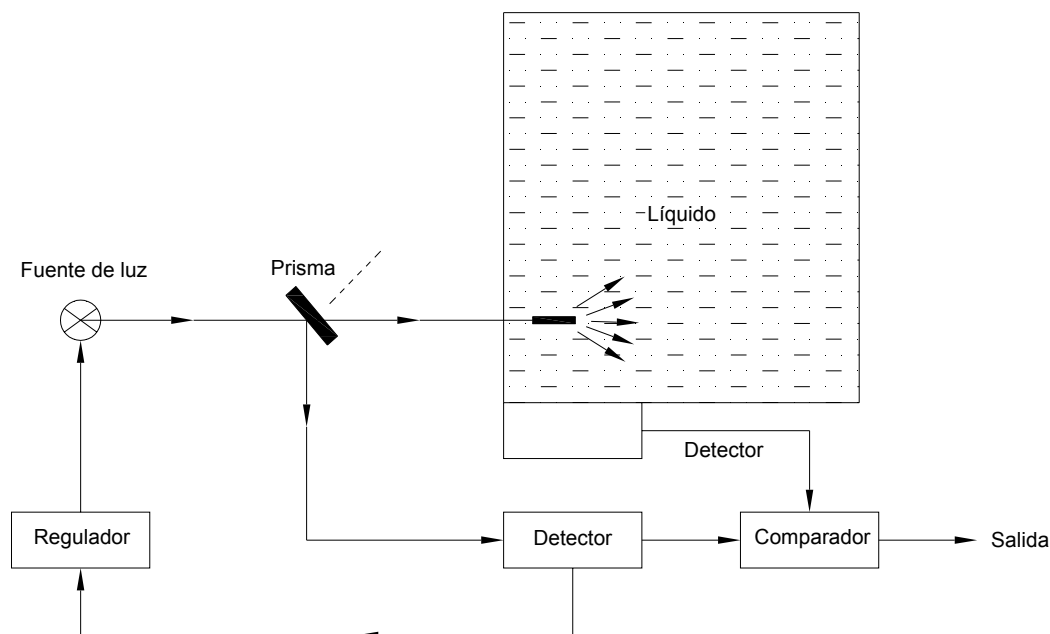


Fig. 2.92 Refractómetro.

### Medidor radiactivo

A medida que los isótopos radiactivos se desintegran, emiten radiación en la forma de partículas u ondas. Este fenómeno físico puede ser utilizado para propósitos de medición de densidad. Por ejemplo, los rayos gamma son pasados a través de muestras y su velocidad de llegada se mide utilizando detección basada en iones.

El método de radiación se basa en la determinación del grado con que el líquido absorbe la radiación procedente de una fuente de rayos gamma. La radiación residual es medida con un contador de centelleo (este un dispositivo que se basa en la ionización producida por partículas cargadas que se desplazan a gran velocidad en determinados sólidos y líquidos transparentes, conocidos como materiales centelleantes; ya que la ionización produce destellos de luz visible, colocando un material de centelleo como puede ser el yoduro de sodio, delante de un tubo fotomultiplicador, como es una célula fotoeléctrica, los destellos de luz se convierten en impulsos eléctricos que pueden amplificarse y registrarse; de esta forma, el contador de centelleo se basa en los destellos luminosos que producen las partículas ionizadas al atravesar determinados cristales y líquidos orgánicos) que proporciona pulsos de tensión, cuya frecuencia es inversamente proporcional a la densidad del fluido. El dispositivo se instala en la tubería o en el tanque a cuyo a través pasa el líquido, con la fuente blindada dispuesta en la parte exterior de la tubería o el tanque y con el receptor de la radiación instalado en a parte opuesta (ver fig. 2.93). Las conexiones eléctricas del receptor van a un registrador o controlador situado en cuarto de control.

El instrumento dispone de compensación por temperatura, de linealización de la señal de salida y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación (compensación por desplazamiento causado por la desintegración de la fuente), aspecto que debe de ser considerado a tomarse en cuenta para tener la misma precisión de la puesta en marcha.

Generalmente, la velocidad de absorción másica de los rayos gamma es independiente de la composición del material; por tanto, pueden ser utilizados para una gran variedad de materiales. Los densímetros basados en radiación proporcionan una precisión de hasta  $0.0001 \text{ g/cm}^3$ .

La exactitud de la medición de densidad depende de la exactitud de la medición de la intensidad de la radiación y la longitud del camino. Una mayor longitud del camino a través del material proporciona una señal de detección más fuerte.

La fuente de radiación utilizada industrialmente es el cesio 137 de vida media de 30 años, aunque también suele emplearse el americio de vida media de 458 años.

Las ventajas y desventajas de los densímetros de radiación pueden resumirse de la siguiente forma:

| Ventajas   | Desventajas  |
|--|--|
| El sensor no toca la muestra, por tanto no existe bloqueo del camino de líquido. | Se requiere una fuente radioactiva, por tanto hay dificultad en el manejo. |
| Se pueden medir líquidos multi-fases.  | Para exactitudes razonables, se requiere de una longitud mínima de camino. |
| Son más adecuados en aplicaciones difíciles, como minería e industria pesada.    | Sólo son adecuados para mediciones de sólidos y líquidos.                  |
| Puede ser empleado en todo tipo de líquidos.                                     | Su lectura se ve influida por el aire o gases disueltos en el líquido      |

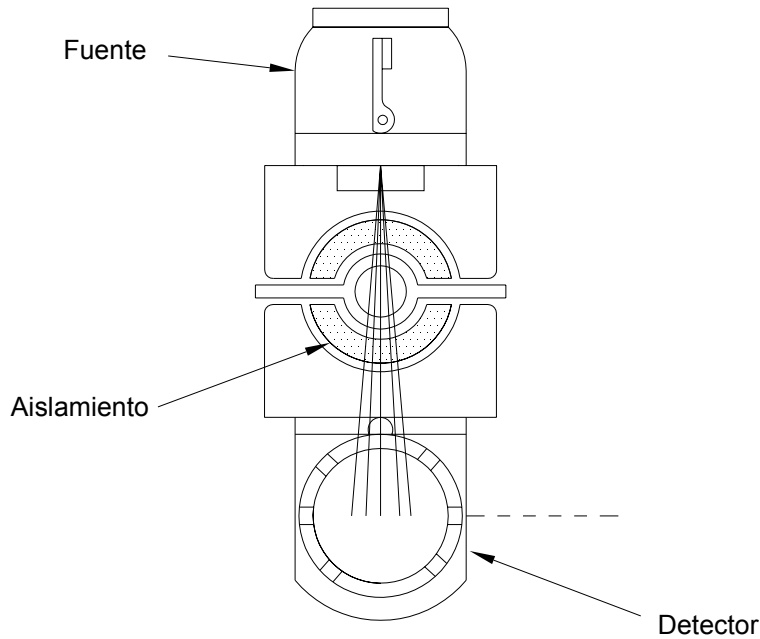


Fig. 2.93 Medidor de densidad de radiación.

## Densímetros de absorción

Esta técnica es utilizada frecuentemente para mediciones de densidad en aplicaciones específicas. Rayos X, luz visible, luz ultravioleta, y absorción sónica son ejemplos típicos de este método. Esencialmente la absorción y el cambio de fase de un rayo generado el cual atraviesa la muestra se mide y se relaciona a la densidad de la muestra. Dos ejemplos típicos son: absorción de rayos ultravioletas utilizados para determinar la densidad de depósitos de mercurio, y sensores ultrasónicos para mediciones difíciles (por ejemplo, medición de densidad de lodos). Éstos dispositivos pueden proporcionar exactitud es de hasta 0.01%.

La tabla 2.20 muestra finalmente las principales características de los medidores de densidad estudiados previamente.

| Instrumento         | Precisión (%) | Ventajas   | Desventajas  | Aplicación               |
|---------------------|---------------|--|--|--------------------------|
| Picnómetro          | $\pm 1$       | -Sencillo<br>-Medición de peso específico  | -Resultado depende del manejo personal<br>-Inconvenientes cuando la medición no es en tiempo real<br>-Necesidad de limpieza continua | Líquidos y gases         |
| Areómetro           | $\pm 1-3$     | -Sencillo y barato<br>-Posibilidad de transmisión a distancia<br>-Resolución baja en rangos pequeños | -Alcance pequeño<br>-Puede ser frágil<br>-Inconvenientes cuando la medición no es en tiempo real<br>-Requiere fluidos limpios        | Líquidos limpios         |
| Presión diferencial | 0.5-1         | -Medida en tanques a presión   | -Requiere nivel constante del fluido   | Líquidos                 |
| Desplazamiento      | $\pm 1$       | -Medida en tanques a presión   | -No es adecuado con líquidos que recubre el flotador   | Líquidos                 |
| Vibratorio          | 0.5-1         | -Simple montaje en línea<br>-Adecuado para líquidos altamente viscosos y aplicaciones lodosas        | -Requiere compensación por temperatura y viscosidad  | Líquidos y gases         |
| Coriolis            | 0.2           | -Medición en línea a alta presión  | -Costo alto  | Líquidos y gases         |
| Balanza             | 0.25-1        | -Respuesta rápida y simple   | -Medida indirecta  | Líquidos y gases         |
| Punto de ebullición | -----         | -Simple montaje en línea   | -Necesidad de vapor a la misma presión que el proceso  | Líquidos en evaporadores |
| Refractómetro       | $\pm 0.1$     | -Insensible a sólidos y aire   | -No recomendable en fluidos que recubran el prisma   | Líquidos                 |
| Radiactivo          | 1             | -Sin contacto con el proceso   | -Costo alto<br>-requiere inspección continua y seguridad<br>-Influido por aire o gases disueltos                                     | Líquidos                 |
| Absorción           | 0.01          | -Simple montaje en línea   | -Uso limitado a aplicaciones especiales  | Líquidos                 |

Tabla 2.20 Instrumentos de medición de densidad.

### 2.41.3 Medición de humedad y punto de rocío

Cuando cualquier gas puro (o mezcla gaseosa) se encuentra en contacto con un líquido, el gas adhiere cierta cantidad de vapor del líquido. Si este contacto se mantiene durante un intervalo de tiempo considerable se alcanza el equilibrio, después de lo cual la presión parcial del vapor (líquido vaporizado) iguala la presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema. A pesar de la duración del contacto entre el líquido y el gas, una vez que se logra el equilibrio ya no se evapora mayor cantidad de líquido hacia la fase gaseosa. En estas condiciones se dice que el gas está saturado con dicho vapor a la temperatura indicada, o también se dice que el gas se encuentra en su punto de rocío.

Dado lo anterior, cuando el vapor es agua y el gas es el aire se habla de humedad, para otros gases y vapores se usa el término saturación. La humedad se define entonces, como la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire totalmente seco.

El punto de rocío, por su parte, se define como la temperatura a la cual el vapor de agua en el aire comienza a condensarse, esto es la temperatura a la cual se empieza a formar el rocío en el aire que contiene una cantidad conocida de vapor de agua.

La temperatura de punto de rocío es la temperatura a la cual el gas debe ser enfriado, a presión constante, para llegar a la saturación. Cuando el condensado es hielo, se llama punto de escarcha. Este es, con una composición de gas que no cambia, independiente de la temperatura. Ésta cambia con la presión debido a que la presión del agua es proporcional a la presión total. Desde luego, ocurrirá condensación si se llega a la presión de saturación de vapor.

Debido a la distribución asimétrica de su carga eléctrica, las moléculas de agua son fácilmente absorbidas en casi cualquier superficie; por esto, de forma general, al contenido de vapor de agua en el aire, demás gases y en los sólidos, es generalmente llamado humedad. En un sistema, la presión de vapor es aquella parte de la presión total contribuida por el vapor de agua.

La determinación de la humedad es de gran importancia industrialmente dado su aplicación en acondicionamiento de aire, atmósferas empleadas en tratamientos térmicos, humidificadores, secadores, etc. Además de que en el correcto control y manejo de esta, recae el mantenimiento óptimo de algunos productos o materias primas almacenadas, que puede secarse a humedades extremas o estropearse a humedades altas.

Las consideraciones hechas para el estudio de la humedad en distintas sustancias son importantes, dado que el vapor de agua es uno de los gases constituyentes de la atmósfera de la tierra, cuya presión total, es la suma de las presiones parciales de sus distintos constituyentes. Esto puede expresarse de la siguiente forma:

$$P_{\text{Atm}} = P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{Otros gases}}$$

En condiciones ambientales promedio, el agua puede estar presente también en la fase líquida y sólida, razón por la cual se habla de vapor de agua en vez de gas de agua. A este respecto es conveniente aclarar que, aunque todas las sustancias gaseosas tienen comportamiento similar por debajo y por encima de su punto crítico, se suele definir una sustancia como gas cuando se habla de esta por encima de su temperatura crítica, esto es la máxima temperatura a la que se puede licuar aplicando una presión suficiente; por ello,



desde este punto de vista, una sustancia gaseosa es imposible que pueda existir en fase líquida o sólida. Por debajo de la temperatura crítica se puede hablar de sustancias en estado de vapor, aunque también puede entenderse el uso del término vapor a cualquier sustancia que en condiciones normales de presión y temperatura pueden existir en estado líquido o sólido.

El contenido en vapor de agua del aire varía considerablemente en función de la temperatura y de la humedad relativa. Con un 100% de humedad relativa (máxima cantidad de vapor de agua admisible a una determinada temperatura), la cantidad de vapor de agua varía de 190 partes por millón (ppm) a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta 42.000 ppm a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Por esto, un espacio vacío en equilibrio con una superficie plana de agua (o hielo), puede, a una temperatura dada, mantener una cantidad máxima bien definida de vapor de agua. Cuando se alcanza la presión de saturación de vapor, cualquier adición de vapor de agua resulta en condensación.

Algunas definiciones importantes con las cuales se expresan la humedad o punto de rocío en la industria son las siguientes:

**Humedad absoluta:** Masa de vapor de agua en kg por kg de aire seco.

**Humedad relativa:** Es la relación entre la presión parcial del vapor de agua a una temperatura y la presión de vapor en el equilibrio (vapor saturado) a la misma temperatura. Equivale al porcentaje de humedad. Ya que la presión de vapor del agua máxima depende de la temperatura, la humedad relativa también depende, dado un determinado contenido de agua, de la temperatura. A temperatura constante y a un determinado contenido de agua, la humedad relativa, es dependiente de la presión total.

**Porcentaje de humedad:** Es el cociente multiplicado por 100 entre la cantidad en kg del vapor de agua contenido en 1 kg de aire seco y la cantidad en kg del vapor de agua contenida en 1 kg de aire seco si el aire está en condiciones de saturación.

**Temperatura seca:** Temperatura del aire medida con un termómetro con el bulbo seco, es decir, en contacto directo con la atmósfera.

**Temperatura húmeda:** Es la temperatura de equilibrio dinámico alcanzado por una superficie húmeda cuando se la expone al aire. Puede ser medida con un termómetro cuyo bulbo está en ambiente de saturación, lo cual puede ser conseguido envolviendo el bulbo con un paño que se mantiene húmedo constantemente (bulbo húmedo).

**Punto de rocío:** Temperatura límite a la que el vapor de agua existe en el aire o en el gas se condensa a estado líquido.

**Contenido de humedad:** Es un valor expresado en tanto por ciento que define la cantidad de agua existente en las sustancias sólidas por unidad de peso o del volumen del sólido seco o húmedo. El término se aplica con preferencia en relación al sólido seco, esto es, se expresa en base seca.

**Contenido de humedad comercial:** Es el contenido de humedad expresado en kg de agua por kg del material al salir este del proceso de secado.

Antes de estudiar los dispositivos y las técnicas de medición de humedad en sustancias, es conveniente conocer algunos aspectos importantes que implican dicha medición.

Existen tres problemas fundamentales a los que enfrenta la instrumentación industrial en la medición de la humedad. El primero de ellos es la probable dificultad de encontrar un material que sea inerte a las moléculas de agua y con el cual pueda ser imposible, con algún método físico, medir la presencia de agua.

De esto se infiere que es a partir de las mismas propiedades que poseen las moléculas del agua, sea que, aprovechando estas características, se desarrollen técnicas de medición. Ya que las moléculas de agua cambian la longitud de los materiales orgánicos, la conductividad y peso de los materiales higroscópicos y absorbentes químicos, y en general la interacción de casi cualquier material. El agua absorbe radiación infrarroja así como ultravioleta. Cambia el color de los químicos, el índice refractivo del aire y de líquidos, la velocidad del sonido en el aire o la radiación electromagnética en sólidos, y la conductividad térmica de gases así como de líquidos y sólidos.

El segundo problema consiste en definir el rango mínimo de operación requerido por el medidor, ya que la sobre especificación puede ser cara, además, diseñar instrumentos adecuados para procesos de secado a altas temperaturas y, al mismo tiempo, que logren la detección de trazas de vapor de agua en gases secos resultaría muy complicado.

El tercer problema estriba en que a diferencia de un sensor de temperatura, un sensor de humedad puede, al menos en el aire, esencialmente no estar cubierto por su ambiente directo. La pregunta de cómo medir la humedad no puede ser separada de ese problema de medición en cuestión (contaminación, condensación, etc.). Por ello la medición debe de considerar la posibilidad de condensación antes o después del periodo real de medición.

La observación a los problemas anteriores lleva a conclusiones tales como, la exactitud que puede ser esperada en el campo de la higrometría (parte de la física relativa al conocimiento de las causas productoras de la humedad atmosférica y de la medida de sus variaciones) es considerablemente más baja que aquella en otros campos de medición. No deberían esperarse exactitudes mejores a 2% o 3% de humedad relativa o 0.5 °C en punto de rocío. Antes de decidir el uso de un cierto método, o la compra de un instrumento en particular, es de mucha ayuda revisar bien los rangos de humedad, temperatura, y presión, posibles contaminantes en el proceso, y exactitudes y tiempo de respuesta requeridos. Después de esto debe de hacerse una consideración en la frecuencia de servicio y calibración, costo del reemplazo del sensor, etc.

A partir de esto, el desarrollo de las primeras técnicas se basaron en algunos principios fundamentales; tales como, remover el contenido de agua (vapor) de una muestra y medir el cambio de peso (o el cambio de presión en el gas), o evaporar una superficie de agua dentro de una corriente de gas (esto logrado con un instrumento llamado psicrómetro) y enfriar la muestra de gas hasta detectar condensación.

En la actualidad existen diversos métodos e instrumentos para la medición de humedad en el aire y gases, así como en sólidos, de entre ellos los que destacan son los siguientes:

Para medición de humedad en aire y gases:

- Método gravimétrico
- Método de cabello o nailon (Higrómetro mecánico)
- Método de bulbo seco y bulbo húmedo (Psicrómetro)
- Método de célula de cloruro de litio
- Método de sensor de polímero (Sensor eléctrico de humedad relativa)

Para medición de punto de rocío:

- Cámara de niebla
- Célula de cloruro de litio
- Condensación en espejo
- Analizador de infrarrojos

Para medición de humedad en sólidos:

- Secado térmico
- Método de conductividad
- Método de capacidad
- Método de infrarrojos
- Método de radiación

## **Humedad en aire y gases**

### **Método gravimétrico.**

El método gravimétrico es la forma más fundamental de conocer la cantidad de vapor de agua en un gas húmedo. En un instrumento diseñado para determinar la humedad del aire atmosférico llamado higrómetro gravimétrico, el vapor de agua es congelado mediante una trampa o absorbido por un desecante químico y pesado, mientras que el volumen o la masa de gas seco son medidos directamente. Ya que el resultado de la medición proporciona un valor promedio en un tiempo largo, el instrumento es utilizado en combinación con un generador de humedad, capaz de producir un gas de humedad constante. Este método se utiliza para estándares primarios de países como Estados Unidos, Reino Unido y Japón. Las exactitudes alcanzables son de aproximadamente 0.1% a 0.2% en la relación de mezcla, o de 0.04 °C en el rango de -35 °C a 50 °C en punto de rocío, incrementándose a 0.08 °C a 80 °C y 0.15 °C a -75 °C. La operación de tales estándares requiere hardware muy sofisticado.

### **Método de cabello o nailon (Higrómetro mecánico)**

Si bien estos higrómetros pierden terreno, aún son utilizados ampliamente, principalmente en condiciones bajo techo. El principio se basa en la expansión o contracción lineal (ver fig. 2.94) que tiene el cabello humano principalmente, o fibras de nailon, con la humedad relativa, cuyo efecto puede ser amplificado mecánicamente para mover un registrador. La mejor exactitud es 2% a 3% de humedad relativa (para cabello, en el rango entre 35% y 95% de humedad relativa si se genera a intervalos regulares); en general, no se deben esperar exactitudes mejores a 5% de humedad relativa. En el caso del cabello, debe tenerse en cuenta el hecho de que este puede estar en estado diferente al que estuvo durante su calibración. El cabello exhibe una curva cuando está seco y otra cuando está húmedo; la transición toma lugar por debajo del 35% de humedad relativa. Una vez en la curva seca, el instrumento puede leer hasta 20% de humedad relativa más alto si fue calibrado en la curva húmeda como generalmente se hace. El tiempo de respuesta depende fuertemente de la temperatura: éste varía desde unos pocos minutos a 20 °C hasta 20 a 30 minutos a -10 °C. El límite de temperatura es de -60 °C hasta 90 °C. Puede definirse que el campo de medida de esta clase de instrumentos es de 15 a 95 % de humedad relativa, con una precisión del orden de  $\pm 3$  a  $\pm 5$  %.

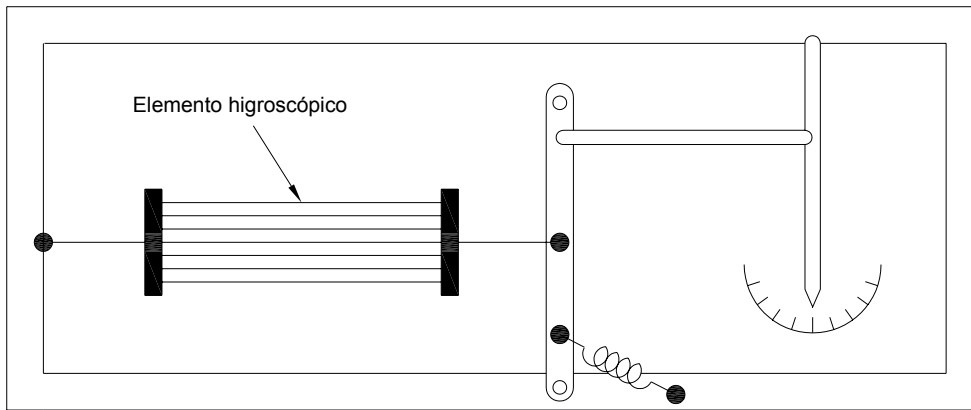


Fig. 2.94 Higrómetro mecánico con elemento de cabello.

### Método de bulbo seco y bulbo húmedo (Psicrómetro)

El método de bulbo seco y bulbo húmedo consiste en ventilar dos termómetros con el gas de humedad desconocida. Un sensor, el bulbo seco, mide la temperatura del gas  $t$ . El otro sensor, el bulbo húmedo, está rodeado por una cinta tejida de algodón saturada con agua pura. La energía requerida para evaporar el agua dentro de la corriente de aire enfría el bulbo húmedo a la temperatura  $t_w$ . La presión de vapor en el gas puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$e = e_w - A \cdot P \cdot (t - t_w)$$

En donde  $e_w$  es la presión del vapor saturado a la temperatura  $t_w$ ,  $P$  es la presión atmosférica total, y  $A$  es el coeficiente del psicrómetro.  $A$  depende de la velocidad de ventilación, dimensiones del bulbo húmedo, y el intercambio de calor por radiación entre el bulbo seco, el bulbo húmedo, y sus alrededores.

La teoría se fundamenta en que leyendo en un diagrama psicrométrico las temperatura del bulbo seco y el bulbo húmedo sobre las líneas correspondientes se obtiene por intersección la humedad relativa. Pero en lugar de realizar cálculos, o consultar el diagrama psicrométrico para cada lectura, es posible emplear un instrumento que mida directamente la temperatura diferencial entre el bulbo seco y el bulbo húmedo respectivamente, calibrado de tal forma que la pluma del instrumento indique directamente la humedad relativa.

El atractivo del método psicrométrico radica en el hecho de que es un método directo y relativamente simple, con una base teórica fuerte. La exactitud del método es determinada por la exactitud de ambos bulbos, el mantenimiento de una velocidad mínima de ventilación, y la limpieza de la cinta de algodón que sirve como mecha.

Dependiendo de la temperatura del bulbo seco, la cinta de algodón puede tener problemas con el suministro de agua a una evaporación fuerte. Los bulbos húmedos congelados, los cuales son posibles a temperaturas ambiente por debajo de los  $9^{\circ}\text{C}$ , de igual forma pueden traer problemas. Su uso no es recomendable en cámaras pequeñas, ya que el agua del bulbo húmedo se incorpora fácilmente al ambiente y falsea la lectura.

No obstante, el instrumento tiene la ventaja de ser muy preciso cuando la humedad relativa esta próxima a la saturación, con lo que se permite el uso de aparatos con un campo de medida muy estrecho a la humedad relativa próxima a 100 %. Cuando la humedad relativa esta por debajo del 20 % su precisión es pobre.

### Método de célula de cloruro de litio

La célula de cloruro de litio (ver fig. 2.95) consiste en una célula embebida en cloruro de litio con una rejilla de láminas de oro. La sal tiene la propiedad de variar de forma considerable su resistencia al aumentar o disminuir la humedad ambiente, dado que libera o absorbe iones de la película soporte. Debido a que la humedad relativa viene determinada simultáneamente por el contenido de humedad y por la temperatura del aire, es necesario compensar la medición por temperatura ambiente.

La resistividad de la célula de litio medida en microhmios a una determinada temperatura ambiente corresponde al valor de la humedad relativa. La proporción de la sal de cloruro de litio en la película que recubre la célula establece el campo de medida de la humedad, de tal forma, que entre más alta sea la proporción de la sal más bajo será el campo de medida.

El instrumento basado en una célula de cloruro de litio no puede utilizarse en atmósferas con mucho polvo, con dióxido de azufre, vapores ácidos, amoníaco, cloro, vapores alcalinos, acetileno, óxido de etileno y atmósferas contaminadas con sal. Su precisión suele ser de  $\pm 2\%$  a  $\pm 3\%$ , logrando medir satisfactoriamente dentro del rango de 5 % a 95 % de humedad relativa. El instrumento disminuye su indicación en un 1 a 2 % al año, dado que envejece.

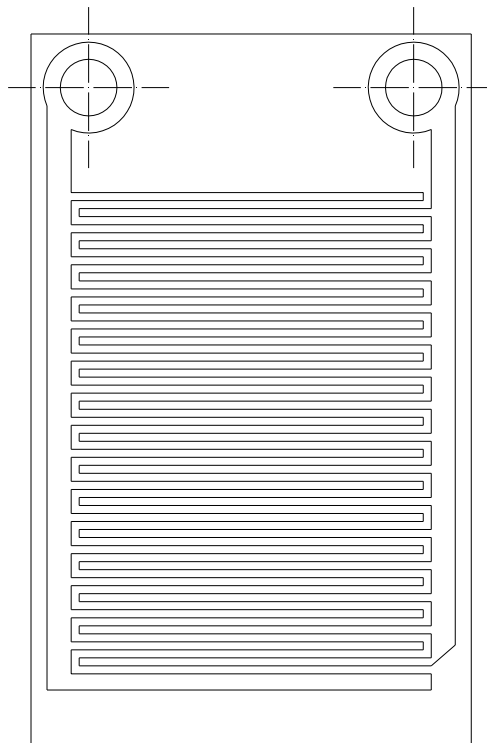


Fig. 2.95 Célula de cloruro de litio.

## **Método de sensor de polímero (Sensor eléctrico de humedad relativa)**

Este método se basa en sensores generalmente pequeños, de respuesta rápida, que no disipan el calor, y pueden ser utilizados en espacios confinados. Los dos principales tipos de sensores son: el tipo Dunmore y el tipo Pope. El Dunmore utiliza una solución de cloruro de litio diluida en un adhesivo de acetato polivinílico en un sustrato aislante, con el peligro de enjuagarse en la saturación. La resistencia del sensor es una función de la humedad relativa del aire rodeante. Lo anterior también aplica para el sensor tipo Pope, en donde un sustrato de poliestireno es la parte sensitiva del sensor, después de haber sido tratada con ácido sulfúrico; ya que la variación de humedad ambiente (30 % a 90 % de humedad relativa) cambia la resistencia del sensor, debido a que el radical sulfato ( $\text{SO}_4$ ) libera o absorbe los iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) procedentes de la humedad del ambiente. Este sensor es menos sensible al enjuague, y tiene un rango más amplio que el tipo Dunmore. En ambos casos, se utilizan compensadores por temperatura y se conectan los sensores a un puente de Wheatstone.

Recientemente se han desarrollado nuevos sensores básicamente consistentes de películas delgadas de polímeros entre dos electrodos de varios materiales. Los diferentes tipos varían principalmente en el tipo de polímero y el material del electrodo, resultando en sensores con diferentes características para soportar la polución y temperaturas de hasta 190 °C.

## **Medición de punto de rocío**

### **Cámara de niebla**

El dispositivo de cámara de niebla realiza una medición manual discontinua del punto de rocío. El diseño consiste en una pequeña cámara con una bomba manual que permite comprimir una muestra del gas. Anotando las condiciones de operación de presión y temperatura iniciales y comprimiéndolo hasta una presión determinada, se abre una válvula de escape a la atmósfera con lo que el gas sufre una expansión adiabática y baja de temperatura. El procedimiento se repite y en cada ensayo el gas se comprime cada vez más, hasta que la temperatura alcanzada en la expansión hace aparecer niebla en la cámara. Esta temperatura corresponde a la temperatura de punto de rocío.

### **Célula de cloruro de litio**

La adición de una sal soluble higroscópica en agua pura baja la presión de vapor de saturación de la solución en el equilibrio. En la figura 2.96 este cambio es ilustrado para una solución de cloruro de litio, la cual tiene una humedad relativa de equilibrio de cerca de 11%. Una muestra del gas en una condición *a* se encuentra en equilibrio con una solución saturada de cloruro de litio a la temperatura *b* (mayor), de donde el punto *c* pertenece a la temperatura de rocío. La aplicación de este principio conduce a un sensor sencillo y efectivo.

El sensor de célula de cloruro de litio consiste en un manguito de tela impregnada con la solución de cloruro de litio, que envuelve a una bobina (ver fig. 2.97). Sobre el manguito está arrollado un hilo bifilar, abierto en un extremo y alimentado a través del secundario de un transformador (el transformador es un dispositivo eléctrico que consta de una bobina de cable situada junto a una o varias bobinas más, y que se utiliza para unir dos o más circuitos de corriente alterna, aprovechando el efecto de inducción entre las bobinas; la bobina conectada a la fuente de energía se llama bobina primaria, las demás bobinas reciben el nombre de bobinas secundarias), con lo que circula una corriente entre los hilos a través de la sal de cloruro

de litio. La solución de cloruro de litio tiene la propiedad característica de mantenerse con una humedad relativa del 11 % en equilibrio con la atmósfera húmeda. A valores inferiores a 11 % la sal cristaliza y deja de ser conductora.

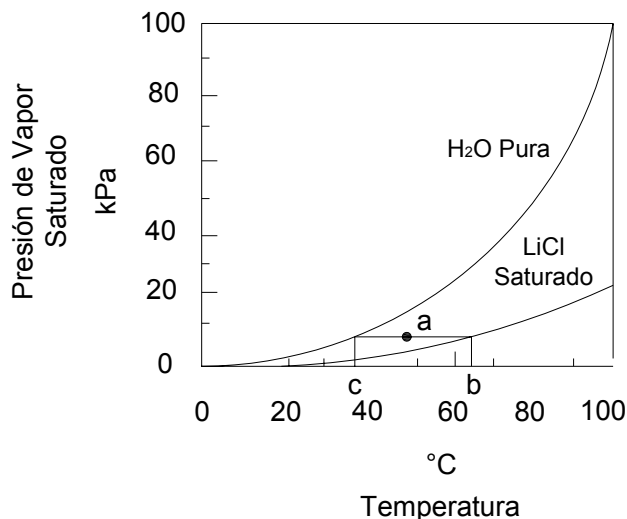


Fig. 2.96 Determinación de punto de rocío gráficamente empleando una célula de cloruro de litio.

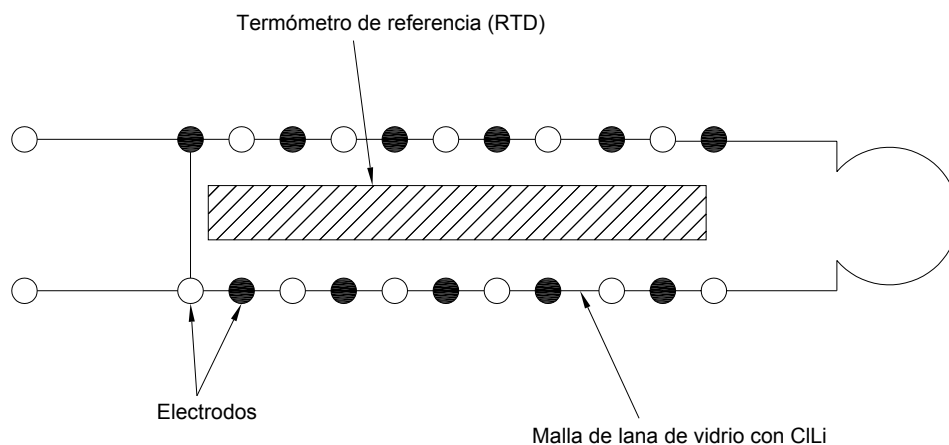


Fig. 2.97 Instrumento de célula de cloruro de litio de medición de punto de rocío en aire o en gases.

La sal es altamente higroscópica, dado lo cual tiene una gran afinidad por la humedad ambiente, de forma tal, que entre más alta sea la humedad ambiente, mayormente conductora será la sal y tanto más se calentará la bobina por la circulación de corriente a través del hilo bifilar. La temperatura de equilibrio de la bobina (punto *b*), esta relacionada con el punto de rocío del aire o del gas (punto *a* de equilibrio correspondiente al punto *c* de temperatura de punto de rocío) de modo que puede medirse con una sonda de resistencia conectada a un puente de Wheatstone, el cual puede ser graduado directamente en temperatura de punto de rocío.

El rango de operación de la célula es de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una exactitud de cerca de  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; a temperaturas por arriba de los  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  el punto de rocío puede medirse admitiendo el paso de aire a una cámara de temperatura constante y enfriándolo a menos de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  antes de circular a través de la célula. La velocidad de flujo del aire o del gas también es un aspecto importante a considerar, ya que velocidades bajas de flujo puede causar estratificación alrededor de la superficie sensora y velocidades altas pueden enfriarla mucho, lo cual resulta en lecturas muy altas o muy bajas respectivamente. Generalmente se recomiendan velocidades de flujo entre  $0.5$  y  $1\text{ m/s}$ .

La célula requiere que los gases cuyo punto de rocío se mida no contengan ni amoníaco, ni dióxido de azufre, ni cloro ni sal, ni partículas en suspensión. En caso de contaminación de la célula, será necesario regenerarla limpiándola y sumergiéndola en una solución de cloruro de litio.

### Condensación en espejo

La presión de vapor de saturación en el aire se incrementa con la temperatura como puede observarse en la figura 2.96. Esto significa que el aire o gas bajo prueba puede ser enfriado a una temperatura en donde sea saturado con vapor de agua. Al realizar esto a una presión constante y una humedad específica, se puede obtener la temperatura real de punto de rocío.

Si se acondiciona una cámara con un sistema calefactor y refrigerante que controle la temperatura de un espejo situado en su interior, a cuyo través circula una corriente de gas (del que se desea conocer su punto de rocío) y mediante unas células fotoeléctricas que actúen sobre el sistema de refrigeración o calentamiento, de tal forma que se consiga el empañamiento constante del espejo, la temperatura correspondiente a dicho estado, será la temperatura de punto de rocío de gas. Obteniéndose un sistema de medición de punto de rocío por condensación en espejo (ver fig. 2.98).

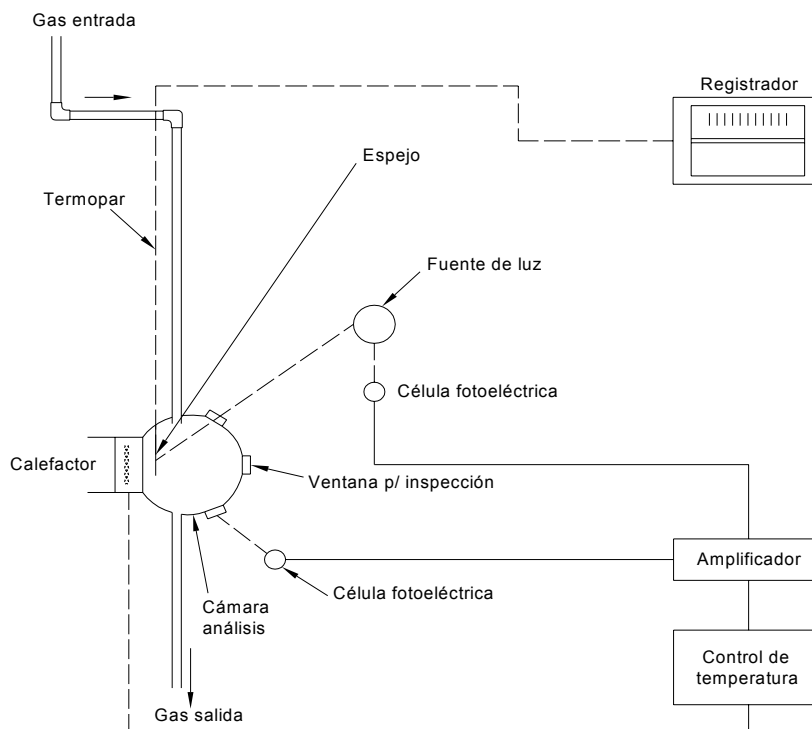


Fig. 2.98 Sistema de condensación en un espejo.



En la práctica, una muestra del gas usualmente se expande sobre un espejo metálico. El espejo es enfriado hasta que se detecta goteo o escarchas, por medios ópticos. La temperatura es mantenida tal que el espesor del depósito ni se incrementa ni se presenta decremento. La mayor exactitud para un estándar de transferencia puede ser esperada de 0.03 °C a 0.05 °C en el rango de -20 °C a 40 °C en punto de rocío. Los hidrómetros de punto de rocío de condensación ópticos industriales alcanzan exactitudes de hasta 0.2 °C, lo cual puede ser cierto en el caso de espejo limpio; aunque en la práctica, 0.5 °C es más realista. La principal ventaja es su rapidez de respuesta, mientras que su desventaja es la susceptibilidad del espejo a contaminarse, por lo que su aplicación se restringe a gases limpios.

### **Analizador de infrarrojos**

Este dispositivo no sólo puede medir el punto de rocío, si no también la concentración de gases tales como el CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub> y el NH<sub>3</sub>, como se vera más adelante. En este punto nos limitaremos solamente a describir su funcionamiento para la medición de punto de rocío.

El vapor de agua absorbe radiación en la región infrarroja. Así que, si el gas es conducido a través del camino óptico entre la fuente infrarroja y un detector, habrá una reducción en la radiación transmitida debido a que la radiación infrarroja es absorbida proporcionalmente a la concentración de vapor de agua. El dispositivo en la industria para medir el punto de rocío de gases, es el analizador de infrarrojos. Este consiste en una fuente pulsante de infrarrojos generada por tungsteno calentado, una célula de referencia y otra de muestra a cuyo través pasan las radiaciones infrarrojas y un detector. Cuando la radiación infrarroja es absorbida proporcionalmente a la concentración de vapor de agua, la presión disminuye en la cámara o célula que contiene al gas muestra, como resultado de la energía intermedia absorbida. Al disponer dos células, una de referencia que contiene un gas no absorbente patrón como puede ser el N<sub>2</sub> y otra célula muestra donde pase el gas húmedo, la radiación en la cámara que contiene el gas no absorbente permanece invariable (no hay variación de presión en la célula), mientras que la radiación a través del gas muestra estará atenuada en la longitud de onda del vapor de agua. De esta forma se consigue una presión variable pulsante en el detector; este posee dos cámaras separadas por un diafragma, el cual hace actuar a un condensador el cual convierte los impulsos de presión a una señal eléctrica que es amplificada y registrada. Este método permite mediciones en un rango amplio, desde el nivel de ppm hasta la saturación. Puede ser utilizado en gases corrosivos, la concentración de los cuales puede ser medida simultáneamente por el uso de otro detector.

### **Humedad en sólidos**

#### **Secado térmico**

El secado térmico es el método más antiguo para la determinación de la humedad que contiene un material. Consiste en aplicar calor al material en estado sólido, granular fibroso e incluso en forma líquida hasta que no puede liberarse más agua a no ser que se aumente la temperatura. El agua es evaporada mientras su presión de vapor dentro del material es mayor que la del aire del horno que le rodea, de esta forma es posible mejorar las condiciones de secado trabajando a temperaturas altas y manteniendo baja la humedad dentro del horno.

El método se fundamenta en el secado del material a una temperatura controlada y tomar la diferencia en peso antes y después del secado, mejorando enormemente la medición mediante instrumentos con microprocesador. La suposición es que el peso perdido es causado únicamente por el agua y que no se han removido otros componentes volátiles, aunque en la realidad esto pudiera no ser así.

## Método de conductividad

La conductividad eléctrica del material se relaciona con la cantidad de agua que contiene. El método de conductividad (ver fig. 2.99) se basa en la medición de la conductividad de una muestra del producto al pasar una corriente a través de unos electrodos que están en contacto con el mismo. Los electrodos forman parte de un puente Wheatstone con la indicación o el registro o en control de la humedad.

El método es eficaz, sin embargo, la lectura viene influenciada considerablemente por el estado de la superficie de contacto de los electrodos, por la presión de los mismos en el material, por la temperatura y en particular por la alta resistividad de algunos materiales como es el papel.

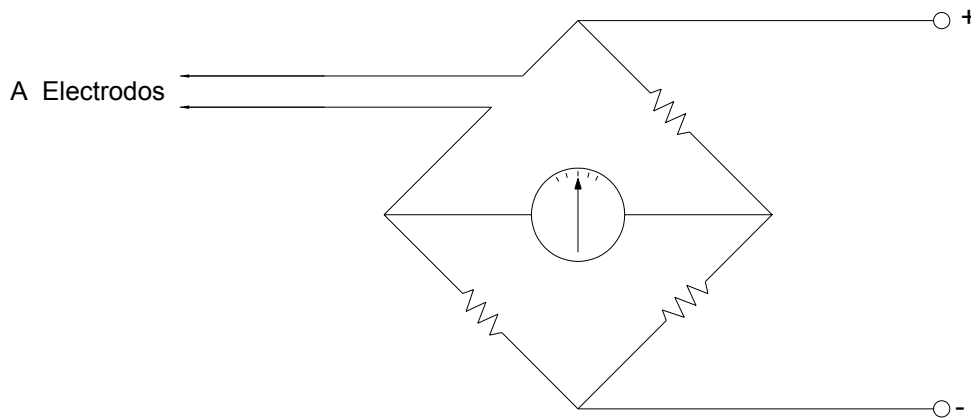


Fig. 2.99 Método de conductividad para medición de humedad en sólidos.

## Método de capacidad

Este método se basa en la variación de la constante dieléctrica que el material muestra experimentalmente entre el estado húmedo y el estado totalmente seco. Un ejemplo de ello es el papel, cuya variación puede estar, entre 2.8 al salir del horno y 80 que es la constante dieléctrica del agua.

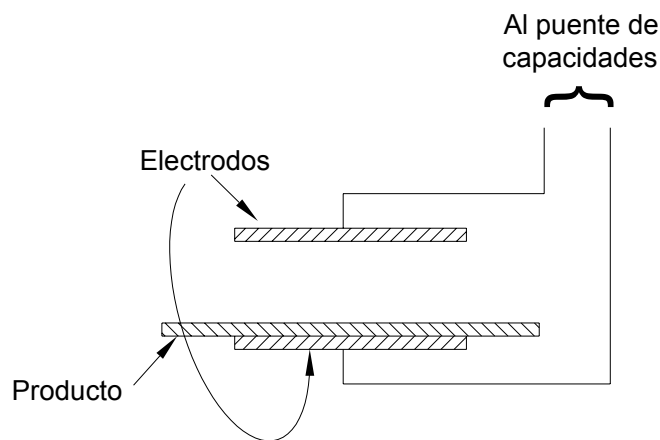


Fig. 2.100 Medición de humedad en sólidos por método capacitivo.

El sistema esta constituido por dos electrodos que forman las placas de un condensador cuyo dieléctrico es el material de cuya humedad a de ser medida empleando un puente de capacidades (ver fig. 2.100).

El sistema es empleado en materiales con un contenido de humedad menor de 20 a 25 % y es independiente de la presión del contacto de los electrodos o de los cambios en la temperatura.

### Método de infrarrojos

La medición de humedad en sólidos empleando la técnica de infrarrojos es un método aplicado preferentemente en la fabricación de papel, en donde una fuente de rayos infrarrojos emite un haz de rayos hacia la superficie del material del cual se desea conocer su humedad. La emisión de infrarrojos es absorbida por el agua que contiene el producto, a una determinada longitud de onda, tal que, el producto absorbe la máxima cantidad de emisión infrarroja, mientras que la celulosa absorbe la mínima. De esta forma, un detector capta la radiación que atraviesa el material e indica la humedad correspondiente.

Con el objeto de que la medida sea independiente de la capa de aire intercala entre el emisor, el material y el detector, de las variaciones del espesor del material y de su posición relativa entre el emisor y el detector, se coloca una fuente adicional que actúa como de referencia. El sistema emisor-detector suele ser móvil para que de este modo explorar toda la superficie de papel. De esta forma, al cantidad de ondas infrarrojas absorbidas a una cierta longitud de onda, dependerá de la humedad que contenga el material. La figura 2.101 muestra un diagrama del funcionamiento de esta clase de instrumento.

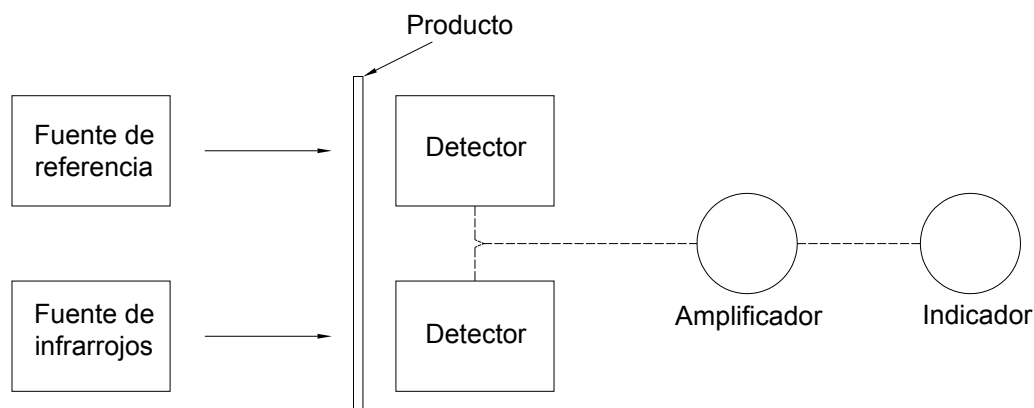


Fig. 2.101 Medición de humedad en sólidos por infrarrojos.

### Método de radiación

El método de radiación (fig. 2.102) se caracteriza por la emisión de una fuente de neutrones de alta energía que se dirige contra el material del proceso y parte de la radiación emitida es reflejada principalmente por los átomos de hidrógeno existentes en las moléculas del material. Dado que el hidrógeno está asociado químicamente con el agua, es posible determinar muy exactamente la humedad del material; de hecho, este método es específico también para átomos de hidrógeno en general. Los principales componentes son un detector de neutrones lentos, junto a una fuente de neutrones rápidos.

El volumen medido es una esfera de hasta décimas de centímetros de diámetro. El método depende de la densidad global del material, pero es en gran forma independiente de las propiedades del material analizado. Es también un dispositivo caro que requiere además supervisión constante de seguridad y una comprobación periódica de la fuente de neutrones.

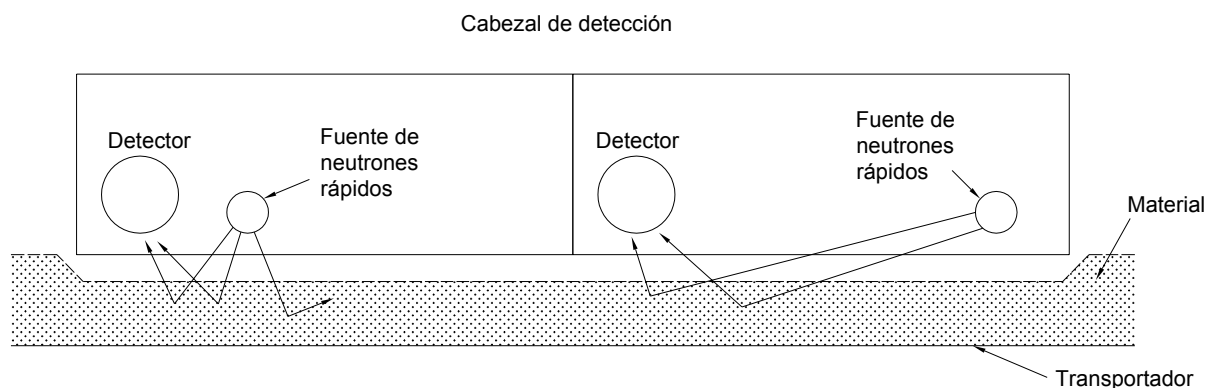


Fig. 2.102 Medición de humedad en sólidos por radiación.

La tabla 2.21 muestra algunas características importantes de los instrumentos de medición de humedad y punto de rocío previamente estudiados.

|                | Sistema                   | Precisión           | Campo de medida | Ventajas                          | Desventajas  | Aplicaciones                          |
|----------------|---------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------------|--|---------------------------------------|
| HUMEDAD        | Cabello                   | 3-5 %               | 15-95 % H.R.    | -Muy adecuado hasta el 70 %       | -Poca precisión  | Aire                                  |
|                | Bulbo seco y húmedo       | 1-2 %               | 0-100 % H.R.    | -Adecuado hasta los 100 °C        | -Necesidad de temperatura diferencial del bulbo húmedo | Gases                                 |
|                | Cloruro de litio          | $\pm 2$ a $\pm 3$ % | 5-95 % H.R.     | -Muy adecuado hasta el 70 %       | -Lento<br>-Envejecimiento                              | Gases excepto los antes especificados |
|                | Polímero                  | 1-2 %               | 30-90 % H.R.    | -Sencillo                         | -Envejecimiento  | Gases                                 |
|                | Secado térmico            | -----               | 0-100 %         | -Patrón                           | -Lento, no adecuado para control                       | Método patrón en sólidos              |
|                | Conductividad             | 2-3 %               | -----           | -Simple<br>-Repetitivo            | -Depende del estado de la superficie                   | Sólidos                               |
|                | Capacidad                 | 2-3 %               | < 25 % H.R.     | -Insensible a presión de contacto | -Bajo campo de medida                                  | Sólidos                               |
|                | Infrarrojos               | $\pm 1$ %           | 0-100 %         | -Sin contacto                     | -Caro  | Papel                                 |
|                | Radiación                 | $\pm 1$ %           | 0-100 %         | -Sin contacto                     | -Caro<br>-Inspección y seguridad                       | Papel y materiales granulares         |
| PUNTO DE ROCÍO | Cámara de niebla          | Método manual       | -----           | -Practico                         | -Operación manual discontinua                          | Gases                                 |
|                | Cloruro de litio          | $\pm 1$ %           | -45 a 60 °C     | -Barato                           | -Lento<br>-Envejecimiento                              | Gases excepto los antes especificados |
|                | Espejo                    | $\pm 1$ %           | -70 a 37 °C     | -Rápido                           | -Caro<br>-Gases limpios                                | Gases limpios                         |
|                | Analizador de infrarrojos | $\pm 1$ %           | 0- 30,000 ppm   | -Rápido                           | -Caro  | Gases                                 |

Tabla 2.21 Sistemas de medición de humedad y punto de rocío.

## 2.41.4 Medición de viscosidad y consistencia

Una propiedad mecánica importante de los fluidos es la viscosidad. Sistemas físicos y aplicaciones tan diversas como el flujo de fluidos en tuberías, el flujo de sangre, lubricación de partes de motor, la dinámica de las gotas de lluvia, las erupciones volcánicas, por nombrar sólo algunos, involucran el flujo de fluidos y son controlados en algún grado por la viscosidad del fluido. La viscosidad se define como la fricción interna del fluido, esto es, a nivel molecular. La naturaleza microscópica de la fricción interna en un fluido es análoga al concepto macroscópico de la fricción mecánica en un sistema de un objeto móvil en una superficie estacionaria plana, en donde se debe suministrar energía para superar el estado inicial establecido entre el objeto y el plano causado por la rugosidad de la superficie y para iniciar y sostener el movimiento del objeto sobre éste plano. De forma análoga, en un fluido se debe suministrar energía para crear movimiento de flujo viscoso mediante la ruptura de los enlaces entre átomos y moléculas y causar que el movimiento sea entre las moléculas del fluido moviéndose relativamente unas con respecto a otras. La resistencia de fluido a la creación y movimiento del flujo se debe a la viscosidad del fluido, el cual sólo se manifiesta cuando se presenta el movimiento en el fluido. Debido a que la viscosidad involucra el transporte de masa con una cierta velocidad, la creación de movimiento para un flujo viscoso es llamada un proceso de transferencia de momentum. La expresión matemática que define el proceso es la siguiente:

$$\tau_{zx} = \frac{\eta dU_x}{dz}$$

En donde  $\tau_{zx}$ , es el esfuerzo cortante el cual es la fuerza por unidad de área ejercida en la parte superior en la dirección  $x$ ;  $dU_x/dz$  es el gradiente de la velocidad en  $x$  en la dirección  $z$  en el fluido; y  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad. En este caso ya que se está tratando con la fuerza que produce el movimiento del fluido, es llamada más específicamente la viscosidad dinámica o absoluta. En mecánica de fluidos la difusión del momentum es una descripción más útil de la viscosidad en donde el movimiento del fluido se considera sin referencia a la fuerza. Este tipo de viscosidad se llama la viscosidad cinemática ( $\nu$ ), y se deriva de la división de la viscosidad dinámica ( $\eta$ ) por la densidad del fluido ( $\rho$ ), como se expresa a continuación:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

La definición de viscosidad de la ecuación anterior es válida sólo para flujo laminar (por capas), y se refiere a la viscosidad molecular o viscosidad intrínseca. La viscosidad molecular es una propiedad del material que depende microscópicamente en las fuerzas de los enlaces y se caracteriza macroscópicamente como la resistencia del fluido a moverse. Cuando el flujo es turbulento, la difusión del momentum consta de las contribuciones viscosas del movimiento, en adición a la viscosidad intrínseca. Las viscosidades de sistemas turbulentos pueden ser tan altas como  $10^6$  veces mayores que las viscosidades de sistemas laminares, dependiendo del número de Reynolds (en año de 1883, el ingeniero británico Osborne Reynolds demostró la existencia de dos tipos de flujo viscoso en tuberías; a velocidades bajas, las partículas del fluido siguen las líneas de corriente, llamado flujo laminar; a velocidades más elevadas, surgen fluctuaciones en la velocidad del flujo, o remolinos, llamado flujo turbulento; con esto Reynolds también determinó que la transición del flujo laminar al turbulento era función de un único parámetro, que desde entonces se conoce como número de Reynolds). El número de Reynolds (el cual es adimensional) es el producto de la velocidad, la densidad del fluido y el diámetro de la tubería dividido entre la viscosidad del fluido.

Si el número es menor de 2,100, el flujo a través de la tubería es siempre laminar; cuando los valores son más elevados suele ser turbulento. El concepto de número de Reynolds es esencial para gran parte de la moderna mecánica de fluidos.

La viscosidad puede entenderse como la propiedad que tiene un fluido el cual tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan una cierta resistencia a fluir; los fluidos de baja viscosidad fluyen con facilidad. La fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo a las capas adyacentes de fluido determina su viscosidad. Por ello, la magnitud con la que un fluido adquiere movimiento (velocidad) es una medida de su viscosidad.

A este respecto, de acuerdo a la teoría molecular, cuando un fluido empieza a fluir bajo la influencia de la gravedad, las moléculas de las capas estacionarias del fluido deben cruzar una frontera o límite para entrar en la región de flujo. Una vez cruzado el límite, estas moléculas reciben energía de las que están en movimiento y comienzan a fluir. Debido a la energía transferida, las moléculas que ya estaban en movimiento reducen su velocidad. Al mismo tiempo, las moléculas de la capa de fluido en movimiento cruzan el límite en sentido opuesto y entran en las capas estacionarias, con lo que transmiten un impulso a las moléculas estacionarias. El resultado global de este movimiento bidireccional de un lado al otro del límite es que el fluido en movimiento reduce su velocidad, el fluido estacionario se pone en movimiento, y las capas en movimiento adquieren una velocidad media.

Esto puede observarse claramente de acuerdo al sistema de medición de viscosidad expuesto por Newton, y del cual dedujo una importante definición de viscosidad. Considérese las placas paralelas mostradas en la figura 2.103.

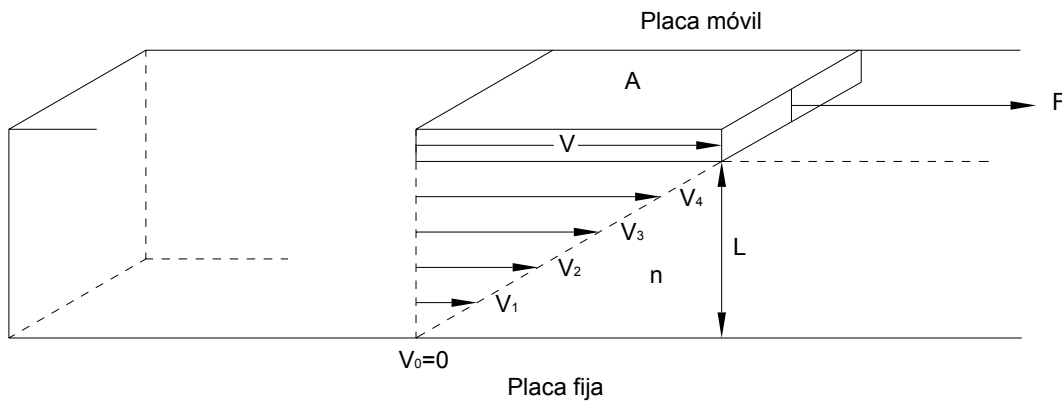


Fig. 2.103 Modelo de placas paralelas para medición de viscosidad.

Aquí puede observarse que la velocidad de la superficie en movimiento es directamente proporcional a la fuerza  $F$  y a la separación  $L$  entre las paredes de las placas (o el espesor de la capa del fluido); en tanto que es inversamente proporcional al área  $A$  y al coeficiente de viscosidad  $\eta$ . Esto es:

$$V = \frac{FL}{\eta A}; \text{ De donde se obtiene: } \eta = \frac{FL}{VA}$$

Por lo tanto, la viscosidad de un fluido de acuerdo a la definición de Newton es la resistencia que ofrece el fluido al movimiento entre dos placas paralelas separadas por una distancia fija, una de estas placas es fija mientras que la otra es móvil (ver fig. 2.103). Esta resistencia se expresa como el cociente entre el esfuerzo cortante (existen tres clases de esfuerzos conocidos; el esfuerzo de tensión, el esfuerzo de compresión y el esfuerzo cortante, el cual ocurre cuando fuerzas iguales y opuestas no tienen la misma línea de acción, tal como ocurre en el caso de las placas paralelas) se define por unidad de área ( $F/A$ ) y la velocidad cortante por unidad de espesor de la capa del fluido ( $V/e$ ), esto es:

$$\eta = \frac{F/A}{V/e} = \frac{Fe}{AV}$$

De esta forma, los fluidos newtonianos son aquellos en donde existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante unitario y la velocidad cortante unitaria, es decir, la representación gráfica de  $F/A$  con relación a  $V/e$  es una línea recta. Esto implica que la constante de proporcionalidad es llamada el coeficiente de viscosidad, y una gráfica de Velocidad cortante vs. Esfuerzo cortante proporciona una línea recta con una pendiente  $\eta$ , como se muestra en la figura 2.104 a.

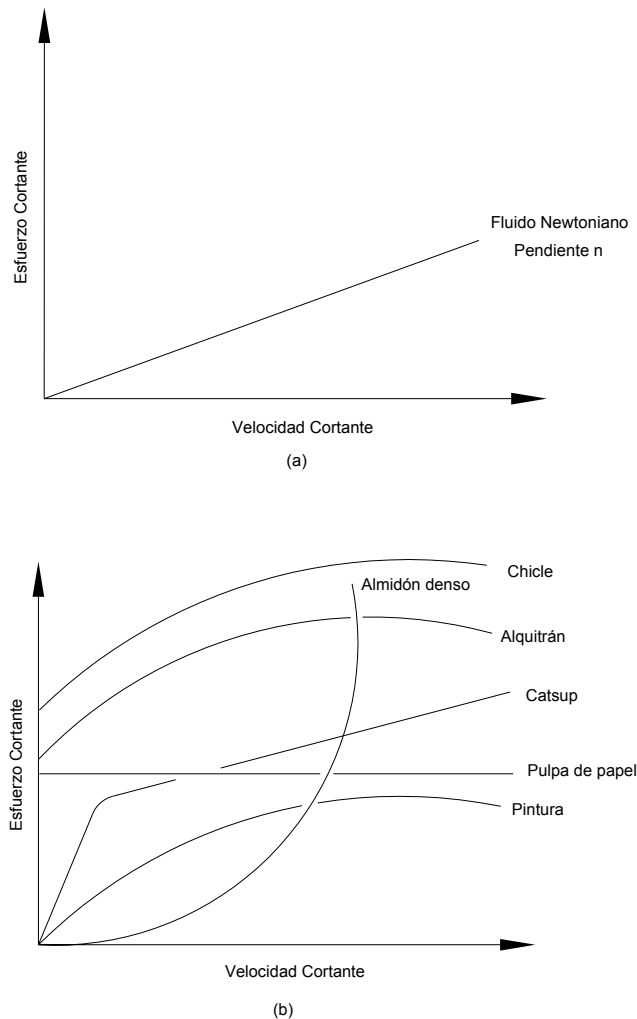


Fig. 2.104 Comportamiento de fluidos newtonianos (a), comportamiento de fluidos no-newtonianos (b).

Existe, sin embargo, un gran grupo de fluidos para los cuales la viscosidad si depende de la elongación (deformación). Tales fluidos se conocen como no newtonianos y su estudio se conoce como reología. Los fluidos en donde no existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad cortante se les llaman fluidos no-newtonianos (ver fig. 2.104 b), dado que no siguen la definición de Newton.

Por ello se dice, que si la viscosidad a lo largo del fluido es independiente de la velocidad de deformación (o elongación), entonces el fluido es un fluido newtoniano. Los fluidos newtonianos de esta forma, no cambian su viscosidad debido al esfuerzo aplicado. La viscosidad de los fluidos newtonianos es función de la temperatura, donde la viscosidad esta en relación inversamente proporcional a la temperatura, es decir, al incrementar la temperatura de un fluido newtoniano, su viscosidad disminuye y al disminuirla hasta el grado de enfriarlo, su viscosidad aumenta.

Esto es debido a que un aumento en la temperatura de un fluido newtoniano, conlleva una disminución en la densidad. Por lo que en un fluido menos denso hay menos moléculas por unidad de volumen que puedan transferir impulso desde la capa en movimiento hasta la capa estacionaria. Esto, a su vez, afecta a la velocidad de las distintas capas. El momento se transfiere con más dificultad entre las capas, y la viscosidad disminuye. En algunos líquidos, el aumento de la velocidad molecular compensa la reducción de la densidad. Los aceites de silicona, por ejemplo, cambian muy poco su tendencia a fluir cuando cambia la temperatura, por lo que son muy útiles como lubricantes cuando una máquina está sometida a grandes cambios de temperatura.

Los fluidos no-newtonianos si dependen de la elongación, por lo que la viscosidad de estos fluidos depende de la clase de esfuerzo a que estén sujetos, ya sea de tensión o de compresión. Si la razón de fuerza (esfuerzo) de tensión aplicada sobre un área de un fluido no-newtoniano es muy elevada, en forma casi instantánea, su viscosidad aumenta considerablemente, tanto, que no fluirá del todo, de hecho se “partira” y no podrá fluir debido a que la presión aplicada rápidamente causa un decremento en el volumen y un correspondiente incremento en la fuerza de enlace, lo cual a su vez incrementa la fricción interna; por lo que para que un fluido no-newtoniano de este tipo pueda fluir y su viscosidad disminuya, es necesario que el esfuerzo de tensión sea aplicado lenta y uniformemente. Pero si en el caso anterior, alguna clase de fluidos no-newtonianos aumentan su viscosidad bajo la aplicación de un esfuerzo de tensión, existe una clase especial de fluidos no-newtonianos que presentan comportamiento opuesto, al aplicarles un esfuerzo de compresión su viscosidad disminuye, a tal grado, que puede fluir con facilidad. Estos fluidos no-newtonianos presentan propiedades de sólido hasta que se les somete a un esfuerzo de compresión, luego entonces sus propiedades cambian y actúan como si fueran líquidos; como es sabido, en los sólidos las moléculas permanecen en una posición fija, mientras que en los líquidos las moléculas se mueven libremente.

En el modelo de placa fija y móvil de Newton, se ha observado que muchos plásticos requieren la aplicación de una cierta fuerza a la placa móvil antes de que esta se mueva y una vez en movimiento la viscosidad aparente disminuye al incrementarse la velocidad de la placa (lo que gráficamente representan una baja en la pendiente). Otros materiales que en reposo están coagulados, pasan al estado líquido al ser agitados (materiales tixotrópicos); mientras que otros materiales como la pasta de papel, prácticamente no tiene pendiente (ver fig. 2.104 b). La clase de sustancias que presenta este comportamiento se les denomina por sustancias de cuerpo de St Venant.

Hagen-Poiseuille (Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen, ingeniero hidráulico alemán y Jean Louis Marie Poiseuille, fisiólogo francés; ambos del siglo XIX) definieron la viscosidad en términos más prácticos expresando la relación entre los esfuerzos y las viscosidades cortantes para un tubo capilar de acuerdo a la siguiente expresión:



$$\eta = \frac{\Delta P / 2L}{4Q / \pi R^4} = \frac{\pi \Delta P R^4}{8QL}$$

En donde:

- $\Delta P$  = Presión diferencial a través del líquido en el tubo capilar
- $R$  = Radio interior del tubo
- $Q$  = Caudal del fluido
- $L$  = Longitud del tubo

### Dimensiones y unidades de la viscosidad

Para hacer que una capa de fluido se mantenga moviéndose a mayor velocidad que otra capa es necesario aplicar una fuerza continua. La viscosidad absoluta en poises se define como la magnitud de la fuerza (medida en dinas por centímetro cuadrado de superficie) necesaria para mantener (en situación de equilibrio) una diferencia de velocidad de 1 cm por segundo entre capas separadas por 1 cm.

Las dimensiones de la viscosidad dinámica o absoluta definida por la fórmula de Hagen-Poiseuille son  $M L^{-1} T^{-1}$  y las unidades en el sistema internacional (SI) es Pa·s (Pascal segundo), en donde 1 Pa = 1 N s/m<sup>2</sup>; en el C.G.S. la unidad es el poise (P), equivalente a 1 dina s/cm<sup>2</sup> y el centipoise (cp) equivalente a 0.01 poise, la viscosidad del agua a 20 °C por ejemplo, es de 1 centipoise y a 100 °C disminuye hasta 0.28 centipoise.

Las dimensiones para la viscosidad cinemática (resultado del cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido) son  $L^2 T^{-1}$ , y la unidad en el sistema internacional (SI) es m<sup>2</sup>/s, aunque para la mayoría de las situaciones prácticas esto es usualmente muy grande; por lo que se prefiere en la mayoría de los casos utilizar las unidades cm<sup>2</sup>/s del sistema C.G.S. y que son llamadas stoke (St); para valores aun más pequeños se emplea el centistoke (cs), que equivale a 0.01 stoke.

En el caso de que la viscosidad se exprese como una función del tiempo que un volumen determinado del fluido necesita para pasar a través de un orificio o tubo capilar, se utilizan las siguientes unidades.

Unidades Saybolt (empleadas en E.U.), unidades Redwood (empleadas en Gran Bretaña) y unidades Engler (empleadas en Europa). En donde existe una relación entre la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) y las unidades anteriores por medio de la fórmula:

$$\nu = (A)(t) - \frac{B}{t}$$

Con los siguientes valores para las constantes según el tipo de viscosímetro empleado:

| Viscosímetro | A       | B    |
|--------------|---------|------|
| Saybolt      | 0.0022  | 1.8  |
| Redwood      | 0.0026  | 1.72 |
| Engler       | 0.00147 | 3.74 |

## Consistencia

Por definición, el esfuerzo es la razón de fuerza aplicada entre el área sobre la que actúa, mientras que la deformación es el cambio aparente en las dimensiones o en la forma de un cuerpo como resultado de la aplicación de un esfuerzo. El esfuerzo se refiere a la causa de una deformación elástica, mientras que la deformación se refiere a su efecto. La consistencia por lo tanto, se define como el grado de deformación que presentan los fluidos cuando se les somete a un esfuerzo constante.

El termino consistencia se refiere en esencia a la viscosidad de suspensiones de partículas insolubles en un líquido y es característica de la fluidez del mismo. El termino consistencia se aplica en la industria de pinturas y papel por ejemplo. A pesar de que la consistencia es una forma específica de viscosidad, las unidades de la consistencia son totalmente distintas a la viscosidad, de hecho son unidades arbitrarias y son específicas para cada tipo de aplicación. Por ejemplo, en la industria del papel, la consistencia designa la proporción entre el peso de materia seca o fibra de pulpa seca y el peso total de los sólidos más el agua que los transporta; esto se expresa así:

$$\% \text{Consistencia} = \frac{\text{Peso de sólidos secos en kg}}{\text{Peso de sólidos secos + agua en kg}} \times 100$$

## Medidores de viscosidad

Los instrumentos para mediciones de viscosidad se diseñan para determinar "la resistencia de un fluido al movimiento". El flujo de fluidos bajo una geometría dada en un instrumento define las velocidades de elongación (velocidad cortante) y los correspondientes esfuerzos que son la medida de la resistencia al flujo. Si una de las dos variables se fija y se controla, entonces la otra depende de la viscosidad del fluido. Si el flujo es simple, tal que ambas variables (elongación y esfuerzo) puedan ser determinadas en forma exacta a partir de las cantidades medidas, entonces se puede determinar la viscosidad absoluta dinámica; de otra manera se establecerá la viscosidad relativa.

El principio básico de todos los viscosímetros es proporcionar una cinemática de flujo lo más simple posible, preferentemente flujo unidimensional (isométrico), con el fin de determinar la velocidad de elongación exactamente, fácilmente, y en forma independiente al tipo de fluido. La resistencia a tal flujo se mide, y por lo tanto se determina el esfuerzo. Entonces la viscosidad se encuentra fácilmente como la relación entre el esfuerzo y su correspondiente velocidad de elongación.

Los medidores de viscosidad se clasifican de acuerdo al diseño y al sistema de operación en discontinuos y en continuos. Los métodos y medidores de viscosidad son los siguientes:

Discontinuos:

- Viscosímetros de capilar
- Viscosímetros de esfera y cilindro en caída
- Viscosímetro de burbuja ascendente

Continuos:

- Viscosímetro de cilindros concéntricos
- Viscosímetro de cono y plato
- Viscosímetro de discos paralelos
- Método de oscilación
- Método de caída de presión
- Método de par de torsión
- Método de rotámetro
- Método de ultrasonidos

### Métodos y viscosímetros discontinuos

#### Viscosímetros de capilar

El viscosímetro de capilar se basa en la teoría de flujo laminar totalmente desarrollado (Hagen-Poiseuille) y se muestra en la figura 2.105. La longitud del tubo capilar es muchas veces mayor que su diámetro pequeño, así que la entrada de flujo es despreciable o esta compensada para una medición más exacta o para tubos más cortos. El método consiste en medir el tiempo que emplea un volumen dado de un fluido en descargar a través del tubo capilar.

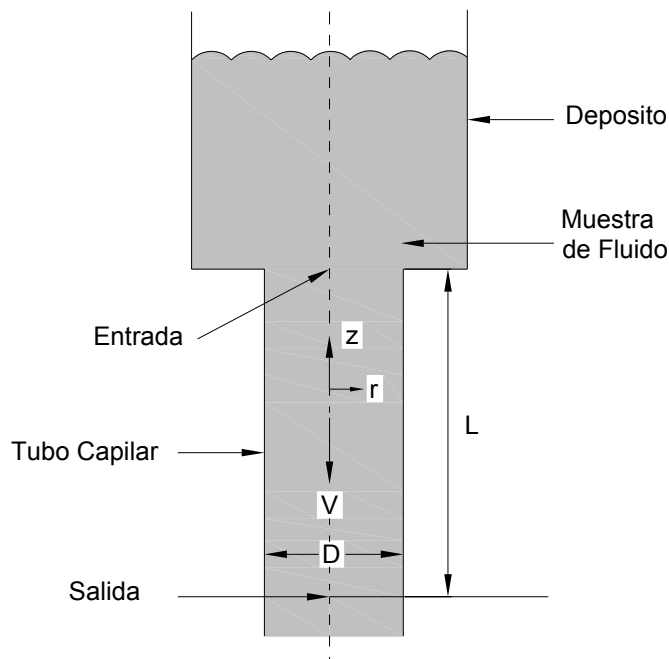


Fig. 2.105 Geometría de viscosímetro de capilar.

Las ventajas de los capilares sobre los viscosímetros de rotación son el bajo costo, la alta exactitud (particularmente con tubos largos), y la habilidad de alcanzar velocidades muy altas, aún con muestras de alta viscosidad. La principal desventaja son el alto tiempo de residencia y la variación del esfuerzo a lo largo del fluido, lo cual puede cambiar la estructura de fluidos complejos, así como causar calentamiento con muestras de viscosidades altas.

### **Viscosímetro de capilar de vidrio**

Estos viscosímetros son muy sencillos y baratos, su geometría es en forma de U con al menos dos bulbos de retención conectados a un pasaje del tubo capilar con diámetro interno conocido. El fluido es drenado (entre marcas grabadas) a un bulbo de retención de volumen conocido. Se mide el tiempo del volumen del fluido en viajar (por el efecto de la gravedad) a través del capilar.

Estos viscosímetros son modificaciones al diseño original llamado viscosímetro de Ostwald, las cuales buscan minimizar efectos indeseables, para así incrementar el rango de viscosidad, o para poder ser útiles de acuerdo a los requerimientos de los fluidos de prueba, como la opacidad por ejemplo. Estos viscosímetros generalmente se utilizan para fluidos de baja viscosidad.

### **Viscosímetro de copa/orificio (de capilar corto)**

El principio de estos viscosímetros es similar a los del tubo capilar excepto que el flujo a través de un capilar corto ( $L/D < 10$ ) no satisface el flujo de tipo Hagen-Poiseuille. El tiempo de viaje,  $\Delta t$ , representa la viscosidad relativa para propósitos de comparación y se expresa como segundos de “viscosímetro”, como segundos Saybolt, o segundos Engler, o grados. Debido a su simplicidad, confiabilidad, y bajo costo, estos viscosímetros se utilizan ampliamente para fluidos newtonianos, como en las industrias de petróleo y otras, en donde se requieren correlaciones sencillas entre las propiedades relativas y los resultados deseados. Sin embargo, estos viscosímetros no son adecuados para medición de viscosidad absoluta, ni para fluidos no newtonianos.

### **Viscosímetros de esfera y cilindro en caída**

La esfera en caída es un método en el cual, se permite que una esfera caiga libremente en una distancia determinada a través de un medio líquido viscoso y se determina su velocidad. Esto es, se mide el tiempo de caída de la esfera.

La figura 2.106 es un diagrama esquemático del método de la esfera y que muestra la simplicidad de su diseño. La aproximación más sencilla y efectiva en costo en la aplicación de este método para fluidos transparentes podría ser el uso de cilindros largos graduados llenos con el líquido. Con una distancia marcada en el cilindro cerca del centro axial y radial (la región menos influenciada por las paredes y los extremos del contenedor), una esfera (tal como una canica del material que no reaccione con el líquido) con una densidad conocida, cae libremente a lo largo de la longitud del cilindro. Ya que la esfera atraviesa la región marcada de longitud conocida a su velocidad final, la medición del tiempo que se toma en este viaje permite calcular la velocidad de la esfera. Habiendo medido todos los parámetros se puede determinar la viscosidad. Este método es útil para líquidos con viscosidades absolutas entre  $10^{-3}$  Pa·s y  $10^5$  Pa·s.

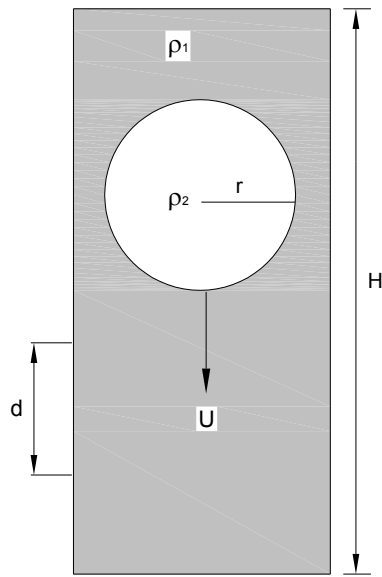


Fig. 2.106 Esquema general del viscosímetro de esfera en caída.

### Cilindro en caída

Este método es similar en el concepto al de la esfera excepto que se deja caer un cilindro con extremos planos en forma vertical en la dirección de su eje longitudinal a través de una de la muestras de líquido dentro de un contenedor cilíndrico. Un diagrama esquemático de la configuración se muestra en la figura 2.107.

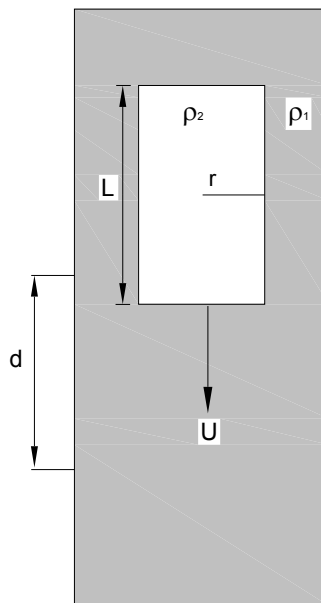


Fig. 2.107 Esquema de la geometría del cilindro en caída.

A diferencia del fluido alrededor de la esfera que cae, el movimiento del fluido alrededor del cilindro es muy complejo. Los efectos de los extremos del contenedor se minimizan por la creación de un espacio pequeño entre el cilindro y la pared del contenedor. Un potencial problema con este método es, que si el cilindro y el contenedor no son concéntricos, el esfuerzo no homogéneo resultante puede causar que el movimiento en caída del cilindro sea excéntrico.

En el pasado, este método fue utilizado principalmente para determinar viscosidades relativas entre fluidos transparentes. En la actualidad, con un diseño adecuado del cilindro y del contenedor, este método se puede utilizar para alcanzar viscosidades absolutas desde los  $10^{-3}$  Pa·s a  $10^7$  Pa·s.

### Método de caída de esfera en líquidos opacos

Los métodos anteriormente descritos se han utilizado extensivamente para aplicaciones en líquidos transparentes en donde es posible la observación visual del cuerpo que cae. Para líquidos opacos, sin embargo, estos métodos requieren el uso de una técnica para determinar, frecuentemente en sitio, la posición del cuerpo que cae con respecto al tiempo. Las técnicas han cambiado pero todas tienen en común la habilidad de detectar el cuerpo a medida que se mueve después del sensor. Un estudio reciente, demuestra que el contraste en la conductividad eléctrica entre la esfera y el líquido opaco pudiera ser de utilidad para medir dinámicamente la esfera móvil si se utilizan electrodos adecuadamente colocados en las paredes del contenedor como se muestra en el diagrama de la figura 2.108.

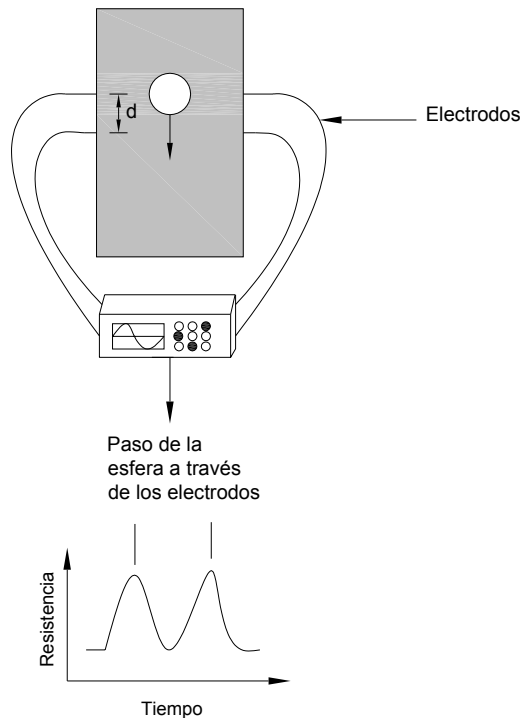


Fig. 2.108 Esquema de la medición de líquidos opacos por esfera en caída empleando electrodos.

## **Viscosímetro de burbuja ascendente**

Para muchos procesos industriales los viscosímetros de burbuja ascendente han sido utilizados como un método de comparación para la viscosidad relativa de líquidos transparentes (como barniz, laca y cerveza) por décadas. Este método ha sido pensado como una derivación del método de la esfera que cae; sin embargo, existen dos diferencias principales entre los dos métodos. La primera diferencia es que la densidad de la burbuja es menor que la de líquido alrededor; mientras que la segunda diferencia es que la burbuja propia, tiene una viscosidad única.

Durante el ascenso, se debe tener mucho cuidado para evitar la contaminación de la burbuja y su superficie con las impurezas del líquido que la rodea. Las impurezas se pueden difundir a través de la superficie de la burbuja y combinar con el fluido adentro. Debido a que la burbuja tiene baja viscosidad, el movimiento ascendente en el medio viscoso induce una resistencia en la burbuja la cual genera un movimiento circular dentro de ella.

Este movimiento puede distribuir las impurezas en forma eficiente a lo largo de toda la burbuja, por lo tanto cambiando su viscosidad y densidad. Las impurezas depositadas en la superficie de la burbuja pueden formar una capa que puede afectar en forma significativa el ascenso de la misma. Estas impurezas en la superficie también pueden contribuir significativamente a la distribución no homogénea de fuerzas de tensión en la interfase.

El método más simple para minimizar los efectos mencionados es mediante la introducción de un volumen específico de aire, con una jeringa u otro dispositivo similar, en el extremo inferior del contenedor cilíndrico y medir el tiempo de ascensión de la burbuja.

La burbuja de aire se comporta como esfera sólida muy pequeña, la cual vuelve las fuerzas de tensión de interfase y el movimiento del fluido interno despreciables. El diseño de este dispositivo es muy similar al de la esfera o el cilindro en caída ya que los tres métodos emplean cilindros graduados como contenedores del fluido de muestra.

## **Métodos y viscosímetros continuos**

### **Viscosímetro de cilindros concéntricos**

La principal ventaja de los viscosímetros rotacionales comparados contra otros, es su habilidad para operar continuamente a cierta velocidad, para que puedan ser efectuadas convenientemente otras mediciones en estado estacionario. De esta forma, se puede detectar y determinar si existe dependencia en el tiempo. También, se pueden efectuar mediciones subsecuentes con el mismo instrumento a diferentes velocidades, temperaturas, etc. Por estas y otras razones, los viscosímetros rotacionales están entre los más ampliamente utilizados para mediciones reológicas.

Los viscosímetros de tipo cilindros concéntricos (ver fig. 2.109) se utilizan normalmente cuando se requieren determinar viscosidades absolutas, las cuales a su vez, requieren el conocimiento de datos de velocidad y esfuerzo bien definidos. Tales instrumentos están disponibles con diferentes configuraciones y pueden ser utilizados para casi cualquier fluido. Existen modelos para altas y bajas velocidades.

Usualmente, el torque en el cilindro estacionario y la velocidad rotacional en el otro cilindro se miden mediante la determinación del esfuerzo cortante y de la velocidad cortante, las cuales se necesitan para el cálculo de la viscosidad. Una vez que el torque es medido, es muy sencillo describir el esfuerzo cortante del fluido en cualquier punto entre los cilindros y con esto conocer la viscosidad del fluido.

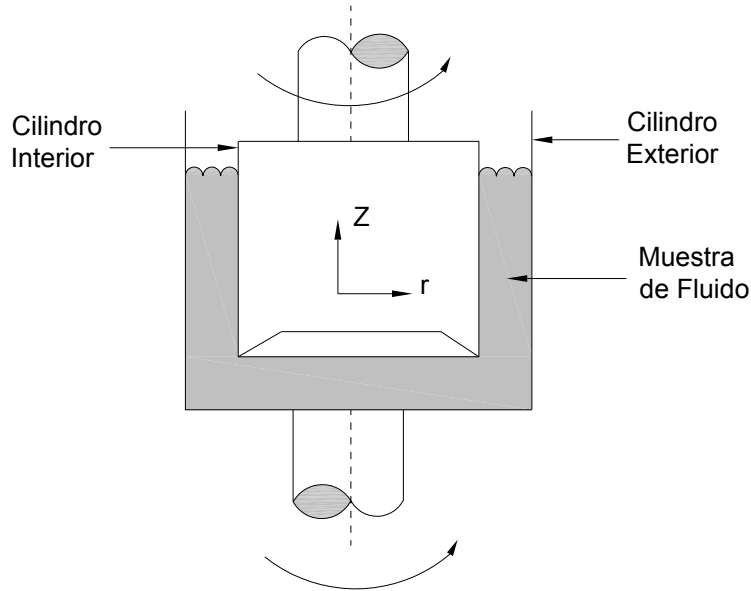


Fig. 2.109 Viscosímetro de cilindros concéntricos.

### Viscosímetro de cono y plato

La geometría sencilla de cono y plato (fig. 2.110) proporciona una velocidad uniforme y mediciones directas de las primeras diferencias de esfuerzo normal. Este es el método más popular para la medición de las propiedades de fluidos no newtonianos.

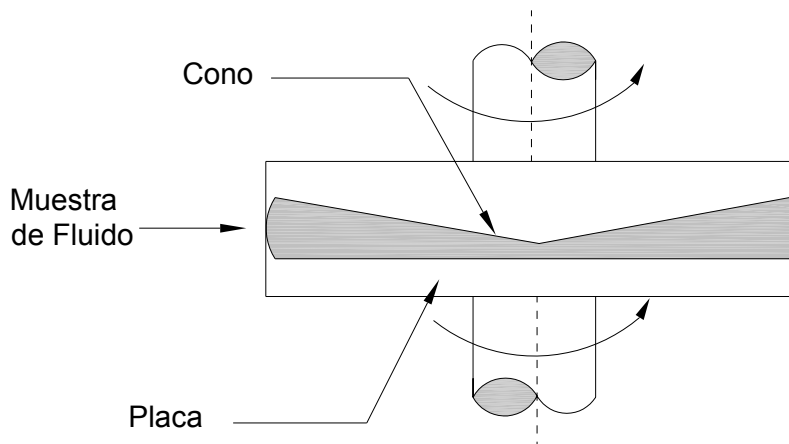


Fig. 2.110 Geometría del viscosímetro de cono y plato.



## Viscosímetro de discos paralelos

Ésta geometría, la cual consiste de un disco rotando con una cavidad cilíndrica (ver fig. 2.111), es similar a la geometría de cono y plato, y muchos instrumentos permiten el uso de ambos. Sin embargo, no es uniforme, si no que depende de la distancia radial del eje de rotación al espacio entre los platos.

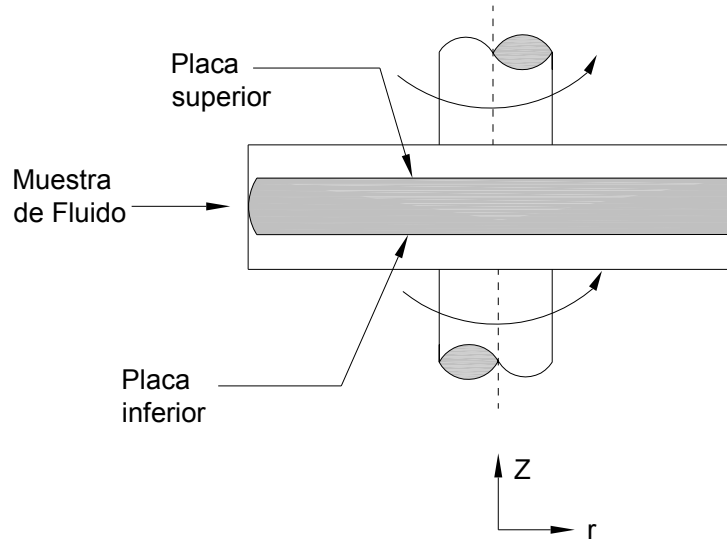


Fig. 2.111 Geometría de discos paralelos.

## Método de oscilación

Si se contiene un líquido dentro de un tanque suspendido por algún sistema torsional el cual es puesto en oscilación con respecto a su eje vertical, entonces el movimiento del tanque experimentará una amortiguación gradual. En una situación ideal, la amortiguación del movimiento del tanque se incrementa como resultado del acoplamiento de líquido al tanque y el acoplamiento entre las capas de líquido. En una situación práctica, existen también pérdidas por fricción dentro del sistema que ayudan en el efecto de amortiguación y que deben ser compensadas en el cálculo final. A partir de las observaciones de la amplitud y períodos de tiempo de las oscilaciones, se puede calcular la viscosidad de líquido. Un diagrama esquemático de la configuración básica de este método se muestra en la figura 2.112. En seguida de la excitación oscilatoria inicial, se puede utilizar una fuente de luz (como un láser de baja intensidad) para medir las amplitudes y períodos de las oscilaciones resultantes mediante la reflexión en el espejo fijado a la barra de suspensión para proporcionar una medición exacta del decremento de las oscilaciones y los períodos.

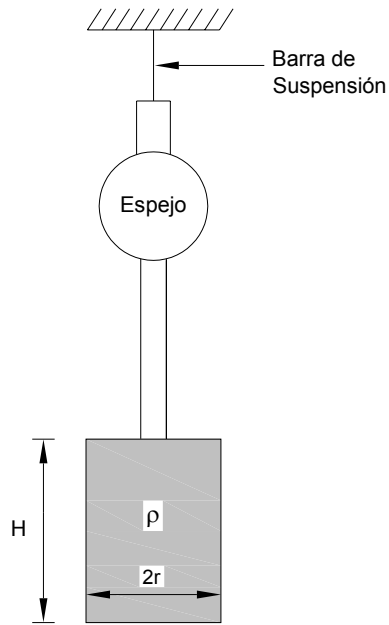


Fig. 2.112 Medición de viscosidad por oscilación.

### Método de caída de presión

Este método se caracteriza por la medición de la caída de presión producida por un tubo capilar al paso del fluido que es bombeado a caudal constante (ver fig. 2.113). Las tomas se sitúan antes y después del tubo capilar y se conectan a un transmisor de presión diferencial. La forma continua de medición de viscosidad que tiene este arreglo, es la perfecta forma del modelo Hagen-Poiseuille.

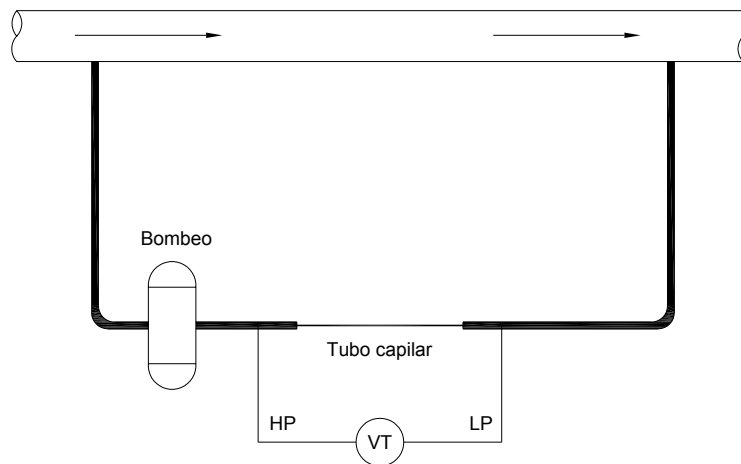


Fig. 2.113 Método de medición de viscosidad por caída de presión.

### Método de par de torsión

La viscosidad de un fluido también puede conocerse a partir de un par de torsión necesario para hacer girar un elemento en el fluido. Este elemento de forma definida, gira a través de un resorte calibrado por medio de un motor síncrono (ver fig. 2.114). El ángulo de desviación en el movimiento entre el eje del motor y el elemento inmerso en el fluido es proporcional a la viscosidad. Este ángulo se mide en desplazamiento de contactos o en variación de resistencia.

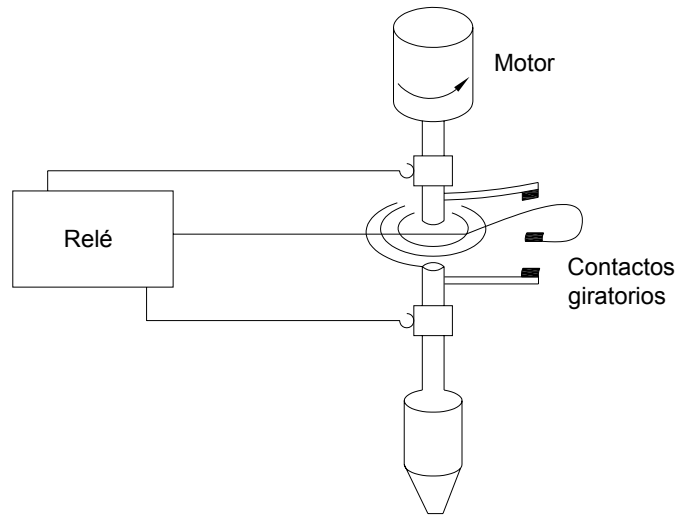


Fig. 2.114 Medición de viscosidad por par de torsión.

### Método de rotámetro

El método consiste en mantener un flujo constante del fluido y colocar un rotámetro con un flotador sensible a la viscosidad, debido a que el caudal es constante, la posición del flotador depende únicamente de la viscosidad del fluido (ver fig. 2.115). Es posible también acoplar un transmisor electrónico al rotámetro.

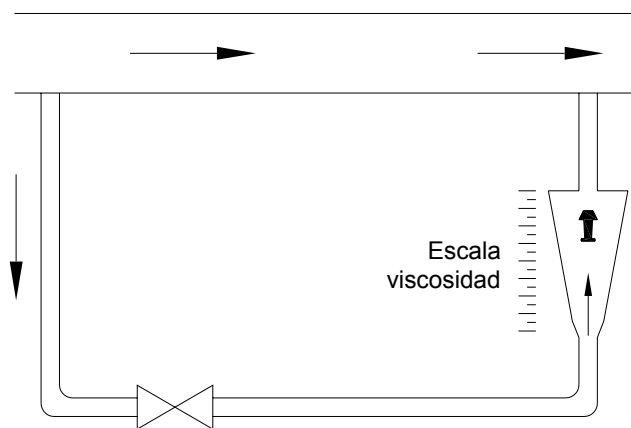


Fig. 2.115 Medición de viscosidad empleando un rotámetro.

## **Método de ultrasonidos**

La viscosidad juega un papel importante en la absorción de energía de una onda acústica viajando a través de un líquido. Utilizando ondas ultrasónicas ( $10^4 \text{ Hz} < f < 10^8 \text{ Hz}$ ), la elasticidad, visco-elasticidad, y respuesta viscosa de un líquido puede ser medida hasta en tiempos de 10 nanosegundos. Cuando la viscosidad del fluido es baja, la escala de tiempo que resulta para la relajación estructural es más corta que el período de las ondas ultrasónicas y el fluido se encuentra en estado de relajación. Los fluidos de alta viscosidad sujetos a ondas ultrasónicas responden como fluidos duros ya que el equilibrio estructural debido a la perturbación acústica no logra completarse antes del próximo ciclo de la onda. Consecuentemente, se puede decir que el fluido está en un estado de relajación que se caracteriza por la dispersión (velocidad de onda dependiente de la frecuencia) y módulo elástico que refleja un líquido mucho más duro.

## **Medidores de consistencia**

Los medidores de consistencia más relevantes son los que a continuación se enlistan:

- Medidor de regla graduada
- Medidor de disco rotativo
- Medidor de paletas rotativas
- Medidor de flotador
- Medidor de puente hidráulico
- Medidor electroóptico

### **Medidor de regla graduada**

Este es un método muy simple que consiste en medir la distancia que recorre el fluido al abrirse una compuerta de apertura rápida sobre una regla graduada inclinada en un ángulo conocido en un determinado tiempo. La distancia recorrida en un tiempo establecido, es una medida de la consistencia del producto.

### **Medidor de disco rotativo y paletas rotativas**

Otro tipo de medidor de consistencia es el del tipo disco rotativo que mide el par necesario para hacer girar a velocidad constante un disco con perfiles caracterizados dentro del fluido que corre en el interior de una tubería. Una modificación al instrumento anterior es el desarrollado para instalarse en tanque de proceso, es el medidor de paleta; donde una paleta de forma en hélice gira por gracias a la acción de un motor, dentro del fluido. El par desarrollado por el agitador es medido con un transmisor electrónico que le permite actuar sobre un controlador y regular así directamente la consistencia.

### **Medidor de flotador**

En este instrumento el fluido es forzado a circular por un tubo en cuyo interior se encuentra un eje sensible con varias placas transversales incorporadas. La deformación que sufre el fluido al pasar entre las placas es función de su consistencia. La fuerza resultante que experimenta el elemento sensible es detectada por un transmisor electrónico.

## Medidor de puente hidráulico

El instrumento de medición de consistencia de puente hidráulico se caracteriza por el bombeo del fluido a través de un paralelogramo o puente hidráulico que crea una presión diferencial entre un vértice y su opuesto. La medida de la presión diferencial haciendo uso de un transmisor, será una medida de la consistencia del fluido.

## Medidor electroóptico

Este es un método que se aplica específicamente en la industria del papel. Se basa en la captación de luz de una mezcla de pulpa de papel y agua, a la que se le enfoca un haz de luz a través de fibra óptica. Por medio de otra terminal de fibra de fibra óptica la luz es recogida (reflejada) y viaja a través de ella hasta donde dos detectores captan la luz reflejada de la mezcla; cada detector posee un filtro de modo tal que en uno de ellos el agua del fluido absorbe la luz, mientras que en el otro no interviene prácticamente y es tomado como referencia. De esta forma, el cociente de las dos señales es una función de la cantidad de agua existente entre las partículas del producto, esto es, de la consistencia del producto.

La tabla 2.22 presenta algunas de las características más relevantes de los medidores de viscosidad y consistencia estudiados anteriormente.

|              | Sistema                              | Precisión                   | Alcance de medida | Ventajas   | Desventajas                                | Aplicaciones                                |
|--------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------|--|--|---|
| VISCOSIDAD   | Tiempo de descarga en tubo capilar   | $\pm 0.1 \%$                | Hasta 20,000 cp   | -Sencillo  | -Método discontinuo                        | Pinturas<br>Barnices<br>Laboratorio         |
|              | Esfera en caída o burbuja ascendente | $\pm 0.1 \%$                | Hasta 200,000 cp  | -Sencillo<br>-Repetibilidad  | -Método discontinuo                        | Aceites de alta viscosidad<br>Laboratorio   |
|              | Cilindro en caída                    | $\pm 1 \%$                  | Hasta 200,000 cp  | -Sencillo<br>-Repetibilidad  | -Método discontinuo                        | Pinturas<br>Aceites<br>Jabones<br>Plásticos |
|              | Presión diferencial en tubo capilar  | $\pm 2 \%$                  | Hasta 3,000 cp    | -Continuo<br>-Solución directa a la ecuación de Hagen-Poiseuille<br>-Transmisión | -Frágil                                    | Fluidos en general<br>Laboratorio           |
|              | Par de torsión de un elemento        | $\pm 1 \%$                  | Hasta 300,000 cp  | -Continuo<br>-Transmisión<br>-Tanques abiertos o cerrados                        | -Calibración del resorte                   | Fluidos en general                          |
|              | Rotámetro con flotador sensible      | $\pm 2 \text{ a } \pm 4 \%$ | Hasta 30,000 cp   | -Método continuo   | -Flotador sensible                         | Fuel-oil                                    |
|              | Ultrasonidos                         | -----                       | Hasta 50,000 cp   | -Método continuo   | -Necesidad de compensación por temperatura | Fluidos en general                          |
| CONSISTENCIA | Regla graduada                       | 0.1 %                       | Amplio            | -Sencillo  | -Método discontinuo                        | Industria alimenticia<br>Laboratorio        |
|              | Disco rotativo                       | $\pm 1 \%$                  | Amplio            | -Diseño desde neumático  | -Requiere mantener velocidad constante     | Industria papelera                          |
|              | Paletas rotativas                    | $\pm 1 \%$                  | Amplio            | -Método continuo   | -Requiere mantener velocidad constante     | Industria papelera                          |
|              | Flotador                             | $\pm 0.1 \%$                | Hasta 8 %         | -Método continuo   | -Posible agarrotamiento del flotador       | Industria papelera                          |
|              | Puente hidráulico                    | $\pm 1 \%$                  | Amplio            | -Método continuo   | -Necesidad de flujo constante              | Industria alimenticia<br>Papel              |
|              | Electroóptico                        | $\pm 0.1 \%$                | Hasta 6 %         | -Método continuo   | -Delicado                                  | Papel                                       |

Tabla 2.22 Medidores de viscosidad y consistencia.

## 2.41.5 Detección de Llama

Desde el punto de vista de seguridad, la detección de llama es muy importante. Los quemadores de gas o fuel-oil utilizados en los hornos o en las calderas de vapor, requieren para un funcionamiento correcto que la llama producida por el combustible sea estable y de calidad mientras el quemador esté en marcha. Ante un fallo en la llama, el sistema de protección debe de entrar en acción de inmediato excitando el circuito lógico de enclavamiento designado a la instalación para permitir que el sistema entre (o “caiga” como se le conoce) en seguridad y evite la entrada de combustible sin quemar, eliminando así el peligro de su eventual encendido y la subsiguiente explosión.

El mantenimiento de la llama es importante no sólo por razones de seguridad en la planta, si no que también la presencia de la misma, a una determinada intensidad es importante debido a que esta permite dar un acabado deseado en algunos productos. Tal es el caso de la industria cerámica, donde el recubrimiento de esmalte del producto, depende del mantenimiento de una curva de cocción que se establece en un programa preciso de temperatura, distribuida de acuerdo con las tres zonas típicas de un horno túnel, que son: precalentamiento, cocción y enfriamiento. La detección de la llama y su intensidad, se logra midiendo la temperatura dentro del horno y abriendo o cerrando las válvulas de alimentación de combustible, así como la inyección de aire frío en la zona de enfriamiento y la recirculación del aire caliente procedente de esa zona, a la zona de precalentamiento.

La instrumentación necesaria para el diseño de detectores de llama basa en el aprovechamiento de algunas características propias de la variable de interés. La llama posee características tales, como son: calor, ionización y radiación. La llama puede ser de fuel-oil, o de gas. A partir de esto, los detectores de llama empleados en la industria son por consiguiente:

- Detectores de calor
- Detectores de ionización-rectificación
- Detectores de radiación

### **Detectores de calor**

Los detectores de calor son conocidos también como detectores térmicos. Algunos característicos son los formados por bimetales, termopares, varillas de dilatación y dispositivos basados en expansión de líquidos. Esta clase de instrumentos no sólo proporcionan un control satisfactorio en instalaciones de aplicación común para indicación y control de temperatura en muchas clases de procesos industriales; si no que también son adecuados para proporcionar una regulación relativamente satisfactoria en procesos que no involucran un sistema de seguridad como tal, como es el proceso de horneado de algunos productos en donde la medición de temperatura se realiza con termopares tipo K.

### **Detectores de ionización-rectificación**

Una tensión alterna aplicada a dos electrodos colocados dentro de la llama hace circular una pequeña corriente alterna ya que los gases en la llama están ionizados. La resistencia de la llama es bastante alta, del orden de 250,000 a 150,000,000 de ohmios y la corriente que pasa es de unos pocos microamperios. Estos detectores se basan en que al aplicar una tensión alterna a los electrodos (varilla y quemador) la corriente circula con mayor facilidad en un sentido que otro si la superficie activa de uno de los electrodos (superficie

expuesta a la llama) es varias veces mayor que la del otro electrodo (en relación 4:1). De esta forma se genera una corriente alterna rectificada semejante a una corriente continua pulsante.

Este fenómeno puede entenderse mejor al analizar el origen del mismo, el cual es el diseño del tubo de vacío. Un tubo de vacío consiste en una cápsula de vidrio de la que se ha extraído el aire, y que lleva en su interior varios electrodos metálicos. Un tubo sencillo de dos elementos (diodo) está formado por un cátodo y un ánodo, este último conectado al terminal positivo de una fuente de alimentación. El cátodo (un pequeño tubo metálico que se calienta mediante un filamento) libera electrones que migran hacia él (un cilindro metálico en torno al cátodo, también llamado placa). Si se aplica una tensión alterna al ánodo, los electrones sólo fluirán hacia el ánodo durante el semiciclo positivo; durante el ciclo negativo de la tensión alterna, el ánodo repele los electrones, impidiendo que cualquier corriente pase a través del tubo. Los diodos conectados de tal manera que sólo permiten los semiciclos positivos de una corriente alterna (c.a.) se denominan tubos rectificadores y se emplean en la conversión de corriente alterna a corriente continua (c.c.). Al insertar una rejilla, formada por un hilo metálico en espiral, entre el cátodo y el ánodo, y aplicando una tensión negativa a dicha rejilla, es posible controlar el flujo de electrones. Si la rejilla es negativa, los repele y sólo una pequeña fracción de los electrones emitidos por el cátodo puede llegar al ánodo. A este tipo de tubo se le denomina triodo.

Aunque el sistema de ionización-rectificación empleado en los detectores de llama no es obviamente el mismo que el del tubo de vacío, el fenómeno de creación de corriente alterna rectificada es el mismo.

Sin embargo, este sistema presenta el inconveniente de que en caso de que exista un cortocircuito de alta resistencia entre los electrodos, se genera una señal alterna que es detectada como una llama, esto es, un falso en el sistema. Además su uso no es adecuado en quemadores de fuel-oil debido a que la llama del fuel quema en despegue del inyector del quemador y además se forman sedimentos e incluso corrosiones en la varilla por la combustión de fuel-oil, por lo que su uso se restringe al la detección de llama de gas. La figura 2.116 muestra un esquema del principio de operación de este sistema de detección de llama.

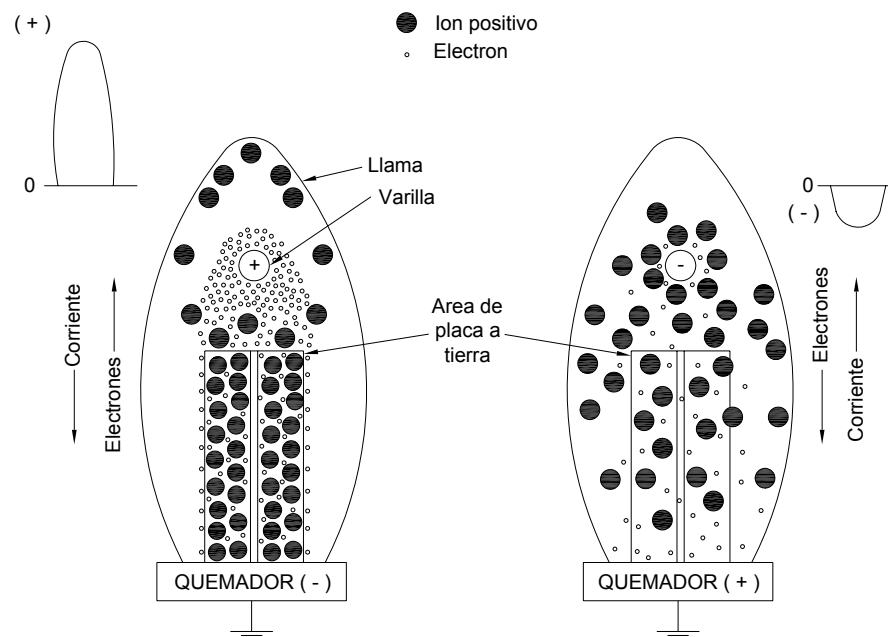


Fig. 2.116 Detección de llama empleando electrodos de rectificación.

## **Detectores de radiación**

Estos detectores se basan en la radiación de energía que una llama irradia en forma de ondas que producen luz y calor. Los detectores de radiación se clasifican en tres grupos:

- Detectores de radiación visible
- Detectores de radiación infrarroja
- Detectores de radiación ultravioleta

### **Detectores de radiación visible**

Los detectores de radiación visible son de dos tipos: sulfuro de cadmio y óxido de cesio. El primero, que es el más utilizado, consiste en un elemento de sulfuro de cadmio que varía su resistencia de forma inversamente proporcional a la intensidad luminosa, mientras que el de óxido de cesio consiste en un tubo de vacío que contiene un cátodo y ánodo emitiendo el cátodo electrones cuando la luz incide sobre su superficie.

El funcionamiento correcto de estos detectores requiere de una llama luminosa, por lo que su uso se limita a combustibles líquidos. No son capaces de diferenciar la luz procedente de una llama de la de otras fuentes (luz natural, refractario, etc.).

### **Detectores de radiación infrarroja**

Los detectores de radiación infrarroja emplean una celda de sulfuro de plomo cuya resistencia eléctrica decrece al aumentar la intensidad de radiación. La celda de sulfuro de plomo no distingue entre la radiación infrarroja emitida por el refractario o por la llama. No obstante esto, debido a que la emisión de energía radiante de la llama tiene la característica de parpadear, esto permite al circuito electrónico discriminar entre la señal de la llama y la señal uniforme del refractario; aun dado lo cual, el movimiento de los gases calientes en el refractario, pueden simular un parpadeo, excitando con esto la célula.

### **Detectores de radiación ultravioleta**

Los detectores de radiación ultravioleta (fig. 2.117) consisten en un tubo que contiene dos electrodos, normalmente de tungsteno. El tubo es de material permeable a la radiación ultravioleta, cuarzo por ejemplo y está lleno de un gas inerte. El funcionamiento es similar al de un tubo Geiger.

El contador Geiger fue desarrollado por el físico alemán Hans Geiger. Este es un dispositivo empleado para detectar la presencia y la intensidad de una radiación. Está formado por un tubo lleno de gas a baja presión, que actúa como cámara de ionización. Un circuito eléctrico mantiene un campo eléctrico intenso entre las paredes del tubo y un alambre fino situado en el centro del mismo. Cuando las partículas cargadas, a elevada velocidad, procedentes de una fuente radiactiva colisionan con los átomos del gas del tubo, los ionizan y generan electrones libres, que fluyen por el alambre central y crean un pulso eléctrico que se amplifica y cuenta electrónicamente. Además, los pulsos producen un sonido semejante a un chasquido.

En el caso de los detectores de radiación ultravioleta, si una radiación ultravioleta penetra en el tubo e incide sobre el cátodo éste emite electrones que son atraídos por el ánodo a causa del campo eléctrico establecido entre ambos. Este proceso ioniza el gas en el tubo con lo que éste conduce una corriente.



Debido a que el tubo de estos detectores una vez que es excitado presenta una descarga automantenida, una vez que existe un campo eléctrico entre los electrodos, es necesario interrumpir periódicamente la tensión entre cátodo y ánodo, con la finalidad de que sea establecida la conductividad del tubo un número de veces por segundo, y así, asegurar la constante verificación de la presencia de la llama.

La ventaja principal de los detectores de radiación ultravioleta es su total insensibilidad a las radiaciones infrarroja y visible no siendo afectados por este motivo, por las radiaciones del refractario caliente. Dado que ambas llamas de gas y de fuel-oil generan radiaciones ultravioletas, estos detectores son idóneos para instalaciones mixtas. Sin lugar a dudas, el mejor dispositivo por encima de sus símiles hasta ahora conocido para la detección de llama.

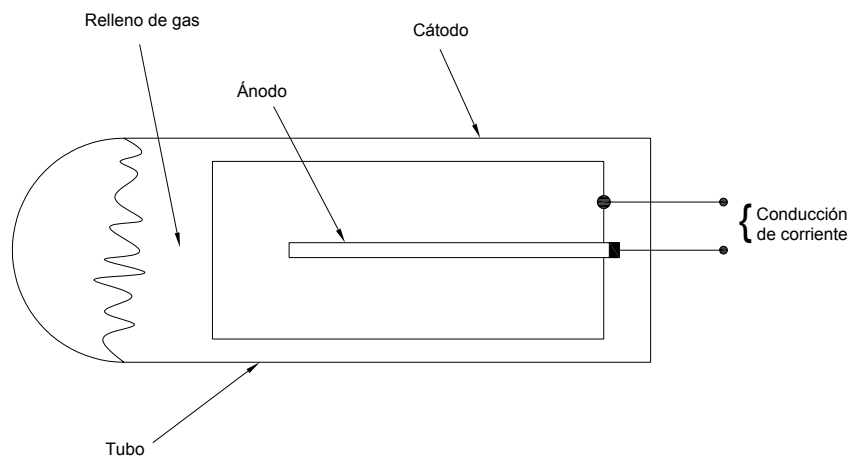


Fig. 2.117 Esquema de un detector de radiación ultravioleta.

### Controlador lógico programable

Los detectores antes descritos están conectados a controladores lógicos programables (PLC). Cuya lógica (por lógica debe entenderse a la secuencia de operaciones necesarias que debe realizar el instrumento en base a decisiones de carácter lógico, or, and, not, etc; con lo cual se encuentra estructurada la filosofía de operación, para lograr el control satisfactorio del sistema) puede considerar desde una simple alarma de fallo de llama, hasta una programación mucha más compleja de puesta en marcha (arranque) y paro de la instalación que incluye las fases de prepurga (para limpieza de la cámara de combustión antes de cada encendido), supervisión de llama piloto y principal, pospurga, interruptores de enclavamiento para fallos en la presión de vapor, presión de aire de control, alimentación eléctrica, bajo nivel en caldera, etc.. La figura 2.118 muestra un solo un esquema general de este sistema de control y no pretende ser un diagrama lógico de control como tal.

Las prioridades de mayor importancia en los sistemas de control de seguridad es el tiempo de detección de la (s) variable (s) en base a lo cual esta controlado el proceso y el tiempo de respuesta del sistema de control ante un fallo que lleve a un estado de emergencia. En este caso, el sistema formado por el detector y el controlador lógico debe de ser capaz de detectar la llama en un tiempo lo más breve posible y, de igual forma, debe ser capaz de actuar de acuerdo a su lógica, en el menor tiempo posible en caso de que ocurra un fallo de algún componente, en el sentido de reajustar el sistema o incluso, en el último de los casos, llegar al paro del mismo, si se presentan fallos sincronizados dentro de un mismo ciclo.

Considérese el siguiente ejemplo. Un quemador de gas con una potencia de 600,000 kcal/h, con un consumo aproximado de 60 m<sup>3</sup>/h de gas natural, presenta un fallo de llama. El detector encargado de sensar la misma, es un detector del tipo térmico. El tiempo respuesta de esta clase de detector, para la detección de llama es del orden de 1 a 3 minutos. Actuando en el mejor de los casos le lleva 1 minuto cortar el paso del combustible, debido a la ausencia de llama. Para cuando finalice ese tiempo habrían entrado en la cámara de combustión 1 m<sup>3</sup> de gas y una cantidad de aire aproximadamente 10 veces mayor, con lo que en total serían 11 m<sup>3</sup> de potencial mezcla explosiva. En cambio, si el detector fuera electrónico, de radiación ultravioleta, le tomaría un tiempo aproximado de 1 segundo, con lo que el volumen liberado sería de 0.2 m<sup>3</sup>.

La primera impresión que causa el observar una instalación como esta, es que exista el riesgo de que puedan presentarse fácilmente muchas explosiones. Sin embargo, en realidad, este riesgo es controlado y además, para que se produzca una explosión, es necesario que varias fallas actúen a la vez (fallos sincronizados) en el mismo ciclo y no solamente una.

De cualquier forma, para este sistema de control, es necesario que realice una autocomprobación de sus componentes en cada arranque, de forma periódica, así, se garantiza la protección total del sistema, durante el tiempo de trabajo de la caldera. La autocomprobación comienza en la detección de llama, de forma tal, que si se presenta un fallo de llama, se impedirá el arranque del quemador, o, si la autocomprobación es periódica, lo parara si estaba en marcha. Esto lleva a considerar el número de veces que el sistema debe de autocomprobarse y en que forma. La respuesta es obviamente el mayor número de veces posible y en forma periódica, dado de que aún la posibilidad de que ocurran fallos sincronizados en un mismo ciclo es remota, la probabilidad de fallo aumenta conforme el número de ciclos operativos disminuye, debido que el tiempo entre puestas en marcha y verificación de componentes es mayor, por ello la autocomprobación debe de ser periódica.

La autocomprobación periódica durante la puesta en marcha es lograda con detector ultravioleta, el cual posee un diafragma oscilante que dispara unas 50-90 veces por minuto de acuerdo a los impulsos emitidos por un relé en el controlador lógico; esto significa interrumpir la tensión entre el cátodo y el ánodo del tubo de detección ultravioleta. En estas condiciones la llama deja de ser vista por el detector y el relé asegura la autocomprobación del circuito una vez por segundo; de tal forma de que en caso de que se presentara algún fallo en los componentes electrónicos del detector y del controlador lógico, se origina un paro de seguridad en un tiempo máximo de 4 segundos.

Los programadores con microprocesador proporcionan una comprobación lógica continua de todo el circuito, la detección y solución de averías, la optimización de los períodos de prepurga y postpurga con el consiguiente ahorro de combustible y la secuencia automática de puesta en marcha y paro de la instalación.

El correcto diseño de la lógica de control que incluye componentes electrónicos de punta, basado en una filosofía de operación adecuada, es difícil que falle y no pueda funcionar correctamente, pues aun hay filosofías operativas que consideran la redundancia del control del proceso, lo cual significa, que si falla en primera instancia un sistema de control destinado como unidad primaria, entra en acción otro sistema de control secundario que releva al primero y mantiene el control satisfactorio del proceso.

Finalmente la tabla 2.23 resume las características más importantes de los detectores de llama de ionización-rectificación y los de radiación, las características de los detectores de calor no se muestran debido a que estos no son empleados como detectores de llama en sistemas de supervisión en quemadores, donde las condiciones de operación son críticas.

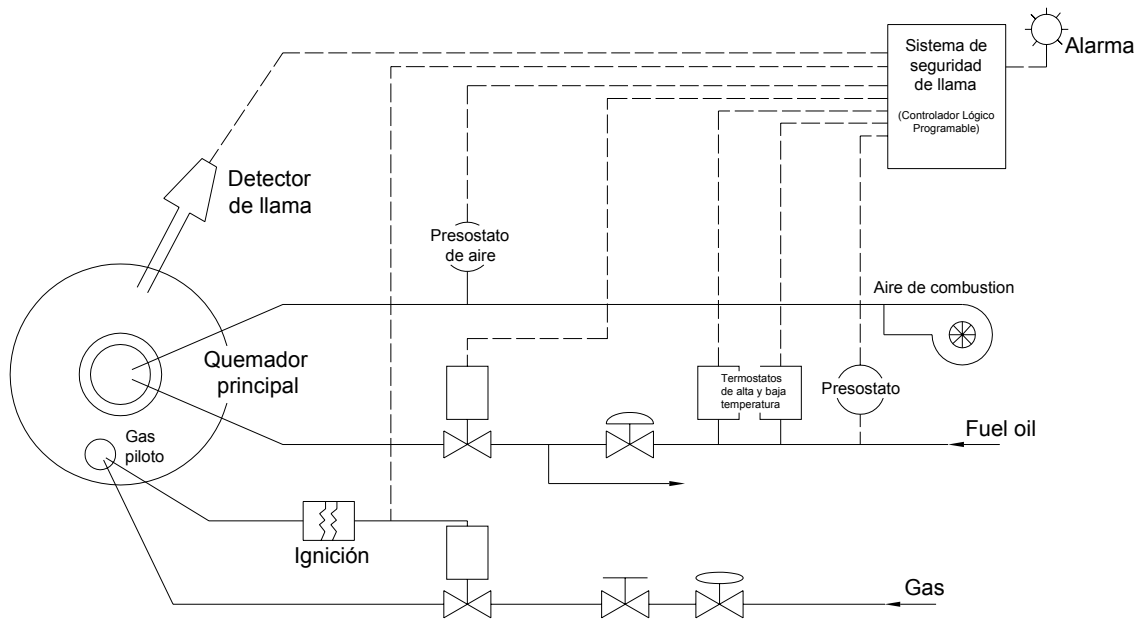


Fig. 2.118 Esquema general del control de llama en quemador de caldera de vapor.

| Vía de detección de llama |   | Rectificación                            | Infrarrojo                     | Radiación visible                       | Ultravioleta               |
|---------------------------|---|--|--------------------------------|---|----------------------------|
| Tipo de detector          |   | Electrodo de rectificación               | Fotocélula de sulfuro de plomo | Fotocélula de sulfuro de cadmio o cesio | Tubo detector ultravioleta |
| VENTAJAS                  | Detector para llama de gas                                      | SI                                       | SI                             | NO                                      | SI                         |
|                           | Detector para llama de fuel-oil                                 | NO                                       | SI                             | SI                                      | SI                         |
|                           | Capaz de enfocar un plano de la llama                           | NO                                       | SI                             | SI                                      | SI                         |
|                           | No influido por el refractario caliente                         | NO                                       | NO                             | NO                                      | SI                         |
|                           | Autocomprobación antes de cada arranque                         | SI                                       | SI                             | SI                                      | SI                         |
| DESVENTAJAS               | Dificultad en apuntar a la llama                                | NO                                       | SI                             | NO                                      | NO                         |
|                           | Deterioro rápido del electrodo a altas temperaturas             | SI                                       | NO                             | NO                                      | NO                         |
|                           | Insensible a la llama de gas con alta concentración de aire     | NO                                       | SI                             | SI                                      | NO                         |
|                           | Corriente de gases Calientes en refractario puede simular llama | NO                                       | SI                             | NO                                      | NO                         |
|                           | Refractario caliente puede simular la llama                     | NO                                       | NO                             | SI                                      | NO                         |
|                           | Ignición eléctrica puede simular la llama                       | SI                                       | NO                             | NO                                      | SI                         |
|                           | Incapaz de discriminar la luz de la llama de otras fuentes      | No aplica, detección en seno de la llama | SI                             | SI                                      | NO                         |

Tabla 2.23 Comparación de ventajas y desventajas de los detectores de llama.

## 2.42 Medición de variables químicas

Las variables químicas son aquellas que se encuentran relacionadas con las propiedades químicas de los cuerpos o con su composición misma. Entre las variables químicas, las que son de importancia en la industria son la conductividad, el pH, el potencial de oxidación-reducción (Redox) y la composición de los gases en una mezcla.

### 2.42.1 Medición de conductividad

#### Conductividad electrolítica

La conductividad de las soluciones desempeña un importante papel en las aplicaciones industriales de la electrólisis, ya que el consumo de energía eléctrica en la electrólisis depende en gran medida de ella.

La conductividad se define como la capacidad de una solución acuosa para conducir corriente eléctrica. Ningún solvente puro conduce la corriente eléctrica. Y ningún soluto puro conduce la corriente eléctrica, a menos que este en estado líquido. Pero una solución puede conducir la corriente. Para que esto suceda, la solución debe estar formada por un soluto electrolito (es decir, compuestos formado por enlaces iónicos no orgánicos) y por un solvente polar como el agua, lo cual forma una solución electrolítica. El agua destilada pura, no conduce como tal la corriente, pero si se le disuelven sólidos minerales aumenta su capacidad de conducción, debido a que estos sólidos al disolverse se separan en iones positivos y negativos en equilibrio.

Los iones poseen la susceptibilidad de desplazarse bajo la acción de un campo eléctrico y también combinarse con otros iones para formar iones nuevos o cuerpos distintos que ya no ionizaran. La conductividad de estos iones es función de la concentración y de la movilidad. Las soluciones de NaCl (sal común) o CuSO<sub>4</sub> (sulfato cúprico) en agua conducen la electricidad a toda su intensidad. Pero, el ácido acético o vinagre común (CH<sub>3</sub>-COOH) al disolverse en agua produce iones los cuales pueden conducir la electricidad, pero solo levemente.

Por consiguiente, cuando dos electrodos a tensión sumergidos en un líquido, en el que existe una sal en solución (NaCl) producirán que los iones positivos Na<sup>+</sup> emigren al electrodo cargado negativamente, mientras que los iones negativos Cl<sup>-</sup> serán atraídos por el electrodo positivo. Al llegar a los electrodos, los iones adquieren cargas de signo contrario y se neutralizan. De esta forma se establecerá una corriente a través de la solución y del circuito eléctrico, que dependerá de: a) número y tipo de iones presentes en la solución, b) área efectiva de los electrodos, c) diferencia de potencial y distancia entre los electrodos y d) temperatura de la solución.

Si en una solución de un determinado producto químico se mantienen constantes los conceptos b), c) y d), entonces la conductividad de la solución dependerá solamente del número de iones en la solución y por consiguiente, si el producto esta disociado totalmente será una medida directa de la concentración del mismo en la solución.

Los medidores de conductividad electrolítica se basan en mediciones de concentración de una muestra debido a su modulación en conductividad. Por ejemplo, la conductividad se mide usualmente con una lectura directa de la conductividad eléctrica en agua, la cual entonces se correlaciona con el número de iones presentes. La onda usualmente consiste de dos electrodos de voltaje (+ y -) y dos electrodos de corriente (también + y -) soportados por algún tipo de cubierta. Los instrumentos más recientes tienen compensación por temperatura y almacenamiento de datos. La mayoría también proporciona una lectura de sonidos disueltos. Los sensores de conductividad también se encuentran disponibles para mediciones de resistividad, salinidad, y temperatura.

Las sustancias iónicas conducen la electricidad cuando están en estado líquido o en disoluciones acuosas, pero no en estado cristalino, porque los iones individuales son demasiado grandes para moverse libremente a través del cristal.

### **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica se define como el recíproco de la resistencia en ohmios medida entre dos caras opuestas de un cubo de 1 cm de lado sumergido en la solución. La unidad es el mho o siemens (recíproco del ohmio) que es la conductancia de una solución que con una diferencia de potencial de 1 voltio entre las caras de los electrodos da lugar a la circulación de 1 amperio. Debido a que esta unidad es muy grande, se emplea a menudo en soluciones diluidas el micromho ( $\mu\text{mho}$ ) que es la millonésima parte de un mho.

La resistividad es una propiedad física clave de todos los materiales. Frecuentemente es necesario medir exactamente la resistividad de un material. La resistividad eléctrica de materiales diferentes a temperaturas ambiente puede variar considerablemente.

La resistividad eléctrica de un material es un número que describe que tanto un material resiste el flujo de electricidad. La resistividad se mide en unidades de ohm-metro. Si la electricidad puede fluir fácilmente a través de material, entonces ese material tiene baja resistividad. Si la electricidad tiene gran dificultad para fluir a través del material, ese material tiene alta resistividad.

La resistividad eléctrica se representa por la letra griega  $\rho$ . La conductividad se representa por la letra  $\sigma$ , y se define como la inversa de la resistividad. Esto significa que una alta resistividad es lo mismo que una baja conductividad y que una baja resistividad es lo mismo que una alta conductividad:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Con el entendimiento de que la conductividad puede ser obtenida mediante la inversa de la resistividad ( $\sigma = \text{mho/metro}$ ), cuando se habla de conductividad se hace en términos de la resistividad. La resistividad eléctrica de material es una propiedad física intrínseca, independiente del tamaño de la partícula o de la forma de la muestra.

## Métodos de medición de resistividad

### Técnica de dos puntos

Es claro que a partir de la propia definición de conductividad, el primer dispositivo que se diseñó para medir la conductividad, fue el introducir dos placas (electrodos) paralelas conectadas a un a circuito de puente Wheatstone, tal como se muestra en la figura 2.119. El sistema tiene el inconveniente de que gradualmente acumula suciedad en los electrodos y esto falsea la medida.

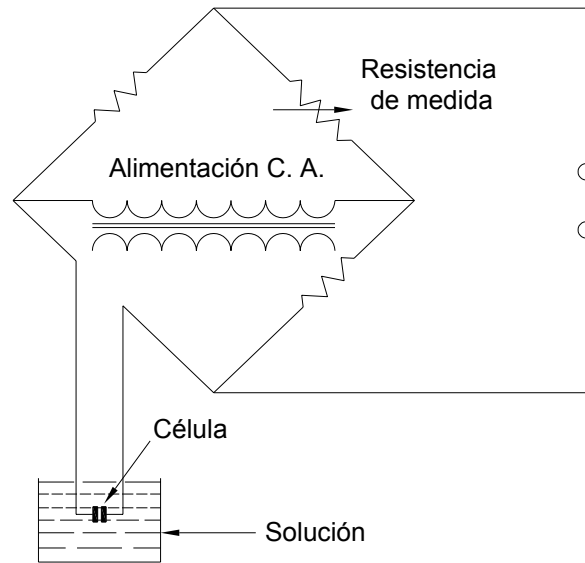


Fig. 2.119 Medición de conductividad por puente Wheatstone.

Por su parte, la resistividad de un material sólido, puede obtenerse mediante la medición de la resistencia y las dimensiones físicas de una barra de material, como se muestra en la figura 2.120. En este caso el material se corta en la forma de una barra rectangular de longitud  $l$ , altura  $h$ , y ancho  $w$ . Se conectan cables de cobre a ambos extremos de la barra. Esto se llama la técnica de dos puntos, debido a que los cables se conectan al material en dos extremos. Se aplica una fuente de voltaje  $V$  a lo largo de la barra, causando que una corriente  $I$  fluya a través de la barra. La cantidad de corriente  $I$  que fluye a través de la barra se mide con un amperímetro, el cual está conectado en serie con la barra y la fuente de voltaje. La caída de voltaje a lo largo del amperímetro debería de ser despreciable. La resistencia de la barra está dada por la siguiente expresión:

$$R = \frac{V}{I}$$

En donde

- R = Resistencia en  $\Omega$
- V = Voltaje en voltios
- I = Corriente en amperes

Las dimensiones físicas pueden ser medidas con una regla, un micrómetro, u otro instrumento apropiado. La resistividad de dos puntos del material es entonces:

$$\rho = \frac{Rwh}{l}$$

En donde  $\rho$  es la resistividad en  $\Omega \text{ m}$ ,  $R$  es la resistencia medida en  $\Omega$ , y  $w$ ,  $h$ , y  $l$ , son las dimensiones físicas de la muestra en metros.

En la práctica la medición de la resistividad con esta técnica no es muy confiable. Existe usualmente resistencia entre los cables de contacto y el material, o en el mismo equipo de medición. Estas resistencias adicionales hacen que la medición de la resistividad del material sea mayor que lo que en realidad es. Un segundo problema potencial es la modulación de la resistividad de la muestra debido a la corriente aplicada, dado que esta es frecuentemente una posibilidad para materiales semiconductores. Un tercer problema es que los contactos entre los electrodos metálicos y la muestra semiconductoras tienden a tener otras propiedades eléctricas que proporcionan estimados erróneos para la resistividad real de la muestra.

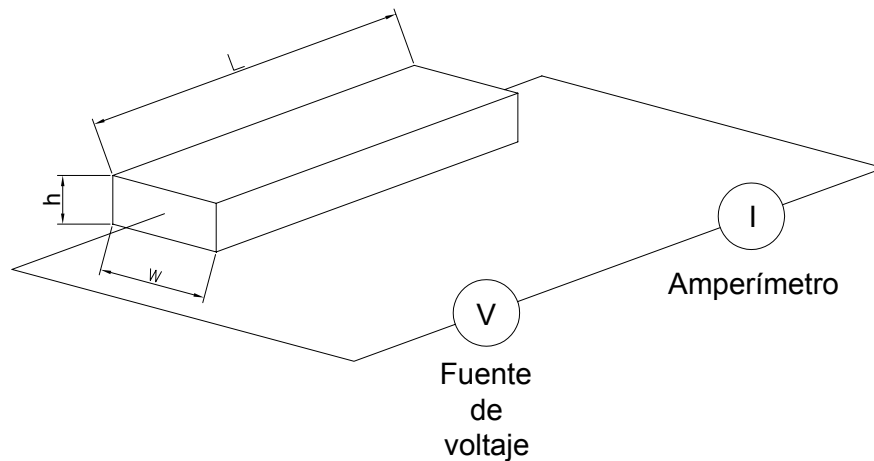


Fig. 2.120 Medición de resistividad en un sólido por dos puntos.

### Técnica de cuatro puntos

Un método para compensar los efectos de la acumulación de suciedad en los electrodos es el de trabajar con un circuito potenciométrico autoequilibrado con alimentación en corriente alterna. Este consiste en introducir cuatro placas (electrodos) paralelas conectadas al circuito potenciométrico. El principio se basa en mantener constante la diferencia de potencial entre los dos electrodos del medio y de esta forma la acumulación de sólidos no afecta a la medida. Esto se logra comparando la diferencia de potencial entre los dos electrodos del medio con una tensión de referencia establecida en el circuito, de forma tal, que si hay diferencia entre ambas tensiones, se excita un motor de equilibrio que mueve a su vez el brazo móvil de un reóstato (potenciómetro) en el sentido de que la diferencia se elimine debido al ajuste de tensión hecho. Las dos placas del extremo sirven, una para llevar a cabo la comparación de tensiones y otra para ajustar la diferencia de potencial en las placas del medio, en el sentido que esta tensión y la referencia sean las mismas. De esta forma, la acumulación de suciedad en los electrodos ya no es un inconveniente para falsear la medida.

Una ventaja de trabajar con corriente alterna es que se logra que la alimentación a los electrodos y al circuito de medida se encuentre en fase al estar conectados al mismo transformador. El uso de la corriente alterna en la medida de conductividad permite equilibrar en parte el fenómeno de polarización de los electrodos. Este es un fenómeno que se produce en corriente continua cuando los iones llegan a estar muy concentrados alrededor de un electrodo y su carga equivale a la de estos; por lo cual, al ion le es difícil alcanzar al electrodo debido a que el potencial neto es muy pequeño para atraer iones adicionales.

La medición de conductividad empleando cuatro electrodos requiere la compensación de temperatura de la solución con relación a la temperatura estándar (25 °C). El dispositivo electrónico de medición de conductividad por cuatro puntos realiza esta compensación automáticamente. La precisión en la medida con este método es de  $\pm 0.5\%$  con un campo de medida de 0-150,000  $\mu\text{mhos}$ .

Las determinaciones de la conductividad se usan ampliamente en los estudios de laboratorios. Así, se las puede usar para determinar el contenido de sal de varias soluciones durante la evaporación del agua (por ejemplo en el agua de calderas). Las basicidades de los ácidos pueden ser determinadas por mediciones de la conductividad.

En lo que refiere a la medición de la resistividad en un material sólido, las inconveniencias del método de dos puntos, se eliminan con la técnica de cuatro puntos. La figura 2.121 muestra la técnica de cuatro puntos en una barra de material. Cuatro cables se conectan a la muestra. Una fuente de corriente fuerza a una corriente constante a lo largo de los extremos de la muestra. Un amperímetro separado mide la cantidad de corriente  $I$  que pasa a través de la barra. Simultáneamente el voltímetro mide el voltaje  $V$  producido a lo largo de la parte interior de la barra. La resistividad de cuatro puntos del material entonces se calcula:

$$\rho = \frac{Vwh}{I l'}$$

En donde

$\rho$  = Resistividad en  $\Omega\text{m}$

$V$  = Voltaje medido por el voltímetro en volts

$w$  = Ancho de la barra medida en metros

$h$  = Altura de la barra medida en metros

$I$  = Corriente que mide el amperímetro fluyendo a través de la muestra en amperes

$l'$  = Distancia entre los dos puntos en donde los cables del voltímetro hacen contacto con la barra medida en metros

Nótese que no se utiliza la longitud de la barra para calcular la resistividad, se utiliza la longitud entre los dos contactos interiores.



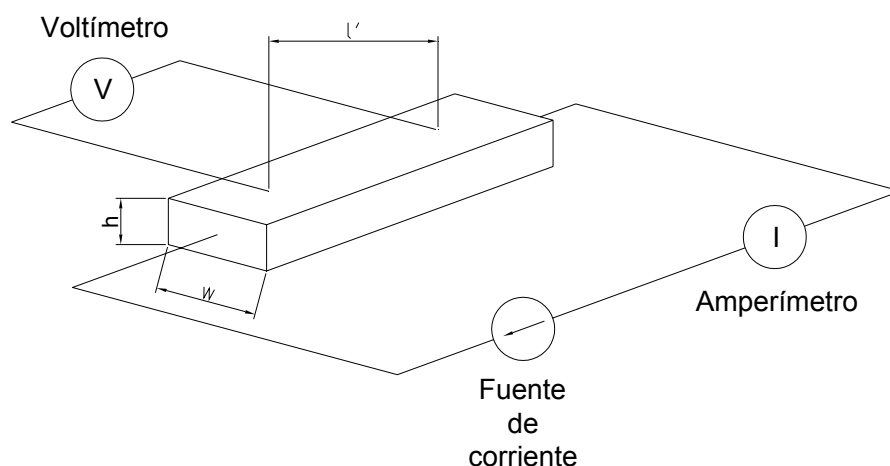


Fig. 2.121 Medición de resistividad en un sólido por cuatro puntos.

## 2.42.2 Medición de pH

El pH fue definido por el químico danés Soren Peter Lauritz Sorensen en 1909. Eligió  $p$  como símbolo de la palabra danesa “potenz” que significa “poder”. El pH es un término que indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución. Se trata de una medida de la acidez de la disolución. El término se define como el logaritmo de la concentración de iones hidrógeno,  $H^+$ , cambiado de signo como se expresa a continuación:

$$pH = -\log [H^+]$$

En donde  $[H^+]$  es la concentración de iones hidrógeno en moles por litro. Debido a que los iones  $H^+$  se asocian con las moléculas de agua para formar iones hidronio,  $H_3O^+$ , el pH también se expresa a menudo en términos de concentración de iones hidronio. De esta forma, si una solución tiene un  $pH=3$ , entonces significa que la solución tiene una concentración de iones  $H_3O^+ = 10^{-3}$  moles/litro.

En el agua pura a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura, existen cantidades iguales de iones  $H_3O^+$  y de iones hidróxido ( $OH^-$ ); la concentración de cada uno es  $10^{-7}$  moles/litro. Por lo tanto, el pH del agua pura es  $-\log(10^{-7})$ , que equivale a 7. Sin embargo, al añadirle un ácido al agua, se forma un exceso de iones  $H_3O^+$ ; en consecuencia, su concentración puede variar entre  $10^{-6}$  y  $10^{-1}$  moles/litro, dependiendo de la fuerza y de la cantidad de ácido. Así, las disoluciones ácidas tienen un pH que varía desde 6 (ácido débil) hasta 1 (ácido fuerte). En cambio, una disolución básica tiene una concentración baja de iones  $H_3O^+$  y un exceso de iones  $OH^-$ , y el pH varía desde 8 (base débil) hasta 14 (base fuerte). Las medidas prácticas de pH se encuentran entre los valores de 0 a 14. La figura 2.122 a) muestra la concentración de iones  $H^+$  y  $OH^-$  en la escala de pH y 2.122 b) los valores de pH de algunos alimentos y sustancias en la misma escala.

|        | pH | Concentración H <sup>+</sup> mol/l | Concentración OH <sup>-</sup> mol/l |
|--------|----|------------------------------------|-------------------------------------|
| Ácido  | 0  | 1                                  | 0.000000000000001                   |
|        | 1  | 0.1                                | 0.000000000000001                   |
|        | 2  | 0.01                               | 0.000000000000001                   |
|        | 3  | 0.001                              | 0.000000000000001                   |
|        | 4  | 0.0001                             | 0.000000000000001                   |
|        | 5  | 0.00001                            | 0.000000000000001                   |
| Neutro | 6  | 0.000001                           | 0.000000001                         |
|        | 7  | 0.0000001                          | 0.000000001                         |
| Base   | 8  | 0.00000001                         | 0.0000001                           |
|        | 9  | 0.000000001                        | 0.00001                             |
|        | 10 | 0.0000000001                       | 0.0001                              |
|        | 11 | 0.00000000001                      | 0.001                               |
|        | 12 | 0.000000000001                     | 0.01                                |
|        | 13 | 0.0000000000001                    | 0.1                                 |
|        | 14 | 0.000000000000001                  | 1                                   |

(a)

| Ph de productos alimenticios comunes | Escala de pH | pH de varios productos químicos a 25 °C |
|--------------------------------------|--------------|---|
|                                      | 0            | Ácido sulfúrico al 4.9 % 1 N            |
|                                      | 1            | Ácido hidrocórico al 0.37 % 0.1 N       |
| Jugo de limón                        | 2            | Ácido acético al 0.6 % 0.1 N            |
| Jugo de naranja                      | 3            |   |
| Cerveza                              | 4            |   |
| Queso                                | 5            | Ácido hidrocianico al 0.27 % 0.1 N      |
| Leche                                | 6            |   |
| Agua Pura                            | 7            |   |
| Huevo                                | 8            | Bicarbonato sódico al 0.84 % 0.1 N      |
| Borax                                | 9            | Acetato de potasio al 0.98 % 0.1 N      |
| Magnesia                             | 10           |   |
|                                      | 11           | Amoniaco al 1.7 % 1 N                   |
|                                      | 12           | Sosa cáustica al 0.04 % 0.01 N          |
|                                      | 13           |   |
|                                      | 14           | Sosa cáustica al 4 % 1 N                |

(b)

Fig. 2.122 a) Concentración de iones hidronio e hidroxilo para distintos valores de pH, b) valores de pH para distintos alimentos y sustancias conocidas.

La medición de pH es probablemente la prueba que más se ejecuta en un laboratorio, reflejando la importancia del agua como un reactivo y como un solvente común. Desde el primer uso de un electrodo para determinar la concentración del ión hidrógeno, el electrodo de vidrio y sus variantes han madurado siendo ahora herramientas de rutina en las mediciones analíticas. En la medida de pH pueden utilizarse varios métodos, de entre los cuales destacan por su exactitud y sencillez en la aplicación industrial, los siguientes:

- Electrodo de membrana de vidrio
- ISFET-Ion Sensitive Field Effect Transistors (también conocidos como pHFETS, ó sencillamente llamados de transistor)

### Electrodo de membrana de vidrio

La medición electroquímica del pH utiliza dispositivos que transducen la actividad química del ión hidrógeno a una señal electrónica, tal como una diferencia de potencial eléctrico o un cambio en la conductancia eléctrica.

El diseño de un sistema de medición por electrodo de membrana de vidrio, esencialmente esta constituido por un electrodo de vidrio, un electrodo de referencia y un voltímetro calibrado para poder leer directamente en unidades de pH.

El electrodo de vidrio se basa en una propiedad singular de una fina membrana de un vidrio especial, que hace que se establezca un potencial a través de la membrana cuando ambos lados de la misma se hallan en contacto con disoluciones en las que las concentraciones de iones hidrógeno son diferentes. Durante su utilización, todo el electrodo se sumerge en la disolución de pH desconocido y así la membrana se halla en contacto con dos disoluciones, una de pH conocido y otra de pH desconocido.

Como se ilustra esquemáticamente en la figura 2.123 (a), un medidor de pH mide la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) que se desarrolla entre un electrodo indicador de membrana de vidrio y un electrodo de referencia sumergido en la muestra a ser determinada. Los electrodos indicador y de referencia comúnmente están combinados en una misma sonda la cual es referida como electrodo combinado. La membrana de vidrio del electrodo indicador desarrolla un potencial dependiente del pH como resultado del intercambio iónico (sustitución de iones de una disolución por otros iones con la misma carga) entre los iones de hidrógeno en solución y los cationes univalentes en la membrana de vidrio.

El interior del electrodo se encuentra lleno de una solución tampón (la solución tampón o disolución amortiguadora, es una disolución que contiene unas sustancias que inhiben los cambios de pH, o concentración de ion hidrógeno de la disolución; tales sustancias pueden contener un ácido débil y su sal, por ejemplo, ácido acético y acetato de sodio, o una base débil y una sal de esa base, por ejemplo, hidróxido de amonio y cloruro de amonio; estas disoluciones tampones se utilizan en química y sirven como referencia en la medida del pH) de pH constante dentro de la cual se encuentra inmerso un hilo de plata recubierto con cloruro de plata (la función principal de este hilo es la establecer un contacto eléctrico con la disolución); del cual hay que mencionar, que en caso de exponerse a muy altas temperaturas, puede dar lugar a la disolución del revestimiento de cloruro de plata.

Al introducir el electrodo en el seno del líquido, se desarrollara un potencial relacionado directamente con la concentración del ion hidrógeno del líquido. Implicando que si esta concentración es mayor que la interior del electrodo, entonces se desarrollara un potencial positivo a través de la punta del electrodo y si es inferior, el potencial desarrollado será negativo.

Es conveniente mencionar que este potencial cambia con la temperatura, por ejemplo, pasa de 54.2 mV a 0 °C a 74 mV a 100 °C. Es por esta razón que se necesita disponer en la solución de un segundo elemento o electrodo de referencia, para lograr con esto medir el potencial desarrollado. Otra razón es que la sensibilidad del potencial de la membrana de vidrio hacia los cambios en pH es pequeña, así que se requiere un electrodo de referencia diseñado adecuadamente y un medidor de alta impedancia (la impedancia de entrada se refiere a la resistencia al paso de corriente) de entrada (ya que la resistencia de la membrana de vidrio es muy elevada) para poder medir con esto, de forma precisa, el potencial desarrollado.

El electrodo de referencia, aparte de servir para cerrar el circuito, suministra un potencial que se establece como de referencia para medir el potencial variable del electrodo de vidrio. El electrodo de referencia posee una célula interna formada por un hilo de plata recubierto con cloruro de plata que está en contacto con un electrolito de cloruro de potasio. El electrolito pasa a la solución muestra a través de una unión líquida, de esta forma la célula interna del electrodo permanece en contacto con una solución que no varía de concentración y que por consiguiente proporciona una referencia estable de potencial. La disposición es tal que la diferencia de potencial medida por el voltímetro se debe solamente a la diferencia de las concentraciones de ion hidrógeno en las dos disoluciones, en la del electrodo de membrana de vidrio y el de referencia.

La construcción típica de un electrodo indicador de pH se ilustra en la figura 2.123 (b). La membrana de vidrio en la punta del electrodo, el cual actúa como el transductor de pH, tiene aproximadamente un grosor de 0.1 milímetros. Un lado de la membrana contacta la muestra mientras que el otro contacta la solución de llenado del electrodo, un electrolito de composición y pH definidos. Un elemento de referencia (un alambre de plata cubierto con cloruro de plata) sumergido en la solución de llenado hace contacto eléctrico estable entre el circuito de medición de potencial de medidor de pH y el electrolito en contacto con el lado interior de la membrana de vidrio.

El electrodo de referencia ilustrado en la figura 2.123 (c) proporciona el medio de hacer el contacto eléctrico entre el medidor y la muestra que está en contacto con el lado externo de la membrana de vidrio del electrodo indicador. Así como el electrodo indicador, el cuerpo del electrodo de referencia está lleno con un electrolito dentro del cual se sumerge un elemento de referencia. El electrodo también tiene medios, como cerámica porosa, mediante la cual la solución de llenado del electrodo de referencia puede establecer contacto físico y eléctrico con la muestra. La importancia de esta unión líquida no puede desestimarse ya que es una fuente potencial de contaminación de la muestra, errores en la medición y problemas de confiabilidad.

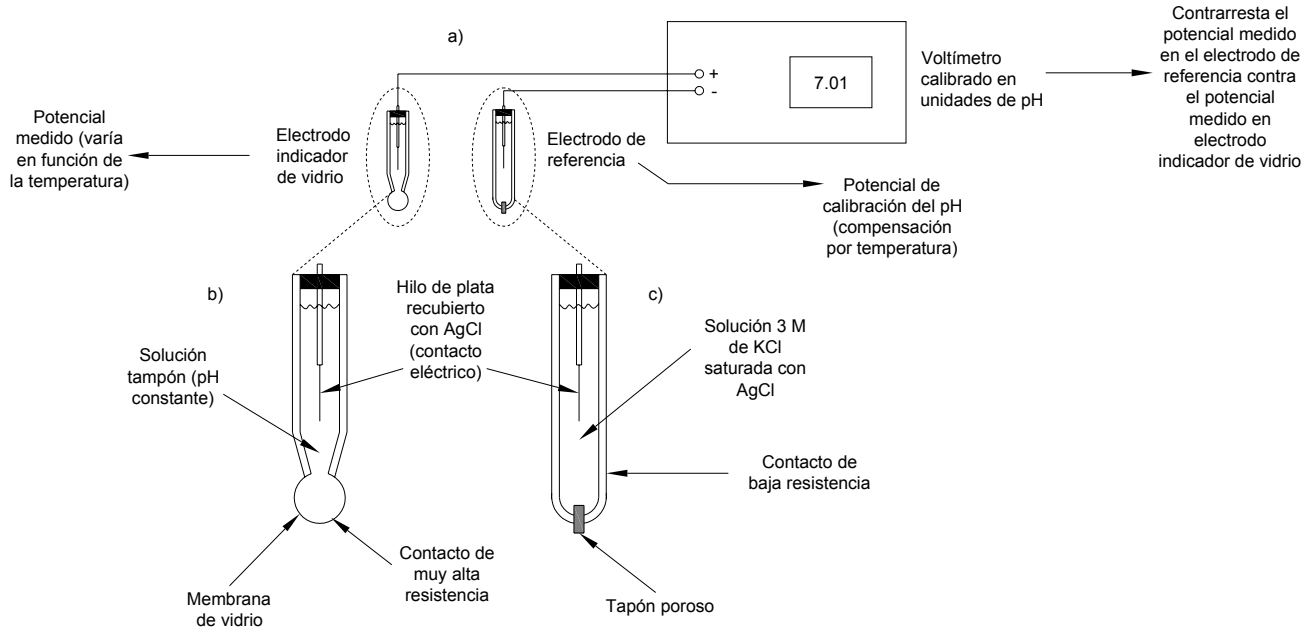


Fig. 2.123 a) Medición de diferencia de potencial eléctrico entre los dos electrodos, b) electrodo indicador de membrana de vidrio, c) electrodo de referencia.

La diferencia de potencial eléctrico entre el electrodo indicador de pH y el electrodo de referencia proporciona una medición del pH. La figura 2.124 proporciona una ilustración de las diferencias de potencial, que contribuyen al potencial medido. La principal función del medidor de pH en la figura 2.123 (a) es medir esta diferencia, con una precisión de 0.1 mV o mejor. Debido a la alta resistencia eléctrica de la membrana de vidrio del electrodo indicador, el medidor debe tener una correspondientemente alta impedancia de entrada. La mayoría de los medidores de pH actualmente contienen microprocesadores incluidos que simplifican la medición de pH ya que incluyen guardado de calibraciones, diagnóstico, e implementación de compensación por temperatura.

El medidor de pH mostrado en la figura 2.123 (a) mide el potencial desarrollado entre el electrodo indicador de pH y el electrodo de referencia, del cual, el pH de la muestra se determina utilizando una calibración previamente establecida y posiblemente la temperatura de la muestra. La magnitud del potencial, es complicada por la gran resistencia eléctrica que presenta la membrana de vidrio. Esta puede variar considerablemente desde 100 MΩ hasta 1000 MΩ, por lo que se necesitan el uso de amplificadores de alta impedancia de entrada y con bajo nivel de ruido para disminuir los errores, si es que el potencial de la membrana de vidrio se va a medir exactamente.

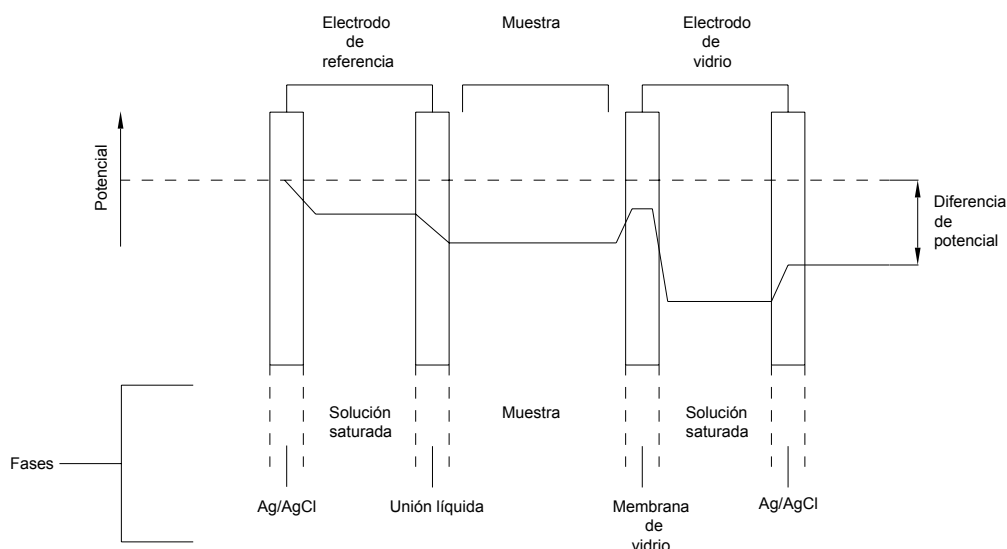


Fig. 2.124 Variación de la diferencia de potencial de los electrodos del sistema electrodo de membrana de vidrio para medición de pH.

En la medida de pH por el método de electrodo de membrana de vidrio pueden presentarse algunas dificultades durante el tiempo de operación, las principales son las siguientes:

- Recubrimiento o abrasión de la membrana del electrodo de vidrio.
- La solución es no-acuosa o presenta gran resistencia.
- Taponamiento o fallo mecánico de la unión líquida en electrodo de referencia, lo que impide el paso del electrolito KCl, con lo que el circuito queda abierto. Si este taponamiento es parcial se desarrolla un potencial indeterminado.
- Entrada de la solución de muestra dentro de la solución interna del electrodo de referencia.
- Variación con el tiempo del potencial de asimetría que depende de la naturaleza del vidrio, de la disolución gradual del vidrio en la solución y del desgaste por erosión del vidrio.

El problema mencionado en el inciso a), pueden evitarse o disminuirse, en la medida que se le de un mantenimiento adecuado según sea el caso de utilización. Ya que el instrumento inmediatamente “avisa” cuando existe el problema del recubrimiento, ya que comienza a falsear la señal de salida. Pues el electrodo se comporta como si tuviera bajas concentraciones del ion  $H^+$ , con lo cual los valores de pH se leerían altos.

La prevención para los incisos b), c) y d) se consideran más adelante en la parte correspondiente a la selección, uso y cuidado de los electrodos de referencia.

En lo que respecta al inciso e), esta variación de potencial es de sólo unos pocos milivolts y se mantiene prácticamente constante. El instrumento de medición de pH dispone de un ajuste para corregir este potencial.

El potencial desarrollado a lo largo de la membrana de vidrio del electrodo indicador de pH es dependiente de la temperatura, con un coeficiente de temperatura de aproximadamente 0.3% por °C. Esto quiere decir que la variación de la temperatura influye en la medida de pH. Cuando el pH es constante, se presenta una variación de 0.2 mV por grado centígrado. La mayoría de los medidores de pH tienen prevista la compensación por temperatura, lo cual corrige la pendiente del potencial medido contra la calibración de pH como puede observarse en la figura 2.125. Los medidores equipados con compensación automática de temperatura utilizan un termómetro de resistencia del platino para medir directamente la temperatura de la muestra.

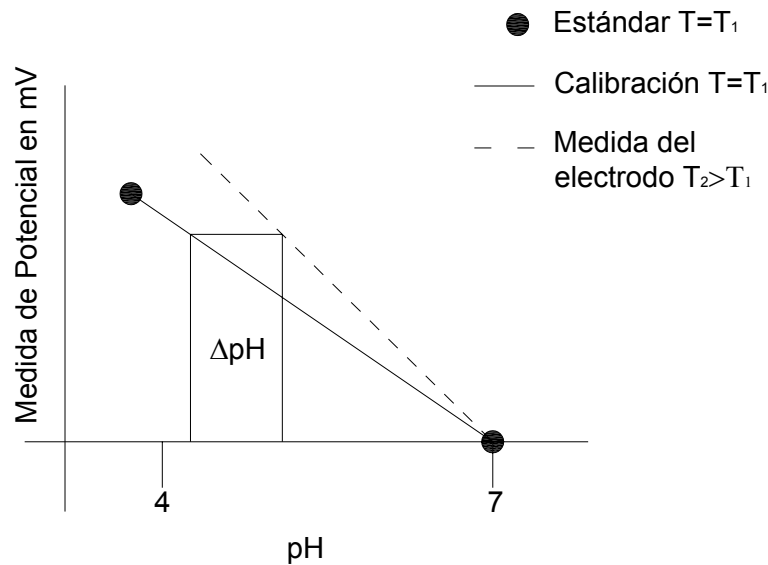


Fig. 2.125 Ajuste de pH por temperatura del instrumento electrodo de membrana de vidrio.

El medidor de esta forma, corrige entonces la función de calibración para que la lectura de milivoltaje sea correctamente interpretada como el pH de la muestra a la temperatura de medición. Hay que señalar que el termocompensador o sonda de resistencia compensa sólo la relación tensión-temperatura del electrodo de vidrio y de esta forma, sólo asegura la medida de pH real de la solución a su temperatura real. No detecta las variaciones con la temperatura propias del pH de cada solución, es decir, no mide la variación del pH inherentes a cada solución con la variación de la temperatura. Esto significa que la lectura del pH sólo es válida a la temperatura a la que se encuentra la solución.

### Construcción del electrodo indicador de membrana de vidrio

Los vidrios de ión hidrógeno utilizados para construir electrodos indicadores de pH se forman mediante la fundición de sílice, óxidos metálicos alcalinos, y otros óxidos alcalinos. El componente de sílice,  $SiO_2$ , constituye aproximadamente el 70% del vidrio. Los óxidos metálicos contribuyen con iones móviles tales como sodio o litio, los cuales actúan como transportadores de carga eléctrica, o son intercambiados por otros iones en la capa de vidrio hidratada. Se adicionan componentes tales como el óxido de calcio ( $CaO$ ) para incorporar iones multivalentes en el vidrio; estos actúan para modificar la estructura de red del vidrio, impartiendo características tales como la resistencia química.

## Electrodo de referencia

Un electrodo de referencia, como el mostrado en la figura 2.123 (c), se utiliza para establecer un contacto de baja resistencia eléctrica entre el circuito de medición externo y la muestra (de hecho cierra el circuito), para establecer un potencial de referencia contra el cual el electrodo indicador puede ser contrastado. En los conductores metálicos del circuito del medidor de pH, la corriente es llevada mediante electrones, mientras que en la muestra, la corriente electrolítica es acarreada por iones. La diferencia entre electrodos de referencia son principalmente las reacciones de oxidación y reducción que efectúan transferencia de carga a lo largo de la interfase de referencia elemento/electrolito. Las especies que participan en estas reacciones deben de estar presentes en el electrolito contenido dentro del cuerpo del electrodo de referencia. Como resultado, la composición de la solución de llenado del electrodo de referencia es, en general, diferente a la de la muestra, y el contacto físico entre los dos electrolitos disimilares forma lo que se conoce como la unión líquida. Las dos fronteras de fases (elemento de referencia/solución de llenado y solución de llenado/muestra) necesarias para establecer contacto eléctrico con la muestra, introducen un potencial adicional, lo cual se suma a aquel del electrodo indicador, aunque el diseño propio del electrodo de referencia asegura que estos potenciales se mantengan constantes y puedan ser calibrados.

## Uniones líquidas

El contacto necesario entre el electrolito de llenado del electrodo de referencia y la muestra forma una unión líquida, y resulta en el desarrollo de un potencial de la unión que depende de las composiciones de los dos electrolitos. El potencial de la unión puede ser minimizado llenando el electrodo de referencia con un electrolito que tenga altas concentraciones de aniones y cationes de difusividad comparable. La estabilidad del potencial de la unión líquida depende de la constancia de la interfase entre el electrolito de llenado y la muestra.

## Selección, uso y cuidado de los electrodos de referencia

La selección de electrodos de referencia es dictada por la muestra a ser estudiada y las condiciones de medición tales como la temperatura. Para uso general y para altas temperaturas (70 °C o mayor), se prefieren los electrodos de cloruro de plata sobre los de calomel (El electrodo de calomelanos, o de calomel, está constituido por mercurio, Hg, una papilla de dicloruro de dimercurio o calomelanos,  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , y una disolución de cloruro de potasio, normalmente de concentración 0,1 M ó 1 M). Para determinaciones de alta exactitud se prefieren los electrodos de calomel, así como cuando la contaminación de la muestra con plata representa un problema. Otra forma de prevenir contaminación de la muestra por plata es incorporando una doble unión en el electrodo de cloruro de plata. El tipo de unión líquida y su velocidad de flujo es importante; una alta velocidad de flujo puede contaminar la muestra y desgastar el electrodo, mientras que una baja velocidad de flujo puede llevar a una obstrucción. Las muestras viscosas semi-sólidas o de baja fuerza iónica requieren una unión con alta velocidad de flujo. El orificio de llenado del electrolito de referencia debería de permanecer abierto durante el uso del electrodo para asegurar el flujo adecuado a través de la unión. Esto prevendrá que los contaminantes puedan entrar al cuerpo del electrodo de referencia y reducirá la probabilidad del estancado de la unión, al costo de un rellenado más frecuente. Los electrodos de referencia de "bajo mantenimiento" utilizan un gel de polímero saturado con electrolito dentro del cuerpo del electrodo y funcionarán correctamente si se almacenan en solución de llenado.

## **pHFETS**

Un desarrollo relativamente reciente en la medición de pH es la introducción de sistemas basados en el uso de transistores de ión selectivo pHFETS por sus siglas en inglés que significan Ion Sensitive (referido al pH) Field Effect Transistors, como el elemento sensor. Estos, en los cuales el transistor sensible al ión hidrógeno es una variante, se derivan del semiconductor de óxido de metal, el bloque básico de construcción para circuitos integrados. Estas "plaquetas" combinan una membrana que responde al pH en forma similar a la del electrodo de vidrio con la amplificación del transistor. La amplificación integral y el pequeño tamaño ha llevado al desarrollo de sistemas de medición de pH baratos, de baterías, y de tamaño bolsillo. Estos dispositivos han encontrado nichos únicos y crecientes, incluyendo la industria alimenticia en donde la medición de pH con electrodos de vidrio representa un riesgo de seguridad inaceptable, la medición de pH para geles, pastas, leches, y para la medición de soluciones fuertemente alcalinas en donde los bulbos convencionales de vidrio responden a los iones de sodio y dan lecturas erróneamente bajas.

El sensor posee una señal de pH de baja impedancia, lo que le da una gran fiabilidad y tiene una larga duración, funcionando en líquidos más sucios y con más impurezas. La estructura de este instrumento es bastante sólida y proporciona además una respuesta muy rápida

La precisión obtenida, ya sea por el sistema electrodo de membrana de vidrio o pHFETS es de  $\pm 0.25$  al  $\pm 1$  % y con el uso del microprocesador se aporta inteligencia al transmisor de pH, proporcionando insensibilidad a vibraciones, compensación automática de temperatura, autodiagnóstico y una precisión de  $\pm 0.1$  %.

## **Otros métodos de medición de pH**

### **Métodos ópticos para medición de pH**

Para algunas aplicaciones los métodos ópticos ofrecen ventajas sobre el uso de electrodos de vidrio u otros dispositivos para la medición de pH. Las moléculas de pigmentos orgánicos con propiedades espectrales dependientes del pH han sido utilizadas rutinariamente por décadas en titulaciones ácido-base y en papeles indicadores de pH. Estos pigmentos, muchos de origen natural, han sido puestos más recientemente en uso, para medir pH localizados dentro de células vivas y en el desarrollo de sondas de fibra óptica para medición de pH dentro del cuerpo.

### **Pigmentos indicadores**

La medición óptica del pH se basa en el uso de moléculas de pigmentos orgánicos que son ácidos débiles o bases. La pérdida o ganancia de un protón cambia la estructura electrónica de la molécula, produciendo un cambio medible de la manera en la cual la molécula interactúa con la luz. Esta interacción puede ser la absorción de luz de una longitud de onda particular, o fluorescencia de una forma de la molécula. Un buen entendimiento de las posibles interacciones entre el pigmento indicador y la muestra es importante en el uso efectivo de los pigmentos de indicación óptica para la medición de pH. Así como los ácidos débiles y las bases, la adición de pigmentos indicadores a una muestra puede cambiar el pH, particularmente en muestras pobremente amortiguadas. Este efecto es importante cuando se utilizan papeles de pH ó sensores ópticos para medir pequeñas muestras, en donde existe potencial para que sea excedida la capacidad de amortiguamiento de la muestra por la cantidad de pigmento inmovilizado en el papel o en el sensor. Como una regla general, los errores potenciales pueden ser minimizados mediante la calibración en soluciones similares en composición a la muestra a ser medida.



## **Pigmentos indicadores de absorción**

Las diferentes formas de los pigmentos indicadores de absorción de ácidos conjugados y bases difieren en las longitudes de onda características a las cuales éstas absorben energía de luz. Sus rangos de medición de pH pueden variar desde 1 hasta 13. Para la medición cuantitativa del pH, la absorción de luz del indicador es medida por un espectrómetro o un reflectómetro a una longitud de onda específica.

## **Pigmentos indicadores fluorescentes**

Los pigmentos indicadores fluorescentes absorben luz de un color particular (o longitud de onda) y re-emiten algo de la energía absorbida como luz de un color diferente. La absorción de luz del indicador promueve a la molécula desde el estado de energía inicial a un estado de energía mayor. Los procesos subsecuentes como las colisiones moleculares llevan a una transición hacia un estado de energía menor. La molécula puede entonces emitir un fotón de energía resultando en el regreso de la molécula a su estado inicial a partir de su estado intermedio. En principio, una medición fluorescente es más sensible que una medición de absorción ya que la única luz medida por el detector se origina a partir de las moléculas fluorescentes.

## **Papel indicador**

Los papeles indicadores son medios simples, rápidos, y baratos para la medición de pH cuando no se requiere la precisión de la medición instrumental. Estos están contruidos de tiras de papeles o plástico que ha sido impregnado con uno o más pigmentos indicadores de absorción escogidos para abarcar el rango de pH de interés. Los pigmentos generalmente son acoplados en forma covalente a la tira, para prevenir la contaminación de la muestra mediante el escurrimiento de los pigmentos. El pH de la muestra es determinado a una precisión de típicamente 0.5% unidades mediante la comparación del color de la tira con el color de calibración de una carta proporcionada por el fabricante.

## **Sondas de fibra óptica para pH**

Los sensores ópticos para pH, generalmente referidos como opto eléctricos, representan algunos de los sensores más sofisticados de pH, los cuales encuentran uso para la medición remota en el cuerpo o plantas industriales debido a su pequeño tamaño y su ausencia de conexiones eléctricas. Estos son contruidos típicamente inmovilizando un pigmento indicador en la punta de una guía de luz formada de una o más fibras ópticas, las cuales son utilizadas para acoplar luz entre el indicador y la instrumentación para medición. Las sondas resultantes pueden ser fabricadas muy pequeñas, y con fibras ópticas de alta calidad, el pH puede ser medido en distancias considerables o en ambientes eléctricamente ruidosos que pueden interferir con los electrodos de tipo potenciométrico (como a fin de cuentas sucede en la variación de señal en mV en el instrumento de electrodo de membrana de vidrio, donde la señal una vez amplificada es registrada en unidades de pH mediante un potenciómetro).

### 2.42.3 Medición de concentración de gases

En la industria es de interés determinar la concentración de los gases tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO} + \text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  u otros, ya sea en el análisis de humos de salida de las calderas de vapor para comprobar su combustión correcta, o en el análisis de concentración de gases desde el punto de vista de seguridad ante una eventual explosión, o en cualquier otra aplicación donde sea importante conocer la concentración de la mezcla gaseosa.

Los analizadores de concentración de gases se basan en general en propiedades características de los gases, tales como la conductibilidad térmica, el paramagnetismo del oxígeno y el coeficiente de absorción infrarroja.

#### **Análisis por conductividad térmica**

Un caso clásico de aplicación del principio de conductividad térmica es la determinación del contenido en dióxido de carbono de los gases de combustión de una caldera de vapor. La determinación se basa en la diferencia de conductividad térmica del gas cuando se compara en una célula con el aire u otros posibles constituyentes del gas de combustión. De esta forma, el gas es aspirado y pasa a la célula. Esta célula contiene un hilo de resistencia calentado eléctricamente y mantenido a una temperatura ligeramente superior a la de las paredes. El diseño óptimo de la célula permite limitar la temperatura del hilo caliente para que la transmisión de calor por convección y radiación sea despreciable y que la temperatura y por consiguiente, la resistencia del hilo central, sea inversamente proporcional a la conductividad del gas que lo rodea. Las variaciones en la temperatura del instrumento de medida (célula) y del gas, se compensa con otra célula cerrada idéntica de medida de la conductividad térmica que contiene aire de composición conocida. La medición efectuada en la práctica es la diferencia de resistencia de los hilos en contacto con el aire y con el gas de combustión, respectivamente, y se realiza con un circuito de puente de Wheatstone. La diferencia en las resistencias indica una cierta composición del dióxido de carbono en el aire. El sistema se emplea básicamente para la mezcla aire- $\text{CO}_2$ , pero puede emplearse en otros gases.

Otro ejemplo de utilización de estos analizadores lo constituye la determinación del monóxido de carbono e hidrógeno en los gases de combustión de la caldera de vapor. Como estos gases son combustibles se queman con un exceso de aire y se determina el calor desprendido en un tubo provisto de un alambre calentado eléctricamente cuya resistencia varía con el aumento de la temperatura en la combustión. El alambre se conecta a una rama de un puente de Wheatstone. Las variaciones en la temperatura exterior se compensan con otra resistencia sensible a esta temperatura. El resultado expresado en porcentaje  $\text{CO} + \text{H}_2$  se convierte en señal indicada o registrada.

En otra aplicación se determina el contenido de oxígeno en los gases de combustión, por la variación de conductividad térmica cuando los gases se pasan sobre carbono a temperatura elevada, con lo que todo el oxígeno presente se convierte en dióxido de carbono. El instrumento es semejante al utilizado para la determinación de  $\text{CO}_2$  con una célula de conductividad en cada rama de un puente de Wheatstone. Los gases de combustión se hacen pasar a través de un par de células de referencia, después a un horno pequeño que contiene barras de carbono a temperatura elevada, y finalmente a pasan al otro par de células. De esta forma se mide el cambio en la conductividad térmica y por consiguiente el aumento en la proporción de  $\text{CO}_2$ , para que el resultado se indique o se registre.

Otro aparato completo que trabaja según el principio de la conductividad térmica es el cromatógrafo de gases, que permite determinar los componentes de una muestra de gas en pocos minutos. Consta de una columna de separación de los componentes del gas, una toma de muestras, una cámara de temperatura controlada encerrando el detector y un registrador que marca en el gráfico los picos correspondientes a los determinados componentes.

Al inyectar en la columna una cantidad exacta del gas a analizar ésta la absorbe en forma distinta a cada uno de los componentes de tal modo que éstos avanzan a distinta velocidad llegando uno tras otro al detector de conductividad que compara las conductividades térmicas entre el gas portador y la mezcla dando una tensión proporcional a la concentración del gas correspondiente. El área de cada pico indica la cantidad de cada componente en la mezcla y el tiempo de retención identifica la clase de componente. El esquema de funcionamiento se ilustra en la figura 2.126.

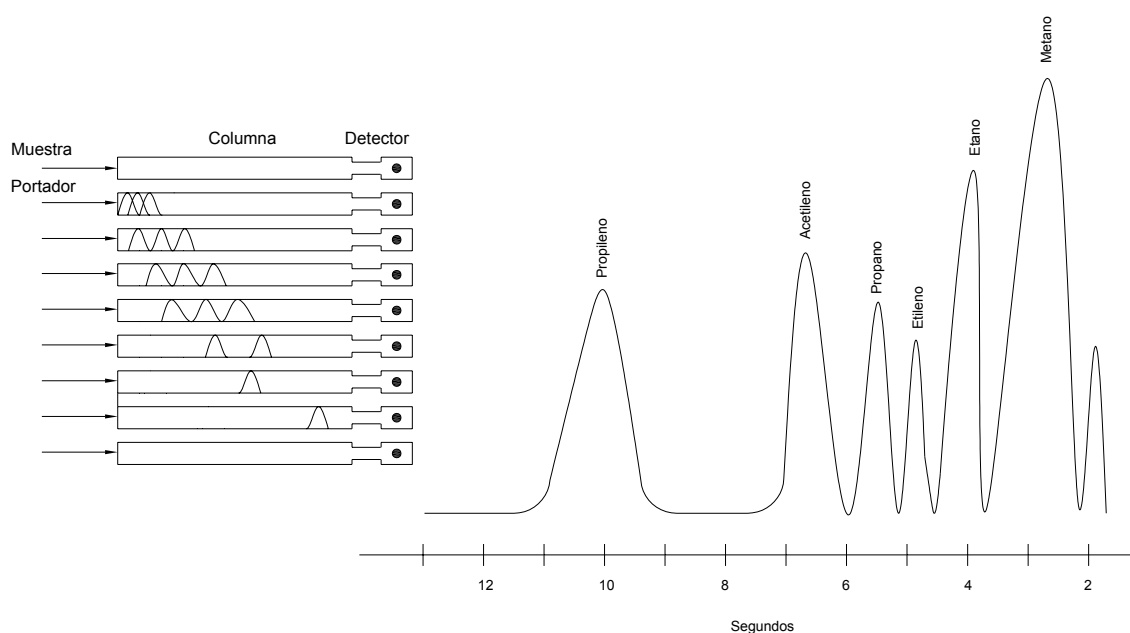


Fig. 2.126 Cromatógrafo de gases.

### Paramagnetismo del oxígeno

El paramagnetismo es una propiedad que poseen varios materiales, entre ellos el oxígeno; se magnetizan cuando se exponen a la acción de un campo magnético. De este modo una bola suspendida en equilibrio en un campo magnético variará de posición al pasar el gas a analizar ya que el oxígeno del gas absorberá parte de la energía magnética disponible en el campo. Este fenómeno, cuyo principio se emplea en el diseño del analizador paramagnético, hace posible analizar el contenido de oxígeno en una mezcla gaseosa debido al paramagnetismo del oxígeno. En la figura 2.127 se muestra un esquema del analizador, donde se puede observar, que el gas circula por dos cámaras idénticas con dos pequeños calefactores. Uno de ellos está en el seno de un fuerte campo magnético con lo que el oxígeno, que es paramagnético desplaza los otros gases y el elemento calefactor se enfría más rápidamente. De este modo, las diferencias de temperatura medidas con un circuito de puente de Wheatstone son proporcionales a la susceptibilidad magnética del gas y, al ser el oxígeno el único gas paramagnético presente, son como consecuencia, también proporcionales al contenido de oxígeno.

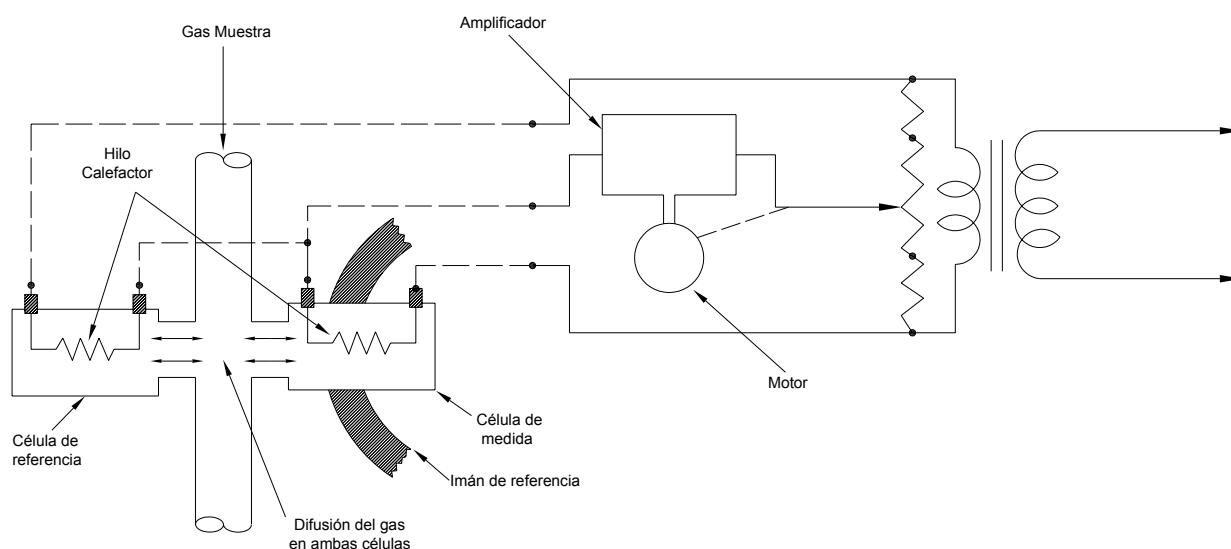


Fig. 2.127 Analizador de oxígeno paramagnético.

### Analizador de infrarrojos

El analizador de infrarrojos fue estudiado ya al describir la medida del punto de rocío de los gases por analizador infrarrojo. El principio se fundamenta en las diferentes absorciones de radiación infrarroja que tienen distintos gases. Algunos gases tales como el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno y el cloro, no absorben prácticamente radiaciones infrarrojas. Otros, como ya se había mencionado anteriormente, sin embargo, tales como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  o vapor de agua lo absorben en cantidades detectables.

Como en el caso de la medición de punto de rocío, el gas pasa a través de una cámara de muestra y la otra cámara es llena con un gas no absorbente, que podría ser  $\text{N}_2$ ; la radiación infrarroja es interrumpida alternativamente entre la célula de muestra y la célula de comparación. La radiación que pasa a través de la célula de comparación no se atenúa mientras que la que atraviesa la célula de muestra, si el gas contiene  $\text{CO}_2$  es absorbida proporcionalmente al porcentaje de  $\text{CO}_2$ . Ambas radiaciones inciden alternativamente en las dos cámaras del detector y varían alternativamente la presión, captándola mediante un condensador, en donde una de las placas es la membrana metálica que divide las dos cámaras. La señal es amplificada, rectificada y registrada.

# Válvulas de Control

### 3.1 Generalidades

Una válvula (fig. 3.1) se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.

Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. Sus tamaños van desde una fracción de pulgada hasta 30 ft (9 m) o más de diámetro. Pueden trabajar con presiones que van desde el vacío hasta mas de 20,000 lb/in<sup>2</sup> (140 Mpa) y temperaturas desde las criogénicas hasta 1500 °F (815 °C). En algunas instalaciones se requiere un sellado absoluto; en otras, las fugas o escurrimientos no tienen importancia.

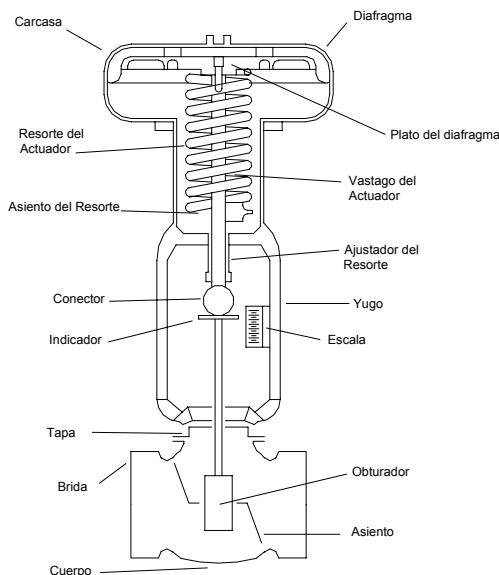


Fig. 3.1 Válvula de control.

La señal que hará variar la apertura de la válvula y consecuentemente el caudal, puede ser generada bien en la propia válvula, en cuyo caso se habla de una válvula autorreguladora, bien en un elemento externo, normalmente un controlador, en cuyo caso se habla de una válvula de control automática o simplemente válvula de control.

La válvula automática de control generalmente constituye el último elemento en un lazo de control instalado en la línea de proceso y se comporta como un orificio cuya sección de paso varía continuamente con la finalidad de controlar un caudal en una forma determinada.

Una válvula de control automático está formada por el cuerpo, los internos, el actuador, el posicionador y los accesorios. Normalmente se utilizan válvulas de dos tipos: ángulo o globo. De acuerdo a la diferencia de presiones de entrada y salida de la válvula, estas se dividen en: válvulas de control convencionales y de servicio severo o crítico.

Las convencionales son las que de acuerdo con el diseño de un sistema de flujo de fluidos y las condiciones de operación, la presión antes de la válvula o sea la presión de entrada a la válvula ( $P_e$ ) es solo mayor un 10% que la presión a la salida de la misma ( $P_s$ ).

Una válvula de servicio severo verdadero es aquella cuya presión de entrada  $P_e$  es el doble o más que su presión de salida, aunque en algunos casos dependiendo de la temperatura, presión y tipo de fluido, aunque la presión de salida sea mayor, se considera como válvula crítica.

Una válvula de control se considera como un orificio de diámetro muy variable y por lo tanto cuando un fluido pasa a través de ella tendrá su menor presión y su mayor velocidad en la vena contracta de la válvula que es el lugar inmediatamente después de el orificio teórico que representa la válvula, esto viene siendo el lugar después del regulador de flujo interno en la válvula (vena contracta).

La válvula de control se llama de servicio severo porque la energía potencial de la diferencia de presiones se convierte en energía cinética (velocidad) y puede alcanzar velocidades gigantescas en comparación con las velocidades que los fluidos muestran en la tubería.

### **3.2 Cuerpo de la válvula**

Básicamente, el cuerpo está provisto de un obturador o tapón, los asientos del mismo y una serie de accesorios. La unión entre la válvula y la tubería puede hacerse por medio de bridas soldadas o roscadas directamente a la misma. El tapón es el encargado de controlar la cantidad de fluido que pasa a través de la válvula y puede accionar en la dirección de su propio eje mediante un movimiento angular. Está unido por medio de un vástago al actuador.

El cuerpo de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o a la corrosión producida por el fluido.

El cuerpo es el encargado de regular el pasaje del fluido, transformando los desplazamientos del vástago (lineal o rotacional) en una variación de caudal.

El cuerpo suele ser de hierro, acero y acero inoxidable, y en ciertos casos especiales (cuando el fluido es muy corrosivo) pueden ser de monel, hastelloy B o C, etc.

El cuerpo y las conexiones a la tubería (bridadas o roscadas) están normalizados de acuerdo a las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN (Deutsches Institut für Normung) y ANSI (American National Standards Institute), fundamentalmente.

Para el cuerpo de la válvula se deben tener las siguientes consideraciones:

- a) Las conexiones roscadas se utilizan hasta 2 pulg.
- b) Las bridas pueden ser planas, con resalte, machihembradas con junta de anillo.
- c) Las conexiones soldadas pueden ser con encaje o con soldadura a tope. Las primeras se emplean para tamaños de válvulas hasta 2 pulg. y las segundas desde 2.5 pulg. a tamaños mayores.

La consideración inicial más importante que ha de realizarse con respecto al cuerpo es la relativa a la presión y temperatura que la válvula ha de soportar ya que éstas nos indicarán la clase (“rating”) del cuerpo de la válvula.

Diversas entidades como la ANSI o la (DIN) han establecido los valores de estos parámetros para cada “rating” y material de construcción.

La selección del material de construcción juega un papel importante porque, en algunos casos, la elección de un material algo más caro (por ejemplo el WC9, que el generalmente utilizado WCB), puede hacer más económica la válvula, ya que al ser más resistente el primero posibilita el seleccionar un “rating” inferior.

Dado que no todos los tipos de válvula son generalmente construidos en todos los “ratings”, es, pues, necesaria una primera selección.

Por otro lado, la temperatura ha de ser considerada por sí misma, ya que, válvulas que utilizan elastómeros como dispositivo de cierre o guiado no podrán ser utilizadas para altas temperaturas, al mismo tiempo que aplicaciones criogénicas requerirán diseños específicos.

### **3.3 Partes internas**

Como partes internas de la válvula se consideran generalmente las piezas metálicas internas desmontables que están en contacto directo con el fluido. Estas piezas son: el vástago, la caja de empaquetadura, el obturador y el asiento. Hay que señalar que el obturador y el asiento constituyen el “corazón de la válvula” al controlar el caudal, gracias al orificio de paso variable que forman al variar su posición relativa.

El obturador y el asiento se fabrican normalmente de acero inoxidable, porque este material es muy resistente a la corrosión y a la erosión del fluido.

Los internos tienen una parte fija y una parte móvil que es la permite que la válvula se mantenga abierta o cerrada. La parte móvil es el ensamble del tapón con la parte del vástago que estará en contacto con el medio. La parte fija de los internos es muy sencilla en aplicaciones convencionales, pero en aplicaciones

para servicio severo es una jaula con diferentes diseños, por ejemplo jaulas concéntricas, placas perforadas, pila de discos, etc., y con las piezas necesarias para acomodar la jaula por dentro.

Los internos deben de ser del tipo de cambio rápido, por lo que ningún componente debe de ir soldado o roscado en el cuerpo o bonete.

Como en algunas válvulas de control se nota que el tapón a veces se pega y queda fijo en una posición, por lo tanto se debe de especificar que los internos deben de tener un anillo igualador de presión alrededor del tapón para minimizar la vibración y que no se flexione el tapón por flujo concentrado en una sola porción del tapón. El fabricante debe de cumplir con este diseño para cumplir con los requerimientos de la especificación.

Los fluidos líquidos o gaseosos al pasar por una válvula de control con gran caída de presión pueden provocar ciertos fenómenos, los cuales normalmente son destructivos. Los líquidos pueden provocar "cavitación" y "flashing", y los gases pueden provocar ruido y su fenómeno asociado que es la vibración. Todos estos fenómenos son función de la velocidad alta del fluido, por lo que todos pueden evitarse controlando la velocidad del fluido al pasar y salir de los internos. Lo único que no puede evitarse es el "flashing" porque las condiciones del proceso no lo permiten, pero regulando la velocidad del líquido a través de la válvula se modera el efecto destructivo de este fenómeno.

Por lo tanto, cuando se detecte que la presión de entrada es igual al doble o mas de la presión de salida de la válvula, se sabe que se trata de una aplicación de servicio severo o crítico o riguroso o riesgoso pues la energía potencial de la diferencial de presiones puede convertirse en energía cinética dentro y a la salida de los internos de la válvula que es donde la velocidad sería la mayor, entonces se deberá especificar cuidadosamente la requisición de una válvula, pues de no hacerla el ingeniero se arriesga a seleccionar un equipo deficiente que podría causar problemas operativos de control y físicos, costos enormes operativos y de mantenimiento y en algunas ocasiones riesgos, sobre todo cuando se manejan combustibles.

### **Especificaciones relacionadas con los internos de las válvulas de control que manejen líquidos**

**Velocidad.** La velocidad de un líquido a la salida de los internos de la válvula de control debe ser menor a 23 metros por segundo. Nótese que no se dice a la salida de la válvula, pues ahí sería ya la velocidad correspondiente a una tubería.

Los internos que permiten hacer un diseño a la medida de la aplicación son los que se llaman tipo multipasos-multietapas, que al entrar el líquido a la válvula se divide en varios pasajes o pasos de flujo y cada pasaje contiene una serie de etapas o accesorios como los de la tubería (codos, expansiones) que vienen siendo cambios de dirección en 90 grados que reducen la velocidad del líquido al hacerla pasar por el número suficiente de etapas.

**Dirección de flujo.** La dirección del líquido en la válvula de control debe ser por arriba del tapón o sea en el sentido en que la válvula cierra. Esto es porque los líquidos suelen llevar sólidos ya sea por óxidos u otro material, los cuales serían atrapados en la pila de discos o en la jaula de la válvula y solamente pasarían las partículas sólidas que dejaran pasar los internos y no incidirían directamente sobre los asientos de la válvula.

**Anillo igualador de presión.** Los internos deben de contener un anillo igualador de presión que distribuya el flujo de líquido alrededor del tapón para evitar vibración por concentración de flujo en una sola sección y flexionamiento del tapón que puede provocar que el tapón se pegue en alguna posición.



## Especificaciones relacionadas con los internos de las válvulas de control que manejen gas o vapor

**Velocidad.** La velocidad de un gas o vapor a la salida de los internos de la válvula de control debe ser equivalente a una cabeza velocidad  $V_h$  menor a 70 psia. La cabeza velocidad  $V_h$  es igual a la densidad del gas multiplicada por la velocidad al cuadrado, todo entre 2 g que es la constante universal de cálculo. Se prefiere la  $V_h$  porque el gas que es un fluido compresible varía su densidad por el peso molecular, la presión y la temperatura. Desde luego que si se habla de velocidad se debe siempre recordar que no se deben manejar velocidades cercanas al Mach (unidad de velocidad, igual a la de propagación del sonido en el medio) correspondiente del gas o vapor, pues se tendrían vibraciones en la válvula de control que pudieran fracturar el material de alguna parte del sistema.

En aplicaciones de operación poco frecuente se puede aceptar una  $V_h < 150$  psia.

Los internos que permiten un diseño a la medida de la válvula de control cuando se tienen grandes caídas de presión, cuando se tiene que regular la velocidad del gas o vapor y el nivel de sonido, son aquellos que son tipo multipasos-multietapas, pues estos internos tendrán las etapas requeridas por donde pasará el gas para bajar verdaderamente la velocidad hasta alcanzar el nivel de sonido especificado.

**Dirección de flujo.** La dirección del gas o vapor en la válvula de control puede ser por abajo o por arriba del tapón si se trata de un gas o vapor limpio, pero si se sospecha que puede haber contaminación con sólidos, es imperativo que la dirección del gas sea por arriba del tapón, para proteger los asientos de la válvula por los efectos de los sólidos que pudieran causar erosión y abrasión.

**Nivel de sonido.** El nivel de sonido de un gas o vapor a la salida de los internos de una válvula de control debe ser menor a 85 decibeles audibles a un metro de distancia, sin aislamiento de ningún tipo, pues el ruido se genera por el paso del gas a través de la válvula y si se modera el ruido con aislamiento, el efecto físico del ruido a la válvula no se elimina. El ruido tiene efecto sobre las aleaciones y está asociado con la vibración.

El nivel de sonido  $< 85$  decibeles audibles a un metro de distancia se debe alcanzar sin artificios en la tubería anterior y posterior a la válvula, como orificios, deflectores, etc.

Para aplicaciones no frecuentes y recirculación se acepta un nivel de sonido  $< 90$  decibeles a un metro de distancia.

**Anillo igualador de presión.** Los internos de la válvula deben de contener un anillo igualador de presión para distribuir el flujo alrededor del tapón para evitar vibración inducida por flujo concentrado en una sección y que se flexione el tapón.

### 3.4 Tipos de válvulas

Debido a las diferentes variables, no puede haber una válvula universal; por tanto, para satisfacer los cambiantes requisitos de la industria se han creado innumerables diseños y variantes con el paso de los años, conforme se han desarrollado nuevos materiales. Todos los tipos de válvulas recaen en nueve categorías: válvulas de compuerta, válvulas de macho, válvulas de globo, válvulas de bola, válvulas de mariposa, válvulas de diafragma, válvulas de compresión, válvulas de retención y válvulas de desahogo (alivio).

Estas categorías básicas se describen a continuación. Sería imposible mencionar todas las características de cada tipo de válvula que se fabrica y no se ha intentado hacerlo. Más bien se presenta una descripción general de cada tipo en un formato general, se dan recomendaciones para servicio, aplicaciones, ventajas, desventajas y otra información útil.

### Válvulas de compuerta

La válvula de compuerta es de vueltas múltiples, en la cual se cierra el orificio con un disco vertical de cara plana que se desliza en ángulos rectos sobre el asiento (ver fig. 3.2).

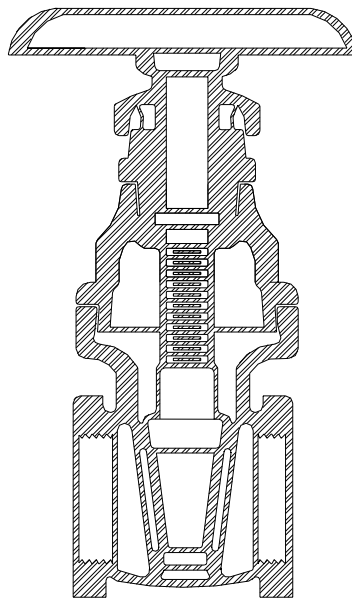


Fig. 3.2 Válvula de compuerta.

### Recomendada para:

- a) Servicio con apertura total o cierre total, sin estrangulación.
- b) Para uso poco frecuente.
- c) Para resistencia mínima a la circulación.
- d) Para mínimas cantidades de fluido o líquido atrapado en la tubería.

### Aplicaciones

Servicio general, aceites y petróleo, gas, aire, pastas semilíquidas, líquidos espesos, vapor, gases y líquidos no condensables, líquidos corrosivos.

## **Ventajas**

- a) Alta capacidad.
- b) Cierre hermético.
- c) Bajo costo.
- d) Diseño y funcionamiento sencillos.
- e) Poca resistencia a la circulación.

## **Desventajas**

- a) Control deficiente de la circulación.
- b) Se requiere mucha fuerza para accionarla.
- c) Produce cavitación con baja caída de presión.
- d) Debe estar cubierta o cerrada por completo.
- e) La posición para estrangulación producirá erosión del asiento y del disco.

## **Variaciones**

- a) Cuña maciza, cuña flexible, cuña dividida, disco doble.

## **Materiales**

- a) Cuerpo: bronce, hierro fundido, hierro, acero forjado, monel, acero fundido, acero inoxidable, plástico de PVC.
- b) Componentes diversos.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) Lubricar a intervalos periódicos.
- b) Corregir de inmediato las fugas por la empaquetadura.
- c) Enfriar siempre el sistema al cerrar una tubería para líquidos calientes y al comprobar que la válvula esta cerrada.
- d) No cerrar nunca la válvula a la fuerza con la una llave o una palanca.
- e) Abrir la válvula con lentitud para evitar el choque hidráulico en la tubería.
- f) Cerrar la válvula con lentitud para ayudar a descargar los sedimentos atrapados.

### Especificaciones para el pedido

- a) Tipo de conexiones de extremo.
- b) Tipo de cuña.
- c) Tipo de asiento.
- d) Tipo de vástago.
- e) Tipo de bonete.
- f) Tipo de empaquetadura del vástago.
- g) Capacidad nominal de presión para operación y diseño.
- h) Capacidad nominal de temperatura para operación y diseño.

### Válvulas de macho

La válvula de macho es de  $\frac{1}{4}$  de vuelta, que controla la circulación por medio de un macho cilíndrico o cónico que tiene un agujero en el centro, que se puede mover de la posición abierta a la cerrada mediante un giro de  $90^\circ$  (ver fig. 3.3).

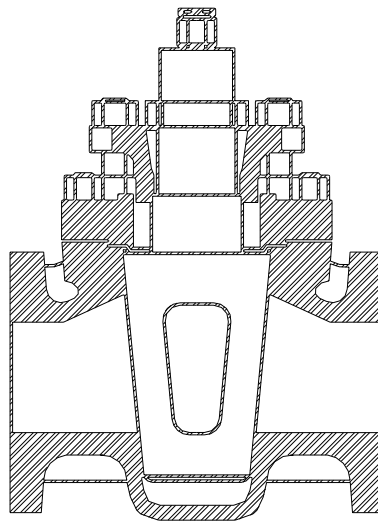


Fig. 3.3 Válvula de macho.

### Recomendada para:

- a) Servicio con apertura total o cierre total.
- b) Para accionamiento frecuente.

- c) Para baja caída de presión a través de la válvula.
- d) Para resistencia mínima a la circulación.
- e) Para cantidad mínima de fluido atrapado en la tubería.

### **Aplicaciones**

Servicio general, pastas semilíquidas, líquidos, vapores, gases, fluidos corrosivos.

### **Ventajas**

- a) Alta capacidad.
- b) Bajo costo.
- c) Cierre hermético.
- d) Funcionamiento rápido.

### **Desventajas**

- a) Requiere alta torsión (par) para accionarla.
- b) Desgaste del asiento.
- c) Cavitación con baja caída de presión.

### **Variaciones**

- a) Lubricada, sin lubricar, orificios múltiples.

### **Materiales**

Hierro, hierro dúctil, acero al carbono, acero inoxidable, monel, níquel, hastelloy.

### **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) Dejar espacio libre para mover la manija en las válvulas accionadas con una llave.
- b) Lubricar la válvula antes de ponerla en servicio.
- c) Asimismo, lubricarla a intervalos periódicos.

### **Especificaciones para pedido**

- a) Material del cuerpo.
- b) Material del macho.

- c) Capacidad nominal de temperatura.
- d) Disposición de los orificios, si es de orificios múltiples.
- e) Lubricante, si es válvula lubricada.

### Válvulas de globo

Una válvula de globo es de vueltas múltiples, en la cual el cierre se logra por medio de un disco o tapón que cierra o corta el paso del fluido en un asiento que suele estar paralelo con la circulación en la tubería (ver fig. 3.4).

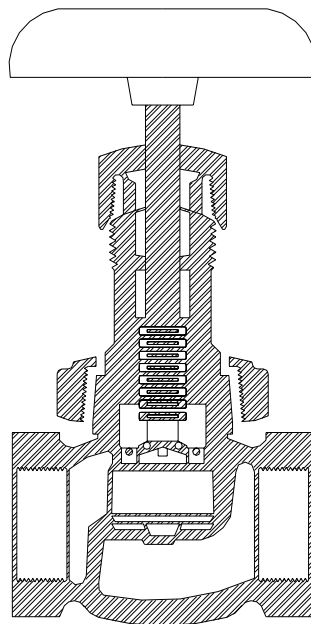


Fig. 3.4 Válvula de globo.

### Recomendada para:

- a) Estrangulación o regulación de circulación.
- b) Para accionamiento frecuente.
- c) Para corte de gases o aire.
- d) Cuando es aceptable cierta resistencia a la circulación.

## **Aplicaciones**

Servicio general, líquidos, vapores, gases, corrosivos, pastas semilíquidas.

## **Ventajas**

- a) Estrangulación eficiente con estiramiento o erosión mínimos del disco o asiento.
- b) Carrera corta del disco y pocas vueltas para accionarlas, lo cual reduce el tiempo y desgaste en el vástago y el bonete.
- c) Control preciso de la circulación.
- d) Disponible con orificios múltiples.

## **Desventajas**

- a) Gran caída de presión.
- b) Costo relativo elevado.

## **Variaciones**

- a) Normal (estándar), en "Y", en ángulo, de tres vías.

## **Materiales**

- a) Cuerpo: bronce, hierro, hierro fundido, acero forjado, monel, acero inoxidable, plásticos.
- b) Componentes: diversos.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) Instalar de modo que la presión este debajo del disco, excepto en servicio con vapor a alta temperatura.
- b) Registro en lubricación.
- c) Hay que abrir ligeramente la válvula para expulsar los cuerpos extraños del asiento.
- d) Apretar la tuerca de la empaquetadura, para corregir de inmediato las fugas por la empaquetadura.

## **Especificaciones para el pedido**

- a) Tipo de conexiones de extremo.
- b) Tipo de disco.

- c) Tipo de asiento.
- d) Tipo de vástago.
- e) Tipo de empaquetadura o sello del vástago.
- f) Tipo de bonete.
- g) Capacidad nominal para presión.
- h) Capacidad nominal para temperatura.

### Válvulas de bola

Las válvulas de bola son de  $\frac{1}{4}$  de vuelta, en las cuales una bola taladrada gira entre asientos elásticos, lo cual permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola  $90^\circ$  y cierra el conducto (ver fig. 3.5).

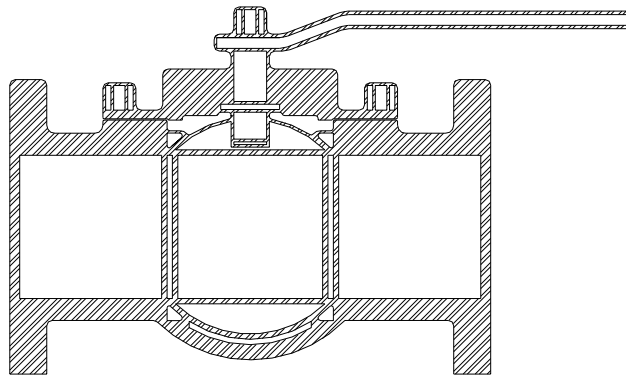


Fig. 3.5 Válvula de bola.

### Recomendada para:

- a) Para servicio de conducción y corte, sin estrangulación.
- b) Cuando se requiere apertura rápida.
- c) Para temperaturas moderadas.
- d) Cuando se necesita resistencia mínima a la circulación.



## **Aplicaciones**

Servicio general, altas temperaturas, pastas semilíquidas.

## **Ventajas**

- a) Bajo costo.
- b) Alta capacidad.
- c) Corte bidireccional.
- d) Circulación en línea recta.
- e) Pocas fugas.
- f) Se limpia por si sola.
- g) Poco mantenimiento.
- h) No requiere lubricación.
- i) Tamaño compacto.
- j) Cierre hermético con baja torsión (par).

## **Desventajas**

- a) Características deficientes para estrangulación.
- b) Alta torsión para accionarla.
- c) Susceptible al desgaste de sellos o empaquetaduras.
- d) Propensa a la cavitación.

## **Variaciones**

- a) Entrada por la parte superior, cuerpo o entrada de extremo dividido, tres vías, orificio de tamaño total, orificio de tamaño reducido.

## **Materiales**

- a) Cuerpo: hierro fundido, hierro dúctil, bronce, latón, aluminio, aceros al carbono, aceros inoxidable, titanio, tántalo, zirconio; plásticos de polipropileno y PVC.
- b) Asiento: TFE, Nylon, Buna-N, neopreno.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

Dejar suficiente espacio para accionar una manija larga.

## **Especificaciones para el pedido**

- a) Temperatura de operación.
- b) Tipo de orificio en la bola.
- c) Material para el asiento.
- d) Material para el cuerpo.
- e) Presión de funcionamiento.
- f) Orificio completo o reducido.
- g) Entrada superior o entrada lateral.

## **Válvulas de mariposa**

La válvula de mariposa es de  $\frac{1}{4}$  de vuelta y controla la circulación por medio de un disco circular, con el eje de su orificio en ángulos rectos con el sentido de la circulación (ver fig. 3.6).

## **Recomendada para:**

- a) Servicio con apertura total o cierre total.
- b) Servicio con estrangulación.
- c) Para accionamiento frecuente.
- d) Cuando se requiere corte para gases o líquidos.
- e) Cuando solo se permite un mínimo de fluido atrapado en la tubería.
- f) Para baja caída de presión a través de la válvula.

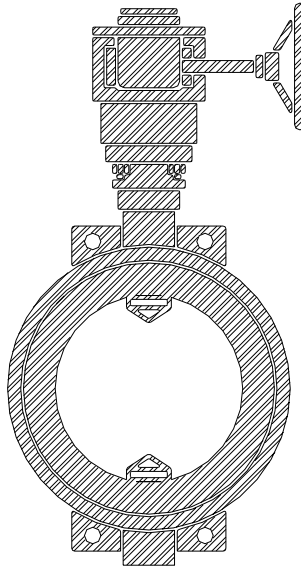


Fig. 3.6 Válvula de mariposa.

### **Aplicaciones**

Servicio general, líquidos, gases, pastas semilíquidas, líquidos con sólidos en suspensión.

### **Ventajas**

- a) Ligera de peso, compacta, bajo costo.
- b) Requiere poco mantenimiento.
- c) Numero mínimo de piezas móviles.
- d) No tiene bolas o cavidades.
- e) Alta capacidad.
- f) Circulación en línea recta.
- g) Se limpia por si sola.

### **Desventajas**

- a) Alta torsión (par) para accionarla.
- b) Capacidad limitada para caída de presión.
- c) Propensa a la cavitación.

## **Variaciones**

Disco plano, disco realzado, con brida, atornillado, con camisa completa, alto rendimiento.

## **Materiales**

- a) Cuerpo: hierro, hierro dúctil, aceros al carbono, acero forjado, aceros inoxidable, bronce, monel.
- b) Disco: todos los metales; revestimientos de elastómeros como TFE, Buna-N, neopreno.
- c) Asiento: Buna-N, viton, neopreno, caucho, poliuretano, TFE.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) Se puede accionar con palanca, volante o rueda.
- b) Dejar suficiente espacio para el movimiento de la manija, si se acciona con palanca.
- c) Las válvulas deben estar en posición cerrada durante el manejo y la instalación.

## **Especificaciones para el pedido**

- a) Tipo de cuerpo.
- b) Tipo de asiento.
- c) Material del cuerpo.
- d) Material del disco.
- e) Material del asiento.
- f) Tipo de accionamiento.
- g) Presión de funcionamiento.
- h) Temperatura de funcionamiento.

## **Válvulas de diafragma**

Las válvulas de diafragma son de vueltas múltiples y efectúan el cierre por medio de un diafragma flexible sujeto a un compresor. Cuando el vástago de la válvula hace descender el compresor, el diafragma produce sellamiento y corta la circulación (ver fig. 3.7).

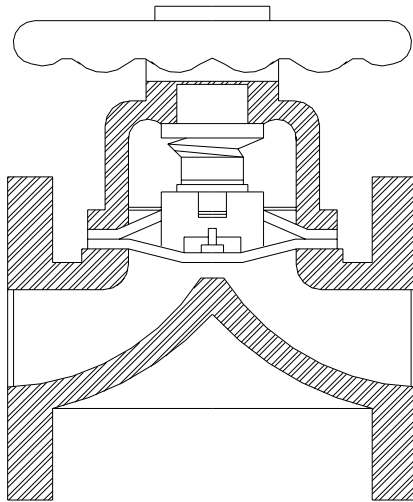


Fig. 3.7 Válvula de diafragma.

**Recomendada para:**

- a) Servicio con apertura total o cierre total.
- b) Para servicio de estrangulación.
- c) Para servicio con bajas presiones de operación.

**Aplicaciones**

Fluidos corrosivos, materiales pegajosos o viscosos, pastas semilíquidas fibrosas, lodos, alimentos, productos farmacéuticos.

**Ventajas**

- a) Bajo costo.
- b) No tienen empaquetaduras.
- c) No hay posibilidad de fugas por el vástago.
- d) Inmune a los problemas de obstrucción, corrosión o formación de gomas en los productos que circulan.

**Desventajas**

- a) Diafragma susceptible de desgaste.
- b) Elevada torsión al cerrar con la tubería llena.

## **Variaciones**

Tipo con vertedero y tipo en línea recta.

## **Materiales**

Metálicos, plásticos macizos, con camisa, en gran variedad de cada uno.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) Lubricar a intervalos periódicos.
- b) No utilizar barras, llaves ni herramientas para cerrarla.

## **Especificaciones para el pedido**

- a) Material del cuerpo.
- b) Material del diafragma.
- c) Conexiones de extremo.
- d) Tipo del vástago.
- e) Tipo del bonete.
- f) Tipo de accionamiento.
- g) Presión de funcionamiento.
- h) Temperatura de funcionamiento.

## **Válvulas de compresión**

La válvula de compresión es de vueltas múltiples y efectúa el cierre por medio de uno o más elementos flexibles, como diafragmas o tubos de caucho que se pueden apretar u oprimir entre sí para cortar la circulación (ver fig. 3.8).

## **Recomendada para:**

- a) Servicio de apertura y cierre.
- b) Servicio de estrangulación.
- c) Para temperaturas moderadas.
- d) Cuando hay baja caída de presión a través de la válvula.

e) Para servicios que requieren poco mantenimiento.

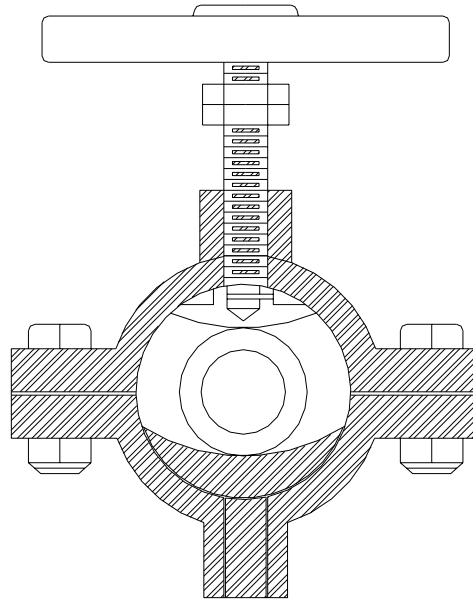


Fig. 3.8 Válvula de compresión.

### Aplicaciones

Pastas semilíquidas, lodos y pastas de minas, líquidos con grandes cantidades de sólidos en suspensión, sistemas para conducción neumática de sólidos, servicio de alimentos.

### Ventajas

- a) Bajo costo.
- b) Poco mantenimiento.
- c) No hay obstrucciones o bolsas internas que la obstruyan.
- d) Diseño sencillo.
- e) No corrosiva y resistente a la abrasión.

### Desventajas

- a) Aplicación limitada para vacío.
- b) Difícil de determinar el tamaño.

## **Variaciones**

Camisa o cuerpo descubierto; camisa o cuerpo metálicos alojados.

## **Materiales**

Caucho, caucho blanco, poliuretano, neopreno, Buna-N, Buna-S, Viton A, caucho, TFE.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

Los tamaños grandes pueden requerir soportes encima o debajo de la tubería, si los soportes para el tubo son inadecuados.

## **Especificaciones para el pedido**

- a) Presión de funcionamiento.
- b) Temperatura de funcionamiento.
- c) Materiales de la camisa.
- d) Camisa descubierta o alojada.

## **Válvulas de retención (check) y de desahogo (alivio)**

Hay dos categorías de válvulas y son para uso específico, más bien que para servicio general: válvulas de retención (check) y válvulas de desahogo (alivio). Al contrario de los otros tipos descritos, son válvulas de accionamiento automático, funcionan sin controles externos y dependen para su funcionamiento de sentido de circulación o de las presiones en el sistema de tubería. Como ambos tipos se utilizan en combinación con válvulas de control de circulación, la selección de la válvula, con frecuencia, se hace sobre la base de las condiciones para seleccionar la válvula de control de circulación.

## **Válvulas de retención (check)**

La válvula de retención (fig. 3.9) esta destinada a impedir una inversión de la circulación. La circulación del líquido en el sentido deseado abre la válvula; al invertirse la circulación, se cierra. Hay tres tipos básicos de válvulas de retención: 1) válvulas de retención de columpio, 2) de elevación y 3) de mariposa.

## **Válvulas de retención del columpio**

Esta válvula tiene un disco con bisagra o de charnela que se abre por completo con la presión en la tubería y se cierra cuando se interrumpe la presión y empieza la circulación inversa. Hay dos diseños: uno en "Y" que tiene una abertura de acceso en el cuerpo para el esmerilado fácil del disco sin desmontar la válvula de la tubería y un tipo de circulación en línea recta que tiene anillos de asiento reemplazables.



**Recomendada para:**

- a) Cuando se necesita resistencia mínima a la circulación.
- b) Cuando hay cambios poco frecuentes del sentido de circulación en la tubería.
- c) Para servicio en tuberías que tienen válvulas de compuerta.
- d) Para tuberías verticales que tienen circulación ascendente.

**Aplicaciones**

Para servicio con líquidos a baja velocidad.

**Ventajas**

- a) Puede estar por completo a la vista.
- b) La turbulencia y las presiones dentro de la válvula son muy bajas.
- c) El disco en "Y" se puede esmerilar sin desmontar la válvula de la tubería.

**Variaciones**

Válvulas de retención con disco inclinable.

**Materiales**

- a) Cuerpo: bronce, hierro fundido, acero forjado, Monel, acero fundido, acero inoxidable, acero al carbono.
- b) Componentes: diversos.

**Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) En las tuberías verticales, la presión siempre debe estar debajo del asiento.
- b) Si una válvula no corta el paso, examinar la superficie del asiento.
- c) Si el asiento está dañado o escoriado, se debe esmerilar o reemplazar.
- d) Antes de volver a armar, limpiar con cuidado todas las piezas internas.

**Válvulas de retención de elevación**

Una válvula de retención de elevación es similar a la válvula de globo, excepto que el disco se eleva con la presión normal en la tubería y se cierra por gravedad y la circulación inversa.

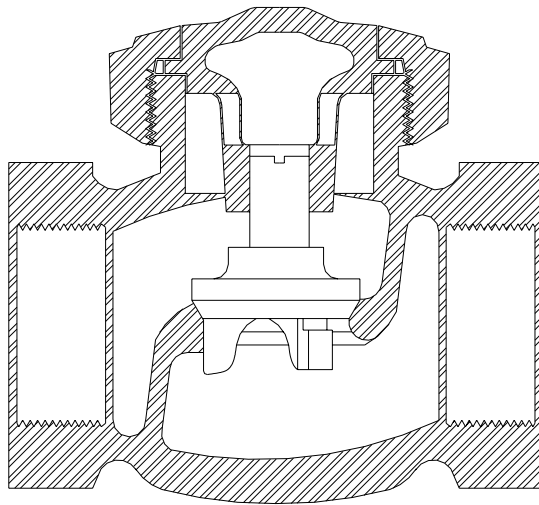


Fig. 3.9 Válvula de retención (tipo de elevación).

#### **Recomendada para:**

- a) Cuando hay cambios frecuentes de circulación en la tubería.
- b) Para uso con válvulas de globo y angulares.
- c) Para uso cuando la caída de presión a través de la válvula no es problema.

#### **Aplicaciones**

Tuberías para vapor de agua, aire, gas, agua y vapores con altas velocidades de circulación.

#### **Ventajas**

- a) Recorrido mínimo del disco a la posición de apertura total.
- b) Acción rápida.

#### **Variaciones**

- a) Tres tipos de cuerpos: horizontal, angular, vertical.
- b) Tipos con bola (esfera), pistón, bajo carga de resorte, retención para vapor.

#### **Materiales**

- a) Cuerpo: bronce, hierro, hierro fundido, acero forjado, monel, acero inoxidable, PVC, camisa de TFE.
- b) Componentes: diversos.

### **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) La presión de la tubería debe estar debajo del asiento.
- b) La válvula horizontal se instala en tuberías horizontales.
- c) La válvula vertical se utiliza en tubos verticales con circulación ascendente, desde debajo del asiento.
- d) Si hay fugas de la circulación inversa, examinar disco y asiento.

### **Válvula de retención de mariposa**

Una válvula de retención de mariposa tiene un disco dividido con bisagra en un eje en el centro del disco, con un sello flexible sujeto al disco a 45° con el cuerpo de la válvula, cuando esta se encuentra cerrada. Luego, el disco solo se mueve una distancia corta desde el cuerpo hacia el centro de la válvula para abrir por completo.

### **Recomendada para:**

- a) Cuando se necesita resistencia mínima a la circulación en la tubería.
- b) Cuando hay cambios frecuentes en el sentido de la circulación.
- c) Para uso con las válvulas de mariposa, macho, bola, diafragma o de compresión.

### **Aplicaciones**

Servicio para líquidos o gases.

### **Ventajas**

- a) El diseño del cuerpo se presta para la instalación de diversos tipos de camisas de asiento.
- b) Menos costosa cuando se necesita resistencia a la corrosión.
- c) Funcionamiento rápido.
- d) La sencillez del diseño permite construirlas con diámetros grandes.
- e) Se puede instalar virtualmente en cualquier posición.

### **Variaciones**

- a) Con camisa completa.
- b) Con asiento blando.

## **Materiales**

- a) Cuerpo: acero, acero inoxidable, titanio, aluminio, PVC, polietileno, polipropileno, hierro fundido, monel, bronce.
- b) Sello flexible: Buna-N, Viton, caucho de butilo, TFE, neopreno.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) En las válvulas con camisa, esta se debe proteger contra daños durante el manejo.
- b) Comprobar que la válvula queda instalada de modo que la abra la circulación normal.

## **Válvulas de desahogo (alivio)**

Una válvula de desahogo (fig. 3.10) es de acción automática para tener regulación automática de la presión. El uso principal de esta válvula es para servicio no comprimible y se abre con lentitud conforme aumenta la presión, para regularla.

La válvula de seguridad es similar a la válvula de desahogo y se abre con rapidez con un "salto" para descargar la presión excesiva ocasionada por gases o líquidos comprimibles.

El tamaño de las válvulas de desahogo es muy importante y se determina mediante formulas específicas.

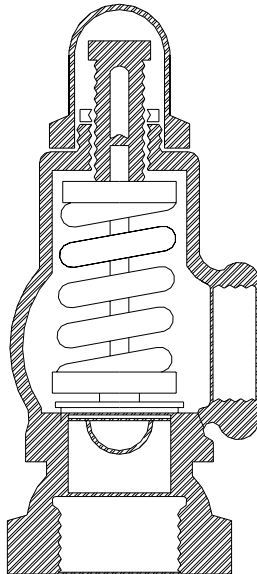


Fig. 3.10 Válvula de desahogo (alivio).

**Recomendada para:**

Sistemas en donde se necesita una gama predeterminada de presiones.

**Aplicaciones**

Agua caliente, líquidos en general, vapor de agua, gases, vapores.

**Ventajas**

- a) Bajo costo.
- b) No se requiere potencia auxiliar para la operación.

**Variaciones**

- a) Seguridad, desahogo de seguridad.
- b) Construcción con diafragma para válvulas utilizadas en servicio corrosivo.

**Materiales**

- a) Cuerpo: hierro fundido, acero al carbono, vidrio y TFE, bronce, latón, camisa de TFE, acero inoxidable, hastelloy, monel.
- b) Componentes: diversos.

**Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- a) Se debe instalar de acuerdo con las disposiciones del Código ASME (American Society of Mechanical Engineers) para recipientes de presión sin fuego.
- b) Se debe instalar en lugares de fácil acceso para inspección y mantenimiento.

### **3.5 Características de caudal y curvas características**

La característica de caudal de una válvula de control es la relación existente, a presión diferencial constante, entre el caudal a través de la válvula y su carrera cuando ésta varía en todo su campo. Usualmente esto se representa gráficamente tomando como abcisas a la carrera del obturador de la válvula, mientras que en el eje de las ordenadas se considera el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante.

El propósito de la caracterización de la válvula de control es el facilitar una relativa estabilidad del lazo de control ante las variaciones esperadas de las condiciones de operación del sistema.

Las tres características más utilizadas son las denominadas lineal, igual porcentaje o isoporcentual y apertura rápida (ver fig. 3.11).

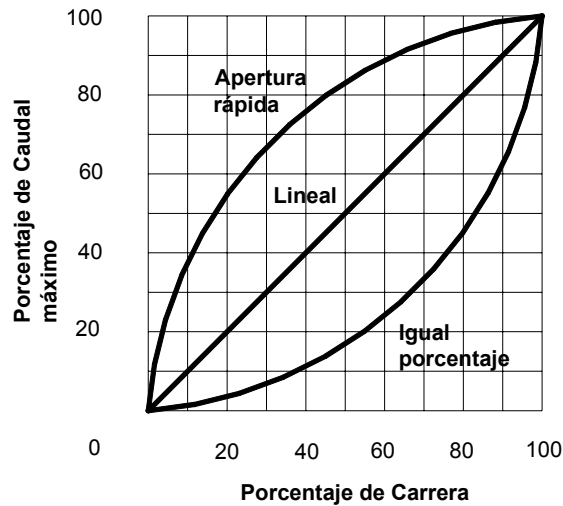


Fig. 3.11 Gráfica que establece las características lineal, igual porcentaje y de apertura rápida.

La característica lineal es por sí misma explicativa, ya que la capacidad de la válvula varía linealmente con la carrera del obturador.

Diremos que una válvula presenta característica isoporcentual cuando incrementos iguales de la carrera de la válvula producen cambios en igual porcentaje en el caudal existente antes de producirse el incremento de carrera.

Una válvula con característica de apertura rápida facilita un máximo cambio de caudal a bajas aperturas, siendo posteriormente muy pequeña su ganancia.

Diversas reglas han sido establecidas con el fin de seleccionar la característica de caudal óptima de la válvula de control, si bien la forma más idónea para la elección de ésta, viene dada por el análisis dinámico del sistema.

No obstante, y a falta de éste, las dificultades pueden ser solventadas mediante las sugerencias establecidas en la tabla 3.1, a pesar de que el control óptimo puede que no sea alcanzado.

En primer instancia y cuando el proceso no es bien conocido, de forma general, se puede decir que se usarán válvulas:

Isoporcentuales para:

- a) Procesos rápidos.
- b) Cuando la dinámica del sistema no se conoce muy bien.

- c) Cuando se requiere alta rangeabilidad.

Lineales para:

- a) Procesos lentos.
- b) Cuando más del 40 % de la caída de presión del sistema cae en la válvula.

Apertura rápida para:

- a) Control on-off.
- b) Cuando la máxima capacidad de la válvula debe ser obtenida rápidamente.

La experiencia y numerosos análisis muestran que en caso de duda lo mejor es seleccionar una característica isoporcentual.

| Variable controlada | Condiciones de proceso   | Característica a utilizar |
|---------------------|--|---------------------------|
| Nivel               | La caída de presión aumenta en relación 2 a 1 o superior cuando el Caudal aumenta.   | Apertura rápida           |
|                     | Cualquier otra.  | Lineal                    |
| Presión             | Fluido en estado líquido   | Igual porcentaje          |
|                     | Fluido compresible donde el sistema es rápido (generalmente menos de 3 metros aprox. de la tubería aguas abajo. lo que hace que la presión se incremente rápidamente). | Igual porcentaje          |
|                     | Fluido compresible donde el sistema es lento (generalmente más de 30 metros aprox. de tubería aguas abajo. lo que hace que la presión se incremente lentamente).       | Lineal                    |
|                     | Fluido compresible donde la caída de presión varía en relación 5 a 1 o mayor (aplicable tanto si el sistema es rápido como lento).                                     | Igual porcentaje          |
| Caudal              | Elemento de medida instalado en serie con la válvula   | Lineal                    |
|                     | El caudal es pequeño con altas variaciones en la presión diferencial   | Igual porcentaje          |
| Temperatura         | Aplicaciones en general  | Igual Porcentaje          |

Tabla 3.1 Selección del tipo de característica en válvulas de control a emplearse de acuerdo al proceso.

### 3.6 Corrosión y erosión en las válvulas

Con el fin de evitar la corrosión de la válvula, se requiere seleccionar el material de las mismas, dicha selección depende particularmente del medio en donde se trabaje, siendo necesaria la utilización de materiales combinados.

Si bien existen tablas que nos proporcionan ayuda en la selección del material, la selección dependerá principalmente de las pruebas experimentales a que se someta el material en el proceso.

Cuando las cuestiones de practicidad o bien de tipo económico no permitan la utilización de un dado material, se pueden utilizar revestimientos, generalmente plásticos, fluorocarbonos, elastómeros o vidrio.

Para la clasificación del grado de resistencia a la corrosión se utiliza normalmente la designación del grado de resistencia por las letras A, B, y C, siendo la primera clasificación (A) recomendada para pequeñas velocidades de corrosión (0.125 mm/año); la clasificación B recomendada si es permisible una corrosión limitada (0.125 a 1.25 mm/año), como en los casos en que los materiales de mayor resistencia sean muy caros o que no existan materiales adecuados; y, finalmente, la clasificación C (velocidades de corrosión mayores a 1.25 mm/año) o materiales inaceptables.

Cuando el fluido dentro de la válvula presenta una velocidad muy alta, erosionará los componentes de la válvula de control (internos, cuerpo y tuberías adyacentes) perdiéndose el control y la hermeticidad al estar cerrada. Los fluidos al pasar por la válvula de control a alta velocidad pueden provocar ciertos fenómenos, el gas provocará niveles altos de sonido (mayores a 80 decibeles a un metro de distancia) y además vibración; el líquido provocará cavitación y evaporación constante sostenida (flashing). La cavitación producirá vibración y un ruido característico como de piedras dentro de la válvula y la tubería de salida cercana. El flasheo producirá ruido más o menos constante y a veces vibración.

Tanto el ruido, la cavitación y el flasheo producen destrucción acelerada de la válvula con todas sus consecuencias de descontrol, fugas internas y externas, altos costos de mantenimiento y operación.

Lo anterior nos conduce a la correcta selección del material del cuerpo y obturador para resistir la erosión, poniendo particular atención en las condiciones extremas de presión diferencial y temperatura.

Los materiales termoplásticos son resistentes a la corrosión frente a muchos materiales químicos. No resisten las vibraciones mecánicas pero resultan convenientes como recubrimiento de metales proporcionando un buen manejo de la corrosión y las vibraciones.

Los materiales termoplásticos presentan el doble de duración que los metálicos frente a la erosión en los casos en que el caudal no supera los 3 m/s y el tamaño de las partículas flotantes en el líquido no supera los 300 mesh (referidos a la abertura o espacio en una criba; el valor de la malla se expresa por el número de aberturas por pulgada lineal).

La tabla 3.2 muestra las características de distintos materiales empleados en válvulas de control en un rango de temperatura.



| <b>Material</b>         | <b>Temperatura °C recomendada</b> | <b>Características</b>  |
|-------------------------|-----------------------------------|---|
| AISI-316                | -253 a 316                        | Las buenas características de fabricación y de resistencia a la corrosión, hacen que este material sea utilizado como el normalizado para las partes internas. Es usado para bajas caídas de presión.   |
| AISI-304                | -253 a 316                        | Similares características que el AISI-316, siendo generalmente seleccionado para trabajar a temperaturas criogénicas.   |
| AISI-416                | -28 a 427                         | Utilizado debido a su alta resistencia y relativamente buena resistencia a la corrosión. Es válido para altas caídas de presión, cuando es endurecido.  |
| AISI-440                | -28 a 427                         | Al poseer un alto porcentaje de cromo muestra buena resistencia a la erosión, corrosión y al desgaste cuando está endurecido. Es apto para caídas de presión elevadas.  |
| 17.4 PH<br>(St. St.)    | -40 a 427                         | Posee una buena resistencia a la corrosión y al desgaste. Después de ser tratado térmicamente alcanza una dureza considerable, lo que le hace válido para grandes caídas de presión.  |
| STELLITE 6<br>(ALLOY 6) | -273 a 816                        | Es un aleado de cobalto, cromo y tungsteno que muestra buena resistencia a la erosión y a la corrosión. Posee una moderada resistencia al daño producido por la cavitación y la evaporación.<br>Suele ser utilizado como tal material o bien aportado a otros (principalmente al AISI 316), para altas presiones diferenciales. |

Tabla 3.2 Características de los materiales empleados en válvulas de control.

### 3.7 Servomotores

Los servomotores pueden ser neumáticos, eléctricos, hidráulicos y digitales (siendo los dos primeros los más ampliamente utilizados debido a su simpleza, su rapidez de actuación y su gran capacidad de esfuerzo). Se considera que en la industria el 90% de las válvulas utilizadas se accionan neumáticamente.

Los servomotores de tipo hidráulico están constituidos de una bomba que se acciona eléctricamente suministrando fluido hidráulico a una servoválvula. La señal ocasiona que la servoválvula dirija el fluido

hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta lograr la posición exacta de la válvula por retroalimentación. Como sus características principales destacan su rapidez extrema, potencia y suavidad, y su alto costo, por lo que sólo se emplean en aplicaciones en donde los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.

Las válvulas de tipo digital disponen de compuertas neumáticas accionadas por electroválvulas las cuales son estimuladas por la señal de salida binaria de un microprocesador. Generalmente estas válvulas se limitan a fluidos limpios y no corrosivos, aún cuando resultan adecuadas para el mando digital directo, aunque su velocidad de apertura instantánea no representa una ventaja esencial frente a las válvulas neumáticas industriales, además de su elevado costo.

El servomotor neumático consiste en un diafragma con resorte que trabaja generalmente entre 3 psi (posición 0 de su carrera) y 15 psi (en la posición 100), de tal forma que existe una proporcionalidad entre las señales intermedias y sus correspondientes posiciones.

Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta que la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte alcanzan el equilibrio.

El servomotor eléctrico se compone de un motor eléctrico acoplado al vástago de la válvula por medio de un tren de engranajes. La característica principal de este motor es su par y el tiempo requerido para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada o viceversa (generalmente 1 minuto). Existen básicamente tres tipos de circuitos eléctricos de control capaces de actuar sobre el motor: todo-nada, flotante y proporcional.

Los servomotores son de acción directa cuando aplicando aire, el vástago se mueve hacia abajo: e inversa cuando al aplicar aire el vástago, se mueve hacia arriba. Para los servomotores de tipo eléctrico, se dice que son de acción directa cuando con el servomotor desexcitado la válvula está abierta, y de acción inversa cuando, con el servomotor desexcitado la válvula está cerrada.

### **3.8 Actuadores y tipos de acciones en las válvulas de control**

El fabricante será responsable del tamaño seleccionado del actuador, tomando en consideración principalmente las condiciones de operación del proceso. Los actuadores pueden ser tipo neumático de diafragma o de pistón de doble acción. Para aplicaciones con válvulas mayores de 2 pulgadas de diámetro y caídas de presión de > 580 psi no deben de usarse actuadores de diafragma. La presión de aire será de 135 psi o menores. Se pueden usar otro tipo de actuadores como excepción, por petición escrita del vendedor al comprador.

El material de un actuador tipo pistón debe ser el requerido para la aplicación y las condiciones ambientales.

El material de la tubería, válvulas y accesorios para el aire entre el actuador y la válvula de control debe de ser de acero inoxidable AISI 316. El diámetro mínimo debe de ser de 1/4 de pulgada NPT.

La inexactitud de la carrera de la válvula debido a cualquier limitación, debe ser menor a 2%.

El actuador cuando module debe de presentar estabilidad, solamente se permite una condición de inestabilidad de 2% en las pruebas en la fábrica y en el campo. El vendedor junto con la propuesta debe de presentar un reporte de prueba, que muestre la curva de funcionamiento en una experiencia previa en condiciones similares con la misma especificación.

La posición a la falla debe de llevarse a cabo sin ayuda de la presión del proceso. La posición a la falla de aire debe de probarse durante la inspección y antes de que la válvula opere estando el sistema sin presión. Cuando el resorte de retorno en un actuador tipo pistón no alcance la posición a la falla, el actuador debe ser equipado con un sistema seguro de falla. Los aumentadores de señal (booster) deben usarse cuando se necesiten para dar la velocidad de acción de actuación ya sea rápida o lenta, de acuerdo con la señal controlada.

El fabricante debe seleccionar una válvula con su actuador que cumpla con los requerimientos de velocidad de cierre o apertura especificados en las hojas de datos del proceso.

En todo tipo de aplicación se necesita verificar la velocidad de acción de la válvula. Los tiempos de apertura y cierre de la válvula deben de verificarse con el 100 % de rango de la señal de control sin ayuda de la presión del proceso. Estos tiempos se deben de probar durante la inspección del vendedor. Se pueden usar aumentadores de señal para alcanzar la velocidad requerida, pero los movimientos de la válvula al 20, 50 y 80 % de señal deben de permanecer estables en cada cambio.

El tiempo requerido para operación rápida de la válvula bajo condiciones de falla deben ser especificados separadamente. El fabricante puede usar válvulas de apertura rápida, probando que esto no interfiere con el control normal de operación del sistema del actuador.

Según su acción, los cuerpos de las válvulas se dividen en válvulas de acción directa (la válvula se cierra al aplicar aire sobre el diafragma o se abre cuando se quita el aire debido a la acción del resorte), y acción inversa (la válvula se abre cuando se aplica aire sobre el diafragma y se cierra por la acción del resorte cuando se quita el aire).

Al combinar estas acciones se considera siempre la posición de la válvula sin aire sobre su diafragma, con el resorte manteniendo el diafragma y por tanto la válvula en una de sus posiciones extremas.

Al seleccionar la válvula es importante considerar estos factores desde el punto de vista de seguridad. Ninguna instalación está exenta de averías y una de ellas puede ser un fallo de aire o de corriente de alimentación con lo cual la válvula pasa naturalmente a una de sus posiciones extremas y ésta debe ser la más segura para el proceso. En las válvulas de acción inversa en las que el resorte del servomotor neumático o eléctrico asienta el obturador en el asiento, cerrando la válvula, es importante consultar las tablas del fabricante para comprobar la presión diferencial máxima conque la válvula podrá cerrar.

Con la válvula en posición de cierre, la fuga de fluido que se produce está normalizada en la norma ANSI B16.104-1976, en las siguientes clases:

|          |   |
|----------|---|
| Clase I  | Fuga sin especificar.   |
| Clase II | 0.5 % del caudal a apertura total en válvulas de doble asiento, y con asiento metal-metal. Medio de prueba: Aire. |

|           |   |
|-----------|---|
| Clase III | 0.1 % del caudal a apertura total en válvulas de doble asiento, y con asiento metal-metal. Medio de prueba: Aire.   |
| Clase IV  | 0.01 % del caudal a apertura total en válvulas de simple asiento, y con asiento metal-metal. Medio de prueba: Aire.   |
| Clase V   | $5 \times 10^{-4}$ ml agua/minuto/pulgada de diámetro orificio/psi de presión diferencial, (o $3 \times 10^{-3}$ ml agua/minuto/mm de diámetro orificio/bar de presión diferencial) válvulas de simple asiento, y con asiento metal-metal. Medio de prueba: Agua. |
| Clase VI  | Fluido de prueba: aire o N <sub>2</sub> . Con los caudales:   |

| Diámetro nominal | Caudal de fuga                              |
|------------------|---|
| 1"               | 0.15 cm <sup>3</sup> /min (1 burbuja/min)   |
| 1 1/2"           | 0.30 cm <sup>3</sup> /min (2 burbujas/min)  |
| 2"               | 0.45 cm <sup>3</sup> /min (3 burbujas/min)  |
| 3"               | 0.90 cm <sup>3</sup> /min (6 burbujas/min)  |
| 4"               | 1.70 cm <sup>3</sup> /min (10 burbujas/min) |
| 6"               | 4.00 cm <sup>3</sup> /min (25 burbujas/min) |
| 8"               | 6.75 cm <sup>3</sup> /min (40 burbujas/min) |

Para válvulas con obturador de anillo de teflón con cierre hermético.

### 3.9 Accesorios

Los accesorios comúnmente montados sobre las válvulas de control son:

- Posicionador (neumático, electro-neumático o eléctrico): Instrumento que transmite una señal de carga neumática o eléctrica a un actuador para posicionar el obturador de la válvula exactamente en el lugar requerido por el instrumento de control.
- Filtro manorreductor: Regulador de presión con filtro incorporado utilizado para alimentar un posicionador u otro equipo de control.
- Volante manual (lateral o superior): Usado para posicionar manualmente la válvula y puede ser utilizado como limitador de carrera.
- Interruptor final de carrera: Generalmente utilizado para indicar eléctricamente posición abierta y/o cerrada de la válvula, así como para operar indicadores luminosos, válvulas solenoides, alarmas, etc.
- Transmisor de posición (neumático o eléctrico): Instrumento que emite una señal de salida proporcional a la posición del obturador de la válvula.

- f) Convertidor electroneumático: Convierte una señal electrónica en señal neumática, siendo esta última la utilizada para operar la válvula y/o instrumentos.
- g) Sistemas de enclavamiento: Están formados por equipos neumáticos y/o eléctricos (válvulas de enclavamiento, de solenoide, presostatos, etc.) y son utilizados para mantener o modificar la posición de la válvula por fallo de alimentación o por necesidades del proceso.

### 3.10 Principios de dimensionamiento de válvulas de control, coeficientes Kv o Cv

El correcto dimensionamiento de una válvula de control constituye un factor importante en el diseño de un lazo de control.

La selección del tamaño adecuado exige el conocimiento de las condiciones de proceso bajo las cuales ha de trabajar la válvula.

Usando esta información la técnica para el dimensionamiento de la válvula ha sido basada en una combinación de teoría y experimentación.

#### Ecuación básica para el dimensionamiento de válvulas en servicio líquido

Daniel Bernoulli fue uno de los primeros científicos que investigó sobre líquidos. Usando el principio de la conservación de la energía, descubrió que la cantidad de líquido que pasa a través de un orificio es función de la velocidad del fluido, siendo el cuadrado de ésta directamente proporcional a la presión diferencial existente en el orificio e inversamente proporcional al peso específico del fluido. Es decir, a mayor presión diferencial, mayor velocidad y a mayor peso específico menor velocidad.

Lógicamente la cantidad de caudal (Q) será calculada multiplicando la velocidad (V) por el área de paso (A)

$$Q = A \cdot V$$

En base a lo expuesto, podemos efectuar la siguiente transformación:

$$Q = CA \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

Siendo:

- Q = Caudal en galones por minuto.
- A = Área de paso en pulgadas cuadradas.
- $\Delta P$  = Presión diferencial en psi.
- G = Peso específico.
- C = Valor que recoge todas las constantes de proporcionalidad y las propias unidades de medida de caudal.

Ahora bien, esta ecuación es totalmente teórica y no toma en cuenta las pérdidas de energía debidas a las turbulencias y a las fricciones que se ocasionan como resultado del paso del fluido por el orificio.

Esta va a ser compensada por la introducción de un coeficiente de descarga ( $C_d$ ) específico para cada tipo de orificio.

$$Q = C C_d A \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

Como el área de paso es también una función de cada tipo de orificio, estos tres términos pueden ser agrupados en uno solo que, aplicado a válvulas, es denominado coeficiente de caudal ( $C_v$ ).

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

El coeficiente de caudal ( $C_v$ ) es determinado experimentalmente para cada tipo y tamaño de válvula, y nos indica el número de galones USA de agua a 60 °F que pasan a través de una válvula en un minuto cuando la presión diferencial es de una libra por pulgada cuadrada.

De forma análoga, podemos definir el  $K_v$  (sistema europeo) como el número de metros cúbicos de agua a 15 °C que pasan a través de una válvula cuando la presión diferencial en ésta es de un bar (ver tabla 3.3).

Así pues, el coeficiente de caudal provee un índice de comparación del flujo de líquido de los diferentes tipos de válvula.

### **Corrección por viscosidad**

La utilización de la fórmula básica para el cálculo del coeficiente de caudal en servicios de líquidos viscosos ha dado lugar a predicciones que la práctica, en determinadas ocasiones, ha refutado.

Con el fin de asegurar el correcto dimensionamiento han sido desarrollados procedimientos basados en el número de Reynolds que toman en consideración tanto el coeficiente de caudal o pseudocoficiente, calculado con la ecuación básica, como el caudal y la viscosidad, para obtener un factor de corrección ( $F_v$ ).

El correcto coeficiente vendrá dado por el valor del producto del factor de corrección,  $F_v$ , por el  $C_v$  inicial o pseudocoficiente calculado.

En algunas aplicaciones con fluidos viscosos no será necesaria corrección alguna, mientras que, en otras ocasiones, el factor de corrección puede tomar valores superiores a cien.

| SISTEMA AMERICANO   |  |
|---|--|
| $C_v = Q_{gpm} \frac{G}{\Delta P_d \text{ psi}}$                | <p><math>C_v</math> = Número de galones USA de agua a 60 °F que pasan a través de una válvula en un minuto cuando la presión diferencial en ésta es de 1 psi.<br/> <math>Q</math> = Caudal en galones por minuto.<br/> <math>G</math> = Peso específico relativo al agua.<br/> <math>\Delta P_d</math> = Presión diferencial para dimensionamiento, psi.</p> |
| SISTEMA EUROPEO   |  |
| $K_v = Q_{m^3/h} \frac{G}{\Delta P_d \text{ bar}}$              | <p><math>K_v</math> = Número de metros cúbicos de agua a 15 °C que pasan a través de una válvula en una hora cuando la presión diferencial en ésta es de 1 bar.<br/> <math>Q</math> = Caudal en m<sup>3</sup>/h<br/> <math>G</math> = Peso específico relativo al agua.<br/> <math>\Delta P_d</math> = Presión diferencial para dimensionamiento, bar.</p>   |
| La relación entre ambos es:                                     |  |
| $C_v = 1.156 Q_{m^3/h} \sqrt{\frac{G}{\Delta P_d \text{ bar}}}$ | $K_v = 0.865 Q_{gpm} \sqrt{\frac{G}{\Delta P_d \text{ psi}}}$  |

Tabla 3.3 Fórmulas relativas al coeficiente de caudal ( $C_v$ ).

En la industria, el diseño de las válvulas de control se apega a los siguientes procedimientos, dependiendo el tipo de servicio que prestará las válvulas de control.

### Válvulas de control para líquidos

#### Definiciones

Válvulas de control: Dispositivos mecánicos ó eléctricos las cuales son utilizadas para controlar el paso de flujo.

Las válvulas más frecuentemente utilizadas son:

| Tipo de válvula | Movimiento                        |
|-----------------|-----------------------------------|
| Globo           | Reciprocante (vástago deslizante) |
| Ángulo          | Reciprocante (vástago deslizante) |
| Bola            | Rotatorio                         |
| Mariposa        | Rotatorio                         |
| Macho           | Rotatorio                         |

Cv (coeficiente de dimensionamiento): Son los GPM (galones por minuto) que pasan a través de la válvula, con una gravedad específica de 1 con un  $\Delta P$  de 1 psig.

$\Delta P$  permisible: Es la diferencial de presión permitida para que la válvula opere en perfectas condiciones, ya que si se rebasa esta diferencial de presión, la válvula presentará cavitación o flasheo.

Ruido: Este término es medido en decibeles (dB), el cual se propaga en forma de ondas de frecuencia, en decibeles altos es peligroso para el oído humano.

La elaboración del cálculo de las válvulas de control para líquidos se realiza de acuerdo a este procedimiento operativo:

Para realizar la memoria de cálculo es necesario tener datos del proceso y del fluido tales como:

Q= Flujo ( $m^3/h$ )

$\Delta P$ = Presión diferencial ( $kg/cm^2$ )

G= Gravedad específica del fluido @ condiciones de operación

T= temperatura del fluido ( $^{\circ}C$ )

$P_1$ = Presión de entrada a la válvula ( $kg/cm^2$ ) manométrica

$P_v$ = Presión de vapor del fluido a la temperatura de entrada (psia)

$P_c$ = Presión crítica del fluido (psia)

En la memoria de cálculo se obtiene el Cv (coeficiente de dimensionamiento de la válvula). Con este coeficiente obtenido se consultan los catálogos de fabricantes de válvulas y se elige el tamaño y el tipo de diseño de la misma.

La característica del flujo de las válvulas tipo globo y ángulo se seleccionan de acuerdo a lo siguiente:

|  |   |
|--|---|
| Característica Lineal:                   | Se utiliza para válvulas en servicio de variable nivel.                                 |
| Característica Igual Porcentaje:         | Se utilizan para válvulas en servicio de las variables de flujo, presión y temperatura. |
| Característica apertura rápida (ON-OFF): | Se utiliza para válvulas en servicios de corte de producto.                             |

Las válvulas de bola, mariposa y macho, únicamente tienen característica cercana a igual porcentaje.

Por ciento de apertura recomendada de acuerdo a las características de flujo seleccionados para válvulas tipo globo y ángulo:

|                  |  |
|------------------|--|
| Lineal:          | Para flujo normal el Cv calculado debe estar entre 40% y 60% de apertura de la válvula para flujo máximo, el Cv calculado no debe rebasar el 90% de apertura.    |
| Igual Porcentaje | Para flujo normal el Cv calculado debe estar entre el 60% y 80% de apertura de la válvula. Para flujo máximo el Cv calculado no debe rebasar el 90% de apertura. |



Apertura rápida:

Cuando se tiene este servicio, no se calcula la válvula a menos que el departamento de proceso requiera caídas de presión.

Por ciento de apertura para válvulas rotatorias:

El por ciento de apertura para válvulas rotatorias para flujo normal el Cv calculado debe estar entre 50°-80°.

Una vez seleccionada la característica de la válvula y obtenido el Cv calculado se procede a seleccionar el tamaño de la misma, el tamaño mínimo a utilizar es la mitad del diámetro de la tubería, de no ser así se deberán seleccionar válvulas de puertos reducidos, posteriormente se calculan los decibeles que genera la válvula, el límite permisible es de < 85 dB medidos a un metro de distancia, si no cumple con este, se tendrá que recurrir a algún accesorio interno o un difusor para reducir el ruido.

Si la  $\Delta P$  de operación es mayor a la  $\Delta P$  permisible el Cv se calculara con el  $\Delta P$  permisible, ya que al llegar a la  $\Delta P$  permisible la válvula ya no da más flujo aunque se tenga en el sistema más caída de presión.

De igual forma se tendrá que tomar en cuenta el tipo de material de los internos de la válvula, de acuerdo al fluido utilizado y a las condiciones de operación del mismo como son: corrosión, temperatura, presión, etc.

Si aún recalculando la válvula, si la válvula cavita se tendrá que indicar el accesorio para evitarla. Si la válvula flashea se tendrá que pedir internos estelitados.

### **Válvulas de control para gases**

Desde luego las definiciones son las mismas que en el procedimiento anterior, por ello pasaremos a los datos necesarios para efectuar la memoria de cálculo.

La elaboración del cálculo de las válvulas de control para gases se realizara de acuerdo a este procedimiento:

Para realizar la memoria de cálculo es necesario tener datos del proceso y del fluidos tales como:

Q= Flujo ( $\text{Nm}^3/\text{h}$  @  $0^\circ\text{C}$  y  $1.033 \text{ kg}/\text{cm}^2$ )

$\Delta P$ = Presión diferencial ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

G= Gravedad específica del gas (peso molecular del gas/29)

T= Temperatura del fluido ( $^\circ\text{C}$ )

$P_1$ = Presión de entrada a la válvula ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

En la fórmula de cálculo se obtiene el Cg. y posteriormente el Cv. Con este coeficiente obtenido se consultan catalogos de fabricantes de válvulas y se elige el tamaño y el tipo de las mismas.

La característica de flujo de las válvulas tipo globo y ángulo se seleccionan de acuerdo a lo siguiente:

|  |   |
|--|---|
| Característica Igual Porcentaje (=%):    | Se utilizan en servicio de las variables de flujo, presión y temperatura. |
| Característica Apertura rápida (ON-OFF): | Se utiliza para válvulas en servicios de corte de producto.               |

Las válvulas de bola, mariposa y macho tienen únicamente característica cercana a =% (igual porcentaje).

Por ciento de apertura recomendada de acuerdo a las características de flujo seleccionado para válvulas tipo globo y ángulo:

|                        |  |
|------------------------|--|
| Igual Porcentaje (=%): | Para flujo normal el Cv calculado debe estar entre el 60% y 80% de apertura de la válvula. Para flujo máximo el Cv calculado no debe rebasar el 90% de apertura. |
|------------------------|--|

|                  |  |
|------------------|--|
| Apertura rápida: | Cuando se tiene este servicio, no se calcula la válvula a menos que el departamento de proceso requiera caídas de presión altas. |
|------------------|--|

|  |  |
|--|--|
| Por ciento de apertura para Válvulas rotatorias: | El por ciento de apertura para válvulas rotatorias para flujo normal el Cv calculado debe estar entre 50°-80°. |
|--|--|

Una vez seleccionada la característica de la válvula y obtenido el Cv calculado se procede a seleccionar el tamaño de la misma, el tamaño mínimo a utilizar es la mitad del diámetro de la tubería, de no ser así se deberán seleccionar válvulas de puertos reducidos, posteriormente se calculan los decibeles que genera la válvula, el límite permisible es de < 85 dB medidos a un metro de distancia, si no cumple con este, se tendrá que recurrir a algún accesorio interno o un difusor para reducir el ruido.

De igual forma se tendrá que tomar en cuenta el tipo de material de los internos de la válvula, de acuerdo al fluido utilizado y a las condiciones de operación del mismo como son: corrosión, temperatura, presión, etc.

### 3.11 Consideraciones en el flujo de líquido y vapor

El flujo de líquido o vapor a través de todos los sistemas de la planta se efectúa por medio de tuberías, bombas, válvulas de bloqueo, recipientes, cambiadores de calor, condensador, caldera, turbinas, etc. El líquido o el vapor ocasionan desgastes que se consideran normales en todas las partes del sistema por corrosión o erosión, pero cuando se detecta erosión mayor se debe de analizar el caso rápidamente para eliminar la causa. El líquido y el vapor deben de ser inocuos desde el punto de vista de la corrosión, pero su temperatura puede causar corrosividad aumentando los óxidos de hierro. La erosión es el desgaste de un sólido cuando un líquido o gas en contacto con él pasa a cierta velocidad. La erosión es proporcional a la velocidad del líquido o el vapor.

De acuerdo con lo anterior y considerando que en una planta de fuerza debe de tenerse controlada la corrosividad del líquido y el vapor, también debe de controlarse la velocidad del líquido y el vapor.

Los libros técnicos recomiendan que el agua y el vapor por donde circulen deben de manejarse a:

- velocidad del agua < 3 metros por segundo.
- velocidad del vapor < 30 metros por segundo.

Estas velocidades se pueden generalizar para cualquier líquido o gas/vapor.

Es muy conveniente manejar solamente líquidos o gases/vapores en un sistema. Si se tiene una fase mixta líquido vapor se complica el funcionamiento. Los sólidos representan un problema específico que debe ser eliminado por filtrado, pues de otra manera dañará rápidamente los componentes por donde circulan. La calidad del agua que se utilice es básica, o sea que no debe de tener contaminantes sólidos y los compuestos en disolución son permisibles en muy pequeña escala, por lo que todos los tipos de agua en una planta de fuerza se consideran como tal.

Los procesos diferentes de generación de vapor son similares y normalmente la temperatura y presión del agua que manejan las bombas no permiten la formación de fase mixta. Si se observaran problemas se deben de revisar estas condiciones y corregirse. La temperatura del vapor sobrecalentado producido no debe ser excesiva, solo suficiente para evitar baja calidad del mismo en cualquier parte del sistema.

Una mezcla líquido-gas tiene un peso específico efectivo resultante de la fracción de gas en el líquido. Se supone que el gas es insoluble en el líquido o que sólo se disuelve en una pequeña parte que puede despreciarse, que el líquido no se vaporiza al pasar a través de la válvula y que la velocidad de la mezcla a su paso por la válvula es suficiente para asegurar una buena mezcla turbulenta.

Cuando una mezcla de líquido y su vapor penetran en la válvula se presenta una vaporización adicional. Actualmente, en el estado alcanzado por la técnica es imposible predecir con exactitud la capacidad de la válvula trabajando en estas condiciones. Uno de los motivos que impide un cálculo exacto de la válvula es la variación tan grande que puede sufrir el peso específico efectivo si cambia la fracción del fluido que se vaporiza.

### **3.12 Vaporización (flasheo) y cavitación**

Estos dos fenómenos requieren una especial atención, ya que presentan una limitación a la ecuación básica de dimensionamiento de válvulas en servicio líquido.

Para simplificar el estudio del caudal, podemos representar la válvula de control como un simple orificio de restricción en la línea (fig. 3.12). La mínima sección de paso del fluido se produce aguas abajo de la restricción física y a una pequeña distancia de ésta, llamando a este punto vena contracta.

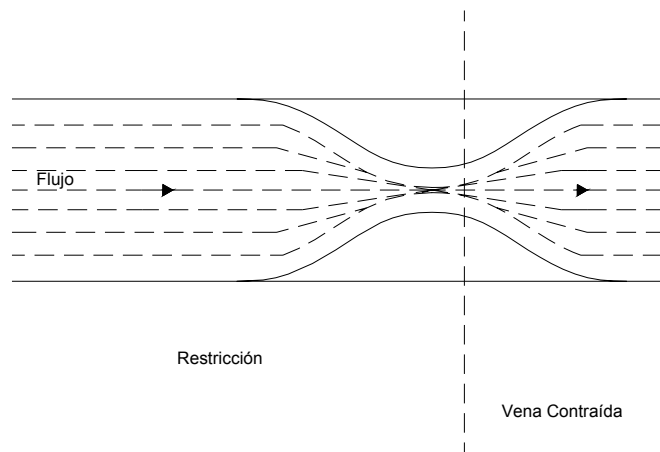


Fig. 3.12 Líneas de flujo en un orificio de restricción.

Para entender ambos fenómenos, es necesario primeramente comprender el intercambio que se produce entre energía cinética y energía potencial de un fluido, cuando éste pasa a través de una válvula u orificio de restricción.

Para asegurar el paso de líquido a través de la válvula, la velocidad debe ser mayor en la vena contracta, ya que el área de paso es menor.

Este incremento en la velocidad o energía cinética es conseguido a expensas de la presión o energía potencial.

La figura abajo muestra cómo la presión decrece mientras que la velocidad aumenta. La presión más baja y la velocidad más alta se presentan en la vena contracta. Atravesado este punto, al ser el área mayor, el fluido se expande con lo cual la velocidad decrece y en correspondencia la presión aumenta, sin alcanzar la presión inicial (ver fig. 3.13).

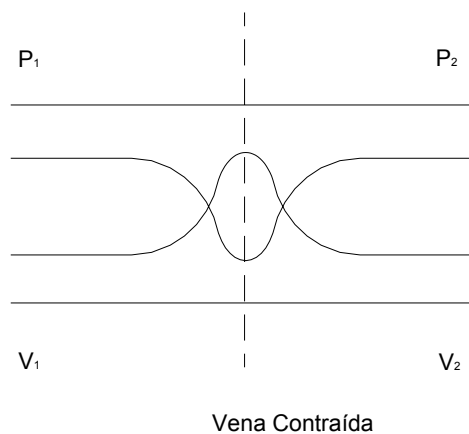


Fig. 3.13 Presión y velocidad a través de un orificio de restricción.

Ahora bien, atendiendo a la mayor o menor recuperación de la presión inicial, podemos clasificar los diferentes tipos de válvulas de control en dos grandes grupos: Las de alta recuperación (generalmente válvulas de paso recto) y las de baja recuperación (fig. 3.14).

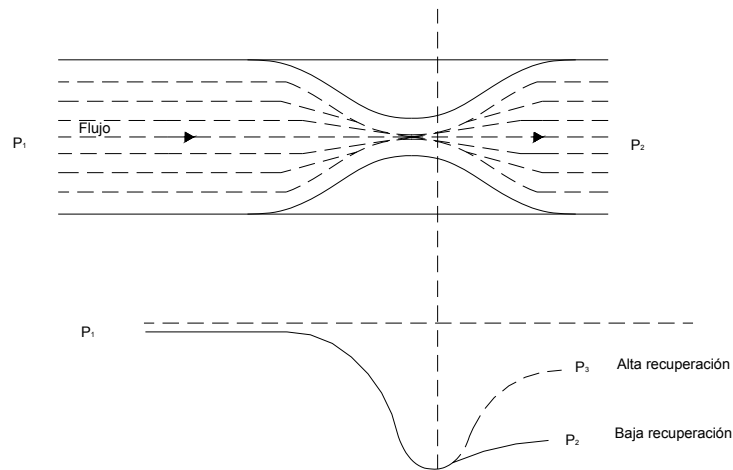


Fig. 3.14 Comparación del comportamiento de la presión en válvulas de alta y baja recuperación.

Conocemos que la menor presión es alcanzada en la vena contracta debido a la mayor velocidad existente. Si el valor conseguido en este punto se encuentra por debajo de la presión de vapor del fluido, se formarían burbujas de vapor, aumentando su número a medida que la presión se haga más baja. En este momento no existe diferencia entre “flasheo” y cavitación; lo que acontezca aguas abajo de la vena contracta es lo que marcará la diferencia.

Si la presión a la salida de la válvula permanece por debajo de la presión de vapor del líquido, las burbujas permanecerán en el sistema, conociéndose a este fenómeno como “flasheo” (fig. 3.15).

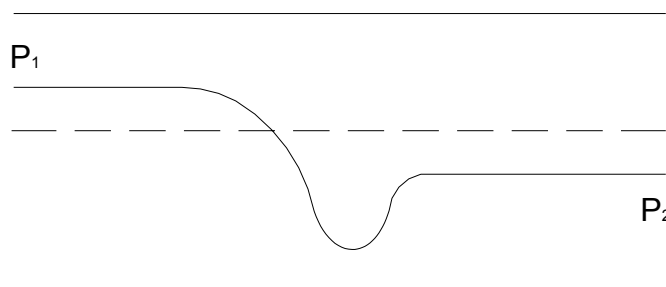


Fig. 3.15 Flashing.

Por el contrario, si la presión a la salida de la válvula alcanza valores superiores a la presión de vapor, las burbujas existentes colapsarán o implotarán, produciendo cavitación (ver fig. 3.16).

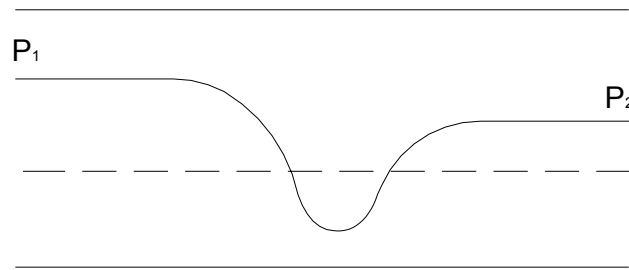


Fig. 3.16 Cavitación.

La formación de estas burbujas de vapor tiende a restringir el paso del fluido, alcanzándose una determinada situación en la que el caudal no puede ser incrementado, a pesar de aumentar la presión diferencial. Este límite viene marcado por la denominada máxima presión diferencial permisible para dimensionamiento ( $\Delta P_t$ ), siendo ésta función tanto de la configuración geométrica de la válvula (tipo de válvula y de obturador), como del tamaño de la misma.

La máxima presión diferencial permisible para dimensionamiento es la máxima caída de presión que será efectiva en incrementar el caudal, y viene dada por la siguiente fórmula.

$$\Delta P_t = F_t^2 (P_1 - F_f P_v)$$

Siendo:

$F_t$  = Factor de recuperación de presión de la válvula.

$P_1$  = Presión de entrada en términos absolutos.

$F_f$  = Factor relación de la presión crítica.

$P_v$  = Presión de vapor (absoluta) a la temperatura de entrada.

El factor de recuperación de presión de la válvula es determinado experimentalmente y relaciona las características de recuperación de presión de la válvula con el aumento de caudal a través de ella. Es por esto por lo que las válvulas denominadas de alta recuperación poseen un coeficiente de recuperación más bajo que las llamadas de baja recuperación.

El factor relación de la presión crítica ( $F_f$ ) viene dado como función de la presión de vapor y la presión crítica del líquido.

Resumiendo, podemos decir que si la presión diferencial a través de la válvula es mayor que la caída de presión permisible, el menor valor ha de ser utilizado en la ecuación básica para dimensionamiento de líquido.

Diremos entonces que nos encontramos ante condiciones críticas.

### 3.13 Ruido en válvulas de control

La preocupación pública por el ruido como consecuencia de la fatiga fisiológica y mental que causa, está favoreciendo el desarrollo de una legislación anti-ruido.

Es generalmente aceptado por las legislaciones vigentes, que el nivel sonoro a soportar durante un período máximo de 8 horas no sea superior a 90 dBA (nivel de presión medido en decibelios en la escala A de frecuencia de un medidor de nivel de sonido; el circuito A simula con mucha aproximación la sensibilidad del oído humano), si bien algunos expertos en medicina consideran 80/85 dBA como el límite más apropiado.

La tabla 3.4 trata de asignar algunos niveles sonoros que se dan en la vida cotidiana, con su nivel de intensidad.

| Nivel Sonoro dBA | Descripción comparativa (distancia a metros) |
|------------------|--|
| 140              | Motor de aviación (15)                       |
| 120              | Umbral de dolor oído humano.                 |
| 100              | Torno automático                             |
| 80               | Oficina con máquinas electromecánicas.       |
| 60               | Conversación normal.                         |
| 40               | Residencia silenciosa (interior)             |
| 20               | Reloj eléctrico.                             |
| 0                | Umbral de audición.                          |

Tabla 3.4 Distintos niveles de ruido en dBA.

Las válvulas instaladas en procesos industriales controlando líquidos y gases pueden contribuir sustancialmente a incrementar los niveles sonoros existentes. Este ruido puede ser generado por las vibraciones mecánicas de los componentes de la válvula y/o por causas de naturaleza hidrodinámica o aerodinámica.

Puede decirse que el ruido resultante de las vibraciones mecánicas ha sido minimizado mediante los nuevos diseños de válvulas y puede ser considerado más que un problema de ruido, un problema estructural. En servicio líquido, el ruido hidrodinámico es principalmente causado por la implosión de las burbujas de vapor que se forman en el proceso de cavitación.

En servicio de vapores y gases el ruido aerodinámico es consecuencia de las altas velocidades y de las turbulencias que se dan en el fluido de proceso. Las técnicas para estimar el valor del nivel sonoro tienen en consideración los siguientes parámetros:

- a) Presión diferencial en la válvula.
- b) Coeficiente de caudal requerido.
- c) Relación existente entre la presión diferencial y la presión de entrada.
- d) Configuración geométrica de la válvula.
- e) Tamaño y espesor de la tubería de salida.
- f) Presión de salida.
- g) Velocidad de salida del fluido.

Niveles de ruido superiores a 110 dBA no son recomendados, ya que podrían dar lugar a altas vibraciones, causando daños a la válvula de control, al actuador, a la instrumentación e incluso a la tubería. Dispositivos tales como partes internas especiales, difusores, silenciadores, etc, han sido diseñados con el fin de reducir los niveles sonoros.

### **3.14 Válvula de control digital**

Aparecida gracias al desarrollo de los microprocesadores, contiene un controlador digital, y sensores de medición de temperatura, caudal y presión montados en la propia válvula. El controlador digital controla la presión manométrica antes o después del orificio de la válvula, y la temperatura o el caudal, y envía la señal de salida al módulo del posicionador electroneumático acoplado al actuador. Cada válvula tiene grabada en una memoria ROM la variación del  $C_v$  correspondiente al intervalo 0 al 100 % de apertura de la válvula y el valor del factor de recuperación  $C_c$ , lo que permite conocer y controlar el caudal que está pasando a través de la válvula, todo esto gracias al microprocesador que calcula el caudal utilizando las fórmulas correspondientes. El software permite seleccionar la característica deseada de la válvula: lineal, igual porcentaje, apertura rápida y la que pueda especificar el usuario.

La válvula de control digital es una válvula “inteligente” que acepta la entrada del valor externo del punto de consigna y la comunicación digital a través de la interfaz RS-485 con el protocolo adecuado para comunicarse con los sistemas de control distribuido. De este modo, accede a los valores de la variable de proceso, el punto de consigna y las alarmas.

La válvula inteligente puede efectuar un diagnóstico de sí misma al medir la carrera del vástago y las presiones del actuador. Puede captar el excesivo rozamiento del vástago o el pegado de las partes internas. Además permite llevar el proceso a una condición de seguridad en el caso de problemas graves. Por ejemplo, si se pierde la comunicación con el control distribuido, el sistema puede ser programado para conducir la válvula a una posición de seguridad que impida la pérdida del material o para prevenir una condición de peligro para el operador de la planta.



# Diagramas de Tubería e Instrumentación

## 4.1 Clasificación de Instrumentos

Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada. Existen dos clasificaciones básicas que están relacionadas una con la función que desempeña el instrumento, y otra con la variable de proceso a la cual se asocia el instrumento. Estas clasificaciones son las siguientes:

- En función del instrumento
- En función de la variable de proceso

### En función del instrumento

Que a su vez se clasifican en:

- Instrumentos ciegos
- Instrumentos indicadores
- Instrumentos registradores
- Elementos primarios
- Transmisores
- Transductores y Convertidores
- Receptores y Controladores
- Elementos finales de control

### Instrumentos ciegos

Son todos aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, tales como los presóstatos y termostatos (interruptores de presión y temperatura), ya que sólo se ajusta el punto de disparo del interruptor al cruzar la variable a un valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de caudal, nivel, presión, temperatura y de cualquier otra variable sin indicación.

### Instrumentos indicadores

Los instrumentos indicadores son aquellos que normalmente disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos.

## **Instrumentos registradores**

Los instrumentos registradores registran con trazo continuo o a puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado según sea la forma del gráfico.

## **Elementos primarios**

Los elementos primarios están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado, para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada. El efecto producido por el elemento primario puede ser, un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc. Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz.

## **Transmisores**

Los transmisores captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi. (libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua. La señal neumática de 3 a 15 psi equivale a 0,206 - 1.033 bar (0,21 - 1,05 kg/cm<sup>2</sup>), por lo cual, también se emplea la señal en unidades métricas 0,2 a 1 bar (0,2 a 1 kg/cm<sup>2</sup>). Asimismo, se emplean señales electrónicas de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA c.c. No obstante, la señal normalizada es de 3 a 15 psi en neumática y 4 a 20 mA c.c. en electrónica. La señal digital utilizada en algunos transmisores inteligentes es apta directamente para el ordenador. El elemento primario puede formar o no parte integral del transmisor; por ejemplo, el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capilar, mientras que el segundo un transmisor de caudal con la placa orificio como elemento primario.

## **Transductores y Convertidores**

Los transductores reciben una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida. Son transductores, un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor P/I (señal neumática a intensidad), un convertidor I/P (señal de corriente a neumática), etc.

Los convertidores son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 mA c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar. Por ejemplo, un convertidor P/I (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica), un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

Conviene señalar que a veces se confunde el término convertidor con transductor. Este último término es general y no debe aplicarse a un aparato que convierta una señal de instrumentos.

## **Receptores y Controladores**

Los receptores reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados 3-15 psi., en señal neumática, o 4 -20 mA c.c., en señal electrónica, que actúan sobre el elemento final de control.

Los controladores comparan la variable controlada (flujo, nivel, presión, etc.) con un valor deseado (punto de ajuste) y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación existente.

El control de la variable puede ser directamente como es el caso de los controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor en campo.

### **Elementos finales de control**

El elemento final de control recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. En el control neumático, el instrumento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúa su carrera completa de 3 a 15 psi (0.2-1 bar). En el control eléctrico, el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico. En el control electrónico la válvula o el servomotor son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) o señal digital a presión que convierte la señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. o digital, a neumática (3-15 psi.).

En el control electrónico y en particular en regulación de temperatura de hornos, pueden utilizarse rectificadores de silicio (tiristores). Éstos se comportan esencialmente como bobinas de impedancia variable y varían la corriente de alimentación de las resistencias del horno, en la misma forma en que una válvula de control cambia el caudal de fluido en una tubería.

Las señales neumáticas (3-15 psi o 0.2-1 bar o 0.2-1 kg/cm<sup>2</sup>) y electrónica (4 -20 mA c.c.) permiten el intercambio entre instrumentos de la planta. No ocurre así en los instrumentos de señal de salida digital (transmisores, controladores) donde las señales son propias de cada suministrador. No obstante, existe el propósito de normalización y aplicación de un protocolo de comunicaciones por parte de firmas de instrumentos de control y por los comités internacionales encargados de tales propósitos.

El elemento final de control puede actuar también con señal digital y no con neumática (3-15 psi), a dicha válvula de control se le conoce como “válvula inteligente”, que con ayuda del microprocesador puede manipular toda una serie de variables a alta velocidad y precisión. A pesar de las grandes ventajas que ofrece esta clase de instrumento, su costo es elevado y además requiere que el lazo de control sea en señal digital para un mayor rendimiento y en el mismo protocolo de comunicación para su operabilidad. Debido a que esto implica una implementación tecnológica en la planta que puede ser costosa, es difícil aún, por el momento, que desplace a la tradicional señal neumática empleada en las válvulas de control convencionales, dado que estas tienen buen rendimiento, facilidad de instalación y no son tan costosas como las digitales.

Aunque a no muy largo plazo, el control digital y prácticamente el uso de la señal digital será un estándar en la operación de las plantas de proceso.

### **En función de la variable de proceso**

De acuerdo con la variable del proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, velocidad, pH, conductividad, etc.

Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso. De este modo, un transmisor neumático de temperatura del tipo de bulbo y capilar, es un instrumento de temperatura a pesar de que la medida se efectúa convirtiendo las variaciones de presión del fluido que llena el bulbo y el capilar; por lo que el aparato receptor de la señal neumática del transmisor anterior es un instrumento de temperatura, si bien, al ser

receptor neumático lo podríamos considerar instrumento de presión, caudal, nivel o cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente.

Asimismo, esta clasificación es independiente del número y tipo de transductores existentes entre el elemento primario y el instrumento final, así ocurre en el caso de un transmisor electrónico de nivel de 4 a 20 mA c.c., un receptor controlador con salida de 4-20 mA c.c., un convertidor intensidad-presión (I/P) que transforma la señal de 4-20 mA c.c. a neumática de 3-15 psi y la válvula neumática de control: todos estos instrumentos se consideran de nivel.

En la designación del instrumento, se utiliza en el lenguaje común, las dos clasificaciones expuestas anteriormente. Y de este modo, se consideran instrumentos tales como transmisores ciegos de presión, controladores registradores de temperatura, receptores indicadores de nivel, receptores controladores, registradores de caudal, etc.

En la figura 4.1 pueden apreciarse las diferentes clases de instrumentos empleados en la industria, de acuerdo a su función, a la variable de proceso y su ubicación.

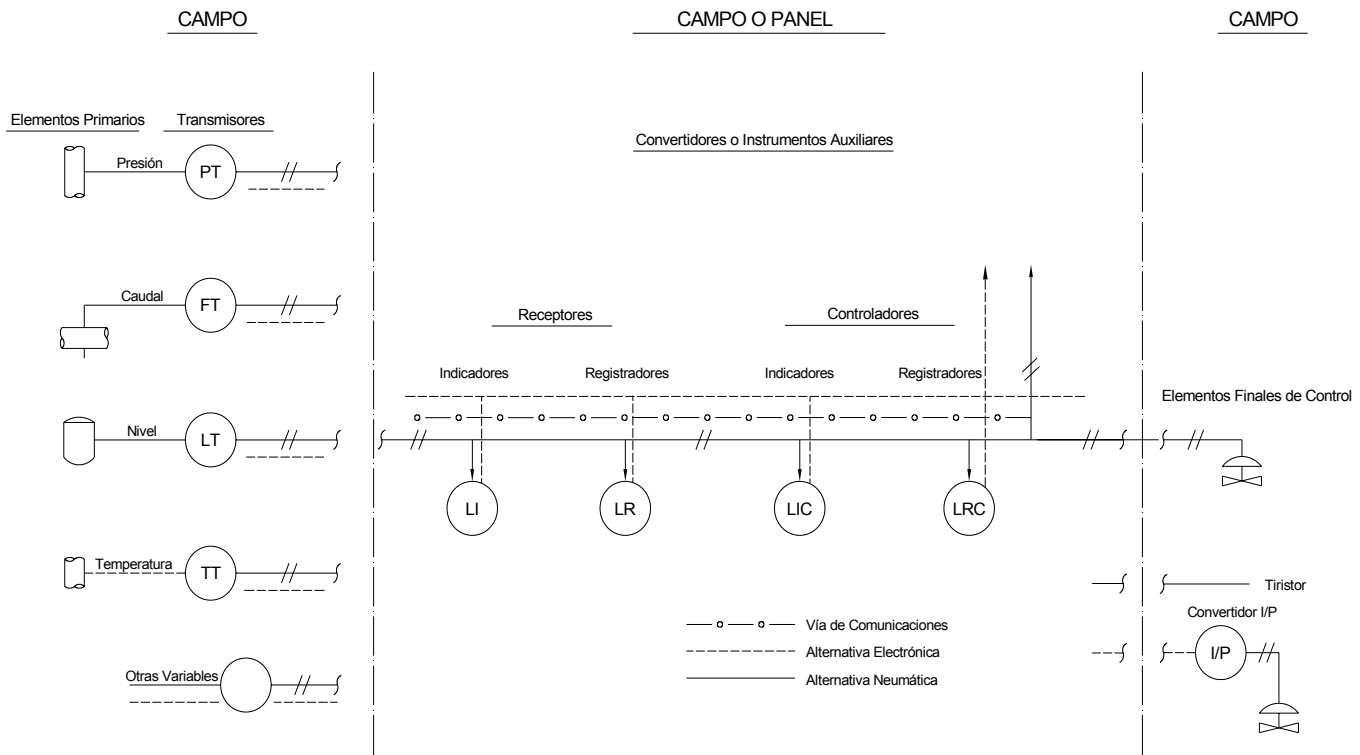


Fig. 4.1 Tipos de instrumentos.

Debe de resaltarse que se consideran los instrumentos de campo y de panel; donde la primera identificación incluye los instrumentos locales situados en el proceso o en sus proximidades (es decir, en tanques, tuberías, etc.) mientras que la segunda se refiere a los instrumentos montados en paneles, situados en salas aisladas o en zonas del proceso.

## 4.2 Resumen de la Norma ISA-S5.1-84 de Códigos de Identificación de Instrumentos

### Generalidades

Cada instrumento estará representado en los diagramas o planos por un símbolo. Este símbolo deberá estar acompañado por una identificación. Una identificación representativa es la siguiente:

|                                |                     |   |                                |                                    |
|--------------------------------|---------------------|---|--------------------------------|------------------------------------|
| T                              | RC                  | IO  | IO                             | A                                  |
| Primera Letra                  | Letras subsecuentes | Número de área, número de plano, conjunto, etc. | Número ordinal del instrumento | Sufijo (generalmente no necesario) |
| Identificación funcional       |                     | Identificación del circuito                     |                                |                                    |
| Identificación del Instrumento |                     |   |                                |                                    |

La identificación de los instrumentos considera la identificación funcional y la identificación del circuito como a continuación se detalla.

### Identificación por función

- a) La identificación por función de un instrumento, consistirá de letras de acuerdo a la tabla 4.1 de la norma ISA-S5.1-84 y deberá incluir una “primera letra”, describiendo la variable medida, y una ó más letras subsecuentes describiendo las funciones del instrumento individual. Una excepción a esta regla, es el uso de la letra sencilla L la cual denota una luz piloto, que no forma parte de un circuito de instrumentación.
- b) La identificación por función de un instrumento, deberá estar de acuerdo a su función y no a su construcción. Esto es, por ejemplo, si un registrador de presión diferencial es usado para la medición de flujo, deberá ser identificado como un FR; un indicador de presión y un interruptor de nivel neumático, deberán ser identificados como PI y LS, respectivamente.
- c) En un circuito de instrumentación, la primera letra de la identificación por función, debe ser seleccionada de acuerdo a la variable a medir ó variable iniciadora y no a la variable manipulada. Por tanto, una válvula de control que varía el flujo y actúa de acuerdo a un controlador de nivel, será una LV y no FV. Aunque la utilización de la primera letra no solo se refiere a una variable de proceso (flujo, nivel, etc.), sino que también puede hacer referencia a variables de operación (H, manual; Z, posición).
- d) Las letras subsecuentes de la identificación por función designan una ó más funciones pasivas ó de indicación ó ambas.

- e) La secuencia de letras de identificación, comenzará con una “primera letra”. (ver excepción en el inciso a). Estas letras serán seguidas por letras subsecuentes en cualquier secuencia y a éstas seguirán las letras de función de salida en cualquier secuencia, excepto que la letra de salida C (control), la cual precederá a la letra V (válvula), por ejemplo HCV, válvula de control actuada manualmente.
- f) La identificación de un instrumento en un diagrama de tuberías e instrumentación debe ser escrita con tantos círculos como variables medidas ó salidas tenga.

Por ejemplo, un transmisor registrador de relación de flujo con un interruptor de relación de flujo, puede ser identificado en un diagrama de flujo por dos círculos unidos, en uno se escribirá FFRT-3 y en el otro FFS-3. El instrumento será designado como FFRT/FFS-3 para todos los usos y referencias escritas.

- g) El número de letras de identificación por función agrupadas para un instrumento, deberá ser reducido a un mínimo de acuerdo al criterio de la persona que los emplee. El número total de letras inscritas en un grupo deben ser reducidas al mínimo por los medios siguientes:
  - (1) Si un instrumento indica y registra la misma variable medida, la letra I de indicación, deberá ser omitida.
  - (2) El número total de letras en un grupo no debe exceder de cuatro.
- h) Todas las letras de la identificación por función, deben ser mayúsculas.

### **Identificación del circuito del instrumento**

- a) Para la identificación del circuito al cual pertenece un instrumento, debe generalmente emplearse un número asignado a dicho instrumento. Cada circuito de instrumentos deberá tener un número ordinal único para cada instrumento. Un instrumento común a dos ó más circuitos, podrá tener diferentes números de circuitos si se desea.
- b) Debe usarse una sola secuencia para todos los números de circuitos de instrumentación de proyectos ó sección de un proyecto, prescindiendo de las diferentes “primeras letras” que haya en la identificación por función de un circuito.

La secuencia de numeración de un circuito puede principiar con el número 01 o con cualquier otro número conveniente, tal como 301 o 1405, etc., que puede ser incorporado al código de información como por ejemplo en la designación del área de una planta.

- c) Si en un circuito dado, se tiene más de un instrumento con la misma identificación por función, entonces preferiblemente debe ser agregado un sufijo al número de circuito. Por ejemplo: FV-2A, FV-2B, FV-2C, etc. Ó bien: TE-25-1, TE 25-2, TE-25-3, etc. Empero, puede ser más conveniente ó lógico en una instancia determinada el designar uno para cada transmisor, por ejemplo: un FT-2 y FT-3 en un lugar de FT-2A y FT-2B. Los sufijos pueden ser aplicados siempre y cuando las letras empleadas como sufijos, sean mayúsculas.
- d) Un instrumento que realiza dos o más funciones puede ser identificado con todas sus funciones. Por ejemplo, un registrador de flujo FR-2 con otra pluma para presión FR-2/PR-4; un registrador de

presión de dos plumas puede designarse como PR-7/8 y una alarma común para alta y baja temperatura, puede ser TAH/L-9.

- e) Los accesorios para instrumentos que no se muestran explícitamente en un diagrama de flujo, pero que necesitan de una identificación para otros propósitos, deben ser identificados individualmente de acuerdo con su función y deben usar también el mismo número de circuito del instrumento al que directamente están asociados.

La aplicación de tal designación no implica que el accesorio deba ser mostrado en el diagrama de flujo. Como alternativa, los accesorios pueden usar el mismo número de identificación de los instrumentos a los cuales estén asociados, siempre y cuando sea agregada alguna palabra aclaratoria al respecto cuando se requiera.

Así por ejemplo, unas bridas asociadas con una placa de orificio FE-7, pueden identificarse como FX-7, pero pueden también ser identificadas como “bridas FE-7”. Un rotámetro asociado con un indicador de presión PI-8, puede ser identificado como FI-8.

Un termopozo asociado con un termómetro TI-9, puede ser identificado como TW-9, ó bien como: “Termopozo TI-9”.

En la identificación de un instrumento la primera letra siempre significará la variable medida o la variable de interés en el bucle de control. Las letras subsecuentes denotarán una función pasiva o de lectura, una función de salida o una función de modificación.

Ejemplo:

LAH = Alarma de Alto Nivel

Primera letra: L

Variable de interés: Nivel

Función pasiva o de lectura: Alarma

Función de salida: No existe, no hay tal

Función de modificación: Alto (high)

Esto es así cuando generalmente son tres letras la que definen al instrumento, pero en el caso de que existan cuatro, el orden es el siguiente: La primer letra denota siempre la variable medida o de interés, las letras subsecuentes una letra de modificación, una función pasiva o de lectura y una función de salida.

Ejemplo:

TDRC = Registrador Controlador Diferencial de Temperatura

Variable de interés: Temperatura

Letra modificada: Diferencial

Función Pasiva: Registrador

Función de Salida: Controlador

No es aceptable la existencia de instrumentos que se definan por más de cuatro letras.

Finalmente, al respecto de las identificaciones de instrumentos para su representación en diagramas de tuberías e instrumentación, la tabla 4.1 muestra un resumen de las letras y sus significados para la denotación de los mismos de conforme con la norma ISA–S5.1–84.

| Primera Letra                    |                                | Letras Subsecuentes (3)     |                                 |   |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---|--------------------------------|
| Variable medida o de interés (4) | Letra Modificada               | Función pasiva o de lectura | Función de salida               | Función de modificación                                 |                                |
| A                                | Análisis (5)                   |                             | Alarma                          |   |                                |
| B                                | Flama de Quemador              |                             | Para usarse como se escoja (1)  | Para usarse como se escoja (1)                          | Para usarse como se escoja (1) |
| C                                | Conductividad Eléctrica        |                             |                                 | Control (13)  |                                |
| D                                | Densidad o gravedad específica | Diferencial (4)             |                                 |   |                                |
| E                                | Voltaje (EMF)                  |                             | Elemento Primario               |   |                                |
| F                                | Flujo                          | Relación (4)                |                                 |   |                                |
| G                                | Medida (Dimensional)           |                             | Indicador de vidrio (Glass) (9) |   |                                |
| H                                | Manual                         |                             |                                 |   | Alto (7,15,16)                 |
| I                                | Corriente Eléctrica            |                             | Indicador (10)                  |   |                                |
| J                                | Potencia                       | Exploración (7)             |                                 |   |                                |
| K                                | Tiempo o secuencia             |                             |                                 | Estación de control                                     |                                |
| L                                | Nivel                          |                             | Luz Piloto (11)                 |   | Bajo (7,15,16)                 |
| M                                | Humedad                        |                             |                                 |   | Medio o intermedio (7,15)      |
| N(1)                             | Para usarse como se escoja (1) |                             | Para usarse como se escoja      | Para usarse como se escoja                              | Para usarse como se escoja     |
| O                                | Para usarse como se escoja (1) |                             | Orificio de restricción         |   |                                |
| P                                | Presión ó Vacío                |                             | Punto (conexión de prueba)      |   |                                |
| Q                                | Cantidad o Evento              | Integrador Totalizador (4)  |                                 |   |                                |
| R                                | Radioactividad                 |                             | Registro                        |   |                                |
| S                                | Velocidad o Frecuencia         | Seguridad (8)               |                                 | Interruptor (13)  |                                |
| T                                | Temperatura                    |                             |                                 | Transmisor  |                                |
| U                                | Multivariable (6)              |                             | Multifunción (12)               | Multifunción (12)                                       | Multifunción (12)              |
| V                                | Viscosidad                     |                             |                                 |   |                                |
| W                                | Peso o Fuerza                  |                             | Termopozo                       |   |                                |
| X (2)                            | No clasificado                 |                             | No clasificado                  | No clasificado  | No clasificado                 |
| Y                                | Para usarse como se escoja (1) |                             |                                 | Relevador (13)(14)                                      |                                |
| Z                                | Posición                       |                             |                                 | Guiar actuar o elemento final de control no clasificado |                                |

Nota: Los números entre paréntesis están referidos a notas aclaratorias en las siguientes páginas.

Tabla 4.1 Significado de las letras de identificación para instrumentos.



## Significado de las letras de identificación

### Notas para la tabla 4.1

Nota (1): Estas letras intentan cubrir el significado de los casos no enlistados que pueden usarse repentinamente en una simbología particular. Como primera letra, puede tener un significado y otro como letra subsecuente. El significado necesita ser definido solamente una vez. Por ejemplo, la letra “N” como primera letra puede definirse como módulo de elasticidad y como letra subsecuente toma el significado de osciloscopio.

Nota (2): La letra no clasificada X, se usará para cubrir casos no enlistados que serán usados solamente en grado muy limitado. Dicha letra podrá tener cualquier número de significados como primera letra así como letra subsecuente. Excepto para su uso con símbolos distintivos, es aconsejable que su significado sea definido junto al círculo de identificación en el diagrama de tuberías e instrumentación. Por ejemplo, XR- 2 puede ser un registrador de tensión, XR-3 puede ser un registrador de vibración, XX-4 puede ser un osciloscopio de tensiones.

Nota (3): La forma gramatical del significado de las letras subsecuentes puede ser modificada como sea conveniente. Por ejemplo, puede ser válvulas de control ó válvula controladora; registro ó registrador, etc.

Nota (4): Cualquier primera letra si es usada en combinación con letras de modificación como D (diferencial), F (relación) ó Q (integrador ó totalizador), ó cualquier combinación puede ser tratada como una nueva primera letra. De manera que los instrumentos TDI y TI miden dos variables diferentes, es decir, diferencial de temperatura y temperatura. Estas letras de modificación pueden ser usadas cuando se crea conveniente.

Nota (5): La primera letra “A” para análisis, cubre todos los análisis que no están enlistados en la tabla 4.1 y no están cubiertos por la expresión “para usarse como se escoja”. Es conveniente que el tipo de análisis en cada caso sea definido en la parte exterior del círculo de identificación en un diagrama de tuberías e instrumentación (los símbolos exteriores pueden ser pH, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, etc.).

Nota (6): El uso de la primera letra U para multivariable en combinación con otras primeras letras, es opcional.

Nota (7): El uso de los términos, alto, bajo, medio ó intermedio, y “scan” es conveniente, pero opcional.

Nota (8): El término “seguridad” puede aplicarse solamente para elementos primarios y de control final, protectores de emergencia; es decir, para condiciones que sean de peligro para personal y/o equipo. Por ejemplo, una válvula auto-operada que prevenga la operación de un sistema de fluido de una presión más alta que la deseada, puede ser una válvula de contrapresión tipo PCV; igual si la válvula no se pretende usar normalmente. Empero, esta válvula deberá ser una PSV si está destinada a protección para condiciones de emergencia, o sea, en condiciones que son peligrosas para personal y/o equipo. La designación PSV es aplicada a todas las válvulas destinadas para protección contra condiciones de presión de emergencia prescindiendo del tipo de construcción de la válvula y su modo de operación y la coloca en la categoría de válvula de seguridad, de relevo o de seguridad y relevo.

Nota (9): La función pasiva “Glass” (vidrio) es aplicada a instrumentos que proporcionan una visión directa no calibrada del proceso.

Nota (10): El término indicador, se aplica solamente a la lectura de una medición actual. Esto no puede ser aplicado a una escala de ajuste manual de una variable, si no hay medición de entrada a la escala.

Nota (11): Una luz piloto que forma parte de un circuito de instrumentación, será designada por una primera letra, seguida por una letra subsecuente “L”. Por ejemplo, una luz piloto que indica que ha terminado un período de tiempo, puede ser identificada como KL. No obstante; si se desea identificar una luz piloto que no forma parte del circuito de instrumentación, puede ser designada en la misma forma ó alternativamente por una letra sencilla L. Por ejemplo, una luz que indica que un motor eléctrico está trabajando, puede ser identificada como EL, asumiendo que el voltaje es la variable apropiada para medir, ó bien, XL, asumiendo que la luz es accionada por contactos eléctricos auxiliares en el arrancador del motor, ó simplemente por una “L”. La acción de una luz piloto, puede ser acompañada por una señal audible.

Nota (12): El uso de la letra subsecuente U para indicar multifunción, en lugar de una combinación de otras letras de funciones, es opcional.

Nota (13): Un dispositivo que conecta ó transfiere uno ó más circuitos, puede ser tanto un interruptor, un controlador de abrir y cerrar (on-off), ó una válvula control, dependiendo de la aplicación. Si el dispositivo manipula un fluido de proceso y no es una válvula de bloqueo para abrir y cerrar operada manualmente, se le designará como una válvula de control. Para todas las aplicaciones que no sean fluidos de proceso, el dispositivo será designado como sigue:

Un interruptor, si es accionado manualmente.

Un interruptor ó un controlador abrir-cerrar (on-off) si es automático y es el primer dispositivo como ése en un circuito de instrumentación.

El término interruptor es generalmente usado si el dispositivo es usado para luz piloto, selección “interlock” ó seguridad.

El término controlador es generalmente usado si el dispositivo es empleado para control normal de operación.


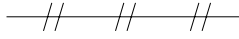
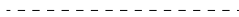
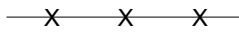
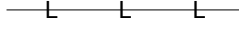
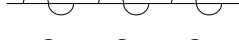

Un relevador, si es automático y no es el primer dispositivo semejante en un circuito de instrumentación, esto es, que es operado por un interruptor o por un controlador de abrir- cerrar (on-off).

Nota (14): Es deseable que las funciones asociadas con el uso de la letra subsecuente “Y” sean definidas fuera del círculo de identificación en un diagrama de tuberías e instrumentación donde sea conveniente hacerlo así. Esto no es necesario donde la función de instrumento es obvia, como por ejemplo una válvula solenoide en una línea de señal.

Nota (15): El uso de los términos modificadores, alto, bajo, y medio ó intermedio, corresponden a los valores de la variable medida, mas no de la señal, a menos que se especifique de otra manera. Por ejemplo, una alarma por alto nivel, derivada de una señal de transmisor de nivel de acción inversa deberá ser LAH, aún cuando la alarma sea actuada cuando la señal llegue a un valor bajo. Los términos deben ser usados en combinaciones apropiadas.

Nota (16): Los términos alto y bajo, cuando son aplicados a posiciones de válvulas u otros dispositivos de abrir- cerrar, serán definidos como sigue: “alto”, denota que la válvula está en ó en aproximación a la posición abierta totalmente, y “bajo” denota que está en ó aproximación a la posición cerrada totalmente.

Figuran a continuación además, los símbolos de líneas y señales a emplear en los planos y dibujos de representación de instrumentos en los procesos industriales de acuerdo a la norma ISA-S5.1-84.

|   |   |
|---|---|
|  | Conexión a proceso o enlace mecánico, o alimentación de instrumentos* |
|  | Señal neumática** o señal sin definir en un línea de proceso          |
|  | Señal eléctrica   |
|  | Tubo capilar  |
|  | Señal hidráulica  |
|  | Señal electromagnética*** (sin alambrado ni entubado)                 |
|  | Señal protocolizada   |

\* Se sugieren las siguientes abreviaturas para representar el tipo de alimentación:

- AS Alimentación de aire
- ES Alimentación eléctrica
- GS Alimentación de gas
- HS Alimentación hidráulica
- NS Alimentación de nitrógeno
- SS Alimentación de vapor
- WS Alimentación de agua

\*\* Aire de instrumentos para válvulas de control en señal neumática.

\*\*\* Para transmisión por cámara de televisión.

### 4.3 Significado de las Letras y Dibujos para Representar Instrumentos de acuerdo a la Norma ISA-S5.1-84

Las letras y sus correspondientes símbolos que enseguida se muestran, son los más comúnmente empleados para la notación de instrumentos en un gran número de aplicaciones industriales.

#### Letras

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| A   | Análisis                            |
| AA  | Alarma de Análisis                  |
| AE  | Elemento de Análisis                |
| AIC | Indicador Controlador de Análisis   |
| AIT | Indicador Transmisor de Análisis    |
| AR  | Registrador de Análisis             |
| ARC | Registrador Controlador de Análisis |
| AS  | Interruptor de Análisis             |
| AT  | Transmisor de Análisis              |
| AV  | Válvula de Control de Análisis      |

En los Diagramas de Tuberías e Instrumentación deberán mostrarse el tipo de análisis al que se hace referencia mediante la siguiente designación: pH, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, etc. Indicando en el exterior y junto al círculo de identificación del instrumento.

|     |   |
|-----|---|
| B   | Flama                                     |
| BA  | Alarma de Flama                           |
| BE  | Detector de Flama                         |
| BI  | Indicador de Flama                        |
| BS  | Interruptor de Flama                      |
| C   | Conductividad                             |
| CA  | Alarma de Conductividad                   |
| CE  | Celda de Conductividad                    |
| CI  | Indicador de Conductividad                |
| CIC | Indicador Controlador de Conductividad    |
| CIT | Indicador Transmisor de Conductividad     |
| CR  | Registrador de Conductividad              |
| CRC | Registrador Controlador de Conductividad  |
| CS  | Interruptor de Conductividad              |
| CT  | Transmisor de Conductividad               |
| CV  | Válvula de Control de Conductividad       |
| D   | Densidad                                  |
| DA  | Alarma de Densidad                        |
| DE  | Elemento de Densidad                      |
| DI  | Indicador de Densidad                     |
| DIC | Indicador Controlador de Densidad         |
| DIT | Indicador Transmisor de Densidad          |
| DR  | Registrador de Densidad                   |
| DRC | Registrador Controlador de Densidad       |
| DS  | Interruptor de Densidad                   |
| DT  | Transmisor de Densidad                    |
| DV  | Válvula de Control de Densidad            |
| E   | Voltaje                                   |
| EA  | Alarma de Voltaje                         |
| EI  | Indicador de Voltaje (Voltímetro)         |
| ER  | Registrador de Voltaje                    |
| F   | Flujo                                     |
| FA  | Alarma de Flujo                           |
| FC  | Controlador de Flujo                      |
| FCV | Válvula Auto-Operada de Control de Flujo  |
| FE  | Elemento de Flujo (Orificio, Pitot, etc.) |
| FG  | Mirilla de Flujo                          |
| FI  | Indicador de Flujo                        |
| FIC | Indicador Controlador de Flujo            |
| FIT | Indicador Transmisor de Flujo             |
| FQ  | Integrador y/o Contador de Flujo          |
| FQI | Indicador Integrador de Flujo             |
| FQR | Registrador Integrador de Flujo           |
| FR  | Registrador de Flujo                      |
| FRC | Registrador Controlador de Flujo          |

|     |  |
|-----|--|
| FS  | Interruptor de Flujo                     |
| FT  | Transmisor de Flujo                      |
| FV  | Válvula de Control de Flujo              |
|     |  |
| H   | Manual                                   |
| HIC | Indicador Controlador Manual             |
| HS  | Interruptor Manual                       |
| HV  | Válvula de Control Manual                |
|     |  |
| I   | Corriente                                |
| IA  | Alarma de Corriente                      |
| IE  | Elemento de Corriente                    |
| II  | Indicador de Corriente (Amperímetro)     |
| IR  | Registrador de Corriente                 |
|     |  |
| J   | Potencia                                 |
| JI  | Indicador de Potencia (Wattmetro)        |
|     |  |
| K   | Tiempo                                   |
| KA  | Alarma de Tiempo                         |
| KC  | Controlador de Tiempo                    |
| KI  | Indicador de Tiempo                      |
| KIC | Indicador Controlador de Tiempo          |
|     |  |
| L   | Nivel                                    |
| LA  | Alarma de Nivel                          |
| LC  | Controlador de Nivel                     |
| LCV | Válvula Auto-Operada de Control de Nivel |
| LG  | Indicador de Nivel (vidrio)              |
| LI  | Indicador de Nivel                       |
| LIC | Indicador Controlador de Nivel           |
| LIT | Indicador Transmisor de Nivel            |
| LR  | Registrador de Nivel                     |
| LRC | Registrador Controlador de Nivel         |
| LS  | Interruptor de Nivel                     |
| LT  | Transmisor de Nivel                      |
| LV  | Válvula de Control de Nivel              |
|     |  |
| M   | Humedad                                  |
| MA  | Alarma de Humedad                        |
| ME  | Elemento de Humedad                      |
| MI  | Indicador de Humedad                     |
| MIC | Indicador Controlador de Humedad         |
| MR  | Registrador de Humedad                   |
| MRC | Registrador Controlador de Humedad       |
| MS  | Interruptor de Humedad                   |
| MV  | Válvula de Control de Humedad            |

|      |  |
|------|--|
| P    | Presión  |
| PA   | Alarma de Presión                                      |
| PC   | Controlador de Presión                                 |
| PCV  | Válvula Auto-Operada de Control de Presión             |
| PDA  | Alarma de Presión Diferencial                          |
| PDC  | Controlador de Presión Diferencial                     |
| PDCV | Válvula Auto-Operada de Control de Presión Diferencial |
| PDI  | Indicador de Presión Diferencial                       |
| PDIC | Indicador Controlador de Presión Diferencial           |
| PDR  | Registrador de Presión Diferencial                     |
| PDRC | Registrador Controlador de Presión Diferencial         |
| PDS  | Interruptor de Presión Diferencial                     |
| PDT  | Transmisor de Presión Diferencial                      |
| PDV  | Válvula de Control de Presión Diferencial              |
| PI   | Indicador de Presión                                   |
| PIC  | Indicador Controlador de Presión                       |
| PIT  | Indicador Transmisor de Presión                        |
| PR   | Registrador de Presión                                 |
| PRC  | Registrador Controlador de Presión                     |
| PS   | Interruptor de Presión                                 |
| PSE  | Elemento de Seguridad de Presión                       |
| PSV  | Válvula de Seguridad de Presión                        |
| PT   | Transmisor de Presión                                  |
| PV   | Válvula de Control de Presión                          |
|      |  |
| S    | Velocidad  |
| SA   | Alarma de Velocidad                                    |
| SC   | Controlador de Velocidad                               |
| SI   | Indicador de Velocidad                                 |
| SIC  | Indicador Controlador de Velocidad                     |
| SIT  | Indicador Transmisor de Velocidad                      |
| SR   | Registrador de Velocidad                               |
| SRC  | Registrador Controlador de Velocidad                   |
| SS   | Interruptor de Velocidad                               |
| ST   | Transmisor de Velocidad                                |
|      |  |
| T    | Temperatura  |
| TA   | Alarma de Temperatura                                  |
| TC   | Controlador de Temperatura                             |
| TCV  | Válvula Auto-Operada de Control de Temperatura         |
| TDA  | Alarma de Diferencial de Temperatura                   |
| TDI  | Indicador de Diferencial de Temperatura                |
| TDIC | Indicador Controlador de Diferencial de Temperatura    |
| TDR  | Registrador de Diferencial de Temperatura              |
| TDRC | Registrador Controlador de Diferencial de Temperatura  |
| TDS  | Interruptor de Diferencial de Temperatura              |
| TDV  | Válvula de Control de Diferencial de Temperatura       |
| TE   | Elemento de Temperatura                                |
| TI   | Indicador de Temperatura                               |

|     |  |
|-----|--|
| TIC | Indicador Controlador de Temperatura   |
| TIT | Indicador Transmisor de Temperatura    |
| TR  | Registrador de Temperatura             |
| TRC | Registrador Controlador de Temperatura |
| TS  | Interruptor de Temperatura             |
| TT  | Transmisor de Temperatura              |
| TV  | Válvula de Control de Temperatura      |
| TW  | Termopozo                              |
|     |  |
| V   | Viscosidad                             |
| VA  | Alarma de Viscosidad                   |
| VI  | Indicador de Viscosidad                |
| VR  | Registrador de Viscosidad              |
| VRC | Registrador Controlador de Viscosidad  |
| VS  | Interruptor de Viscosidad              |
| VT  | Transmisor de Viscosidad               |
| VV  | Válvula de Control de Viscosidad       |
|     |  |
| W   | Peso                                   |
| WA  | Alarma de Peso                         |
| WE  | Elemento de Peso                       |
| WI  | Indicador de Peso                      |
| WR  | Registrador de Peso                    |
| WRC | Registrador Controlador de Peso        |
| WS  | Interruptor de Peso                    |
| WT  | Transmisor de Peso                     |
|     |  |
| Z   | Posición                               |
| ZA  | Alarma de Posición                     |
| ZI  | Indicador de Posición                  |
| ZR  | Registrador de Posición                |
| ZS  | Interruptor de Posición                |
| ZT  | Transmisor de Posición                 |

## Dibujos

Los dibujos que se muestran a continuación, ilustran los símbolos que están destinados para representar la instrumentación en los diagramas de tubería e instrumentación, diagramas de flujo y otros; cubriendo su aplicación una gran variedad de procesos.

Las aplicaciones mostradas, fueron seleccionadas para ilustrar los principios de los métodos de simbolización e identificación.

Los ejemplos muestran numeración típica para describir instrumentos interrelacionados, pero la numeración puede ser variada según convenga.

Los símbolos ilustran con guías típicas, las variadas situaciones de aplicaciones de instrumentos, esto no implica sin embargo, que dichas aplicaciones o designaciones de los instrumentos sean por lo tanto limitadas en cualquier vía.

Lo anterior implica, de igual forma, que los símbolos mostrados no son todos los que puedan representarse para toda la extensa variedad de instrumentos que existen, si no que solamente se deben de considerar como ejemplos ilustrativos.

No debe deducirse que la selección de cualquiera de las ilustraciones constituya una recomendación para la ilustración de métodos de medición y control.

Además de todo esto deberán considerarse los siguientes aspectos:

- a) Los círculos pueden ser usados para indicar la identificación de símbolos distintivos tales como válvulas de control. Cuando se desee tal identificación (en tales casos la línea que conecta al círculo con el símbolo del instrumento, debe llegar cerca, más no tocar el símbolo). En estos casos, el círculo sirve para representar al instrumento propiamente.
- b) Una breve nota explicativa puede ser agregada adyacente al símbolo para aclarar la función de un equipo.
- c) Los tamaños de los círculos de identificación y de los símbolos misceláneos mostrados, son los tamaños generalmente recomendados; no obstante, los tamaños óptimos pueden ser variados, dependiendo de si el diagrama de tuberías e instrumentación final sea reducido en tamaño fotográficamente y en el número de caracteres que tenga la identificación del instrumento. Los tamaños de los otros símbolos pueden ser seleccionados con propiedad de acuerdo a las dimensiones de los símbolos de los demás equipos en el diagrama.
- d) Aparte de los requerimientos generales de claridad y legibilidad, todos los símbolos pueden ser dibujados con cualquier orientación.

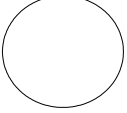
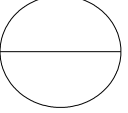
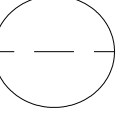
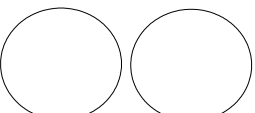
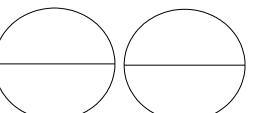
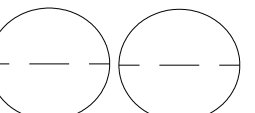
Del mismo modo, pueden ser dibujadas las líneas de señales que entran y salen en la parte apropiada de un símbolo en cualquier ángulo. Flechas direccionales deben ser agregadas a las líneas de señales cuando haya necesidad de definir la dirección del flujo.

- e) El suministro eléctrico, neumático u otro, en un instrumento no es aconsejable que sean mostrados en un diagrama de tuberías e instrumentación, a menos que sea esencial para el entendimiento de la operación del instrumento ó circuito.
- f) Generalmente una línea de señal será suficiente para representar las interconexiones entre dos instrumentos en un diagrama de tuberías e instrumentación, aunque eventualmente ellos puedan conectarse físicamente por más de una línea.
- g) La secuencia en la cual son conectados los instrumentos de un circuito en un diagrama de tuberías e instrumentación, debe reflejar la función lógica que desarrolla.

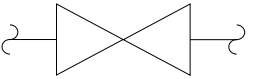
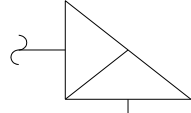
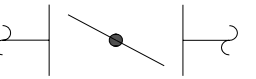
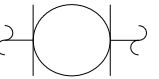
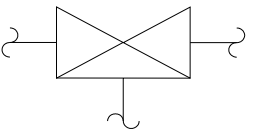
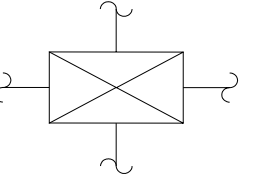
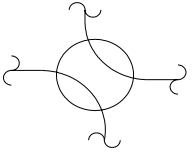
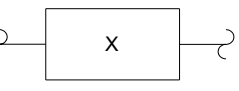


## Dibujos para instrumentos\*

### Símbolos Generales

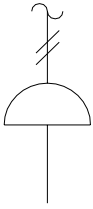
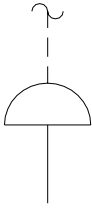
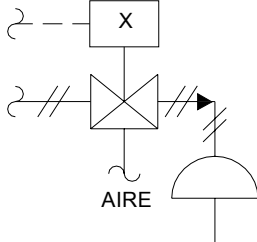
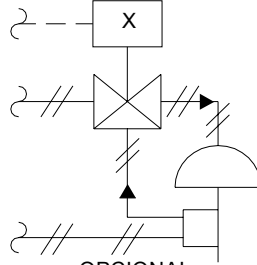
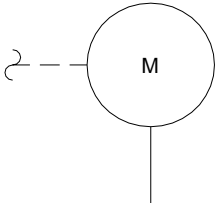
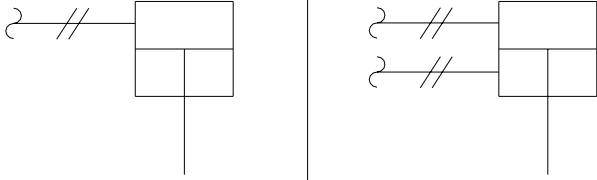
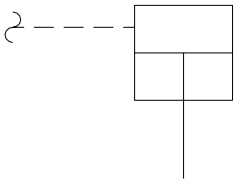
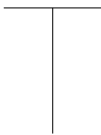
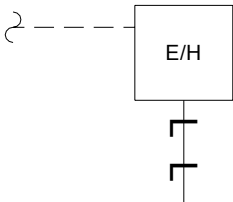
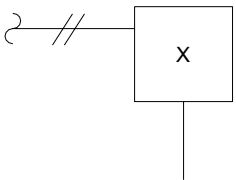
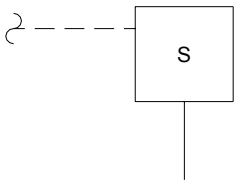

|   |   |   |
|---|---|---|
| <p>∅ Aproximadamente 11.0 mm<br/>Si la escala es 1:100</p>  <p>LOCAL</p> |  <p>MONTAJE EN<br/>PANEL</p> |  <p>MONTAJE DETRAS<br/>DEL PANEL</p>                      |
| INSTRUMENTO PARA UNA VARIABLE MEDIDA  |   |   |
|  <p>MONTAJE LOCAL</p>  |  <p>MONTAJE EN<br/>PANEL</p> | <p>LOCAL</p>  <p>MONTAJE DETRAS<br/>DE PANEL AUXILIAR</p> |
| INSTRUMENTO PARA DOS VARIABLES MEDIDAS, OPCIONALMENTE<br>PUEDEN AÑADIRSE CIRCULOS ADICIONALES SI SE PRECISAN  |   |   |

### Símbolos para Válvulas de Control

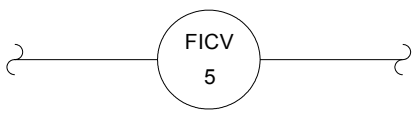
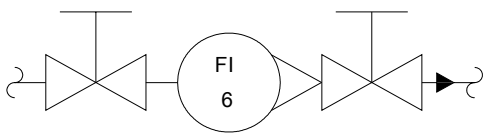
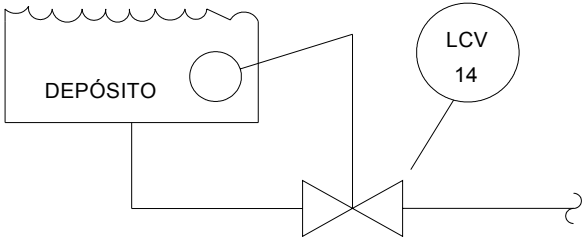
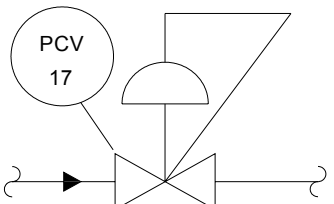
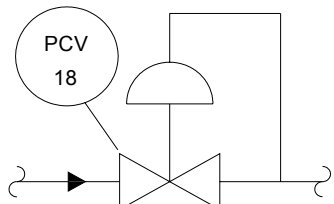
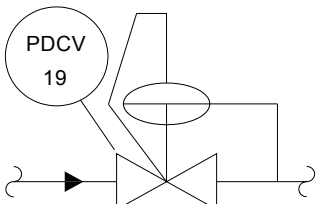
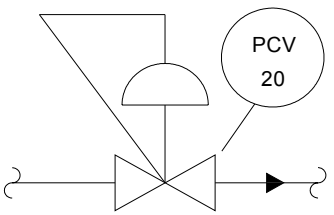
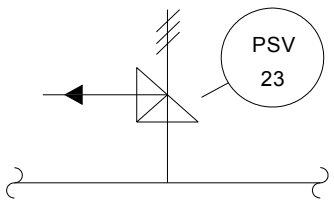
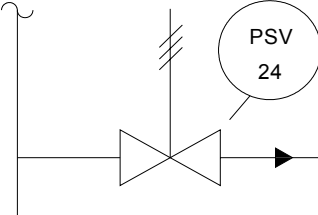
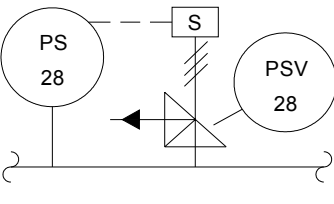
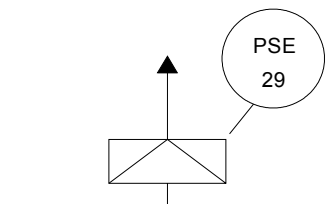
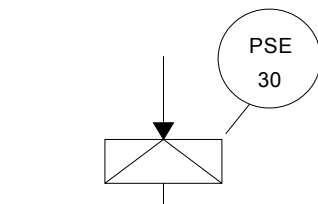
|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
|  <p>GLOBO O COMPUERTA</p> |  <p>ÁNGULO</p>        |  <p>MARIPOSA, PERSIANA<br/>O COMPUERTA</p> |  <p>OBTURADOR<br/>ROTATIVO O VÁLVULA<br/>DE BOLA</p> |
|  <p>TRES VÍAS</p>         |  <p>ALTERNATIVA 1</p> |  <p>ALTERNATIVA 2</p>                      |  <p>SIN CLASIFICAR</p>                               |
| CUATRO VÍAS  |  |  |   |

\* Los dibujos aquí mostrados, solo son una representación gráfica, sin escala. En un plano de mayor tamaño, por ejemplo de 91 cm X 61 cm (tamaño estándar para DTI's), la recomendación es que el diámetro de los círculos para representar instrumentos sea de 11.0 mm (escala 1:100). Aunque esto dependerá del tamaño del plano y de la densidad del diagrama, por lo que la anterior recomendación deberá de efectuarse siempre que sea posible, en tanto el tamaño del plano y su impresión final así lo permitan.

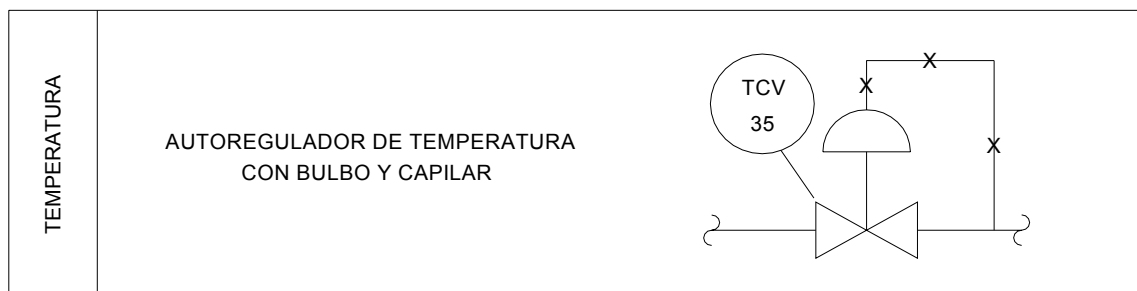
## Símbolos para Actuadores

|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
|  <p>SIN POSICIONADOR</p>                        |  <p>POSICIONADOR<br/>VÁLVULA SOLENOIDE</p>  |  <p>AIRE<br/>PREFERIDO</p>                           |  <p>OPCIONAL</p> |
| <p>DIAFRAGMA CON MUELLE</p>  |  | <p>DIAFRAGMA CON MUELLE, POSICIONADOR Y<br/>VÁLVULA PILOTO QUE PRESURIZA EL DIAFRAGMA<br/>AL ACTUAR</p>                                |   |
|  <p>MOTOR ROTATIVO</p>                         |  <p>ACCIÓN SIMPLE      DOBLE ACCIÓN</p> <p>CILINDRO SIN POSICIONADOR U OTRO PILOTO</p> |  |   |
|  <p>PREFERIDO PARA<br/>CUALQUIER CILINDRO</p> |  <p>ACTUADOR MANUAL</p>   |  <p>ELECTROHIDRÁULICO</p>                         |   |
|  <p>SIN CLASIFICAR</p>                        |  <p>SOLENOIDE</p>   |  <p>PARA VÁLVULA DE ALIVIO<br/>O DE SEGURIDAD</p> |   |

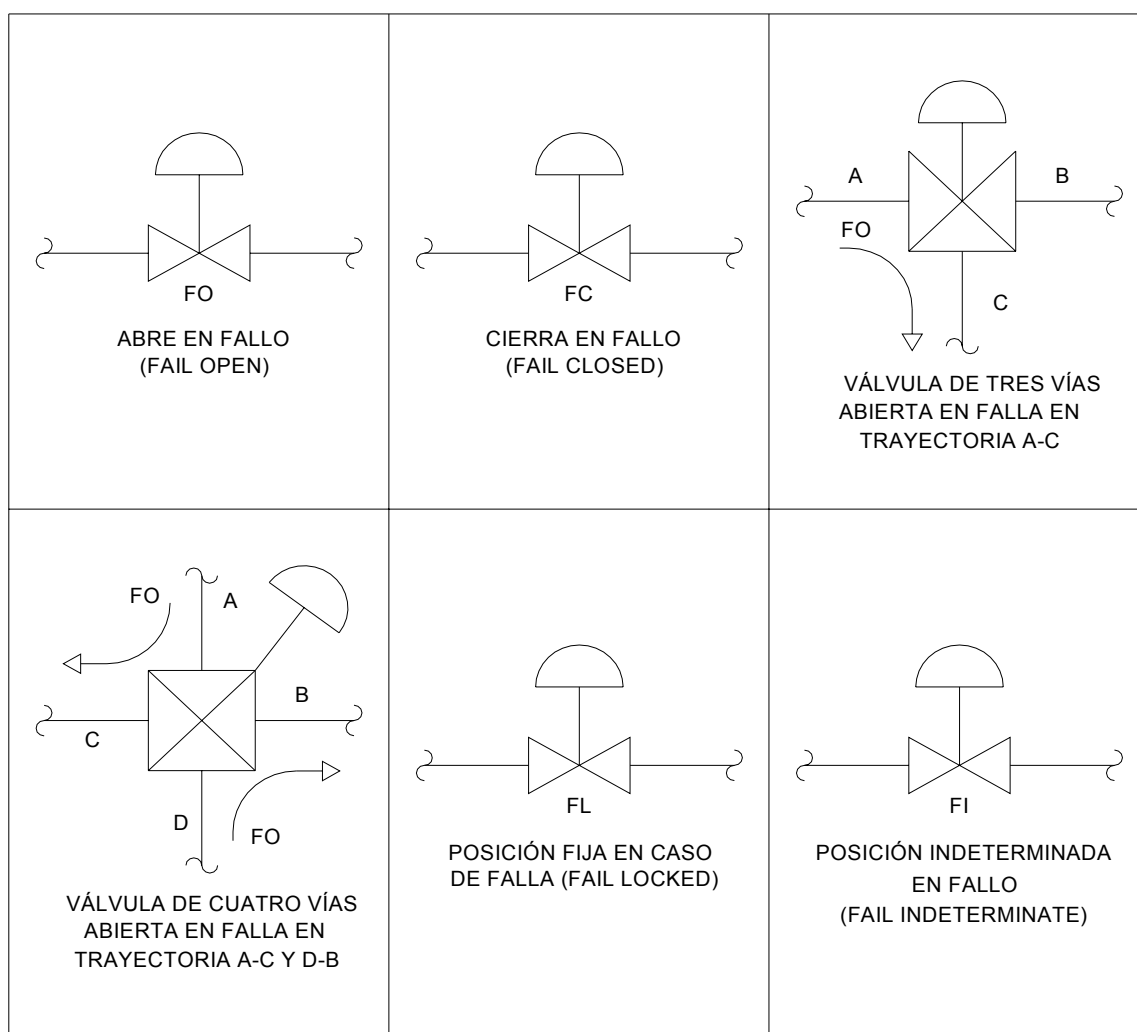
# Autoreguladores

|         |   |   |   |
|---------|---|---|---|
| CAUDAL  |  <p>REGULADOR AUTOMÁTICO CON INDICACIÓN INTEGRAL DE CAUDAL</p>               |  <p>ALTERNATIVO ALTERNATIVO</p> <p>ROTÁMETRO INDICADOR CON VÁLVULA MANUAL DE REGULACIÓN</p> |   |
| NIVEL   |  <p>CONTROLADOR DE NIVEL CON ENLACE MECÁNICO</p>                            |   |   |
| PRESIÓN |  <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN CON TOMA INTERIOR</p>                         |  <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN CON TOMA EXTERIOR</p>  |  <p>REGULADOR REDUCTOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL CON TOMAS INT. Y EXT.</p> |
|         |  <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN POSTERIOR CON TOMA INTERIOR</p>              |  <p>VÁLVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ÁNGULO</p>  |  <p>VÁLVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE PASO RECTO</p>                 |
|         |  <p>VÁLVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ÁNGULO DISPARADA POR SOLENOIDE</p> |  <p>DISCO DE RUPTURA PARA PRESIÓN</p>   |  <p>DISCO DE RUPTURA PARA VACÍO</p>                                    |

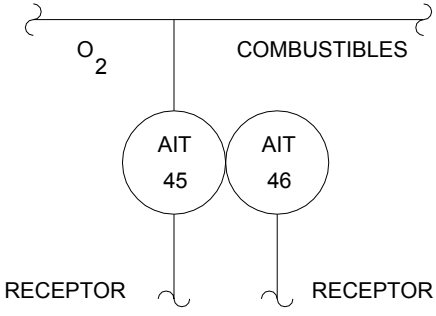
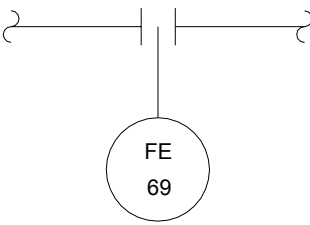
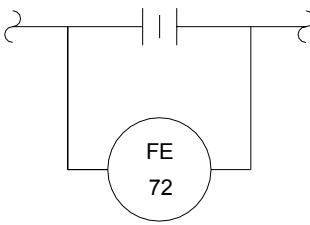
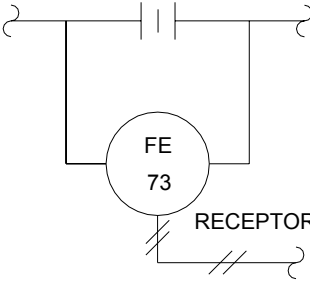
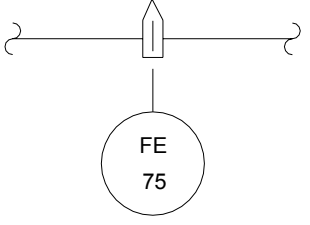
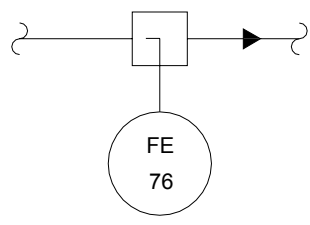
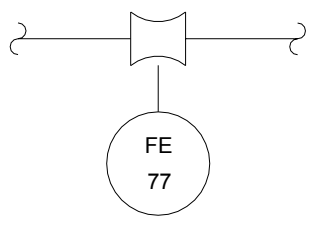
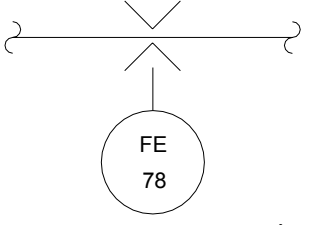
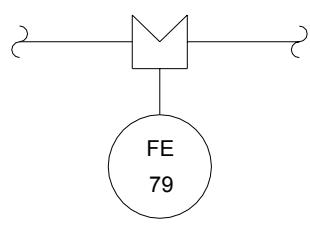
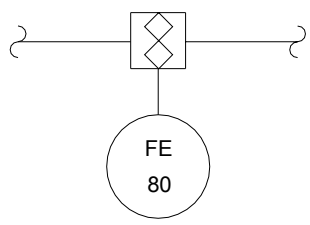
## Autoreguladores (continuación)



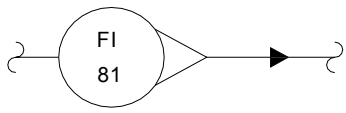
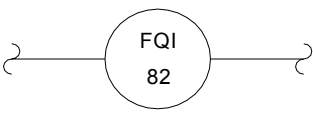
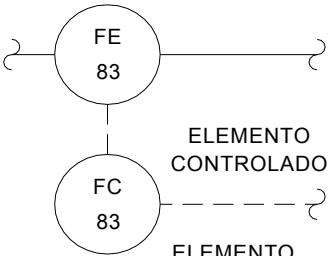
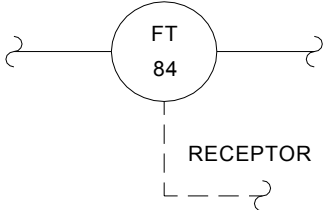
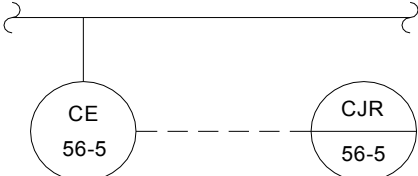
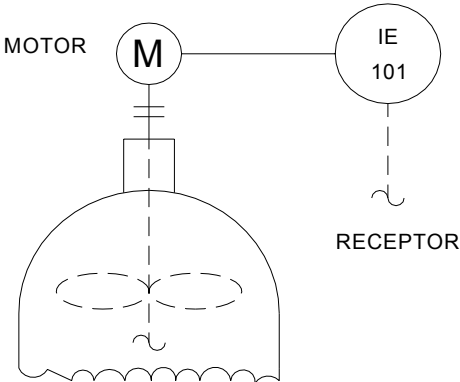
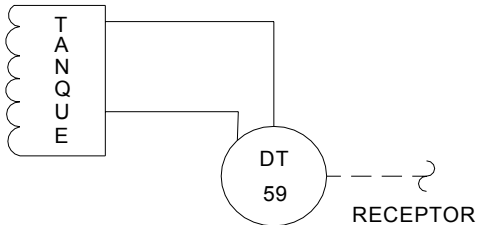
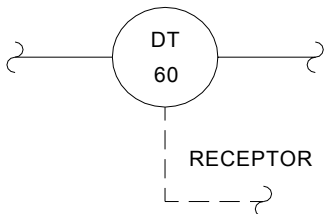
### Acción del Actuador en caso de fallo de suministro



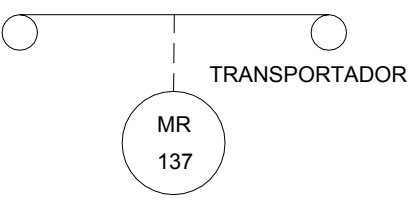
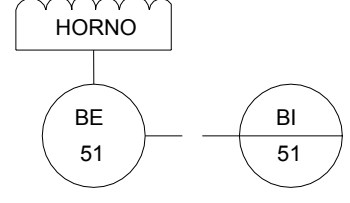
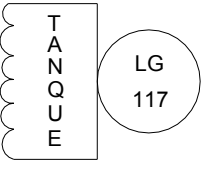
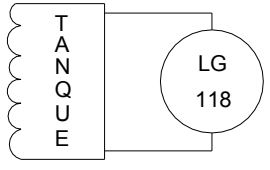
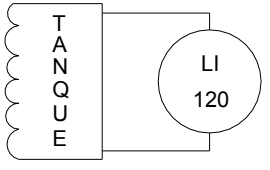
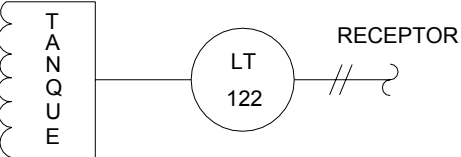
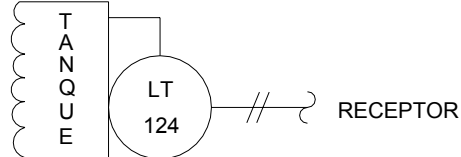
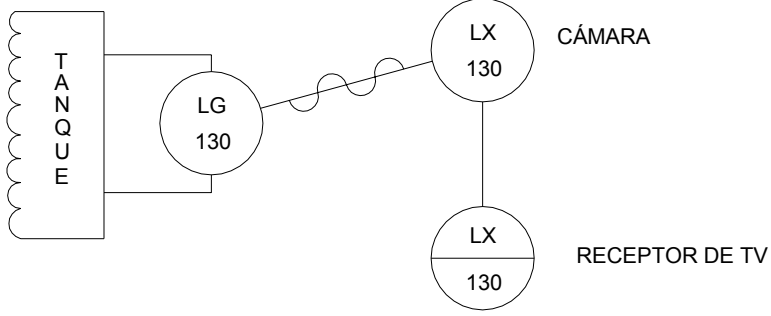
## Elementos Primarios

|          |  |   |  |
|----------|--|---|--|
| ANÁLISIS |  <p>TRANSMISOR INDICADOR DOBLE DE ANÁLISIS PARA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO Y COMBUSTIBLES</p> |   |  |
| CAUDAL   |  <p>PLACA DE ORIFICIO CON TOMAS DE BRIDA O DE ESQUINA</p>                                   |  <p>PLACA DE ORIFICIO CON TOMAS DE VENA CONTRACTA O TUBERÍA</p> |  <p>PLACA DE ORIFICIO CON TOMAS DE TUBERÍA CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PRESIÓN DIF.</p> |
|          |  <p>PLACA DE ORIFICIO CON DISPOSITIVO DE CAMBIO RÁPIDO</p>                                |  <p>TUBO PITOT O TUBO VENTURI PITOT</p>                       |  <p>TUBO VENTURI O TOBERA DE FLUJO</p>  |
|          |  <p>CANAL MEDIDOR (CANALÓN)</p>   |  <p>VERTEDERO</p>   |  <p>ELEMENTO DE TURBINA</p>   |

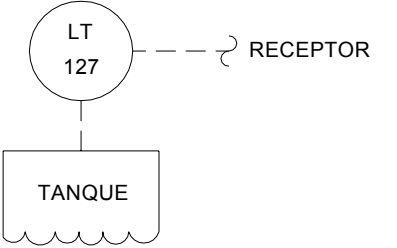
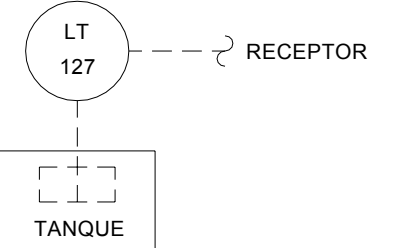
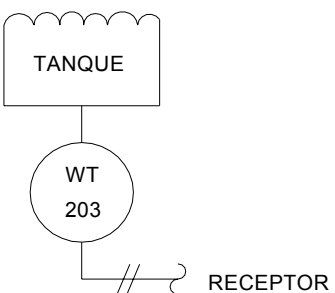
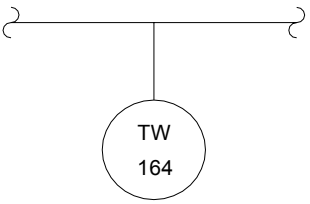
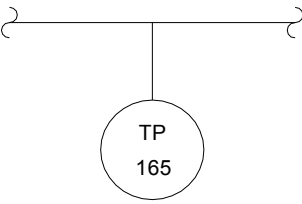
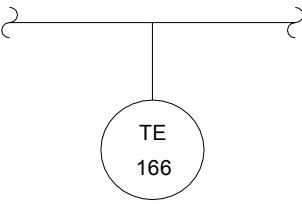
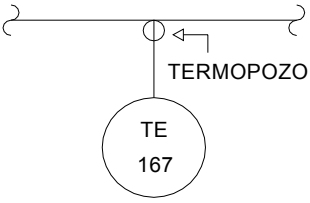
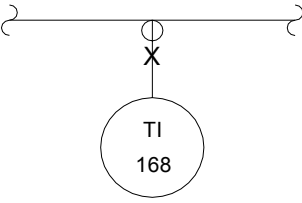
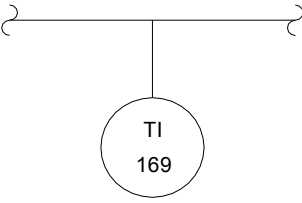
## Elementos Primarios (continuación)

|           |  |   |  |
|-----------|--|---|--|
| CAUDAL    |  <p>ROTÁMETRO INDICADOR DE CAUDAL</p>                   |  <p>TOTALIZADOR INDICADOR DE CAUDAL TIPO DESPLAZAMIENTO POSITIVO</p> |  <p>ELEMENTO CONTROLADO</p> <p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR, CONECTADO A UN CONTROLADOR</p> |
|           |  <p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR CON TRANSMISOR</p>          | CONDUCTIVIDAD   |  <p>CÉLULA DE CONDUCTIVIDAD CONECTADA AL PUNTO 5 DE UN REGISTRADOR MULTIPLE</p>        |
| CORRIENTE |  <p>MOTOR</p> <p>RECEPTOR</p>                         | <p>TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD MIDIENDO CORRIENTE DE UN MOTOR</p>   |  |
| DENSIDAD  |  <p>TRANSMISOR DE DENSIDAD DE PRESIÓN DIFERENCIAL</p> |  <p>TRANSMISOR DE DENSIDAD RELATIVA MONTADO EN LÍNEA</p>          |  |

## Elementos Primarios (continuación)

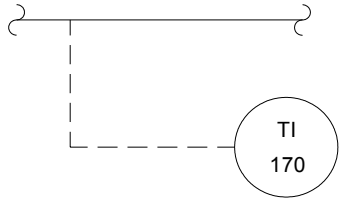
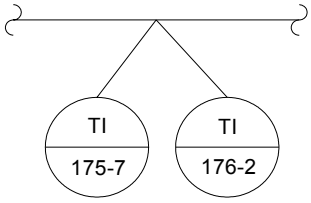
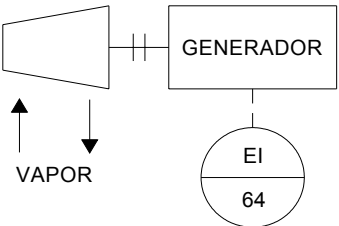
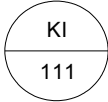


|                |   |  |   |
|----------------|---|--|---|
| <p>HUMEDAD</p> |  <p>REGISTRADOR DE HUMEDAD</p>   | <p>LLAMA</p>   |  <p>DETECTOR DE LLAMA CONECTADO A UN INDICADOR DE INTENSIDAD DE LLAMA</p> |
|                |  <p>VIDRIO DE NIVEL MONTADO EN TANQUE</p>  |  <p>VIDRIO DE NIVEL DE CONEXIÓN EXTERNA</p>                               |  <p>INDICADOR DE NIVEL TIPO FLOTADOR O DESPLAZAMIENTO</p>                |
| <p>NIVEL</p>   |  <p>TRANSMISOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DESPLAZAMIENTO MONTADO EN EL EXTERIOR DEL TANQUE</p>  |  <p>TRANSMISOR DE NIVEL DE PRESIÓN DIFERENCIAL MONTADO EN EL TANQUE</p> |   |
|                |  <p>VISIÓN REMOTA DE UN INDICADOR DE NIVEL (VIDRIO) MEDIANTE UNA CÁMARA DE TELEVISIÓN</p> |  |   |

## Elementos Primarios (continuación)

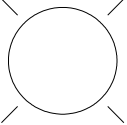

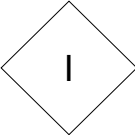
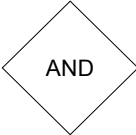
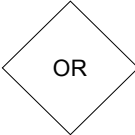
|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">NIVEL</p>   |  <p style="text-align: center;">ELEMENTO DE NIVEL DE CAPACIDAD<br/>CONECTADO A UN TRANSMISOR DE NIVEL</p> |  <p style="text-align: center;">INTERRUPTOR DE NIVEL DE<br/>SÓLIDOS DE PALETAS</p>   |   |
| <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">PESO O FUERZA</p>   |  <p style="text-align: center;">TRANSMISOR DE PESO<br/>DE CONEXIÓN DIRECTA</p>                            |  |   |
| <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">TEMPERATURA</p>   |  <p style="text-align: center;">CONEXIÓN DE ENSAYO DE<br/>TEMPERATURA CON VAINA<br/>(CON TERMOPOZO)</p> |  <p style="text-align: center;">CONEXIÓN DE ENSAYO DE<br/>TEMPERATURA SIN VAINA</p> |  <p style="text-align: center;">ELEMENTO DE<br/>TEMPERATURA SIN VAINA</p> |
|  <p style="text-align: center;">ELEMENTO DE<br/>TEMPERATURA CON VAINA</p> |  <p style="text-align: center;">INDICADOR DE TEMPERA-<br/>TURA DE BULBO Y CAPI-<br/>LAR CON VAINA</p>   |  <p style="text-align: center;">TERMÓMETRO BIMETÁLICO<br/>O DE VIDRIO U OTRO</p>   |   |



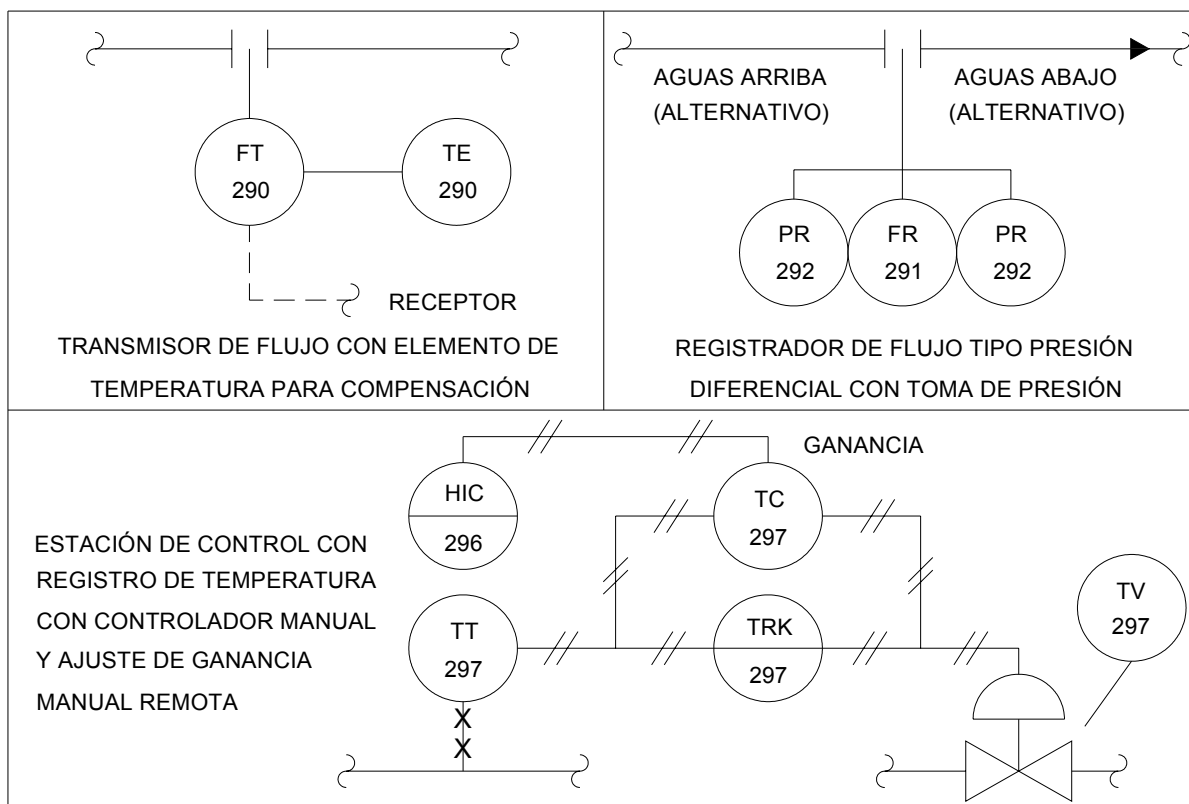
## Elementos Primarios (continuación)

|                        |   |   |  |
|------------------------|---|---|--|
| TEMPERATURA            |  <p>INDICADOR DE TEMPERATURA DE TERMOPAR O DE BULBO DE RESISTENCIA</p> |  <p>TERMOPAR DÚPLEX CONECTADO A UN INDICADOR Y REGISTRADOR MÚLTIPLE</p> |  |
| TENSIÓN O VOLTAJE      |  <p>VOLTÍMETRO INDICADOR CONECTADO A UN GENERADOR DE TURBINA</p>       | TIEMPO O SECUENCIA  |  <p>RELOJ</p> |
| VELOCIDAD O FRECUENCIA |  <p>TRANSMISOR DE VELOCIDAD</p>                                     |   |  |
| VISCOSIDAD             |  <p>TRANSMISOR DE VISCOSIDAD</p>                                    |   |  |

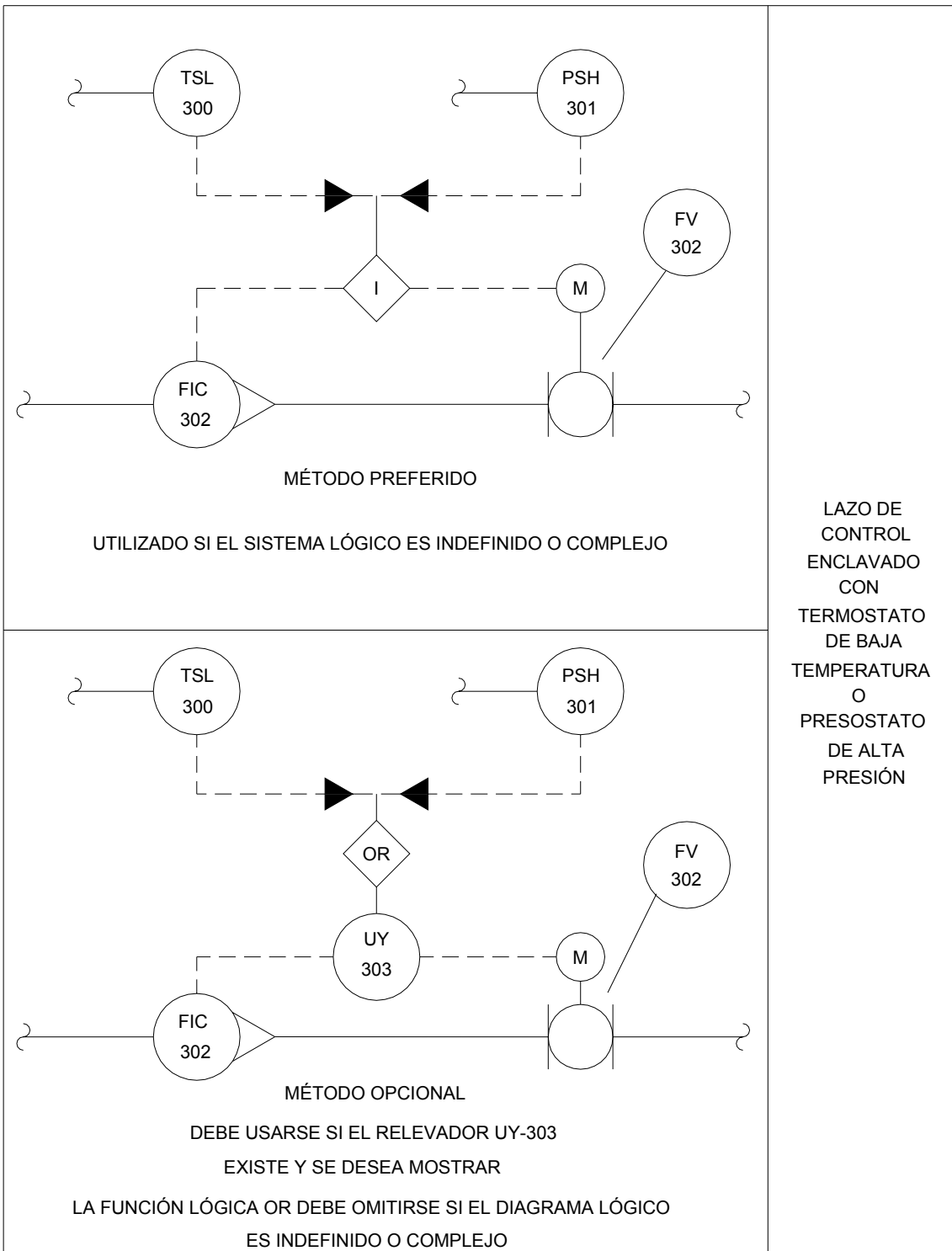
## Símbolos Varios

|   |   |   |
|---|---|---|
| <p>∅ 11 mm aprox.<br/>en escala 1:100</p>  <p>LUZ PILOTO</p> |  <p>SELLO QUÍMICO</p>  |   |
|  <p>ENCLAVAMIENTO LÓGICO<br/>COMPLEJO O SIN DEFINIR</p>      |  <p>ENCLAVAMIENTO EFECTIVO<br/>SI EXISTEN TODAS LAS<br/>ENTRADAS</p> |  <p>ENCLAVAMIENTO EFECTIVO<br/>SI EXISTEN UNA O MAS<br/>ENTRADAS</p> |

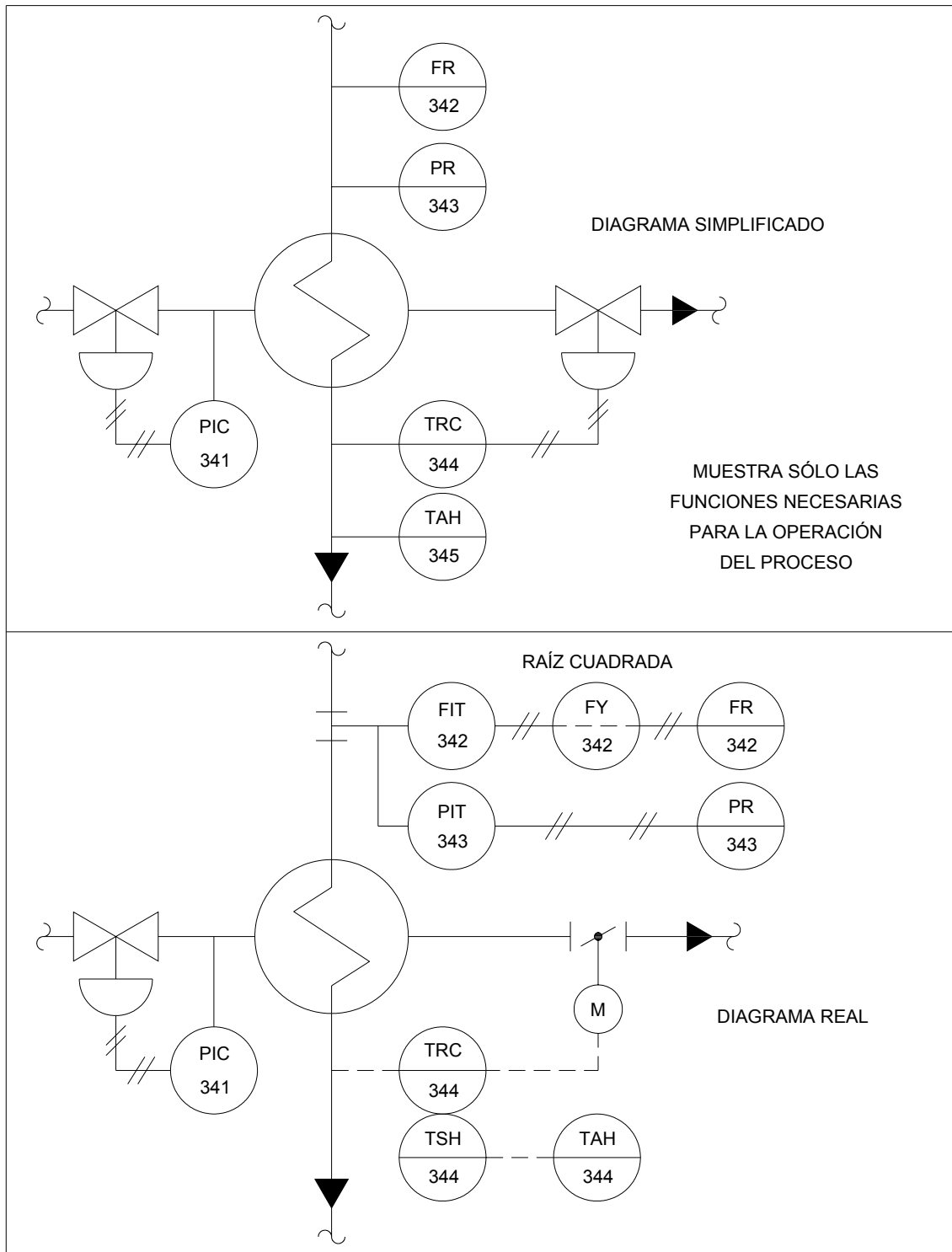
## Sistemas Varios



## Sistemas Varios (continuación)



## Sistemas Varios (continuación)



## **4.4 Consideraciones generales para la elaboración de Diagramas de Tubería e Instrumentación**

El Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) es un documento en donde aparecen todas las líneas, equipos e instrumentos requeridos por el proceso, no sólo para control sino también para indicar, registrar, alarmar y parar automáticamente.

Los DTI's son la representación gráfica de todos los datos necesarios para el desarrollo de la ingeniería de diseño de una planta de proceso. En estos diagramas la simbología que se emplea para la designación de los equipos es más descriptiva que la de los diagramas de flujo de proceso.

El departamento de procesos estudia y prepara el diagrama de flujo de proceso, en él se muestra el equipo principal y las principales tuberías con sus flujos, básicamente.

A partir del diagrama de flujo de proceso se desarrolla el diagrama de tubería e instrumentación de proceso, éste muestra todo el equipo de proceso, la instrumentación y los accesorios requeridos para obtener una buena operación y control, así como la tubería de entrada y salida que manejan servicios auxiliares.

En el desarrollo de estos diagramas, la instrumentación de tubería y equipos debe ser la típica, además de tener presente las líneas y equipos auxiliares para la operación normal de la planta, las líneas y equipos auxiliares para el vaciado de equipo en el paro de planta para mantenimiento y tomar en cuenta operaciones de emergencia, tales como la variación de la capacidad, la falla en algún equipo, la ruptura de tubos y otras emergencias que se pudieran presentar durante la operación de la planta.

También se incluye el diámetro e identificación o número especial de equipo, toda la simbología de los instrumentos, así como las señales requeridas para tener un buen control.

Los diagramas de tubería e instrumentación son de gran utilidad en las plantas de proceso químicos o petroquímicos, por que representan la base para el diseño de los arreglos de equipo y tubería, isométricos de tubería, localización de instrumentos y operación de la planta. En ellos aparecen todos los equipos, accesorios y tuberías que los conectan.

A partir del diagrama de flujo de proceso también se elabora el Diagrama de Tuberías e Instrumentación de Servicios.

### **Información contenida en los diagramas de tubería e instrumentación**

#### **Simbología y Clave de Equipo**

La simbología y clave de los equipos que se indica en los DTI's debe estar de acuerdo a estándares o normas establecidas.

#### **Características de los equipos**

Los diagramas de tubería e instrumentación deben contener información acerca de los equipos para ayudar a la comprensión del diseño y de la operación de las plantas de proceso.

La información va a estar en función de los equipos de proceso, esto quiere decir que es necesario indicar para cada equipo las condiciones de operación. Por ejemplo en el caso de una bomba se anotará la capacidad de diseño en GPM y la diferencial de presión (DP) en psi, en el caso de un intercambiador de calor se especificará principalmente la carga térmica, etc.

### Tubería y Accesorios

La información que complementa los DTI's y que sirve de interconexión entre equipos de proceso y servicios, son las tuberías o líneas de proceso y de servicios auxiliares. Algunas características importantes que deben reunir, al respecto, los Diagramas de Tubería e Instrumentación son las siguientes:

- a) Tamaño y "rating" (libraje) de la tubería.
- b) Número de la línea.
- c) Codificación del material de la tubería.
- d) Tamaño de las válvulas si es diferente al de la línea.
- e) Interconexión de las tuberías con otros DTI's.
- f) Válvulas de seguridad: tamaño, área del orificio y presión y ajuste.
- g) Líneas de entrada y salida incluyendo drenes y venteos.
- h) Especificación de las líneas que requieren aislamiento.

Una tubería normalmente debe describir en su notación: el diámetro de la tubería, el producto o fluido que transporta, un número consecutivo de línea, el material de la tubería y el material del aislante si es que se requiere.

Un ejemplo es: Línea 250-P-500-CS-PPE

|     |  |
|-----|--|
| 250 | Diámetro en mm   |
| P   | Material, producto, fluido, etc., que lleva la línea (este ejemplo es general, normalmente el producto es especificado por notación) |
| 500 | Número consecutivo de línea  |
| CS  | Material (Acero al carbón en este caso)  |
| PPE | Aislante de la línea (PPE= Polipropileno)  |

Habrá que mencionar que en el desarrollo de un proyecto siempre deberá existir un plano de simbología general, el cual describe la simbología de válvulas, tuberías, equipos, accesorios varios y notación de letras, que habrán de utilizarse en la ejecución del proyecto en particular.

### **Información requerida para elaborar un diagrama de tubería e instrumentación**

Para la elaboración de los diagramas de tubería e instrumentación se deberá contar con la siguiente información:

- a) Bases de diseño.
- b) Diagramas de flujo de proceso.
- c) Especificación de tuberías.
- d) Especificación de aislamiento.
- e) Lista de equipo.
- f) Procedimientos para codificación de líneas.
- g) Información de los equipos.
- h) Control e instrumentación típica de equipos.

### **Recomendaciones generales para la elaboración de los DTI'S**

- a) Distribuir los equipos convenientemente guardando cierta proporción en tamaño y elevación.
- b) Dejar espacios libres de aproximadamente 6 cm. en la parte superior e inferior para los datos de los equipos.
- c) Es recomendable que el sentido del flujo sea de izquierda a derecha.
- d) La línea exterior de los equipos deberá ser delgada pero firme, mostrando las características importantes del equipo.
- e) Mostrar todo el equipo misceláneo, aún cuando no estén conectados en batería.
- f) La simbología del equipo debe estar de acuerdo al estándar.
- g) Dibujar las conexiones una vez agrupados los equipos.
- h) La separación entre líneas será de acuerdo a la densidad del diagrama.
- i) La simbología de las líneas debe estar de acuerdo a lo especificado.
- j) Mostrar todos los accesorios de las líneas en las interconexiones.
- k) Los cambios de dirección se dibujan en línea recta.

- l) No se mostraran bridas a menos que sean bridas ciegas.
- m) Los cruces de líneas deben hacerse suspendiendo generalmente la línea vertical, se debe respetar que un solo tipo de línea es la que tiene que suspender.
- n) El sentido del flujo en las líneas se muestra mediante flechas en los cambios de dirección.
- o) Se indicará el tamaño de la reducción en los cambios de diámetro.
- p) No se mostrarán las trampas de vapor en los cabezales.
- q) Las líneas de proceso que continúan o vienen de otro diagrama se indicarán horizontalmente.
- r) Las líneas de servicio que continúan o vienen de otros diagramas se muestran verticalmente.
- s) El tag o identificación de los instrumentos se indica en un círculo de 11 mm. aproximadamente.
- t) La simbología de las válvulas manuales deben estar de acuerdo a los símbolos especificados.
- u) Codificar todas las líneas de acuerdo a lo especificado.
- v) El número de equipo debe aparecer dentro del mismo o lo más cerca posible y debe estar subrayado.
- w) La información de los equipos se debe mostrar en la parte superior e inferior.

La información que se debe indicar en esta sección es:

- i. El número del equipo (subrayado).
  - ii. El nombre del equipo, tal como aparece en la lista de equipo.
  - iii. Gasto.
  - iv. Cabeza.
  - v. Dimensiones generales.
  - vi. Capacidad.
  - vii. Material de construcción.
  - viii. Número de motor.
  - ix. Potencia del motor.
- x) Los pendientes se muestran encerrándolos en una nube.
  - y) Las notas generales se indican en el extremo superior derecho de DTI.



## 4.5 Ejemplos de control e instrumentación típica de equipos

### Columnas de destilación

La operación de destilación consiste en separar una mezcla por diferencia de composición entre un líquido y su vapor. Esta operación se realiza en forma continua en las denominadas columnas o torres de destilación donde por un lado asciende el vapor del líquido hasta salir por la cabeza de la columna y por el otro va descendiendo el líquido hasta llegar a la base. En estos pasos tiene lugar una mezcla entre dos fases, de tal modo que pueden efectuarse extracciones a distintos niveles de la columna para obtener productos más o menos pesados. Los problemas de la destilación son muy diversos, por lo cual los tipos de columnas lo son también. Se presenta a continuación una columna típica de funcionamiento continuo que está representada en la figura 4.2.

Las variables importantes que regulan el funcionamiento de la columna son la presión en la cabeza de la columna, el caudal, la composición y la temperatura de la alimentación, el calor añadido y las calorías extraídas y los caudales de destilado y de producto extraídos en la base.

La presión en la columna se regula mediante un controlador de presión en cascada con un controlador de caudal de los gases incondensables que escapan del condensador, si bien también podría efectuarse con el regulador de presión actuando directamente sobre la válvula de gases incondensables.

El caudal de la alimentación se regula con un controlador de caudal que mantiene un flujo constante. La composición de la alimentación tiene una gran importancia en el funcionamiento de la columna. Sin embargo, es difícil ajustar esta composición de modo que es necesario actuar sobre la columna cuando se presentan cambios en la composición de la alimentación. La temperatura de la alimentación es también importante. Con el objeto de controlarla se emplea un intercambiador de calor con vapor. La temperatura se regula en cascada con el caudal del vapor.

El calor añadido en la columna se efectúa a través de un intercambiador de calor instalado en la base o en un plato intermedio de la columna. Un controlador de caudal de vapor ajusta estas calorías aportadas. Como complemento se instala un controlador que actúa sobre la extracción. Las calorías extraídas tienen lugar en el condensador de los gases que salen de la cabeza de la columna. Un controlador de caudal de agua de refrigeración del condensador ajusta estas calorías. El caudal de destilado se ajusta mediante un controlador de nivel en el acumulador. El caudal de producto extraído en la base está relacionado con el calor añadido en la columna y tal como se ha indicado está regulado indirectamente por el controlador de nivel de la base de la columna.

Es obvio que las variables que influyen en el funcionamiento de la columna de destilación son muy diversas y que cada una de ellas, si varía, actúa como una perturbación en todo el proceso, por lo cual existen formas variadas de control derivativas de la mostrada, que cada vez son más complejas, siendo la última la optimización mediante control por sistema computarizado que se aplica siempre que los estudios económicos así lo aconsejen.

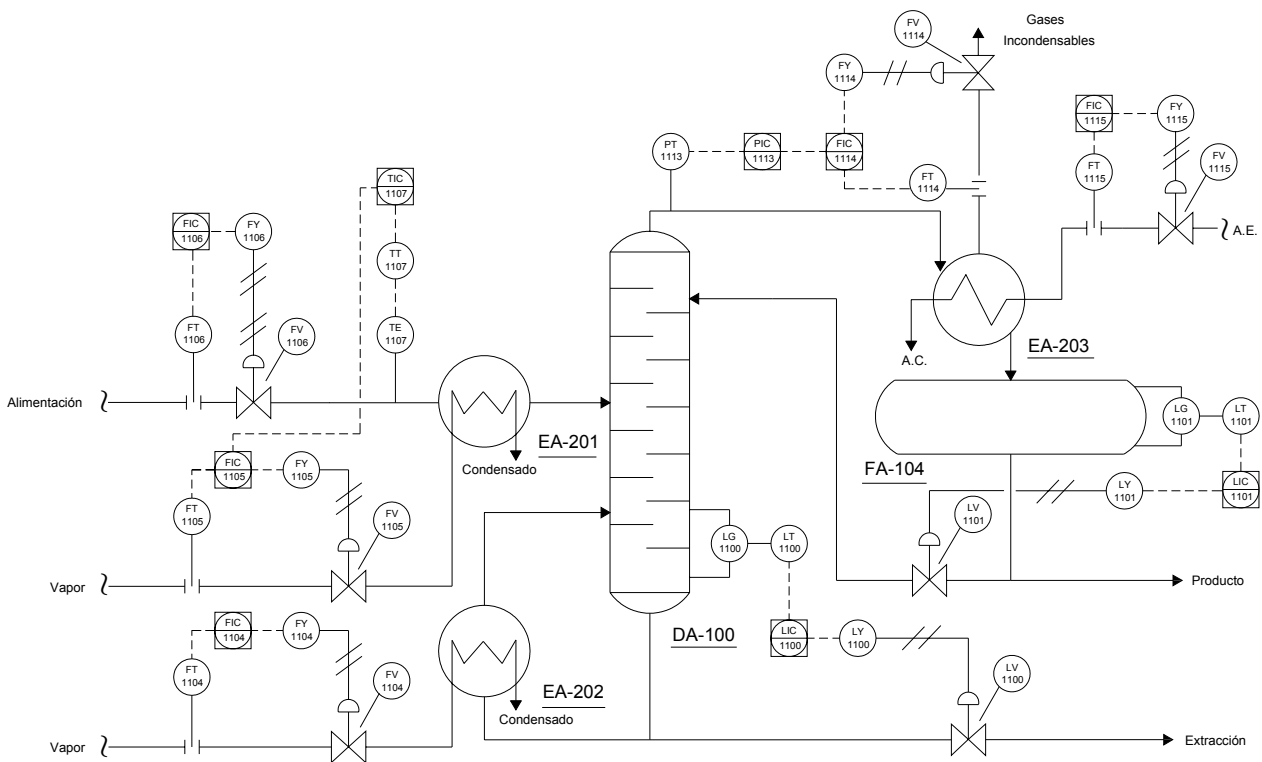


Fig. 4.2 Proceso de destilación.

## Intercambiadores de calor

La gran mayoría de los procesos industriales emplean intercambiadores de calor en operaciones tales como precalentamiento, pasteurización, esterilización y refrigeración, entre otras.

Existen varios sistemas para el control de los intercambiadores de calor debido a que son muchos los factores que deben considerarse: la presión del vapor o del fluido de alimentación, las fluctuaciones en el caudal del producto, las variaciones en la temperatura del producto, en su calor específico, los retardos del proceso, etc. El control en cascada (fig. 4.3) entre el controlador de temperatura como primario y un controlador de presión de vapor como secundario muestra como las variaciones de presión del vapor de la línea de alimentación son corregidas inmediatamente por el controlador de presión secundario mientras que el controlador de temperatura primario actúa en la salida del producto.

En los casos de intercambiadores de calor entre líquidos, es usual estabilizar la temperatura del líquido de calefacción o refrigeración en un sistema separado. Cuando el intercambiador de calor tiene una respuesta demasiado lenta, el mantenimiento de temperatura del producto se realiza con un controlador de temperatura actuando sobre una válvula de tres vías diversora que deriva el intercambiador. De este modo se logra una respuesta rápida frente al empleo de una válvula de dos vías, ya que la capacidad térmica del intercambiador es grande e introduce un retardo considerable ante cambios en la carga. El producto es derivado y se mezcla directamente con el producto caliente que sale del intercambiador. La figura 4.4 ilustra lo anterior.

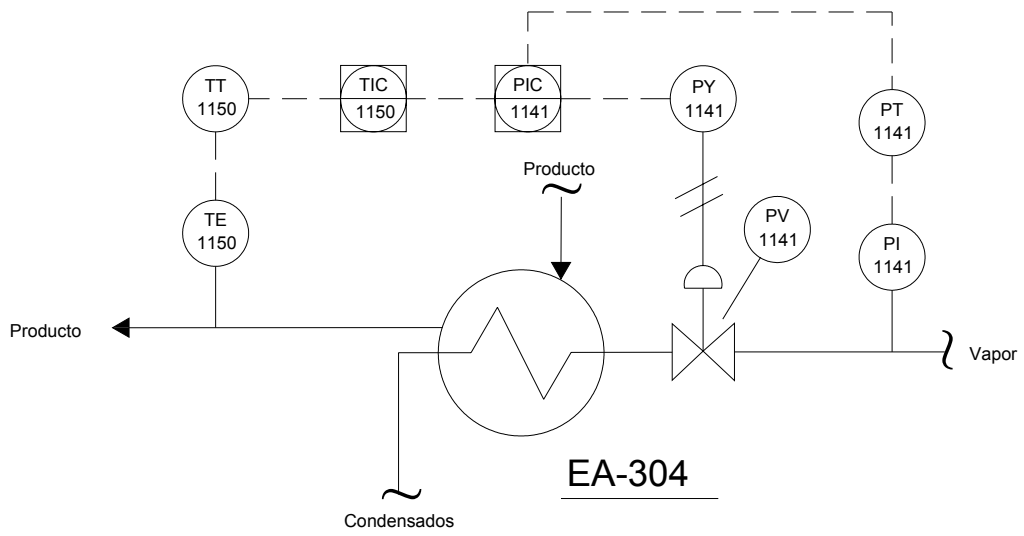


Fig. 4.3 Control en cascada en un intercambiador de calor.

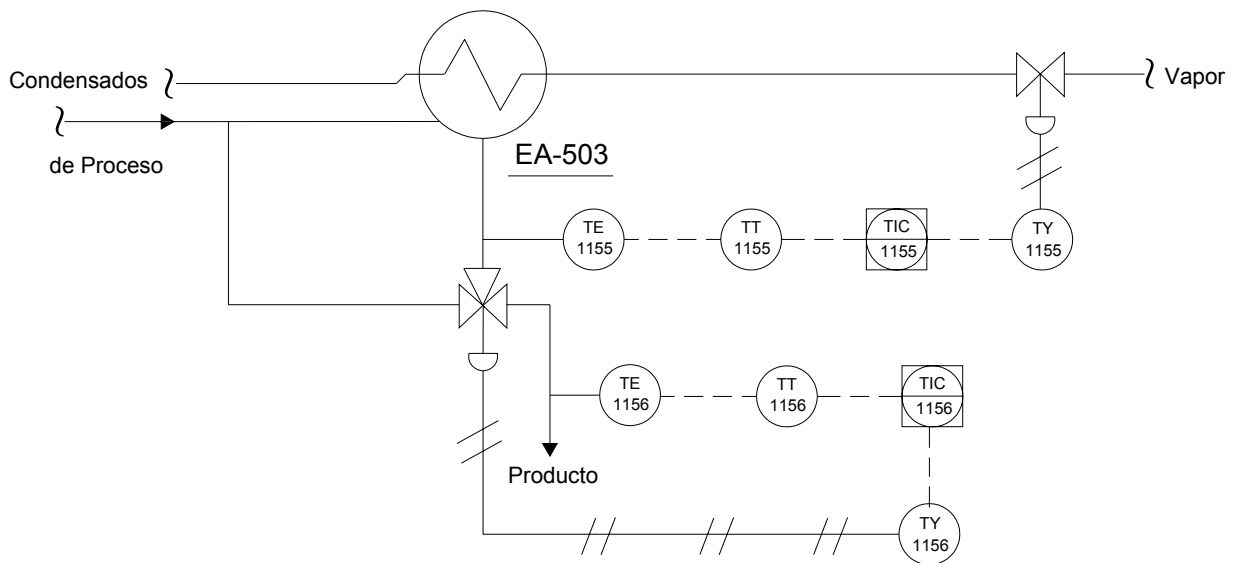


Fig. 4.4 Control en derivación del producto.

## Evaporación

En el evaporador de doble efecto (fig. 4.5) la concentración que resulta del efecto final se controla mediante el control del ascenso del punto de ebullición, ya que al mantener este constante, la concentración del soluto se mantiene al valor que se desea. Mientras más alta sea la concentración del soluto más alto es el ascenso del punto de ebullición. Este puede controlarse mediante el manejo del vapor que entra al primer efecto.

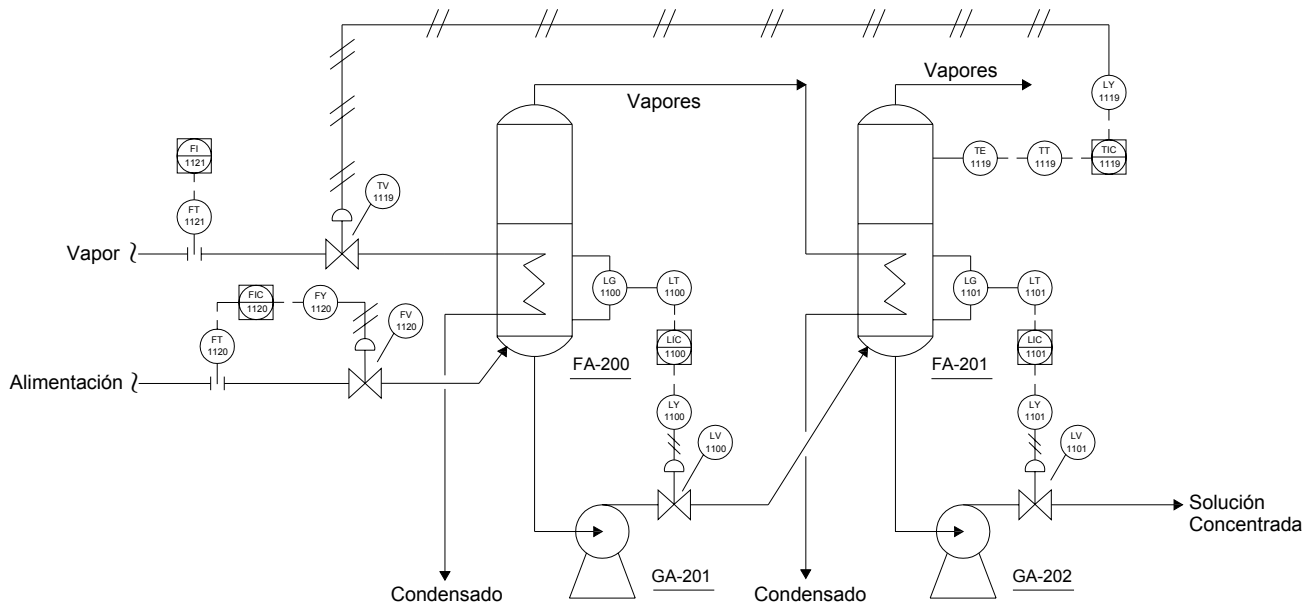


Fig. 4.5 Evaporación en doble efecto.

## Lógica y Control de Procesos

### 5.1 Símbolos Lógicos para Operaciones Binarias

#### Circuito Lógico

Es aquel circuito en donde existen interconexiones entre elementos que desarrollan una operación de lógica simple. Es decir, representan ya sea una condición Verdadera ó Falsa, de existencia o de no existencia; así por ejemplo, una señal de alto voltaje puede ser representada por el número 1 y una señal de bajo voltaje por el número 0:



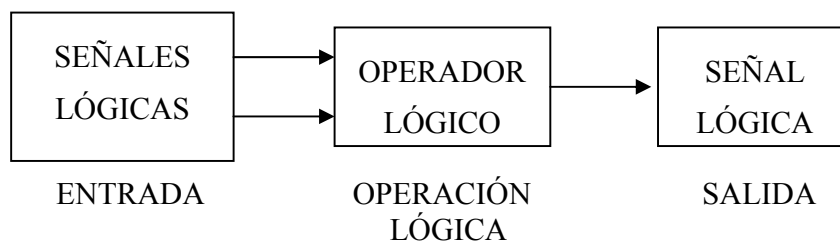
La operación lógica dependerá de si la lógica es positiva o negativa. En la lógica positiva la condición verdadera (on) es igual a un alto voltaje y esto es igual a 1; la condición falsa (off) es igual a un bajo voltaje y esto es igual a 0.

Condición Verdadera (on) = Voltaje Hi = 1

Condición Falsa (off) = Voltaje Lo = 0

La lógica negativa será por consecuencia alto voltaje igual a 0 y bajo voltaje igual a 1.

La operación lógica esta constituida por un número definido de entradas de señales lógicas que habrán de ser interpretadas por un operador lógico con la finalidad de tener una señal de salida lógica.



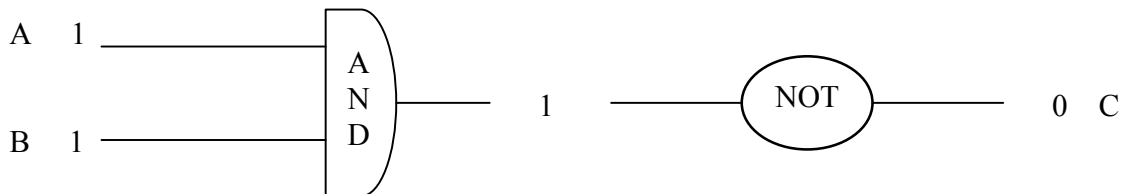
La existencia de una señal lógica puede corresponder de forma física a la existencia o no de una señal de instrumentos, dependiendo de la filosofía del diseño del circuito. Por ejemplo, puede diseñarse una alarma por alta temperatura para que sea accionada por un interruptor eléctrico en el que los contactos abran, o cierren cuando la temperatura es alta. Por lo que la condición de alta temperatura puede ser representada por la presencia o por la ausencia de señal eléctrica en un interruptor.



La salida es 1 si y sólo si una entrada es 1 y la otra es cero, de lo contrario la salida es cero. C existe sólo si están presentes un número especificado de entradas A y B.

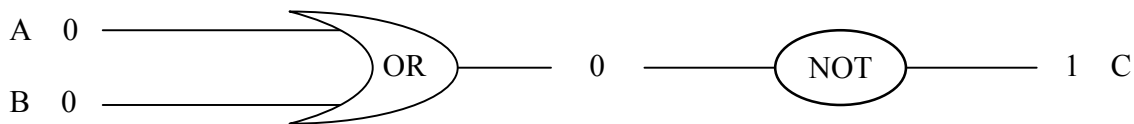
### Combinación de operadores

#### Operador NAND



Este operador se caracteriza por tener un NOT a la salida de un AND.

#### Operador NOR



El operador NOR tiene un NOT a la salida de un OR.

### Tablas de verdad para operadores lógicos considerando cuando más dos entradas

| AND |   |   |
|-----|---|---|
| A   | B | C |
| 0   | 0 | 0 |
| 0   | 1 | 0 |
| 1   | 0 | 0 |
| 1   | 1 | 1 |

| OR |   |   |
|----|---|---|
| A  | B | C |
| 0  | 0 | 0 |
| 0  | 1 | 1 |
| 1  | 0 | 1 |
| 1  | 1 | 1 |

| NAND |   |   |
|------|---|---|
| A    | B | C |
| 0    | 0 | 1 |
| 0    | 1 | 1 |
| 1    | 0 | 1 |
| 1    | 1 | 0 |

| NOR |   |   |
|-----|---|---|
| A   | B | C |
| 0   | 0 | 1 |
| 0   | 1 | 0 |
| 1   | 0 | 0 |
| 1   | 1 | 0 |

| NOT |   |
|-----|---|
| A   | B |
| 1   | 0 |
| 0   | 1 |

Las tablas de verdad para operaciones lógicas simbolizan, de izquierda a derecha en las primeras columnas (A y B), a las entradas de señales lógicas, las cuales pueden ser provenientes de otros elementos dentro del mismo circuito (internas), o provenientes de otros elementos fuera del circuito (externas), y la última columna la salida de la señal lógica. Cada casilla representa una y sólo una señal lógica. La tabla de verdad representa entradas y salidas de señales lógicas en un circuito lógico para operaciones binarias.

Exceptuando al operador NOT, para todos los demás operadores puede haber más de dos señales de entrada (mínimo dos) y sólo una salida.

Una secuencia lógica, o una serie de secuencias lógicas, pueden ser representadas únicamente utilizando el símbolo de los operadores lógicos. Ver figura 5.1.

Toda esta serie de símbolos lógicos se utilizan cuando se desea realizar un diagrama lógico de control en donde uno o más circuitos lógicos representan en un diagrama la operación de un proceso, o de una parte de este (control de nivel en un tanque de llenado, paro y arranque de bombas de inyección, permisivos para arranque, disparos por alta temperatura, bajo flujo, alta o baja presión, etc.).

Los diagramas lógicos de control de procesos en la industria están basados en la lógica operacional que integran a los circuitos electrónicos. El control de un proceso deberá de hacerse siempre en base a una adecuada secuencia lógica de operación, y de la misma forma que se controla la operación de un proceso en base a la manipulación de flujos, niveles, presiones, temperaturas, corriente eléctrica, concentraciones, estados de operación, etc., de igual manera, los microprocesadores en base a pequeñas variaciones de voltaje en un circuito electrónico, interpretan flujos de información codificada en números binarios, de tal forma que les permite la toma de decisiones para llevar a efecto una determinada operación.

Los operadores lógicos de un circuito electrónico no son otra cosa más que operaciones lógicas que son interpretadas por una computadora, con una serie de instrucciones en números binarios.

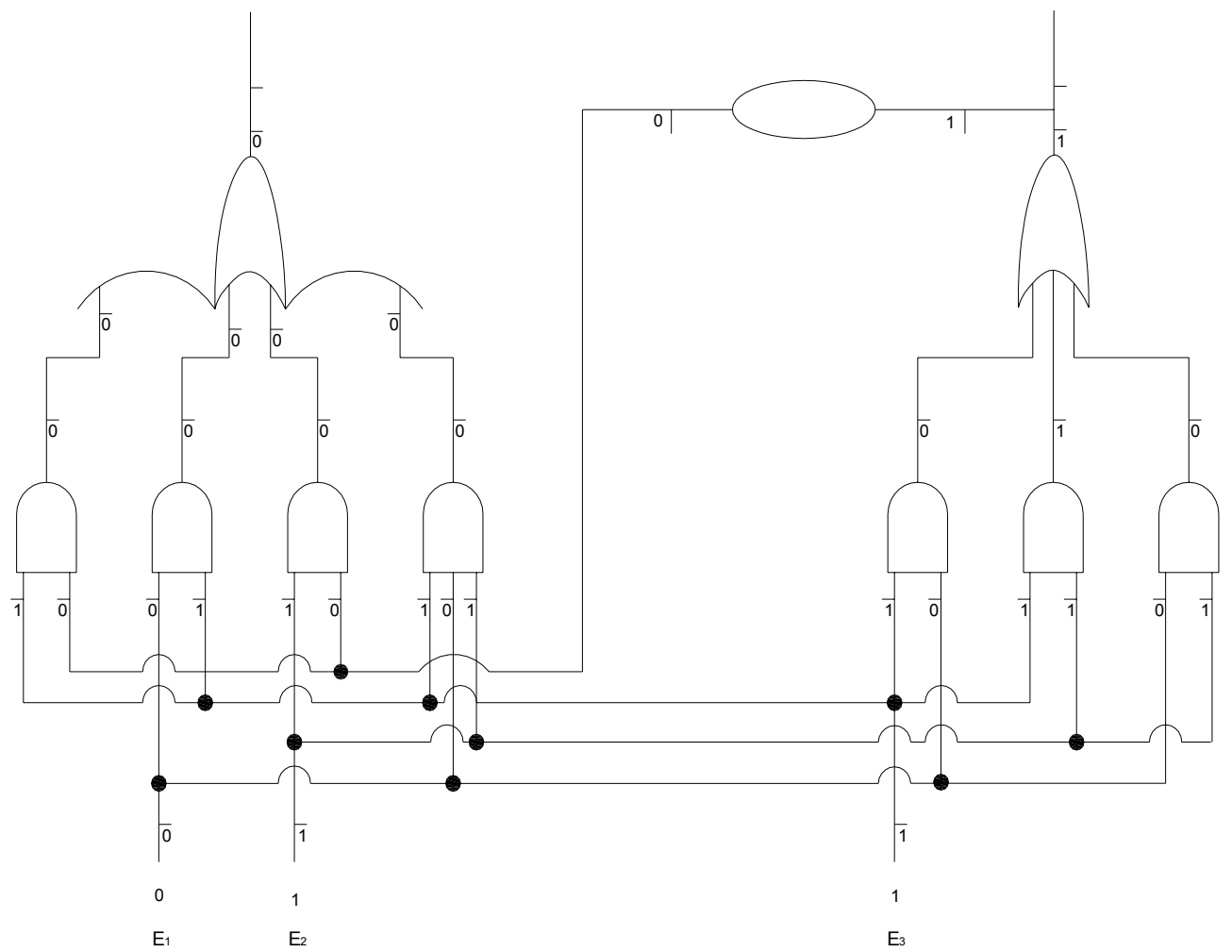
El sistema binario desempeña un importante papel en la tecnología de los ordenadores. Los primeros 20 números en el sistema en base 2 son 1, 10, 11, 100, 101, 110, 111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111, 10000, 10001, 10010, 10011 y 10100. Cualquier número se puede representar en el sistema binario, como suma de varias potencias de dos. Por ejemplo, el número 10101101 representa, empezando por la derecha,  $(1 \times 2^0) + (0 \times 2^1) + (1 \times 2^2) + (1 \times 2^3) + (0 \times 2^4) + (1 \times 2^5) + (0 \times 2^6) + (1 \times 2^7) = 173$ .

Puesto que sólo se necesitan dos dígitos (o bits), el sistema binario se utiliza en los ordenadores o computadoras. Un número binario cualquiera se puede representar, por ejemplo, con las distintas posiciones de una serie de interruptores. La posición "encendido" corresponde al 1, y "apagado" al 0. Además de interruptores, también se pueden utilizar puntos imantados en una cinta magnética o disco: un punto imantado representa al dígito 1, y la ausencia de un punto imantado es el dígito 0. Los dispositivos electrónicos biestables, con sólo dos posibles valores de voltaje a la salida y que pueden saltar de un estado al otro mediante una señal externa, también se pueden utilizar para representar números binarios. Los circuitos lógicos realizan operaciones con números en base 2. La conversión de números decimales a binarios para hacer cálculos, y de números binarios a decimales para su presentación, se realizan electrónicamente.

Los ordenadores o computadoras utilizan la lógica digital para efectuar operaciones. La lógica digital implica tomar sucesivas decisiones de verdadero o falso, que se representan como 1 y 0, respectivamente. Los circuitos lógicos, que están en el corazón de los chips de la computadora, están diseñados para tomar series de este tipo de decisiones a través de juntas denominadas puertas. Estas están diseñadas y organizadas de tal forma que pueden tomar diferentes tipos de decisiones acerca de las entradas que reciben. Los valores individuales de entrada y de salida son siempre verdaderos o falsos, y se transmiten a través del circuito en forma de diferentes tensiones.

Como resulta evidente, la representación en un diagrama lógico de un circuito electrónico de control es solamente una simbolización de toda una serie de operaciones lógicas que físicamente se transmiten en forma de impulsos eléctricos (tensiones de 1 V, 0.5 V, 0.9 V, etc.) en un circuito lógico, donde además de operadores lógicos que permiten la toma de decisiones, existen diodos (componentes electrónicos que permiten el paso de la corriente en un sólo sentido; también son conocidos como válvulas electrónicas), transistores (componente electrónico semiconductor provisto de tres o más electrodos que sirven para rectificar y amplificar los impulsos eléctricos), resistencias, puestas a tierra, etc.





En donde:

● Punto de interconexión

⌋ Sin conexión con la intersección

┆ Entrada ó salida de señal lógica

$E_i$  Entrada de señal lógica externa al circuito

— Líneas de conexión para señales internas



Operador AND



Operador OR

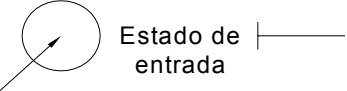
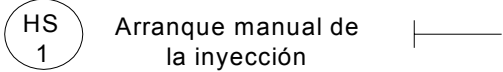
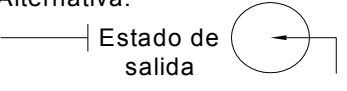
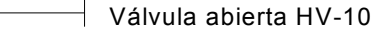
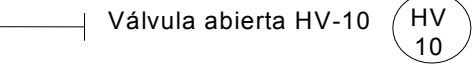
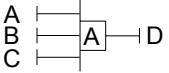
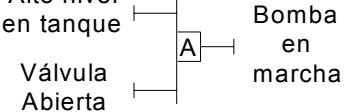


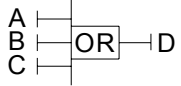
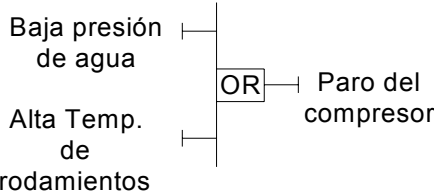
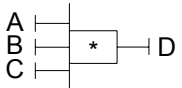
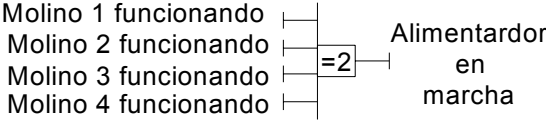
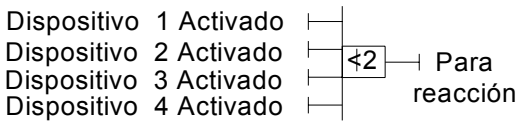
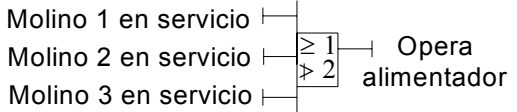
Operador NOT

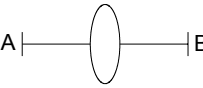
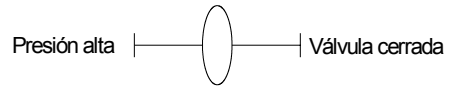
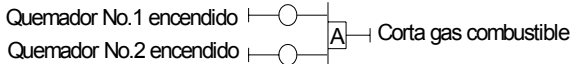
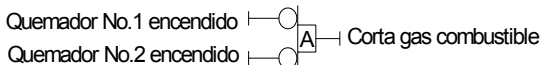
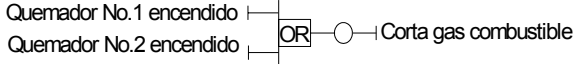
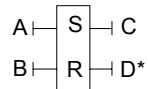
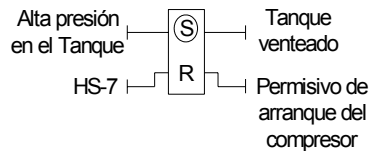
Fig. 5.1 Ejemplo de circuito lógico utilizando sólo símbolos de operadores.

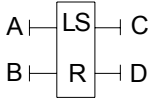
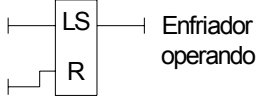
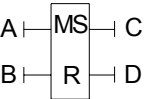
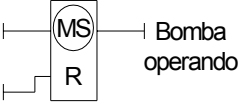
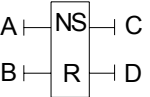
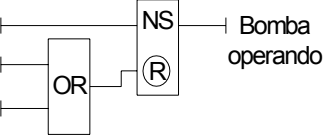
### 5.1.1 Resumen de Norma ISA-S5.2-76

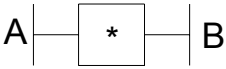
Esta norma presenta los símbolos lógicos que representan operaciones de proceso binarias independientemente de que tipo de señal de instrumento se utilice o el tipo de hardware empleado.

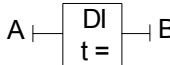

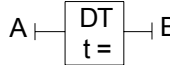

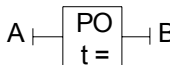

| FUNCIÓN         | SÍMBOLO  | DEFINICIÓN  | EJEMPLO   |
|-----------------|--|---|---|
| Entrada (INPUT) | <p>Puede ser precedido por el símbolo del instrumento.</p> <p>Alternativa:</p>  <p>Estado de entrada</p> <p>Identificación del instrumento o dispositivo de inicio.</p> | Entrada de secuencia lógica.  | <p>a) Al actuar un detector manual HS-1 se envía una señal de arranque de la inyección.</p> <p>b) Alternativa:</p>  <p>Arranque manual de la inyección</p>   |
| Salida (OUTPUT) | <p>Puede ser seguido por el símbolo del instrumento.</p> <p>Alternativa:</p>  <p>Estado de salida</p> <p>Identificación del instrumento o dispositivo operado.</p>      | Salida de secuencia lógica.   | <p>a) Una salida de la secuencia lógica envía una señal para abrir la válvula HV-10.</p>  <p>Válvula abierta HV-10</p> <p>b) Alternativa:</p>  <p>Válvula abierta HV-10</p> |
| Y (AND)         |   | La salida lógica D existe si y sólo si, todas las entradas lógicas A,B y C existen. | <p>La bomba está en marcha si el nivel en el tanque es alto y la válvula de descarga está abierta.</p>   |

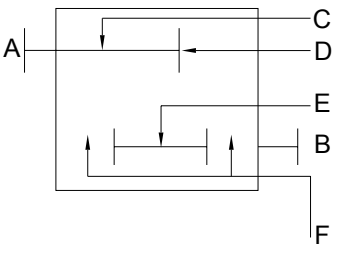
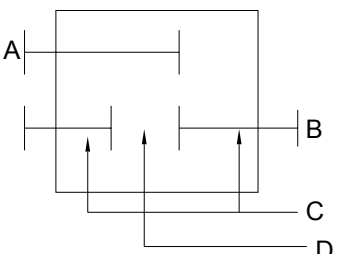
| FUNCIÓN              | SÍMBOLO   | DEFINICIÓN  | EJEMPLO   |
|----------------------|---|---|---|
| OR ("O")             |    | <p>La salida lógica D existe si y solo si una o más de las entradas lógicas A , B y C existen.</p>  | <p>Paro del compresor si la presión del agua de enfriamiento es baja ó si la temperatura de rodamientos es alta.</p>   |
| OR( "O" ) CALIFICADO |  <p>* Espacio para cantidades numéricas.</p> | <p>La salida lógica D existe si y sólo si un número especificado de entradas lógicas A,B y C existen.</p> <p>Para especificar el número de entradas se usan símbolos matemáticos en forma apropiada que incluyen los siguientes:</p> <p>a.= Igual a<br/> b.≠ Diferente de<br/> c.&lt; Menor que<br/> d.&gt; Mayor que<br/> e.≧ No menor que<br/> f.≦ No mayor que<br/> g.≤ Menor o igual que<br/> h.≥ Mayor o igual que</p> | <p>a) Alimentador del material en marcha mientras dos y sólo dos molinos funcionen.</p>  <p>b) La reacción para si cuando menos dos dispositivos de seguridad se disparan.</p>  <p>c) El alimentador del material opera si cuando menos uno y no mas de dos molinos están en servicio.</p>  |

| FUNCIÓN                        | SÍMBOLO  | DEFINICIÓN  | EJEMPLO  |
|--------------------------------|--|---|--|
| <p>NOT ( NO )<br/>INVERSOR</p> |  <p>El símbolo lógico NOT, se puede dibujar tangente a un símbolo lógico adyacente.</p> | <p>La salida lógica B existe y solo si la entrada lógica A no existe.</p>   | <p>a) Cerrar la válvula sólo mientras la presión no es alta.</p>  <p>b) Se corta el combustible si los quemadores No.1 y No.2 no están encendidos.</p>  <p>Alternativas:</p>   |
| <p>MEMORIA</p>                 | <p>a)</p>  <p>* Si no existe la salida lógica D no debe mostrarse</p>                  | <p>S representa el ajuste de la memoria (set memory).<br/>R representa el reajuste de la memoria (reset memory).</p> <p>La salida C existe tan pronto como la entrada lógica A existe. C continuara existiendo sin importar los subsecuentes estados de A, hasta que la memoria es reajustada, es decir será reajustada por la existencia de la entrada lógica B. C continuaran existente sin importar los subsecuentes estados de B. Hasta que la existencia de la entrada lógica A ajuste la memoria. La salida lógica D, si se usa existe cuando C no existe y D no existe cuando C existe.</p> <p>Opción por predominio de una entrada:<br/>Si las entradas A y B existen simultáneamente, y si se deseará tener a A predominando sobre B, entonces S deberá encerrarse en un círculo (S); si B predominara sobre A entonces R deberá encerrarse en un círculo (R).</p> <p>Opción por falla en el suministro de energía:<br/>La letra S sin modificar denotara que no fue tomada en consideración la acción de la memoria en el caso de falla de energía a la lógica.</p> | <p>Si la presión del tanque es alta, el tanque ventea y continuara venteando no importando la presión hasta que se accione manualmente el interruptor HS-7 siempre y cuando la presión no sea alta. Si el venteo se detiene el compresor podrá arrancar.</p>    |

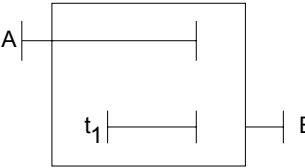
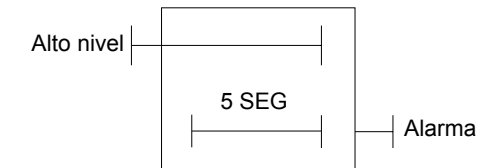
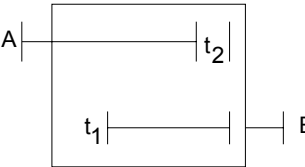
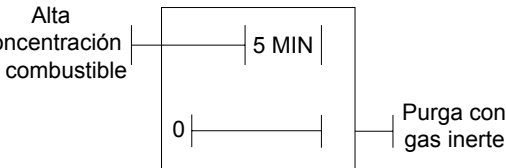
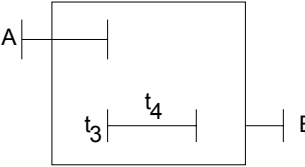
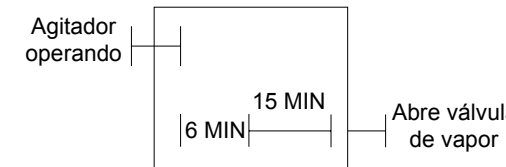
| FUNCIÓN | SÍMBOLO   | DEFINICIÓN  | EJEMPLO  |
|---------|---|---|--|
| MEMORIA | b)<br>   | Idem definición del símbolo del inciso a), excepto que la memoria se pérdida (lost) en caso de falla en el suministro de energía a la lógica.   | Cuando la alimentación empiece a fluir, el enfriador debe operar hasta que el tanque de alimentación este vacío. En caso de falla de energía a la lógica el enfriador no deberá operar.<br><br>Alimentación fluendo   |
|         | c)<br>   | Idem a la definición del símbolo del inciso a), excepto que la memoria deberá ser retenida (maintained) en el caso de falla en el suministro de energía a la lógica.  | Si la operación de una bomba de emergencia es iniciada, la bomba operará; en el caso de falla de energía a la lógica, la bomba continuara operando hasta que la secuencia del proceso termine. La bomba operará si los comandos de arranque y paro existen simultáneamente.<br><br>Arranque bomba de emergencia   |
|         | d)<br> | Idem a la definición del símbolo del inciso a), excepto que después de haberse analizado se encontro que no es significativo (not significant) en lo que respecta al proceso si la memoria se retiene o se pierde en el caso de falla de energía. | Si el nivel del tanque es bajo, operará la bomba de llenado hasta que el nivel sea alto o la calidad del agua no sea satisfactoria. No es significativo al proceso lo que ocurra a la bomba en caso de pérdida de energía en la lógica. Si los comandos de arranque y paro existen simultáneamente la bomba deberá parar.<br><br>Bajo nivel del tanque  |

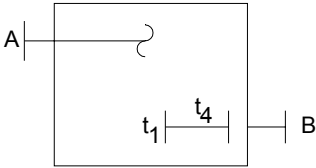
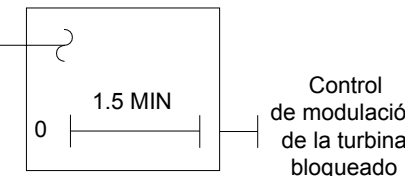
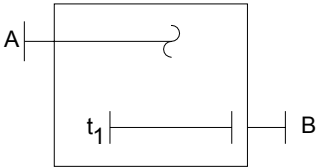
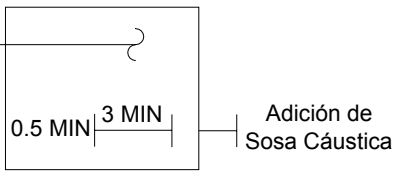
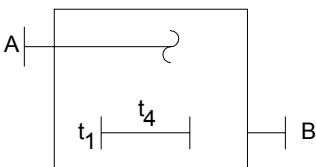
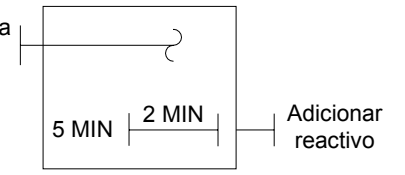
| FUNCIÓN            | SÍMBOLO   | DEFINICIÓN   | EJEMPLO |
|--------------------|---|--|---------|
| ELEMENTO DE TIEMPO |  <p>* Insertar Símbolo</p> <p>DI, DT, PO</p> | <p>Forma básica</p> <p>Símbolo                      Significado</p> <p>Retarda la iniciación de la salida. La existencia continua de la entrada lógica A durante un tiempo especificado causa la existencia de la salida lógica B cuando el tiempo expira.</p> <p><u>DI</u> :                      B termina cuando A termina.</p> <p>Retarda la terminación de la salida. La existencia de la entrada lógica A causa la existencia inmediata de la salida lógica B. B termina cuando A a terminado y no a existido durante un tiempo especificado.</p> <p><u>DT</u> :                      Impulso de salida. La existencia de la entrada lógica A , independientemente de sus subsecuentes estados causa que la salida lógica B exista inmediatamente. B existe por un tiempo especificado y luego termina.</p> <p><u>PO</u> :                      </p> |         |

| FUNCIÓN             | SÍMBOLO  | DEFINICIÓN | EJEMPLO   |
|---------------------|--|------------|---|
| ELEMENTOS DE TIEMPO | a )<br><br>Retardo de la señal de salida (Delay initiation)                 |            | Si la temperatura en el reactor excede un límite alto continuamente durante 10 segundos, se cierra el flujo del catalizador. Restablecer el flujo del catalizador cuando la temperatura no exceda el límite alto.<br><br>Alta temperatura en reactor  Flujo de catalizador bloqueado |
|                     | b )<br><br>Retardo en la terminación la señal de salida (Delay termination) |            | Si la presión disminuye abajo de un límite opera el compresor; para cuando la presión se mantenga arriba del límite durante un minuto continuamente.<br><br>Baja presión  Compresor operando   |
|                     | c )<br><br>Señal de pulso (Pulse output)                                  |            | Si el recipiente de purga falla por cualquier período de tiempo, opera la bomba de evacuación por tres minutos y luego para.<br><br>Recipiente de purga falla  Arranca bomba de evacuación   |

| FUNCIÓN                        | SIMBOLO  | DEFINICIÓN   | EJEMPLO |
|--------------------------------|--|--|---------|
| ELEMENTOS DE TIEMPO ESPECÍFICO | <p>e1 )</p>   | <p>A = Entrada<br/>           B = Salida<br/>           C = Existencia del estado lógico de entrada<br/>           D = No existencia del estado lógico de entrada<br/>           E = Existencia del estado lógico de salida<br/>           F = No existencia del estado lógico de salida</p> <p>El momento en el cual la entrada lógica A se inicia (representado por el lado izquierdo del rectángulo), el tiempo transcurre de izquierda a derecha. La salida lógica B siempre empieza y termina dentro de los límites del tiempo (representado por los lados del rectángulo) con el mismo estado.</p> |         |
|                                | <p>e2 )</p>  | <p>A = Entrada<br/>           B = Salida<br/>           C = Existencia del estado lógico de salida<br/>           D = No existencia del estado lógico de salida</p> <p>La salida lógica B existe como una función del tiempo respecto a la entrada lógica A y puede resultar en un estado de existencia como de no existencia.</p>   |         |



| FUNCIÓN                        | SIMBOLO   | DEFINICIÓN  | EJEMPLO  |
|--------------------------------|---|---|--|
| ELEMENTOS DE TIEMPO ESPECÍFICO | <p>a )</p>   | <p>La existencia continua de la entrada lógica A por un tiempo <math>t_1</math>, causa que la salida lógica B exista cuando <math>t_1</math> termina. B termina cuando A termina.</p>   | <p>Evitar falsas situaciones de alarma provocadas por condiciones instantáneas de alto nivel. Habrá una condición de alarma solo si el nivel permanece alto por mas de 5 segundos. La condición de alarma termina cuando la condición de alto nivel termina.</p>  |
|                                | <p>b)</p>    | <p>La existencia continua de la entrada lógica A por un tiempo <math>t_1</math>, causa que la salida lógica B exista cuando <math>t_1</math> termina. B termina cuando A ha terminado por un período continuo <math>t_2</math>.</p>   | <p>Purgar inmediatamente con gas inerte cuando la concentración de combustible sea alta. Terminar la purga cuando la concentración de combustible halla dejado de ser alta 5 minutos consecutivos.</p>    |
|                                | <p>c)</p>  | <p>La terminación de la entrada lógica A y su no existencia continua por un tiempo <math>t_3</math>, causa que la salida lógica B exista cuando <math>t_3</math> termina. B termina cuando:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) B ha existido por un tiempo <math>t_4</math> ó</li> <li>2) A exista nuevamente</li> </ol> <p>Lo que ocurra primero.</p> | <p>Se abre el vapor por 15 minutos si el agitador a dejado de operar por 6 minutos. Pero el vapor deberá cerrarse si el agitador arranca.</p>   |

| FUNCIÓN                               | SÍMBOLO   | DEFINICIÓN  | EJEMPLO  |
|---------------------------------------|---|---|--|
| <p>ELEMENTOS DE TIEMPO ESPECÍFICO</p> | <p>d)</p>    | <p>La existencia de la entrada lógica A, no importando sus subsecuentes estados, causa que la salida lógica B exista cuando el tiempo t1 termina. B existe por un tiempo t4 y luego termina.</p>  | <p>Si la presión disminuye por debajo de un cierto valor momentáneamente se bloquea el control modulante de la turbina y se mantiene así por 1.5 min, transcurrido ese tiempo se permite que opere momentáneamente el control modulante de la turbina.</p>  |
|                                       | <p>e)</p>    | <p>La existencia continua de la entrada lógica A por un tiempo t1, causa que la salida lógica B exista cuando el tiempo t1 termina. B existirá por un tiempo t4, independientemente de los estados de A, y después termina.</p>   | <p>Si el pH es bajo continuamente durante un tiempo de 0.5 minutos, adicionar Sosa Cáustica por 3 minutos</p>    |
|                                       | <p>f)</p>  | <p>La existencia continua de la entrada lógica A por un tiempo t1, causa que la salida lógica B exista cuando el tiempo t1 termina. B termina cuando:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) B ha existido por un tiempo t4</li> <li>2) A ha terminado.</li> </ol> <p>Lo que ocurra primero.</p> | <p>Si la temperatura permanece normal por 5 minutos continuamente, adicionar reactivo por 2 minutos. El reactivo dejará de adicionarse si la temperatura no es normal.</p>    |

## 5.1.2 Ejemplos de diagramas lógicos para operaciones binarias de procesos

En la elaboración de un diagrama lógico, el flujo de información estará representado por líneas que interconectan estados lógicos. La dirección normal del flujo es de izquierda a derecha o de arriba hacia abajo. Para una mayor claridad del diagrama, y siempre que sea necesario, pueden añadirse flechas a las líneas de flujo.

Puede ocurrir que una condición lógica aún y cuando sea especificada, no sea bien comprendida cuando se trate de un aparato con dos estados alternativos específicos. Un ejemplo de esto es una válvula que no está cerrada, esto puede ser debido a que la válvula está totalmente abierta, o que la válvula no está cerrada y se encuentra en una posición intermedia, entre casi cerrada y totalmente abierta. Si se interpreta literalmente el diagrama forzaría a pensar que la válvula esta totalmente abierta.

Las siguientes definiciones se aplican a los aparatos que tienen posiciones abiertas, intermedias ó cerradas:

Posición abierta: Posición que esta 100% abierta.

Posición no abierta: Posición que es menor del 100% abierta.

Posición cerrada: Posición que es 0% abierta.

Posición no cerrada: Una posición que es mayor que 0% abierta.

Posición intermedia: Una posición especificada que es mayor de 0% y menor de 100% abierta.

Posición no intermedia: Una posición especificada que es superior o inferior a la posición intermedia especificada.

Tomando de referencia estas definiciones, para las válvulas todo-nada, en el diagrama se deberá especificar exactamente lo deseado, de modo que si la válvula debe de estar abierta, así debe establecerse. Lo incorrecto sería establecer que la válvula está no cerrada.

Contrario a esto, una bomba que es accionada por un motor siempre esta funcionando o está parada dependiendo de las circunstancias; señalar que la bomba no esta funcionando, indica que está parada.

En un sistema lógico en donde se presente un estado de entrada (señal de entrada a algún operador o elemento lógico) derivado de forma inferencial o indirecto, puede presentarse una condición que conduzca a una conclusión errónea. Por ejemplo, si se supone que existe flujo en la línea de alimentación a un tanque tan sólo porque la bomba que lo alimenta está operando, puede ser un error ya que es posible que una válvula en la línea al tanque este cerrada, o que aún y que la bomba esté excitada, el eje de esta se encuentra roto, o sencillamente por otra causa. Es por ello que deberá analizarse detalladamente el diseño de un sistema lógico.

Por otro lado, la pérdida de alimentación (eléctrica, neumática u otra) a memorias o elementos lógicos, puede afectar la operación del proceso, por lo que la fuente de alimentación o la pérdida de esta, debe también de considerarse como una entrada lógica al sistema, o a los elementos lógicos individuales.

Las memorias son una buena opción para que la pérdida de alimentación eléctrica por ejemplo, pueda incluirse como una entrada lógica en la forma que se indica en los diagramas. También es posible incluir la restauración de la alimentación, la cancelación de esta a la memoria, o sencillamente, no tomarla en consideración.

Los diagramas lógicos en los procesos industriales significan la representación gráfica de la operación de procesos industriales en base a toma de decisiones tales como falso, verdadero, si y sólo si, si condicionado, etc, y a esto, se le llama lógica de procesos.

La aplicación de sistemas lógicos no está restringida solamente a los procesos industriales; en realidad, son de uso cotidiano para todas las personas, aunque esto no sea de su conocimiento. Los sistemas de semáforos en vía pública, los sistemas de iluminación pública, los elevadores en los edificios, son sólo algunos ejemplos de la aplicación de sistemas lógicos en la vida cotidiana de cualquier persona.

En los procesos industriales, el diseño de los diagramas lógicos muy pocas veces se realiza como una unidad; si no que se suelen desarrollar por etapas sucesivas, donde cada una de ellas proporciona la secuencia del control que se desea realizar en el sistema. Por ello, lo primero que debe de considerarse en la proyección de diagramas lógicos para la operación de procesos, es tener una idea clara del conjunto de funciones lógicas y operaciones en el sistema, de forma tal que se efectúe cada función lógica en dependencia correcta con las otras funciones lógicas que debe realizar el sistema, con la finalidad de tener un control adecuado del proceso.

Las secuencias o etapas de elaboración de diagramas lógicos para aplicaciones industriales, pueden resumirse de la siguiente forma:

- Etapa 1) Analizar y comprender el sistema que se desea desarrollar, de esta forma se puede identificar las secuencias lógicas individuales en el sistema.
- Etapa 2) Representar cada secuencia individual con símbolos.
- Etapa 3) Interconectar las secuencias individuales y cuando sea necesario mostrar el sistema lógico completo.
- Etapa 4) Examinar el sistema lógico completo para comprobar que pueden ser combinadas todas las funciones a fin de reducir al mínimo el número de elementos.
- Etapa 5) Revisar el diagrama lógico para evitar posibles incongruencias en las secuencias individuales y comprobar que el diagrama lógico satisface los requerimientos propuestos para el proceso.

A continuación se presentan algunos ejemplos de diagramas lógicos (que incluyen una breve descripción del sistema) de aplicación de uso común a cualquier persona y algunos otros en aplicaciones industriales.

Ejemplo 1. Iluminación de marquesina en una casa habitación.

Descripción de la operación del sistema:

En una casa habitación que tiene una marquesina con tres focos de alumbrado los cuales puede ser encendidos o apagados a través de un contacto de dos posiciones sostenidas desde la puerta de la entrada principal , en el patio de la casa o desde el interior de la sala en la planta baja de la casa habitacional.

Diagrama lógico:

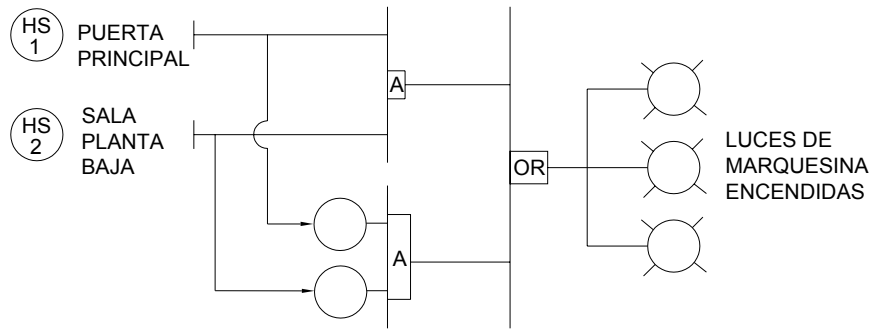
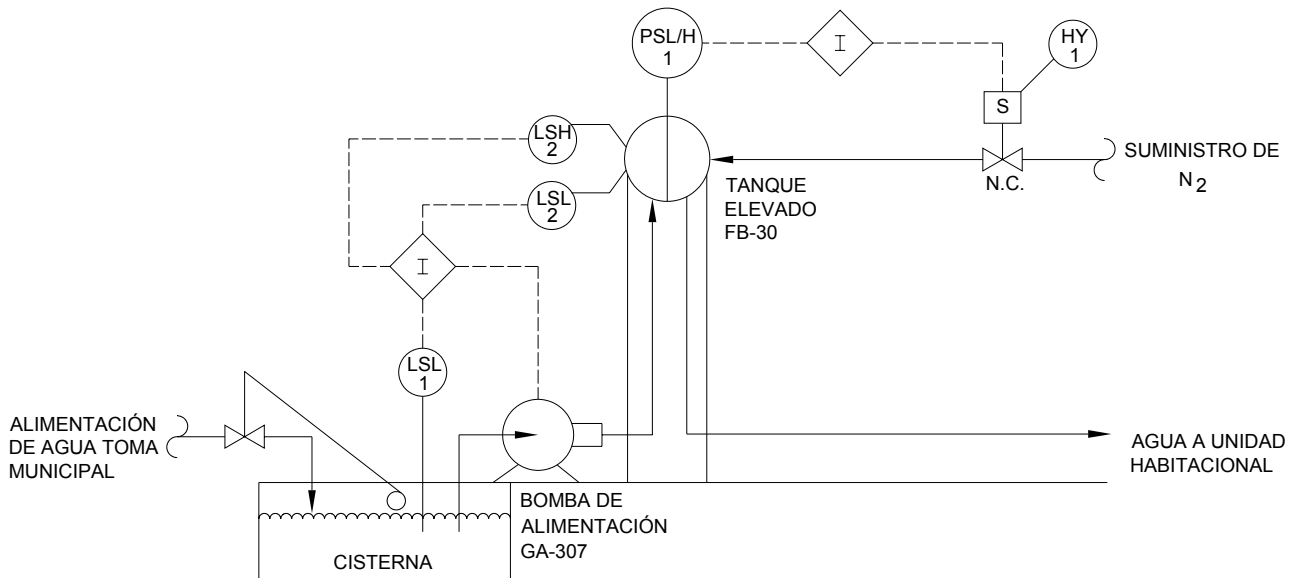


Fig. 5.2 Diagrama lógico de iluminación en marquesina.

Ejemplo 2. Sistema de suministro de agua a una unidad habitacional.

Diagrama de Control del Sistema:



Descripción de la Operación del Sistema:

- a) La bomba operara a través de un selector de 3 posiciones sostenidas: manual- fuera- automático.
- b) En posición manual, arranca o para la bomba a través de botones momentáneos.
- c) En posición fuera, la bomba queda fuera de servicio.
- d) En posición automática, la bomba opera si detecta bajo nivel en el tanque elevado y para, cuando detecta alto nivel en el tanque elevado.
- e) El suministro de nitrógeno se alimenta al tanque elevado, si se detecta baja presión y no existe bajo nivel, la alimentación de nitrógeno se bloquea cuando se alcanza alta presión en el tanque elevado.
- f) Es condición de paro predominante de la bomba, si se detecta bajo nivel en la cisterna. Cuando la bomba esta funcionando y se presenta bajo nivel en la cisterna, la bomba parara después de 5 segundos si permanece esta condición.

Diagrama lógico de los incisos a), b) y c). Operación de GA-307 por selector de 3 posiciones.

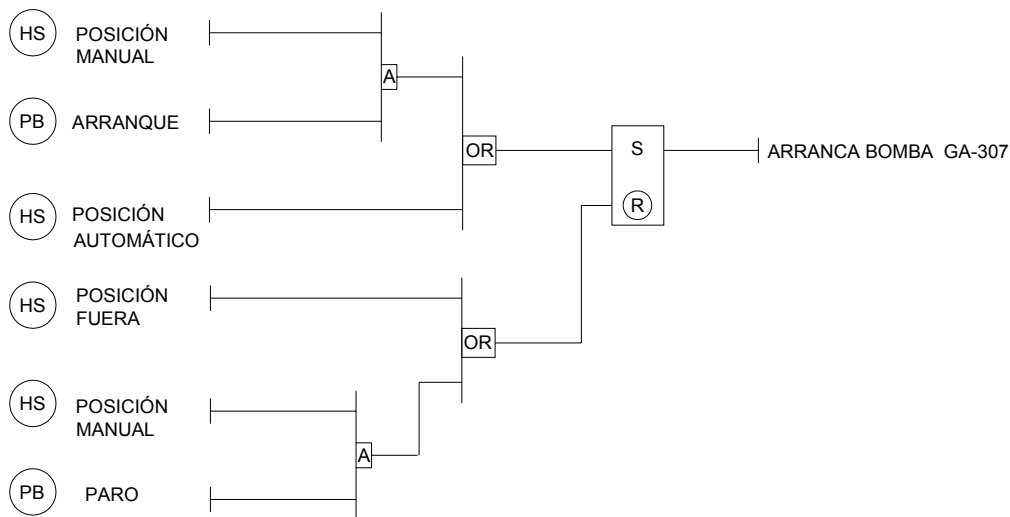


Diagrama lógico del inciso d). Posición automática de GA-307.

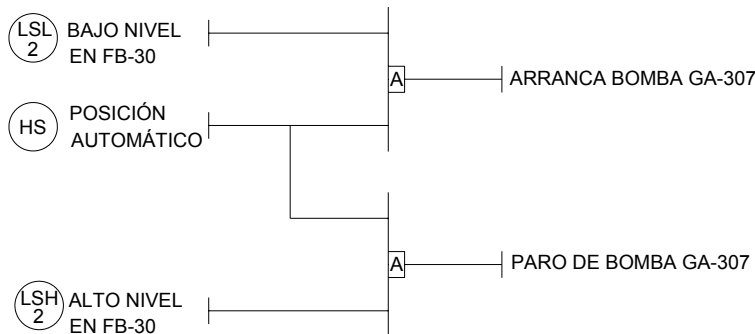


Diagrama lógico del inciso e). Suministro de Nitrógeno.

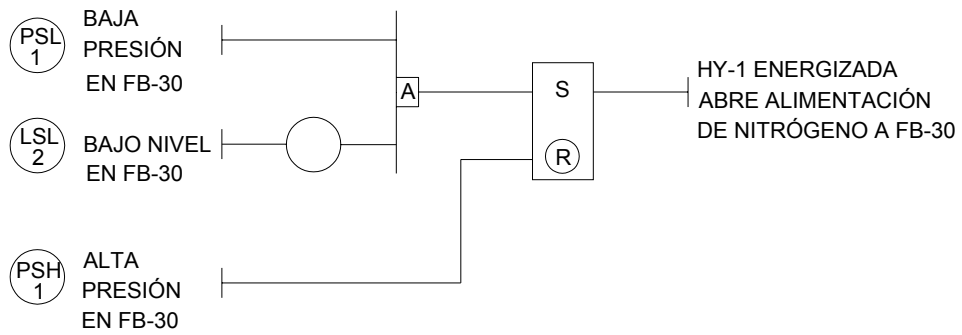
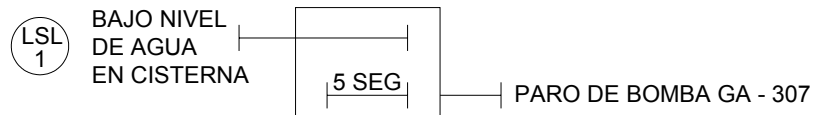


Diagrama lógico del inciso f) Operación de GA-307 con bajo nivel en cisterna.



Finalmente, se deben hacer todas las ligas correspondientes a cada una de las condiciones de proceso. Esto se muestra a continuación en la figura 5.3.

Diagrama lógico final:

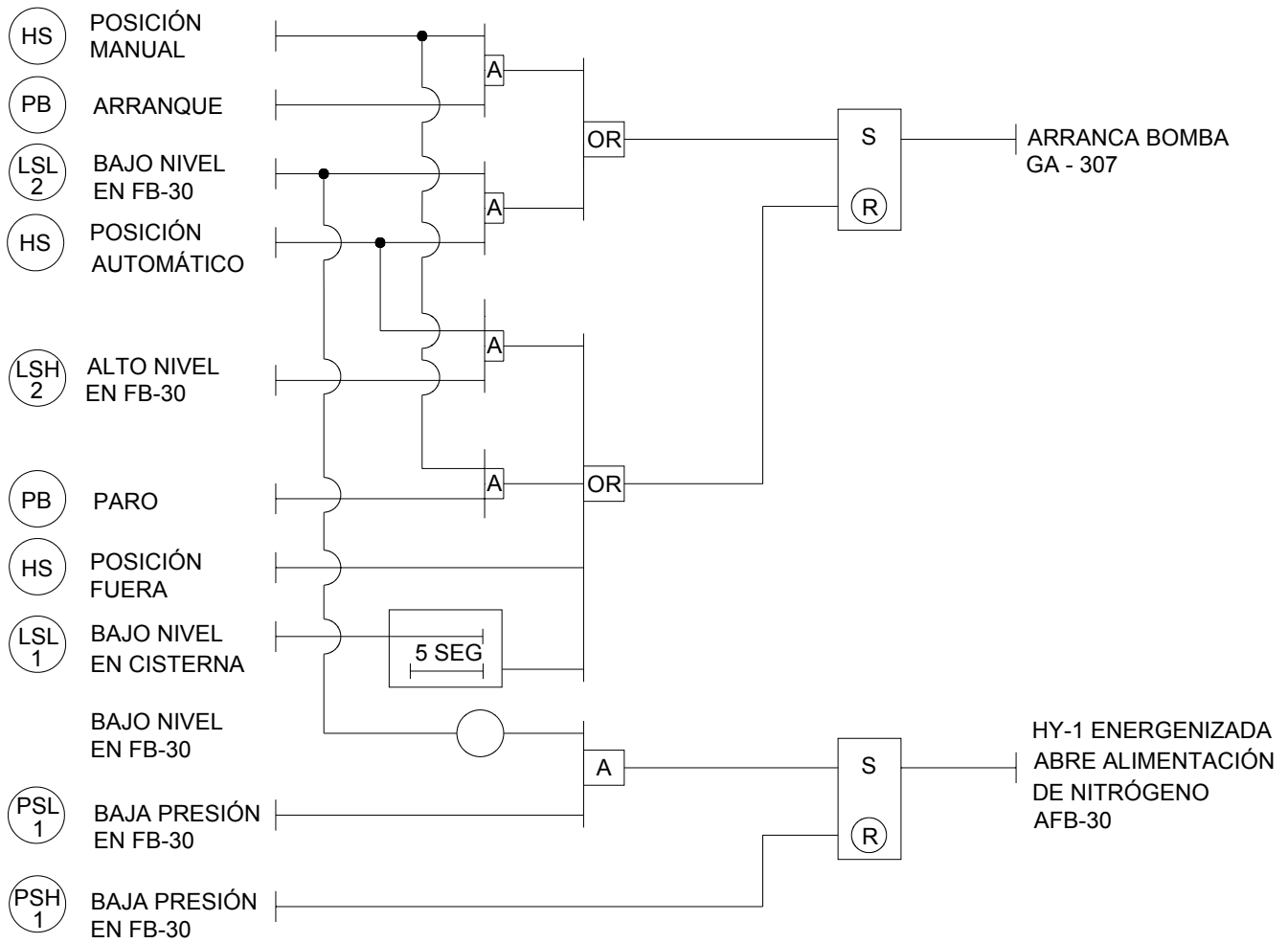
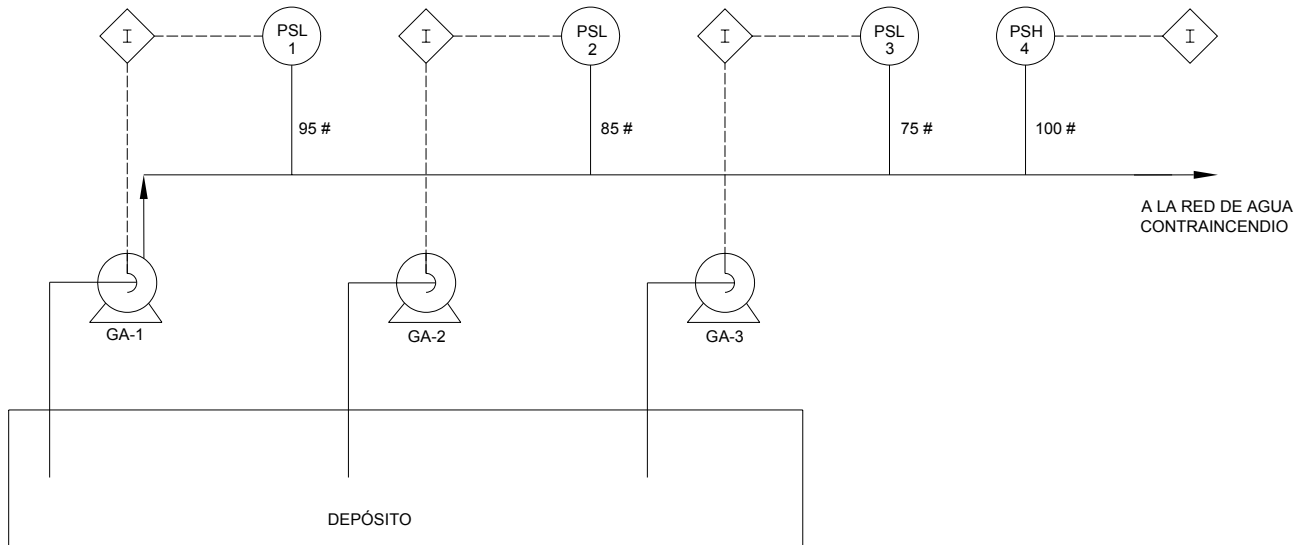


Fig. 5.3 Diagrama lógico del sistema de suministro de agua a una unidad habitacional.



### Ejemplo 3. Sistema de suministro de agua contraincendio.

Diagrama de Control del Sistema:

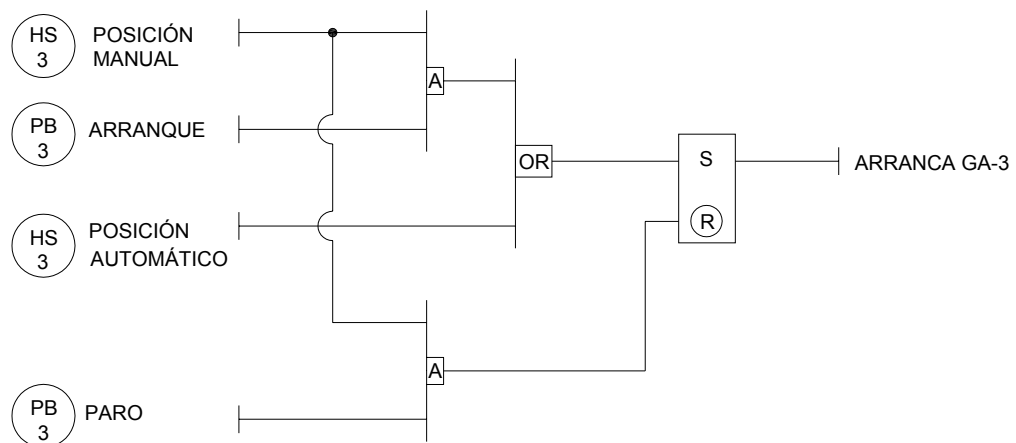
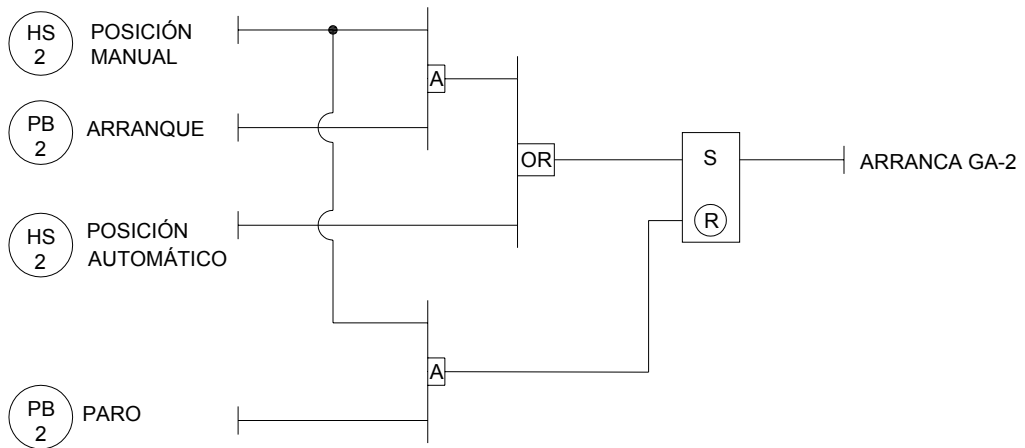
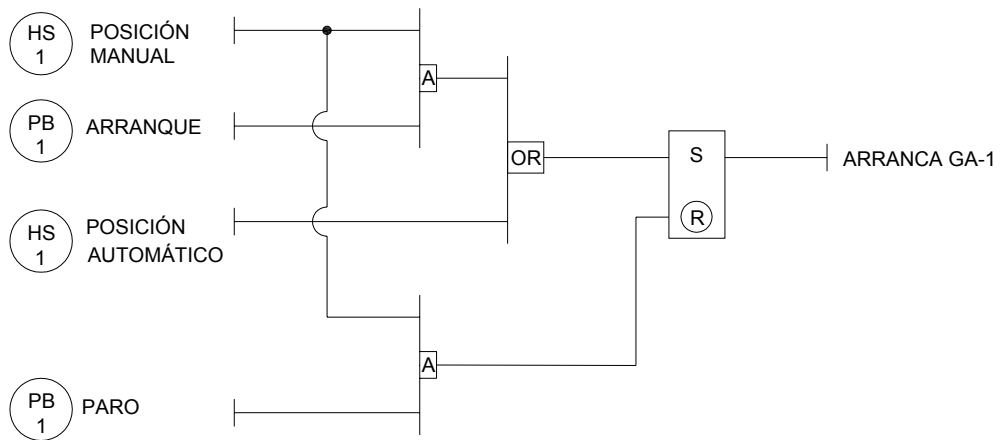


Descripción de la operación del sistema:

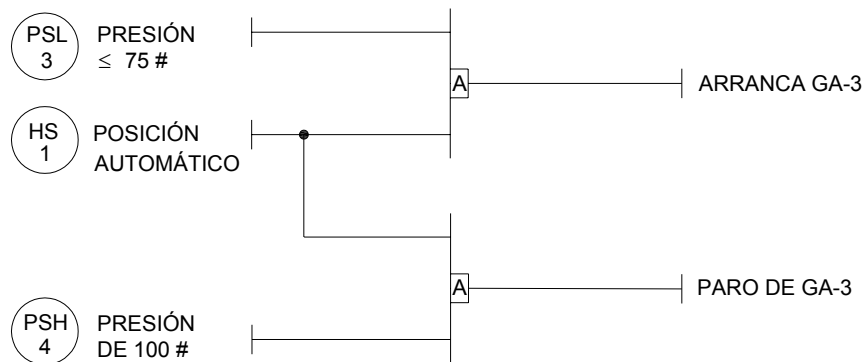
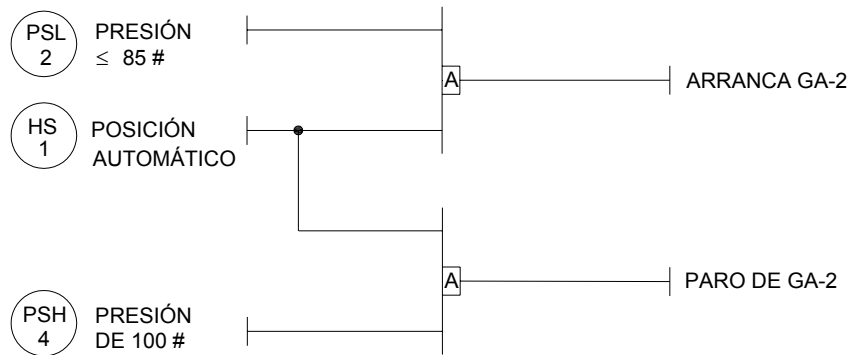
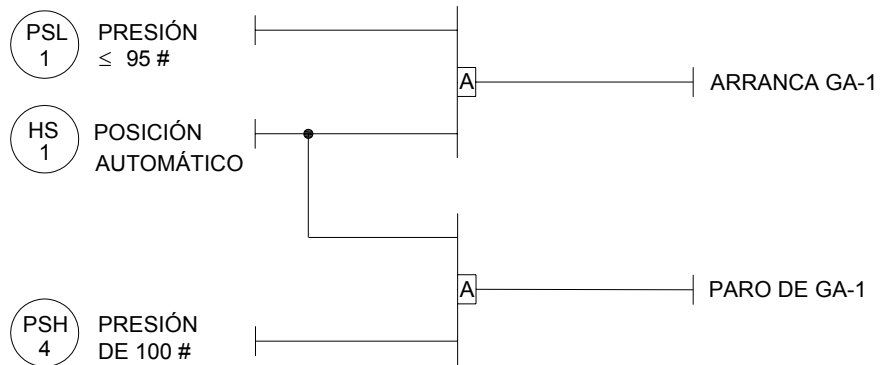
Se tiene un tren de tres bombas para mantener presurizada a 100 # una red de agua contraincendio las cuales operan de la forma siguiente:

- a) Las bombas son operadas a través de un selector sostenido de dos posiciones Manual – Automático.
- b) En la posición manual cada bomba puede ser operada por sus respectivos botones de Arranque – Paro.
- c) En la posición automática el sistema opera de la manera siguiente:
  - c-1) La bomba GA-1 arranca si se detecta una presión de 95# o menor y para, si se alcanza 100# de presión.
  - c-2) La bomba GA-2 arranca si se detecta una presión de 85# o menor y para, si se alcanza 100# de presión.
  - c-3) La bomba GA-3 arranca si se detecta una presión de 75# o menor y para, si se alcanza 100# de presión.
- d) Es condición de paro del sistema si se detecta 100# de presión en el cabezal del agua.

Diagramas lógicos de los incisos a) y b). Arranque de Bombas.



Diagramas lógicos de los incisos c) y d). Posición en Automático de Bombas.



Por lo tanto, solamente falta integrar las ligas correspondientes del proceso para obtener el diagrama final. Este es mostrado en la figura 5.4.

Diagrama lógico final:

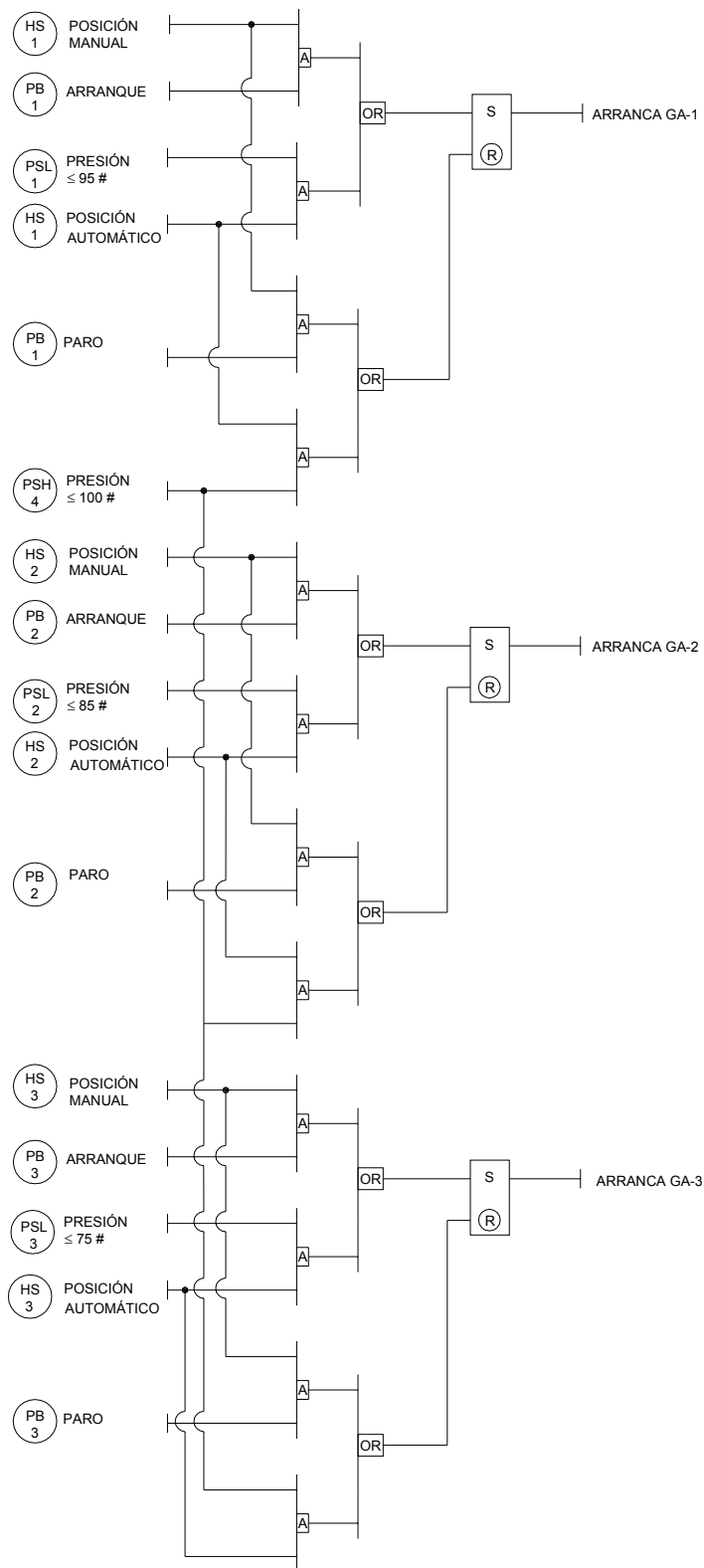
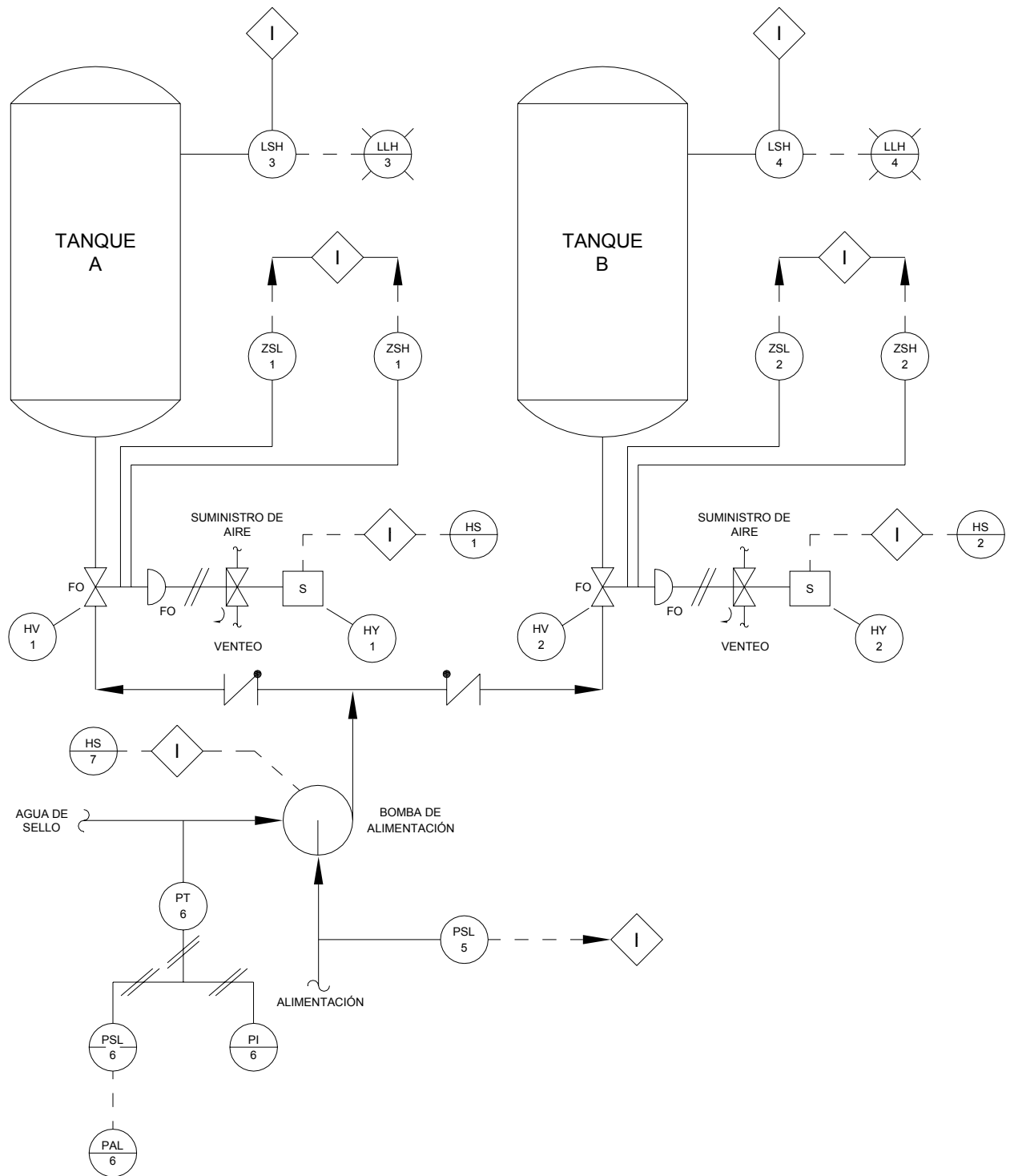


Fig. 5.4 Diagrama lógico del sistema de suministro de agua contraincendio.

Ejemplo 4. Sistema de llenado de dos tanques de proceso.



Descripción de la operación del sistema:

a) Arranque de bomba.

a-1). La alimentación es bombeada hacia el tanque A o hacia el tanque B. La bomba puede operarse en forma manual o en forma automática, de acuerdo a lo seleccionado manualmente en un selector local de salida sostenida HS-7 el cual tiene tres posiciones; dentro, fuera y automático. Cuando la bomba esta funcionando se enciende una luz piloto roja L-8A y cuando la bomba no esta funcionando se enciende una luz piloto verde L-8B.

Una vez que la bomba ha sido puesta en marcha, continua operando hasta que aparezca un comando de paro o hasta que haya una falla en el suministro de energía.

La bomba puede ponerse en marcha manualmente en cualquier momento siempre y cuando exista alguna condición anormal. La presión de succión no debe estar por debajo de cierto valor, la presión de agua de sello no debe estar por debajo de un valor mínimo. El motor de accionamiento de la bomba no debe estar sobrecargado y su arrancador debe estar restablecido.

Para que la bomba arranque automáticamente se deben cumplir todas las siguientes condiciones:

a-2). Los interruptores manuales de tablero de contacto momentáneo HS-1 y HS-2 inician la operación de llenado para los tanques A y B respectivamente. Cada interruptor tiene dos posiciones; arranque y paro. En la posición de arranque se desenergizan las válvulas de solenoides HY-1 y HY-2, al desenergizarse las válvulas de solenoide se ventean los actuadores. Despresurizandose los diafragmas de las válvulas de control HV-1 y HV-2 provocando que estas abran. Las válvulas de control tienen interruptores límite que indican si la válvula esta abierta, ZSH-1 y ZSH-2, o bien, si la válvula esta cerrada, ZSL-1 y ZSL-2.

La posición de paro de los interruptores HS-1 y HS-2 provocan la acción contraria: las válvulas solenoide energizan, los actuadores de las válvulas de control se presurizan y las válvulas de control cierran. Si se pierde la energía en el circuito de arranque, se pierde la memoria de arranque y la operación de llenado se detiene. La operación de paro manual puede bloquear la acción de inicio de llenado. Para arrancar la bomba automáticamente, cualquiera de las válvulas de control HV-1 ó HV-2 debe estar abierta y la otra cerrada dependiendo de que si el tanque A va a ser llenado o el tanque B.

a-3). La presión en la succión de la bomba debe estar por arriba de un cierto valor, esta presión es detectada por el interruptor PSL-5.

a-4). Si la válvula HV-1 esta abierta permitiendo bombear hacia el tanque A, el nivel en el tanque debe estar por debajo de un cierto valor; este nivel se detecta con el interruptor de nivel LSH-3, el cual también actúa una luz piloto LLH-3 localizada en tablero, que indica una condición de alto nivel. De manera similar el interruptor LSH-4 permite bombear hacia el tanque B si no existe alto nivel y acciona la lámpara piloto LLH-4 si existe alto nivel.

a-5). La presión de agua de sello debe ser adecuada y se muestra en el indicador de presión localizado en tablero PI-6. Esta es una condición que no esta enlazada a la operación automática y depende de la supervisión del operador antes de arrancar el sistema. El interruptor de presión PSL-6 localizado atrás del tablero acciona la alarma por baja presión PAL-6 localizada en tablero.

a-6). El motor que acciona la bomba no debe estar sobrecargado y su arrancador debe estar restablecido.

b) Paro de la bomba.

La bomba para, si se presenta alguna de las siguientes condiciones:

b-1). Si mientras se esta bombeando hacia alguno de los tanques, la válvula de control correspondiente pierde la condición de completamente abierta o si la válvula del otro tanque pierde la posición de completamente cerrada.

b-2). Si el tanque que se esta llenando en forma automática se llena.

b-3). Si la presión de succión de la bomba es baja por un tiempo mayor de 5 seg.

b-4) Si el motor de la bomba se sobrecarga. No es importante para la lógica del proceso si se retiene o no la memoria de sobrecarga del motor de la bomba bajo pérdida de energía en el sistema ya que la memoria sostenida que opera la bomba se ha definido que se pierde al perderse la energía del sistema y esto ocasionara que se pare la bomba. Sin embargo la existencia de una condición de sobrecarga no permite restablecer el arrancador del motor.

b-5). La secuencia se puede detener manualmente a través de HS-1 ó HS-2. Si existen simultáneamente las condiciones de arranque y paro, la condición de paro predomina sobre la de arranque.

b-6). La bomba podrá ser parada manualmente con el HS-7.

b-7). Si la presión de agua de sello de la bomba es baja. Esta condición no parará la bomba automáticamente si no que requiere de la intervención del operador para parar la bomba.

Diagrama lógico del inciso a-1, a-3 y a-6. Arranque de bomba.

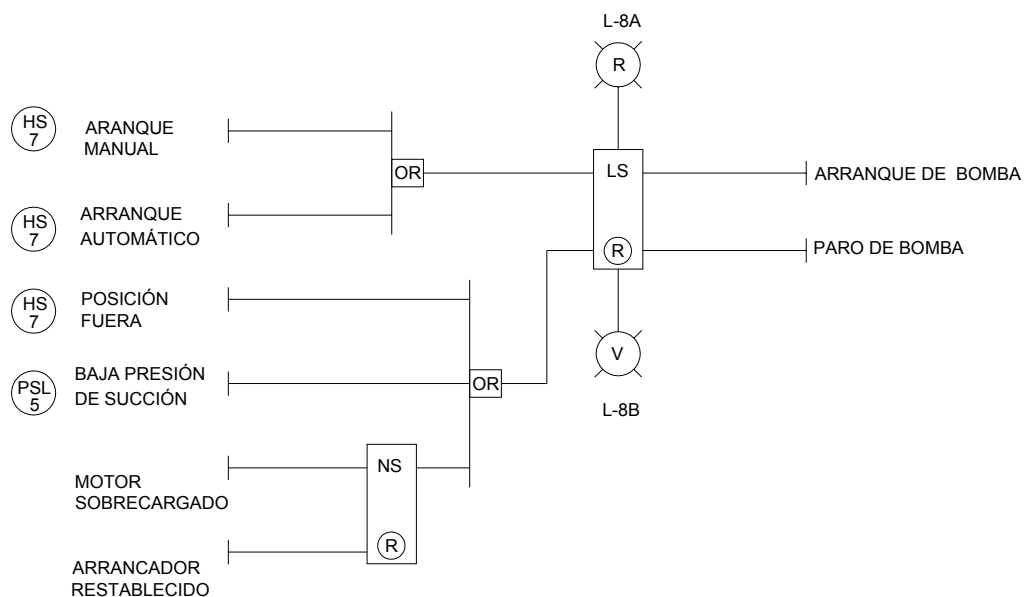


Diagrama lógico del inciso a-2. Permisivo para arranque de la bomba.

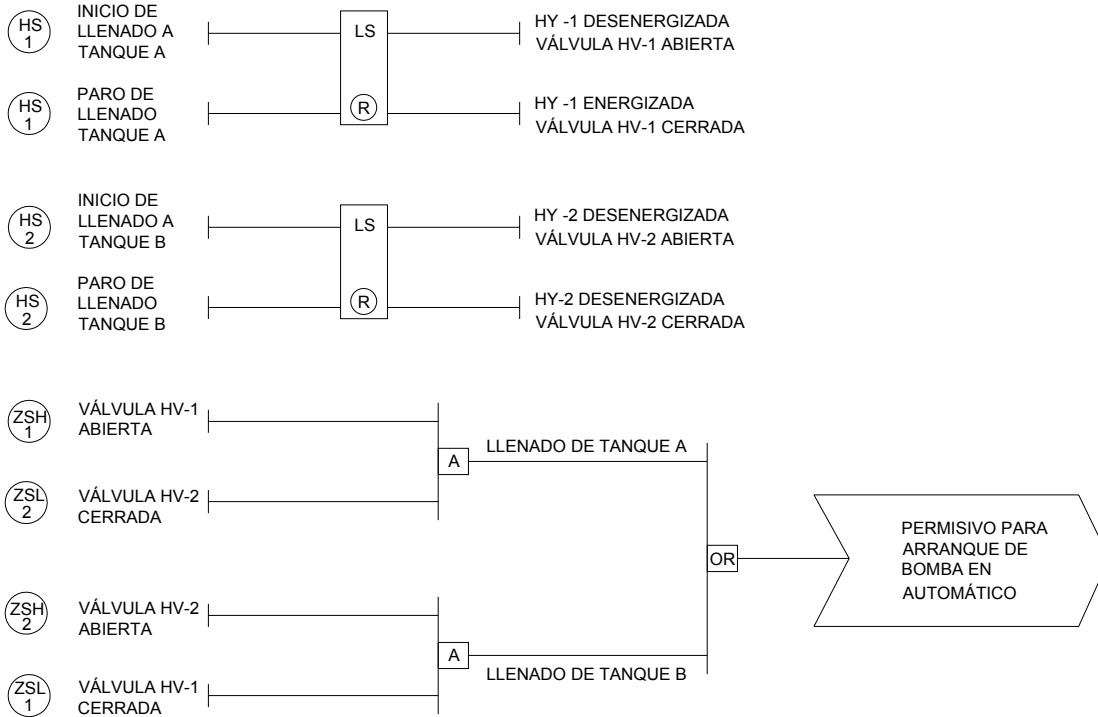


Diagrama lógico del inciso a-4. Operación en automático de la bomba.

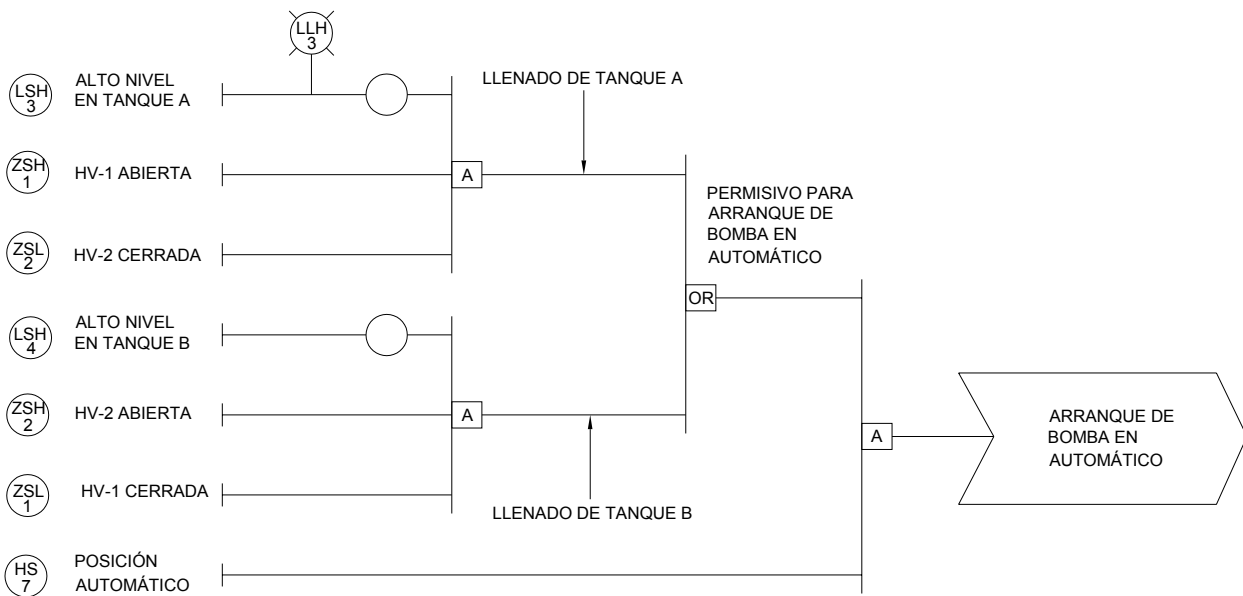


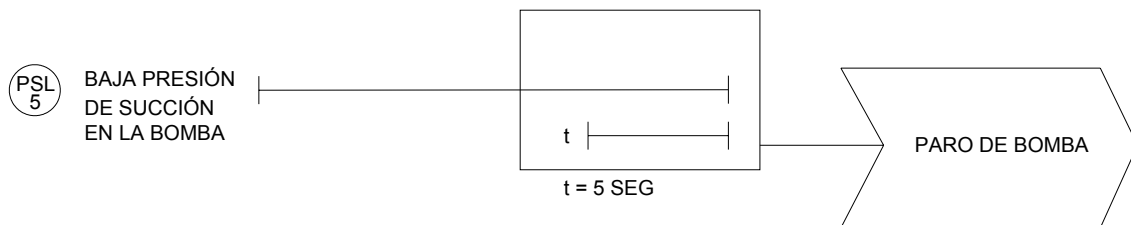


Diagrama lógico del inciso a-5. Alimentación de agua de sello.



Diagrama lógico del inciso b-3. Paro de bomba.

El permisivo para arranque de la bomba en automático será negado en caso de cumplirse los puntos considerados en los incisos b-1 y b-2.



Los inciso b-4, b-5, b-6 y b-7, fueron ya considerados en los lógicos de los incisos a-1, a-2, a-1, y a-5 respectivamente.

De esta forma, se ha logrado el análisis individual de cada secuencia, no queda más que armar todas las ligas correspondientes para obtener el diagrama lógico final. Este se muestra en la figura 5.5.

Diagrama lógico final:

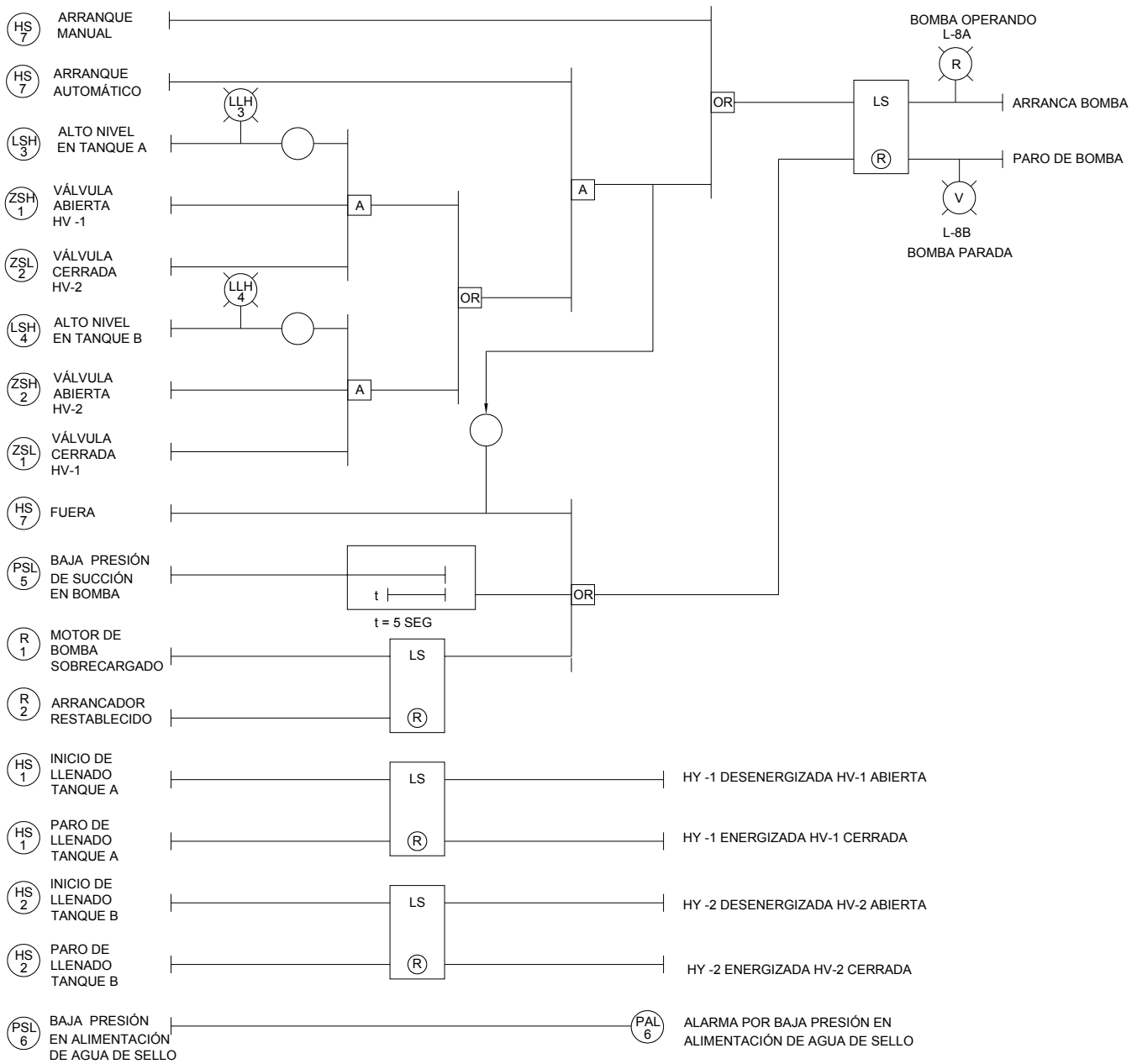


Fig. 5.5 Diagrama lógico del sistema de llenado de los tanques A y B.

## 5.2 Características del control de procesos

En sus inicios el control de procesos se llevo a cabo tan sólo en base a la intuición y a la experiencia acumulada. En estos casos el operador era realmente el “instrumento de control”, donde gracias a su juicio vigilaba la marcha del proceso en base a las características de este. Un ejemplo de esto es el proceso de horneado de un producto, donde el operador observaba el color de la llama, el humo, el tiempo transcurrido y el aspecto del producto; en tales circunstancias intervenía no sólo la experiencia del operador sino también la suerte, trayendo como consecuencia que el producto muchas veces no era obtenido en las mejores condiciones de fabricación.

Posteriormente el mercado exigió productos con mayor calidad de fabricación, lo que llevo a la búsqueda y al desarrollo de teorías que intentaran explicar analíticamente el control de procesos.

Típicamente un bucle de control consta del proceso en sí mismo, la medición y transmisión, el controlador y la válvula de control. Ver figura 5.6.

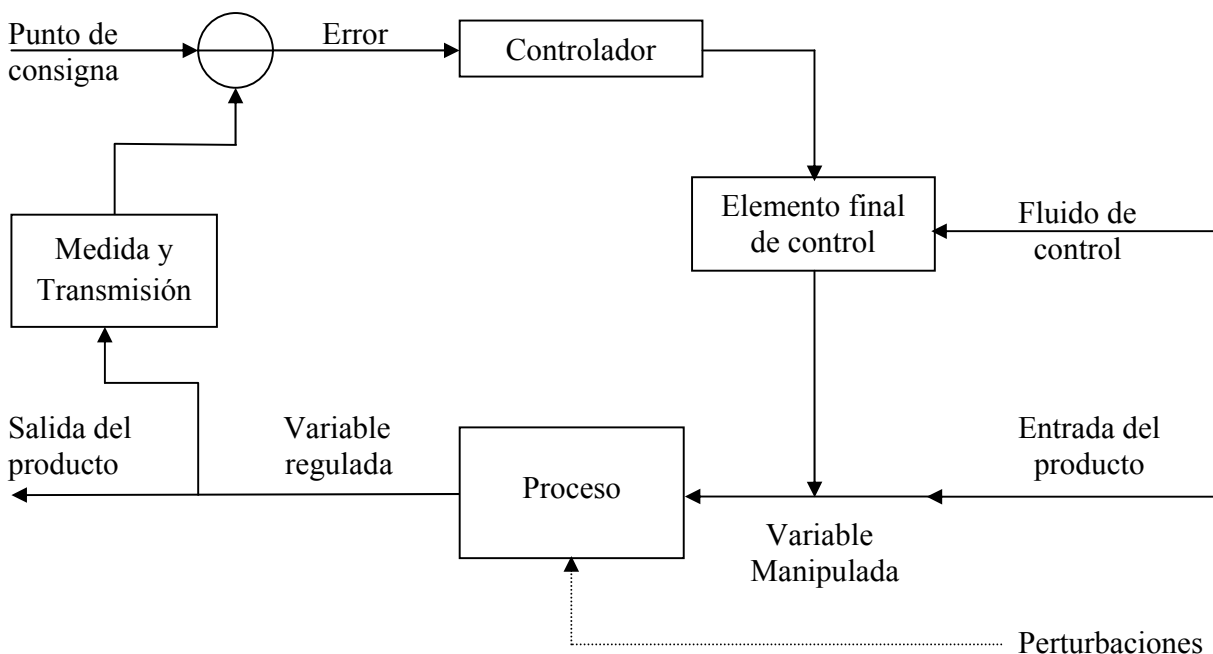


Fig. 5.6 Bucle de control con retroalimentación.

Las características de los componentes de este bucle de control son las siguientes:

- La variable regulada es la variable a mantener ó controlar dentro de un valor deseado.
- El controlador compara la variable medida con la de referencia (punto de consigna) para determinar el error.

- c) El punto de consigna es el valor que se desea que tenga la variable regulada.
- d) La variable manipulada es la que se utiliza dentro del proceso para mantener la variable regulada en el punto de ajuste.
- e) Las perturbaciones son todas aquellas causas que originan que la variable regulada salga del punto de consigna.

En la figura 5.7 la variable regulada es la temperatura. La variable manipulada es el flujo de vapor, mientras que el controlador estabiliza el funcionamiento del bucle de control. Algunas perturbaciones podrían ser que en las líneas de proceso ó de vapor exista contaminación, otra que la calidad del vapor no es la deseada, o que el fluido de proceso este contaminado, el medio ambiente, etc.

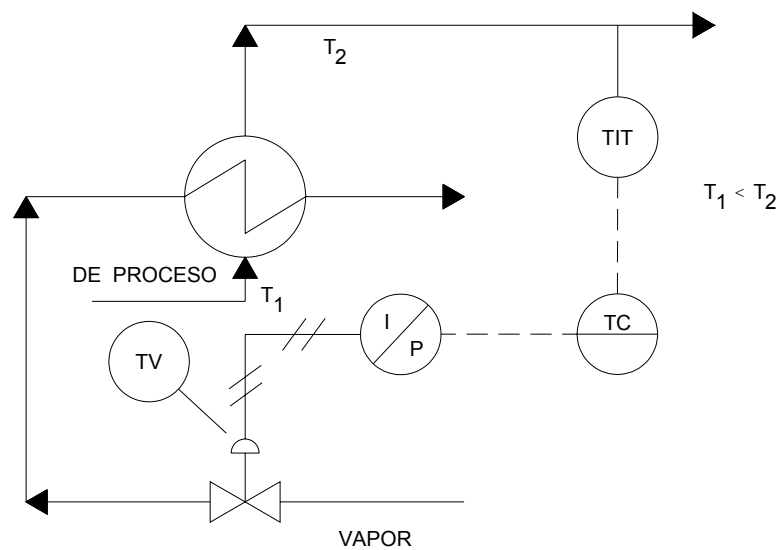


Fig. 5.7 Regulación de temperatura en un intercambiador de calor.

Los bucles de control pueden ser abiertos o cerrados. En el circuito abierto de control no existe un controlador, por lo cual no es posible que se realice una comparación entre el valor medido y el deseado, para determinar una acción de control. Un ejemplo de esto es el calentamiento de agua en un tanque mediante una resistencia eléctrica.

Un circuito o bucle cerrado de control es un sistema con retroalimentación dado que si se lleva a efecto una comparación entre resultados, es decir una serie de operaciones de medida, comparación, cálculo y corrección constituyendo una cadena cerrada de acciones.

El conjunto de elementos en un circuito cerrado que hacen posible el control, reciben el nombre de lazo de control (loop control).

## 5.3 Sistemas de Control Neumáticos y Eléctricos

Imaginemos que un operador regula el flujo de vapor manipulando una válvula en un intercambiador de calor, para calentar una corriente de proceso. Esto puede hacerse de distintas maneras:

- a) Puede cerrar ó abrir casi instantáneamente (en la medida de lo posible) la válvula.
- b) Puede cerrar ó abrir la válvula lentamente, más lentamente aún, ó a una velocidad constante mientras la desviación exista. (suponiendo que pueda conocer cuando se presenta dicha desviación y en que magnitud).
- c) Puede abrir la válvula en mayor grado si la desviación es más rápida.
- d) Puede abrir la válvula un número de vueltas constante por cada unidad de desviación.

En los sistemas industriales de control, al igual que este operador, puede emplearse otros métodos complementarios, o una combinación de los incisos anteriores, es decir se emplea uno ó una conjunción de los siguientes sistemas de control:

- a) Dos posiciones (todo-nada).
- b) Proporcional de tiempo variable.
- c) Flotante.
- d) Proporcional.
- e) Proporcional + Integral.
- f) Proporcional + Derivativo.
- g) Proporcional + Integral + Derivativo.

### 5.3.1 Control todo-nada

En este sistema el elemento final de control se mueve rápidamente sólo entre una de dos posiciones: abierta ó cerrada para un único valor de la variable regulada. En este caso se presenta una banda diferencial o zona muerta en la que el elemento final de control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial.

La gráfica de la figura 5.8 muestra la operación de una válvula de control que regula el flujo de vapor en un intercambiador de calor. La temperatura mostrada es la de la corriente de proceso.

Como puede observarse, ajuste en el sistema de control consiste en variar únicamente el punto de consigna.

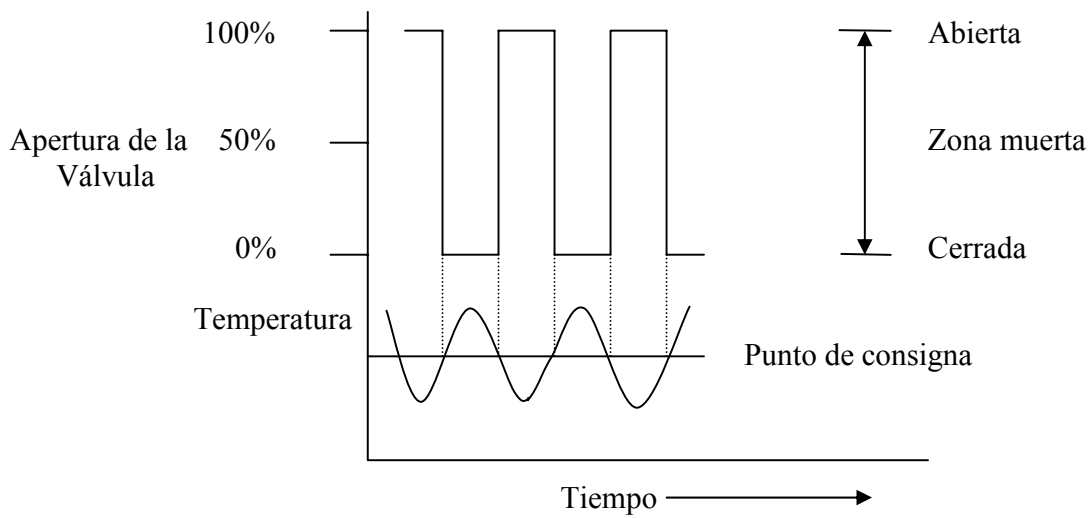


Fig. 5.8 Control todo-nada.

Resulta claro que, en estas condiciones la variable controlada oscila continuamente y esto será proporcional en frecuencia y en magnitud según se presenten los cambios de carga en el proceso (esto es la cantidad total del fluido ó agente de control que el proceso requiere en cualquier momento para mantener la variable controlada en el punto de ajuste). El sistema de control todo-nada es satisfactorio si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta.

En sus inicios y considerando que la instrumentación con transmisión a salas de control centralizadas, se desarrollo a instancias principalmente de la industria petroquímica, con el problema de atmósfera con peligro de explosión, la instrumentación por lo tanto era neumática.

Después, con los perfeccionamientos que se fueron dando en la electrónica por un lado y el desarrollo de las técnicas de protección y seguridad en áreas peligrosas por el otro, se fue introduciendo la instrumentación electrónica, la cual dio paso a la electrónica digital y esta a su vez, a la última empleada en la actualidad, la digital, que manipula una gran cantidad de información con ajustes en tiempo real.

Sin embargo, en instalaciones pequeñas la instrumentación neumática es una buena decisión por su sencillez, facilidad de instalación y sin problemas de explosión.

Aun y que en la actualidad existan controladores digitales dotados de un microprocesador, la señal neumática sigue utilizándose, ya que el 90% de las válvulas empleadas en la industria son accionadas neumáticamente.

Aunque desde luego, los controladores neumáticos hoy en día, están prácticamente en desuso, el control por señal neumática fue muy importante en su momento por las razones antes explicadas.

Los controladores neumáticos son sistemas que aunque parezcan simples, son muy ingeniosos y efectivos.

Estos pueden ser instalados en áreas peligrosas y tiene la capacidad de seguir funcionando aunque falle la alimentación eléctrica, en tanto exista aire en los cabezales de distribución de alimentación neumática en la planta.

El aire para instrumentos debe ser seco y limpio, la alimentación es típicamente a través de un filtro a una presión de 20 psi.

La figura 5.9 muestra un controlador neumático típico de control de dos posiciones (control todo-nada). Los controladores neumáticos pueden ser empleados además en los sistemas de control proporcional, proporcional + integral, proporcional + derivativo y proporcional + integral + derivativo.

Hacia el orificio se proporciona aire de suministro de forma continua. Cuando la pluma del elemento de medición se desvía del punto de ajuste, una chapaleta que es actuada por un dispositivo detector, cubre o descubre el orificio. Al aumentar la variable regulada se provoca que la chapaleta se mueva hacia el orificio y se produzca un incremento de presión entre la restricción y el orificio.

Esta presión es transmitida hacia una válvula piloto (relevador neumático) haciendo que este se abra, enviando toda la presión de aire a la válvula de control.

Las válvulas de control se pueden ajustar de manera que a falla de aire, abra o cierre, dependiendo de que tipo de acciones de seguridad se asuman, se elegirá por una u otra opción.

Por su parte la válvula piloto desempeña una función valiosa, pues transmite con muy poco retraso toda la presión de aire al diafragma de la válvula de control, lográndose un proceso más efectivo con esto que el utilizar una conexión directa entre la línea del orificio y la válvula de control.

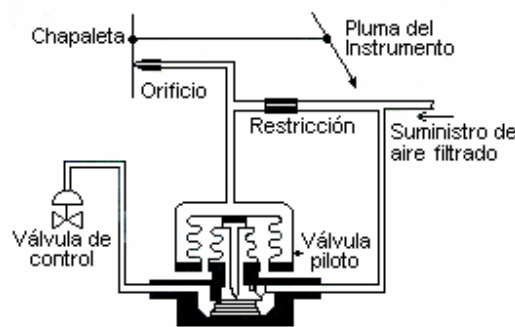


Fig. 5.9 Control neumático de dos posiciones.

En lo que refiere a los circuitos eléctricos las acciones de control son posibles gracias al empleo del servomotor. El servomotor es un motor eléctrico que es acoplado al vástago de la válvula a través de un tren de engranajes. Para el control todo-nada el tiempo de carrera total de la válvula es normalmente de 1 minuto y el motor utilizado es unidireccional (la válvula si abre, no puede pasar a un estado de cierre si no abre primero totalmente y viceversa). Además de su empleo en el control de dos posiciones, también es posible implementarse su uso en el control flotante y el proporcional básicamente.

### 5.3.2 Control flotante

Es una forma especial del sistema todo-nada; el control flotante (fig. 5.10) en realidad llamado control flotante con velocidad constante, se caracteriza porque el elemento final de control se mueve a una velocidad constante, independientemente de la desviación.

Acoplado una válvula motorizada (servomotor) reversible de baja velocidad a un control todo-nada con zona muerta, se obtiene un control flotante. La válvula permanece sin movimiento si la variable regulada queda dentro de la zona muerta, cuando es rebasada, la válvula se mueve en la dirección adecuada hasta que la variable vuelve a caer dentro de la zona muerta, pudiendo llegar la válvula incluso hasta su posición de cerrada o abierta.

El motor eléctrico es bidireccional con interruptores de fin de carrera, el interruptor del controlador flota entre dos contactos de accionamiento. El motor gira a derecha o a izquierda según si el controlador cierra el contacto correspondiente y para si el controlador no cierra ninguno de los dos contactos, o cuando llega al fin de la carrera. El tiempo de carrera total es variable y dependerá de la velocidad del motor.

De la misma forma que en el control todo-nada, el control flotante de velocidad constante, presenta una tendencia a producir oscilaciones en la variable regulada, no obstante, esto puede minimizarse eligiendo adecuadamente la velocidad del elemento final de control.

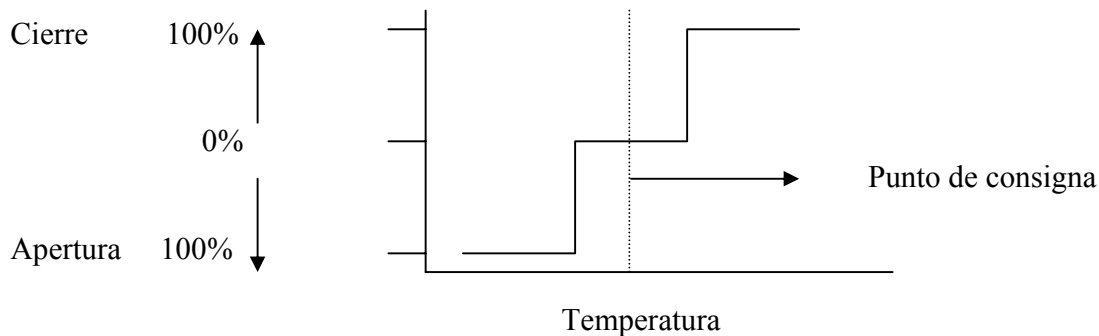


Fig. 5.10 Control flotante.

La válvula debe moverse a una velocidad lo suficientemente rápida para mantener la variable lo más pronto posible ante los más rápidos cambios de carga que presente el proceso. La principal ventaja del control flotante es que es capaz de compensar los cambios de carga lentos del proceso, moviendo gradualmente la posición de la válvula, aunque si los cambios de carga son muy rápidos, aún y que sean pequeños, el control flotante no es adecuado.



### 5.3.3 Control proporcional

En este sistema de control existe una posición proporcional ó una dependencia lineal entre el valor de la variable regulada y la posición de la válvula de control (carrera de la válvula), esto es, la válvula se mueve un porcentaje igual por una misma unidad de desviación, tal como se muestra en la figura 5.11.

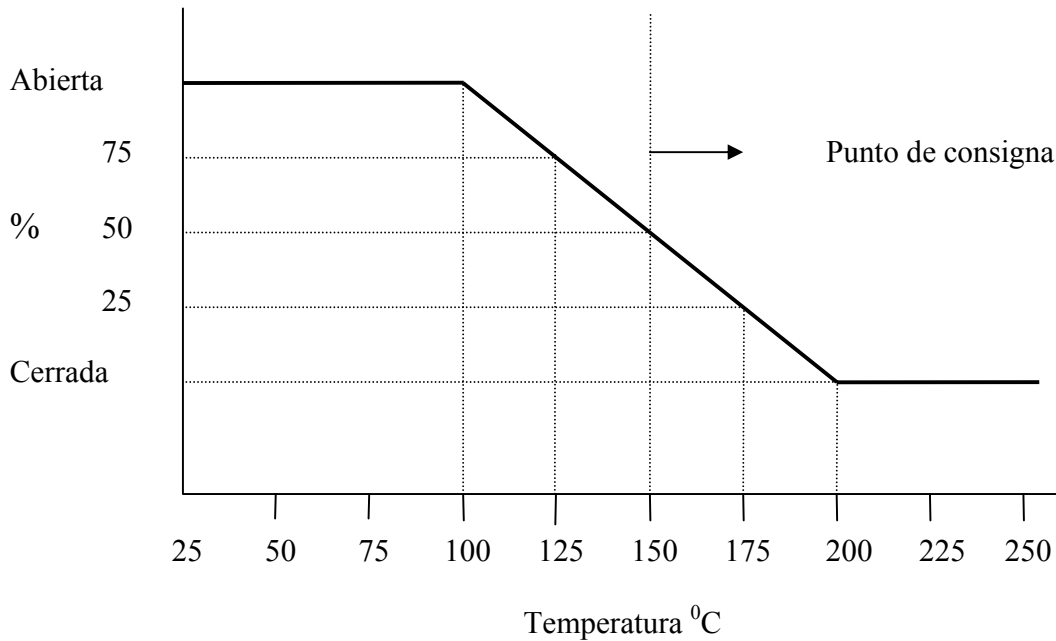


Fig. 5.11 Control proporcional.

La figura 5.11 ejemplifica una válvula de control que alimenta vapor en un intercambiador de calor, por donde pasará una corriente de proceso que requiere ser calentada.

Se necesitan 25 °C de cambio para provocar una carrera de la válvula de un 25%. El punto de consigna es de 150 °C y requiere un 50% de apertura de la válvula.

Consideremos ahora que el mismo intercambiador de calor de la gráfica tiene que responder ante un cambio de carga en el proceso, este se caracteriza por una mayor demanda en el consumo de la corriente de proceso debido a una apertura simultánea de las válvulas de consumo.

Al momento de presentarse el cambio de carga, la temperatura de la corriente de proceso que sale del intercambiador de calor disminuye considerablemente del punto de ajuste, a lo que la válvula responde dando una mayor apertura (para incrementar el flujo de vapor) y corregir el error intentando colocar la variable regulada rápidamente al punto de ajuste (150 °C) ; sin embargo, si el cambio de carga permanece constante durante un mayor tiempo que el de respuesta de la válvula, ¿podrá el sistema ajustar la desviación hasta lograr los 150 °C nuevamente en la corriente de salida del intercambiador?.

Definitivamente no; pues si esto ocurriera, la válvula tendría que cerrar proporcionalmente hasta el punto de ajuste, lo cual es absurdo, porque entonces el sistema no funciona en lo absoluto, pues si corrigiera siempre hasta el punto de ajuste al presentarse una desviación, entonces sencillamente no respondería ante los cambios de carga. Dicho en otras palabras, tiene que responder ante los cambios de carga y al mismo tiempo ajustar la desviación de la variable regulada en  $150^{\circ}\text{C}$ , pero por el diseño mismo del control proporcional, resulta imposible hacer las dos cosas al mismo tiempo.

Lo que en realidad pasa en estos casos, es que la válvula responde ante los cambios de carga dando una mayor apertura, pero esta última oscila entre la posición de la válvula en el punto de ajuste y la mayor apertura de la válvula originada por el cambio de carga. Esta posición provoca que como resultado de esto, la temperatura de la corriente de salida oscila en un intervalo menor al punto de ajuste; después de esto, la posición de la válvula se estabiliza al igual que la temperatura, sólo que esta se logra estabilizar a un valor menor a  $150^{\circ}\text{C}$ , por decir algo, a los  $140^{\circ}\text{C}$ .

Esta diferencia se conoce como el “offset” (desplazamiento, desviación) en un sistema de control proporcional y es un error constante cada vez que se presente un cambio de carga en el proceso. La única forma de volver a estabilizar el controlador, es reajustando manualmente el punto de consigna. La figura 5.12 muestra el offset para el ejemplo anteriormente descrito.

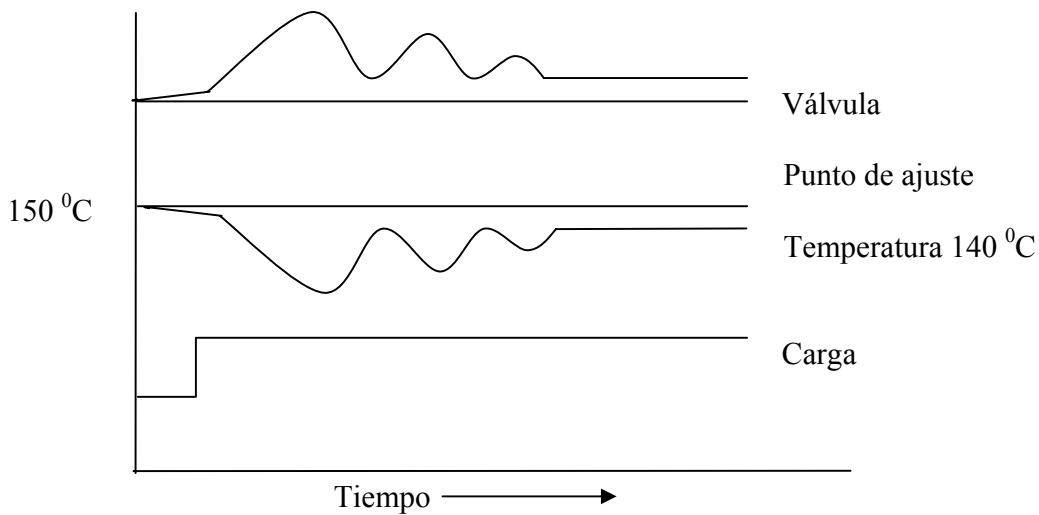


Fig. 5.12 Offset en el sistema de control proporcional.

Para el controlador neumático, el control proporcional (fig. 5.13) se logra diseñando una unidad a forma de poder variar, en toda la escala de la variable regulada, el porcentaje de cambio requerido para abrir ó cerrar la válvula de control.

A este porcentaje se le conoce como “banda proporcional”. El mecanismo de un controlador de banda proporcional es semejante al del control todo-nada, sólo que en este caso la presión de aire de la válvula de control es aplicada hacia un fuelle estrangulador cuyo movimiento contrarresta al movimiento original de la chapaleta.

El movimiento neto final de la chapaleta está gobernado por la posición de la banda proporcional, la cual puede modificarse manualmente. Las bandas anchas producen movimientos pequeños de la chapaleta, por consiguiente también produce cambios menores en la presión de la válvula de control.

El sistema de control proporcional produce sobre la válvula de control una acción estranguladora más que un movimiento de cierre y apertura total.

La presión de aire de la válvula de control es proporcional a la posición de la pluma, por lo que existe una posición determinada de la válvula de control dentro de un rango de la indicación de la pluma.

Los cambios en la variable regulada lograrán que la válvula abra ó cierre, regresando de esta forma al sistema a su punto de control original, considerando desde luego la desviación permanente que existe en el control proporcional. Pues aunque exista una relación permanente entre la posición de la pluma y la presión de aire en la válvula, en los casos de cambio de carga frecuentes, esta relación tendrá que ajustarse manualmente.

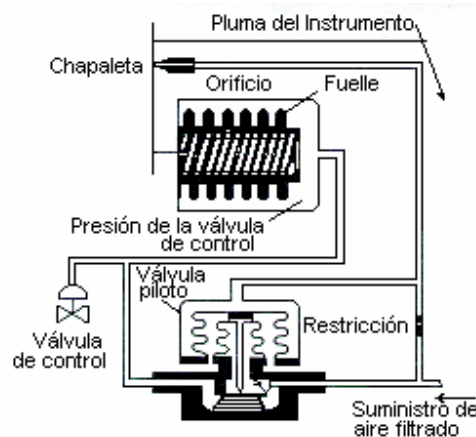


Fig. 5.13 Control neumático proporcional.

Para el control eléctrico proporcional, el circuito está formado por un potenciómetro (el potenciómetro es instrumento más preciso para medir una fuerza electromotriz, mide esta magnitud al compararla con una fuerza electromotriz variable y de valor conocido, opuesta a la que se quiere medir; es un divisor de tensión ajustable, formado por un reóstato de tres terminales, una de las cuales es móvil) de equilibrio, un relé (el relé es un conmutador eléctrico especializado que permite controlar un dispositivo de gran potencia mediante un dispositivo de potencia mucho menor; un relé está formado por un electroimán y unos contactos conmutadores mecánicos que son impulsados por el electroimán; este requiere una corriente de sólo unos cientos de miliamperios generada por una tensión de sólo unos voltios, mientras que los contactos pueden estar sometidos a una tensión de cientos de voltios y soportar el paso de decenas de amperios; por lo tanto, el conmutador permite que una corriente y tensión pequeñas controlen una corriente y tensión mayores) de equilibrio y un motor bidireccional (que en sí mismo lleva un potenciómetro para su funcionamiento). El potenciómetro de equilibrio es el controlador, este posee un brazo móvil que se mueve de acuerdo con el valor de la variable de proceso.

No obstante, la función principal la realiza el relé de equilibrio. Este es un dispositivo con una armadura ligera en forma de U que pivota en su centro entre dos bobinados de control. Posee una lámina en contacto móvil que flota entre dos contactos fijos conectados a las bobinas del motor a través de dos interruptores de fin de carrera. En tanto que las dos posiciones de los brazos móviles de los potenciómetros, tanto el del controlador como el del motor coinciden, la corriente que fluye entre los dos bobinados de control es la misma y la armadura del relé de equilibrio permanece neutra. En cambio, si existe una variación de señal en la salida del potenciómetro del controlador, entonces el brazo móvil que posee cambia de posición variando la corriente de paso entre los dos bobinados de control, por lo que la armadura y el contacto móvil del relé de equilibrio cierra el circuito de excitación de uno de los dos bobinados del motor, girando entonces en el sentido correspondiente, hasta que la posición del brazo móvil de su potenciómetro se corresponde con la posición del brazo móvil del potenciómetro del controlador.

El tiempo de recorrido del vástago puede ser de 15 segundos a 4 minutos, desarrollando un par considerablemente grande. La alimentación de esta clase de motores es normalmente con corriente alterna, aunque también el motor puede ser de alimentación con corriente continua.

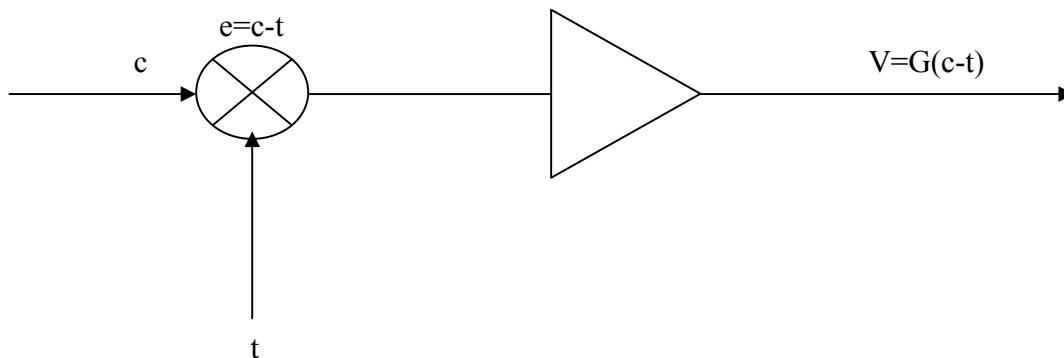
Esta clase de controladores eléctricos son mayormente adecuados en servicios intermitentes, ya que cuando las características del control exigen una modulación continua de la posición de la servoválvula, el motor y el relé de equilibrio quedan sometidos a mucho desgaste, por lo que la vida útil de servicio es acortada considerablemente. En tal caso, es recomendable el uso de servomotores de corriente continua a base de tiristores, aunque estos son empleados en el control electrónico.

### **5.3.4 Control proporcional + integral**

El desarrollo de los primeros controladores neumáticos fue sólo en base a la observación. Los primeros diseñadores de controladores ajustaban estos en campo fundamentándose en empirismos, buscando que el controlador respondiera de acuerdo a sus primeras observaciones. De hecho, todo este proceso se dio antes que naciera la propia teoría del control, que supone en muchos casos un amplio aparato matemático.

Consideremos que por una línea de proceso pasa un fluido el cual debe de tener un gasto de 10 l/seg constante. Se instala un medidor de flujo en la línea con el objeto de medir y generar una señal proporcional al caudal que realmente este pasando. Esta señal se transmite a un controlador. El controlador posee un dial el cual se ajusta manualmente al punto de consigna de 10 l/seg. En un momento dado pasan 14 l/seg; lo que primero hace el controlador es comparar este valor con el referencia y comprueba que están pasando 4 l/seg de mas, entonces debe proceder a cerrar la válvula ligeramente para restringir el flujo a sólo 10 l/seg; pero es aquí donde comienza el problema de la teoría clásica de control: ¿qué señal deberá mandar el controlador a la válvula para que el flujo disminuya de forma razonablemente de rápida y segura, de 14 l/seg a 10 l/seg?.

La primer observación que se hizo, fue que para bajar de 14 a 10 l/seg, o sea eliminar un error de 4 l/seg, la señal que el controlador debía de mandar a la válvula, es del doble que la necesaria para eliminar un error de 2 l/seg; es decir, la señal de salida del controlador debe de ser “proporcional” al error; entonces nace el controlador proporcional. El siguiente esquema muestra la operación de un controlador proporcional:



Donde:

$c$  = Punto de consigna

$e$  = Error (diferencia entre el valor de la variable regulada y el punto de ajuste)

$t$  = Señal procedente del transmisor

$V$  = Señal de corrección enviada a la válvula

$G$  = Tamaño de la relación entre la señal de entrada y la señal de salida

El signo de la diferencia entre el punto de ajuste y la señal procedente del transmisor únicamente indicara si la válvula debe abrir si el signo es positivo o cerrar si el signo es negativo, en este caso  $e = 10 - 14 = -4$ , lo que indica que están pasando 4 l/seg de más, por lo que la válvula debe cerrar para reducir esos 4 l/seg. Sin embargo, como puede observarse, el número -4 indica en realidad que hay un excedente en el gasto volumétrico de + 4 l/seg, y si pasarán 6 l/seg en vez de 14 l/seg, entonces  $e = 10 - 6 = 4$ , lo que indica que existe un decremento de -4 l/seg con respecto al punto de consigna. Por lo que el número resultante de la diferencia entre  $(c-t)$ , se manejara positivo en la ecuación  $V = G(c-t)$ , en caso de ser matemáticamente negativo y viceversa.

Por su parte, la constante de proporción  $G$  es conocida como la “ganancia del controlador”, esta es ajustada en campo y se busca que sea lo suficientemente efectiva para que la señal enviada a la válvula corrija el error rápidamente, pero no tan rápidamente que provoque un comportamiento inestable.

Después se observó también que si la constante  $G$  del controlador es muy alta, por ejemplo de 3, la señal que enviaría a la válvula del ejemplo prototipo sería:  $V = 3e = 3(10 - 14) = 3(4) = 12$  l/seg (nótese el criterio del signo anteriormente explicado), por lo que la válvula debe cerrar. Sin embargo, con esta señal tan elevada, la válvula cierra demasiado y el flujo pasa de 12 l/seg a  $V = 3(10 - 12) = 3(2) = 6$  l/seg en vez de los 10 l/seg que se esperaban. Ante esto, el controlador vuelve a detectar un error:  $(10 - 6) = 4$ , entonces se vuelve a enviar una señal a la válvula de  $3e = (3)(-4) = -12$  (nótese nuevamente el criterio del signo), con lo cual la válvula ahora abre excesivamente y el caudal vuelve a aumentar a 12 l/seg y nuevamente volver a reducirse a 6 l/seg. Esta situación podría prolongarse mucho tiempo sin ser resuelta, a lo cual se le conoce con el término de inestabilidad y mientras más grande sea  $G$  más fácil es que se dé esta situación.

Reuniendo todas estas observaciones, los diseñadores pudieron fabricar un controlador proporcional que enviara una señal adecuada a la válvula para evitar en mayor grado la inestabilidad en el sistema. Sin embargo, a pesar de que este controlador fuera muy efectivo, nunca logró reducir por completo el error (ya expuesto anteriormente como el offset) en el proceso, siempre quedaba una desviación permanente, y es que cuando el error era tan pequeño, la salida del controlador ( $G$ ) también lo era y no tenía la “suficiente fuerza” para llevar a la válvula a la posición de ajuste.

Es decir, el controlador proporcional provee los ajustes necesarios pero son insuficientes. Por lo cual ahora era necesario manejar ese error de forma independiente al principio pero que tuviera al final un impacto global en todo el sistema.

Lo que se pensó fue lo siguiente: si el error era tan pequeño por ejemplo de 0.1 (10%) y en el tiempo constante, integrándolo en un intervalo de tiempo que estuviera presente el error, la salida del controlador aumentaría y en consecuencia el error ahora podría ser eliminado. De esta forma, nació el controlador proporcional + integral (PI), producto de las limitaciones del propio controlador proporcional.

La acción del controlador proporcional + integral puede verse fácilmente. Si el error que es de 0.1 se mantiene durante un tiempo de 100 segundos, integrándolo se tiene:

$$\int_0^{100} e dt = 100(0.1G) = 10 G$$

Por lo que la “ganancia” del controlador es mucho mayor. Los 100 segundos de tiempo corresponden a lo que se conoce como el “tiempo de acción integral” y durante ese tiempo el controlador eliminará el offset de la parte proporcional y reajustará el valor de la variable regulada al punto de ajuste.

La ecuación general para el controlador proporcional + integral es la siguiente:

$$V = Pe + PI \int_0^t e dt + Vo$$

Donde:

V= Salida del controlador

P= Ganancia

I= Acción integral

Vo= Posición inicial del controlador

e= Error

Si se conoce la gráfica del error en función del tiempo además de todos los parámetros anteriores, entonces puede determinarse la salida del controlador proporcional + integral con respecto al tiempo.

De esta manera, en el momento en que se presente el error, el controlador responderá con una acción proporcional (respuesta del controlador proporcional al error) al dar una determinada carrera de válvula (apertura o cierre), que será corregida a su vez con la acción integral que dará un ajuste más a la posición de la válvula; esto se repetirá conforme el error se siga presentando en el tiempo, hasta que se logre llegar al ajuste deseado.

El controlador neumático proporcional + integral se muestra en la figura 5.14. El efecto estrangulador se logra similarmente a la forma descrita anteriormente para el controlador neumático proporcional.

El fuelle estrangulador (fuelle exterior) se mueve por presión de aire sobre el otro fuelle (fuelle interior). En el momento en que la pluma se mueve desde el punto de ajuste en una dirección que haga que la chapaleta se aparte del orificio, la presión de la válvula de control disminuye.

Al reducirse la presión de aire en la válvula de control el fuelle estrangulador se expande hacia la derecha sobre el fuelle interior por el efecto de la más baja presión de aire, logrando con esto que el fuelle interior a su vez se desplace también hacia la derecha y mueva la chapaleta nuevamente hacia el orificio. La cámara líquida de los dos fuelles esta conectada por medio de un paso restringido. La cámara líquida del fuelle estrangulador esta siempre a presión atmosférica. La del fuelle interior esta momentáneamente debajo de esa presión. El líquido del fuelle estrangulador, por consecuencia, pasa gradualmente hacia el fuelle interior logrando que este se mueva otra vez hacia la derecha. Este movimiento aleja la chapaleta del orificio y abate más la presión del aire, repitiéndose el ciclo ya descrito.

El movimiento de la aguja separándose de la chapaleta continuará de esta manera hasta que la válvula de control llegue al punto en que la pluma regrese a su punto de ajuste. Únicamente en ese punto las presiones líquidas serán iguales en cada fuelle. Esta acción de reajuste mantendrá al proceso en el punto de control, independientemente de los cambios de carga.

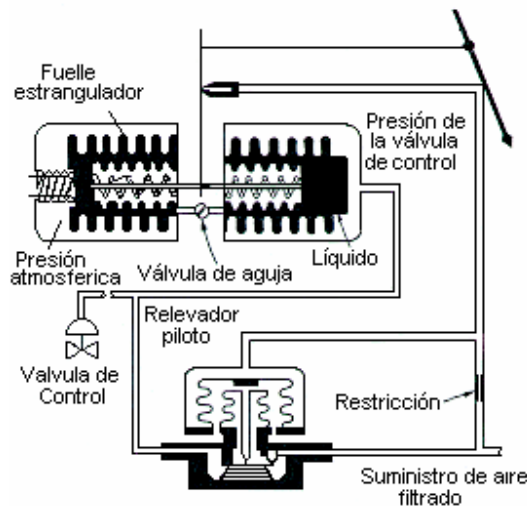


Fig. 5.14 Control neumático proporcional con reajuste (proporcional + integral).

### 5.3.5 Control proporcional + derivativo

El control proporcional + integral (PI) si bien, corrige el error constante (offset) del modo proporcional y abate el tiempo invertido en lograr la corrección y regresar a la válvula a su punto de ajuste, existe la desventaja de que la  $G$  del controlador sea muy elevada y conlleva el riesgo de introducir inestabilidad en el sistema, pues como ya se había explicado antes, entre más grande sea la ganancia en el controlador proporcional, más inestable se vuelve el sistema.

Es por ello que tiene que recurrirse a una alternativa más. Esta consistió en enviar a la válvula una señal no solamente proporcional a la señal del error, sino también proporcional a la velocidad con que el error se esta presentando; es decir, proporcional a la derivada del error. Con esto se da a luz el control proporcional + derivativo (PD).

El control proporcional + integral corrige el error del proporcional gracias a la acción integral, pero no puede anticiparse a él, ni tampoco lo corrige en una velocidad directamente proporcional a la velocidad con que el error se presenta y cambia.

En una regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable regulada y la posición del elemento final de control. Es decir, la carrera de la válvula es proporcional a la velocidad de cambio de la variable, por ejemplo, la temperatura cuanto más rápido varíe ésta, tanto más se moverá la válvula de control.

El control derivativo cambia la señal de salida del controlador proporcionalmente a la tasa de cambio de la señal de error, mediante la observación de que tan rápido cambia éste.

La ecuación característica para determinar la gráfica de la salida del controlador proporcional + derivativo es:

$$V = Pe + PD \frac{de}{dt} - \alpha D \frac{dv}{dt} + Vo$$

Donde:

V= Salida del controlador

P= Ganancia

e= Error

D= Acción derivativa

$\alpha$ = Término limitante de la ecuación

Vo= Posición inicial del controlador

Conociéndose cual es porcentaje de error que existe en el controlador en función del tiempo, puede predecirse cual será la salida del controlador proporcional + derivativo (PD). Mientras la pendiente de la gráfica del error permanezca constante, sea cero ó cambie de signo, la acción derivativa ajustará la salida del controlador de manera proporcional a la velocidad y a la magnitud con que se presenta el error.

Este modelo de control a pesar de estabilizar grandemente el sistema no logra eliminar el error constante que siempre existirá debido a la acción de la parte proporcional del sistema de control.

El controlador neumático proporcional + derivativo (PD) se logra colocando una restricción entre la línea de realimentación a la válvula de control y el fuelle proporcional (estrangulador) en el controlador proporcional de la figura 5.13. De esta forma, cuando se presenta el error, la señal de salida del controlador proporcional va aumentando, pero a su vez, el aire que va pasando a través de la restricción aumenta la presión de salida de la realimentación con el mismo grado de variación que la salida del controlador, es decir, proporcional al error. Por consecuencia, el fuelle estrangulador se comprime actuando inmediatamente sobre el obturador (chapaleta), con lo que se origina una disminución en la señal de salida del controlador. Esta disminución equivale al aumento que la señal de salida del controlador estaba presentando. En la acción derivada la realimentación es disminuida y la señal de salida es aumentada en un valor proporcional a la velocidad de variación de la variable controlada. El intervalo de tiempo en que la variación de la señal de salida debida a la acción proporcional (aumento de la señal de salida del controlador por el error) equivale a la parte variación de presión debido a la acción derivativa (disminución de la señal de salida del controlador) se le conoce de “tiempo de acción derivativa”.



### 5.3.6 Control proporcional + integral + derivativo

Si se acoplara en un mismo sistema de control proporcional la acción integral de eliminar el offset y la acción derivativa de ajustar el error del sistema en una velocidad proporcional a la velocidad con que este se presenta, lo que se obtendría es un controlador proporcional + integral + derivativo (PID). La figura 5.15 presenta la acción de un PID antes los cambios en la variable comparada con la acción individual de los otros controladores.

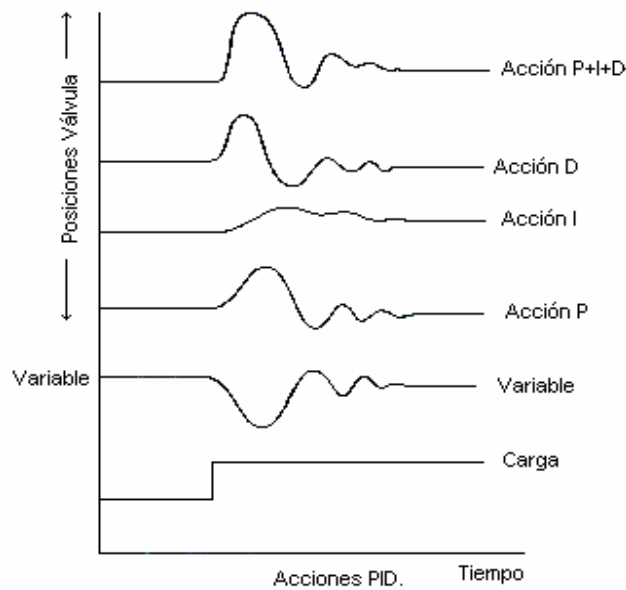


Fig. 5.15 Respuesta de un controlador PID comparado con controladores P, PI y PD.

En general puede decirse que la acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.

La acción integral lleva a la válvula a una posición donde por si sola con el control proporcional no puede llegar para eliminar el error (offset).

Finalmente la acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada, es decir proporcionalmente a la tasa de cambio con que el error se presenta.

En el control neumático esta forma de control era particularmente importante en sistema con grandes retrasos.

La expresión matemática para calcular la respuesta del controlador PID es:

$$V = Pe + PI \int_0^t e dt + PD \frac{de}{dt} - \alpha D \frac{dv}{dt} + Vo$$

Donde  $V_o$  = Salida del controlador

$$P_e + PI \int_0^t e \, dt = \text{Parte integral}$$

$$PD \frac{de}{dt} - \alpha D \frac{dv}{dt} + V_o = \text{Parte derivativa}$$

La definición de los términos individuales es la misma que en los modelos anteriores.

Mediante el empleo de esta expresión, si es conocida la gráfica del error al igual que en los anteriores modos de control, puede obtenerse la gráfica de la salida del controlador PID en función del tiempo.

El controlador neumático proporcional + integral + derivativo se logra instalando una restricción ajustable entre la línea de presión de aire de la válvula de control y el fuelle estrangulador del sistema de la figura 5.14 (controlador neumático proporcional + integral). Esta restricción tiene el efecto de reducir la acción estranguladora y permite de esta forma que la válvula de control pueda “sobrecorregir” temporalmente los cambios en la variable controlada. Esto produce una corrección más rápida y es particularmente valioso en sistemas con grandes retrasos entre los cambios que pudieran presentarse en el proceso y los cambios en la variable regulada.

De esta manera, colocando una pequeña restricción en el controlador neumático proporcional + integral, se le incorpora la acción derivativa y se tiene al final un controlador neumático proporcional + integral + derivativo (PID).

## 5.4 Sistemas de Control Electrónicos y Digitales

En la actualidad los circuitos electrónicos empleados para obtener los diversos tipos de control se basan en el uso del amplificador operacional. El amplificador de corriente continua posee una ganancia de tensión considerable ya que la señal de salida equivale a la señal de entrada incrementada. Necesita sólo una corriente de entrada del orden de los 0.5 nA ( $0.5 \times 10^{-9}$  Amperes) para provocar un cambio total en la señal de salida de 1 a 30 mA (un valor muy próximo a la corriente de alimentación).

Las características más importantes de los amplificadores operacionales son las siguientes:

- a) Ganancia elevada de tensión en corriente continua entre  $10^3$  y  $10^6$  A (esto expresa la relación entre una variación en la tensión de salida y la variación correspondiente en la entrada diferencial de tensión).
- b) Corriente de deriva en la entrada de 1 nA a 100  $\mu$ A (esta es la corriente que fluye a través de cualquier terminal de entrada mientras la tensión de salida es nula, se expresa también como promedio de las dos corrientes de entrada).
- c) Bajo consumo en la corriente de alimentación, del orden de 0.05 a 25 mA.
- d) Tensión desfasada de entrada de 0.5 a 5 mV (esto equivale a la tensión en corriente continua diferencial entre los dos terminales de entrada para que sea nula la tensión de salida).

- e) Corriente desfasada de entrada de 1 nA a 10  $\mu$ A (diferencia entre las dos corrientes de entrada).
- f) Tensión máxima de salida de 1 a 5 V menor que los límites de la tensión de alimentación.
- g) Corriente de salida de 1-30 mA.

El amplificador operacional mediante una adecuada conexión de componentes dispuestos en forma de realimentación positiva o negativa constituyen la parte más importante de los controladores electrónicos.

El amplificador operacional funciona con corriente continua y su salida es igual a la diferencia entre el voltaje de salida con respecto al de entrada por la ganancia del controlador.

La mayoría de los amplificadores operacionales son amplificadores diferenciales, esto es que esencialmente, disponen de tres terminales, dos a la entrada y uno a la salida.

Una señal de entrada aplicada al terminal llamado “no inversor” logrará que la salida cambie en la misma dirección, su símbolo de esta terminal es +Ve. Una variación de señal en la otra entrada logrará que la señal de salida cambie en dirección inversa; a este segundo terminal se le conoce como “inversor” y su símbolo es -Ve.

El símbolo utilizado para representar un amplificador operacional es un triángulo equilátero, en cuya base vertical se conectan las dos terminales de entrada, el superior es el inversor -Ve y el inferior el no inversor +Ve, mientras que el vértice se acostumbra situar a la derecha conectándosele el terminal de salida. Desde luego que el circuito real de un amplificador electrónico es más complejo y está rodeado por muchas conexiones que aunque sean necesarias, en realidad no intervienen en la función principal del amplificador.

Por ello, lo que se presente a continuación mostrará exclusivamente el funcionamiento más importante de un circuito de amplificador operacional de forma clara y sencilla sin omitir detalles de relevancia. No se adentrará en mayores cuestiones pues esto implicaría el objeto de un estudio aparte, y lo que se desea realmente es mostrar el principal funcionamiento de estos amplificadores operacionales en los circuitos electrónicos de control todo-nada, P, PI, PD y PID.

### **5.4.1 Control todo-nada**

El amplificador operacional electrónico se utiliza como un controlador todo-nada al establecer sólo una pequeña diferencia de señales en la entrada para que se obtenga un voltaje total en la salida poco inferior a la tensión en la alimentación. Esto es posible a la alta ganancia del amplificador.

La señal de entrada es la diferencia entre la variable regulada y el punto de consigna, mientras que el terminal de salida es conectado a un circuito de excitación de un relé acoplado al elemento final de control.

La banda muerta en el amplificador electrónico todo-nada se logra colocando una resistencia conectada en serie con el terminal no inversor y con una resistencia conectada entre este último y la salida del amplificador. Ver figura 5.16.

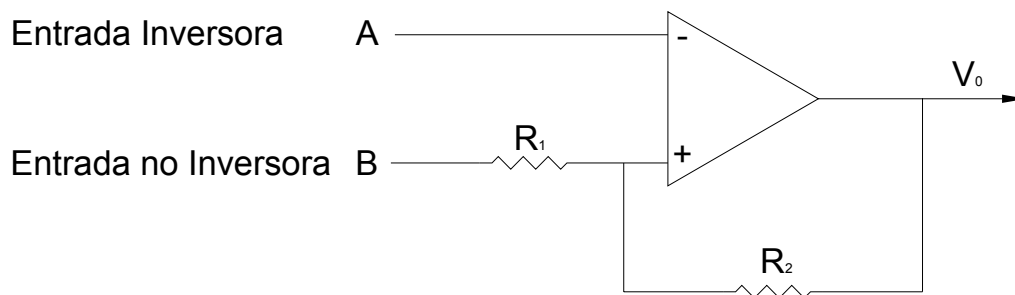


Fig. 5.16 Control todo-nada electrónico.

Con este arreglo, cuando la señal en la terminal B aumenta unos pocos milivolts con respecto a la terminal A, la salida  $V_0$  aumenta y es realimentada a través de la resistencia  $R_2$  a la entrada del amplificador, con lo que se bloquea la entrada. El amplificador permanecerá en estas condiciones debido al divisor de tensión que forma la entrada no inversora y la salida. Lo anterior implica que cuando la variable regulada se desajusta del punto de consigna provoca un aumento en la entrada no inversora, la salida  $V_0$  desequilibra el relé final de control, con lo que se mueve la válvula (abre totalmente) y no cambia de posición.

Para que las condiciones iniciales sean restablecidas (cierre de válvula) es necesario que la señal de entrada baje los suficientes milivolts con relación al terminal inversor para compensar el efecto de divisor de tensión  $R_1R_2$ . El valor de la zona muerta dependerá de la relación  $R_2/R_1$  y será más pequeña cuanto mayor sea esta relación.

## 5.4.2 Control proporcional

Considérese la figura 5.17. Si las señales de entrada y salida son nulas, no habrá circulación de corriente en las resistencias  $R_f$  y  $R_a$ ; pero si en la entrada inversora existe un milivoltaje de + 1 V, entonces la tensión de salida variara en la dirección de la entrada A hasta que la corriente de entrada del amplificador sea cero (puesto que es un amplificador diferencial). Bajo estas condiciones se verifica lo siguiente:

$$\frac{V_0(\text{salida})}{R_f} = \frac{V_A(\text{entrada})}{R_a}$$

Con lo que la ganancia del controlador en este caso es:

$$\frac{V_0}{V_A} = \frac{R_f}{R_a}$$

Mas si fuera la entrada no inversora la que cambiara en + 1 V, entonces la señal de salida variará positivamente en la dirección de la entrada B, hasta que la realimentación en la entrada inversora a través de la resistencia  $R_f$  aumente la señal en la entrada A el mismo valor que en la entrada no inversora B. Bajo estas condiciones se verifican las expresiones:

$$V_0 = i_f R_f + i_a R_a$$

$$V_B = i_a R_a$$

$$i_f = i_a$$

Por lo que la ganancia del controlador en este caso es:

$$\frac{V_0}{V_B} = \frac{R_a + R_f}{R_a}$$

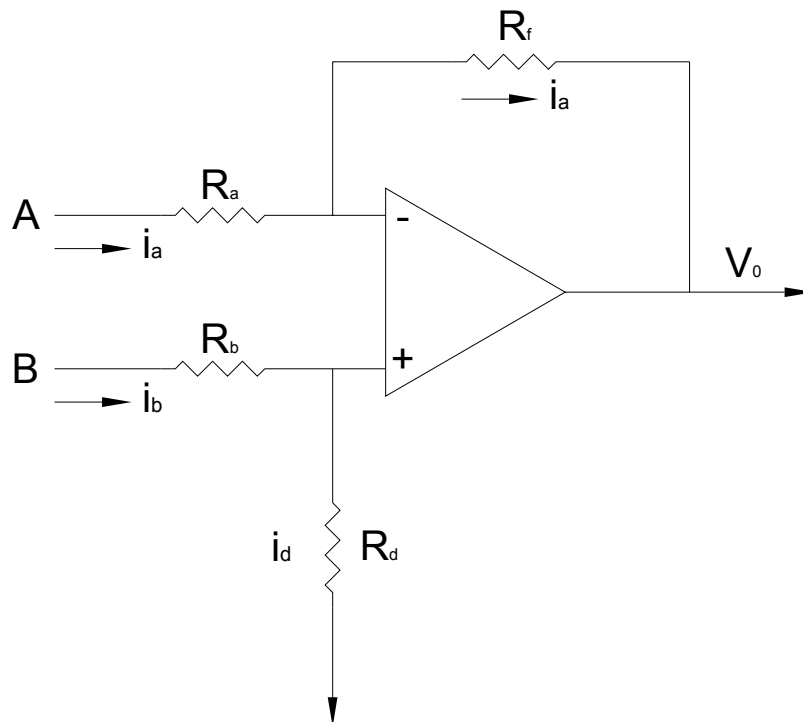


Fig. 5.17 Control proporcional electrónico.

Como puede observarse, existe una diferencia entre las ganancias de ambas entradas; por lo que es necesario introducir un divisor de tensión aplicado a la entrada no inversora B, de esta forma, se verificarían las siguientes expresiones:

$$V_A = i_a R_a + i_b R_d$$

$$V_0 = -i_a R_f + i_b R_d$$

$$V_B = i_b R_b + i_b R_d$$

Y dado que  $R_a=R_b$  y  $R_f=R_d$ , empleando las dos entradas del amplificador operacional se tendría una ganancia en tensión haciendo  $i_b=0$ , ó  $i_a=0$  de:

$$\frac{V_0}{V_B - V_A} = \frac{-i_a R_f + i_b R_d}{-i_a R_a + i_b R_b} = \frac{R_f}{R_a}$$

Lo cual implica utilizar una u otra entrada del amplificador operacional. En cualquier caso, variando la relación  $R_f/R_a$  se obtendrá un controlador proporcional al conectar el cursor de un potenciómetro a la entrada inversora del amplificador electrónico. De esta forma, al variar la posición del cursor del potenciómetro, cambiara la ganancia del controlador en ganancia variable, lo que significa que la señal de salida es proporcional a la variación de la señal de entrada.

### 5.4.3 Control integral

Para el control integral, el amplificador operacional (fig.5.18) es condicionado con un condensador conectado en serie con la línea de realimentación negativa y conectando la entrada inversora a una línea de cero voltios a través de una resistencia.

Cuando es aplicada una señal de error positiva PV-SP a la entrada no inversora B, la salida cambia en la dirección positiva con lo cual el condensador  $C_i$  se va cargando, pasando así una corriente  $i$  a través de la resistencia  $R_i$  lo que lleva a una variación de la carga del condensador.

La disminución de la tensión correspondiente creada en la entrada inversora del amplificador provoca que la salida aumente en una dirección positiva, lo cual a su vez hace que el terminal negativo a través del condensador, pase a tener una tensión positiva, manteniendo la corriente  $i_i$  en la resistencia  $R_i$  y continuando indefinidamente esta cadena de acontecimientos, acción la cual recibe el nombre de integración.

Recibiendo la señal de error PV-SP en el terminal positivo, la señal de salida cambia en forma de rampa positiva. La velocidad de variación de la salida depende de los valores de  $C_i$  y  $R_i$  así como desde luego, del valor de la señal de error.

La señal de error puede variarse conectando la resistencia  $R_i$  al cursor de un potenciómetro conectado entre la línea de cero voltios y la entrada B de la señal de error. Con esta adecuación, se obtendrá un ajuste fino del tiempo de acción integral en el potenciómetro, y a su vez, un ajuste más amplio cambiando los valores de la resistencia  $R_i$ . La ecuación que gobierna el amplificador integral esta definida para la ganancia del mismo, la cual es la siguiente:

$$V_o = -\frac{1}{R_i C_i} \int_0^t (PV - SP) dt$$

Donde:

$$(PV - SP) = i_i R_i$$

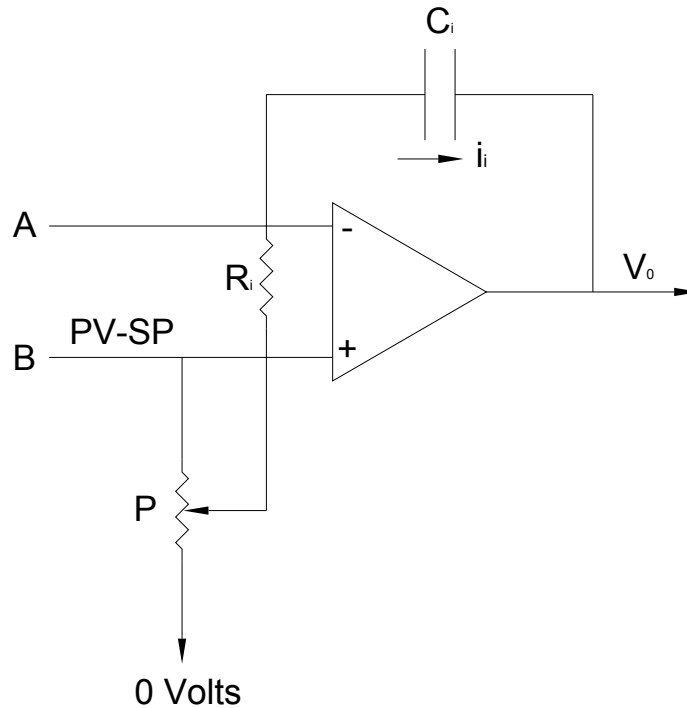


Fig. 5.18 Control integral electrónico.

#### 5.4.4 Control derivativo

La acción derivativa en un amplificador operacional (fig. 5.19) se logra colocando un capacitor  $C_d$  a la entrada inversora y una resistencia  $R_d$  en paralelo entre la salida y la entrada inversora. El ajuste de la acción derivativa se obtiene transformando la resistencia  $R_d$  en un potenciómetro.

El diseño es muy adecuado cuando se presenta una variación rápida de la variable del punto de consigna; conectando un condensador  $C_1$  y una resistencia  $R_1$  en serie, en paralelo con la resistencia derivativa  $R_d$ . De esta forma, como la impedancia de  $C_1$  es inversamente proporcional a la variación de tensión que se le aplica, un cambio rápido de tensión provocará que el condensador  $C_1$  presente una baja impedancia a través de la resistencia derivativa  $R_d$ , con lo cual el tiempo de acción derivativa será necesariamente bajo, modificándose el valor derivativo ajustado únicamente durante el instante de la variación rápida de la señal.

Un interruptor conectado en paralelo con el condensador  $C_1$  permite, en la posición de conexión, eliminar la acción derivativa cuando así se desee. La ecuación característica del amplificador operacional derivativo es la siguiente:

$$V_o = -R_d C_d \frac{d(PV - SP)}{dt}$$

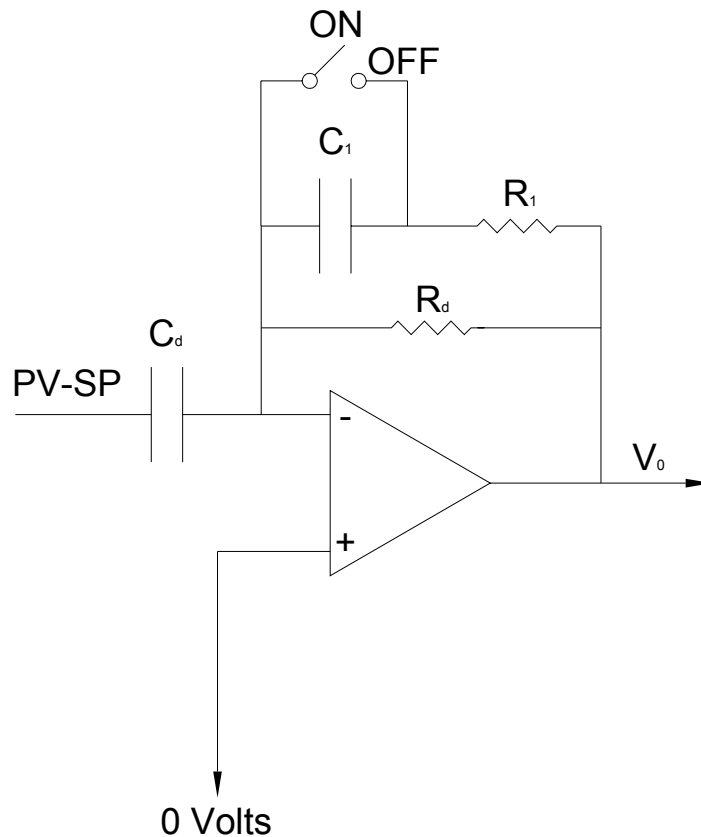


Fig. 5.19 Control derivativo electrónico.

### 5.4.5 Control proporcional + integral + derivativo

Al unir en un circuito electrónico los circuitos proporcional, integral y derivativo, se obtiene un instrumento electrónico llamado proporcional + integral + derivativo (PID). El circuito consiste en un módulo PI en donde se establece la ganancia o banda proporcional, se amplifica la desviación entre la variable y el punto de consigna, se fija el valor del mismo y se selecciona la acción directa o inversa del controlador, finalmente esto se conecta a un módulo de acción derivada donde se encuentra un potenciómetro de acción derivada.

Los controladores electrónicos PID poseen además un conmutador automático-manual con un reóstato para control manual y un circuito de memoria para que el cambio de automático-manual se haga sin



saltos en la válvula de control. Esto implica que en la posición manual el elemento final de control recibe la salida de un potenciómetro de ajuste manual, mientras que en la posición de automático la conexión se establece en el bloque PID.

Finalmente se mencionará, que en el momento de decidir entre uno de estos circuitos de control, habrá que considerarse que el controlador elegido debe de ser suficiente para los requerimientos del proceso, pero no debe de adicionarse refinamientos excesivos en él, tal que, lo encarezcan. Aunque no exista mucha diferencia económica entre uno u otro circuito de control, en un proceso que no es bien conocido de acuerdo a sus características de perturbación, podría ser mejor utilizar un controlador PID que de mayor flexibilidad al control del proceso, en vez de gastar en un PI ó PD que a la postre no sea suficiente para la calidad del control. En realidad, actualmente los controladores electrónicos que funcionan en distintas aplicaciones de procesos industriales son en su gran mayoría del tipo PID, y aunque un controlador integral o derivativo podría funcionar adecuadamente en ciertas aplicaciones específicas, se prefiere la utilización de un controlador PID por su capacidad, velocidad y flexibilidad notablemente superior al controlador integral o derivativo.

La tabla 5.1 resume las características de los distintos tipos de controladores electrónicos antes estudiados en función de las características del proceso y su aplicación.

| Tipo de Control                      | Proceso         |             |                  | Aplicaciones   |
|--------------------------------------|-----------------|-------------|------------------|--|
|                                      | Capacitancia    | Resistencia | Cambios de Carga |  |
| Todo-nada                            | Grande          | Cualquiera  | Cualquiera       | Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad.  |
| Proporcional                         | Media a Pequeña | Pequeña     | Moderados        | Presión, temperatura y nivel donde el offset no es un inconveniente.   |
| Proporcional + integral              | Cualquiera      | Pequeña     | Cualquiera       | La mayor parte de aplicaciones incluyendo el caudal.   |
| Proporcional + derivativo            | Media           | Pequeña     | Cualquiera       | Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral.                      |
| Proporcional + integral + derivativo | Cualquiera      | Grande      | Rápido           | Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables, por ejemplo, control de temperatura en intercambiadores de calor. |

Tabla 5.1 Características de los tipos de control electrónico más importantes.

## 5.4.6 Controladores digitales

Si a los controladores electrónicos vistos anteriormente (en particular el PID, por gran funcionalidad) se le adiciona un microprocesador, lo que se le incorpora es “inteligencia” y lo que se tiene como resultado es un controlador digital, que permite entre otras cosas, el ajuste del punto de consigna sin tener que desmontar el instrumento electrónico (ajuste manual), dado que el ajuste será ahora autoajustado desde el microprocesador. También es posible autoajustar el instrumento (fijar los valores de las acciones proporcional, integral y derivativa) para acomodarse a las variaciones de régimen de carga en el proceso y, también autodiagnosticar el instrumento.

El controlador digital posee un procesador CPU (Central Process Unit) y una memoria principal conectados entre si con los respectivos periféricos (monitor, teclado, ratón, impresora, modem, etc); la comunicación entre el CPU y los periféricos se realiza a través de tres canales de señales o buses: el bus de datos, bus de dirección y bus de control.

El procesador o microprocesador esta constituido por una unidad aritmética y lógica (ALU), que realiza las operaciones de aritmética simple (suma, resta) y dispone de operadores lógicos de comparación, (and, or, not, etc).

El cerebro del procesador es la unidad de control; esta organiza las funciones de la unidad aritmética y lógica en base a pulsos de frecuencia del reloj del microprocesador, que determina el tiempo necesario para que una tarea sea realizada por este. El reloj de velocidad se expresa en megahertz (mhz) que significan millones de ciclos por segundos (millones de pulsos por segundo).

Por su parte el bus de datos transfiere instrucciones de forma bidireccional entre el procesador y la memoria principal (ROM y RAM). El bus de datos dispone de ciertos canales (8, 16, 32, 64, 128, etc) que son conductores eléctricos en los circuitos impresos que transportan un número igual al número de canales de impulsos eléctricos a través de las llamadas puertas paralelas. Entre más conductores en paralelo se tengan disponibles, mayor será el número de datos que se manejen o transfieran. De esto nació la denominación de ordenadores de 8, 16, 32, 64, 128, etc, bits; donde un bit es el valor 0 o 1, que representa el paso o no de un impulso eléctrico a través de cada conductor del bus, capaces de manejar 1, 2, 4, 8, 16, etc, bytes; donde 1 byte es igual a 8 bits.

El bus de direcciones en el microprocesador indica a la memoria principal la dirección exacta en la memoria misma en donde están ubicados los datos.

El bus de control se encarga de transportar las señales de control que activan las funciones de los componentes del procesador, de forma parecida a como son enviados los estímulos nerviosos en el ser humano.

En la memoria principal se almacenan los datos o instrucciones en grupos de bits, 8 bits es igual a 1 byte y 1 byte corresponde a un carácter, que puede ser una letra, un número, un símbolo o un espacio. Cada 1024 (caracteres) bytes constituyen 1 kilobyte y 1000 kilobytes son un megabyte.

La memoria ROM (Read Only Memory) es una memoria de solo lectura, no puede ser modificada y no se borra al apagar el ordenador; en la ROM se guarda el sistema operativo (windows por ejemplo) que proporciona la interfase entre el ordenador y el exterior indicándole al ordenador las instrucciones que debe ejecutar.

La memoria RAM (Random Access Memory) es una memoria de acceso aleatorio, que almacena los programas, estos constituyen una forma de “memoria aprendida” o como se le conoce “software”. El hardware representa la estructura física del ordenador que incluye a los periféricos, esto es todo lo que puede verse y tocarse (incluyendo las partes internas del CPU). La RAM es “volátil”, esto significa que se borra cuando se apaga el ordenador.

Con el objeto de almacenar datos permanentemente se construyeron unidades de disco duro que se incorporaron al ordenador, además de las externas.

Los controladores digitales, particularmente aquellos que se utilizan en procesos batch (discontinuos), pueden llevar a cabo control multifuncional, actúan como instrumentos reguladores (para las variables de proceso, flujo, nivel, presión, temperatura, etc), con control lógico y control secuencial, efectúan operaciones aritméticas, monitorizan entradas y salidas, ofrecen la posibilidad de graficar el balance de material y permiten además la creación de software específico para definir todos los enclavamientos y secuencias de la operación del proceso.

Los controladores digitales gracias al microprocesador, en el control de procesos permiten el ajuste del algoritmo del proceso (PID) para resolver las perturbaciones periódicas del proceso y a la vez pueden trabajar con distintos tipos de algoritmos de control sin ningún problema.

Los controladores digitales son configurables directamente a través del teclado y pueden realizar en general las siguientes acciones:

- a) Filtrado digital de la señal de entrada.
- b) Selección de la variable presentada en diferentes unidades (metros cúbicos por hora, grados centígrados, etc).
- c) Selección del tipo de control: todo-nada, P, PI, PD, PDI y de otros algoritmos de control.
- d) Selección de la acción directa (si aumenta la variable se aumenta la señal de salida) o de acción inversa (si aumenta la variable disminuye la señal de salida).
- e) Seguimiento del punto de consigna.
- f) Autoajuste de las acciones de control.
- g) Seguridad contra manejo no autorizado.
- h) Autodiagnóstico.

Es importante mencionar que el controlador digital es la parte medular del sistema de control distribuido (del cual se hablara más adelante en mayor detalle), en donde no solamente uno, sino varios microprocesadores controlan las variables en la planta, haciendo conexión con las entradas analógicas y digitales por un lado y por el otro enviando señales de salida a los elementos finales de control básicamente.

Con el empleo del sistema de control distribuido el operador desde el cuarto de control puede cambiar los puntos de consigna, modificar los valores de las alarmas, modificar los valores de las acciones PID, visualizar en gráfico los lazos de control, los gráficos dinámicos, cambiar los márgenes de medida de los

transmisores y de las alarmas, visualizar las curvas de tendencia de las variables, etc. A esto habría que añadirle también que el operador puede ser avisado cuando se presente algún fallo en el sistema, o en los cables de comunicación, y si se prefiere examinar el buen funcionamiento del sistema.

Los controladores digitales son la base también del controlador lógico programable (PLC), que sustituyen a los relés convencionales utilizando un software especial basado en la lógica de relés.

Por otro lado, la principal desventaja del ordenador personal en el control de procesos industriales, es que desde su esencia, no fue diseñado para trabajar en ambientes tan hostiles como son los industriales, donde el polvo, las vibraciones, las altas o bajas temperaturas pueden dañar al equipo requiriendo constante mantenimiento o incluso, recurrente sustitución del mismo. Por esta razón, cada día se construyen equipos más robustos que sus predecesores.

En conclusión, el empleo del ordenador personal en el control de procesos se ha convertido en una herramienta indispensable para la segura y óptima operación de plantas de proceso, ya que son una opción económica y competitiva que representa alta rentabilidad. La evolución de las placas y tarjetas de adquisición de datos de entrada/salida, así como la facilidad de programación de estas, que conllevan el desarrollo de nuevo software, permitiendo el control de procesos en tiempo real prácticamente es a cada momento, debido a que el desarrollo del ordenador personal es cada vez mayor.

Finalmente, la figura 5.20 muestra un arreglo general de lo que representa el empleo del ordenador personal en el control de procesos industriales, basado este como ya fue explicado, en el controlador digital.

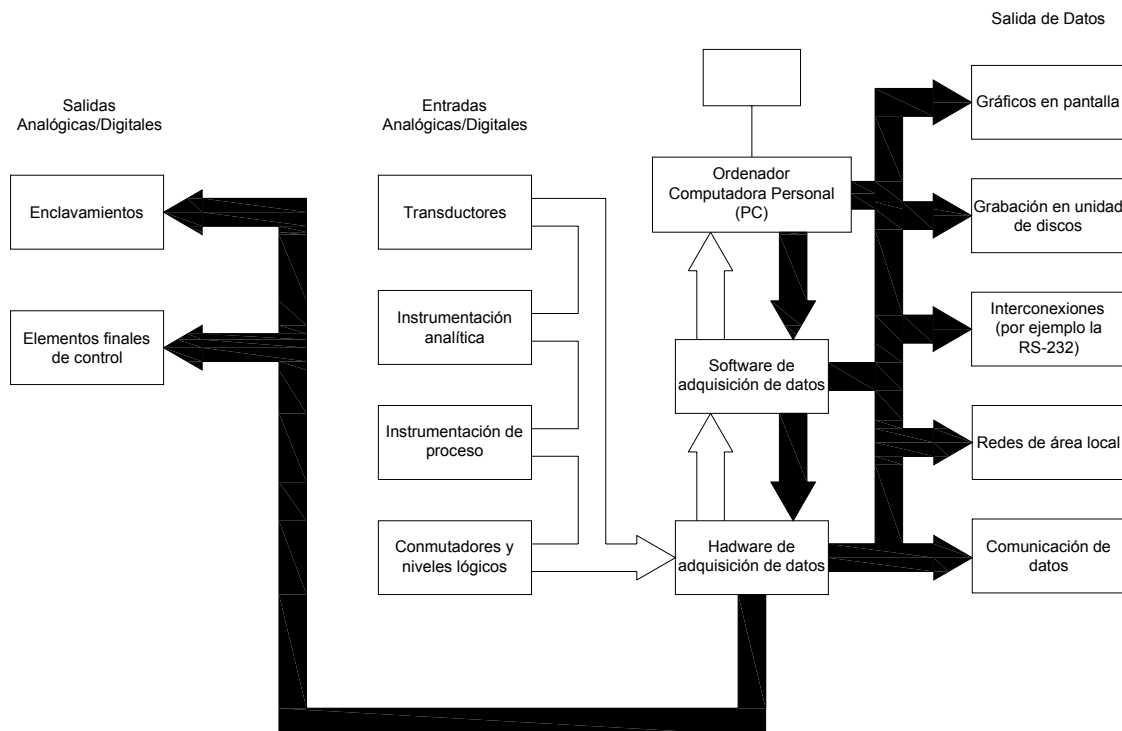


Fig. 5.20 Control de procesos con computadora personal.

## 5.4.7 Controlador Lógico Programable (PLC)

### Reseña histórica

El origen del PLC se remonta a 1968, año en que la división Hydramatic de la General Motors Corp. de los Estados Unidos especificó los criterios básicos para su diseño. La intención de la empresa al encargar el desarrollo de este aparato fue la de dar una solución a una gran cantidad de problemas que tenían las automatizaciones basadas en componentes electromecánicos o electrónicos (relés, temporizadores, contadores, etc.), o en circuitos electrónicos específicamente diseñados para una tarea.

Algunos de estos problemas eran:

- a) El alto costo asociado a los circuitos de relés por su baja confiabilidad, difícil mantenimiento, paros imprevistos, etc.
- b) La falta de flexibilidad de circuitos electromecánicos o electrónicos diseñados para una aplicación especial.
- c) No se podía, o era muy difícil, utilizar una misma máquina para varios modelos de piezas. Un nuevo diseño significaba adaptar todo el circuito (es decir, docenas de componentes) o reemplazarlo por uno nuevo.

Las especificaciones mínimas que debía cumplir el primer PLC según la solicitud de General Motors fueron:

- a) Programable: El aparato debía adaptarse fácilmente a una gran variedad de aplicaciones.
- b) Sencillo: Tanto la programación como el mantenimiento y la instalación debían estar a cargo de técnicos o ingenieros de planta sin un entrenamiento específico.
- c) Lógico: Como solo se pretendía reemplazar tableros electromecánicos o electrónica dedicada sencilla, se requería un aparato que efectuara un control lógico binario (ON/OFF).
- d) Reutilizable: Si bien no era en ese momento la condición de mayor peso, se pretendía que un mismo aparato fuera reutilizable.

General Motors encargó la tarea de desarrollo a este equipo a una consultora llamada Bedford Associates. La implementación de este desarrollo fue liderada por Richard Morley, quien construyó en 1969 el primer controlador lógico programable: el Modicon 084. Con una capacidad de 255 entradas/salidas, y una memoria de 4KB, el Modicon 084 tenía un peso de 46 Kg.

Años más tarde, la firma Allen Bradley iniciaba la producción de sus propios equipos, dándole el nombre de PLC (Programmable Logic Controller). Este nombre se universalizaría como denominación de los controladores lógicos programables. Durante los primeros años de vida se efectuaron infinidad de modificaciones en el desarrollo original, algunas orientadas a corregir problemas, y otras con la finalidad de apuntar a un mercado industrial más amplio.

Los primeros PLC se programaban en un lenguaje de tipo secuencial muy primitivo. Hacia 1972 aparecieron equipos que utilizaban un lenguaje de lógica de escalera (RLL, Relay Ladder Logic), semejante a los esquemas funcionales eléctricos utilizados en los circuitos lógicos de relés. Este lenguaje tuvo gran aceptación entre los técnicos de ingeniería y mantenimiento.

Con el transcurrir de tiempo (1970-1974), los equipos comenzaron a ofrecer cada vez más ventajas, como la de almacenar programas en cintas magnéticas (para facilitar la reprogramación). Las posibilidades de conexión a campo se hicieron más variadas ya que las señales podían ser de distintos tipos y niveles, pues algunos equipos podían conectarse a computadoras y otros periféricos.

Al igual que en otros ámbitos industriales, la causa que aceleró el desarrollo de los PLCs fue la invención del microprocesador, y su aplicación en el diseño de los nuevos PLCs. Los equipos pudieron manejar mayor cantidad de datos y realizar mayor cantidad de operaciones. Los avances entre 1975 y 1979 continuaron incesantemente. El desarrollo de memorias con cada vez mayor capacidad de almacenamiento en menor espacio hizo que los PLCs disminuyeran en tamaño y aumentaran en potencia. Así fue posible el desarrollo de programas mucho más grandes y complejos. A partir de los comienzos de la década de los ochentas, los PLCs ofrecieron una nueva ventaja: las entradas/salidas remotas. El hecho de poder colocar elementos de forma y emisión de señales de campo distribuidamente y a veces a grandes distancias del controlador significa un ahorro muy grande de dinero en instalación y cableado y por consiguiente una gran sencillez de mantenimiento.

## **Introducción a los PLC**

Un PLC es un dispositivo digital utilizado para el control de máquinas y operación de procesos. Se trata de un aparato digital electrónico con una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones, permitiendo la implementación de funciones específicas como: lógica, secuencias, temporizado, conteo y aritmética; con el objeto de controlar máquinas y procesos. Estos equipos son utilizados en donde se requieran equipos con capacidad de control lógico y/o secuencial. También pueden utilizarse en donde se debe implementar una aplicación de control regulatorio sencillo. Las aplicaciones típicas son: máquinas envasadoras, hornos automáticos, sistemas de seguridad, transportes de materiales, etc.

El controlador lógico programable no fue el primer equipo digital de aplicación para el control de procesos. Más bien, fue precedido por el uso de computadoras digitales para la supervisión de controladores electrónicos analógicos. Sin embargo, podemos afirmar que son los equipos que mas amplia difusión han alcanzado, al punto de que la gran mayoría de las plantas industriales cuentan con un controlador lógico programable, desde pequeñas unidades que manejan una docena de señales, hasta grandes equipos con miles de señales en complejas aplicaciones.

Originalmente, los PLCs fueron esencialmente orientados a la industria manufacturera o de procesos discontinuos, como la fabricación de automóviles, industria del plástico, etc. Luego encontraron aplicación en la industria de procesos continuos, como equipo auxiliar que reemplazó a los paneles de relés, en el enclavamiento de bombas, válvulas on/off, control de seguridad de calderas, etc. Al ser complementados con manejo de señales analógicas y control regulatorio (esta clase de control permite a la variable controlada seguir y en su caso igualar a la referencia, vía el manejo de la variable manipulada después de una variación en el punto de ajuste o bajo la presencia de un disturbio) en el mismo equipo, los PLCs ampliaron su campo de acción en la industria de procesos continuos, para incluir el control de procesos batch de pequeña magnitud y baja criticidad.

En esos casos desplazaron a equipos más costosos como los Sistemas de Control Distribuido DCS (pues pudiera ser el caso de que el control por DCS fuera excesivo), o a sistemas formados por instrumentos neumáticos o electrónicos analógicos y paneles de relés. Esto resultó particularmente cierto a partir de la combinación de PLCs, PCs y software para control de procesos, combinación que tuvo su origen a comienzos de la década de los ochentas.

Hacia la misma época se ofrecieron los primeros “módulos inteligentes” que, formando parte del conjunto, realizan tareas paralelas al procesador CPU principal. Como ejemplo de estos módulos podemos mencionar los programables en lenguaje de alto nivel como BASIC o C, los constituyen computadoras completas insertables en el chasis del PLC.

En lo que refiere a la evolución del software de programación, los PLCs en su mayoría se continúan programando por medio de lógicas en escalera. Muchos fabricantes ofrecen al usuario otras posibilidades adecuadas a sus requerimientos. En buena medida, esta diversidad tiene origen en los requerimientos de distintos mercados: el usuario norteamericano utiliza en general la lógica en escalera, mientras que los europeos, importantes proveedores de PLCs, favorecen el uso de diagramas lógicos. La complejidad de muchas aplicaciones demandó lenguajes que simplifiquen el trabajo de programación. En ese sentido, los proveedores ofrecen la posibilidad de programación estructurada.

## **Estructura de un PLC**

El término estructura o configuración externa de un PLC se refiere al aspecto físico exterior del mismo, bloques o elementos en que esta dividido. Actualmente son tres las estructuras más significativas que existen en el mercado:

### **Estructura Externa**

Estructura compacta

Estructura semimodular (Estructura Americana)

Estructura modular (Estructura Europea)

### **Estructura compacta**

Este tipo de PLCs se distingue por presentar en un solo bloque todos sus elementos, esto es, CPU, fuente de alimentación, memorias, entradas/salidas, etc. Su capacidad de proceso suele ser muy limitada.

### **Estructura semimodular**

Esta estructura se caracteriza por separar las E/S del resto del PLC, de tal forma que en un bloque compacto están reunidas la CPU, la memoria de usuario o de programa y la fuente de alimentación, separadas estas de las E/S.

### **Estructura modular**

La característica principal de esta estructura es que existe un módulo para cada uno de los diferentes elementos que componen el PLC. La sujeción de los mismos se hace con un carril DIN, placa perforada o sobre rack, en donde va alojado el Bus externo de unión de los distintos módulos que lo componen.

## Estructura Interna

Las tres partes fundamentales de un PLC son: la CPU (Central Processing Unit), las entradas y las salidas.

La CPU es el cerebro del PLC, responsable de la ejecución del programa desarrollado por el usuario. Estrictamente, la CPU está formada por uno o varios procesadores; en la práctica, puede abarcar también a la memoria, puertos de comunicaciones, circuitos de diagnóstico, fuentes de alimentación, etc. Las entradas (interfases o adaptadores de entrada) se encargan de adaptar señales provenientes de campo a niveles que la CPU pueda interpretar como información. En efecto, las señales de campo pueden implicar niveles y tipos de señal eléctrica diferentes a los que maneja la CPU. En forma similar, las salidas (interfases o adaptadores de salida) comandan dispositivos de campo en función de la información enviada por la CPU. La CPU se comunica con las interfases de entrada por medio de un bus paralelo. De esta forma se cuenta con un bus de datos y un bus de direcciones. Adicionalmente, un bus de alimentación provee alimentación eléctrica a las interfases de entrada.

A las entradas se conectan sensores, que pueden ser por ejemplo:

- a) Pulsadores
- b) Llaves
- c) Termostatos
- d) Presostatos
- e) Límites de carrera
- f) Sensores de proximidad
- g) Otros elementos que generan señales binarias (ON-OFF)

Las salidas comandan distintos equipos, por ejemplo:

- a) Lámparas
- b) Sirenas y bocinas
- c) Contactores de mando de motores
- d) Válvulas solenoide
- e) Otros elementos comandados por señales binarias

Cuando un sensor conectado a una entrada se cierra, permite que aparezca entre los bornes de esa entrada una tensión, por ejemplo: 24 VCD (ver fig. 5.21). Esta tensión es adaptada por la interfase de entrada al nivel y tipo de tensión que la CPU puede leer a través del bus de datos. Cuando la CPU lee este nivel de tensión, recibe la información de que dicha entrada está en el estado activo, o sea en el estado lógico 1.



Cada entrada es reconocida por la CPU mediante una identificación. Si la entrada activada se denomina X1, podemos decir que X1 está en estado lógico 1 ( $X1=1$ ). Cuando el sensor conectado al borne de entrada se abra, X1 estará en estado 0 ( $X1=0$ ). En forma similar, cuando la CPU desea que una salida se active (pase a estado lógico 1), modifica los niveles de tensión en el bus de datos. La tarjeta de salida, que está conectada al bus de datos, cierra entonces el circuito de conexión, energizando el dispositivo de campo. Cada salida está identificada, por ejemplo una salida podría denominarse Y2. Podemos decir entonces que salida Y2 está energizada ( $Y2=1$ ) o desenergizada ( $Y2=0$ ).

La identificación que la CPU utiliza para cada punto de entrada/salida en la memoria se conoce como direccionamiento (o addressing) de la entrada/salida. Un programa muy sencillo podría ser: "Cuando  $X1=1$ , se debe hacer que  $Y2=1$ ". Este podría ser el caso en que se enciende una lámpara al presionar un pulsador. El pulsador deberá estar conectado a la entrada X1, y la lámpara a la salida Y2. Al presionar el pulsador, la CPU leerá en la interfase de entrada que  $X1=1$ . Resolverá el programa, y pondrá un 1 en Y2. Como consecuencia, la salida cerrará el circuito de conexión y encenderá la lámpara. La convención por la cual un "1" indica la presencia de señal, mientras que un "0" indica su ausencia; se denomina lógica positiva. En forma inversa, la lógica negativa utiliza un "0" para indicar la presencia de señal, y un "1" para indicar su ausencia. Las interfases de entrada/salida presentadas pueden tomar solo uno de los dos estados: "1" ó "0".

Otras interfases pueden tener como entrada o salida a variables analógicas, las que se caracterizan por tomar valores intermedios en forma continua entre dos límites. Un ejemplo de variable analógica puede ser la presión de un reactor, que varía en forma continua entre 0 y 10 kg/cm<sup>2</sup> man. Dado que la naturaleza de una señal de presión no es eléctrica, se requiere un transmisor de presión. Este convierte la presión medida en una señal eléctrica, que puede ser de 4 a 20 mA, 0 a 10 VCD, etc.

La interfase de entrada analógica convierte una señal analógica eléctrica en un número binario, cuya cantidad de dígitos depende de la resolución de la interfase de entrada/salida (por ejemplo, un rango de 00000000 a 11111111, con una resolución de 8 bits). Es evidente que la interfase maneja en realidad valores digitales, por lo cual se les denomina interfases de entrada/salidas analógicas. El conjunto de entradas y salidas se denomina a veces "estructura de entradas/salidas", o también "periferia de entradas/salidas", aunque es más frecuente que se le abrevie como E/S, o I/O por su sigla en inglés (input/output). Cada entrada o salida se denomina canal o punto de E/S.

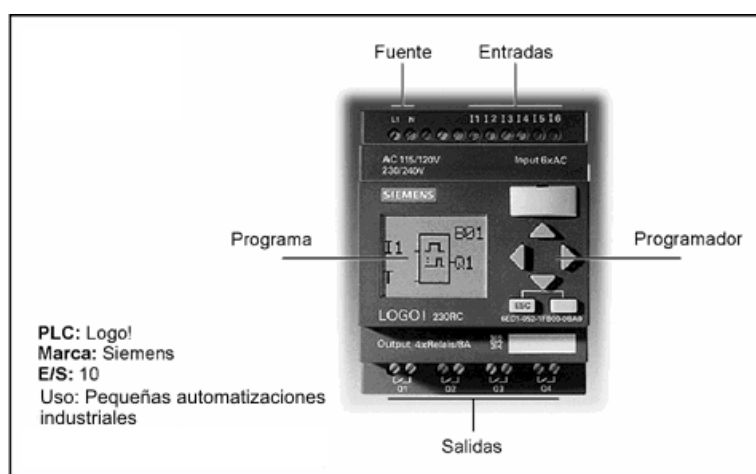


Fig. 5.21 Conexión del PLC con el campo.

## **Clasificación**

Si deseamos establecer una clasificación de PLCs, podemos considerar distintos aspectos:

### **Por su construcción:**

- a) Integral (compacta)
- b) Modular (semimodular y modular)

### **Por su capacidad:**

- a) Nivel 1: Control de variables discretas y pocas analógicas, operaciones aritméticas y capacidad de comunicación elementales.
- b) Nivel 2: Control de variables discretas y analógicas. Matemáticas de punto flotante. E/S inteligentes. Conexión en red. Gran capacidad de manejo de datos analógicos y discretos.

### **Por cantidad de E/S:**

- a) microPLC (hasta 64 E/S).
- b) PLC pequeño (65 a 255 E/S).
- c) PLC mediano (256 a 1023 E/S).
- d) PLC grande (más de 1024 E/S).

## **Clasificación por construcción**

La clasificación por construcción distingue a los PLCs que integran todas sus partes (E/S, CPU, fuentes, puertos de comunicaciones, etc.) en una misma caja o gabinete, de los que están formados por módulos. Se le denomina PLC integral (fig. 5.22) a aquel que integre todas sus partes una misma caja o gabinete.

Se suele utilizar también la denominación de compacto, pero la aparición de PLCs modulares de pequeño tamaño hace que esta clasificación a fin de cuentas resulte inadecuada. El PLC integral suele tener muy pocas E/S, clasificándose en general como micro PLC. Tiene como ventajas un bajo costo y un pequeño tamaño. Una desventaja es la imposibilidad de expandir un equipo en forma gradual. En general se parte de un equipo básico que puede ampliarse mediante el agregado de unas pocas unidades de expansión con cantidad y tipo de E/S. Otra desventaja es la escasa variedad disponible de tipos de E/S, ya que, al estar éstas integradas en un gabinete, es imposible cubrir una amplia gama de opciones.

Un PLC modular, como su nombre lo indica, está formado por módulos. El equipo se arma sobre un bastidor o base de montaje (también llamada chasis o rack) sobre el cual se instalan la CPU, los módulos de entrada, los módulos de salida y otros periféricos (ver fig. 5.23). El chasis contiene en su parte posterior los buses de datos, direcciones y alimentación del PLC, con conectores apropiados a los que se conectan los distintos módulos. Por la forma que tienen estos módulos, es usual que se los denomine tarjeta. Es así que es muy frecuente encontrar la frase tarjeta de entrada/salida en referencia a los módulos de entrada/salida.

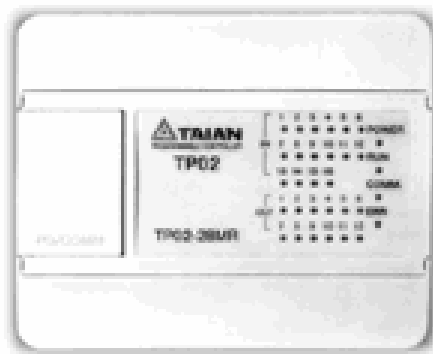


Fig. 5.22 PLC integral TP-02.

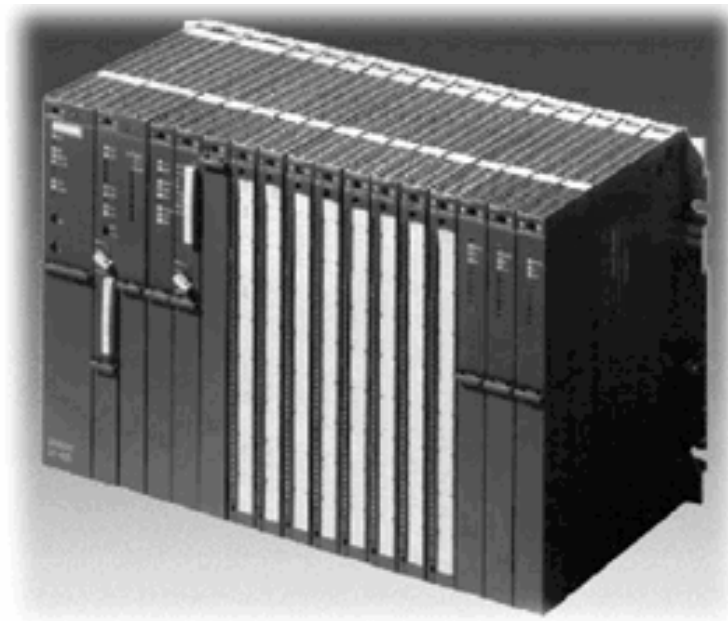


Fig. 5.23 PLC Modular SIMATIC S7-400.

La principal ventaja que un PLC modular frente a uno integral es evidente, el usuario puede componer su equipo con la cantidad y tipo de entradas y salidas que necesite, y luego puede ampliarlo agregando los módulos necesarios.

La desventaja, en equipos pequeños, es su mayor costo. En general, este mayor costo tiene dos razones; mayor cantidad y costo de los componentes utilizados en la fabricación y ensamblado del equipo (conectores, chasis, plaquetas, etc.), y la mayor capacidad que suele tener un PLC modular. Esta mayor capacidad se evidencia en un lenguaje de programación más potente y con instrucciones para aplicaciones más complejas, mayor capacidad de comunicaciones, etc.

### **Clasificación por capacidad**

La clasificación por capacidad distingue dos niveles, en función de la complejidad de las instrucciones que el PLC puede manejar. El nivel 1 identifica a un PLC con construcciones sencillas y no muy potentes, mientras que el nivel 2 identifica a los PLCs con funciones de mayor complejidad. Algunas de las instrucciones que podemos encontrar en un PLC de nivel 2, y que en general no estarán en un PLC de nivel 1 son: raíz cuadrada, logaritmo, antilogaritmo, aritmética de doble precisión y de punto flotante, funciones trigonométricas, diferenciación e integración, lazos PID, etc. Es usual que a mayor cantidad de E/S corresponda mayor capacidad del PLC.

### **Clasificación por cantidad de E/S**

La clasificación por cantidad de E/S es arbitraria. A pesar de ello, este parámetro es el indicador que habitualmente define un PLC. Los fabricantes ofrecen características tales como la capacidad de memoria, operaciones aritméticas, etc., en directa relación a la cantidad de entradas y salidas que el controlador puede manejar. Así, por ejemplo, suele haber una directa relación entre la clasificación de PLCs como integrales, y los clasificados como microPLC por la cantidad de E/S. Más aún, este PLC clasificado como integral por su construcción y como microPLC por su cantidad de E/S, probablemente deba ser clasificado como de nivel 1 en cuanto a su capacidad.

### **CPU (Unidad Central de Proceso)**

La CPU está compuesta por dos partes fundamentales: el procesador y la memoria. Puede contener también otros elementos, como puertos de comunicación, o incluso la fuente de alimentación.

### **Procesador**

El procesador tiene como tarea principal ejecutar el programa de aplicación escrito por el usuario. También cumple con otras tareas importantes, como ser la de administrar las tareas de comunicación y ejecutar programas de autodiagnóstico. Los PLCs más sencillos poseen un solo procesador, pero en la medida que su capacidad de control aumenta pueden tener varios procesadores dedicados a tareas específicas como resolución de lazos, comunicaciones, diagnóstico, etc. Para poder gobernar todo el sistema, el procesador necesita de un programa escrito por el fabricante (el mismo contiene el conjunto de instrucciones utilizado para ejecutar el programa de aplicación, una rutina de autodiagnóstico y el sistema básico de interacción con los periféricos: tarjetas de E/S, puertos de comunicaciones, etc.).

A este programa se lo denomina programa ejecutivo o sistema operativo. El sistema operativo no es accesible al usuario y se encuentra almacenado en la memoria no volátil que forma parte de la CPU. Las tareas asignadas al procesador son ejecutadas por éste en forma secuencial incesantemente mientras el equipo está conectado a la alimentación. Esta secuencia se denomina barrido o scan. Una secuencia típica de barrido o scan consistiría en (fig. 5.24):

- a) Consultar el estado de las entradas y almacenar estos valores en la memoria.
- b) Resolver el programa de aplicación.
- c) Atender las comunicaciones con módulos inteligentes.
- d) Atender las comunicaciones de los puertos de la CPU.
- e) Ejecutar un autodiagnóstico.
- f) Actualizar las salidas a partir de los resultados almacenados en la memoria.
- g) Volver a empezar el ciclo.

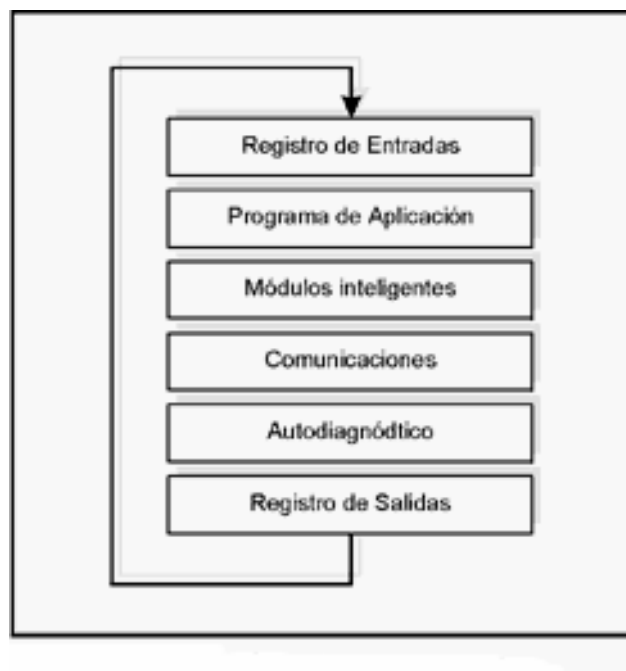


Fig.5.24 Barrido de programa o scan.

El tiempo que necesita el procesador para llevar al cabo es ciclo se denomina tiempo de barrido o de scan time. Los fabricantes en general informan un tiempo promedio necesario para ejecutar un programa de aplicación que contiene 1K (1024) instrucciones de lógica booleana. Los PLCs más rápidos tienen un tiempo de barrido de menos de medio milisegundo para 1K de instrucciones. Sin embargo, la comparación de distintos PLCs en función del tiempo de barrido indicado en la especificación puede ser engañosa. Esto se debe a que no está normalizado el tipo de instrucciones a utilizar en este ensayo, y a que los distintos PLCs pueden tener distinta rapidez en la resolución de una determinada instrucción.

Algunos PLCs que parecen muy rápidos dejan de serlo cuando deben ejecutar operaciones aritméticas o instrucciones complejas. Por otra parte, los PLCs de mayor capacidad suelen tener tiempos de barrido más rápidos por K de instrucciones, pero son también los que deben ejecutar programas de mayor volumen. La determinación exacta del tiempo real de barrido de un programa de aplicación requiere al cálculo del tiempo que le insume al procesador la ejecución de cada una de las instrucciones utilizadas, así como el tiempo insumido por las demás funciones que ejecuta la CPU. Con frecuencia se asocia un corto tiempo de barrido a una rápida ejecución de una aplicación. Esto es incorrecto, ya que otros factores suman su influencia.

Consideremos los pasos necesarios para encender una lámpara desde un pulsador:

1. Debe cerrarse el contacto del pulsador.
2. La tarjeta de entrada debe leer que el contacto está cerrado (tiempo de respuesta de la entrada).
3. La CPU debe leer la tarjeta de entrada, resolver el programa de aplicación y escribir el resultado en la tarjeta de salida. El tiempo total para estas tareas es el tiempo de barrido.
4. La tarjeta de salida debe cerrar el circuito de conexión (tiempo de respuesta de la salida).
5. La lámpara debe encenderse.

El tiempo total que todas estas tareas insumen se denomina tiempo total de respuesta, o throughput. La figura 5.25 muestra la distribución del tiempo total de respuesta para una aplicación de pequeña magnitud, con E/S discretas en corriente alterna. Se puede apreciar que una mejora en el tiempo de barrido (aún cuando ésta sea importante) no mejorará demasiado la respuesta total del sistema. Concentrarse en el tiempo insumido por los dispositivos de campo puede ser, a veces, más importante.

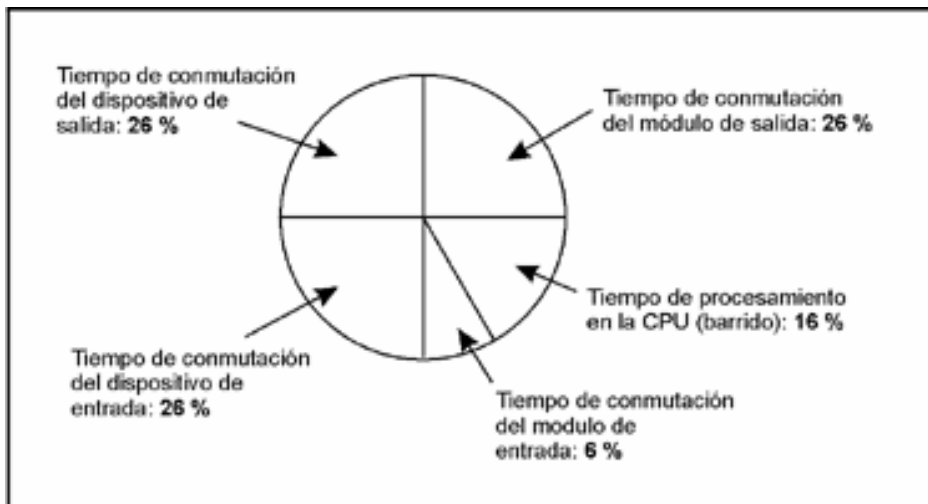


Fig. 5.25 Componentes del tiempo de respuesta para una aplicación de pequeña magnitud.

## Memoria

Todos los datos que el PLC maneja, su sistema operativo, el programa de aplicación, la tabla de estado de las E/S, etc., se almacenan en la memoria. En realidad deberíamos decir las memorias, porque son varias. En efecto, el sistema operativo, el programa de aplicación, las tablas de E/S y los registros internos (variables no asociadas a E/S) pueden estar en memorias separadas y de distintos tipo. Según el tipo y capacidad del PLC, éste puede manejar mayor o menor cantidad de datos, y a su vez datos con formato más o menos extenso. El formato con que se agrupan los datos puede ser en grupos de 8 bits llamados bytes, o en grupos de 16 bits.

La memoria total de un equipo tiene distintas zonas en las que se almacenan datos:

- a) Área de programas de aplicación o memoria de usuario.
- b) Registro de E/S discretas.
- c) Registro de E/S analógicas.
- d) Registro de temporizadores y contadores.
- e) Registro de variables.
- f) Área auxiliar (scratch pad).
- g) Sistema operativo.

Los fabricantes en general especifican la cantidad de memoria disponible para el programa de aplicación y la cantidad de memoria disponible para datos (o la cantidad disponible de cada tipo de registro). No obstante, es necesario tomar ciertas consideraciones al comparar PLCs porque las instrucciones del programa de aplicación pueden ocupar distinta cantidad de memoria en distintas marcas. Esta situación es similar a la que se da desde el punto de vista de la velocidad de procesamiento del programa de aplicación.

El sistema operativo es un parte fija integrante del PLC. Debe permanecer inalterable a través del tiempo y ante falla de alimentación del equipo; además debe ser inmune a cambios accidentales generados por el operador o programador, por lo tanto necesita una memoria con capacidad de almacenamiento permanente, como son las memorias ROM (memoria de sólo lectura, no reprogramable; esta se utiliza para almacenar el sistema operativo del sistema), que contiene rutinas tales como: inicialización tras puesta en marcha en tensión o reset, rutinas de test y de respuesta a error de funcionamiento, intercambio de información con unidades exteriores y lectura y escritura en la interfases de E/S. La EPROM (memoria de solo lectura reprogramable) que se emplea para usar el programa de usuario una vez que ha sido convenientemente depurada. O la EEPROM (memoria de sólo lectura, alterable por medios eléctricos) que se emplea principalmente para almacenar programas, aunque en la actualidad es cada vez más frecuente el uso de combinaciones RAM + EEPROM, utilizando estas ultimas como memorias de seguridad que salvan el contenido de la RAM, que una vez reanudada la alimentación el contenido de la EEPROM se vuelca sobre la RAM.

En cambio, el programa de aplicación debe permanecer estable durante el funcionamiento del equipo, pero también debe poder ser alterado fácilmente para la eliminación de errores de un programa o para reprogramar el controlador en una nueva aplicación. Se utilizan entonces memorias RAM o EEPROM. Para las áreas de datos se requiere otra condición: las memorias deben permitir una lectura y escritura rápida. La velocidad de estas operaciones de ingreso y consulta de datos juega un rol fundamental en la velocidad de operación del PLC. Por otra parte, no se requiere permanencia de los datos luego de una caída en la alimentación. Por ello, se utilizan memorias RAM.

## **Entradas y salidas**

Las entradas y salidas son los elementos del PLC que lo vinculan al campo. En el caso de las entradas, adaptan las señales de los sensores para que la CPU las reconozca. En el caso de las salidas, activan un circuito de conexión ante una orden de la CPU. No todas las señales que vienen o van hacia el campo son iguales, ni tampoco responden al tipo de nivel y señal que la CPU puede leer o escribir. Por ello existen interfaces de entrada y salida adecuadas para los tipos de señales más comunes. Por supuesto, para un PLC todas esas señales deben ser eléctricas, para lo cual se utilizan transductores de diversos tipos: presostatos, interruptores de posición, transductores de corriente a presión para comandos de válvulas con actuador neumático, etc. También son necesarios transductores cuando se desea medir una variable eléctrica como tensión o corriente, en niveles incompatibles con los que maneja la interfase de entrada. Veamos una clasificación de entradas y salidas:

- a) Discretas: También llamadas lógicas, binarias u "ON-OFF", pueden tomar solo dos estados.
- b) Analógicas: Pueden tomar una cantidad de valores intermedios dentro de un cierto límite, dependiendo de su resolución. Por ejemplo: 0 a 10 VCD, 4 a 20 mA c.c., etc.
- c) Especiales: Son variantes de las analógicas, como las entradas de pulsos de alta velocidad, termopares, RTDs, etc.
- d) Inteligentes: Son módulos con procesador propio y un alto grado de flexibilidad para su programación. Durante su operación intercambian datos con la CPU.

Un término comúnmente utilizado en los PLCs modulares es el de densidad de la tarjeta de E/S. La densidad define la cantidad de puntos de entrada/salida que contiene un mismo módulo. Según el fabricante, el modelo del PLC y el tipo de tarjeta, se puede disponer de tarjetas de 4, 8, 16, o 32 puntos de E/S en un mismo módulo. Se suele denominar como de alta densidad a los módulos de 32 puntos. Para poder acomodar los componentes de un módulo de alta densidad en el espacio disponible en la tarjeta, es usual que los canales compartan algunos componentes. Por ejemplo, en un módulo de 16 entradas discretas, éstas se pueden distribuir en dos grupos de ocho. Cada grupo dispone de un solo borne de tensión de referencia o común. Esto obliga a que todos los canales de un mismo grupo utilicen el mismo tipo y nivel de tensión, obtenido de la misma fuente. En forma similar, en las tarjetas de salida discreta, el fusible de protección puede ser compartido por todos los canales de un grupo. Esto significa que, si el fusible se funde, todo el grupo sale de servicio. La ventaja que ofrecen los módulos de alta densidad es que reduce el tamaño del equipo, y se pueden colocar más puntos en un mismo chasis; por ende, el costo por punto se reduce.

En algunos PLCs integrales, los bornes de conexión de los cables que traen o llevan la señal de campo forman parte del gabinete del equipo. En caso que deba ser reemplazado el PLC, será necesario desmontarlo. Para ello se deben desconectar previamente todos los cables del equipo, reemplazarlo o repararlo, y volver a conectar todos los cables del equipo.



Es evidente que en este proceso pueden ocurrir errores debido a un error en el conexionado. En los PLCs modulares, este trabajo es más sencillo. La bornera es un bloque que se conecta directamente al bloque de E/S a este bloque se conectan los cables de campo. Este bloque se denomina bornera o bloque terminal. En caso de que sea necesario reemplazar una tarjeta, se extrae la bornera, se reemplaza el módulo defectuoso y se introduce en el nuevo módulo la bornera existente. Se reemplaza así la tarjeta sin que se haya desconectado de la bornera de un solo cable de campo, evitando el riesgo de errores en la desconexión y conexión de cables.

Un aspecto que debe considerarse en los módulos de alta densidad es el espacio que ocupa la bornera. En algunos casos, el espacio requerido por los bornes es superior al espacio disponible en la tarjeta, por lo que se debe recurrir a una solución alternativa. Esta solución consiste en el uso de borneras separadas del módulo de E/S, y conectadas al mismo por medio de un cable prearmado y un conector especial. Un error que puede ocurrir en el mantenimiento de un PLC es la confusión respecto al modelo del módulo a reemplazar. Podría ocurrir que el técnico de mantenimiento intente reemplazar un módulo de 16 entradas ON-OFF de 220 VCA, por otro de 16 entradas ON-OFF que tomó del taller, sin ver que éste es para señales de 24 VCD.

Para evitar que este módulo que no corresponde sea insertado en el chasis, muchos PLCs disponen de una clave mecánica que impide la inserción de un módulo distinto al inicialmente previsto en esa posición del chasis. También se puede encontrar este concepto de clave mecánica en la bornera de la tarjeta. El uso de chasis de expansión tiene dos posibilidades: una conocida como local y otra como remota. La expansión local consiste en la interconexión de los buses paralelos que corren en la parte posterior del chasis, por medio de cables apropiados. Esta aplicación está severamente limitada por la distancia, que en el mejor de los casos no puede superar algunas decenas de metros. También puede estar limitada por la cantidad de tarjetas que se pueden conectar al bus local.

La expansión remota utiliza procesadores de comunicaciones especiales, uno en el chasis principal y uno en cada chasis de expansión. Entre ambos procesadores se produce una comunicación que típicamente tiene la característica de ser propietaria de alta velocidad y con procedimientos de chequeo para asegurar la calidad de la información transmitida. Los medios físicos más usuales son cable coaxial, un par de conductores trenzados con malla, o fibra óptica. La distancia que se puede abarcar usando chasis remotos llega en algunos casos a más de 5 km. Con este concepto de E/S remotas se logran importantes ahorros de cableado en instalación. Consideremos por ejemplo una planta con una sala de control donde se aloja el chasis principal con la CPU; y un centro de control de motores con unos 200 puntos de E/S distante a solo 50 mts. Vemos que si utilizamos un PLC con todas sus entradas y salidas en la sala de control, el tendido será de 10 km de cable bipolar. Si ahora colocamos un chasis remoto en el centro de control de motores, solo utilizaremos 50 mts de par trenzado o cable coaxial. Este cambio desde luego representa un ahorro considerable.

Usualmente se asocia el uso de chasis remotos a la distribución geográfica de las tarjetas de E/S. Sin embargo, éstos también se utilizan en los casos en los que se requieran más módulos de E/S que los soportados por chasis locales. En este caso se instalan chasis remotos vecinos al chasis principal. Un aspecto que aumenta la vulnerabilidad del sistema que utiliza chasis remotos es que todas las señales "viajan" por un solo par de conductores. La rotura de éstos conductores provoca la falla de todo el sistema. Es por ello que algunos PLCs ofrecen la posibilidad de que las comunicaciones entre los chasis sean redundantes, es decir, se hagan sobre dos pares de conductores y no sobre uno solo. Esto permite cablear cada par de conductores por caminos distintos, evitando que un inconveniente en una zona de la planta inhabilite el sistema.

Desde el punto de vista de la programación del software de aplicación, el uso de chasis remotos es totalmente transparente para la CPU; y ella ordena solo activar una salida sin importar donde este ubicada físicamente. En los puntos siguientes se describirán con mayor detalle las características de interfases de E/S. Si bien la descripción está orientada a equipos modulares, las características generales que se presentarán son válidas también para PLCs integrales. En la descripción de características se darán algunos valores referenciales de tiempos, cargas, tensiones, etc., debiendo confirmarse el valor correcto con la especificación del PLC utilizado.

### Entradas discretas

Los fabricantes ofrecen una gran cantidad de alternativas para estos módulos. Así es que se puede optar por módulos con distinta cantidad de entradas y para distintas tensiones; las más comunes son: 24 VCD, 24 VCA, TTL (5 VCD), 110 VCA, 120 VCA, 220 VCA, etc. La estructura típica de una entrada discreta puede separarse en varios bloques por donde pasará la señal, hasta convertirse en un 0 o un 1 para la CPU. (véase fig. 5.26).

Estos bloques son:

- a) Rectificador: En el caso de una entrada de CA, convierte la señal en continua. En el caso de una señal de CC, limita o impide daños por inversión de polaridad.
- b) Acondicionador de señal: Elimina ruidos eléctricos, detecta los niveles de señal para los que conmuta el estado lógico, y lleva la tensión al nivel manejado por la CPU.
- c) Indicador de estados: En general, se dispone de un indicador luminoso por canal, que está encendido mientras exista tensión de entrada. Un indicador adicional señala el correcto funcionamiento de la tarjeta, que permanece encendido si la tarjeta y la CPU trabajan sin falla alguna.
- d) Aislamiento: Las entradas de la mayor parte de los PLCs son optoaisladas para que, en caso de sobretensiones externas, el daño causado no afecte más que a ese punto, sin perjudicar al resto de la tarjeta ni propagarse al resto del PLC.
- e) Circuito lógico de entrada: Es el encargado de informar a la CPU el estado de la entrada cuando ésta la interroga.

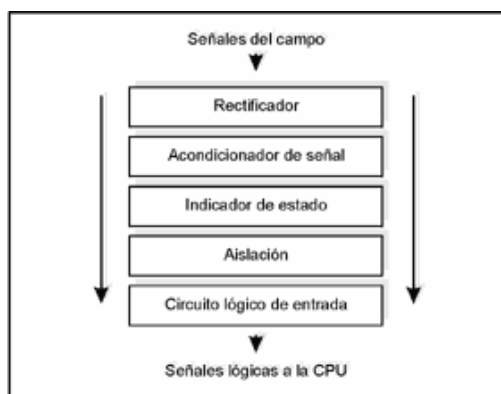


Fig. 5.26 Diagrama en bloques de una entrada discreta.

El paso de la señal por todos esos bloques insume un tiempo que se conoce como tiempo de respuesta de entrada. Este tiempo debe tenerse en cuenta en el diseño del sistema. Un aspecto a analizar es el mínimo tiempo de permanencia o ausencia de una señal requerida para que el PLC la interprete como un 0 o un 1. Si una variable de proceso pasa al estado lógico 1, y vuelve al estado 0 en un tiempo menor al de respuesta de la entrada, es posible que el PLC no llegue a leerla. Por ejemplo: si una tarjeta tuviera un tiempo de respuesta de 10 mseg no será capaz de identificar una señal que presentó un pulso de menos de 10mseg. Para aquellos casos que se produzca ésta situación, se requieren tarjetas con capacidad de retención, en las que el estado lógico es sostenido por un período mayor que el pulso de la señal. Como referencia, podemos indicar que el tiempo de respuesta en la lectura de un contacto que no se abre puede no ser el mismo que el tiempo de respuesta en la lectura de un contacto que se cierra. En general, el tiempo de respuesta de una tarjeta discreta de entradas no es superior a los 20 mseg pudiendo ser de unos pocos milisegundos.

### Salidas discretas

La estructura de una salida discreta típica es la siguiente (fig. 5.27):

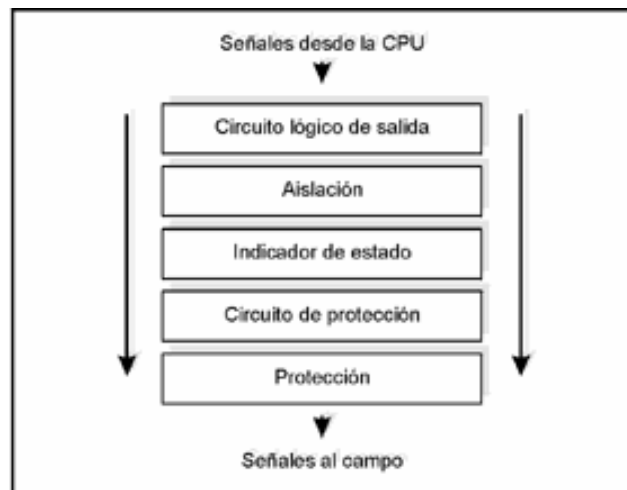


Fig. 5.27 diagrama en bloques de una señal discreta.

- a) Circuito lógico de salida: Es el receptor de la información enviada por la CPU.
- b) Aislamiento: Cumple una función análoga a la del aislamiento de una tarjeta de entradas.
- c) Indicador de estados: Se utiliza uno por canal, que enciende sólo cuando la salida está cerrada. Un indicador adicional indica el correcto funcionamiento de la tarjeta, permaneciendo encendido si la tarjeta y la CPU se comunican sin falla alguna.
- d) Circuito de conexión: Es el elemento de salida a campo, que maneja la carga conectada por el usuario. Se dispone de tres opciones de circuitos de conexión: transistor, triac y relé.

- e) Protección: Puede consistir en un fusible en serie con los contactos de salida, una protección electrónica por sobrecarga, o circuitos R-C para eliminar picos generados por la naturaleza de la carga, en caso de que ésta sea inductiva y la alimentación sea en CC. Un aspecto a considerar es que, dependiendo del modelo de módulo utilizado, se puede disponer de un fusible por módulo o por grupos de puntos de un módulo. En este caso los puntos de un módulo no están protegidos individualmente, por lo que en caso que actúe la protección de fallas en un punto, quedarán inhabilitadas todas las salidas del grupo.

En forma similar a las entradas, se denomina tiempo de respuesta de salida al tiempo que insume una señal para pasar por todos los bloques. Las alternativas de selección para la conexión del circuito son tres: salidas por relé, por triac, o por transistor. Las salidas de relé pueden utilizarse en cargas de CA o CC, las del transistor en CC, y las del triac sólo en CA. En todos los casos debe verificarse que la potencia sea compatible con el circuito elegido. Las salidas por triac o transistor se prefieren a las de relés en los casos que requieren mayor velocidad de operación. El tiempo típico de respuesta para un transistor es de 1 mseg tanto para conexión como para desconexión, mientras que la salida del triac se aproxima a los 10 mseg. Adicionalmente, los módulos de salida a triac o transistor suelen ser de mayor densidad que los de salida a relé, redundando en diseños más económicos. Los módulos con salida por relé tienen mayor flexibilidad, en cuanto a que manejan CA o CC indistintamente. Además, pueden manejar cargas mayores que un módulo con salida por triac o transistor. Como desventajas, los relés son elementos mecánicos sujetos a desgastes, son más lentos (tiempo de conexión y desconexión = 20 mseg), y tienen un mayor consumo, por lo que pueden requerir fuentes de alimentación adicionales.

Una consideración sobre el diseño de los módulos de salida discreta es la simultaneidad de las cargas. En general, la tarjeta tiene una capacidad máxima de un punto multiplicada por la cantidad de puntos del grupo. Una cuestión importante en la instalación son los protectores cuando se conectan cargas inductivas en CC, para limitar los picos producidos por éstas. Estos picos pueden dañar la salida, por lo que deben ser evitados. Para ello se utiliza un diodo conectado entre los bornes de conexión de la carga.

### **Entradas analógicas**

El PLC fue originalmente diseñado para el control de estados lógicos y es un equipo de tecnología digital. Por lo tanto la única manera de trabajar que tiene con valores analógicos es que éstos se representen internamente por medio de números binarios. La principal tarea de una tarjeta de entrada analógica es la de convertir un valor análogo en formato binario, por medio de un conversor A/D. Las entradas analógicas convierten una señal analógica en un número binario (fig. 5.28). Una entrada analógica con un conversor de 8 bits puede dividir un rango de 4 a 20 mA c.c. en 256 valores.

El componente más caro de una entrada analógica es el conversor A/D, y éste resulta más caro cuando mayor resolución tiene. Por ello, los PLCs más pequeños usan conversores de 8 bits, mientras que los medianos y grandes llevan de 10 a 16 bits. Una forma de eliminar costos es utilizar un solo conversor A/D que convierte todas las señales de entrada del módulo, una a la vez, y las almacena en una memoria temporaria (buffer) alojada en el mismo módulo, desde donde la CPU lee los valores. Para ello se requiere un circuito que seleccione un canal por vez, enviando su señal al conversor A/D. Este circuito se denomina multiplexor.

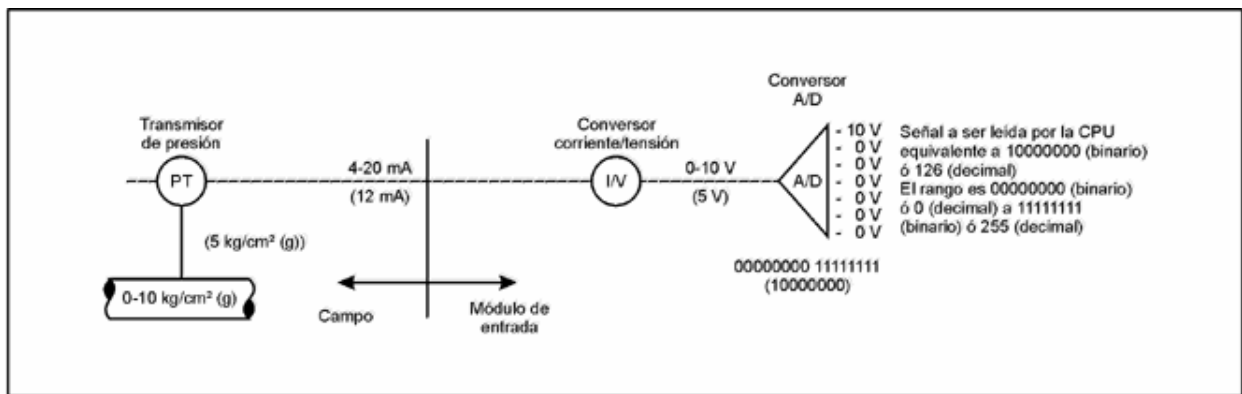


Fig. 5.28 En señal analógica se indica el rango de cada componente del circuito y el valor que toma la señal si la presión de proceso es de  $5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (g)}$ .

En la estructura de una entrada analógica podemos distinguir las siguientes partes básicas (fig. 5.29):

- Protección: Impide daños al módulo y al resto del PLC por conexión con polaridad invertida o fuera del rango permitido.
- Filtro analógico: Elimina posibles ruidos que ingresen por la instalación. Básicamente consiste en un filtro pasabajos, que permite que las señales de baja frecuencia lleguen al convertor A/D, evitando el paso de señales de alta frecuencia. Este filtro es necesario, ya que en caso contrario podrían aparecer señales de alta frecuencia enmascaradas como señales de baja frecuencia.
- Multiplexado: Esta etapa consiste en un selector que envía un canal de entrada por vez al convertor A/D.
- Convertor A/D: Es el encargado de transformar la señal analógica en un número binario interpretable por la CPU.
- Aislación: En algunos equipos se dispone de optoaisladores luego del convertor A/D, para separar la CPU del campo.
- Buffer: memorias donde se almacenan los valores que vienen del convertor, mientras éste opera sobre los demás canales. Aquí es donde la CPU lee los valores convertidos.

Los fabricantes ofrecen en su mayoría módulos con intensidades de 2, 4, 8 o 16 canales de entrada analógica. Evidentemente el hecho de que varios canales de una tarjeta utilicen un mismo convertor A/D lleva a un mayor tiempo de respuesta de la entrada. Este tiempo está relacionado con la cantidad de puntos de la tarjeta, y el tiempo que le insume al convertor A/D, a los optoaisladores y a otros componentes leer un punto. El tiempo de respuesta en algunos módulos puede estar en el orden de 100 mseg por punto, con lo que la actualización se disminuye a menos de 1 mseg por canal. Para la selección de la tarjeta apropiada se debe considerar el tiempo de actualización requerido por el proceso. Las señales de entrada pueden ser por tensión o por corriente; en éste último se utiliza una resistencia calibrada donde se mide la caída de tensión. Los valores más comunes de señal son 4 a 20 mA c.c., 1 a 5 VCD, -5 a +5 VCD ó 0 a 10 VCD.

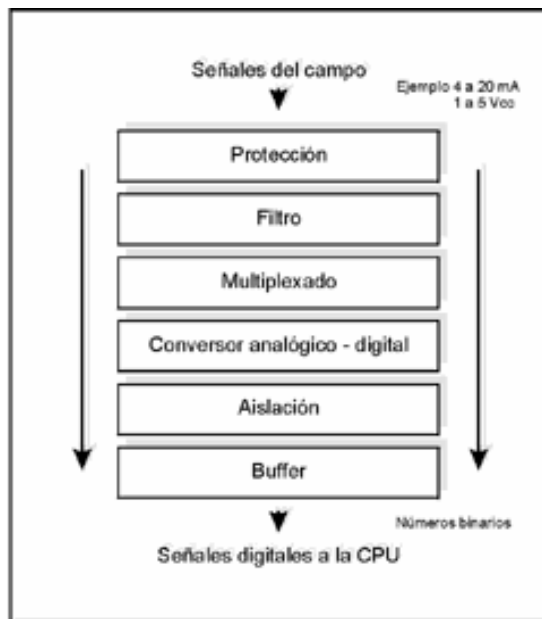


Fig. 5.29 Diagrama en bloques de una entrada analógica.

### Salidas analógicas

El concepto básico de funcionamiento es inverso al de una entrada analógica. Aquí la CPU emite un número binario a través del bus de datos, que debe convertirse en una señal analógica de corriente o tensión. Para las salidas analógicas valen las mismas consideraciones sobre resolución y exactitud explicadas para las entradas analógicas. A diferencia del módulo de entradas analógicas, es frecuente que en la de salida analógica se disponga de un conversor D/A por canal. Los módulos de salida analógica ofrecen 2, 4 ú 8 canales, en tensión o corriente. La composición en bloques de un módulo de salidas analógicas incluye (fig. 5.30):

Buffer: memoria donde la CPU escribe los valores binarios a convertir por el conversor, mientras éste opera sobre los demás canales.

- Aislación: Optoaislación para separar la CPU del campo.
- Conversor D/A: Es el encargado de transformar el número binario enviado por la CPU en una señal analógica.
- Protección: Se encarga de impedir daños al módulo por conexión con polaridad invertida o fuera del rango permitido.

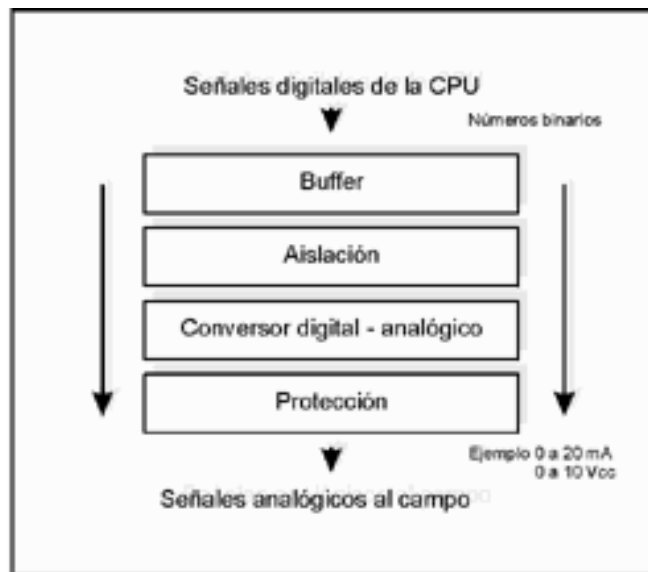


Fig. 5.30 Diagrama en bloques de una salida analógica.

### Entradas/Salida de palabras

Muchos PLCs pueden interpretar como números BCD (binary coded decimal) las señales presentes en grupos de entradas discretas, o decodificar valores numéricos desde la CPU y convertirlos en números BCD en salidas discretas. En la codificación BCD, cada cifra del sistema decimal es representada por un número binario de cuatro cifras, desde el 0000, hasta el 1001. Esto permite conectar al PLC dispositivos tales como llaves BCD, teclados de ingresos de datos y displays que utilicen ésta codificación. Para la implementación de E/S de tipo BCD pueden utilizarse módulos de E/S discretas, con una adecuada programación, o módulos especiales diseñados para este fin. El multiplexado hace posible conectar varias llaves BCD a un mismo módulo. Las líneas de datos de todas las llaves se conectan a los mismos bornes y el común de cada llave a un borne en particular para cada una. El circuito del multiplexado se encarga de enviar tensión a cada llave de a una por vez, y guardar su valor en una memoria buffer.

### Entradas/Salidas especiales

Dentro del sistema de E/S de un PLC se pueden instalar módulos dedicados a tareas especiales que no pueden ser resueltas eficientemente por la CPU. Así que podemos encontrar algunos módulos denominados especiales, como los siguientes:

- a) Entrada de termopares: Incluye un microprocesador para linealización de la señal de entrada, y una junta fría para compensación.
- b) Entradas de RTD: Incluye un microprocesador para linealización de entrada.
- c) Entrada de pulsos de alta velocidad: El tiempo que le insume a la CPU resolver el programa del usuario hace que ésta no pueda leer pulsos de alta velocidad. Estos módulos poseen un procesador dedicado a ésta función y pueden dar señales al campo y a la CPU al alcanzar valores prefijados.

Las frecuencias que puedan leer van a 100 KHz y sirven para conectar encoders, caudalímetros a turbina, etc. En muchos casos, la entrada puede discriminar el sentido de giro y efectuar conteos ascendentes y descendentes. Generalmente, éste módulo cuenta con algunas entradas de pulsos, entradas discretas para la habilitación y vuelta a cero del contador (reset), y salidas discretas comandadas por éste módulo, accionadas cuando el total alcanza un valor prefijado.

Todos estos módulos son desarrollos especiales de los de E/S discretas y analógicas convencionales. Si bien estos módulos tienen procesador propio, se diferencian de los módulos inteligentes en que están diseñados para una función específica, definida por el tipo de módulo. Mientras que los módulos inteligentes tienen mayor flexibilidad. Desde el punto de vista de la CPU, el direccionamiento de las E/S no cambia, ya que no depende del tipo de módulo.

### **Módulos inteligentes**

Con el objeto de descargar a la CPU de tareas que le insumen un tiempo que no es aceptable, o para las que no está preparada, se dispone de módulos inteligentes. Algunos de estos módulos cuentan con sus propias E/S, mientras que los otros aprovechan la estructura de E/S que ofrece el PLC. Una característica de éstos módulos es que su funcionamiento es independiente de la CPU, por lo que, en caso de falla de ésta, los módulos siguen operando. Los módulos inteligentes poseen un procesador propio que funciona en forma asincrónica con el de la CPU. Ambos procesadores intercambian datos a través de la capacidad del módulo inteligente de leer y escribir ciertas posiciones de la memoria de la CPU principal. En algunos casos, la cantidad de datos que un módulo inteligente puede intercambiar con la CPU principal está limitada por el diseño del módulo.

Algunos de estos módulos inteligentes son:

- a) **Módulo BASIC:** Programable en lenguaje BASIC, posee uno o varios puertos de comunicación RS232 ó RS422. Se puede utilizar para resolver ecuaciones complejas, para estadísticas, para adquisición de datos, como ingreso de datos desde lectores de código de barras, para ingreso de datos manuales, para almacenamiento de recetas, impresión de reportes, etc. También se utilizan para la implementación de protocolos de comunicaciones que permiten la comunicación del PLC con los otros equipos digitales. Esta aplicación es útil en aquellos casos en que el PLC no disponga del software de aplicaciones, ya que resulta en una implementación razonablemente económica. En estos casos se programa el protocolo en este módulo utilizando el lenguaje BASIC, En general, este módulo no cuenta con canales de E/S propios, excepto los puertos de comunicaciones. Por otra parte, en algunos casos este módulo incluye un módem o fax-módem para comunicarse con otros equipos digitales remotos.
- b) **Módulo PID:** Este módulo resuelve uno o varios lazos PID en forma separada de la CPU principal. La configuración de los lazos se efectúa desde la CPU principal, o directamente a través de un puerto RS232 ó RS422 que el módulo posee. A este puerto se conecta una PC con el software adecuado, permitiendo la configuración con independencia de la CPU principal. Este módulo descarga a la CPU principal del cálculo del algoritmo PID, que insume un tiempo importante, haciendo más lento el tiempo de barrido de la CPU. Adicionalmente, la distribución de varios lazos PID en varios módulos disminuye la posibilidad de falla de varios lazos. Algunos módulos cuentan con canales de E/S analógicos y discretos propios, haciéndolo totalmente independiente del resto del PLC. Otros módulos PID utilizan la estructura de E/S del PLC.



- c) **Módulo ASCII:** Almacena mensajes que pueden emitirse a través de sus puertos de comunicaciones por orden del programa de la CPU principal. Ante determinados eventos como alarmas o simplemente a requerimiento del usuario, el programa de la CPU principal le ordena a este módulo emitir uno de los mensajes prealmacenados en su memoria. Estos mensajes pueden contener texto fijo, datos variables tomados de la memoria de la CPU, hora y fecha, etc., y pueden emitirse en displays alfanuméricos, impresoras, terminales, etc.
- d) **Módulo de posicionamiento:** Es una combinación de un módulo contador de alta velocidad con salidas para motores. Se utilizan para resolver lazos de posicionamiento en aplicaciones de control numérico o robótica.
- e) **Módulo Computador Integrado:** Son verdaderas computadoras, con teclado, pantalla, impresora, conexión en red y almacenamiento masivo (en discos rígidos o en discos RAM que emulan un disco rígido utilizando memoria RAM). Pueden correr prácticamente cualquier programa que corra en computadoras comerciales. Existen casos en que utilizan sistema operativo DOS, o variantes de UNIX.
- f) **Módulos de comunicaciones:** Son módulos inteligentes especialmente dedicados a tareas de comunicaciones.

Distinguiremos tres casos típicos de módulos de comunicaciones:

- a) **De propósito general:** Para conectar computadoras, con fines de programación, su previsión, adquisición de datos, etc. Son de tipo RS232 ó RS422. Utilizan protocolos relativamente sencillos, de baja velocidad y de tipo maestro-esclavo. En general, el protocolo para acceso a los datos contenidos en la CPU es abierto (su especificación está disponible a cualquiera que la desee). No ocurre lo mismo con el protocolo de programación, que ni siempre es abierto. Este tipo de comunicación se incluye en muchos casos en la CPU. Ejemplo: ModBus de Modicon.
- b) **Peer to peer:** Estos protocolos son de mayor velocidad y sofisticación que los anteriores. Permiten el intercambio de datos, la programación remota de CPUs y otras funciones. Las estaciones tienen todas la misma jerarquía, no existiendo una estación que concentre funciones especiales desde el punto de vista de las comunicaciones. Este aspecto es una clara diferencia respecto de los protocolos de propósito general, que suelen ser de tipo maestro-esclavo. Utilizan protocolos propietarios. Ejemplos: ModBus Plus de Modicon y Data Highway II de Allen Bradley.
- c) **Redes abiertas:** Permiten la integración de PLCs, computadoras y equipos especiales de distintos proveedores por medio de un protocolo abierto. Por el momento, las redes abiertas tienen mucho de expresión de deseo y poco de realidad, aún cuando existen esfuerzos para generar una permita este nivel de conectividad. Ejemplos: MAP, ProfiBus, ISP.

## **Programación**

Una de las razones de la rápida difusión de los PLCs es su gran flexibilidad, que permite adaptarlos a gran cantidad de aplicaciones, muy dispares entre sí. La base para la programación de los PLCs existe desde 120 años antes que los PLCs mismos. En efecto, la programación de PLCs se basa en el álgebra booleana, desarrollada en 1849 por George Boole. Lejos de buscar una aplicación industrial, el álgebra booleana tiene como objetivo ser una herramienta auxiliar de filosofía, utilizadas para el análisis de sentencias lógicas. Las sentencias lógicas son aquellas que solo pueden ser verdaderas o falsas.

El concepto de sentencias que sólo pueden ser verdaderas o falsas es aplicable a varias cosas que pueden estar en uno de dos estados: Una luz puede estar encendida o apagada, un motor puede estar funcionando o parado, un contacto puede estar abierto o cerrado, etc. Resulta pues interesante analizar algunos aspectos de detalle del álgebra booleana, para luego aplicarla a la programación de PLCs.

### Álgebra booleana

La definición completa y estricta del álgebra booleana y sus postulados, leyes y propiedades escapan a la intención de este trabajo, por lo que sólo presentaremos algunas características importantes. Una primera característica es que las variables pueden tomar solo dos valores, 0 o 1. Definimos a una variable que tiene esta característica como variable booleana. Se definen dos operaciones binarias: La suma booleana y el producto booleano. La suma booleana se representa con el símbolo +, mientras que el producto se representa por medio de un punto, que a veces se omite entre las variable ( $A.B = AB$ ). Estas operaciones son descritas por las tablas de verdad, las que se muestran en la figura 5.31. Estas tablas muestran el resultado que toman estas operaciones en función de los operandos. Se define también una operación singular: el complemento booleano, cuya tabla de verdad también se muestra en la figura 5.31. Estas operaciones cumplen con una serie de postulados y leyes: propiedades asociativa y conmutativa de la suma y el producto booleano, propiedad de la suma respecto del producto, propiedad distributiva del producto de la suma, leyes de absorción, ley de Morgan, etc. (fig. 5.32).

Esta representación del álgebra booleana respeta la simbología matemática encontrada en los libros de texto. También se utiliza con frecuencia un método gráfico, denominado lógica de compuertas (fig. 5.33). Se utiliza un símbolo denominado compuerta Y para la representación del producto booleano, y otro símbolo denominado compuerta O para la representación de la suma booleana. Un tercer símbolo denominado compuerta NO representa el complemento booleano. Este método permite una presentación visual de un problema lógico.

|               |   |   |                   |   |   |                      |   |
|---------------|---|---|-------------------|---|---|----------------------|---|
| $a + b = c$   |   |   | $a \cdot b = c$   |   |   | $\bar{a} = b$        |   |
| a             | b | c | a                 | b | c | a                    | b |
| 0             | 0 | 0 | 0                 | 0 | 0 | 0                    | 1 |
| 0             | 1 | 1 | 0                 | 1 | 0 | 1                    | 0 |
| 1             | 0 | 1 | 1                 | 0 | 0 |                      |   |
| 1             | 1 | 1 | 1                 | 1 | 1 |                      |   |
| Suma booleana |   |   | Producto booleana |   |   | Complemento booleano |   |

Fig. 5.31 Operaciones básicas del álgebra booleana.

|  |
|--|
| $a + (b + c) = (a + b) + c$ $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$ <p><b>Propiedad asociativa de la suma y el producto booleano</b></p> |
| $a + b = b + a$ $a \cdot b = b \cdot a$ <p><b>Propiedad conmutativa de la suma y el producto booleano</b></p>                                |
| $a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$ <p><b>Propiedad distributiva de la suma respecto del producto</b></p>                              |
| $(b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$ <p><b>Propiedad distributiva del producto respecto de la suma</b></p>                                  |
| $a + a \cdot b = a$ $a \cdot (a + b) = a$ <p><b>Ley de absorción</b></p>   |
| $a + b + c + \dots = a \cdot b \cdot c \cdot \dots$ $a \cdot b \cdot c \cdot \dots = a + b + c + \dots$ <p><b>Regla de De Morgan</b></p>     |

Fig. 5.32 Algunos postulados y leyes del algebra de Boole.

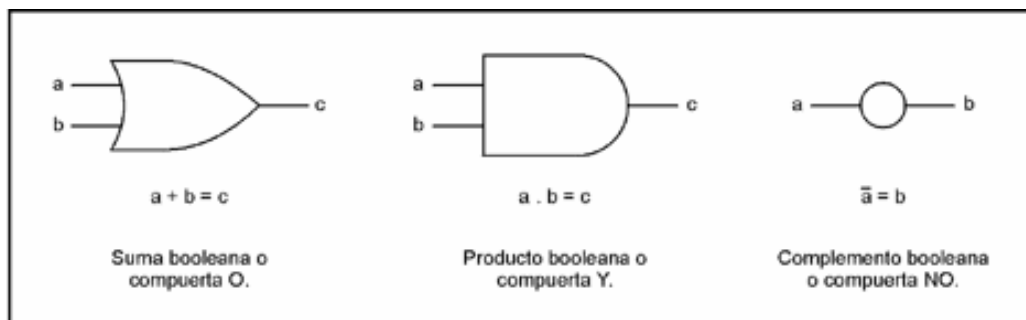


Fig. 5.33 Compuertas lógicas.

## Operaciones adicionales requeridas para aplicaciones industriales

Las operaciones definidas para el álgebra booleana son esenciales para la implementación de una aplicación en un PLC, pero con frecuencia no son suficientes. Las instrucciones que usualmente se encuentran en un PLC se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- a) Operaciones básicas: Este grupo comprende las operaciones booleanas básicas, suma (o), producto (y) y complemento booleano (NO), así como otras derivadas de éstas básicas. Tanto operandos como resultados son variables booleanas.
- b) Temporizadores y contadores: En su forma básica, estas instrucciones permiten activar o desactivar un dispositivo luego de un determinado tiempo o el conteo de eventos. Por ejemplo, un temporizador se activará frente a un contacto de entrada que se cierra, contará un tiempo predefinido y cerrará un contacto de salida pasado ese tiempo. A partir del temporizador básico es posible implementar otros temporizadores. Temporizadores y contadores son funcionalmente similares, diferenciándose en que los temporizadores basan su acción en un determinado tiempo, mientras que los contadores basan su acción en el conteo de un evento que se repite. Un aspecto a considerar es que temporizadores y contadores combinan variables booleanas con variables no booleanas. Mientras la entrada y salida de un temporizador son variables booleanas, el tiempo prefijado es una variable no booleana (por ejemplo 15 segundos). El concepto es análogo para contadores.
- c) Operaciones aritméticas: Hemos mencionado que un PLC puede tener entradas y salidas analógicas, así como contadores y temporizadores. Con frecuencia es necesario realizar una operación aritmética entre esas variables, por lo cual se cuenta en general con las cuatro operaciones básicas: suma, resta, multiplicación y división. Los PLCs de mayor capacidad agregan otras funciones, como logaritmos, raíz cuadrada, funciones trigonométricas, etc. Evidentemente, estas operaciones tienen operandos y resultados no booleanos.
- d) Comparadores: La comparación entre dos variables tiene en general tres variantes: igual a ( $=$ ), mayor que ( $>$ ) y menor que ( $<$ ). Al igual que en las operaciones aritméticas, los operandos son números booleanos. El resultado de la comparación es booleano (verdadero o falso).
- e) Transferencia de datos: Estas operaciones permiten el movimiento de datos dentro del PLC.
- f) Control del flujo del programa: Las funciones descritas hasta ahora actúan sobre variables que existen en la memoria del PLC. En cambio, las funciones de control de flujo del programa actúan sobre la forma en que éste es ejecutado. Incluyen funciones tales como marcas de comienzo y final del programa, saltos condicionados, saltos incondicionados, llamado a subrutinas, etc.

## Representaciones utilizadas en aplicaciones industriales

Hasta el momento hemos visto como puede utilizarse una expresión booleana para la representación de un problema de aplicación industrial, como el arranque y paro de una bomba. El problema fue presentado por medio de una operación algebraica y por medio de un diagrama de compuertas. Si bien éstas dos representaciones cubren las operaciones básicas presentes en un PLC, (O, Y y NO), no cubren muchas otras funciones como las descritas anteriormente. Las diversas formas de representación utilizadas en aplicaciones industriales cubren las operaciones básicas, así como muchas otras de las funciones descritas.

Las representaciones más usuales para la programación de un PLC son:

- a) Diagramas lógicos.
- b) Listados de instrucciones.
- c) Lógica en escalera.
- d) Lenguajes de alto nivel.

Estas distintas representaciones se conocen como lenguajes de programación de un PLC. El lenguaje utilizado para la programación de un PLC depende de su diseño, por lo que varía en los distintos equipos. Algunos equipos permiten programar indistintamente en uno u otro lenguaje, siendo posible la traducción de un programa de aplicación de un PLC a otro. Para poder implementar una aplicación en un PLC se debe conocer el lenguaje de programación que éste utiliza. También se debe estudiar la forma en que se denominan las variables en la memoria del mismo. Por ejemplo, para denominar las E/S, algunas marcas mencionan un número que indica la posición del módulo en el chasis o base de montaje, seguido de otro número que indica el número de borne del campo correspondiente. Otros identifican con una X las entradas y con una Y las salidas, seguidas de un número que identifica la dirección de memoria que contiene a su estado. En los equipos pequeños sólo se utilizan números.

### **Configuración, instalación y puesta a punto**

La configuración del controlador lógico programable es un proceso mediante el que se determina como y donde se sitúan los distintos componentes del sistema de control. La configuración dependerá de la tarea de control propiamente dicha y del tipo de control que se haya decidido y contempla tanto los elementos del controlador lógico programable como sus periféricos. Durante la elaboración del algoritmo de control, se han determinado las entradas y salidas, tanto discretas como analógicas, y estas se han relacionado mediante diagramas o esquemas lógicos: la cantidad y tipo de las E/S determina qué componentes son necesarios. La mejor manera de realizar la configuración es confeccionar un mapa de direccionado, en el que mediante una representación de las estructuras de E/S se indica qué componentes se ubican en el local junto a la unidad central y cuales se sitúan en posiciones remotas. Concluida la configuración del sistema, pueden comenzar simultáneamente dos trabajos: la programación y la instalación.

### **Instalación**

Dadas las características constructivas y de diseño de los controladores lógicos programables, su instalación es viable en prácticamente cualquier ambiente industrial siempre que no se sobrepasen las especificaciones dadas por el fabricante. No obstante, existen ciertas recomendaciones prácticas para asegurar un correcto funcionamiento del sistema, que atañen principalmente a las condiciones de temperatura y humedad y a la inmunidad frente a interferencias eléctricas. En general el controlador lógico programable se montará en un armario de maniobra de dimensiones adecuadas para contener con holgura los componentes del equipo y el resto de elementos, como interruptores/seccionadores y fuentes de alimentación, circuitos de protección, conductos de cableado, etc. se recomienda el empleo de armarios metálicos ya que minimizan los efectos de la radiación electromagnética generada por equipos de conmutación instalados en las inmediaciones. Para la instalación, se seguirán las norma y reglamentos vigentes de aplicación habitual en cualquier instalación eléctrica de control. La convección natural es suficiente ya que la mayoría de los fabricantes preparan los controladores lógicos programables para que trabajen a una temperatura máxima de 60°.

## **Situación de los componentes**

Los componentes del controlador lógico programable se montaran siguiendo las recomendaciones del fabricante y en todo caso se pueden seguir las siguientes pautas de aplicación general:

- a) Es recomendable el montaje vertical de los componentes para facilitar la convección y disipación del calor.
- b) Las fuentes de alimentación deberán ocupar una posición por encima del resto de componentes y en la parte superior del armario, ya que son generadores de calor.
- c) La unidad central ocupará una posición adyacente o por debajo de las fuentes de alimentación, en la zona superior del armario, quedando a una altura que facilite su inspección.
- d) Los racks de E/S estarán dispuestos de la forma más conveniente para el acceso y cableado, en el espacio libre.
- e) Se dejarán espacios suficientes entre los componentes y entre estos y la envolvente para una adecuada disipación del calor.
- f) Para el resto de componentes del sistema, se recomienda su instalación en posiciones lo más alejadas del equipo que sea posible, principalmente si se trata de componentes electromecánicos, para minimizar las interferencias electromagnéticas.

## **Cableado**

Siempre que sea posible, en la configuración del sistema se intentará agrupar los módulos por categorías en cuanto a entradas/salidas, tensión alterna o continua, señales discretas o analógicas. Una configuración por grupos permite un cableado racional y una necesaria segregación de los cables de señal débil respecto a los que alimentan cargas y de los de comunicaciones. Siempre que sea posible se separarán los cables de CC de los de CA, para minimizar las interferencias producidos por la conmutación de cargas y también los cables de interconexión de racks y de comunicaciones se separan completamente de otros.

## **Puesta a tierra**

Se seguirá lo especificado en la normativa vigente y las recomendaciones del fabricante, pero hay que recordar que cada una de las estructuras (racks) del controlador lógico programable, debe estar unida mediante un cable independiente de sección adecuada, a la pletina de tomas de tierra del armario. Nunca deben compartirse circuitos de tierra entre racks o con otros componentes del sistema.

## **Circuitos de seguridad**

Los dispositivos de paro de emergencia se instalarán con independencia del controlador lógico programable, para permitir el paro del sistema aún en caso de avería del mismo; en general, deben actuar sobre un contactor de maniobra que corta la alimentación a las cargas de la instalación.

## **Circuito de la disposición de E/S**

En general, o por lo menos para los dispositivos de salida, es deseable que exista un contactor de maniobra que permita cortar la alimentación de esos elementos y que hará posible trabajar con seguridad en la puesta a punto o investigación de averías, con el controlador lógico programable alimentado.

### **Alimentación**

Se recomienda el empleo de transformadores separadores de alimentación ya que proporcionan una buena protección frente a interferencias introducidas en las líneas por la conmutación de cargas importantes existentes en la instalación. Además es deseable que los dispositivos de E/S se alimenten de la misma línea que el controlador lógico programable, ya que la fuente de alimentación del mismo posee circuitos de detección de nivel de tensión que provocan la secuencia de paro del equipo en caso de anomalía en la red, y de este modo se evitarán las falsas lecturas de señal de entrada. Algunos controladores lógicos programables incorporan una fuente auxiliar de 24 VCD para uso externo de los dispositivos de entrada sobre módulos de entrada a 24 VCD. Hay que vigilar que no supere la capacidad de esta fuente, particularmente cuando se alimentan de ella dispositivos estáticos (detectores inductivos, fotoeléctricos, etc.) y deben seguirse las recomendaciones de cableado del fabricante para minimizar la posibilidad de interferencia sobre estos circuitos. En caso de que se prevea la existencia de variaciones de tensión en la línea de alimentación que puedan superar los márgenes de trabajo especificados para el equipo, habrá que instalar transformadores estabilizadores, para evitar frecuentes paros del sistema; en estas circunstancias es mejor alimentar las salidas del controlador lógico programable directamente desde la línea de entrada para descargar el transformador permitiendo que sea de una menor potencia.

### **Consideraciones sobre la instalación de E/S**

Cuando se emplean dispositivos electrónicos de detección como elementos de entrada, hay que tener en cuenta la corriente residual de los mismos (detectores de 2 hilos de corriente alterna). En general, el problema se reduce a que el indicador de entrada se ilumina tenuemente, pero en ocasiones, cuando la corriente residual es elevada, o dependiendo de los umbrales de disparo del circuito de entrada pueden darse señales falsas. Cuando los dispositivos de entrada trabajan a niveles de señales débiles como TTL, analógicas, termopares, etc., hay que realizar conducciones de cableado separadas para evitar el problema de la inducción. Además, para evitar las interferencias electromagnéticas, se recomienda la instalación mediante cables trenzados y apantallados.

Los circuitos de salida controlan habitualmente cargas inductivas (solenoides), que provocan la aparición de picos de tensión cuando se interrumpe el circuito de alimentación (descarga del circuito inductivo). Estas crestas, que pueden alcanzar varios centenares de voltios, deben ser suprimidas, ya que pueden averiar los circuitos de salida (estáticos) y provocar interferencias en todo el sistema. Los fabricantes suelen incorporar supresores de transitorios en los circuitos de los módulos de salida pero a veces no son suficientes para evitar anomalías.

En general los módulos de salida incorporan circuitos fusibles de protección dimensionados adecuadamente a las características nominales de la salida (transistor, triac); si no es así, hay que instalarlos en el exterior (regleta de bornes) teniendo en cuenta las especificaciones del fabricante ya que no protegerán adecuadamente la salida en caso de sobrecarga si no están bien dimensionados.

## **Puesta a punto**

Una vez montado e instalado el equipo y cargado el programa en la memoria de la Unidad Central, hay que poner en marcha el sistema para comprobar que responde adecuadamente a la descripción de la tarea de control original, y en su caso realizar las correcciones y mejoras oportunas.

Antes de dar alimentación, hay que hacer una serie de comprobaciones rutinarias pero importantes:

1. Comprobar que todos los componentes del controlador lógico programable están en su lugar (el que corresponde a la configuración) perfectamente insertados en sus conectores y asegurados.
2. Comprobar que la línea de alimentación está conectada a los correspondientes terminales de la fuente de alimentación del equipo, y que se distribuye adecuadamente a los módulos de entrada y salida (si procede).
3. Verificar que los cables de interconexión entre racks están correctamente instalados.
4. Verificar que los cables de conexión a periféricos están correctamente instalados.
5. Verificar que las conexiones de los bornes de E/S están firmes y corresponden al esquema de cableado.
6. Verificar que las conexiones a los módulos de E/S están firmes y corresponden al esquema de conexiones.

Previo al ensayo de funcionamiento según lo programado, hay que comprobar que los dispositivos de E/S funcionan correctamente, de tal forma que:

1. Con el equipo en PARO (STOP, HALT, DISABLE, TEST, etc. dependiendo del modelo) aplicar tensión al sistema.
2. Verificar que los indicadores de diagnóstico de la Unidad Central reflejan una situación correcta.
3. Comprobar que los paros de emergencia actúan correctamente.
4. Accionar los dispositivos de entrada manualmente y verificar que su estado es registrado por el controlador lógico programable; el funcionamiento se puede seguir en los indicadores de los módulos y también se puede seguir visualizando la tabla de E/S mediante un equipo de programación.

Para la comprobación de los dispositivos de salida, hay que cortar la alimentación de las cargas que pudieran dar lugar a situaciones peligrosas y verificar con el procesador en MARCHA (RUN) que las salidas se activan. Esta comprobación resulta más fácil si se utiliza un terminal de programación en el modo "forzado de E/S" para activar o desactivar las salidas una a una. Una vez finalizadas todas las comprobaciones anteriores, hay que introducir el programa en la memoria de la Unidad Central y dar alimentación al sistema.



Se recomienda que siempre que sea posible, las pruebas de funcionamiento se hagan por áreas, particularmente si se trata de sistemas grandes, dejando fuera de servicio los componentes de las áreas que no se prueban; esto puede realizarse cortando la alimentación de campo de los racks de E/S o inhibiendo su funcionamiento. Verificadas y corregidas las distintas secuencias, el sistema puede arrancar en automático debiendo funcionar correctamente si todas las comprobaciones se han efectuado con éxito. Las correcciones efectuadas, tanto en la instalación como en el programa deben ser documentadas inmediatamente, y se obtendrán copias del programa definitivo (copia, en disco o cinta) tan pronto como sea posible.

### **Identificación y resolución de averías**

Aunque los controladores lógicos programables son equipos robustos y bien adaptados al medio industrial, es necesario establecer ciertas rutinas de mantenimiento preventivo para disminuir la probabilidad de fallo o avería. Unas pocas operaciones de mantenimiento, programadas de forma regular harán que el sistema esté disponible completamente por largos períodos de tiempo.

### **Inspección periódica de la Unidad Central y Sistema de E/S**

Se recomiendan las siguientes consideraciones:

- a) Observación de los indicadores de diagnóstico del procesador.
- b) Cambio de las baterías antes de que se cumpla la fecha límite para su sustitución; en todo caso existe un indicador de "batería baja" que puede registrarse en una secuencia de programa y generar una alarma.
- c) Observación de los indicadores de "fusible fundido" de los módulos de salida. En general la existencia de un fusible fundido se detectará por un funcionamiento anómalo del sistema pero para algunas cargas de funcionamiento esporádico esta circunstancia podría pasar desapercibida si no se inspecciona el módulo.
- d) Observar las conexiones en el cableado de los módulos de E/S y las conexiones de los módulos al rack para comprobar si siguen perfectamente asentados y sujetos.

Inspección periódica del armario:

- a) Comprobar periódicamente el estado de los filtros y limpiarlos de polvo para mantener una buena circulación.
- b) Hay que evitar que se produzca acumulación de polvo y suciedad en el controlador lógico programable. Para facilitar la disipación del calor generado por los circuitos, los componentes del equipo presentan aberturas que permiten la entrada de polvo, y en caso de acumulación, pueden resultar averiados los componentes electrónicos, ya que la suciedad evita la correcta disipación del calor y puede ser causante de cortocircuitos.
- c) Comprobar que no se está trabajando con equipos pesados generadores de interferencias electromagnéticas en las proximidades del armario, ya que esto podría afectar el funcionamiento del equipo.

Cuando se presenta una anomalía por vez primera en el funcionamiento del sistema hay que recordar que el programa ha estado respondiendo a las secuencias de control de forma satisfactoria hasta ese momento, y a menos que alguien lo haya manipulado, no puede ser el programa el causante del fallo. La anomalía entonces debe tener su origen en alguno de los componentes del sistema.

La identificación de un fallo es un proceso de acotación y eliminación, para el que son de gran ayuda los indicadores de diagnóstico del controlador lógico programable y los códigos de error que sea capaz de elaborar la Unidad Central.

Las averías que pueden considerarse graves son aquellas que pueden provocar el paro total del sistema, y afectarán en general a la Unidad Central (particularmente al procesador), módulos de memoria y módulos de interconexión de sistema de E/S.

Estas averías quedan reflejadas en los indicadores de diagnóstico del módulo afectado, y además el tipo de fallo puede ser identificado mediante el código de error generado a través de un equipo de programación o test; no obstante la resolución de la avería supone el cambio del módulo causante sin más posibilidad de intervención del usuario. Cuando se trata de funcionamientos anómalos estando el controlador lógico programable operando, hay que identificar la secuencia de control afectada y los dispositivos de E/S que intervienen en ella.

En cuanto a los módulos de entrada, el primer paso es observar si el indicador responde adecuadamente a las acciones del dispositivo de campo (pulsador, final de carrera, etc.). Si el indicador no responde a dichas acciones hay que verificar el nivel de tensión que aparece en los bornes de entrada del módulo; si es el adecuado es posible que exista una avería en el módulo y hay que sustituirlo. En ocasiones resulta ser el procesador el que no reconoce la señal de entrada, pudiendo estar la avería a nivel de módulo o del rack, aunque en este último caso quedarán afectados varios circuitos de entrada y salida.

En el caso de fallos en las salidas, si el indicador de la salida afectada evoluciona de acuerdo con las secuencias programadas, hay que observar los indicadores de fusible fundido y comprobarlo y si está en condiciones, verificar el cableado hasta el dispositivo de campo.

Si la salida no se activa de acuerdo con el programa, entonces el módulo o el circuito de salida en cuestión están averiados y hay que proceder a su sustitución. La sustitución de un módulo de E/S se hará con el equipo sin tensión aunque hay sistemas que permiten el cambio aún bajo tensión.

En cualquier caso es recomendable que se desconecte la alimentación de los dispositivos de campo afectados al retirar y reinsertar el módulo en el rack.

## 5.5 Otras clases de control

### 5.5.1 Control en cascada

Hasta ahora se ha visto sistemas en los que la regulación de estos se realiza a través de la realimentación de la señal del error al controlador, en donde debido al lazo de control, el error lograba anularse dentro de los límites de alcance de los instrumentos.

La principal ventaja de estos sistemas de control es que no se necesita un conocimiento a fondo de las características del proceso, pues el control se realiza tan solo con que exista una señal de error captada por el controlador para que este efectúe los ajustes necesarios. No obstante, a su vez, también es esta una gran desventaja; pues entre más tiempo se requiera para que el controlador capte la señal de error, más difícil será controlar el proceso con los sistemas clásicos de realimentación. En el tiempo muerto, en ese intervalo, las características del proceso pudieron haber cambiado. En otras palabras, mientras mayor retardo tenga un proceso, también con gran retraso actuarán los instrumentos de control, dejando un espacio de tiempo muerto donde nada puede hacerse mientras el proceso tal vez cambie o se afecte en algunas condiciones.

Una técnica empleada en casos donde es difícil mantener la variable en el punto de consigna (aún y cuando los ajustes del controlador son los más adecuados) debido a perturbaciones producidas en el tiempo muerto del proceso, es el control en cascada. Considérese la figura 5.34.

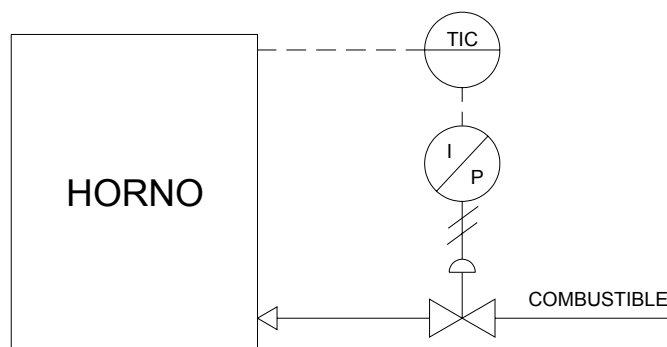


Fig. 5.34 Regulación de temperatura en un horno.

En el momento que la temperatura en el horno varía saliéndose del intervalo del punto de ajuste, el controlador recibirá esta señal de error y moverá la posición del vástago de la válvula para incrementar o disminuir la alimentación del combustible. En este caso, si todas las características del combustible (como es la presión y la viscosidad) y las del producto se mantienen constantes, el control será normalmente aceptable. Pero que pasa si alguna de estas características del combustible, por ejemplo, la presión varía repentinamente de manera no controlada. El flujo del combustible por consecuencia también variará en una misma proporción aunque la posición de la válvula sea la misma. Obviamente la temperatura por su parte también experimentará un cambio y al cabo de algún tiempo, que dependerá de la capacitancia, la resistencia y el

tiempo de transporte del sistema, este desajuste llegará hasta el controlador el cual moverá la válvula en el sentido adecuado de conforme con las acciones que se requieran.

En la gran mayoría de los casos se observó que después de que ocurrió esto, casi nunca, bajo este procedimiento, el controlador logró eliminar todas las perturbaciones provocadas por la variación de la presión del fuel y por lo tanto las características del producto no eran satisfactorias.

Este problema originó la creación del control de cascada. Y es que las perturbaciones en estas circunstancias eran absolutamente al azar y el tiempo de retardo entre el momento en que la señal de error llegaba hasta el controlador provocaba una continua corrección de la válvula, tornándose esto contradictorio para la correcta regulación.

La observación que llevo a resolver este problema fue la siguiente: la temperatura en el horno era debida a la transferencia de energía (calor) del combustible de alimentación al horno, entonces la temperatura era más bien regulada por el caudal del combustible, que por la simple posición de la válvula, y aunque esta posición daba una apertura o cierre al caudal del combustible, el flujo en si mismo no era directamente controlado, sino que solo se manipulaba en función de una posición de la válvula.

El flujo del combustible debía de ser también controlado. Lo que se hizo fue que a la señal de salida del controlador de temperatura (primario, porque es de interés principal) actuara como un punto de consigna de un instrumento que controle al caudal y cuya señal de salida ajuste la posición de la válvula; este segundo controlador (secundario) permitiría corregir rápidamente las variaciones de caudal provocadas por los cambios en la presión del fuel. De esta manera, el sistema tenía la posibilidad de que en todo momento la temperatura fuera bien regulada con el controlador primario.

Así, los dos controladores permanecen conectados en serie (cascada), manteniendo la temperatura constante gracias a que un controlador manda (el primario) y el otro obedece (secundario). Véase figura 5.35.

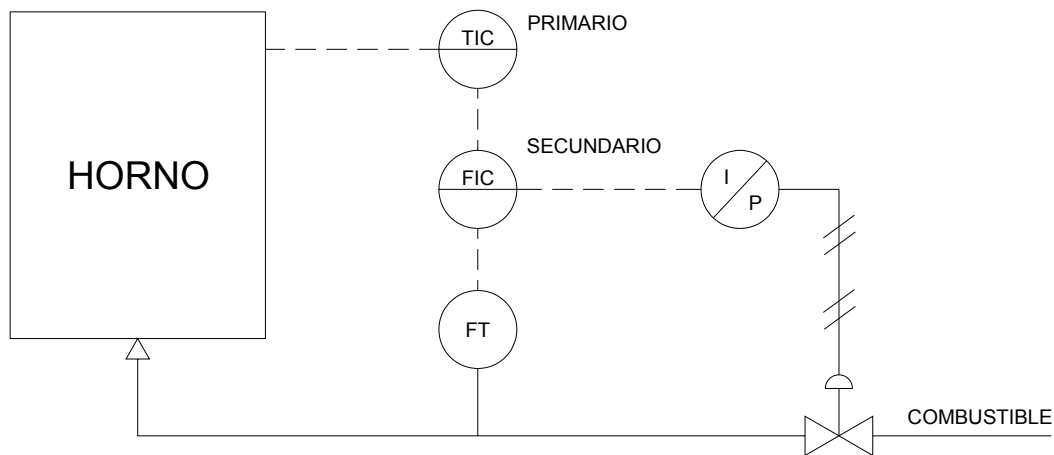


Fig. 5.35 Control en cascada en un horno.

Para que el control en cascada sea verdaderamente eficaz, la variable secundaria debe de ser la más adecuada; esto significa que debe de elegirse tomando en cuenta cuales son las distintas perturbaciones que se presenten y la forma en que afecten a la variable primaria y secundaria.

Asimismo, el punto de consigna de la variable secundaria debe de estar directamente relacionado con el de la variable primaria y será mejor si su relación es lineal, es decir, que un cambio en el punto de consigna del controlador primario equivalga a una variación proporcional en el controlador secundario.

### 5.5.2 Control de relación

Una forma típica de este sistema de control es en una caldera de vapor. La relación existente entre el flujo de aire/flujo de combustible, se ajusta mediante un control de relación.

Mientras el control en cascada es una forma de mejorar el control de una variable, el control de relación establece un control entre la relación de dos variables; estas dos variables son básicamente dos fluidos.

Este método logra controlar un caudal (secundario) con respecto a otro caudal (primario). Véase figura 5.36.

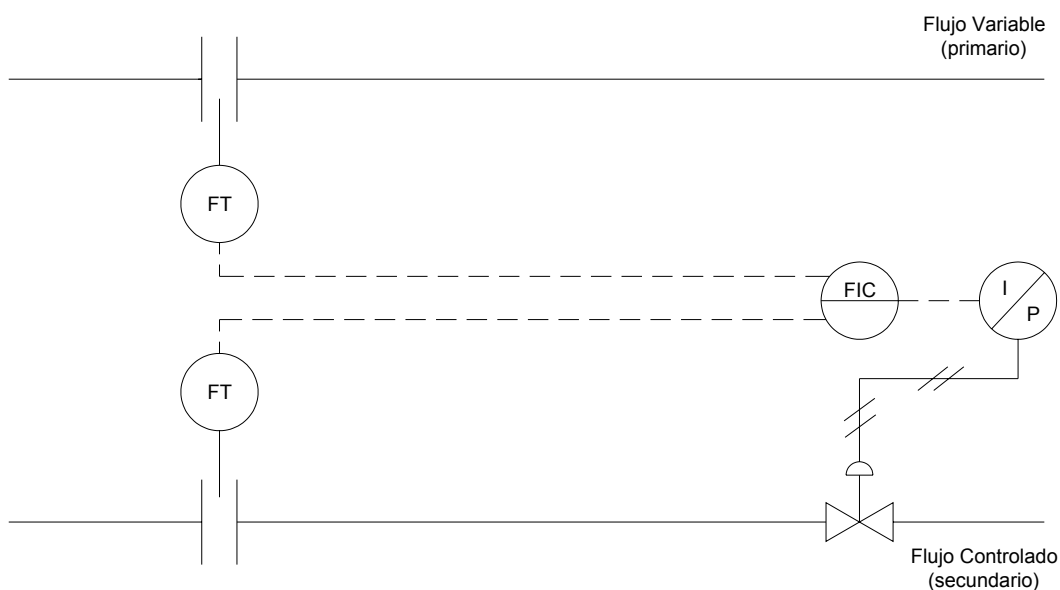


Fig. 5.36 Control de relación.

La señal del transmisor primario es multiplicada por un factor que se establece previamente, dado lo cual, la señal de salida resultante se establece como el punto de ajuste, el cual será el que fije el control sobre la variable secundaria. El instrumento que realiza la operación de multiplicación es un relé de relación, del cual se hablará más adelante.

### 5.5.3 Control anticipativo

La forma tradicional para el control de procesos, es el control de realimentación (también conocido como control feedback), la variable controlada se mide, después se compara este valor con el punto de ajuste o set-point y la diferencia actúa sobre el controlador el cual ajustara la variable manipulada consiguiéndose el control sobre el proceso. Véase figura 5.37.

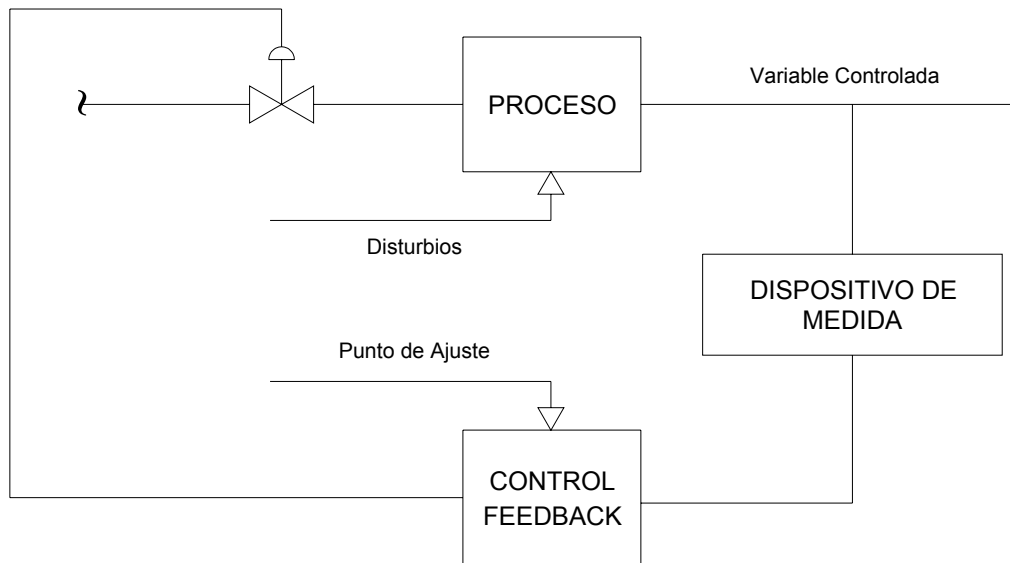


Fig. 5.37 Control feedback.

En los sistemas en donde existen tiempos de retardo importantes, la señal de error es detectada mucho después que se ha presentado un cambio de carga, con lo cual la corrección es a destiempo y se vuelve hasta innecesaria porque en ocasiones el cambio de carga que origina el ajuste ha dejado de existir.

Para resolver esta clase de problemas, se puede introducir un control en cascada. El control en cascada en realidad es un lazo de control secundario dentro de otro primario, con una respuesta suficientemente rápida. Sin embargo, aún este necesita que primero se produzca un error para poder después actuar, teniendo el riesgo de que actuara sólo rápidamente ante perturbaciones en la variable secundaria sin que actúe del mismo modo ante variaciones de la variable primaria.

Es entonces que se creó el control anticipativo (fig. 5.38) también conocido como control feedforward. Este sistema de control parte de la medida de una o más variables a la entrada y actúa a su vez simultáneamente sobre la variable manipulada que produce la salida deseada del proceso.

Este tipo de control utiliza un modelo del proceso para controlar el sistema, lo que se le conoce como “modelo del sistema para cambiar”. Por ejemplo, en el intercambiador de calor de la figura 5.38, existen consideraciones importantes que deben conocerse; por ejemplo, la relación entre el caudal del producto y su temperatura, las perturbaciones que pueden presentarse en la presión de vapor, la variación de temperatura de

entrada del producto, el rendimiento del intercambiador, etc. Dadas estas circunstancias, se toma como modelo la relación entre la temperatura de salida y el flujo de entrada del producto (esto se logra asignado como punto de consigna al flujo de entrada, lo que fija la temperatura de salida del producto), siendo esto función de transferencia del sistema de control anticipativo, es decir, el controlador debe de responder ante este modelo para cambiar.

Como es notorio, la eficacia de esto será función a la vez de la precisión con que el controlador mida la variable o variables de entrada y desde luego de la precisión alcanzada en el modelo del proceso. El control anticipativo requiere un conocimiento exacto y completo de las características dinámicas (condiciones que cambian con respecto al tiempo) y estáticas del proceso.

El problema aquí es que es casi imposible reproducir un modelo exacto del proceso, por lo que en la práctica un controlador de este tipo es adecuado para “seguir” los cambios dinámicos del proceso, pero siendo en realidad un lazo abierto, su aplicación aislada originara un offset (desviación) de consideración. Esto significa, que la temperatura de salida del producto de salida se apartará significativamente de la que es requerida.

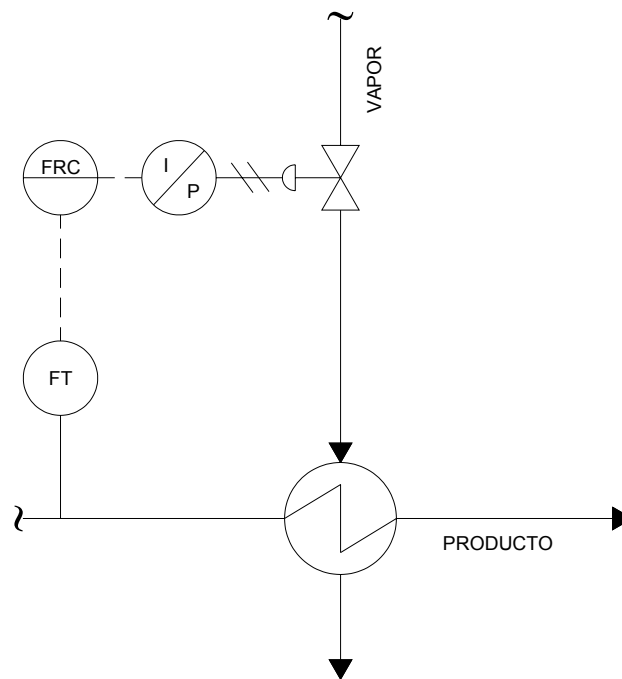


Fig. 5.38 Control anticipativo en un intercambiador de calor.

El control de realimentación es adecuado en régimen permanente, pero si se entra en régimen dinámico no es satisfactorio. El control anticipativo es capaz de perseguir rápidamente los cambios dinámicos del sistema, pero presenta la desventaja del offset.

La solución es combinar las dos técnicas para conjuntarse y conseguir un control dinámico del proceso sin offset. En la figura 5.39 se muestra un ejemplo del control con realimentación combinado con el anticipativo en un intercambiador de calor.

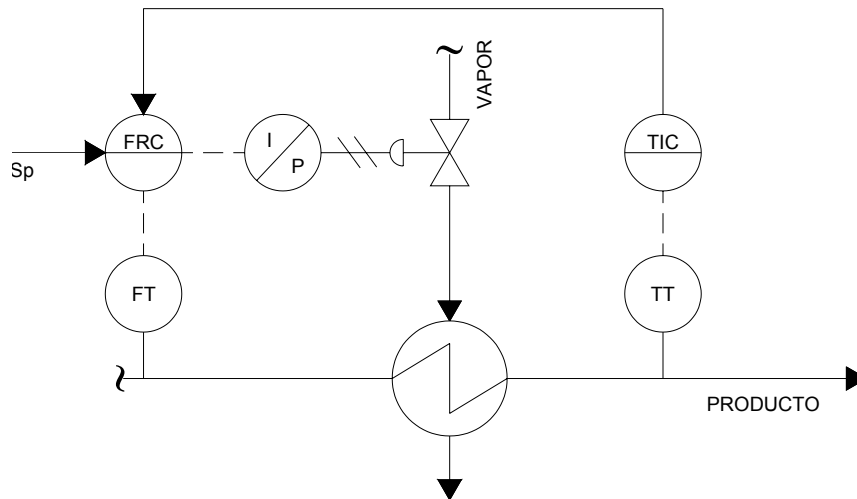


Fig. 5.39 Control de realimentación y anticipativo interactuando en un intercambiador de calor.

De este modo, si el caudal es fijo, la señal procedente del controlador de temperatura llega sin ningún cambio a la válvula de control, pero si el caudal varía, la señal del controlador de flujo se sumará o se restará con la del controlador de temperatura en el sentido de la variación de esta. Así, los cambios de carga en el caudal del producto son detectados y ajustados inmediatamente compensando los cambios del control anticipativo (offset a la salida) que pueden producirse en la temperatura. A este tipo de arreglo se le conoce como “control anticipativo estático”.

Más aún este sistema no considera las posibles variaciones en el vapor, las variaciones en la temperatura del flujo de entrada del producto, ni la velocidad del producto dentro del intercambiador. Para ello se diseña un sistema de control llamado “control anticipativo dinámico”, y aunque no será tratado aquí en detalle, podemos decir que este modelo si considera el flujo de vapor con relación a la temperatura de salida del producto, pues se instala un controlador de flujo de vapor que es función de la temperatura de salida del producto, y estos dos factores se combinan a su vez considerando el flujo de entrada del producto, ya que este flujo será función a su vez de la relación entre las dos variables antes mencionadas.

El considerar la interacción de todas las variables consigo mismas y con el proceso que intervienen en el mismo, en el sentido de la variación que dicha interacción cambia o se mantiene con respecto al tiempo, constituye la base del control en la dinámica de procesos.



La utilidad del empleo del control anticipativo es cuando existen algunos de los siguientes aspectos en el proceso:

- a) Tiempos muertos y retrasos muy considerables, ante lo cual el control de realimentación es difícil que maneje.
- b) Cambios de carga muy constantes y en donde la variable regulada es difícil de medirse con precisión o de forma continua.
- c) Cuando la variable regulada además de no ser fija viene determinada por el efecto de otras variables.

#### **5.5.4 Control selectivo**

Esta clase de control se emplea para limitar la variable dentro de un rango de operación a un valor alto o bajo; esto tal vez pensando en evitar algún tipo de inconveniente en la operación del proceso, o quizá, del producto.

La figura 5.40 muestra un ejemplo de control selectivo (override control) en una bomba. Aquí puede observarse que hay dos controladores, uno en la aspiración y otro en la impulsión, la señal de salida es seleccionada por un relé selector en comunicación con la válvula de control.

En condiciones de operación normal el control se realiza con el controlador en la impulsión, pero si por alguna razón baja la presión en la aspiración de la bomba por debajo de algún límite de seguridad, debe entrar en funcionamiento el controlador en la aspiración.

Este procedimiento puede realizarse gracias a que el controlador en la impulsión es de acción inversa, por lo que el punto de consigna del controlador en la aspiración es inferior a los valores normales de trabajo y el relé selector selecciona la mínima de las dos señales que le llegan.

De este modo, si baja demasiado la presión en la aspiración (por debajo de su punto de consigna), la presión en la salida también bajará, con lo que el controlador en la impulsión aumentará su señal de salida y el relé selector siempre tomará la señal más baja, que será entonces la del controlador en la aspiración, lográndose que la válvula pase a ser controlada por la presión en la aspiración directamente.

La válvula de control será manipulada alternativamente por el controlador en la impulsión en condiciones normales de trabajo y por el controlador en la aspiración en condiciones de baja presión.

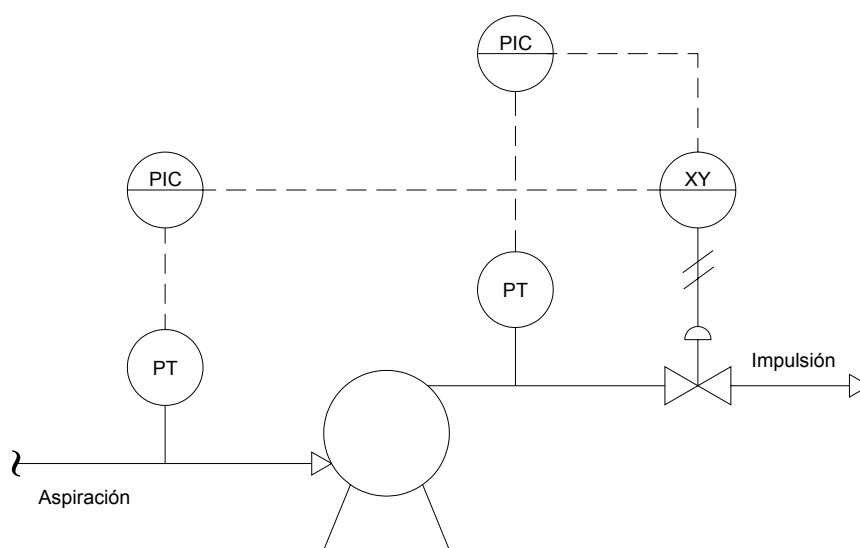


Fig. 5.40 Control selectivo.

## 5.6 Instrumentos auxiliares

En muchas ocasiones en el control de procesos es necesario relacionar o transformar las variables entre si medidas; estas funciones las realizan los llamados “instrumentos auxiliares”, que están situados detrás del panel de control o en un panel aparte. Existen tanto para instrumentos neumáticos como electrónicos. En control digital estas funciones son realizadas normalmente por el propio controlador digital. Los instrumentos auxiliares son de gran importancia en el control industrial debido a la diversidad de funciones que pueden realizar. Estos instrumentos auxiliares son también conocidos como “relés” auxiliares.

No será propósito en este trabajo describir como están contruidos o diseñados estos dispositivos, pero si mencionar cual es su funcionamiento para relacionar variables entre si. Los relés auxiliares para señal neumática y electrónica básicos son mostrados a continuación:

### Instrumento extractor de raíz cuadrada

Este tipo de instrumento realiza la extracción de la raíz cuadrada de la señal que recibe, utilizado generalmente para linealizar una señal de flujo.

Para señal neumática es:

$$P_0 = \sqrt{P_1}$$

Para señal electrónica:

$$I_0 = \sqrt{I_1}$$

Donde el subíndice cero es la señal de salida del relé y el subíndice 1es la señal de entrada al relé.

## Instrumentos sumadores

Esta clase de relés pueden realizar operaciones varias, con normalmente al menos dos señales de entrada. La operación para señal neumática y electrónica es respectivamente de forma generalizada:

$$P_0 = P_1 + P_2 - P_3 \pm K$$

$$I_0 = I_1 + I_2 - I_3 \pm K$$

Donde  $P_0$ ,  $I_0$  son señales de salida y  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , son señales de entrada junto con el factor  $K$  que es ajustable de acuerdo a las características deseadas. Estas operaciones pueden desglosarse también así:

| Suma              | Resta             | Inversión de signo | Bias              |
|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| $P_0 = P_1 + P_2$ | $P_0 = P_1 - P_3$ | $P_0 = -P_3$       | $P_0 = P_1 \pm K$ |
| $I_0 = I_1 + I_2$ | $I_0 = I_1 - I_3$ | $I_0 = -I_3$       | $I_0 = I_1 \pm K$ |

Donde el Bias es la suma de una cantidad constante a la señal de salida.

## Promedio

$$P_0 = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

## Relés de relación

Estos son utilizados para relacionar dos variables entre si (recordar control de relación), la forma en que llevan a cabo la operación es:

$$P_0 = cP_1$$

$$I_0 = cI_1$$

Donde  $c$  es la constante de relación y  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $I_0$ ,  $I_1$ , son las señales a comparar.

## Relés inversores

Estos se emplean en instrumentos electrónicos y realizan la siguiente operación:

$$I_0 = 24 - I_1$$

Donde  $I_1$  es la señal de entrada en mA c.c.,  $I_0$  es la señal invertida. Por ejemplo, si  $I_1 = 4$  mA c.c. entonces  $I_0 = 20$  mA c.c.

## Relés multiplicadores o divisores

Estos instrumentos se derivan de los de relación, solamente sustituyen la constante por otra señal o por la relación de dos señales.

$$P_0 = \frac{P_1 P_3}{P_2}$$

$$I_0 = \frac{I_1 I_3}{I_2}$$

## Relés selectores

Estos seleccionan a una variable de acuerdo a un criterio especificado, pudiendo ser la menor señal la seleccionada o a la inversa.

$$P_0 = P_1 \quad \text{si} \quad P_1 < P_2 \quad \text{ó} \quad I_0 = I_1 \quad \text{si} \quad I_1 < I_2$$

Existen además otras clases de instrumentos auxiliares, que a diferencia de los ya explicados, estos transforman la señal de salida respecto a una de entrada:

Convertidor mV a intensidad (mV/I), permite la conversión de la señal procedente de un termopar en milivoltios a señal electrónica.

Convertidor resistencia a intensidad (R/I), permite la conversión de una señal procedente de una sonda de resistencia o de una variación de resistencia de un reóstato de un controlador eléctrico a señal electrónica.

Convertidor (I/P), de señal electrónica a la entrada, a neumática a la salida.

Convertidor mV/P, de milivolts a neumática. Esto realmente se hace en dos partes; primero de milivolts a intensidad (mV/I) y después de intensidad a neumática (I/P).

Convertidor R/P, de resistencia a neumática, al igual que el anterior caso, primero pasa de resistencia a intensidad de corriente (R/I) y después de intensidad de corriente a neumática (I/P).

Reles de alarma, que ajustados a un valor prefijado de la variable cierran o abren uno o dos contactos. Pueden ser neumáticos efectuando el disparo entre 3 a 15 psi, o electrónicos actuando en el rango de 4-20 mA c.c.

Integradores, que son empleados en la totalización de un caudal y pueden ser neumáticos o electrónicos.

Los instrumentos auxiliares pueden ser considerados como relevadores, ya que estos son dispositivos que reciben información en forma de señal de uno o más instrumentos, modifican esta señal si se requiere, emite una o más señales de salida y no son designados como controladores, interruptores ni de otra forma. Por lo que este lleva a cabo uno o más cálculos o funciones lógicas o ambas y envía una o más señales de salida resultantes. La tabla 5.2 presenta los relevadores faltantes que no fueron mostrados anteriormente (integral, derivada, potencia, etc.) con las abreviaturas o símbolos que identifican a estos relevadores en los diagramas de tubería e instrumentación.

| SÍMBOLO                     | FUNCIÓN   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
|-----------------------------|---|-------------|-------|---|---------|---|------------|---|-----------------------|---|------------------------------|---|-----------|---|-------------------------|---|-----------|---|---------|
| 1-0 o ON-OFF                | Automáticamente conectar, desconectar, o transferir uno o más circuitos, considerando que este no es el primero de su tipo en un circuito de instrumentación.   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| < o ADD o SUM               | Sumar o totalizar (sumar y restar)*   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| $\Delta$ o DIFF o REST      | Restar*   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| + o -                       | Bias**  |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| AVG                         | Promedio  |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| % o 1:3 o 2:1               | Ganancia o atenuación**   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| X                           | Multiplicar*  |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| $\div$                      | Dividir*  |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| $\sqrt{\quad}$ o SQ. RT.    | Extraer raíz cuadrada   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| $x^n$ o $x^{1/n}$           | Elevar a potencia   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| F (x)                       | Función   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| > o Highest                 | Selección alta. Seleccionar la variable medida más alta, no señal a menos que así se especifique.   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| < o Lowest                  | Selección baja. Seleccionar la variable medida más baja, no señal a menos que así se especifique.   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| REV                         | Inversa   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| E/P o P/I, etc, o A/D o D/A | <p>Conversión para señales de entrada/salida la designación es la siguiente:</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th>Designación</th> <th>Señal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E</td> <td>Voltaje</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>Hidráulico</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>Corriente (eléctrica)</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>Electromagnético o sónico***</td> </tr> <tr> <td>P</td> <td>Neumático</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>Resistencia (eléctrica)</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>Analógica</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>Digital</td> </tr> </tbody> </table> | Designación | Señal | E | Voltaje | H | Hidráulico | I | Corriente (eléctrica) | O | Electromagnético o sónico*** | P | Neumático | R | Resistencia (eléctrica) | A | Analógica | D | Digital |
| Designación                 | Señal   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| E                           | Voltaje   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| H                           | Hidráulico  |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| I                           | Corriente (eléctrica)   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| O                           | Electromagnético o sónico***  |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| P                           | Neumático   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| R                           | Resistencia (eléctrica)   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| A                           | Analógica   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| D                           | Digital   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| $\int$                      | Integrar (integrador de tiempo)   |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| D o d/dt                    | Derivada o velocidad  |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |
| I/D                         | Derivada inversa  |             |       |   |         |   |            |   |                       |   |                              |   |           |   |                         |   |           |   |         |

\* Usado para relevadores con dos o más entradas.

\*\*Usado para relevadores de una sola entrada.

\*\*\*Los fenómenos electromagnéticos incluyen calor, ondas de radio, radiación nuclear y luz.

Tabla 5.2 Símbolos y abreviaturas para relevadores.

## 5.7 Seguridad intrínseca

Cuando existan instrumentos eléctricos que operan en atmósferas en donde estén presentes gases o vapores o polvos inflamables, siempre estará presente el riesgo de explosión. Esto lleva a la introducción de técnicas en estas atmósferas, que reduzcan considerablemente el peligro de explosión. Aunque existen varios de estos métodos, el más aceptado por presentar ventajas frente a otros, es la seguridad intrínseca (ver fig. 5.41).

La experiencia demuestra que para producirse una explosión de una mezcla gaseosa por ejemplo, es necesario que se aporte primero un cierto nivel de energía, esto es, la explosión sólo se presenta si se inyecta la suficiente energía a la mezcla para producir la ignición de un mínimo volumen de la mezcla.

Desde el punto de vista molecular, el diámetro de una esfera de este material explosivo se le llama distancia de extinción; de esta forma, si la llama incipiente que pueda formarse se mantiene dentro de esta esfera, la llama naciente no se propaga. A su vez, la energía requerida para la ignición dependerá de la concentración de la mezcla combustible (relación aire-combustible, por ejemplo), y existe una concentración para la cual la energía de ignición es mínima para esta mezcla.

Por lo tanto, la seguridad intrínseca consiste en evitar que la potencia eléctrica disponible en un área clasificada como peligrosa, sea lo suficientemente baja, tal que sea incapaz de producir la ignición de los gases, vapores o polvos inflamables presentes en las condiciones normales de operación.

Ahora bien, un sistema intrínsecamente seguro es aquel incapaz de liberar suficiente energía tanto en condiciones normales o anormales de operación para provocar la ignición de la mezcla explosiva. Por condiciones anormales se debe de entender cualquier avería accidental en el equipo o cables, fallos de aislamiento o cualquier fallo de los componentes eléctricos del equipo.

Un sistema no debe de considerarse intrínsecamente seguro por el instrumento en si mismo, si no por todo el conjunto de seguridad que incluye el aparato a montar en el área peligrosa, el cable para interconexión, la barrera de seguridad instalada en área segura, la fuente de alimentación, etc.

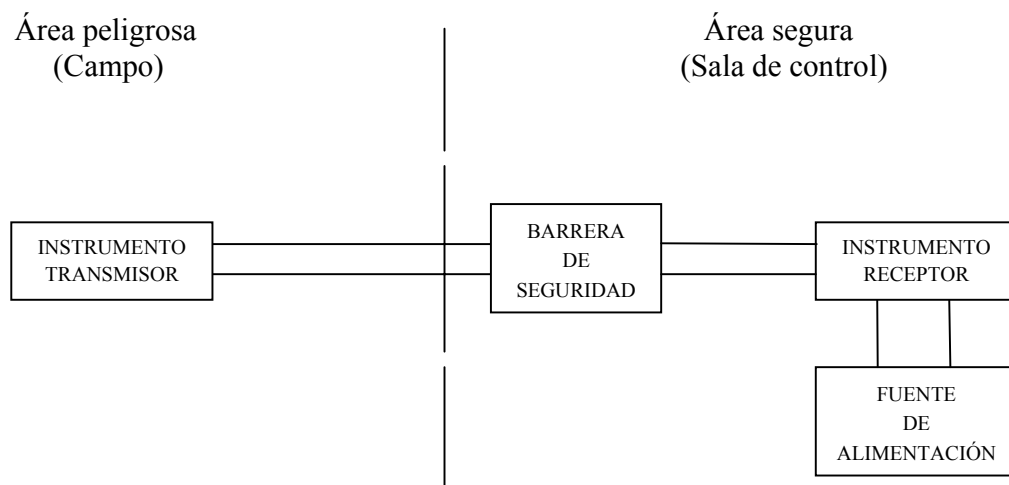


Fig. 5.41 Esquema de un circuito con seguridad intrínseca.

Las técnicas de seguridad han marcado su evolución desde que se empleó la encapsulación con la utilización de un material antideflagrante (que no arda súbitamente) para confinar en su interior una explosión; o con la presurización que con una purga de aire se impedía que la atmósfera entrara en el instrumento; o también con el empleo de seguridad aumentada que adopta medidas para impedir que se forme cualquier arco o chispa. Sin embargo, es con la seguridad intrínseca como se han logrado los mejores resultados. La seguridad intrínseca considera un aspecto muy importante: es preferible evitar una explosión que contenerla, tratar de desviarla, o aceptar la existencia de un “cierto riesgo” al emplear seguridad aumentada.

## **Mecanismos de ignición**

Los mecanismos más comunes al trabajar con instrumentos en la industria, responsables de una posible ignición son los siguientes:

- a) Por cierre de un contacto en un circuito capacitivo: Cuando este contacto cierra el circuito, se descarga el condensador, con la probabilidad de que la corriente vaporice una partícula del material cuando los contactos se tocan por vez primera. Este vapor proporciona un paso para la formación de un arco eléctrico que se mantiene entre los contactos al estar estos muy próximos entre sí.
- b) Por apertura de un contacto en un circuito inductivo: Al abrirse este contacto, se interrumpe la corriente del circuito y la energía almacenada en la bobina intenta mantener la circulación de corriente, lo que provoca un aumento en la tensión entre los contactos separados hasta valores muy altos, que en ocasiones se igualan a la tensión de alimentación. En los circuitos de alta inductancia la tensión entre los contactos es muy alta favoreciendo el mantenimiento del arco eléctrico, por lo que en tales circunstancias es más perjudicial un contacto de apertura rápida que otro de movimiento lento. En los circuitos de baja inductancia la tensión entre los contactos es sensiblemente igual a la de alimentación, con lo cual, un contacto de movimiento lento permite por más tiempo, la presencia del arco y produce la ignición a niveles de corriente más bajos que el contacto de apertura baja.
- c) Por apertura o cierre de un contacto en un circuito resistivo: Formación de un arco por la vaporización del material, ya sea al tocarse los contactos, o cuando estos se separan.
- d) Por contacto con superficies o hilos calientes: Es necesario que los instrumentos que trabajan en áreas peligrosas no deben tener sus superficies excesivamente calientes. Al respecto, la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) ha normalizado seis temperaturas máximas superficiales, las cuales se muestran en la tabla 5.3. También es posible que un pequeño hilo calentado por una corriente elevada, provoque una ignición. No obstante, exceptuando los hilos muy finos, la corriente requerida para provocar la ignición es mayor que la necesaria en la apertura de circuitos resistivos; además de esto, la ignición con hilos de cobre sólo es posible si el hilo se funde o bien si está bobinado; no es posible la ignición de un hilo recto que no funda. De hecho si fundiera, la corriente para la ignición es más alta que la corriente de ignición necesaria en la apertura de un contacto en un circuito resistivo.

| CLASE          | TEMPERATURA.<br>LIMITE °C |
|----------------|---------------------------|
| T <sub>1</sub> | 450                       |
| T <sub>2</sub> | 300                       |
| T <sub>3</sub> | 200                       |
| T <sub>4</sub> | 135                       |
| T <sub>5</sub> | 100                       |
| T <sub>6</sub> | 85                        |

Tabla 5.3 Clasificación de temperaturas máximas superficiales de acuerdo a la IEC.

### 5.7.1 Barreras de seguridad

En cualquier sistema de seguridad intrínseca es necesario impedir que las corrientes o tensiones de los circuitos situados en la zona peligrosa puedan sobrepasar los niveles de seguridad predeterminados. En el circuito de alimentación es necesario impedirse la entrada de tensiones en la red que puedan afectar un circuito situado en el área peligrosa.

Algunos dispositivos tienen un aislamiento mecánico suficiente entre los cables de potencia y los de señal, sin embargo, la mayor parte de estos equipos están alimentados con un transformador (que en cuyo caso se requerirá que este sea de cuatro hilos, conocido como “aislador” y con fusibles adecuados). También era práctica común disponer de una pantalla puesta a masa (aislada a tierra) entre los arrollamientos primario y secundario y que los hilos no estén colocados cerca unos de otros para evitar cortocircuitos.

Continuamente, los equipos situados en las áreas consideradas seguras están sometidos a tensiones tan elevadas, que, ante cualquier fallo pueden comunicarse a los hilos de campo. Estos se vuelven peligrosos y para evitarlo se instalan elementos limitadores que reducen los valores de tensión y de corriente a niveles seguros tan pronto se presente un fallo. Estos dispositivos son conocidos por barreras de seguridad; las hay en dos tipos: Zener y Galvánicas.

Para diseñar un sistema de seguridad intrínseca en base a los instrumentos de campo y las barreras de seguridad se debe considerar lo siguiente:

- a) Elegir una barrera adecuada al tipo de instrumento de campo, con lo cual se fija los máximos parámetros del cable y las tensiones e intensidades máximas a soportar en caso de fallo.
- b) Conocer las tensiones y corrientes máximas admisibles y los valores máximos admisibles de inducción y capacidad en los instrumentos de campo y en las barreras de seguridad.
- c) Los parámetros del cable se deducen al restar los valores de los instrumentos en campo de los valores de las barreras.



De esta forma, el sistema es intrínsecamente seguro si:

- a) Tensión máxima en la barrera < Tensión máxima del instrumento.
- b) Corriente máxima en la barrera < Corriente máxima del instrumento.
- c) Capacidad de la barrera  $\geq$  Capacidad del instrumento + (capacitancia) (longitud del cable).
- d) Inducción máxima de la barrera  $\geq$  Inducción del instrumento + (inductancia) (longitud del cable).

### Barreras Zener y Galvanicas

La barrera Zener normalmente esta diseñada para soportar una tensión de cresta de 365 V de una fuente de impedancia nula situada en el área segura. Las barreras Zener funcionan limitando la tensión que aparecen en los bornes (terminales de conexión) de la barrera. De esta forma, en caso de que exista algún defecto en el equipo, la tensión de alimentación queda aplicada a los bornes de la entrada de la barrera; la corriente circula y limita la tensión en zona peligrosa hasta que se funde el fusible. Los diodos Zener limitan la tensión que aparecen en los bornes de la barrera; esto hace necesario que el aislamiento a masa (puesta a tierra) sea de un valor menor a  $1\Omega$ . Sus principales desventajas es que producen una alta caída de tensión y la puesta a tierra puede ser costosa.

La barrera Galvanica por su parte establece un equilibrio en la tensión de alimentación con respecto a la tierra, con lo que evita las caídas prominentes de tensión y no requiere una puesta a tierra muy compleja, y la señal del transmisor en campo (4-20 mA c.c.) es la misma señal en el área segura. La barrera Galvanica sencillamente deriva y modula a la vez la tensión desde la alimentación hacia los instrumentos en campo (área peligrosa) y el área segura.

Los circuitos o aparatos eléctricos y electrónicos empleados en la industria específicamente en el control de procesos deben de ser certificados por normas internacionales que establezcan requerimientos de seguridad en instalaciones eléctricas, tales como: ISA (Instrument Society of America), NFPA (National Fire Prevention Association), IEC (Internacional Electrotechnical Comisión), CSA (Canadian Standard Associations), NEC (National Electrical Code), etc.

El empleo de seguridad intrínseca como método de protección presenta una ocurrencia de fallo muy baja, tal como a continuación se muestra:

| Evento   | Probabilidad de ocurrencia |
|--|----------------------------|
| Fallo en cualquier parte del sistema permaneciendo intermitente 1 hora en cada 1000          | $10^{-3}$                  |
| Fallo de un componente crítico de un total de 100 en bucles de regulación                    | $10^{-2}$                  |
| El hilo en campo se rompe o se pone a tierra produciendo una chispa durante 1 hora en 1 año  | $10^{-4}$                  |
| El área en donde ocurre la rotura esta próxima a la mezcla concentrada de más fácil ignición | $10^{-2}$                  |

## 5.7.2 Clasificación de áreas peligrosas

### Áreas (clasificadas) peligrosas

Las áreas peligrosas son aquellas en las que los peligros de explosión o fuego pueden existir debido a gases o vapores inflamables, líquidos inflamables, polvos combustibles, o fibras encendibles. Si bien los gases y vapores inflamables así como polvos combustibles existen casi en todos lados, estos están presentes generalmente en cantidades pequeñas, mucho menos que lo necesario para que exista un riesgo de fuego o explosión. Por lo tanto, la presencia de estos no define en sí un área peligrosa. Estos materiales deben estar presentes en cantidades (concentraciones) suficientes para presentar un peligro potencial de explosión.

### Áreas peligrosas “mundiales”

La evolución de normas y códigos eléctricos para áreas peligrosas a lo largo del mundo ha tomado dos caminos distintos. En Norteamérica se ha utilizado un sistema de “división por clases” durante décadas como la base para clasificar áreas peligrosas.

Debido a que los peligros y métodos de protección de equipo eléctrico contra estos peligros difieren para diferentes materiales, las áreas peligrosas están divididas en tres clases y dos divisiones. Las clases se basan en el tipo de peligro y las características explosivas del material y las divisiones se basan en la ocurrencia o riesgo de fuego o explosión que presenta el material. Mientras Canadá y EU tienen algunas diferencias en los métodos aceptables de cableado y normas de productos, ambos sistemas son muy similares.

En otras partes del mundo, las áreas que contienen atmósferas potencialmente explosivas son tratadas usando un “sistema por zonas”. Las zonas se basan predominantemente en la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC) y el Comité Europeo para las Normas de Estandarización Electrotécnica (CENELEC).

Mientras que Norteamérica trata con múltiples tipos de atmósferas peligrosas, el sistema por zonas únicamente se dirige a gases o vapores inflamables, lo cual es equivalente a áreas de Clase I. La diferencia más significativa con el sistema de zonas es que el nivel de probabilidad de peligro está dividido en tres zonas al contrario de tres divisiones.

Mientras que los requerimientos específicos difieren, EU y Canadá han incorporado el sistema de zonas para las áreas peligrosas de Clase I dentro de sus actualizaciones más recientes al código eléctrico. Ambos sistemas proporcionan soluciones efectivas para equipo eléctrico utilizado en áreas peligrosas, y ambos tienen excelentes registros en seguridad.

En Norteamérica las áreas peligrosas se dividen en tres clases basados en las características explosivas del material. Las clases de material son además divididas en “divisiones” o “zonas” basándose en el riesgo de fuego o explosión que presenta el material. El sistema de zonas tiene tres niveles de peligro mientras que el sistema de divisiones tiene dos niveles.

La tabla siguiente muestra una comparación entre los sistemas de “división y clases” y “por zonas”:

| <b>Material peligroso</b> | <b>Sistema de Clases y Divisiones</b> | <b>Sistema de Zonas</b> |
|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| <b>Gases o vapores</b> ①  | Clase I, División 1                   | Zona 0 y Zona 1         |
|                           | Clase I, División 2                   | Zona 2                  |

① EU y Canadá han adoptado zonas para gases y vapores.

## Áreas Clase I

Los áreas de Clase I son aquellos en los cuales gases o vapores inflamables están o pueden estar presentes en el aire en cantidades suficientes para producir mezclas explosivas o encendibles.

El termino “gases o vapores” se utiliza debido al uso común del lenguaje ingles. El termino “gases” es comúnmente utilizado para referirse a materiales en el estado gaseoso bajo condiciones atmosféricas normales, tal es el caso del hidrogeno y metano. El termino “vapores” se refiere a gases por encima de un material que en condiciones atmosféricas normales es liquido (como la gasolina) pero el cual emite gases dentro de su rango de inflamabilidad en las mismas condiciones atmosféricas.

## Áreas Clase I, Divisiones 1 y 2, Grupos A, B, y C

La subdivisión de la Clase I en dos divisiones identifica la probabilidad de riesgo de que una concentración encendible de gases o vapores se encuentre en el lugar. La División 1 identifica áreas en donde el resto es alto o medio. La División 2 identifica áreas en donde hay un riesgo pequeño. Si el riesgo es extremadamente pequeño, el lugar no es considerado como un área peligrosa. Tal lugar se tipifica como una casa familiar con gas natural o propano como la fuente de energía para calentamiento. El gas puede, y en extremadamente raras ocasiones, en efecto se fuga y ocurre una explosión. Sin embargo el riesgo es tan bajo (debido a los sistemas de seguridad construidos dentro del mismo equipo contenedor y de calentamiento) que tales áreas no son clasificadas como áreas peligrosas.

### División 1

Las áreas de Clase I, División 1 son aquellas en donde el peligro de explosión existe bajo condiciones normales de operación. El área puede ser peligrosa durante todo o la mayor parte del tiempo, o puede ser peligrosa solo por algún periodo de tiempo. La División 1 también incluye áreas en donde un paro o fallas en la operación o en el equipo eléctrico o en los procesos pudieran liberar concentraciones encendibles de gases o vapores inflamables, y pudieran causar también fallas simultaneas en equipo eléctrico en tal forma que directamente causaran que el equipo eléctrico se convierta en una fuente de ignición.

Un ejemplo de este tipo de lugar puede ser un área en donde un liquido inflamable se almacena bajo condiciones criogénicas, y una fuga del liquido a temperatura extremadamente baja directamente en el equipo eléctrico pudiera causar fallas de tal equipo al mismo tiempo que los vapores del liquido es encuentran dentro de su rango de inflamabilidad.

## División 2

Los áreas Clase I, División 2 son aquellas en donde normalmente no se encuentran concentraciones encendibles de gases o vapores flamables, pero pueden estar presentes en el evento de una falla, tal como una fuga en una válvula de una línea que transporta líquidos flamables. Las áreas de División 2 también existen frecuentemente alrededor de áreas de División 1 en donde no hay barreras para separar el espacio de División 1 de un área no peligrosa, o en donde una falla en la ventilación (una condición anormal) pudiera extender el área en donde existen materiales flamables bajo condiciones normales. El equipo eléctrico aprobado para áreas de Clase I División 1, es confiable también para usarse en áreas División 2.

La frecuencia de ocurrencia determina el nivel de peligro para un lugar, a mayor tiempo de presencia del material, mayor es el riesgo. Tal como se muestra a continuación:

| Frecuencia de ocurrencia    | Sistema de Clases y Divisiones | Sistema de Zonas |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------|
| Continua                    | Clase I, División 1            | Zona 0           |
| Periódicamente intermitente |                                | Zona 1           |
| Condiciones anormales       | Clase I, División 2            | Zona 2           |

La División 2 y Zona 2 (condiciones anormales de ocurrencia, o áreas de más bajo riesgo) son básicamente idénticas en el sistema de Zonas y el de Divisiones. De cualquier modo en las áreas en las que se espera que el peligro ocurra durante la operación normal (la División 1 y las Zonas 1 y 0), el sistema de zonas trata separadamente con Zonas 0 (áreas con mas altos riesgos) y Zonas 1 con un riesgo asociado al lugar restante, considerado mas bajo.

El sistema de divisiones tiende a ser menos específico en su consideración de la División 1. El sistema de divisiones trata igual a todas las áreas en donde se espera que ocurra peligro durante la operación normal.

Lo siguiente ilustra las diferencias entre las diversas zonas:

| Grado de liberación | Zona | Mezcla flamable presente                         |
|---------------------|------|--|
| Continua            | 0    | 1000 horas por año o más (10%)                   |
| Primaria            | 1    | Entre 10 y 1000 horas por año o mas (0.1% a 10%) |
| Secundaria          | 2    | Menos de 10 horas por año (0.01% a 0.1%)         |
| No clasificada      | -    | Menos que 1 hora por año (menos que 0.01%)       |

La figura 5.42 por su parte muestra la comparación entre los sistemas de división y de zonas en términos de evaluación de riesgos.

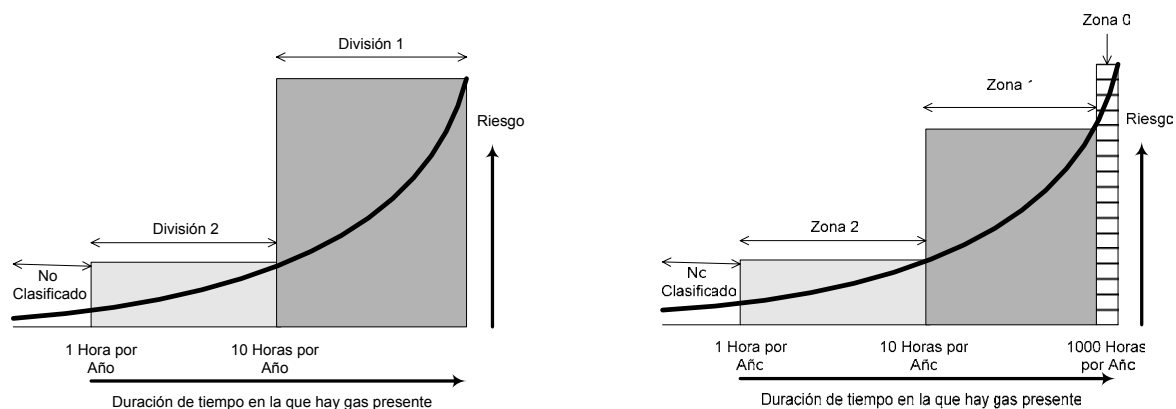


Fig. 5.42 Comparación entre divisiones y zonas en función del riesgo.

### Clase I, Grupos A, B, C y D,

Las áreas Clase I son divididas en grupos ya que diferentes materiales tienen diferentes características de ignición y explosión. Al agruparlos se permite que el equipo sea probado basándose en el tipo de material inflamable para el cual se pretende usar. También se permite que la clasificación de las áreas se base en el tipo de material en ese lugar.

El agrupamiento se basa en dos factores principales: la presión de explosión generada en la explosión, y el máximo espacio existente en superficies metálicas planas (en acoplamientos, bridas) las cuales previenen la propagación de la explosión a través de ese espacio hacia una atmósfera inflamable del mismo material inflamable y de la misma concentración.

#### Grupo A

La más alta de las presiones de explosión de los materiales agrupados es generada por el acetileno, el único material en el Grupo A. Por lo tanto, el equipo a prueba de explosión diseñado para este grupo debe ser muy fuerte para soportar la explosión, y debe tener un espacio muy pequeño entre las superficies de las bridas. El equipo a prueba de explosión para este grupo es el más difícil de diseñar y hay menos equipos a prueba de explosión para este grupo que para cualquier otro.

#### Grupo B

Los materiales del Grupo B producen presiones de explosión menores al acetileno, y el diseño de las cubiertas del equipo a prueba de explosión es de alguna manera menos riguroso que para las cubiertas para el Grupo A. No obstante, debido a las altas presiones de explosión en los Grupos A y B, y, en particular, el muy pequeño espacio entre las superficies de las juntas necesario para prevenir la propagación de la explosión, no existen motores a prueba de explosión para su uso en ninguno de las áreas de estos grupos.

#### Grupo C

Los materiales químicos en el Grupo C caen dentro del rango entre los Grupos B y D tanto en la presión de explosión generada como en el espacio entre la superficie de las juntas del equipo a prueba de explosión el cual prevendría una explosión.

## Grupo D

El Grupo D es el grupo más común encontrado en campo, y existe mas equipo disponible para este grupo que para cualquier otro.

No existe una relación consistente entre propiedades tales como temperatura de ignición, punto de flasheo, y limites de flamabilidad, y los grupos de áreas peligrosas de Clase I en los cuales se encuentran los variados materiales. Lo siguiente ilustra lo anteriormente expuesto de la división 1 y grupos A, B, C, y D:

| <b>Gas típico</b> | <b>Grupos de Gases por Clase y División</b> | <b>Grupos de Gases por Zona</b> |
|-------------------|---|---------------------------------|
| <b>Acetileno</b>  | A   | IIC                             |
| <b>Hidrogeno</b>  | B   | IIC                             |
| <b>Etileno</b>    | C   | IIB                             |
| <b>Propano</b>    | D   | IIA                             |
| <b>Metano</b>     | D   | IIA                             |

## Áreas Clase I, Zonas 0, 1, y 2, Grupos IIC, IIB, y IIA

Este método de clasificación de áreas sigue el método internacional de clasificación desarrollado por las normas IEC y CENELEC. Este sistema de clasificación por zonas es actualmente aplicable solo a áreas con gases y vapores Clase I. Tal como las subdivisiones de la Clase I en Divisiones 1 y 2, y por las mismas razones (clasificaciones de áreas y pruebas de equipo), las áreas peligrosas se clasifican por zonas en lugar de divisiones.

### Zona 0

Estas son áreas en las cuales están presentes concentraciones encendibles de gases o vapores flamables en forma continua o por periodos largos de tiempo. La Zona 0 representa la parte más peligrosa de la División 1 de la clasificación por divisiones.

Hay situaciones en las que líquidos flamables son almacenados en tanques y el espacio de vapor por encima del líquido esta arriba del límite superior de flamabilidad. Si el espacio del vapor esta por encima de este limite superior la mayoría del tiempo, el espacio no es un lugar Zona 0 ya que los requerimientos se establecen para “concentraciones encendibles” de gases o vapores flamables (concentraciones dentro del rango de flamabilidad).

### Zona 1

Estas áreas son casi lo mismo que las áreas Clase I División 1 del sistema por divisiones excepto que no incluyen las áreas definidas como Clase 1 Zona 0 en donde las concentraciones encendibles están presentes la mayoría del tiempo.

### Zona 2

Estas áreas son las mismas que las áreas Clase I División 2 en el sistema por divisiones.

## Grupo IIC

Este grupo es el equivalente de la combinación de los gases y vapores Clase I Grupos A y B del sistema de divisiones. En el sistema internacional de clasificación, para agrupar materiales, solo se considera el espacio entre las superficies planas de las juntas y la corriente de ignición (relacionada directamente con la energía de ignición). La presión de explosión no está considerada. Por lo tanto los Grupos A y B en la clasificación por clases y divisiones pueden ser agrupados juntos en el sistema internacional. El espacio máximo entre las superficies planas de las juntas de los equipos es la misma para los materiales de los Grupos A y B.

## Grupo IIB

Este grupo es el equivalente a los gases y vapores Clase I Grupo C del sistema por divisiones.

## Grupo IIA

Este grupo es el equivalente a los gases y vapores Clase I Grupo D del sistema por divisiones.

## Códigos de temperatura (códigos -T)

### Clase I

La temperatura de ignición o temperatura de auto-ignición (AIT) es la mínima temperatura requerida para iniciar o causar una combustión auto sostenida en una sustancia sin ninguna fuente aparente de ignición. La temperatura de ignición más baja publicada debe ser aquella utilizada para determinar la aceptabilidad del equipo. Esto es de interés particular cuando se selecciona equipo que genera calor tal como instalaciones de alumbrado o motores que pueden generar suficiente calor para crear ignición en la atmósfera que lo rodea.

Las áreas Clase I y Clase II usan códigos-T o son sujetas a limitaciones máximas de temperatura como se muestra en la tabla 5.4. Norteamérica y la IEC son consistentes en sus códigos-T. No obstante, a diferencia de la IEC, Norteamérica incluye valores de incremento como se muestra abajo.

| Códigos de Temperatura<br>Norteamérica (NEC-500) y CSA | Códigos de Temperatura<br>IEC/CENELEC/US (NEC 505) | Temperatura Máxima |     |
|--|--|--------------------|-----|
|  |  | °C                 | °F  |
| T1   | T1   | 450                | 482 |
| T2   | T2   | 300                | 572 |
| T2A  |  | 280                | 536 |
| T2B  |  | 260                | 500 |
| T2C  |  | 230                | 446 |
| T2D  |  | 215                | 419 |
| T3   | T3   | 200                | 392 |
| T3A  |  | 180                | 356 |
| T3B  |  | 165                | 329 |
| T3C  |  | 160                | 320 |
| T4   | T4   | 135                | 275 |
| T4A  |  | 120                | 248 |
| T5   | T5   | 100                | 212 |
| T6   | T6   | 85                 | 185 |

Tabla 5.4 Códigos de temperatura de acuerdo a distintos estándares.

## **Temperatura Ambiente**

La temperatura ambiente es la temperatura a los alrededores del ambiente en el cual se instala una pieza de equipo, ya sea en interiores o en exteriores. Ciertos equipos que generan calor como instalaciones de iluminación enlistan el código de temperatura para temperaturas ambientes dadas.

Un producto que genera calor se considera aceptable para el lugar toda vez que la temperatura mínima de ignición del material peligroso presente y la temperatura ambiente del lugar no excedan los límites establecidos por el fabricante. Si la temperatura ambiente es mayor que la máxima establecida en la placa del nombre, el producto podría aun ser aceptable para su uso bajo ciertas condiciones con tal de que la temperatura de ignición del material peligroso no haya sido excedida.

## **Temperatura de Operación**

La temperatura de operación considerada para productos peligrosos se determina mediante pruebas de laboratorio en una temperatura ambiente de 40 °C. Los productos certificados por las diversas agencias consideran productos certificados a sus normas para ser confiables a diferentes rangos de temperatura.

## **Áreas Clase II**

Las áreas Clase II son peligrosas debido a la presencia de cenizas combustibles. Nótese que el polvo debe estar presente en cantidades suficientes para que exista un peligro de fuego o explosión. El hecho de que haya algo de ceniza combustible presente no significa que existe un área peligrosa Clase II. Para ser considerado como “ceniza” el material combustible debe existir como sólido finamente dividido con tamaño de 0.420 mm o menos.

## **Áreas Clase II, Divisiones 1 y 2, Grupos E, F, y G**

Al igual que en las Divisiones 1 y 2 de la Clase I, la subdivisión de la Clase II en Divisiones 1 y 2 identifica la probabilidad de que habrá un peligro de explosión.

## **División 1**

Un lugar Clase II División 1 es aquel en donde la ceniza combustible se encuentra normalmente suspendida en el aire en cantidades suficientes para producir mezclas encendibles, o en donde fallas mecánicas o bien operaciones anormales del equipo o maquinaria pueda causar la producción de mezclas explosivas o encendibles de aire y ceniza, y pueda ser también fuente de ignición a través de fallas simultáneas del equipo eléctrico. Un lugar Clase II División 1 también existe en donde puedan estar presentes cenizas combustibles con naturaleza conductora de electricidad en cantidades peligrosas (áreas Grupo E). El término “cantidades peligrosas” intenta referirse a aquellas áreas en donde la ceniza pudiera no estar en suspensión en el aire en cantidades suficientes para causar explosión, pero pudiera estar establecida en el equipo eléctrico de tal forma que las partículas eléctricamente conductoras puedan penetrar en las aperturas de la cubierta del equipo eléctrico y causar fallas eléctricas, o en donde el polvo pueda entrar en los cojinetes del motor y causar temperaturas excesivas debido a las fallas en los cojinetes.



## **División 2**

Un área Clase II División 2 es en donde las cenizas combustibles no están normalmente en el aire en cantidades suficientes para producir mezclas explosivas o encendibles, y las acumulaciones de polvo no son normalmente suficientes para interferir con la operación normal del equipo eléctrico, tal como obstrucciones en las aperturas de ventilación, o ser causa de fallas en cojinetes. Esto incluye áreas en donde el polvo combustible puede estar en suspensión en el aire solo como resultado de un malfuncionamiento (o mal manejo) poco frecuente de equipo de proceso, y aquellas áreas en donde la acumulación de polvo puede estar sobre o en las proximidades del equipo eléctrico y puede ser suficiente para interferir en la disipación segura del calor del equipo, o pudiera ser encendible por la operación anormal o falla del equipo eléctrico.

### **Clase II, Grupos E, F, y G**

La división en tres grupos en las áreas Clase II es por la misma razón en la que las áreas Clase I se dividen en Grupos A, B, C, y D: Diseño de equipo y clasificación de áreas. Sin embargo, los tres Grupos de la Clase II se basan en diferentes características que los cuatro Grupos de la Clase I ya que el diseño de equipo a prueba de ignición por polvos para áreas Clase II se basa en principios diferentes que el diseño de equipo a prueba de explosión para áreas Clase I. En áreas Clase II, la temperatura de ignición del polvo, la conductividad eléctrica del polvo, y el efecto de tapadera térmica que el polvo puede tener sobre el equipo que genera calor, tal como las instalaciones de iluminación o los motores, son factores decisivos en la determinación de los Grupos Clase II.

#### **Grupo E**

Los polvos o cenizas del Grupo E incluyen polvos metálicos, tal como Aluminio y Magnesio. Además de que estos son altamente abrasivos, y por lo tanto pudiendo causar sobrecalentamiento de los cojinetes en motores si este polvo entrase en el cojinete, los polvos del Grupo E son conductores eléctricos. Si se les permite entrar en las cubiertas pueden causar fallas eléctricas del equipo.

#### **Grupo F**

Los polvos del Grupo F son carbonosos, siendo el principal polvo en este grupo el polvo de carbón. Estos polvos tienen de algún modo temperaturas de ignición menores a los polvos del Grupo E y una capa de polvo de Grupo F tiene un valor de aislamiento térmico mayor que una capa de polvo del Grupo E, por lo que requieren un control más cuidadoso de la temperatura de la superficie del equipo. Tales polvos son semi-conductores pero esto no es normalmente un factor para equipo de 600 volts o menos.

#### **Grupo G**

Los polvos del Grupo G incluyen polvos plásticos, mayormente polvos químicos, y polvos de comida y grano. Estos no son conductores de electricidad. En general, estos polvos tienen las más altas características como aislantes térmicas y las más bajas temperaturas de ignición. Por esto, el equipo a prueba de ignición por polvos para usarse en atmósferas Grupo G debe tener las temperaturas de superficie más bajas para prevenir la ignición de una capa de polvos por el calor generado dentro del equipo. Debido a las diferentes características de diseño, el equipo confiable para áreas Clase I no es necesariamente confiable para áreas Clase II, y el equipo confiable para áreas Clase II no necesariamente es confiable para áreas Clase I. El equipo debe ser aprobado para cada lugar, clase y grupo involucrado.

Mucho equipo confiable para áreas Clase I es también confiable para áreas Clase II y es marcado como tal, si bien cuando se usa en áreas Clase II puede haber restricciones, como voltaje máximo de lámparas menor para mantener la menor temperatura de superficie necesaria para equipo en atmósferas con polvos. Lo siguiente tipifica la especificación de grupos E, F, y G:

| <b>Tipo de material</b>       | <b>Grupos</b> | <b>Materiales típicos</b>                                |
|-------------------------------|---------------|--|
| Polvos conductores eléctricos | E             | Metales como aluminio y magnesio                         |
| Polvos carbonosos             | F             | Negro de carbón, polvo de carbón, polvo de coque         |
| Polvos de agricultura         | G             | Grano, flor, azúcar, especias, arroz, ciertos polímeros. |

En las áreas Clase II todos los productos deben operar a temperaturas como las mostradas a continuación, basándose en ya sea que estos produzcan calor o sujetos a sobrecargarse o no, y basándose en el grupo en el que caen. Los productos Clase III en todos los casos deben operar debajo de 165 °C.

|                           | <b>Equipo no sujeto a sobrecargas</b> |     | <b>Equipo que puede ser sobrecargado (motores, transformadores)</b> |     |                          |     |
|---------------------------|---------------------------------------|-----|---|-----|--------------------------|-----|
|                           |                                       |     | <b>Operación normal</b>   |     | <b>Operación anormal</b> |     |
| <b>Grupos de Clase II</b> | °C                                    | °F  | °C  | °F  | °C                       | °F  |
| E                         | 200                                   | 392 | 200   | 392 | 200                      | 392 |
| F                         | 200                                   | 392 | 150   | 302 | 200                      | 392 |
| G                         | 165                                   | 329 | 120   | 248 | 165                      | 329 |

### Áreas Clase III

Las áreas Clase III son aquellas que son peligrosas debido a la presencia de fibras o partículas suspendidas fácilmente inflamables, pero en las cuales estas fibras o partículas suspendidas volátiles poco probablemente estén en suspensión en el aire en cantidades suficientes para producir mezclas encendibles. Las partículas suspendidas fácilmente encendibles presentan peligro de fuego pero no de explosión. Un ejemplo típico de este tipo de material es la pelusa de algodón que se acumula en las trampas de pelusa de las secadoras de ropa. Los secadores de ropa son diseñados para que incluso si la pelusa se prende, el fuego quede contenido dentro de la cubierta de la secadora.

### Clase III, Divisiones 1 y 2

#### División 1

Esta división es un lugar en donde hay equipo que produce fibras o partículas suspendidas fácilmente inflamables (cerca de maquinaria textil) o cuando se maneja este material (por ejemplo, en donde el material se guarda en bolsas).

## **División 2**

Estas son áreas en donde se almacenan o partículas suspendidas fácilmente inflamables, excepto en procesos de manufactura (la cual es División 1).

### **Grupos Clase III**

No existen grupos en las áreas Clase III.

En base a lo anterior estudiado, es posible establecer lo siguiente:

Clase I – Gases o vapores inflamables presentes en el área en cantidad suficiente para producir mezclas explosivas o de ignición.

Clase II – Presencia de polvo combustible.

Clase III – Fibras o partículas suspendidas fácilmente inflamables, pero que no es probable que estén en cantidad suficiente para producir una mezcla explosiva.

Las zonas por su parte se clasifican de la siguiente manera:

Zona 0 – Área o espacio cerrado en el cual está continuamente presente o se prevé que esté presente durante largos periodos de tiempo, o cortos periodos frecuentes, cualquier sustancia, sea gas, vapor o líquido inflamable o explosiva en concentraciones comprendidas dentro de los límites inferior y superior de inflamabilidad.

Zona 1 – Área en la cual se procesa, maneja o almacena cualquier sustancia, sea gas, vapor o líquido inflamable o explosiva, y que en operaciones normales presenta la posibilidad de llegar a concentraciones explosivas o de ignición en cantidad suficiente para constituir un peligro.

Zona 2 – Área en la cual, si bien se procesa, maneja o almacena cualquier sustancia, sea gas, vapor o líquido inflamable o explosiva, las condiciones de trabajo están tan bien controladas que la producción o la liberación de una mezcla explosiva o de ignición en cantidad suficiente para ser peligrosa, puede sólo presentarse en condiciones anormales.

### **Diseño y construcción de equipo**

Existen diversas formas de proteger el equipo eléctrico de tal forma que este no pueda causar una explosión cuando sea utilizado en atmósferas rodeadas de material flamable, o pueda encender a una capa de polvo o fibras en el equipo. Las dos formas más comunes son los equipos a prueba de explosión en áreas Clase I División 1 y algunas de División 2 así como equipo a prueba de ignición por polvo en áreas Clase II División 1. El equipo a prueba de fuego y con seguridad incrementada es más común en las áreas Zona 1 Clase I. Intrínsecamente el equipo de seguridad se está volviendo gradualmente más popular en las áreas de División 1 y Zona 1.

Para que ocurra un fuego o una explosión se deben cumplir tres condiciones. Debe haber un combustible (el gas o vapor flamable, o polvo combustible) en cantidades encendibles; debe haber también una fuente de ignición (energía en forma de calor o una chispa) de suficiente energía para causar ignición y debe haber oxígeno, usualmente el oxígeno del aire. Estas tres condiciones son llamadas el triángulo de fuego como se muestra en la figura 5.43. Si quitamos uno o más de estos tres no podrá ocurrir el fuego o una explosión. Esta es la base de los diversos sistemas de protección de equipos eléctricos permitidos en los códigos eléctricos para su uso en áreas peligrosas. Estos métodos de protección ya sea que contienen la explosión interna o bien eliminan uno o mas de los componentes del triángulo del fuego necesarios para que ocurra una explosión.

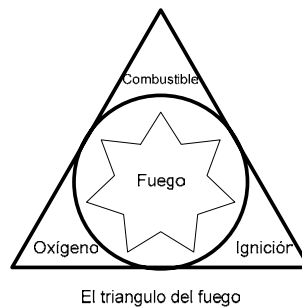


Fig. 5.43 Triángulo del fuego.

Los métodos de protección mas comúnmente utilizados en Norteamérica son equipos a prueba de explosión para áreas Clase I, y equipo a prueba de ignición por polvo para áreas Clase II. El combustible y el oxígeno deben estar en la mezcla correcta, muy poco combustible o mezcla pobre, o mucho combustible o mezcla rica pueden no encender. Estos limites explosivos son definidos como “limites inferiores de explosión” (LEL) y “limites superiores de explosión” (UEL).

## **Tipos de Protección**

### **Protección tipo “d” a prueba de explosión o a prueba de fuego**

Estos tipos de protección se basan en la contención. Los requerimientos para “a prueba de fuego” son en alguna forma menos severos que los requerimientos norteamericanos para equipo “a prueba de explosión”. El equipo a prueba de fuego no se permite en áreas Clase I División 1 y el equipo a prueba de explosión no esta permitido en áreas Clase I Zona 0.

Ya que se espera que los gases y vapores flamables se encuentren dentro de la cubierta del equipo, el diseño de este debe ser capaz de soportar una explosión causada por una chispa en los contactos de los dispositivos interruptores, alta temperatura, o una falla eléctrica. La cubierta es diseñada en tal forma que los gases calientes generados durante una explosión interna sean enfriados por debajo de la temperatura de ignición de la atmósfera flamable a los alrededores a medida que estos se transmiten a través de las juntas o uniones de la cubierta.

Adicionalmente, las superficies externas de la cubierta no deben estar lo suficientemente calientes para encender la atmósfera rodeante como resultado de la energía calorífica dentro de la cubierta. Esta energía calorífica puede ser el resultado de la operación normal del equipo generador de calor, o bien puede ser el resultado de un arco voltaico de la cubierta que parta de una falla en la tierra.

### **Protección de molde o encapsulada tipo “m”**

Este tipo de protección es aquella en la cual las partes que pueden encender a una atmósfera explosiva están encerrados en una resina (plástica) lo suficientemente resistente a las influencias del medio ambiente de tal manera que esta atmósfera explosiva no pueda ser encendida por otras chispas o calentamiento, los cuales pudieran ocurrir dentro de la encapsulación.

### **Protección de seguridad aumentada tipo “e”**

Este sistema de protección es para equipos que, bajo condiciones normales de operación, no producen arcos eléctricos, chispas, o altas temperaturas capaces de producir ignición. Esta protección proporciona un espacio especial mayor entre las partes vivas y las partes vivas de polaridad opuesta o partes metálicas aterrizadas, también proporciona materiales especiales aislantes para reducir la probabilidad de arcos eléctricos, así como terminales especiales para reducir la probabilidad de temperaturas altas o conexiones sueltas, y también equipo de control de temperatura en equipos generadores de calor. Es ampliamente utilizada para protección de motores con caja cilíndrica, cajas terminales y de conexiones, y cajas terminales de equipo a prueba de fuego en donde los contactos arqueados se encuentran en una cubierta separada conectada a la cubierta de seguridad aumentada mediante conectores a prueba de fuego. Este equipo cumple los requerimientos para las Zonas 1 y 2 de las áreas Clase I.

### **Protección de tipo seguridad intrínseca o intrínsecamente seguro “ia” e “ib”**

Existen dos versiones de este método de protección en el sistema por zonas, “ia” (falla 1) para áreas Zona 0 y menos peligrosos, así como “ib” (falla 2) únicamente para áreas Zona 1 y 2. Adicionalmente, en la división por clases el equipo intrínsecamente seguro listado para su uso en áreas Clase I División 1 para el mismo grupo de gases, y con una clasificación apropiada de temperatura es permitido en áreas Clase I, Zona 0, 1 y 2. No hay marca “i” para el equipo intrínsecamente seguro listado en el sistema de divisiones y clases (solo del tipo falla 2).

### **Sistemas intrínsecamente seguros**

Estos son sistemas de baja energía diseñados para asegurar la seguridad mediante la eliminación de la parte del triángulo del fuego conocida como la fuente de ignición. La energía en el sistema se mantiene por debajo de la necesaria para encender la atmósfera inflamable, aún en condiciones de falla. En esta técnica de protección, la apertura, aterrizaje y el diseño de corto-circuito de el cableado instalado en campo se considera una condición de operación normal, mas que una condición de falla. El dispositivo protector comúnmente utilizado en circuitos intrínsecamente seguros es la barrera con diodos Zener. Mientras que este tipo de dispositivo controla la energía que va hacia un circuito, no previene contra productos instalados incorrectamente tales como los capacitores (los cuales pueden almacenar energía) de incrementar la corriente máxima permitida en el sistema. Es importante entender que la seguridad intrínseca intenta actuar como sistema, aunque no hay dispositivo que proporcione protección total.

### **Protección tipo “nA” no chispeante**

Esta es protección adecuada para usar solamente en áreas Clase I, Zona 2 o División 2. Está subdividida en tres categorías, “nA”, “nC”, y “nR”.

Donde:

- A – Equipo no chispeante.
- B – Equipo chispeante en el cual los contactos están protegidos adecuadamente (diferente a la respiración restringida).
- C – Cubierta con respiración restringida. Es similar a herméticamente sellado aunque incluye también otras cubiertas en donde la velocidad de fuga de un flamable dentro de la cubierta es restringida. Se llevan a cabo pruebas especiales de fuga en la cubierta.

### **Protección “nC” herméticamente sellada**

Esta técnica de protección está limitada para áreas Zona 2 o División 2 y funciona mediante la eliminación de la fuente de ignición. Esta protección define “herméticamente sellada” como la fusión de vidrio en metal. Los relevadores llamados también “herméticamente sellados” los cuales son sellados mediante el uso de juntas o sellos no se incluyen en esta definición. Los dispositivos típicos herméticamente sellados son los interruptores de tubo de mercurio y los interruptores de láminas.

### **Protección tipo “nC” no incendiaria**

Este es un método de protección contra contactos chispeantes en áreas Clase I Zona 2 o División 2. Un componente no incendiario es aquél que tiene contactos para establecer o romper un circuito incendiario en donde el mecanismo de contacto está construido de tal forma que el componente es incapaz de encender el gas flamable especificado o la mezcla vapor-aire. La cubierta de un componente no incendiario no tiene la intención de excluir la atmósfera flamable o contener una explosión.

### **Protección “o” de inmersión en aceite**

Esta técnica de protección está limitada también a equipo en áreas División 2 y Zona 1. Este elimina la fuente de ignición del triángulo del fuego. Funciona debido a que la fuente de ignición es mantenida sumergida en aceite. Hay provisiones para asegurar que siempre hay suficiente aceite encima de los contactos para prevenir ignición de atmósferas flamables. Esta técnica es regularmente utilizada para contactos de alta potencia o energía frecuentemente clasificados alrededor de 600 volts, como en los interruptores cortacircuitos, controladores de motor y otros equipos de control industrial. Puede, sin embargo, ser usado para cualquier dispositivo interruptor.

### **Protección “p” presurizada y con purga**

Este es un tipo de protección que previene la entrada de la atmósfera rodeante dentro de la cubierta del aparato eléctrico mediante la conservación de una presión positiva dentro de la caja de un gas protector (aire, inerte, u otro gas adecuado) a una presión mayor a la de la atmósfera rodeante.

La purga es el proceso de proveer a la cubierta un gas protector a un flujo suficiente y presión positiva para reducir la concentración de cualquier gas o vapor flamable presente inicialmente a un nivel aceptable. Esta técnica puede utilizarse para cambiar un lugar Clase II o Clase I División 1 a un lugar no peligroso o bien a un lugar División 2, o también para cambiar un lugar Clase I o II División 2 en un lugar no peligroso. Requiere una recinto no combustible (la cual puede ser un cuarto de control o un cuarto de máquinas) el cual primeramente es purgado de cualquier flamable o combustible que pudiera estar presente, y es entonces mantenido a una presión positiva suficiente para asegurar que combustibles o flamables no puedan entrar y ser encendidos por equipo eléctrico dentro de este cuarto. La purga puede ser continua o una purga sencilla con una presión positiva mantenida para compensar fugas. El medio presurizante puede ser ya sea aire, comúnmente usado en cuartos de control en donde la gente estará trabajando, o un gas no flamable. En buques cisterna en el mar, el gas de combustión es un medio común de purga y presurización. En cuartos de instrumentos en áreas con atmósferas corrosivas, se usa aire o gas especialmente procesado y secado para proteger el equipo contra la corrosión así como para proporcionar protección contra ignición de gases y vapores exteriores flamables o polvos combustibles. Lo mostrado a continuación establece los tipos de protección “p”:

| <b>Tipo</b> | <b>Explicación</b>  |
|-------------|---|
| <b>X</b>    | Cambia el área dentro de la unidad de División 1 a no peligrosa |
| <b>Y</b>    | Cambia el área dentro de la unidad de División 1 a División 2   |
| <b>Z</b>    | Cambia el área dentro de la unidad de División 2 a no peligrosa |

### **Protección “q” rellena de polvo**

Este sistema de protección se permite en áreas Zona 1 y Zona 2. No existe un sistema equivalente reconocido en el código eléctrico US NEC 500. En este tipo de sistema de protección el ámbito del aparato eléctrico es llenado con un material en estado granulado fino para que en las condiciones pretendidas de servicio, el arco que ocurra dentro de este ámbito o lugar del aparato eléctrico no encienda a la atmósfera rodeante. Además, la ignición no puede ser causada por flamas o temperaturas excesivas en la superficie de este lugar. Este sistema de protección es usado para protección de los componentes en cajas de conexiones. A veces es llamado “relleno de arena”.

### **Protección especial**

Algunos países permiten sistemas de protección especial que consisten de combinaciones de otros sistemas o de otros sistemas especiales.

### **Cajas de protección ambiental tipo NEMA y CSA**

El término caja NEMA (National Electrical Manufacturers Association) es común en Estados Unidos, aún cuando los productos son probados normalmente contra normas UL (Underwriter Laboratories). Las siguientes son designaciones de protección ambiental las cuales son especificadas adicionalmente a los requerimientos eléctricos o de áreas peligrosas.

**GABINETE:** Es un recinto o recipiente, que rodea o aloja un equipo eléctrico, con el fin de protegerlo contra las condiciones externas y con objeto de prevenir a las personas de contacto accidental con partes vivas.

### **Cajas Tipo 1 (USOS GENERALES)**

Son diseñadas para uso principalmente en interiores para proporcionar un grado de protección contra cantidades limitadas de polvo que cae. Este tipo no está específicamente identificado en las normas CSA. Diseñadas para uso en interiores, en áreas donde no existen condiciones especiales de servicio, y donde se pretende proteger el contacto accidental de personas con el equipo protegido.

### **Cajas Tipo 2 (A PRUEBA DE GOTEO)**

Son diseñadas para uso principalmente en interiores para proporcionar un grado de protección contra cantidades limitadas de polvo o agua que cae. Diseñadas para uso en interiores, proteger el equipo contra goteo de líquidos no corrosivos y contra la salpicadura de lodos.

### **Cajas Tipo 3 (PARA SERVICIO INTERPERIE)**

Las cajas tipo 3 se diseñan principalmente para uso en exteriores para proporcionar un grado de protección contra lluvia, escarcha, polvaderas, y daño debido a formación externa de hielo. Diseñadas para uso en exteriores y proteger el equipo que encierran contra tolvaneras y aire húmedo. Gabinete metálico resistente a la corrosión.

### **Cajas Tipo 3R (A PRUEBA DE LLUVIA)**

Se diseñan principalmente para su uso en exteriores para proporcionar un grado de protección contra lluvia, escarcha, y daño debido a formación externa de hielo. Diseñado para uso en exteriores y proteger el equipo que encierran contra la lluvia. Gabinete metálico resistente a la corrosión.

### **Cajas tipo 3S (3 Y 3R)**

Las cajas tipo 3S se diseñan principalmente para uso en exteriores para proporcionar un grado de protección contra lluvia, escarcha, polvaderas, y para permitir la operación de mecanismos externos cuando hay mucho hielo encima.

### **Cajas Tipo 4 (HERMÉTICA AL AGUA Y AL POLVO)**

Se diseñan para su uso en interiores o exteriores principalmente para proporcionar un grado de protección contra polvaderas, lluvia, agua que salpica, agua dirigida con manguera o tubo, y daño por formación externa de hielo. Diseñado para equipo expuesto directamente a severas condensaciones externas, salpicaduras de agua o chorro de manguera.

### **Cajas Tipo 4X (HERMÉTICA AL AGUA, POLVO Y RESISTENTE A LA CORROSIÓN)**

Estas son diseñadas para su uso en interiores o exteriores principalmente para proporcionar un grado de protección contra corrosión, polvaderas, lluvia, agua que salpica, agua dirigida con manguera o tubo; y daño por formación externa de hielo. Debe cumplir con los mismos requisitos que se indican para gabinetes Tipo 4, y además ser resistentes a la corrosión (con acabado especial para resistir corrosión o gabinete hecho de poliéster).



### **Cajas Tipo 5 (HERMÉTICO AL POLVO)**

Se diseñan para uso en interiores principalmente para proporcionar un grado de protección contra depósitos de polvo suspendido en el aire, polvo que cae, y líquidos no corrosivos que goteen. Diseñadas para uso en interiores y proteger el equipo que encierran contra el polvo.

### **Cajas Tipo 6 (SUMERGIBLE, HERMÉTICO AL AGUA Y AL POLVO)**

Estas se diseñan para uso en interiores o exteriores principalmente para proporcionar un grado de protección contra agua dirigida por manguera o tubo, la entrada de agua durante la inmersión ocasional de la caja a una profundidad limitada; y daño por formación externa de hielo. Diseñadas para uso en interiores y exteriores, en caso de inmersión ocasional, caída de chorros directos de agua, polvos o pelusas.

### **Cajas Tipo 6P**

Se diseñan para uso en interiores o exteriores principalmente para proporcionar un grado de protección contra agua dirigida por manguera o tubo, la entrada de agua durante la inmersión prolongada de la caja a una profundidad limitada; y daño por formación externa de hielo.

### **Cajas Tipo 12 (USO INDUSTRIAL, HERMÉTICO AL POLVO Y AL GOTEO)**

Se diseñan principalmente para uso en interiores para proporcionar un grado de protección contra polvo en circulación, polvo que cae, y líquidos no corrosivos que gotean. Diseñadas para uso en interiores y proteger el equipo contra fibras, insectos, pelusas, polvos, salpicaduras ligeras, goteos y condensaciones externas de líquidos.

### **Cajas Tipo 12K**

Estas están diseñadas con separadores para su uso en interiores para proporcionar principalmente un grado de protección contra polvo circulante, polvo que cae, y líquidos no corrosivos goteantes.

### **Cajas Tipo 13 (USO INDUSTRIAL, HERMÉTICO AL ACEITE Y AL POLVO)**

Estas están diseñadas para uso en interiores principalmente para proporcionar un grado de protección contra polvo, agua de aspersores, aceite, y refrigerante no corrosivo. Diseñadas para uso en interiores y proteger el equipo contra aceites, líquidos refrigerantes y polvos. Principalmente en gabinetes de dispositivos piloto para máquinas herramientas.

### **Definiciones pertenecientes a áreas (clasificadas) peligrosas**

Las siguientes tipos de caja NEMA aparecen ocasionalmente en especificaciones y literatura de productos, sin embargo estas no son utilizadas por CSA. Estos tipos NEMA solo son específicos para EU.

### **Cajas Tipo 7 (A PRUEBA DE GASES EXPLOSIVOS)**

Estas se diseñan para uso en interiores en áreas clasificados como Clase I, Grupos A, B, C, o D como se define en NEC. Diseñadas para uso en atmósferas y para soportar una explosión interna sin causar peligros externos (equipo encerrado en aire).

### Cajas Tipo 8 (A PRUEBA DE GASES EXPLOSIVOS)

Se diseñan para uso en interiores o exteriores en áreas clasificados como Clase I, Grupos A, B, C, o D como se define en NEC. Diseñadas para el mismo fin que el Tipo 7 pero su equipo trabaja sumergido en aceite para evitar cualquier posibilidad de chispas que se produzcan, arriba del aceite (equipo encerrado en aceite).

### Cajas Tipo 9 (A PRUEBA DE POLVOS EXPLOSIVOS)

Se diseñan para uso en interiores en áreas clasificados como Clase II, Grupos E, F, y G como se define en NEC. Diseñadas para uso en atmósferas peligrosas y evitar el ingreso de cantidades peligrosas de polvos explosivos (equipo encerrado en aire).

### Cajas Tipo 10 (PARA USO EN MINAS)

Diseñadas para uso en minas, cumpliendo los requisitos para atmósferas que contienen mezclas de metano y aire. Gabinete a prueba de explosión con juntas y seguros adecuados.

Las tablas 5.5, 5.6 y 5.7 establecen comparaciones en las aplicaciones para los distintos tipos de cajas de acuerdo a las condiciones ambientales.

| Proporciona un grado de protección contra las siguientes condiciones del ambiente | Tipo de cajas |    |   |    |   |   |    |    |     |    |
|---|---------------|----|---|----|---|---|----|----|-----|----|
|   | 1*            | 2* | 4 | 4X | 5 | 6 | 6P | 12 | 12K | 13 |
| Contacto incidental con el equipo cubierto  | X             | X  | X | X  | X | X | X  | X  | X   | X  |
| Polvo que cae   | X             | X  | X | X  | X | X | X  | X  | X   | X  |
| Líquidos que caen y salpicaduras ligeras  | —             | X  | X | X  | X | X | X  | X  | X   | X  |
| Polvo circulante, pelusas, fibras, volátiles**                                    | —             | —  | X | X  | — | X | X  | X  | X   | X  |
| Polvo depositado, pelusas, fibras, volátiles**                                    | —             | —  | X | X  | X | X | X  | X  | X   | X  |
| Agua que cae de tubos y que salpica   | —             | —  | X | X  | — | X | X  | —  | —   | —  |
| Aceite y refrigerante que escurre   | —             | —  | — | —  | — | — | —  | X  | X   | X  |
| Aceite y refrigerante rociado y salpicado   | —             | —  | — | —  | — | — | —  | —  | —   | —  |
| Agentes corrosivos  | —             | —  | — | X  | — | — | —  | —  | —   | —  |
| Inmersión ocasional temporal  | —             | —  | — | —  | — | X | X  | —  | —   | —  |
| Inmersión ocasional prolongada  | —             | —  | — | —  | — | — | —  | —  | —   | —  |

\* Estas cajas pueden ser ventiladas. Sin embargo, el tipo 1 puede no proporcionar protección contra pequeñas partículas de polvo que cae cuando la ventilación se encuentra en la parte superior de la caja.

\*\* Estas fibras y partículas suspendidas fácilmente inflamables son materiales no peligrosos y no son considerados como fibras encendibles o partículas volátiles combustibles (Clase III).

Tabla 5.5 Comparación de aplicaciones específicas de cajas para uso en interiores en áreas no peligrosas.

| Proporciona un grado de protección contra las siguientes condiciones del ambiente | Tipo de cajas |       |    |   |    |   |    |
|---|---------------|-------|----|---|----|---|----|
|   | 3             | 3R*** | 3S | 4 | 4X | 6 | 6P |
| Contacto incidental con el equipo cubierto  | X             | X     | X  | X | X  | X | X  |
| Nieve, lluvia, escarcha*  | X             | X     | X  | X | X  | X | X  |
| Escarcha**  | —             | —     | X  | — | —  | — | —  |
| Polvaderas  | X             | —     | X  | X | X  | X | X  |
| Mangueras, tubos  | —             | —     | —  | X | X  | X | X  |
| Agentes corrosivos  | —             | —     | —  | — | X  | — | X  |
| Inmersión ocasional temporal  | —             | —     | —  | — | —  | X | X  |
| Inmersión ocasional prolongada  | —             | —     | —  | — | —  | — | X  |

\* No se requieren mecanismos de operación externos cuando la caja está cubierta de hielo.

\*\* Los mecanismos de operación externos son operables cuando la caja está cubierta de hielo.

\*\*\* Estas cajas pueden estar ventiladas.

Tabla 5.6 Comparación de aplicaciones específicas de cajas para uso en exteriores en áreas no peligrosas.

| Proporciona un grado de protección contra atmósferas que típicamente contienen gases, vapores y polvos*** peligrosos | Tipo de cajas NEMA 7 y 8, Grupos de Clase I** |   |   |   |   | Tipo de cajas NEMA 9 y 10, Grupos de Clase II** |   |   |    |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|  | Clase   | A | B | C | D | E   | F | G | 10 |
| Acetileno  | I   | X | — | — | — | —   | — | — | —  |
| Hidrógeno, gases manufacturados  | I   | — | X | — | — | —   | — | — | —  |
| Dietil éter, etileno, ciclopropano   | I   | — | — | X | — | —   | — | — | —  |
| Tolueno, isopreno  | I   | — | — | — | X | —   | — | — | —  |
| Polvos metálicos   | II  | — | — | — | — | X   | — | — | —  |
| Negro de carbón, polvo de carbón, coque  | II  | — | — | — | — | —   | X | — | —  |
| Flúor, almidón, polvo de grano   | II  | — | — | — | — | —   | — | X | —  |
| Fibras, partículas volátiles*  | III   | — | — | — | — | —   | — | X | —  |
| Metano con o sin polvo de carbón   | I   | — | — | — | — | —   | — | — | X  |

\* Debido a las características del gas vapor o polvo, un producto adecuado para una clase o grupo puede no ser adecuado para otra clase o grupo a menos que así lo indique el producto.

\*\* Debe referirse al artículo 500 del código eléctrico nacional (NEC) para los volátiles combustibles o fibras encendibles Clase III.

\*\*\* Una lista completa de líquidos, gases y vapores inflamables se puede encontrar en NFPA 497 – 1997, NFPA 325 – 1994, y NFPA 499 – 1997.

Tabla 5.7 Comparación de aplicaciones específicas de cajas para uso en interiores en áreas peligrosas.

## Clases de protección de cajas (código IP)

La IEC usa el término “protección contra el ingreso” para identificar la protección ambiental de una caja. Esto está definido en la norma 529 de IEC. Los códigos IP son comparables a los tipos de cajas NEMA.

El sistema de clasificación IP designa, mediante números, el grado de protección que proporciona una caja y el equipo eléctrico contra el contacto físico, cuerpos extraños así como el ingreso de agua.

Las clases de protección para el equipo eléctrico se refiere a:

- I. Protección de personas contra el contacto con partes vivas o móviles (protección al contacto físico).
- II. Protección contra el ingreso de cuerpos sólidos extraños (protección contra cuerpos extraños).
- III. Protección contra el ingreso de agua (protección contra agua).

Estructura y uso del código IP:

- I. Si un dígito del código no tiene que ser dado, debe entonces ser remplazado por la letra “X”.
- II. Las letras adicionales y/o suplementarias pueden ser omitidas sin letras de sustitución.
- III. Si se requiere más de una letra suplementaria, se debe seguir un orden alfabético.

El sistema de numeración y grado de protección se establece como sigue:

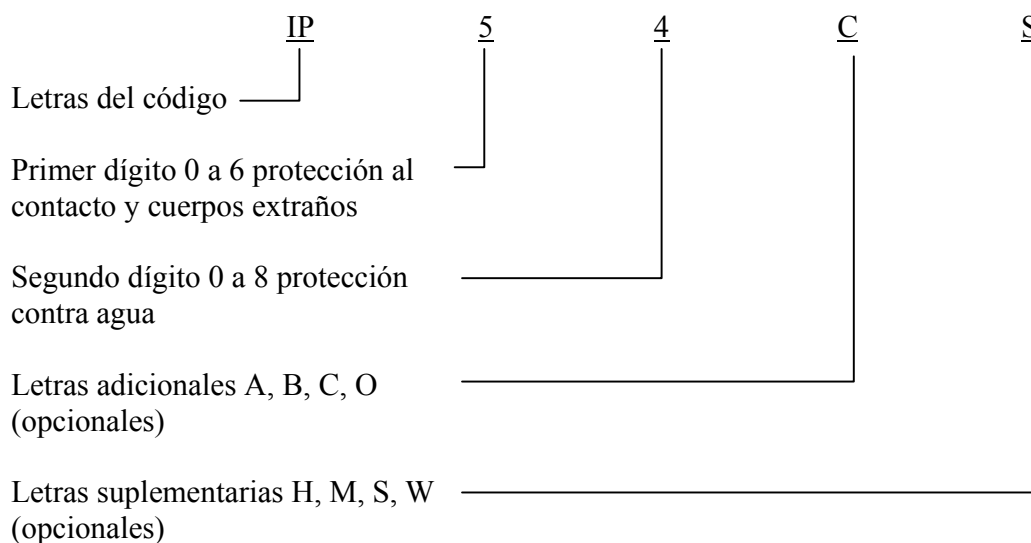
La letra adicional (opcional) tiene que ver con la protección de personas y se refiere a la información acerca de protección contra el acceso a partes peligrosas mediante:

- |                               |         |
|-------------------------------|---------|
| I. Parte posterior de la mano | Letra A |
| II. Dedo                      | Letra B |
| III. Herramienta              | Letra C |
| IV. Cable                     | Letra O |

La letra suplementaria (opcional) tiene que ver con la protección del equipo y proporciona información especialmente para:

- |  |         |
|--|---------|
| I. Equipo de alto voltaje                | Letra H |
| II. Impermeabilidad durante la operación | Letra M |
| III. Impermeabilidad durante alto        | Letra S |
| IV. Condiciones climáticas               | Letra W |

## Sistema de numeración del código IP



La tabla 5.8 muestra una descripción breve de la clasificación IP, mientras que la tabla 5.9 presenta una equivalencia entre las cajas NEMA y la clasificación IEC.

| Dígito | Primer dígito protección física   | Protección cuerpos extraños   | Segundo dígito protección contra agua  |
|--------|---|---|--|
| 0      | No protegido  | No protegido  | No protegido   |
| 1      | Protección contra contacto de dorso de la mano                          | Protegido contra objetos sólidos mayores a 50 mm  | Protegido contra agua cayendo verticalmente  |
| 2      | Protección contra contacto con dedos                                    | Protegido contra objetos sólidos mayores a 12 mm  | Protegido contra agua cayendo verticalmente con ángulo de hasta 15 grados  |
| 3      | Protección contra contacto de cables o herramientas                     | Protegido contra objetos sólidos mayores que 2.5 mm   | Protegido contra agua de aspersores a un ángulo de hasta 60 grados desde el plano vertical                             |
| 4      | Protección contra contacto con un cable o fleje con espesor mayor a 1mm | Protegido contra objetos sólidos mayores a 1.0 mm   | Protegido de agua que salpica en cualquier dirección   |
| 5      | Protección contra contacto con un cable                                 | La protección contra polvo previene el ingreso del polvo en cantidad suficiente para interferir con la operación del equipo | Protegido contra chorros de agua en cualquier dirección  |
| 6      | Protegido contra contacto con un cable                                  | No permite ingreso de polvo   | Protegido contra olas fuertes o chorros poderosos de agua y previene el ingreso de suficiente de ésta para causar daño |
| 7      |   |   | Protegido contra los efectos de inmersión a una profundidad de entre 150 mm hasta 1 metro                              |
| 8      |   |   | Protegido contra inmersión, adecuada para inmersión continua en agua bajo condiciones especificadas por el fabricante  |

Para una descripción completa y requerimientos de prueba, referirse a la publicación 529 de las normas IEC.

Tabla 5.8 Descripción de los dígitos de acuerdo a la protección requerida según la clasificación IP.

| Número de tipo de caja NEMA | Clasificación de cajas IEC |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1                           | IP 10                      |
| 2                           | IP 11                      |
| 3                           | IP 54                      |
| 3R                          | IP 14                      |
| 3S                          | IP 54                      |
| 4 y 4X                      | IP 56                      |
| 5                           | IP 52                      |
| 6 y 6P                      | IP 67                      |
| 12 y 12K                    | IP 52                      |
| 13                          | IP 54                      |

Tabla 5.9 Tipos de cajas NEMA vs clasificación IEC.

## Certificación de equipo

### EU y Canadá

En la mayoría de los casos, el equipo para uso en áreas peligrosas debe de estar certificado de acuerdo a las normas nacionales apropiadas y marcado como tal por una organización. La inspección de seguimiento para asegurar la conformidad es usualmente parte del programa. Los productos pueden estar marcados varias veces para diferentes países.

Los requerimientos específicos para la certificación de productos varían de país a país. Mientras que CSA, UL y FM tienen un enfoque similar, presentan entre sí diferencias sutiles. Esto significa que los productos seleccionados pueden ser ofrecidos en forma modular los cuales el cliente puede ensamblar posteriormente con el listado.

### Países europeos

Los países pertenecientes a la unión europea los cuales desarrollan productos basados en las normas del comité europeo de normalización electrotécnica (CENELEC), tienen requerimientos que difieren en muchos pero no en todos los aspectos con respecto a los requerimientos de EU establecidos por NEC y el ANSI (American National Standards Institute). Estas normas CENELEC fueron desarrolladas basándose en la publicación 79 del IEC y son llamadas normas EN (euronormas). Las normas CENELEC para equipo en áreas peligrosas se numeran desde EN50 014 hasta EN50 028.

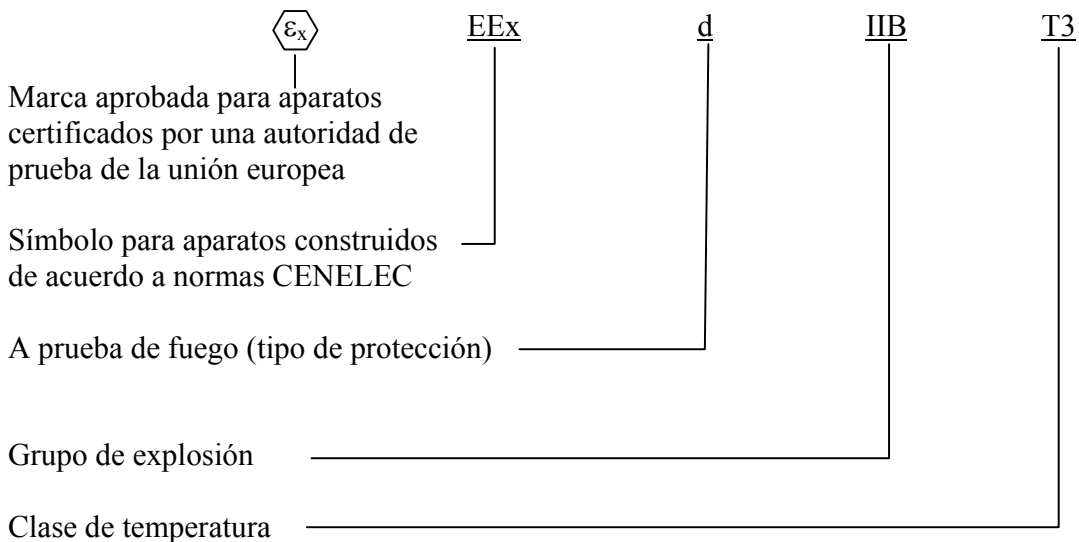
## Marcado

### Marcado típico en Norte América

|                     |                  |                          |
|---------------------|------------------|--------------------------|
| Clase I,            | Divisiones 1 y 2 | Grupos A, B, C, y D, T6  |
| Clase I,            | Zonas 1 y 2      | Grupos IIC, IIB, IIA, T6 |
| Clase II,           | Divisiones 1 y 2 | Grupos E, F, y G         |
| Clase III           |                  |                          |
| NEMA 3, 4, 4X, etc. |                  |                          |

## Marcado típico internacional

El símbolo  $\epsilon_x$  se usa para identificar el equipo diseñado para EN50 014 – EN50 028. Adicionalmente a la información del fabricante, clasificación eléctrica, modelo, etc., lo siguiente se proporciona para equipo que pretende utilizarse en áreas peligrosas.



## Directriz ATEX

Esta directriz aplica para componentes eléctricos y no eléctricos y sistemas protectores diseñados para su uso en atmósferas potencialmente explosivas. El cumplimiento con los requerimientos de esta directriz se volvió obligatorio en Julio del 2003.

La directriz ATEX se refiere a equipo eléctrico y mecánico e incluye aspectos tales como:

- Todo el equipo y sistemas protectores diseñados para el uso en atmósferas potencialmente explosivas dentro de la unión europea están cubiertos y deben tener la marca CE junto con los tipos de marcas específicas para protección contra explosión.
- Atmósferas explosivas causadas por la presencia de gas, vapores y neblinas.
- Los productos existentes previamente certificados deben ser re-examinados para determinar el cumplimiento de las nuevas directrices.
- La explotación de minas (Grupo I) y de superficies (Grupo II) es referida. (Grupo I) Aplica para equipo diseñado para uso en partes subterráneas de las minas, y a aquellas partes de las instalaciones en la superficie de tales minas, propensas a ser puestas en peligro por metano y/o polvos combustibles. (Grupo II). Aplica para equipo diseñado para ser usado en otras superficies industriales y áreas en alta mar propensas a ser puestos en peligro por atmósferas explosivas.
- Se incluyen categorías de equipos que definen los niveles requeridos de protección. La categoría 1 cubre equipo que tiene un nivel de protección muy alto. La categoría 2 cubre equipo que tiene un nivel de protección alto, y la categoría 3 cubre equipo que tiene un nivel normal de protección.

- f) En esta directriz ya no se enlistan las correspondencias a normas europeas. En lugar de esto se ha especificado un grupo de requerimientos de salud y seguridad eléctrica. Los cuerpos de normalización europeos, CEN y CENELEC se han vuelto encargados de la responsabilidad de preparar normas que soporten estos requerimientos esenciales de salud y seguridad (EHSR's).
- g) Los requerimientos técnicos para equipo y sistemas de protección en donde el riesgo surge de polvos combustibles, gases, vapores y neblinas son cubiertos por los requerimientos esenciales de salud y seguridad (EHSR's).
- h) Se pone más énfasis en el cumplimiento continuo de los productos certificados. La determinación de la conformidad se refiere a las fases de diseño y producción. Existe una opción de adoptar enfoques de sistemas de calidad para cubrir la fase de producción de algunos equipos. El sistema de calidad será basado en la serie de normas ISO 9000 pero ampliada para este propósito.
- i) Los requerimientos de inspección son referidos en mayor detalle y por lo tanto no están abiertos a interpretaciones diferentes de los requerimientos.

Todos los fabricantes de los productos cubiertos por estas nuevas directrices deben preparar una declaración de conformidad que contenga detalles acerca del producto, su uso pretendido y como cumple los requerimientos. En la mayoría de los casos, esto implica la participación de un cuerpo reconocido en el proceso de obtención de la conformidad.

La tabla 5.10 y 5.11 presentan una determinación de riesgo correspondiente a cada categoría y los métodos de protección respectivamente.

|                     | <b>Gas flamable siempre presente &gt; 1000 hrs./año</b> | <b>Gas flamable normalmente presente de 10 – 1000 hrs./año</b> | <b>Gas flamable normalmente no presente &lt; 10 hrs./año</b> |
|---------------------|---|--|--|
| <b>EU – NEC 500</b> | División 1  | División 1   | División 2   |
| <b>EU – NEC 505</b> | Zona 0  | Zona 1   | Zona 2   |
| <b>CENELEC/IEC</b>  | Zona 0  | Zona 1   | Zona 2   |
| <b>ATEX</b>         | Categoría 1G (Gas)                                      | Categoría 2G (Gas)   | Categoría 3G (Gas)   |

Tabla 5.10 Determinación de riesgo por zona, división y categoría.

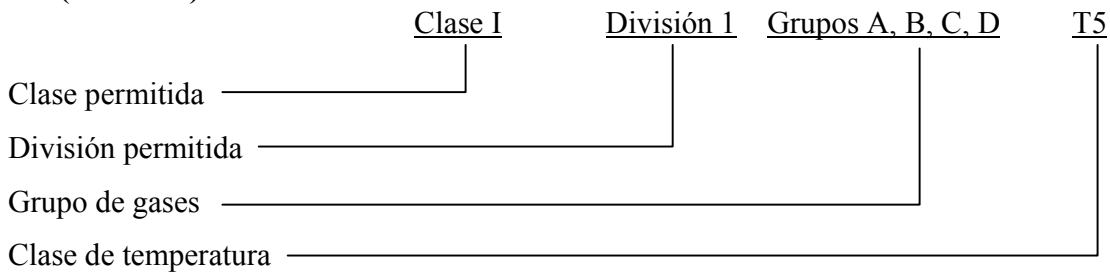


| Método de protección    | Símbolo | Zona permitida (CENELEC/IEC) | Zona permitida (NEC 505) | Categoría permitida ATEX |
|-------------------------|---------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| A prueba de fuego       | d       | 1 y 2                        | 1 y 2                    | 2 y 3                    |
| Falla encerrada         | nC      | 2                            | 2                        | 3                        |
| Relleno de polvo        | q       | 1 y 2                        | 1 y 2                    | 2 y 3                    |
| Seguridad aumentada     | e       | 1 y 2                        | 1 y 2                    | 2 y 3                    |
| No chispeante           | nA      | 2                            | 2                        | 3                        |
| Seguridad intrínseca    | ia      | 0, 1 y 2                     | 0, 1 y 2                 | 1, 2 y 3                 |
|                         | ib      | 1 y 2                        | 1 y 2                    | 2 y 3                    |
| Limitación de energía   | nL      | 2                            | 2                        | 3                        |
| Presurizado             | p       | 1 y 2                        | 1 y 2                    | 2 y 3                    |
| Encapsulación           | m       | 1 y 2                        | 1 y 2                    | 2 y 3                    |
| Inmersión en aceite     | o       | 1 y 2                        | 1 y 2                    | 2 y 3                    |
| Respiración restringida | nR      | 2                            | 2                        | 3                        |
| Especial                | s       | 0, 1 y 2                     |                          | 1, 2 y 3                 |

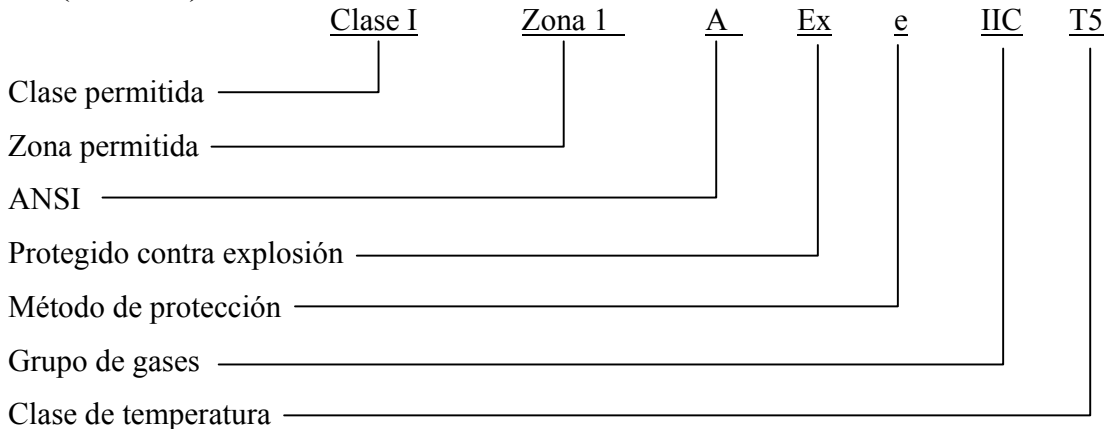
Tabla 5.11 Métodos de protección.

### Marcados expandidos

#### EU (NEC 500)



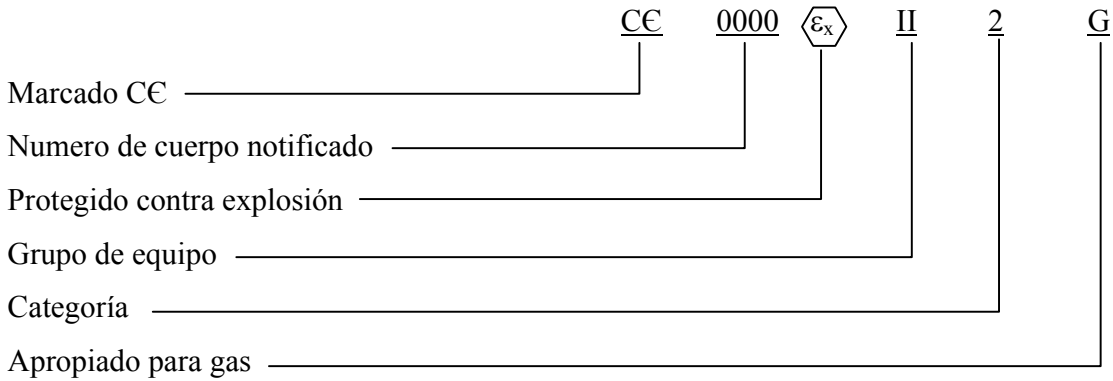
#### EU (NEC 505)



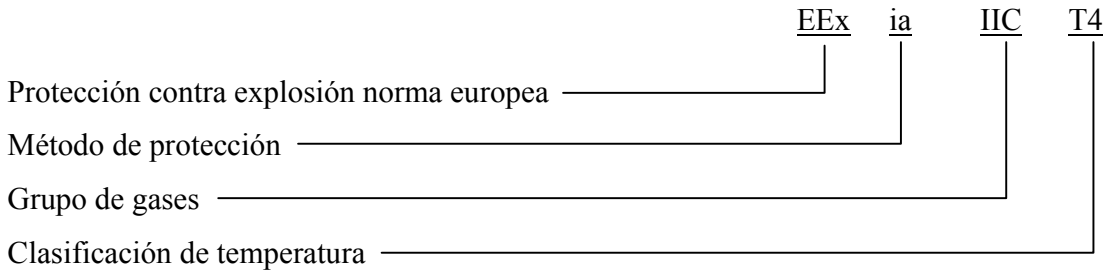
**Ex: marcado CENELEC/IEC**



**Marcado ATEX, marcado CE**



**Marcado adicional**



El equipo certificado por las diversas autoridades de prueba puede requerir información adicional al marcado tal como el símbolo o el nombre de la autoridad de prueba o inspección, el número de certificado, año de emisión, etc.

Los países europeos emiten certificados de conformidad, y estos certificados incluirán instrucciones especiales para la instalación, incluyendo limitaciones para la misma.

Con el libre comercio, el Consejo de Normas de Canadá y la OSHA han acreditado a un número de laboratorios de inspección y prueba nacionalmente reconocidos (NRTL) para certificar equipo entre unas y otras normas nacionales.

Por ello, en USA, Canadá y Europa la emisión de las normas y la certificación de sus productos son como a continuación se muestra:

USA: Múltiples agencias emiten normas de producto.

- OSHA acredita agencias de inspección (listadoras a normas ANSI).
- Marcado específico, múltiple o sin él puede ser aceptable para o bien requerido por agencias regulatorias.
- Se permite la auto-certificación de los fabricantes.

Canadá: CSA es responsable de la emisión de todas las normas de producto.

- El Consejo de Normas de Canadá acredita a las agencias de inspección (listadoras a normas CSA).
- Se requiere marcado específico para la aprobación de las agencias regulatorias.

CENELEC: Emite normas de producto y prácticas de instalación para naciones pertenecientes a la unión europea.

- Se permite la inspección mediante múltiples agencias de países miembros.
- Se requiere marcado específico para la aprobación de las agencias regulatorias.

## Marcas de certificación

**Las siguientes marcas de certificación aplican solamente en EU:**



Si la marca CSA aparece solamente con el subtítulo “NRTL”, es una indicación de que el producto está certificado por CSA en el mercado de EU para las normas ANSI/UL.



Este logo fue introducido en 1999 para ser consistentes en Norteamérica.



“LISTED” significa lo mismo que certificadas o aprobadas. Esto quiere decir que un producto ha sido totalmente investigado para un grupo específico de normas de construcción. En áreas peligrosas, los productos de tipo zona deben ser específicamente “listados” para ese lugar.

---



Los productos clasificados (“CLASSIFIED”) son diferentes a los listados. Los productos que llevan esta marca han sido evaluados por sus propiedades específicas. Si bien UL tiene una marca canadiense, CSA no tiene procesos equivalentes de certificación.

---



El servicio de reconocimiento de componentes de UL cubre la inspección o prueba y la evaluación de los componentes que están incompletos o restringidos en su capacidad de desempeño. Estos componentes serán utilizados después en productos completos o sistemas aprobados por UL. El servicio de reconocimiento de componentes de UL cubre componentes, tales como plásticos, cable y placas de circuito impreso, que puedan ser usados en un amplio espectro o bien en muy específicos productos finales, o en componentes como motores o en suministros eléctricos. Estos componentes no están diseñados para su instalación por separado en campo, están diseñados para su uso como componentes de equipo completo que ha sido sometido a investigación de UL.

---



La aprobación por Factory Mutual es esencialmente la misma que certificada o listada. Esto significa que un producto ha sido totalmente investigado para un grupo específico de normas de construcción. En áreas peligrosas, Factory Mutual aprueba específicamente productos de tipo zona para ese lugar.

---

## “Complies With”

Ciertos fabricantes utilizan el término “complies with” (“cumple con” para productos selectos, en EU se les permite a las compañías “auto-certificar” sus productos hacia una o un grupo de normas, las cuales pueden o no incluir las normas ANSI. Esto quiere decir que ninguna agencia de inspección de tercera parte ha investigado el producto para la seguridad o el desempeño. El instalador y las autoridades que tienen jurisdicción sobre las instalaciones eléctricas están simplemente aceptando la palabra o reputación del fabricante. Esta práctica no está aceptada en Canadá o en países de la unión europea.

## Marcas Canadienses:

### Canadá – Asociación Canadiense de Normas (CSA)

La marca CSA puede aparecer sola o con subtítulos



Si la marca CSA aparece sola, significa que el producto está certificado por CSA en el mercado Canadiense para las normas Canadienses aplicables.

---



Si la marca CSA aparece con subtítulos “NRTL/C”, significa que el producto está certificado por CSA en los mercados de EU y Canadá.

---



Este nuevo logo fue introducido en 1999 para consistencia en Norteamérica.

---



Laboratorios Underwriters de Canadá (Underwriters Laboratorios of Canadá) – Aún cuando está afiliado con UL en EU., ULC es una agencia separada. El listado ULC es confundido frecuentemente con la marca C-UL. Los laboratorios Underwriters de Canadá están limitados en sus inspecciones de equipo eléctrico por lo que la marca es usada normalmente en conjunto con la marca de una o más agencias. ULC trata con todos los equipos relacionados con alarmas de fuego en Canadá.

---

**Laboratorios Underwriters** – Existen tres marcas usadas por UL para adaptarse al mercado canadiense.



Los productos con la marca de listado C-UL han sido evaluados para los requerimientos de seguridad canadienses, los cuales pueden ser en alguna forma diferentes a los requerimientos de seguridad de EU.

---



El uso de la marca de clasificación C-UL indica que UL ha usado algo o porciones de las normas canadienses para evaluar el producto en peligros o propiedades específicas. CSA no tiene normas o procedimientos de certificación que permitan este tipo de certificación. Los usuarios deben revisar con las agencias regulatorias apropiadas para mayor información.

---



El uso de la marca de componente reconocido, la cual indica que UL ha usado algo o porciones de las normas canadienses para evaluar componentes específicos, es vista muy raramente. Esta marca es usada específicamente en partes de componentes que son parte de un producto o sistema más grande. Estos componentes pueden tener restricciones en su desempeño o pueden estar incompletos en su construcción.

CSA no tiene normas o procedimientos de certificación que permitan este tipo de certificación. Los usuarios deben revisar con las agencias regulatorias apropiadas para mayor información

---



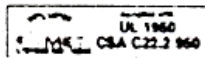
Estas marcas indican que los productos cumplen los requerimientos de CSA y ANSI (UL) y son adecuados para Canadá y EU.

---



Mientras que estas marcas indican cumplimiento con las normas canadienses y de EU, la construcción o certificación de este tipo no es necesariamente reconocida en Canadá.

---



Los productos aprobados por MET pueden ser marcados para su aceptación a través de Canadá. La etiqueta MET CSA puede indicar la norma CSA aplicable para la cual el producto ha sido certificado.

---



Intertek Testing Services – Los productos aprobados por ETL y Warnock Hersey pueden ser marcados para su aceptación a través de Canadá.

**Europa – Lo siguiente es para productos utilizados en países de la unión europea:**



La marca “Hex EX” identifica productos que son inspeccionados por una entidad de inspección miembro de la unión europea con una correspondencia a normas CENELEC. El símbolo Ex se acompaña del nombre de la agencia de inspección y un número de reporte. Todos los productos en áreas peligrosas usados en la unión europea deben tener la marca Ex y pueden requerir también marcas CE o ATEX.

---



Marcado para mostrar cumplimiento con la directriz de aprobación de la unión europea. El uso de esta marca indica conformidad con las directrices aplicables para un tipo particular de producto tales como compatibilidad electromagnética (EMC) o interferencia electromagnética (EMI). Esto es frecuentemente auto-declarado por el fabricante.

## 5.8 Control por computadora

La presencia del control por computadora en el manejo de las plantas de proceso, presenta las siguientes ventajas:

- a) Mayor rendimiento del proceso y por consecuencia una mayor producción a menor costo debido a la utilización eficiente del material y el equipo.
- b) Mayor calidad en la fabricación de productos.
- c) Mayor seguridad, ya que la acción de corrección y la activación de las alarmas es muy rápida.
- d) Alta velocidad conseguida en las señales de mando a las válvulas permitiendo realizar el control continuamente.

En la actualidad, la complejidad de los procesos exige que el control de los mismos sea muy eficiente, pues con esto se logra la estabilidad de las plantas, y a la vez, se alcanzan los beneficios económicos planteados en un inicio, ya que al final de cuentas, se busca la rentabilidad de los procesos.

El control basado en la computadora, es sin lugar a dudas el más óptimo que actualmente se conoce; no obstante, debido a que los sistemas tuvieron una tendencia a evolucionar hacia una mayor complejidad, fue inevitable el intentar desarrollar una computadora de gran capacidad que realizara la función de controlar todas las variables de proceso de forma adecuada. Veamos un poco acerca de su desarrollo:

El ordenador evolucionó en dos etapas: primero el Control Digital Directo y después el Control Supervisor. La instrumentación paso primero por instrumentación analógica del mando directo del operador, hasta que este con el control digital pasara gradualmente a funciones de supervisión, interviniendo sólo en caso de que el ordenador le avisara.

Cuando fue instalado por vez primera, el ordenador digital en el control de una planta, se esperaba que la planta debería de tener una producción anual muy grande, con el objeto de que fuera factible obtener un pequeño porcentaje de mejora en su rendimiento que pudiera justificar la inversión grande que representaba la instalación de control por computadoras.

Actualmente estos costos se han abaratado enormemente y las prestaciones que ofrece el control digital han mejorado considerablemente, desde aquel entonces. De hecho se considera que a partir de unos 20-25 lazos de control es más barata la adquisición de instrumentos digitales que la de analógicos (neumáticos y electrónicos).

Otra razón que justifico la introducción del control por computador, es que en procesos donde las características internas del mismo cambian con el tiempo, como es el caso de los coeficientes de transferencia de calor en un horno, en intercambiadores de calor, etc., los instrumentos convencionales presentaban algunos problemas. Con el control digital se esperaba mayor rendimiento.

A su vez, en el desarrollo de nuevas tecnologías de procesos, el ordenador ofreció grandes ventajas al permitir realizar estudios de forma continua que facilitan un mejor diseño.

### **5.8.1 Control digital directo (DDC)**

El Control Digital Directo (Direct Digital Control) fue implementado por vez primera alrededor de los años sesentas. En esta clase de control el ordenador lleva a cabo todos los cálculos que realizaban individualmente los controladores P, PD, PI, PID, generando directamente las señales que van a las válvulas.

Las principales funciones que realiza esta clase de control son las siguientes:

- a) Explora las variables de entradas analógicas o digitales.
- b) Compara estas variables con los puntos de consigna e introduce la señal de error en el algoritmo correspondiente.
- c) Envía las señales de salida a las válvulas de control en el proceso.
- d) Se dispone además de instrumentos analógicos en paralelo con el computador en los puntos críticos y actúan como reserva en caso de fallo.

La forma en que el control digital directo se enlaza con el proceso se muestra en la figura 5.44. En donde puede observarse lo siguiente:

Las señales procedentes de los transmisores en campo se reúnen en un terminal y pasan a una unidad de filtrado y acondicionamiento en donde son convertidas a señales digitales para ser usadas posteriormente en el control del proceso por el ordenador.

Las señales de entrada pueden tener varios orígenes, como pueden ser, señales de tensión procedentes de termopares, reóstatos, tacómetros, de Ph, de conductividad, etc.; señales de Rtd's o señales procedentes de transmisores.

Después del acondicionamiento de señal, se conectan a un multiplexor, en donde aleatoria o en forma secuencial pasan al ordenador. El ordenador comprueba cada señal de entrada y la compara con los límites establecidos para determinar si sale de esas magnitudes, si es necesario, corregir la posición de la válvula o activar una alarma o imprimir instrucciones que deban seguirse según sea el caso.

El ordenador dispone de varios algoritmos de control, donde el PID es el más típico.

El sistema DDC compara la señal que es enviada a la válvula de control con la de entrada y determina lo que se conoce como "aceptabilidad" para definir la acción de control que debe de tomar.



Si la información no es aceptable se retiene la última posición de la válvula y el operador es prevenido, tomando el ordenador una acción de emergencia. De esta forma, los límites de operación del proceso pueden estrecharse con seguridad, hasta llevarse a puntos de operación críticos sin dificultades.

El control digital directo a diferencia de los controladores analógicos convencionales permite la calibración automática; esto significa que el ordenador ajusta la calibración de sus algoritmos de control de acuerdo a un valor predeterminado de la variable o una combinación de estas. Con esto se evita la calibración individual de cada uno de los instrumentos analógicos convencionales.

El ordenador permite la información de entrada del sistema proveniente de unidades de discos u otros dispositivos de soporte, para almacenar esta información en una “memoria” conectada a la “unidad central de tratamiento”; de ahí, es de donde salen y entran los datos del proceso a través de la interfaz.

La unidad de memoria almacena las instrucciones del programa y los datos empleados por la unidad central de tratamiento. Este componente es el verdadero centro nervioso del computador, pues por un lado realiza las operaciones aritméticas y lógicas (unidad aritmética) y por otro lado controla el flujo de los datos de proceso (unidad de control).

El operador puede obtener la información accesible desde el ordenador de alguna de las siguientes formas:

- a) Por medio de una impresora de alta velocidad.
- b) A través de una pantalla de televisión que muestra a voluntad del operador el estado operacional de la planta, de una sección de esta o tal vez sólo el de un bucle de control.

Algunas características de importancia que se distinguen en el control digital directo son las siguientes:

- a) Flexibilidad en el sistema de control, ya que puede pasarse fácilmente de una acción de control a otra; elegir la ecuación de control que más convenga y añadir además acciones de control en cascada o de adelanto.
- b) Gran rendimiento del sistema de control pues se trabaja muy próximamente al punto óptimo de operación.
- c) Proporciona seguridad al poder comprobar cada variable entre los límites preestablecidos.
- d) Calibración automática.

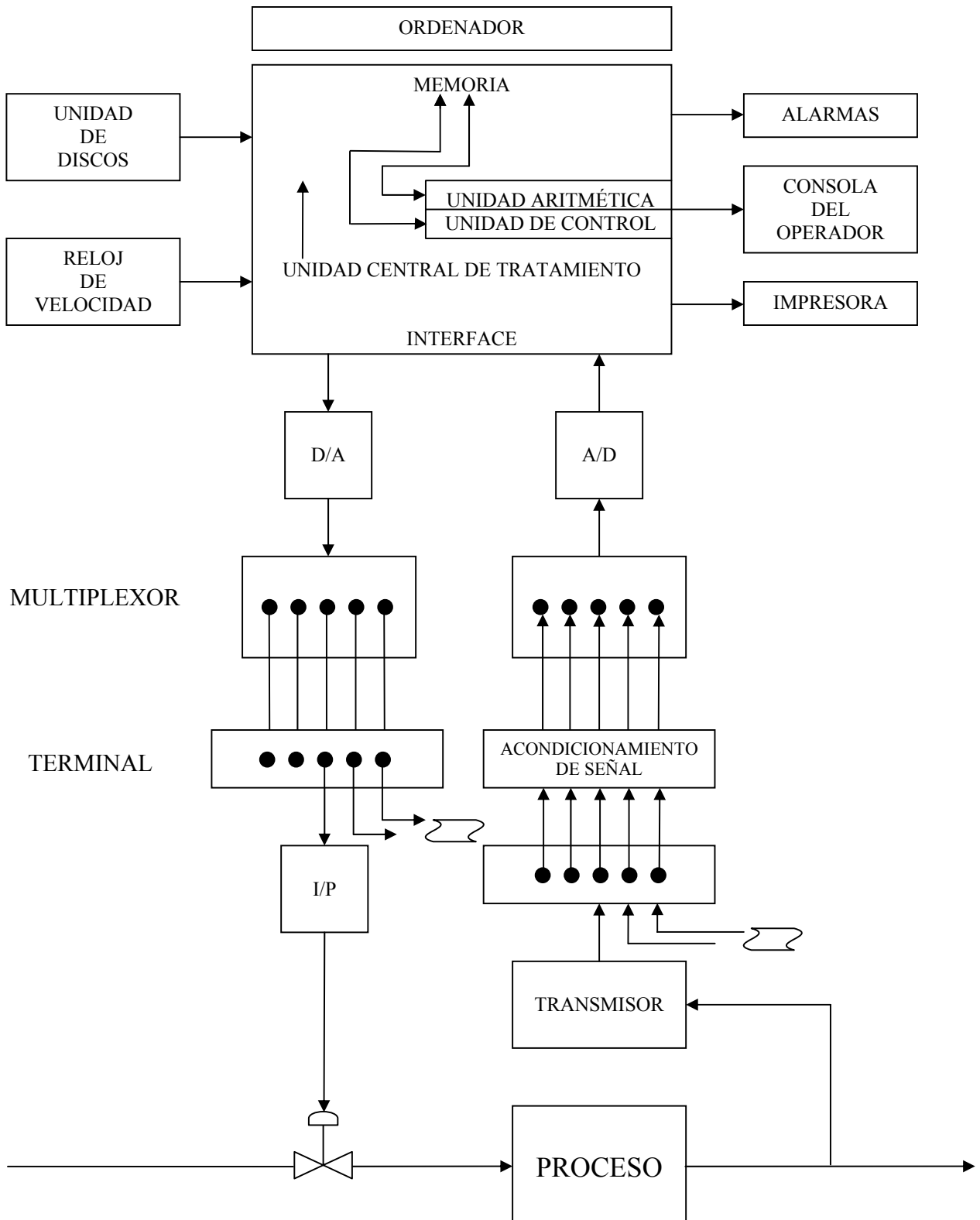


Fig. 5.44 Control Digital Directo.

## 5.8.2 Control supervisor

La principal desventaja del DDC es, como todo sistema electrónico, los fallos posibles que puedan presentarse en sus componentes a pesar de los continuos avances en la tecnología de circuitos integrados. Una posible forma de prevenirse ante estos fallos, es la de instalar estaciones de transferencia automático-manual colocadas fuera del ordenador y disponer de controladores analógicos adicionales en los lazos críticos. No obstante, para garantizar la ausencia total de fallos, habría que utilizarse más de un ordenador interconectados entre sí, para que pudieran sustituirse mutuamente en su función.

De esta forma se pensó que, para obtener una máxima seguridad de funcionamiento, el ordenador debería determinar cuales son los puntos de consigna más convenientes (según los algoritmos de control), para aplicarlos a los lazos de control situados dentro del propio ordenador, o en el exterior en los controladores individuales.

Esta forma de control recibió el nombre de “control de puntos de consigna” o “set point control” (SPC) o “control supervisor” (fig. 5.45). En la figura puede observarse que en paralelo con el bucle de control convencional, entre el transmisor de campo y el controlador analógico, el ordenador calcula los puntos de consigna y los envía en secuencia a cada instrumento. En caso de presentarse cualquier avería, el controlador regulará la variable de proceso en el último punto de consigna que recibió del ordenador.

Una forma de SPC es el control SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), que significa el uso de un ordenador huésped (host) que emplea los datos transmitidos desde campo para presentar los resultados al operador para que actúe como supervisor e inicie alguna acción de control utilizando las unidades remotas de transmisión situadas a largas distancias del ordenador. Las unidades remotas son inteligentes.

El funcionamiento de un sistema SCADA por si sólo, es semejante a las funciones que aporta el SCD (System Control Distributed), a diferencia que la transmisión de datos en el SPC es más lenta y con menor integridad que en el SCD.

De cualquier forma, los sistemas DDC y SPC fueron la base para lograr el diseño del sistema más importante y de mayor fiabilidad, rendimiento y rentabilidad conocido en la actualidad, para el control de grandes y complejos procesos: el Sistema de Control Distribuido. El cual es el siguiente punto a tratar.

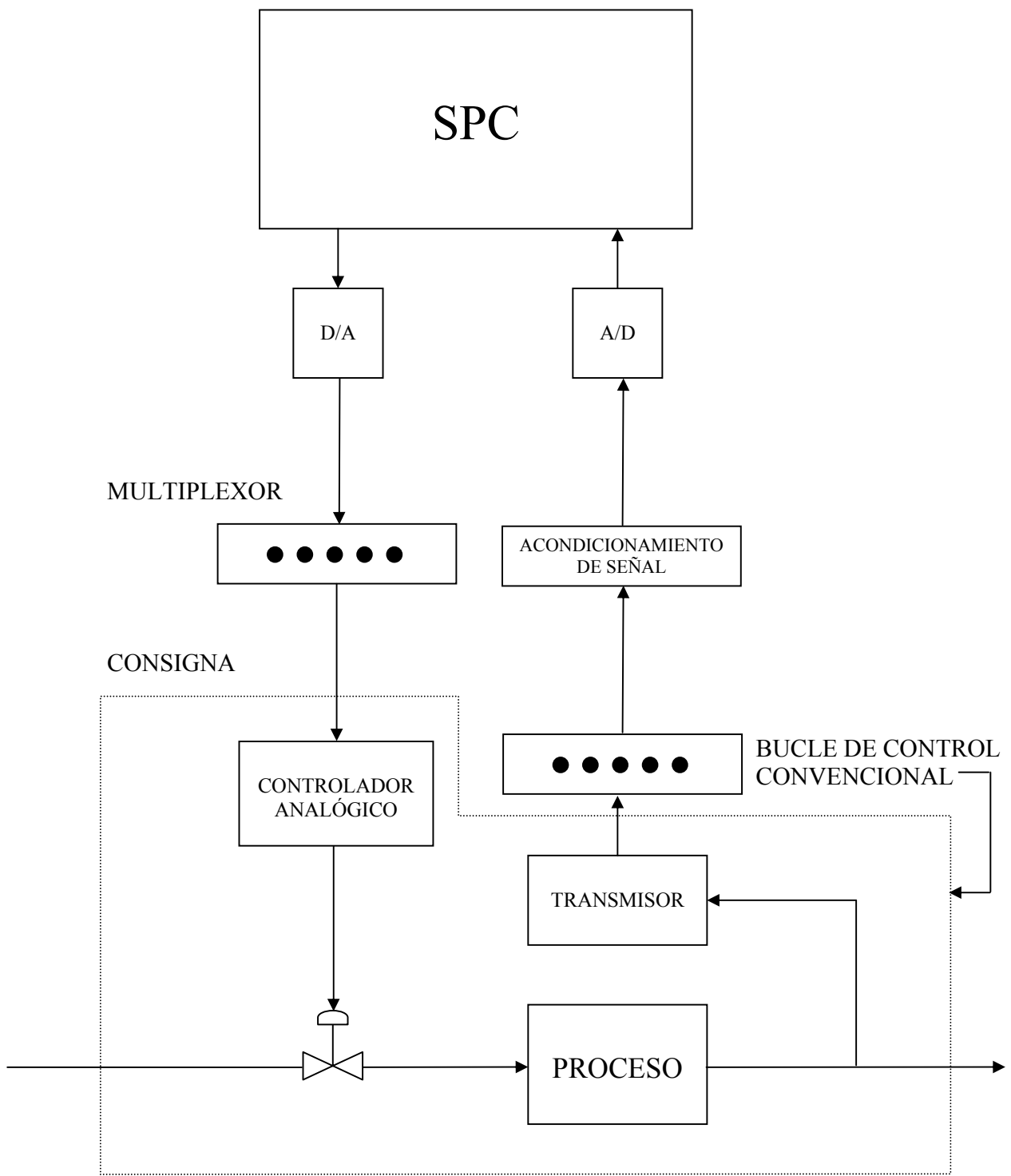


Fig. 5.45 Control Supervisor.

### 5.8.3 Sistema de control distribuido (SCD)

Después de haberse implantado el control digital directo y el control supervisor, alrededor de los años setentas la investigación se orientó al problema de control de fábricas con un gran número de lazos; teniendo en cuenta el estado de la técnica de los microprocesadores y característica “conservadora” de la industria, se ligaron las siguientes conclusiones:

- a) Descartar la utilización de un único ordenador (DDC) por el inconveniente serio de la seguridad y sustituirlo por varios controladores digitales con la capacidad de controlar individualmente un cierto número de variables y de esta forma, “distribuir” el riesgo del control por un solo computador.
- b) Cada uno de estos controladores digitales tendría que ser “universal”, esto es, disponer de algoritmos de control seleccionables por software, permitiendo resolver toda la situación de control y proporcionar flexibilidad al sistema. Esto significa, que un solo controlador digital podía efectuar en un momento dado un control P, PI, PID, de relación o en cascada, por ejemplo.
- c) La velocidad en la adquisición de los datos y su salida hacia las válvulas de control debería ser en “tiempo real”, obligando a la utilización de microprocesadores de 16 bits (que en los años setentas eran algo verdaderamente novedosos comercialmente).
- d) En la comunicación entre los transmisores electrónicos en campo, los controladores y las interfaces para comunicar al operador de la planta, se empleara una vía de comunicaciones, en forma de cable coaxial instalado en la planta, con un recorrido paralelo a la sala de control.
- e) Para eliminar el espacio de panel requerido en el control clásico, se adaptara el uso de uno o varios monitores, en donde el operador, a través del teclado podrá examinar las variables del proceso, las características del control, las alarmas, etc., sin perturbar el control de la planta, pero con la opción de modificar cualesquiera de las características de control de las variables del proceso.

De esta forma y con los esfuerzos que conlleva, apareció en noviembre de 1975 el TBC 2000, primer “control distribuido” para la industria, de Honeywell.

En el control distribuido el ordenador personal permite la visualización de las señales de los múltiples transmisores, el diagnóstico de cada lazo de transmisión y el acceso a los datos básicos de calibración y configuración de transmisores.

El controlador básico del sistema es un microprocesador que proporciona los controles clásicos PID y otros algoritmos de control y era apto para el manejo de 8 lazos, que permiten, entre otros los siguientes algoritmos de control:

- a) Salida manual
- b) PID normal
- c) PID con ajuste externo del punto de consigna
- d) PID con control anticipativo (feedforward)

- e) Sumador
- f) Multiplicador-Divisor
- g) Relación
- h) Extracción de raíz cuadrada
- i) Contador

Estos algoritmos podían configurarse a manera de que en caso de avería se retuviese el último modo de control, las unidades de ingeniería (tipo de termopar, termoresistencia, etc.), la acción de control (directa o inversa), el tipo de señal de entrada (lineal, raíz cuadrada, etc.), las alarmas, etc.

El controlador multifunción que utiliza un lenguaje de programación de alto nivel se asemeja a un ordenador personal, pues proporciona las funciones de control lógico que permiten regular un proceso discontinuo (batch), y el manejo de procesos complejos, donde el controlador básico está limitado. Tal es el caso del control en una columna de destilación donde el control debe ser dinámico y los cálculos deben realizarse en “tiempo real” en las ecuaciones de equilibrio entre el reflujo interno y el reflujo externo en cabeza de la columna. Otro caso puede ser también, la manipulación de reactores en condiciones anormales.

El control secuencial enlaza el control analógico (modulante con posiciones que varían continuamente en la válvula de control) con el control lógico. Tal es el caso del arranque y el paro de una caldera de vapor que debe de hacerse de modo secuencial para eliminar totalmente el riesgo de explosión, que se presentaría si, en el peor de los casos, el agua entrara en la caldera con un nivel muy bajo y con los tubos del serpentín al rojo. El control secuencial lleva a efecto un conjunto de instrucciones o sentencias, parecidas a los programas del ordenador, que establecen en el tiempo, los puntos de ajuste de cada elemento para que tenga lugar la secuencia deseada. El lenguaje empleado es de alto nivel, parecido al BASIC y formulado para orientar al usuario del ordenador, por lo que es relativamente fácil de escribir y de interpretar.

En el control discontinuo (batch control) es común automatizar la entrada de ingredientes, particularmente en la industria farmacéutica, definiendo su naturaleza en cantidades en lo que se llama fórmula. Más debido a que se procesan muchos productos diferentes, es necesario que el equipo de control sea versátil para satisfacer la gran cantidad de fórmulas que puedan presentarse. Esto lleva a que en la práctica, se disponga de un programa de la fórmula principal para modificar ésta dinámicamente de acuerdo con los datos de la fórmula, las fases del proceso discontinuo y el tiempo estimado para la ejecución de la operación.

Una parte importante del control distribuido es el acoplamiento que efectúa con el controlador lógico programable (PLC). El controlador lógico programable sustituye a los relés (ver instrumentos auxiliares) convencionales utilizados en la industria. Estos controladores realizan tres funciones básicas:

- a) Control automático de la variable.
- b) Manejo de relés y contactos auxiliares.
- c) Variación del punto de consigna del controlador (función de programación).

De esta forma, en vez de disponer de pulsadores y relés para los circuitos de enclavamiento y para el accionamiento de los correspondientes motores en la planta, con el correspondiente panel o cuadro de mandos y con los consiguientes cables de conexión, de mucho volumen y caros, el PLC aporta en el control distribuido una solución práctica, versátil, expresada en una lógica de relés (funciones tales NA (normalmente abierto), NC (normalmente cerrado), Temporización ON, OFF, Contador, etc.) como con un software de lenguaje especializado.

De este modo, pueden desarrollarse programas que representen cualquier circuito de enclavamiento y comprobarlos con un simulador de contactos, antes de acoplar el PLC al SDC.

La estación del operador proporciona la comunicación con todas las señales de la planta para el operador del proceso, el ingeniero de proceso y el técnico de mantenimiento. La presentación de la información a cada uno de ellos, se realiza mediante programas de operación, de esta forma:

- a) El operador del proceso ve en la pantalla (s) un gráfico (s) del proceso que le interese y puede manipular las variables deseadas, las alarmas, etc. También puede archivar datos históricos de la planta que juzgue interesantes, obtener copias en impresora de las tendencias, el estado de las alarmas, etc.
- b) El ingeniero de proceso puede editar programas del proceso, construir las representaciones en pantalla de las partes del proceso.
- c) El técnico en mantenimiento puede básicamente diagnosticar y resolver problemas en los elementos del control distribuido en la planta.

El ordenador además permite implementar los programas de aplicación de los usuarios, obtener información determinada de la planta, para analizarlas posteriormente, hacer cálculos complejos sobre balances de energía o de consumo de materias primas de la planta. El ordenador puede a la vez, comunicarse con otros ordenadores para obtener aun más información.

El lenguaje de programación suele ser Fortran, C++, Pascal. El desarrollo de estos programas es orientado para emplear el sistema de control distribuido de forma óptima para mejorar productividad de la planta y minimizar los costos.

La tendencia del ordenador, desde su invención y aplicación al control de procesos es generar cada vez más información que debe ser transmitida en la planta en tiempo real. Esto redundará en la velocidad de adquisición y transferencia de datos.

Las alarmas por su parte, son importantes en el control de procesos. De estas, existen alarmas de alto y bajo valor de la variable (por ejemplo: LAH y LAL), alarmas redseviación del punto de consigna y la variable controlada, alarmas de tendencia que actúan si la variación de la variable excede un valor prefijado, alarmas de estado de la señal de entrada, de salida, etc.

En este respecto, es conveniente la instalación de una gran cantidad de alarmas, ya que con esto, se obliga al operador a silenciarlas apretando el pulsador correspondiente, y además, lo predisponen a no ponerles mucha atención.

Cuando una alarma suena muchas veces en el día, es debido invariablemente, a un mal diseño, o a una condición de proceso que se debe corregir. Por ejemplo, una alarma de nivel de flotador situada en un tanque con agitador, en el cual no existen dispositivos de barrera entre las olas de la superficie, estará actuando intermitentemente cuando el nivel alcance justamente el flotador. La solución en este caso, es el uso de una alarma “inteligente” que actúe siguiendo la lógica del circuito; de esta manera, el sistema dispondría de un circuito lógico que, después de la primera alarma, comprobaría si el nivel bajaba y se separaba en un valor mínimo de la posición del flotador, y si este no fuera el caso, no actuaría por considerar que la situación no es una situación anormal.

El control distribuido tiene una seguridad mejorada con relación a los sistemas convencionales de control. Los transmisores disponen de un sistema de autocalibración y autodiagnóstico, que permite al personal de mantenimiento localizarlas y resolverlas fácilmente, en caso de que se produzcan. El sistema es redundante, y puede considerarse como una inteligencia distribuida, que de manera parecida a la humana, limita las consecuencias de un fallo, manteniendo el control del sistema.

Un parámetro importante en el control distribuido es la fiabilidad del equipo. El número de horas/fallo de los elementos del sistema de control distribuido es de consideración, pues va desde 10,000 horas/fallo en controladores básicos hasta 220,000 horas/fallo en la vía de comunicaciones (cable coaxial), este tiempo sigue incrementándose con las nuevas técnicas de fabricación que se van incorporando a la industria.

Otro parámetro que debe resaltarse es la disponibilidad, es decir, la fracción del tiempo que el sistema es operable. Por ejemplo una disponibilidad del 90% significa que el sistema trabaja el 90% del tiempo y solo un 10% restante está en reparación, actualmente los sistemas de control distribuido tienen una disponibilidad aproximada entre un 99.2% hasta 99.99%, dependiendo como es obvio, de la eficiencia del equipo, de la existencia de piezas de recambio críticas y del mantenimiento.

Los sistemas de control distribuido se han consolidado en el mercado industrial como los sistemas ideales de control, sus ventajas son tan evidentes que al estudiar la instrumentación de una nueva planta o la actualización de una antigua, resulta impensable no considerar al sistema de control distribuido como una opción bastante factible de elección.

Los sistemas electrónicos, al emplear lógica binaria, presentan la ventaja de poder aplicarse tanto para la producción a gran escala, como en la fabricación de un número pequeño de unidades (por lotes).

A su vez, el costo de los equipos electrónicos son continuamente cada vez menores, el software por su parte es cada vez más eficaz, y algo muy importante también, es que la presión económica sobre la automatización se mantiene y es constante, por lo cual, es de esperarse que el desarrollo tecnológico de estos grandes sistemas de control continúe incrementándose.

Hay cuatro aspectos importantes que deben de considerarse en la especificación de un sistema de control distribuido:

- a) El equipo y accesorios (Hardware).
- b) Los programas, lenguajes y procedimientos (Software).
- c) Los servicios que el proveedor del equipo suministra.
- d) La confiabilidad y obsolescencia del sistema.



## **Equipo y accesorios (Hardware)**

El término "Hardware" engloba todos los componentes físicos del SCD y considera los siguientes aspectos:

- a) Arquitectura.
- b) Sistema de Comunicaciones.
- c) Conceptos Generales.

## **Arquitectura**

La arquitectura especifica el tipo y número de los componentes del sistema. Esta debe tener la característica de distribuir funcionalmente todos sus componentes, de manera que satisfaga las estrategias de control y requerimientos de seguridad de los procesos de las plantas, además de permitir futuras expansiones y/o modificaciones. El diseño del SCD debe ser del tipo "Inteligente". Estos dispositivos deben basarse en el uso de microprocesadores de tecnología reciente.

La Arquitectura incluye los siguientes dispositivos y conceptos:

- a) Interfases.
  - a- 1) Hombre-Máquina.
  - a- 2) Máquina-Máquina.
  - a- 3) Con el proceso (I/O).
- b) Unidades de Almacenamiento Masivo.
- c) Unidades de Control.
- d) Fuentes de Poder.
- e) Sistemas de Fuerza Ininterrumpible.
- f) Estructuras Autosoportadas.

## **Interfases**

Son los dispositivos necesarios para permitir la comunicación entre los diferentes componentes del sistema, con el humano, con el proceso o con otros sistemas. El sistema debe considerar las siguientes interfases:

**Interfases Hombre-Máquina:** Estos dispositivos deben permitir al operario/programador una fácil supervisión/monitoreo/configuración y manipulación del sistema de control, así mismo deben facilitar el almacenamiento de la información por medio de dispositivos adecuados, debiendo considerar tener ambiente Windows NT, última versión. Las Interfases Hombre-Máquina que el SCD debe incluir son las siguientes:

## **Monitores**

Los monitores deben ser industriales del tipo cromático de pantalla plana, de 21" (medidas diagonalmente), con 15 tonalidades de color perfectamente distinguibles entre sí los que deben ser como mínimo; blanco, negro, azul, verde, rojo, cian, amarillo y magenta, con sus respectivos semitonos, debiéndose considerar que el negro no tiene semitono. Adicionalmente, a cada tonalidad debe podersele configurar la condición de centelleo, según se requiera.

Los Monitores deben ser de alta resolución (1600 x 1200 pixeles como mínimo).

El tiempo máximo de respuesta de los monitores al comando para invocar o presentar un nuevo desplegado, debe ser de un (1) segundo para los sencillos y no más de dos (2) segundos para los muy densos.

Los Monitores deben ser del tipo toque de pantalla (Touch Screen) del tipo antirreflejante, no son admisibles sistemas antirreflejantes sobrepuestos.

Se debe de considerar el tiempo de vida promedio de los monitores a emplear, pues normalmente se considera que éstos funcionarán 24 horas al día.

## **Teclados**

Los Teclados deben ser para uso intensivo. Los teclados de operación deben ser de diseño "amigable". Las teclas deben ser del tipo membrana a prueba de derrames, tipo industrial dedicados con funciones preconfiguradas.

Con la finalidad de que la operación del SCD pueda ser realizada completamente desde los teclados de operación, sin la necesidad de usar los comandos de los monitores, deben tener teclas dedicadas a las funciones de control y al manejo de la información del sistema, así mismo debe tener al menos 50 teclas con función configurable, según se requiera, siendo utilizadas preferentemente para la invocación de desplegados gráficos.

Se deben tener en el teclado de operación como mínimo las siguientes teclas con funciones dedicadas:

- a) Control del cursor.
- b) Selección de desplegados gráficos.
- c) Funciones de alarma.
- d) Funciones de impresión.
- e) Funciones de tendencia.
- f) Acciones de control.
- g) Selección de puntos de proceso.
- h) Paginación.

j) Entrada de datos.

Para proteger los teclados y facilitar la operación de las estaciones (monitores), deben ser de uno de los siguientes tipos:

- a) Intercambiable: En todas las estaciones (monitores) por medio de conectores adecuados.
- b) Retráctil: Oculto en un compartimiento.

### **Impresora tipo Matriz de Impacto**

La función principal de la impresora tipo matriz de impacto, es la de imprimir los sumarios y balances periódicos, así como los reportes de alarmas configurados en el sistema.

La impresora tipo matriz de impacto debe de ser para propósitos generales con el SCD, la que debe ser adecuada para uso intensivo y para utilizar papel continuo/sencillo estándar. No se acepta el principio de impresión térmico.

Debe ser capaz de: imprimir caracteres alfanuméricos, de autodiagnosticarse de tener una velocidad de impresión de 600 cps como mínimo.

La impresora tipo matriz de impacto debe ser suministrada con todos los accesorios necesarios para permitir la alimentación y recepción del papel continuo.

El tamaño máximo de papel a ser usado debe ser de 132 columnas y debe tener la capacidad para manejar tamaños menores de papel.

El máximo nivel de ruido de la Impresora tipo Matriz de Impacto medido a 90 cm, debe ser de 65 dB sin cubierta absorbente de ruido, y 20 dB con una cubierta absorbente de ruido autosoportada, suministrada con la impresora.

La impresora debe ser capaz de imprimir cualquiera de los desplegados gráficos presentados en cada uno de los monitores de la consola de operación.

Con la impresora, se deben suministrar todos los cables y accesorios necesarios para su apropiada operación.

### **Impresora tipo Láser**

La función principal de la Impresora tipo láser, es la de imprimir los sumarios, balances y reportes, hojas electrónicas y cualquier otro documento resultado del procesamiento estadístico de la información e invocación de la historia del proceso, mediante los dispositivos de la Red de Interfases Hombre-Máquina.

La Impresora tipo Láser debe ser capaz de: imprimir caracteres alfanuméricos, autodiagnosticarse, de tener una velocidad de impresión de 24 ppm como mínimo, con una resolución de 1200 dpi, imprimir en blanco y negro.

El tamaño máximo de papel a ser usado debe ser A4 DIN y Legal y debe tener la capacidad para manejar tamaños menores de papel.

Con la impresora, se deben suministrar todos los cables, accesorios, documentación y programas necesarios para su adecuada operación.

### **Impresora tipo inyección de tinta**

La impresora tipo inyección de tinta debe ser capaz de imprimir caracteres alfanuméricos, así como de imprimir con alta resolución los desplegados gráficos a color presentados en los monitores de la consola de operación, totalmente a color en papel estándar.

La impresora debe ser adecuada para el uso intensivo, usando papel sencillo estándar. Además debe ser capaz de autodiagnosticarse.

La impresora tipo inyección de tinta debe tener una velocidad de impresión de 5 ppm como mínimo, con una resolución de 1400 dpi.

El tamaño de papel a usar debe ser de 11" X 8 1/2" (28 x 21.6 cm, tamaño carta).

Con la impresora se deben suministrar todos los cables, documentación, programas y accesorios necesarios para su adecuada operación.

### **Controladores del Cursor**

Adicionalmente al toque de pantalla, se deben proporcionar los dispositivos conocidos como "Mouse" o "Track Ball". Estos dispositivos deben ser apropiados para uso intensivo, adecuado para ambientes industriales.

No suelen ser aceptados como controladores del cursor los dispositivos conocidos como Lápices Luminosos (Light pens) ni los Bastones (Joysticks).

En caso de suministrarse controladores tipo "Track Ball", se deben montar integralmente a la estructura de las estaciones de control, junto con los teclados de operación.

Con los controladores del cursor deben ser suministrados todos los cables, conectores, accesorios, programas y manuales requeridos para su adecuada operación.

### **Estación para ingeniería, configuración y mantenimiento**

Normalmente se debe de considerar el emplear una estación de ingeniería (con un monitor) para ser instalada en el Cuarto de Control Central, separadamente de las consolas de operación en la sala de ingeniería, con el objeto de ser utilizada por el personal de mantenimiento de la planta, en donde se efectuarán funciones de configuración, revisión del estado del sistema y mantenimiento de éste.

La estación de ingeniería, debe ser completamente compatible con las características de las estaciones de operación/configuración, tanto en funcionalidad como en dimensiones y en sus demás características.

Se deben suministrar todos los accesorios, estructuras de soporte, cables, conectores, documentación y programas para la adecuada operación de la estación de ingeniería.

### **Estación de Operación**

A la par de la estación de ingeniería se considera también al menos una Estación de Operación. La cual es definida como la estructura de soporte individualizada y con diseño apropiado, constituida por un Monitor, un Teclado de Operación, un Controlador del Cursor, Teclados de Ingeniería/Configuración, una estación de trabajo con su unidad electrónica y accesorios y en la cual son montados.

Las Estaciones de Operación deben ser estructuralmente independientes, autosoportadas, contener y fijar adecuadamente a los dispositivos y accesorios asociados a estas.

El diseño de las Estaciones de Operación debe estar de acuerdo con los últimos conceptos de ergonomía. Se debe considerar básicamente la estatura de los operadores para su diseño.

Las Estaciones de Operación deben contener los siguientes dispositivos:

- a) Medios Magnéticos de Almacenamiento Fijos (discos duros).
- b) Medios Magnéticos de Almacenamiento Removibles.
- c) Dispositivos de Almacenamiento Histórico.
- d) Estaciones de Trabajo.
- e) Teclados de Operación, teclados de Ingeniería/Configuración.
- f) Otros dispositivos, según se requiera.

Los Monitores deben ser alojados en la parte superior de las Estaciones de Operación, presentando una orientación apropiada para evitar reflejos y fatiga a los operadores. Los teclados deben ser instalados al frente y debajo de cada monitor.

### **Interfases Máquina-Máquina**

Estos dispositivos permiten al SCD la comunicación congruente con otros dispositivos Inteligentes externos al Sistema, como pueden ser otros SCD, Sistemas de Control dedicados, Controladores Lógicos Programables, (PLC's), Instrumentación Inteligente, Sistemas de Procesamiento de Información, etc.

Las Interfases Máquina-Máquina deben estar instalados en el Cuarto de Control en los mismos Gabinetes que las interfases de Proceso (I/O).

El número y características de las interfases máquina-máquina deben estar de acuerdo con él número y características de los controladores digitales requeridos por el proceso en cuestión.

## **Interfases con el Proceso (I/O)**

Este término cubre todos los dispositivos necesarios para permitir al SCD/SAD la recepción/envío de señales desde/hacia la instrumentación de proceso en campo, esto es, señales de entrada/salida (E/S).

El tipo y especificaciones de las interfases de proceso deben estar de acuerdo con las especificaciones de las interfases, con las redundancias requeridas, con los puntos de reserva solicitados, así mismo se debe considerar un 30% de ranuras libres instaladas para futuras expansiones.

Se debe informar acerca del número, tipo y especificaciones de las Interfases de Proceso utilizadas.

Las interfases de proceso deben ser instaladas en gabinetes de diseño modular, permitiendo una fácil instalación/remoción de las interfases.

El número de ranuras en los gabinetes dedicadas a las interfases de proceso, debe estar de acuerdo con el número total de interfases de proceso, requerido para las señales de entrada/salida presentados en el sumario de señales (documento en el cual se agrupan y se enlistan todas las clases de señales que serán enviadas al SCD), más 30% de puntos de reserva instalados, más el 20% adicional de ranuras vacías (libres) con cubiertas apropiadas.

Las interfases de proceso deben tener indicación visual de su estado operativo. Las terminales deben estar claramente marcadas (por medio de etiquetas permanentes), con objeto de facilitar su alambrado y mantenimiento.

Las interfases de proceso deben estar de acuerdo con el sumario de señales de entradas/salidas, tanto en número como en características (las que se definen a continuación), observando que cada interfase debe de manejar un solo tipo de señal:

**Interfases para señales del campo (Entradas):** Estos dispositivos reciben diferentes tipos de señales de la instrumentación de campo (sensores, transmisores, elementos finales de control, interruptores, controladores de campo, etc.) validan, acondicionan, estandarizan y digitalizan estas señales para ser alimentadas hacia el multiplexor y ser procesadas por el SCD. Las especificaciones para las interfases de proceso para las señales de entrada de campo son las siguientes:

Interfases para Entradas Analógicas de Alto Nivel. Son utilizadas para recibir señales de 4-20 mA c.d. o de 1-5 VCD, las cuales deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- a) Resolución: 0.1% del valor máximo de rango, o mejor.
- b) Repetibilidad: +/- 0.1% del valor máximo de rango, o mejor.
- c) Error: +/- 0.5% del valor máximo de rango, o mejor.
- d) Efecto de temperatura: +/- 0.05% por grado centígrado.
- e) Adecuadas para manejar circuitos con seguridad intrínseca.

**Interfases de Entradas Analógicas de Bajo Nivel:** Se utilizan para manejar señales de termopares, los que pueden ser de los tipos E, J, K, R, S o T, así como para señales de RTD de platino de 100 ohm. Estas interfases deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- a) Resolución: 0.02% del valor máximo de rango o mejor.
- b) Repetibilidad: +/- 0.05% del valor máximo de rango o mejor.
- c) Error: +/- 0.05% del valor máximo de rango o mejor.
- d) Compensación: De junta fría para termopares.
- e) Linealización: De señales para termopares.
- f) Conexión de tres conductores para RTD's.
- g) Compensación automática para corrimiento de voltaje.
- h) Adecuadas para manejar circuitos con seguridad intrínseca.

**Interfases para Entradas Digitales de 24 VCD:** Las cuales deben cumplir con las siguientes características:

- a) Aislamiento: Tipo óptico.
- b) Contactos: No energizados (secos).
- c) Adecuadas para manejar circuitos con seguridad intrínseca.

**Interfases para Señales hacia el Campo (Salidas):** Estas Interfases deben ser capaces de manejar una gran variedad de dispositivos eléctricos, como son posicionadores electroneumáticos para válvulas de control, convertidores I/P, válvulas solenoides, arrancadores de motores, luces indicadoras, y otros tipos de elementos finales de control en general. Estas Interfases deben validar las señales y mantener su último valor en caso de falla de algún componente del SCD. Las Interfases para señales hacia el campo son clasificadas en los siguientes tipos:

**Interfases para Salidas Analógicas:** Deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- a) Rango de la señal: 4-20 mA.
- b) Resolución: 0.1% del valor máximo de rango o mejor.
- c) Error: 0.5% del valor máximo de rango o mejor.
- d) Efecto de temperatura: 0.05% por grado centígrado o mejor.
- e) Adecuadas para manejar circuitos con seguridad intrínseca.

### **Interfases de Salida Digital:**

- a) Rango de la señal: 24 VCD
- b) Tipo: Estado Sólido.
- c) Carga: Inductiva o Resistiva.
- d) Capacidad de Corriente: 100 mA para cajas de luces o indicación visual; 1A para operación de válvulas solenoides o arrancadores de motor.
- e) Capacidad de los contactos: 5A.
- f) Para manejo de cargas continuas y cargas pulsantes.
- g) Adecuadas para manejar circuitos con seguridad intrínseca.

**Interfases para Transmisores Inteligentes:** Cuando así sea indicado en el sumario de señales de entrada/salida, se deben suministrar interfases de proceso para transmisores inteligentes. Estas interfases deben ser adecuadas para manejar circuitos con seguridad intrínseca, debiendo así mismo ser capaces de permitir la comunicación total con los transmisores inteligentes de campo, y realizar las siguientes funciones, como mínimo, desde las estaciones de operación del SCD:

- a) Configuraciones del transmisor (Amortiguamiento ó “damping”).
- b) Cambio del Rango (Alcance o "Span", Elevación y Supresión).
- c) Realización y comunicación del autodiagnóstico del transmisor.
- d) Verificación del estado de las trayectorias de comunicación.

### **Unidades de Almacenamiento Masivo**

El SCD debe tener los dispositivos de almacenamiento requeridos para permitir el arranque, configuración, operación, mantenimiento, así como para permitir el almacenamiento de información del proceso y de todo el sistema, con las características, formatos y períodos especificados.

El número, tipo y capacidad de los dispositivos de almacenamiento masivo, deben cubrir la operación de todos los dispositivos inteligentes, así como cumplir todas las funciones del sistema, los dispositivos de almacenamiento masivo deben ser de los siguientes tipos:

**Memoria Residente:** Se refiere a la memoria de estado sólido (RAM, ROM, EEPROM, etc.) que todos los dispositivos inteligentes del sistema deben tener y que debe ser suficiente y adecuada para permitir a estos dispositivos operar apropiadamente, así como permitir al SCD ejecutar funciones matemáticas simples (por ejemplo: Control Avanzado de Bajo Nivel y Funciones de Adquisición de Datos). Se debe informar acerca del tipo y capacidad de la memoria residente del sistema.



**Memoria Removible:** Engloba las unidades de almacenamiento masivo que son usadas principalmente para cargar el sistema operativo, configuraciones, programas y paquetes, así como para transferir archivos en general desde o hacia el SCD.

La memoria removible debe estar constituida por dos unidades por consola de operación. Estos lectores deben ser adecuados para uso intensivo.

La consola de operación debe tener una unidad para discos magnéticos de 3 1/2" y otra para manejar medios alternativos (por ejemplo: cartuchos de 100 Mb ó CD-ROM RW de lectura/escritura). Las unidades suministradas deben ser instaladas apropiadamente en la consola.

Las unidades deben incluir los accesorios de montaje, cables, programas y manuales para su adecuada operación.

**Memoria Fija:** Estos dispositivos de almacenamiento masivo, refieren a los discos duros del sistema y deben cumplir con funciones de almacenamiento de historia continua del proceso (para 72 horas, para 1 semana, para 1 mes, para 1 año), almacenamiento de todos los cambios de las señales ocurridas durante el último mes (con un mínimo de 2000 eventos), almacenamiento de los eventos diarios del proceso (con un mínimo de 2000 eventos), almacenamiento de las acciones diarias del operador ocurridas durante el último mes (con un mínimo de 500 eventos), almacenamiento de los desplegados gráficos, almacenamiento de todas las alarmas que hayan ocurrido en el último mes (como mínimo se deben considerar 2000 alarmas), almacenamiento de archivos de configuración del sistema, archivos para generación de reportes, archivos para generación de sumarios, archivos y programas para simulación dinámica, etc.

Las unidades de disco duro deben ser adecuadas para uso intensivo, debiendo ser contenidas en una caja portátil, sellada con gas inerte. Las unidades deben resistir vibraciones de magnitud moderada sin sufrir alguna clase de daño.

La capacidad mínima de los discos duros debe ser de 40 Gigabytes (aunque es recomendable unidades mucho mayores), evaluados cuando estén formateados.

**Dispositivos de Almacenamiento Histórico:** Estos dispositivos son requeridos para la historización a largo plazo de la información y eventos ocurridos en los procesos y en los sistemas. Los dispositivos de almacenamiento histórico deben ser complementarios a los discos duros usados para el almacenamiento histórico de Información, pudiendo ser unidades de discos ópticos regrabables (CD-ROM R/W), con la capacidad apropiada para almacenar la información antes indicada.

Los discos duros deben transferir diariamente toda la información recopilada al dispositivo de almacenamiento histórico. Tales registros deben quedar identificados con la fecha y hora correspondiente.

**Unidades de Control:** Estos dispositivos son responsables de ejecutar las acciones que permitan al proceso operar de forma automática, sin la interacción directa de los operadores, esto bajo condiciones normales, requiriendo únicamente de su supervisión. Deben ser instaladas en los mismos gabinetes, en los que las interfases de proceso serán instaladas.

El número y tipo de unidades de control debe estar de acuerdo con el sumario de señales de entradas/salidas, considerando un 30% de capacidad de diseño como mínimo para expansiones futuras y para funciones de adquisición de datos y procesamiento de la información.

Las unidades de control deben ser capaces de comunicarse con todos los dispositivos inteligentes del sistema, así como con otras unidades de control.

Las unidades de control deben ser capaces de ser configuradas desde los teclados de ingeniería/configuración o desde una estación de ingeniería.

Las unidades de control deben ser capaces de manejar los siguientes tipos de enfoques del control automático, dentro de la misma unidad sin requerir de módulos o estaciones adicionales.

- a) Adquisición de datos.
- b) Control Regulatorio.
- c) Control Lógico/Secuencial.
- d) Control Avanzado de Procesos

### **Adquisición de Datos**

La Adquisición de Datos se refiere a la capacidad del SCD de coleccionar, procesar matemáticamente, almacenar y recuperar información de las diferentes variables, condiciones y acciones que ocurren en el proceso y durante la operación del sistema.

Todas las variables analógicas coleccionadas o generadas por el sistema deben ser almacenadas con una base de tiempo de un minuto, para ser usadas en la presentación de tendencias. Otras bases de tiempo deben ser disponibles. El almacenamiento debe ser de un mes como mínimo, transferido diariamente al medio de almacenamiento histórico.

Debe ser posible procesar todas las variables analógicas coleccionadas o generadas por el sistema, mediante operadores, aritméticos, algebraicos, trigonométricos, logarítmicos, estadísticos, vectoriales y matriciales, así como integrarlas o derivarlas, entre otras funciones que deben existir como librería del sistema.

Todas las variables digitales o discretas, así como los estados del proceso y del sistema deben ser almacenados cuando un cambio lógico ocurre (0-1 o 1-0). Los cambios deben ser recuperados cuando sea requerido. El almacenamiento debe ser de un mes como mínimo, transferido diariamente al medio de almacenamiento histórico.

El sistema debe tener como programas de librería, formatos para recuperar y presentar la información del proceso o del sistema existente en los dispositivos de almacenamiento, en forma de sumarios, reportes, estadísticas, desplegados gráficos, etc.

### **Control Regulatorio**

Esta clase de control permite a la variable controlada ( $C(t)$ ) seguir, y en su caso, igualar la referencia ( $R(t)$ ), vía el manejo de la variable manipulada ( $m(t)$ ), después de una variación en el punto de ajuste o bajo la presencia de un disturbio ( $D(t)$ ) en el sistema de control.

En este enfoque, las unidades de control deben funcionar bajo los lineamientos de la teoría clásica del control automático, esto es, empleando funciones de transferencia con el concepto de entrada única/salida única (SISO) ocurriendo en el dominio de la frecuencia.

El número de circuitos de control analógico regulatorio, manejados por una unidad de control, puede variar de acuerdo con las características de cada sistema.

Las Unidades de Control Regulatorio ejecutan, funciones tales como: control PID, selector de acción directa/inversa, acción sobre el error, acción sobre la variable del proceso, selector alto bajo, alarmas de alta, alta-alta, baja, baja-baja para puntos de ajuste, desviación del punto de ajuste con relación a la variable del proceso, operaciones algebraicas, trigonométricas, exponenciales, polinomiales, estadísticas, integrador, derivador, generador de funciones matemáticas, etc.

### **Control Lógico/Secuencial**

Este enfoque de control utiliza señales "Lógicas " o "Discretas", esto es, señales que denotan la presencia o ausencia de una condición determinada de un dispositivo o proceso.

La presencia de la condición referida debe ser denotada como "1", la ausencia como "0". Este criterio es conocido como Lógica Positiva y debe ser usada en la configuración de circuitos lógicos, a menos que se indique otra cosa.

Estas señales podrán ser operadas, combinadas y secuenciadas por medio de funciones lógicas y bajo las reglas del álgebra Booleana.

El objetivo de la interrelación de las señales lógicas es el siguiente:

- a) Manejo de condiciones anormales del Proceso.
- b) Modificación del modo de operación del Proceso.

El mínimo de funciones lógicas que deben realizar los controladores son las siguientes:

- a) Compuerta "Y" (2 y 4 entradas).
- b) Compuerta "O" (2 y 4 entradas).
- c) Inversión.
- d) Memoria (Flip-Flop).
- e) Compuerta "O-exclusiva".
- f) Compuerta "O-programada".
- g) Secuenciador.
- h) Temporizador.

i) Interacción con Circuitos de Control Analógico.

j) Validación de señales.

Los Controladores Lógico/Secuenciales deben ser programados en las siguientes formas:

a) Por diagramas de escalera.

b) Por funciones lógicas.

c) Por lista de instrucciones.

Debe ser posible configurar "Entidades Lógicas Virtuales", para entrelazar al menos dos entradas digitales, dos salidas digitales y dos comandos en una entidad individual, para facilitar la operación de dispositivos tales como válvulas solenoides, arrancadores, etc.

### **Control Avanzado de Procesos**

Este enfoque del Control Automático procura la obtención de la máxima productividad/eficiencia en la operación de un proceso de producción dado.

Las funciones de control avanzado deben seguir los lineamientos de la teoría moderna de control automático, que utiliza modelos en el concepto de múltiples entradas/múltiples salidas (MIMO), ocurriendo en el dominio del tiempo.

El control avanzado de procesos requiere una programación específica y que suele ser muy compleja. A esto, el ingeniero de diseño debe de considerar las necesidades de la planta hacia como el enfoque que debe de darse al diseño del control avanzado aplicado desde el SDC.

### **Fuentes de Poder**

Todas las fuentes de poder deben ser reguladas en voltaje y frecuencia. De la misma manera, deben estar protegidas contra sobrecorrientes y corto-circuito. El proveedor del sistema debe informar acerca de las recomendaciones para el sistema de tierras.

Las fuentes deben ser dimensionadas para alimentar a todos los dispositivos del SCD incluyendo los dispositivos en campo (sensores y elementos finales). También deben alimentar las interfases (E/S) de repuesto además de las ranuras disponibles en los gabinetes.

El porcentaje de saturación máximo de estas fuentes de poder, no debe ser superior al 70% de su capacidad nominal, y deben ser redundantes, con conmutación transparente al operador y con capacidad suficiente para que en caso de falla de una, la otra soporte íntegramente la carga.

Todos los instrumentos de campo requieren un suministro de  $24 \text{ VCD} \pm 5\%$ .

Deben tener fuentes redundantes en todo el sistema, con la suficiente capacidad para que en caso de falla de una, la otra sea capaz de soportar todos los dispositivos instalados en el gabinete. Cada fuente primaria o redundante debe tener un suministro eléctrico independiente.

Las fuentes deben de tener las siguientes indicaciones luminosas al frente de las mismas:

- a) En operación
- b) Apagada
- c) En falla

La alimentación a las fuentes de poder debe ser de 120V, 60Hz, una fase.

Las fuentes de poder de los gabinetes deben tener respaldo de baterías para permitir la operación de todos los dispositivos instalados en estos, así como a la Instrumentación de campo, por un periodo mínimo de 30 minutos. Estas baterías deben ser apropiadas para operación en interiores, libres de mantenimiento, usando baterías de Níquel-Cadmio ó “Jel-Cell”.

En el caso que las fuentes de poder no cuenten con un respaldo propio de baterías, el proveedor del SCD debe proporcionar un Sistema de Fuerza Ininterrumpible (SFI) apropiado, como a continuación se define.

#### **Sistemas de Fuerza Ininterrumpible (SFI)**

Este sistema debe proveer carga sin interrupción del suministro cuando falle la alimentación de la línea principal y si el SFI falla totalmente, la carga seguirá siendo alimentada por una línea de alimentación de respaldo. El sistema debe ser apropiado para la alimentación de dispositivos tales como:

- a) Estaciones de operación.
- b) Periféricos.
- c) Accesorios, etc.

El SFI debe contener todos los dispositivos de protección, regulación, filtrado, instrumentación y alarmas, requeridos para asegurar su integridad y confiabilidad.

El tiempo de respaldo de las baterías del SFI debe ser de 30 minutos, como mínimo. Cualquier desviación deberá ser indicada. El inversor debe ser capaz de desconectar el banco de baterías en forma automática, cuando la tensión crítica de descarga de las baterías es alcanzada.

EL SFI debe ser diseñado para operar a un máximo de 70% de su capacidad nominal, considerando todos los dispositivos del SCD para el periodo de respaldo especificado. Para corroborar lo anterior, el fabricante debe proporcionar la memoria de cálculo correspondiente considerando una sobrecarga del 125% por 10 minutos y 150% durante 1 minuto.

La alimentación para el SFI y los acondicionadores de línea debe ser de 480V, 60 Hz. 3 fases, 4 hilos y debe tener como salida 120 VCA, 60 Hz, con una regulación de  $\pm 1\%$  y una variación en frecuencia no mayor a  $\pm 0.1\%$ . El tiempo de conmutación en caso de falla del suministro por parte del SFI, debe ser menor a 1/4 de ciclo, cuando se transfiera a la alimentación de respaldo. La eficiencia debe ser del 75% al 80% a plena carga.

## Estructuras de Soporte

Estas estructuras deben ser autosoportadas y usadas para alojar los diferentes dispositivos que constituyen el SCD.

Las estructuras de soporte deben ser construidas de perfiles de acero, cubiertas por láminas del mismo material (se debe informar acerca del calibre de perfiles y láminas), trabajadas en frío, pulidas y resanadas para evitar uniones y esquinas filosas o cortantes.

Las estructuras de soporte deben ser terminadas con recubrimiento epóxico o de poliuretano, adecuado para resistir el desgaste resultante del uso normal, así como ralladuras moderadas.

El color del acabado puede ser el estándar del fabricante. El proveedor debe proporcionar una muestra del color propuesto.

Las estructuras de soporte son de los siguientes tipos:

- a) Consolas de Operación.
- b) Gabinetes.
- c) Estructuras y mobiliario auxiliares.

**Consolas de Operación:** Estas estructuras de soporte son destinadas para alojar las Interfases Hombre-Máquina del Sistema, así como a sus dispositivos auxiliares y accesorios, permitiendo una eficiente y segura operación de estas Interfases.

Una consola de operación está constituida del arreglo de una o más estaciones de operación.

El número de estaciones de operación debe ser arreglado en una consola. No son aceptables las alternativas de montaje de los monitores y teclados sobre la superficie de las mesas de las estaciones (Table Top Mounting).

Se debe considerar que el arreglo general de las estaciones de operación debe ser en línea recta ó formar un semicírculo, de acuerdo a la geometría del lugar asignado.

En la distribución general de las estaciones de operación debe de informarse acerca de las dimensiones específicas (alto, fondo, ancho y peso).

Las impresoras de inyección de tinta y láser normalmente son instaladas a un lado de la consola, en módulos auxiliares, con el mismo diseño y dimensiones que las estaciones. Se debe considerar previamente la fijación de los dispositivos, en la superficie de los módulos.

Los accesorios de las interfases Hombre-Máquina, medios de almacenamiento y dispositivos auxiliares podrán ser instalados dentro de las consolas.

**Gabinetes:** Los Gabinetes son ubicados en los cuartos de control y son destinados a contener y soportar en forma segura todos los dispositivos del SCD localizados en este sitio, con excepción de los SFI, acondicionadores de línea y tableros de interconexión y protección.

Los Gabinetes deben ser usados para instalar los siguientes dispositivos:

- a) Interfases con el Proceso.
- b) Unidades de Control y sus dispositivos asociados.
- c) Interfases Máquina-Máquina.
- d) Fuentes de Poder/Respaldo de baterías.
- e) Barreras para seguridad intrínseca por aislamiento galvánico, adecuadas para montaje en riel con especificaciones DIN, debiendo estar apropiadamente sujetas.
- f) Otros Dispositivos, según se requiera.

Los gabinetes deben ser estructuralmente independientes, contruidos con clasificación NEMA 12, ser autosoportados y contener y fijar adecuadamente a los dispositivos y accesorios asociados a estos.

El número de los gabinetes suministrados para el SCD, debe ser definido considerando las características específicas de los Gabinetes, cantidad de dispositivos así como las interfases con el proceso y ranuras.

La instalación de las tarjetas debe efectuarse de una manera sencilla, las cuales deben ser apropiadamente fijadas y protegidas. Esta instalación debe ser posible realizarla con el sistema energizado, ya sean módulos nuevos ó reemplazo.

Para señales provenientes o enviadas hacia la instrumentación de campo, se debe incluir como mínimo la siguiente protección:

Una barrera de seguridad intrínseca por aislamiento galvánico, para montaje en riel DIN incluyendo fusibles para cada entrada analógica de alto nivel, de bajo nivel y protocolizada, por cada salida analógica, por cada entrada digital, por cada salida digital y por cada salida protocolizada.

Todas las terminales en los gabinetes deben ser claramente marcadas, por medio de etiquetas permanentes.

Los gabinetes deben tener un fácil acceso a las tarjetas, alambrado y fuentes de poder, mediante puertas de acceso frontal y trasero. El acceso de los cables es por la parte inferior de los mismos.

Todos los Gabinetes deben contar con ventiladores integrales, de uso intensivo, interconectados por el fabricante desde la línea de suministro principal y no desde las fuentes de poder. Se debe informar acerca del nivel de ruido de estos ventiladores (el máximo aceptable es de 20 dB, medidos a una distancia de un metro).

Todos los gabinetes deben estar provistos con terminales de tierra apropiadas, para permitir su interconexión con el Sistema General de Tierras.

Todas las terminales deben ser del tipo baja densidad, para manejo de conductores de calibre 16 AWG.

**Estructuras y mobiliario auxiliar:** Esto se refiere a todos los dispositivos requeridos para asegurar la apropiada integración e instalación de todos los componentes del SCD, así como para permitir una eficiente operación del sistema.

Este concepto incluye módulos auxiliares para soporte de dispositivos, mesas para instalación de impresoras, sillones reclinables para uso de los operarios (suele proporcionarse un sillón por cada estación de operación y uno para la estación de ingeniería), arneses de sujeción, soportes de cableado, etc.

Las características de todos los dispositivos antes indicados deben ser consistentes en diseño, color, cantidad y calidad con todos los demás dispositivos del SCD.

**Sistema de Comunicaciones:** Define a todos los dispositivos, canales, accesorios, protocolos, programas y procedimientos requeridos para permitir la interconexión y transferencia congruente de información entre todos los dispositivos inteligentes del sistema de control distribuido. Los conceptos englobados por el sistema de comunicaciones son los siguientes:

- a) Topología.
- b) Protocolos.
- c) Medios Físicos.
- d) Dispositivos Electrónicos.
- e) Especificaciones Generales.

**Topología:** Define la estructura mediante la cual los diferentes dispositivos usados en el SCD están interconectados.

La estructura de la Topología debe ser preferentemente lineal (Bus). El Fabricante debe proporcionar información detallada de su topología, así como proporcionar un diagrama de su arquitectura propuesta.

La topología debe ser redundante.

**Protocolos:** Definen la estructura de los datos transmitidos y los convencionalismos utilizados para permitir la transmisión segura, congruente y eficiente de la información utilizada en los diferentes dispositivos del sistema de control distribuido.

Se deben utilizar protocolos normalizados para la transmisión de la información.

Los protocolos normalizados deben definir como mínimo, los siguientes niveles:

- a) Acceso al canal físico.
- b) Nivel de enlace.
- c) Nivel de red.



Para comunicarse con otros sistemas de control distribuido, se debe suministrar el equipo, programas y servicios necesarios para enlazarse en una Red Ethernet con protocolo TCP/IP.

### **Medios Físicos**

Los canales físicos para alambrados en interiores, deben ser cable coaxial o par trenzado como lo define el estándar de la IEC y para exteriores se preferirán las fibras ópticas. En el caso de que se usara otro criterio, este debe ser ampliamente justificado.

Cuando se usen fibras ópticas, se debe considerar tener un 100% de fibras libres para utilizarse como redundancia de las fibras en operación. La especificación del forro de las fibras ópticas debe ser adecuada para resistir el medio ambiente en instalación aérea. El proveedor debe suministrar todos los dispositivos del SCD necesarios que se adapten a este tipo de instalación.

Se deben suministrar todos los medios físicos, conectores, soportes y demás accesorios y servicios requeridos para la interconexión de los dispositivos del sistema de control distribuido, internamente en los cuartos de control y entre estos cuartos.

### **Dispositivos Electrónicos**

Cualquier componente electrónico de sistema de comunicaciones debe ser redundante.

Todos los dispositivos electrónicos del sistema de comunicaciones del SCD deben ser adecuados para uso intensivo.

### **Especificaciones Generales**

El sistema de comunicaciones debe operar al 70% de su capacidad nominal, cuando todos los componentes sean usados y se encuentren transmitiendo.

Cualquier falla en el sistema de comunicaciones debe ser reportada en los monitores y debe ser impreso.

La velocidad del sistema de comunicaciones debe ser la requerida para satisfacer en su totalidad las condiciones antes especificadas.

El sistema de comunicaciones debe ser capaz de informar acerca de lo siguiente:

- a) Máxima distancia de comunicación sin el uso de repetidores.
- b) Velocidad de comunicación.
- c) Número máximo de dispositivos interconectables a la red.
- d) Información detallada del protocolo usado.
- e) Técnicas para detección/corrección de errores.
- f) Características físicas de los canales de comunicaciones (impedancia, atenuación, aislamiento, etc.).

g) Recomendaciones para la instalación de los canales de comunicación (incluyendo ductos, tierras, etc.).

## **Conceptos Generales**

Todos los dispositivos del sistema y accesorios del SCD, deben ser diseñados y construidos de acuerdo con los siguientes conceptos:

### **Modularidad**

Los dispositivos, circuitos impresos, cables, conectores y estructuras de autosoportadas, deben tener un diseño Integral/Modular.

El diseño modular debe incluir a las dimensiones, capacidades, conectores, acabado, colores, interfases, charolas y cableado.

El diseño modular debe permitir una fácil intercambiabilidad de los dispositivos del sistema (considerando funciones similares). Esto sin modificar los dispositivos implicados. La intercambiabilidad debe poder efectuarse en línea.

Se debe garantizar que la modularidad del Sistema sea aplicable desde su instalación.

### **Flexibilidad**

El diseño de la Arquitectura y Topología del SCD, debe ser adecuado para permitir la modificación o expansión del mismo sistema, sin la alteración de la filosofía principal de éste.

### **Seguridad del Sistema**

El Sistema debe tener los medios para detectar cualquier condición anormal, ya sea en el proceso o en el SCD y sus dispositivos auxiliares.

Las condiciones anormales pueden ser señales fuera de rango, ocurrencia de alarmas absolutas (H, HH, L, LL) y alarmas relativas (desviación o razón de cambio), circuitos abiertos, fallas de la instrumentación de campo, alarmas de autodiagnóstico del sistema, etc.

El sistema debe tener los siguientes niveles de autodiagnóstico:

- a) Autodiagnóstico en línea.
- b) Pruebas de rutina.
- c) Diagnóstico fuera de línea.

El autodiagnóstico del sistema debe cumplir con los conceptos siguientes:

- a) Equipo y Accesorios (Hardware) del SCD.
- b) Sistemas auxiliares del SCD.

- c) Sistemas operativos, programas, paquetes y aplicaciones (Software) del SCD.
- d) Mal estado de la instrumentación de campo.
- e) Fallas en el Sistema de comunicaciones internas y externas del SCD.
- f) Operación, configuración o mantenimiento inapropiados del SCD.

Todas las tarjetas de circuitos impresos, usadas en los sistemas deben tener luces indicadoras del estado operativo y puntos de prueba.

Todos los estados de falla y conmutación automática deben ser indicados en los monitores y en las tarjetas de los circuitos impresos, así como mediante alarmas audibles.

Todas las tarjetas de los circuitos impresos deben ser fabricados de fibra de vidrio y no de resinas fenólicas.

Cada condición anormal en el SCD debe dar lugar a una alarma.

Las alarmas deben ser visuales (en los monitores y por medio de luces en las tarjetas) y audibles (fácilmente detectables a 10 m).

El número de pasos para el reconocimiento de una alarma, debe ser uno.

Cualquier alarma presente en el sistema debe ser mostrada en los monitores y debe ser impresa en el momento que ocurra.

Todas las alarmas presentes en el sistema deben ser almacenadas, para su presentación y análisis, indicando identificación, servicio, naturaleza y hora.

En el caso de una falla de un dispositivo dado en el SCD, los dispositivos asociados no deben sufrir ninguna alteración en su operación, la funcionalidad del SCD no debe ser afectada en ningún caso.

Los niveles de alarma deben ser, al menos, los siguientes:

- a) Autodiagnóstico del Sistema.
- b) Alarmas de Proceso.
- c) Alarmas de Emergencia.

El nivel de alarma debe ser fácilmente asignado, cambiado o inhibido por el usuario, por cada punto individual, cuando sea requerido.

Se debe incluir un juego de bocinas por cada sección individual de la consola. Cada tono debe ser relacionado con cada nivel de alarma. El tono; frecuencia y volumen asignado para cada nivel de alarma debe ser como sigue (ver tabla 5.12):

| Nivel de Alarma             | Tono      | Frecuencia | Volumen  |
|-----------------------------|-----------|------------|----------|
| Autodiagnóstico del Sistema | Medio     | Baja       | Medio    |
| Alarmas de Proceso          | Agudo     | Alta       | Alto     |
| Alarmas de Emergencia       | Muy agudo | Alta       | Muy alto |

Tabla 5.12 Características audibles de los diferentes niveles de alarmas.

Se deben incluir los medios de verificar el estado operativo de las bocinas, tanto en los monitores de la consola como en el propio ensamble de bocinas.

Adicionalmente para la seguridad del sistema, se debe contar con funciones y parámetros diseñados para prevenir actividades o cambios no autorizados. Estas funciones pueden establecerse con teclas candado, teclados especiales o uso de claves (passwords).

**Niveles de prioridad de seguridad:** El acceso al sistema debe ser protegido basándose en prioridades. La protección de acceso se debe realizar por medio de teclas candado o con claves (passwords) programables:

Prioridad 4-Únicamente Vista: Es la prioridad más baja, solo se permite ver cualquier desplegado gráfico, pero inhibe realizar cualquier cambio.

Prioridad 3-Operación: El operador tiene acceso a todos los desplegados gráficos de operación permitidos, tales como tendencias, de alarma, reconocimiento de alarmas, control, puntos de ajuste, ajustes manual y automático y cualquier otras funciones programadas como funciones del operador.

Prioridad 2-Supervisión/Mantenimiento: Esta prioridad permite el acceso a todas las funciones del modo de operación, tales como cambio de punto de ajuste de alarmas, rangos de lazo, parámetros de entonamiento y funciones de administración del sistema.

Prioridad 1-Ingeniería: Esta es la prioridad más alta y permite el acceso a toda la base de datos y programación del sistema, incluyendo la seguridad del sistema. Debe haber una opción para restringir cambios de salidas o puntos de ajustes cuando se esté en este modo.

La seguridad del sistema no debe interferir con las acciones normales del operador.

### **Programas, Lenguajes y Procedimientos (Software).**

El término "Software" incluye todos los programas, lenguajes y procedimientos necesarios para que los equipos que integran el SCD, sean puestos en operación, sean configurados, reciban mantenimiento y se reparen. Los conceptos cubiertos por el "Software" para un SCD son los siguientes:

- a) Conceptos generales.

b) Programas de Librería (Standard Software).

c) Programas Especiales (User's Software).

**Conceptos Generales:** El sistema debe ser capaz de manejar formatos de fecha con cuatro dígitos en la indicación del año.

Se deben suministrar los programas, lenguajes y procedimientos, así como las licencias a nombre de del comprador del SCD.

Todos los programas, paquetes y lenguajes del SCD deben cumplir con los conceptos a continuación indicados:

**Compatibilidad:** Se refiere a la aptitud de los programas a ser usados, compartidos o sustituidos por otros programas, con la mínima o ninguna reducción en su capacidad funcional. El "Software" debe ser compatible con el de las mejores y más importantes marcas de equipo de cómputo. Se debe informar acerca de las compatibilidades específicas. Los paquetes de configuración deben apegarse al estándar IEC-61131 y los sistemas operativos deben ser compatibles con los más importantes sistemas operativos distribuidos, tales como el Unix. Es deseable que el SCD pueda utilizar los paquetes más comunes tales como el MS-Office o el Smartsuite para la creación de reportes.

**Flexibilidad:** Los programas especiales escritos por el usuario deben ser fácilmente modificados, expandidos e interconectados con otros programas, con la mínima alteración de la subrutina principal de los programas.

**Operatividad:** Todos los programas, procedimientos y lenguajes del SCD deben ser sencillos, "amigables" y orientados a las funciones de control de proceso. Los paquetes de Configuración de la Base de Datos y de Construcción de Desplegados Gráficos deben ser del tipo "Orientados a Objetos" (Objet Oriented Languages).

**Confiabilidad:** El "Software" debe estar totalmente probado y debe disponer de los medios para detectar cualquier falla en su funcionamiento. Así mismo, se deben proveer los procedimientos, incluyendo programas y documentación, necesarios para corregir o reparar fallas de su funcionamiento.

### **Programas de Librería**

Este término especifica los programas, lenguajes y procedimientos considerados básicos y necesarios para la puesta en funcionamiento, configuración, operación normal, mantenimiento y detección de fallas del SCD. Estos programas, lenguajes y procedimientos deben ser suministrados con el SCD.

Los programas de librería deben incluir los siguientes conceptos:

a) Sistemas Operativos.

b) Configuración del Sistema.

c) Procesamiento de datos.

d) Representaciones visuales (desplegados gráficos).

## **Sistemas Operativos**

El sistema operativo del sistema de control distribuido debe ser del tipo “Sistema Operativo Distribuido”, adecuado para la aplicación indicada en la especificación del SCD.

Un sistema operativo es una colección integrada de rutinas usadas para supervisar el secuenciamiento y procesamiento de los programas del SCD. Normalmente Se pueden tener uno o más sistemas operativos residiendo en el SCD.

Los sistemas operativos deben ejecutar funciones de depuración, control de entradas/salidas, conteo de máquina, compilación y asignación de memoria, etc., entre otras funciones.

El sistema operativo de control debe procesar la información en “Tiempo Real”, debiendo ser adecuado para los propósitos de las funciones de control.

El Sistema Operativo de la Red de Interfases, debe ser apropiado para el ambiente de ventanas y debe ser usado de preferencia para los objetivos de Ingeniería/Configuración. El sistema operativo de la red de interfases debe ser compatible con alguno de los sistemas operativos más importantes para operación en red, tales como el Unix, Ultrix o el Windows NT.

Para los objetivos de la operación del SCD, se debe evitar el uso de ambientes de ventanas, debiendo ser los desplegados gráficos de construcción dedicada y acceso sencillo, evitando que se manejen varias ventanas en un monitor a la vez.

El proveedor del SCD debe indicar todas las características de los sistemas operativos que integran el sistema, las tareas específicas ejecutadas y sus compatibilidades.

Se debe suministrar un original y una copia de los Sistemas Operativos en CD-ROM.

## **Configuración del Sistema**

Este término cubre todos los programas y procedimientos usados para definir la estructura del sistema y asignar los canales de entrada/salida, definir las estrategias de control, características, enlaces y parámetros de los circuitos de control.

La configuración del sistema debe poder ser realizada en cualquier estación de operación utilizando los teclados de Ingeniería/Configuración y controladores del cursor, en caso de no suministrar estación de operación; y desde la Estación de Ingeniería.

Los paquetes de configuración deben ser de uso sencillo y "amigable". El proveedor del SCD debe informar acerca de las características de los paquetes de configuración.

La Configuración debe ser restringida vía clave de acceso (Password) o llave física de seguridad.

La configuración debe ser almacenada desde los dispositivos apropiados y debe ser cargada al sistema, cada vez que se necesite.

Debe existir un procedimiento para verificar que la Configuración ha sido cargada apropiadamente.

Debe existir la posibilidad de configurar en línea al sistema.

Todas las estrategias de control deben ser realizadas vía programación, no requiriendo alguna modificación en el equipo o cableado.

### **Procesamiento de Datos**

El SCD debe estar provisto con los medios necesarios para permitir el procesamiento de datos almacenados por el sistema, transmitidos por la instrumentación de campo o generados por el propio sistema.

La programación debe ser de uso sencillo y debe permitir modificaciones por el usuario.

El sistema debe realizar funciones de elaboración de reportes, presentación de sumarios, elaboración de balances, elaboración de índices, procesamiento de funciones estadísticas, desplegados gráficos, manejo de hojas de cálculo, manejo de editores de dibujo, etc.

El proveedor del SCD normalmente informará acerca de la capacidad del SCD ofertado, para el procesamiento de datos, presentando ejemplos de cada caso.

### **Representaciones Visuales (desplegados gráficos)**

Los desplegados gráficos son la representación visual de los diferentes resultados, del procesamiento de datos recibidos de la instrumentación de campo o generados en los dispositivos que constituyen el SCD.

En todos los diferentes desplegados gráficos del sistema debe aparecer permanentemente la siguiente información:

- a) Hora, Minuto y Segundo.
- b) Fecha (Día, Mes, Año).

En nuestro país, el paquete editor de desplegados gráficos suministrado con el SCD debe tener los recursos necesarios para que cumpla ampliamente con los lineamientos establecidos en la “Especificación y Configuración de Sistemas Digitales de Control (Estándar para la Configuración de Bases de Datos, Construcción de Desplegados Gráficos y Procesamiento de Información para Sistemas de Digitales de Control)” No. K-217 del Instituto Mexicano del Petróleo.

Se debe tener la posibilidad de construir (como mínimo) en el sistema, los desplegados gráficos abajo indicados. Los desplegados gráficos entregados con el SCD deben ser fácilmente modificados por el usuario, así mismo se debe tener la posibilidad de construir los que sean requeridos por el usuario.

El sistema debe ser capaz de mostrar al menos los siguientes tipos de desplegados gráficos:

- a) Desplegados gráficos de Vista General (de la planta).
- b) Desplegados gráficos de Grupo (para incluir todos los puntos configurados).
- c) Desplegados gráficos de Grupos de Alarmas (para incluir todos los puntos configurados).

- d) Desplegados gráficos de Sumarios de Alarmas.
- e) Desplegados gráficos de Tendencias (para incluir todos los puntos configurados).
- f) Desplegados gráficos de Detalle de lazos (uno por punto residente en el SCD).
- g) Desplegados Gráficos Dinámicos (al menos 80).
- h) Desplegados para Autoentonamiento de Circuitos de Control (para incluir todos los puntos de control configurados).
- i) Desplegados gráficos del Estado del Sistema (los requeridos por el sistema).

Cualquier punto medido ó calculado, debe ser visto en estos desplegados gráficos. La configuración de cada desplegado gráfico debe ser interactiva. Debe proveerse una capacidad mínima para 200 desplegados gráficos dinámicos.

### **Programas Especiales (User's Software)**

En adición al "Software", se deben considerar las provisiones necesarias para permitir al SCD desarrollar, recibir y operar programas especiales, requerido para la optimización del control del proceso.

Los programas considerados para la optimización del control del proceso de aplicación futura, son los siguientes:

- a) Simulación.
- b) Control Supervisorio/Avanzado.
- c) Control Estadístico.
- d) Aplicaciones Especiales.

Se debe suministrar el "software" necesario para llevar a cabo la administración del mantenimiento de la instrumentación y del SCD, el cual debe de ser desarrollado por el mismo fabricante del SCD.

### **Paquete de Autoentonamiento**

Este tiene como objetivo la determinación automática de los parámetros óptimos para el entonamiento de circuitos de control que funcionen bajo el algoritmo de control PID. Los parámetros que se deben determinar, se indican a continuación. El paquete debe determinar parámetros adicionales para optimizar la operación de los circuitos de control:

- a) Ganancia de los controladores.
- b) Tiempo de integral.
- c) Tiempo de derivada.



El paquete de autoentonamiento debe funcionar, considerando las siguientes restricciones:

- a) Que cause el menor disturbio.
- b) Que cause el menor sobrepaso.
- c) Que estabilice el circuito en el menor tiempo posible, con un mínimo de ciclos.

El paquete de autoentonamiento debe tener capacidad de ajustar al mismo tiempo todos los circuitos de control configurados en el SCD.

De preferencia, el paquete debe funcionar usando el método de circuito cerrado (en línea), y puede usar el método del circuito abierto, considerando que la magnitud de los disturbios inducidos en el proceso no produzca ninguna alteración o inestabilidad al proceso.

El Paquete de autoentonamiento debe poder ser configurado para operar de manera continua o con desconexión automática cuando se obtenga el entonamiento óptimo.

En la eventualidad que se induzca una alteración en el proceso por la acción del paquete de autoentonamiento, éste debe reconocer la desestabilización y desconectarse automáticamente.

El método usado debe tener un seguimiento estadístico, con el objetivo de estimar en qué extensión se mejora el desempeño del circuito de control, después de cada ciclo de entonamiento, colocando en el histórico los parámetros de autoentonamiento.

La activación/desactivación manual del paquete de autoentonamiento, debe ser realizada desde las estaciones de operación, en una forma rápida y sencilla.

El paquete de autoentonamiento debe tener desplegados gráficos preconstruidos, con el objetivo de permitir una fácil operación y una visualización apropiada de su funcionalidad.

El paquete de autoentonamiento se debe operar con todos los circuitos de control en la planta, permitiendo al operario autorizado iniciar o detener su funcionamiento, según se requiera.

El paquete debe estar completamente probado y se debe garantizar plenamente su funcionamiento.

Se debe suministrar todos los dispositivos, accesorios, programas, licencias (a nombre del comprador), servicios y capacitación requeridos para asegurar que el paquete de autoentonamiento tenga un óptimo funcionamiento.

### **Servicios del Proveedor**

El Proveedor del SCD debe proporcionar los servicios al comprador indicados a continuación:

- a) Capacitación.
- b) Soporte Técnico.

- c) Programación y configuración del SCD.
- d) Documentación (impresa y en CD-ROM).
- e) Pruebas del SCD.
- f) Empaque.
- g) Mantenimiento.

**Capacitación:** El Proveedor debe proporcionar los cursos requeridos para cubrir los aspectos indicados a continuación:

1 (uno) curso de configuración del Sistema, con duración de 10 (diez) días efectivos.

1 (uno) curso de mantenimiento del Sistema, con duración de 10 (diez) días efectivos.

3 (tres) cursos de operación del Sistema, con duración de 5 días (cinco) efectivos cada uno.

Todos los cursos requeridos deben ser incluidos con el sistema, considerando al menos ocho (8) asistentes por curso.

Se debe dar información detallada acerca de la programación de los cursos y antecedentes académicos requeridos por los asistentes.

Se debe informar acerca de la capacidad y conocimientos del expositor, en el campo de interés.

Los cursos deben estar totalmente orientados al proyecto específico y sistema cotizado.

**Soporte Técnico:** Se debe dar todo el soporte técnico requerido, con las facilidades y en el sitio donde se encuentre instalado el SCD de la planta correspondiente, para los siguientes conceptos:

- a) Integración del Sistema.
- b) Supervisión durante la instalación del SCD.
- c) Programación y configuración del sistema.
- d) Instalación de equipos y accesorios externos del sistema.
- e) Puesta en funcionamiento del sistema.
- f) Supervisión durante el arranque de la planta.
- g) Servicio de mantenimiento del sistema.

**Programación y Configuración del SCD:** El proveedor debe considerar que es el responsable de la configuración y programación del SCD.

La programación y configuración del SCD, deben estar completamente apegadas a la información suministrada por el cliente en términos de identificaciones, funcionalidades, filosofías y cantidades.

El proveedor debe proporcionar los servicios requeridos por los siguientes conceptos:

- a) Configuración de puntos (incluyendo funciones relacionadas con almacenamiento y tendencia).
- b) Construcción de desplegados gráficos.
- c) Configuración de grupos históricos.
- d) Construcción de 15 (quince) balances y reportes.
- e) Construcción de programas.

Se deben dar las facilidades necesarias para permitir al personal definido por el cliente, supervisar la integración y configuración del sistema, la programación del procesamiento de datos y construcción de los desplegados gráficos dinámicos, requeridos para la operación normal de la planta.

**Documentación:** El paquete debe incluir toda la documentación requerida para la operación de configuración, capacitación y detección de fallas del sistema.

Se debe listar todos los dibujos y documentos a ser entregados con el sistema.

Los documentos que serán entregados por el contratista al vendedor, para permitir la configuración del sistema, programación del procesamiento de datos y construcción de los desplegados son los siguientes:

- a) Sumario de Señales de Entrada/Salida y Funciones.
- b) Esquemas de Gráficos Dinámicos.
- c) Diagramas Lógicos Detallados.
- d) Diagramas Funcionales de los Circuitos de Control.

Se debe proporcionar todas las licencias de los sistemas operativos y de todos los equipos y subsistemas que contengan “software” de control. Estas licencias deben ser expedidas a nombre de comprador (cliente) con una duración mínima de 10 (diez) años a partir de las pruebas SAT (pruebas en sitio).

**Pruebas del Sistema:** Se debe tomar en cuenta que el sistema debe ser probado totalmente en fábrica y en el lugar en el cual será instalado, ante el supervisor que designe el comprador del SCD.

Las pruebas de aceptación serán como sigue:

- a) Con los sistemas totalmente interconectados, incluyendo todos los dispositivos externos al SCD, tales como los SFI's, PLC's, controladores, etc.

- b) Todas las tarjetas y dispositivos del sistema deben ser probados individualmente.
- c) Cada entrada, cada salida y cada circuito de control deben ser probados individualmente.
- d) Todos los módulos de programación deben ser totalmente probados.
- e) Todas las trayectorias de comunicación deben ser totalmente probadas.
- f) En adición a las pruebas anteriormente especificadas, el cliente puede definir pruebas complementarias.

Sólo después de que el sistema esté completamente probado, todas las funciones verificadas y habiendo operado satisfactoriamente durante tres (3) meses en la planta, el SCD podrá ser aceptado formalmente.

### **Empaque**

Se debe dar las especificaciones detalladas acerca del empaque, transportación y almacenaje del sistema.

El vendedor debe ser responsable del empaque y transportación del sistema en el lugar de su instalación. También debe supervisar el almacenamiento del sistema.

Todos los dispositivos sensibles a las cargas electrostáticas, deben tener doble protección.

### **Mantenimiento**

Se debe entregar toda la información técnica para el mantenimiento y reparación del SCD suministrado y debe ser provisto de los siguientes niveles de autodiagnóstico:

- a) Autodiagnóstico en línea.
- b) Pruebas de rutina.
- c) Diagnóstico fuera de línea.

El diagnóstico en línea debe aplicarse en los siguientes conceptos:

- a) Circuitos y funciones.
- b) Dispositivos e interfases.
- c) Configuración y comunicaciones.
- d) Programas de Librería.
- e) Programas Especiales.

Se debe entregar toda la información técnica requerida para el mantenimiento y reparación del sistema, considerando que esto debe ser realizado por personal técnico, incluyendo las cartas de detección de fallas del sistema (para equipos, así como a lenguajes y procedimientos).

Se debe incluir en el paquete del sistema el equipo de prueba requerido, para diagnosticar en y fuera de línea, así como para efectuar mantenimiento y reparaciones al sistema.

Todas las tarjetas deben tener luces indicadoras y puntos de prueba.

Todos los estados de falla y conmutación automática deben indicarse en los monitores.

Se debe incluir las partes de repuesto requeridas para cada etapa de las mostradas a continuación:

- a) Arranque y puesta en funcionamiento.
- b) Para dos (2) años de operación

Se debe incluir el servicio de mantenimiento predictivo, por 6 (seis) meses después de ser aprobadas las pruebas de aceptación en sitio (SAT).

### **Instalación, Montaje, Rutas, Cableado y Red de Tierras**

**Instalación:** Todo el equipo considerado en el “hardware” debe instalarse de acuerdo a los planos de ubicación física en los diferentes sitios considerados para el proyecto en cuestión (cuarto de control central, cuarto control satélite, etc.).

**Montaje:** Todo el equipo considerado como “hardware” debe montarse sobre una base reforzada a diferencia de los espacios libres del piso falso.

**Ruteado:** Todas las canalizaciones para interconexiones entre módulos y conexiones a instrumentación para señales de campo, deben ser independientes del resto de las canalizaciones.

**Cableado:** Todos los cables de conexión a instrumentos para señales de campo deben ser del tipo multiconductor de cable trenzado de calibre adecuado, con pantalla y perfectamente identificado con etiqueta, cinta auto adherible. Las interconexiones con fibra óptica deben también estar identificadas.

**Red de Tierras:** El SCD debe contar con una red de tierras exclusiva, en la cual solo debe contar con solo un punto de conexión. La impedancia de esta red debe ser de acuerdo a lo recomendado por el fabricante.

### **Confiablez y Obsolescencia**

El Proveedor debe asumir la garantía completa para todo el sistema (incluyendo las partes y equipo no construidos por él, pero suministrados por éste).

La garantía debe cubrir todos los equipos, accesorios, programas y protocolos de comunicación suministrados con el SCD.

La garantía de confiabilidad debe considerar que no más de 1 (un) lazo de control debe fallar en un periodo de 12 (doce) meses de operación continua por cada grupo de 100 (cien) lazos de control y 2 (dos) por cada 100 de puntos de medición.

Se debe proporcionar los cálculos de la disponibilidad del sistema, integrado por los siguientes elementos, así como de todos sus componentes para cinco (5) años de operación:

- a) Interfases Hombre-Máquina.
- b) Interfases con el Proceso.
- c) Dispositivos de Almacenamiento Masivo.
- d) Unidades de Control.
- e) Sistemas de Comunicación.
- f) Fuentes de Poder.
- g) Accesorios.

Además, el proveedor debe proporcionar el Tiempo Promedio de Falla para todo el SCD y todos los Subsistemas.

El sistema debe considerar una redundancia de 1:1 en los siguientes dispositivos:

- a) Sistemas de Comunicación.
- b) Discos Duros (Medios magnéticos y unidades motrices y electrónicas).
- c) Interfases (E/S para lazos de control).
- d) Unidades de Control.

En todos los niveles de redundancia, la conmutación debe ser automática, y el operador debe ser alertado inmediatamente.

La garantía debe cubrir los siguientes conceptos:

- a) Funcionamiento de dispositivos y tarjetas.
- b) Funcionamiento del "Software".
- c) Materiales y mano de obra defectuosa.
- d) Desempeño funcional de los equipos de prueba.
- e) Fuentes de Poder.

- f) Sistemas de comunicación.
- g) Accesorios y partes electromecánicas de los periféricos.
- h) Sistemas de Fuerza Ininterrumpible y acondicionadores de línea.
- i) Funcionalidad del Sistema.

Se debe establecer claramente todas sus cláusulas de garantía.

La garantía debe cubrir los materiales y la mano de obra involucrada en las reparaciones.

En el caso de falla, el Soporte Técnico debe estar disponible dentro de las siguientes veinticuatro (24) horas de la notificación.

Se debe informar todo lo relacionado con los convenios para el cambio de tarjetas defectuosas por otras operantes, así como para la adquisición de partes de repuesto, una vez que el periodo de garantía haya terminado; así mismo se debe informar acerca de las políticas del fabricante para tomar a cuenta el “hardware” y el “software” obsoletos en el momento que el cliente desee efectuar cualquier actualización del sistema. Además el fabricante debe incluir en su cotización una carta donde se comprometa a notificar los avances tecnológicos de su sistema cada 6 (seis) meses.

En caso de una interrupción prolongada de la energía eléctrica, debe ser factible cargar mediante un solo comando toda la configuración y datos necesarios para reiniciar el sistema a su operación normal.

Todos los dispositivos del sistema deben ser adecuados para soportar las siguientes condiciones climatológicas:

- a) Temperatura: 10 a 40 grados centígrados.
- b) Humedad: 10 a 90 % sin condensación.

El proveedor debe garantizar que el diseño, la manufactura, instalación, operación y pruebas de todo el SCD están en concordancia, con al menos los estándares API-RP554-1995 (Process Instrumentation and Control), ANSI/NEMA ICS 6 (Industrial Controls and Systems Enclosures), ANSI/ISA S71.04-1985 (Environmental Conditions for Process Measurement and Control Systems), AWG (American Wire Gauge), CSA (Canadian Standard Association), EIA ( Electronics Industries Association), FM (Factory Mutual), IEC-61131 (Programmable Controllers), ISAS5.1-1984 (Instrumentation Symbol and Identification), ISA-RP S5.3-1983 (Graphics Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation), NEC (National Electrical Code),e ISO-9000 Rev 2000 (Internationale Standard Organization).

### **Obsolescencia**

A la fecha de cotización el sistema debe tener como máximo dos (2) años de haber salido al mercado El sistema debe permitir su actualización en forma modular a componentes más modernos cuando éstos aparezcan en el mercado sin alterar la operabilidad del sistema.

Finalmente, la figura 5.46 muestra un arreglo típico de un SCD con protocolo de comunicación Fieldbus Foundation.

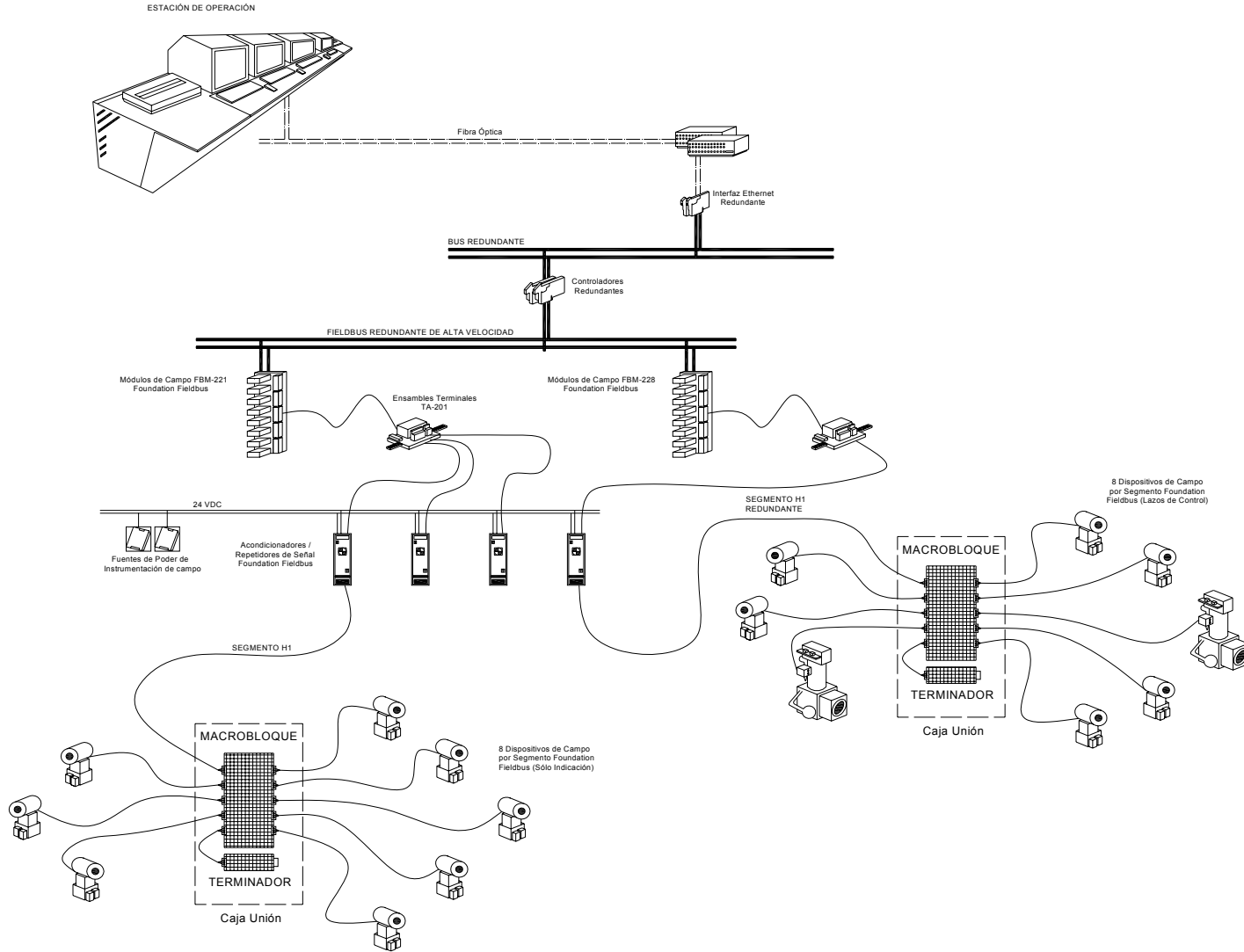


Fig. 5.46 Arquitectura típica de un Sistema de Control Distribuido con Protocolo de Comunicación Filedbus Foundation.



Cabe hacer mención que existen además otros sistemas de control también de importancia, como son, el control avanzado y los sistemas expertos, que aunque no serán tratados aquí, no dejan de ser menos trascendentes en el manejo de las plantas; pues los sistemas expertos emulan la capacidad de toma de decisiones de un experto humano para detectar y diagnosticar los probables potenciales que pueden presentarse en el control de procesos.

El sistema experto se integra en el sistema de control de la planta para asistir al operador en la detección de fallos y en la solución de los casos en que el proceso sale fuera de control.

El conocimiento para elaborar el software de un paquete de sistema experto es laborioso y esta basado fundamentalmente en las señales de alarma que el operador humano capta antes de presentarse las siguientes situaciones anómalas en el proceso que dan lugar a toda clase de fenómenos perjudiciales como son: paro de la planta, distribución del producto, explosiones, desprendimiento de productos peligrosos, etc.

El beneficio que el sistema experto aporta a la planta es la reducción de los tiempos de paro y, lo que es más importante, la disminución de la probabilidad de que el funcionamiento anómalo de la planta conduzca a situaciones catastróficas.

Mientras que el control avanzado son técnicas que se apartan de los sistemas de control neumáticos, electrónicos, analógicos PID, control de relación y en cascada por ejemplo.

Se emplean para mejorar el rendimiento económico del proceso. Las ventajas que representa el control avanzado abarcan el ahorro de energía conseguido en la operación de la planta, el aumento de la capacidad de fabricación, la disminución del costo de operación de la planta y la disminución del porcentaje de recuperación de los productos que salen fuera de especificaciones durante el proceso de fabricación.

Si los métodos de control convencional presentan problemas por no ser un proceso conocido, es complejo o tiene retardos importantes o grandes perturbaciones y es marcadamente no lineal, la alternativa recomendada es el control avanzado, pues día con día crece en su aplicación.

## **5.9 Factores de relevancia en el control de procesos**

Todos los procesos presentan dos características de importancia que deben de considerarse al momento de automatizarlos:

- a) Los cambios en la variable regulada por alteraciones en las condiciones del proceso, a esto se le llama “cambios de carga”.
- b) El tiempo necesario para que la variable de proceso (manipulada) alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este retraso se debe a una o varias propiedades del proceso como son la capacitancia, la resistencia y el tiempo de transporte.

## Cambios de carga.

La carga del proceso es la cantidad total del fluido del control que el proceso requiere en un instante cualquiera para mantener unas condiciones de trabajo equilibradas. Considérese la figura 5.47.

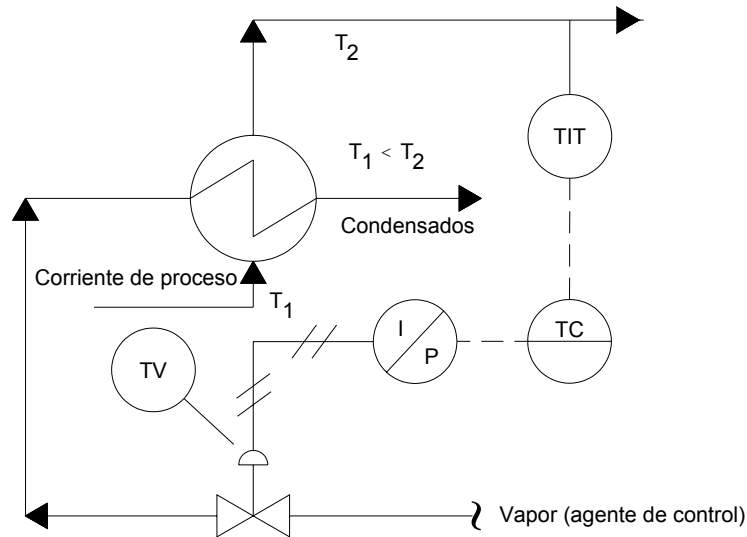


Fig. 5.47 Calentamiento de una corriente de proceso.

Al circular la corriente “fría” (corriente de proceso) con un determinado caudal, a la salida de la corriente esta debe estar “caliente”, por lo general a una temperatura específica, para lograr este propósito se requiere una determinada cantidad de vapor.

Pero un aumento en el gasto de la corriente de entrada precisa un incremento en el consumo de vapor; por otro lado, un aumento en la temperatura de entrada de la corriente fría, requiere un menor flujo de vapor; ambas cosas son cambios de carga. De forma general los cambios de carga en un proceso son debidos a alguno de los siguientes aspectos:

- Mayor o menor demanda del agente de control por el sistema controlado. En la figura 5.47, un aumento en el caudal de la corriente de proceso o una disminución de su temperatura, produce un cambio de carga pues requiere el consumo de mayor cantidad de vapor.
- Por variaciones en la calidad del fluido de control. Si la presión de vapor (en la figura 5.47) disminuye, esto dará lugar a un aumento de su caudal para mantener la misma temperatura controlada, pues el calor que cede el vapor al sistema al condensarse disminuye al bajar su presión.
- Cambios en un medio ambiente. Estos efectos pueden verse fácilmente en instalaciones al aire libre, en donde las pérdidas de calor por radiación varían considerablemente según la estación del año, la hora del día y el tiempo.

- d) Por el calor absorbido o generado por una reacción química, donde ello conlleva un aumento o disminución en la cantidad del agente de control.

Los cambios de carga pueden originar perturbaciones en la alimentación y en la demanda. En la figura 5.47, las variaciones en la presión de vapor, o en la apertura de la válvula de vapor son perturbaciones en la alimentación del proceso. Los cambios en la temperatura de la corriente fría y las variaciones en su flujo, son perturbaciones en la demanda.

### Capacitancia.

La capacitancia en un proceso es un factor de gran importancia en el control automático. Esta se define como una medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía o de material con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia.

Nunca debe de confundirse la capacitancia de un proceso con su capacidad. La capacitancia puede entenderse comparando un sistema con otro; por ejemplo, dos tanques de almacenamiento pueden tener la misma capacidad, pero no significa que tengan la misma capacitancia, pues el que tenga mayor diámetro y menor altura, tendrá mayor capacitancia con relación a una unidad de altura o nivel. Considérese la figura 5.48.

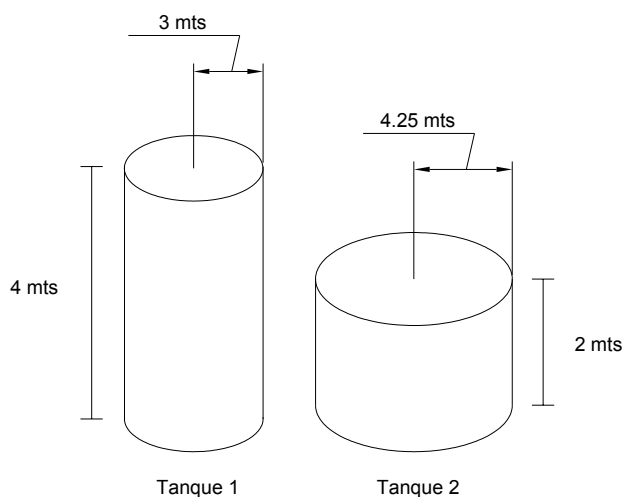
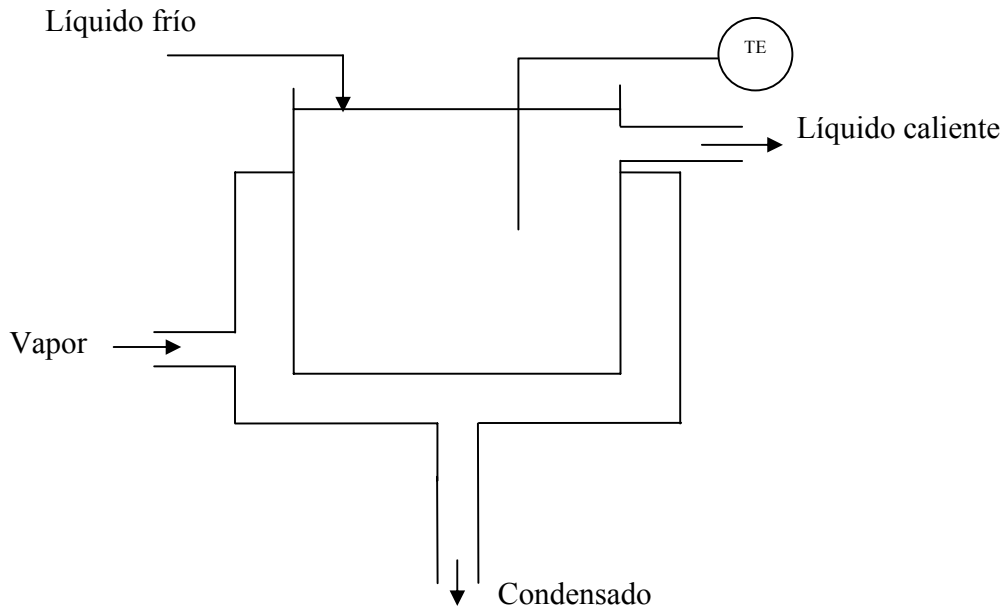


Fig. 5.48 Comparación en capacitancia entre dos tanques.

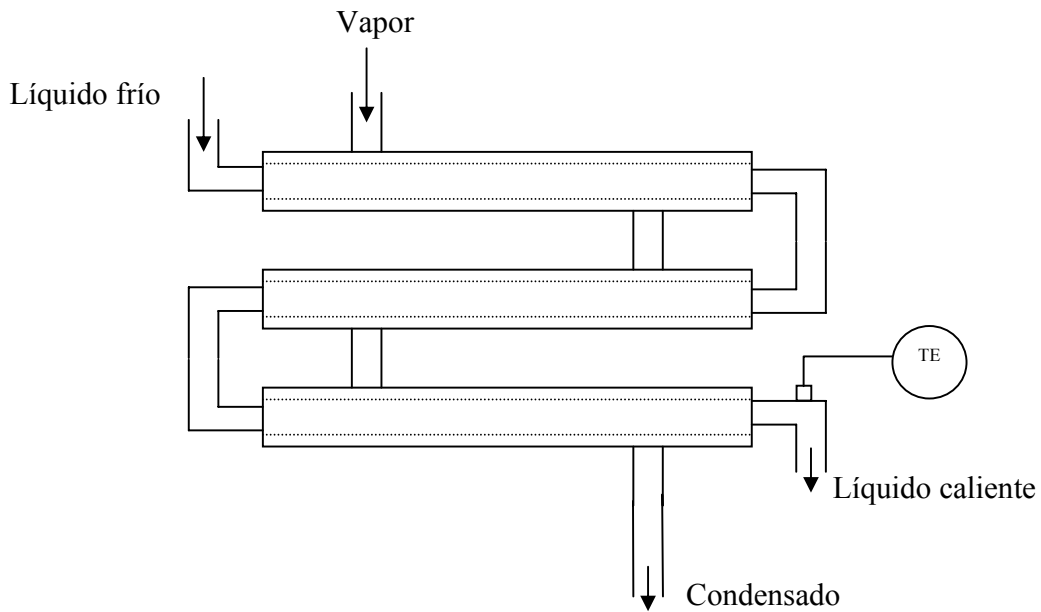
| Tanque 1  | Tanque 2  |
|---|---|
| Altura= 4 mts   | Altura= 2 mts   |
| Radio= 3 mts  | Radio= 4.25 mts   |
| Diámetro= 6 mts   | Diámetro= 8.5 mts                                       |
| Volúmen= $\pi r^2 h = 113 \text{ m}^3$                  | Volúmen= $\pi r^2 h = 113 \text{ m}^3$                  |
| Capacitancia= $113 \text{ m}^3/\text{unidad de altura}$ | Capacitancia= $113 \text{ m}^3/\text{unidad de altura}$ |

De aquí podemos inferir que, como la altura del tanque 2 es menor, sus unidades de nivel serán menos que las del tanque 1, por lo tanto la capacitancia del tanque 2 será mayor por unidad de nivel.

En un proceso, una capacitancia grande relativamente, es favorable para mantener constante la variable regulada a pesar de los cambios de carga que pueden presentarse. Pero esta misma característica, también hace difícil cambiar la variable a un nuevo valor, introduciendo un retardo importante entre la variación del fluido de control y el nuevo valor que toma la variable regulada. Considérese la figura 5.49.



a) Capacitancia térmica grande.



b) Capacitancia térmica limitada.

Fig. 5.49 Capacitancia térmica en dos sistemas, a) grande, b) limitada.

Aquí lo importante es resaltar la diferencia entre los dos sistemas con respecto a la capacidad de transferir energía. En la figura 5.49 a) el tanque contiene una gran cantidad de líquido, de forma que esta masa considerable de líquido estabiliza y resiste los cambios que puedan causarse a la temperatura por variaciones en el flujo del líquido, en la presión de vapor o en la temperatura ambiente. Pero si estas variaciones se aplican al sistema de la figura 5.49 b), definitivamente influirán mucho en la temperatura, pues es pequeña la masa del líquido.

### Resistencia.

La resistencia es la oposición total o parcial de transferencia de energía o de material. Existen muchas formas de ejemplificar la resistencia pero veamos una muy sencilla, tal como se aprecia en la figura 5.50.

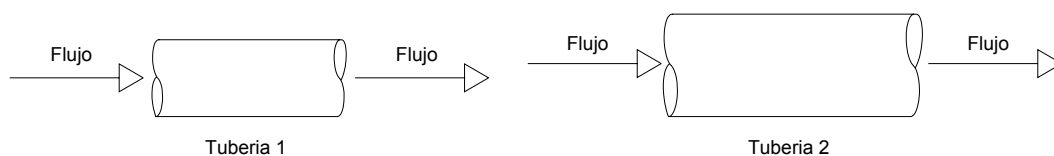


Fig. 5.50 Comparación de resistencia entre dos tuberías.

La tubería 1 presenta mayor oposición al flujo pues su diámetro es menor que la tubería 2, por lo tanto la resistencia al flujo en la tubería 2 será menor que en la primera. La mayor resistencia o la menor resistencia en un proceso son conceptos que por si mismos deben ser correctamente aprovechados, pues si lo que se requiere es un incremento en la presión del fluido de la figura 5.50, el valor de la resistencia debe ser elevado; pero si aplicáramos este concepto al intercambiador de calor de la figura 5.47 en la línea de alimentación de vapor, seguramente esto involucraría considerar la resistencia en la línea de proceso, para lo cual tal vez, no sea adecuado una alta resistencia en ninguna de las dos líneas.

### Tiempo de transporte.

Si en la figura 5.49 b) disminuye la temperatura del líquido en la entrada, pasara cierto tiempo hasta que el fluido más frío pueda circular por los tubos y alcance al medidor de temperatura. Esto se le llama tiempo de transporte y durante ese intervalo, el elemento de medición no capta ningún cambio en la variable regulada. Este retardo depende de la velocidad de transporte y la distancia de este.

El tiempo de transporte en un sistema debe de ser lo mejor conocido posible y nunca subestimado, pues el tiempo de transporte en el control de procesos, retarda la reacción de este ante los cambios de carga presentándose un tiempo muerto durante el cual el elemento de medición primario no sensa y por consecuencia el sistema de control no actúa, y para cuando lo haga pudiera ser con unas condiciones distintas en el proceso las cuales tal vez no puedan manejar adecuadamente.

En tanto, si el proceso es satisfactorio así, el tiempo de transporte debe ser el mínimo, para que permita a los elementos y sistemas de medición y control actuar debidamente.

# Principales Actividades Realizadas por Instrumentación y Control en el área de Diseño en la Ingeniería de Detalle de un Proyecto

## 6.1 Criterios de Diseño

Este es el primer documento que la disciplina debe editar, su contenido indica los requerimientos mínimos aplicables que regirán concernientes a la Instrumentación que se llevara a cabo durante el desarrollo de la ingeniería, previa autorización del cliente.

Entre la información de este documento se tiene:

- a) Códigos estándares (API, ASTM, ASME, etc.).
- b) Símbolos de instrumentación e identificaciones.
- c) Unidades de medición ( $m^3/hr$ ,  $ft^3/hr$ ,  $Kg/cm^2$ ,  $lb/in^2$ , etc.).
- d) Requerimientos específicos para los instrumentos y características constructivas por tipo de instrumento (materiales, carátulas, escalas, rangos, tipo de conexiones, suministros de energía, tipo de señales, accesorios, etc.).

Previo a la elaboración de los criterios de diseño, se debe de contar con las Bases de Diseño del cliente que contenga la información requerida, además de los Diagramas de Tubería e Instrumentación.

## 6.2 Índice de Instrumentos

Este documento se edita, con la información de la primera emisión de los Diagramas de Tuberías e Instrumentación (DTI'S), las subsecuentes ediciones con su correspondiente revisión, deberán efectuarse preferentemente con cada cambio de revisión de DTI'S, así como el avance de actividades de instrumentación incluidos en el Índice de Instrumentos.

La información generalmente contenida para cada instrumento es:

- a) Número consecutivo de partida.
- b) Número de identificación.

- c) Servicio.
- d) Número de DTI.
- e) Número de Hoja de Datos.
- f) Número de Lazo de Control.
- g) Número de Típico de Instalación.
- h) Número de Orden de Compra.
- i) Proveedor.
- j) Marca y Modelo.

El índice de Instrumentos es un documento de gran ayuda durante la etapa de construcción pues en base a el se puede tener toda la información necesaria de los instrumentos del proyecto.

### **6.3 Sumario de Instrumentos**

En este documento se indican las condiciones de operación del proceso (flujos, presiones, temperaturas, caídas de presión, densidades, viscosidades, puntos de ajuste o disparo, etc.) a que deben operar todos y cada uno de los instrumentos de campo (elementos primarios de flujo, transmisores, analizadores, interruptores, válvulas de control, reguladores, solenoides, manómetros, termómetros, etc.).

La disciplina de Instrumentación emite el sumario con la lista de instrumentos de campo, indicando además el servicio, el número de DTI y donde se localiza el instrumento. Posteriormente la transmite a la disciplina de proceso para el llenado en cada caso, según sea, de las condiciones de proceso requeridas. Una vez que se tienen las condiciones de proceso para cada instrumento listado en el Sumario, la disciplina de instrumentación utiliza estos datos para elaborar las Memorias de Cálculo y para especificar técnicamente los instrumentos en las Hojas de Datos.

### **6.4 Memorias de Cálculo**

Previo a la elaboración de las Hojas de Datos para elementos primarios de flujo (placas de orificio, orificios de restricción, toberas, venturis, etc.) válvulas de seguridad y/o alivio, discos de ruptura, etc. Se realizara el cálculo respectivo, teniendo en cuenta que datos derivados del cálculo (cv's, cg's, valores de beta, tamaños de orificio, etc.) son parte de la Hoja de Datos del instrumento en cuestión.

## **6.5 Especificaciones y Hojas de Datos**

Las Especificaciones suelen también llamarse Especificaciones Generales y son elaboradas para todos y cada uno de los instrumentos de campo básicamente que se encuentran en DTI'S.

Estas especificaciones contienen los lineamientos técnicos en detalle (tipo de instrumento, tipos de caja, accesorios para montaje, materiales de construcción, señales de salida, señales de entrada, conexiones a proceso, conexiones al conduit, exactitudes, rangos, etc.) que deberán tener los instrumentos en cuestión, y en base a esto se procederá a elaborar las Hojas de Datos. Estas Hojas de Datos deberán de cumplir con las hojas de especificación general teniendo el carácter de mandatorias.

Para el caso de los sistemas de control (DCS'S, PLC'S) se elaborarán hojas de especificación en donde además de mostrar requerimientos de Hardware (Equipo y Accesorios), Software (Programas y Lenguajes) Servicios del Proveedor, Confiabilidad y Obsolescencia, se indicara también el número y tipo de señales (4-20 mA, mV, 24 vcd, etc.) que se pretende sean manipuladas por el Sistema de Control Distribuido y por el PLC. A esto se le llama "Sumario de Señales" y se le deberá dar un porcentaje mínimo adicional para expansiones futuras.

Las Especificaciones y Hojas de Datos se elaboran con el fin de elaborarse Requisiciones para Cotización y puedan ser enviadas a los proveedores de los equipos.

## **6.6 Requisiciones para Cotización**

Este es el documento mediante el cual se solicita Cotización a los Fabricantes y/o Proveedores del Sistema de Control Distribuido, PLC y demás instrumentos en cuestión. Contiene la siguiente información:

- a) Especificación u Hoja de Datos.
- b) Requerimiento de Partes de Repuesto.
- c) Requisitos de Garantía e Información Requerida del Proveedor.

La requisición una vez revisada y aprobada es transmitida a los concursantes vía Departamento de Procura.

## **6.7 Evaluación y Dictamen Técnico de Cotizaciones**

Una vez que el Departamento de Procura, entrega las cotizaciones de los concursantes al Departamento de Instrumentación, se procede a evaluar técnicamente el cumplimiento de todas y cada una de las cotizaciones, utilizando para tal efecto la Tabla Comparativa correspondiente.



Durante la etapa de revisión de cotizaciones, generalmente se requieren aclaraciones con los concursantes, estas deben llenarse a cabo, a través de procuración y siempre se deberá de cuidar que se obtenga la evidencia de las Preguntas, Respuestas y/o Acuerdos Surgidos.

Cuando ya han sido evaluadas las cotizaciones, de los Proveedores se procede a elaborar el Dictamen Técnico en orden descendente de (conforme a la aceptación técnica) cada una de las ofertas presentadas, así como también las notas u observaciones que procedan.

## **6.8 Requisiciones para Compra**

Como su nombre lo indica, es el documento legal mediante el cual se adquieren los Bienes y Servicios de los Sistemas de Control e Instrumentos.

El contenido de este documento es similar al de las Requisiciones para la Cotización, con la diferencia de contener la información del fabricante como Marca, Modelo, Características Técnicas, Plazos de Entrega, Dibujos del Proveedor, etc.

## **6.9 Revisión de Dibujos del Fabricante**

Colocada la orden de Compra al Proveedor, este deberá proporcionar en las fechas indicadas los documentos y/o dibujos acordados en la selección correspondiente del pedido para su revisión y/o aprobación por el Departamento de Instrumentación. Los Dibujos de Fabricante deberán mostrar en apego específico a las hojas de datos o especificaciones todas las características técnicas (dimensiones, materiales, etc.) además de mostrar la marca y el modelo del fabricante.

## **6.10 Diagramas de Lazos (Loops)**

Este diagrama contiene la instrumentación requerida para las funciones de indicación, registros y alarmas de cualquier variable del proceso y necesaria durante la operación de la planta. Muestra todos y cada uno de los instrumentos y funciones asociados, indicando su localización física (Campo o Cuarto de Control), interconexión entre cada componente del lazo con sus respectivas tablillas, suministros eléctricos o neumáticos, utilización de las cajas de unión, conexión a gabinetes y características de alambrado.

La información de este documento es utilizada, durante el desarrollo de la Ingeniería de Detalle (entre otros, por el fabricante de los Sistemas de Control y PLC'S) así como en el sitio de la obra por construcción y durante la fase de prueba de lazos, en FAT y SAT (fabrica y en sitio).

## 6.11 Diagramas Lógicos

En estos Diagrama Lógicos quedan representadas las acciones de operación (arranque, paros, aperturas, cierres) bajo una Secuencia Lógica que incluye:

- a) Modos de operación (Manual, Semiautomático, Automático).
- b) Operadores Lógicos.
- c) Disparos y Permisivos.
- d) Interlocks y Alarmas.

Este documento también es utilizado por el fabricante del SCD y PLC.

## 6.12 Gráficos Dinámicos

Cuando se esta fabricando un Sistema de Control Distribuido de la marca o proveedor que lo suministra, es necesario elaborar los diagramas gráficos dinámicos que servirán de base al fabricante para elaborar los definitivos que aparecerán en las Pantallas del Sistema de Control Distribuido.

Los gráficos dinámicos mostraran todas las alarmas, indicaciones, disparos, permisivos y controladores que deberán aparecer en el desplegado gráfico en pantalla en cuarto de control. Estos se elaboran en forma de Diagrama de Flujo de Proceso mostrando el equipo principal y las notas generales que facilitan la interpretación de estos diagramas.

Cabe mencionar que el número de Diagramas Gráficos Dinámicos a desarrollar en un proyecto es como mínimo igual al número de Diagramas de Instrumentación y Control.

## 6.13 Localización de Instrumentos

Teniendo como referencia los Planos de Arreglos de Tuberías (plantas, elevaciones), la disciplina de Instrumentación, localiza a escala la Instrumentación de Campo del Proyecto, así como cajas de unión, o de paso.

Es muy importante mencionar que esta localización deberá llevarse a cabo considerando las mejores prácticas de ingeniería, es decir, teniendo en cuenta recomendaciones del fabricante, facilidades para su operación, lectura, mantenimiento y seguridad.

## **6.14 Rutas Eléctricas**

Se indicara en planos, la Ruta o canalización óptima para la Interconexión de los Instrumentos con Señal Eléctrica, considerando siempre los arreglos de planta, equipo y tuberías, con el objeto entre otros, de evitar interferencias.

En las rutas neumáticas se indicara principalmente la ruta de Cabezales de Aire de Instrumentos, considerando los Arreglos de Tuberías.

## **6.15 Cedula de Conduit y Cable**

En este documento se indican las características constructivas de los cables requeridos en las múltiples interconexiones eléctricas entre instrumentos, así como origen y destino, diámetro y longitud de conduit y sus accesorios.

## **6.16 Típicos de Instalación**

Este documento indica gráficamente el detalle de la instalación del Instrumento al Proceso (equipo o línea), así como también los materiales a emplear en su instalación como válvulas, coples, niples, codos, conectores, etc.). El documento es utilizado en etapa de construcción, durante la instalación de los instrumentos.

## **6.17 Lista de Material**

La elaboración y edición de las listas de material para su adquisición, son todos los materiales indicados en los Típicos de Instalación así como en los Planos de Cédula de Cable y Conduit. La práctica de ingeniería recomienda dar un porcentaje de 20% más, adicional al cable requerido y un 10% adicional en número de piezas totales requeridas.

## **6.18 Interfaz con otras Disciplinas**

Durante el desarrollo de la Ingeniería de Detalle del Proyecto, se tiene una participación interdisciplinaria, en la edición de planos, documentos y realización de actividades. Algunos de estos planos y documentos generados por tal interrelación entre las diferentes disciplinas con el Departamento de Instrumentación y Control, son como se describen a continuación:

- a) Proceso/Instrumentación: Filosofía de Operación. Diagramas de Tuberías e Instrumentación y Condiciones de Proceso.
- b) Mecánico/Instrumentación: Especificaciones de Equipo Mecánico y Planos de Recipientes (Tabla de Boquillas).
- c) Tuberías/Instrumentación: Especificaciones de Tuberías, Arreglos de Equipo, Arreglos de Tuberías, Isométricos, Dimensiones de Válvulas de Control y Medidores en línea.
- d) Eléctrico/Instrumentación: Clasificación de Áreas y Suministro de Energía Eléctrica.
- e) Civil/Instrumentación: Arreglos de Cuarto de Control y Cuartos de Gabinetes de Electrónica.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones que surgen de la elaboración del trabajo son las siguientes:

- 1) La utilización de los instrumentos mecánicos, eléctricos, electrónicos y digitales en la industria, resultan indispensables para la correcta operación de las plantas de proceso. Su empleo facilita las operaciones productivas al realizar el trabajo requerido en un tiempo de ejecución y precisión tal, que llevan el manejo del proceso a niveles de operatividad que ninguna clase de operador humano podría llevar a cabo. Posibilita la instauración de mecanismos de transformación bastante efectivos al controlar las variables de operación dentro de los límites deseados, tanto para la implementación tecnológica del proceso y la calidad del producto final, como para las obvias e importantes razones de seguridad. Con lo cual, por las razones antes expuestas, la rentabilidad del proceso se incrementa sensiblemente.
- 2) En la instrumentación industrial todos los instrumentos en si, son imprescindibles para el control de procesos, pues aunque económicamente existan grandes diferencias entre los sistemas de control distribuido y los sensores en campo, ya sea que solamente sensen o que hagan esto y a la vez transmitan, o que envíen una señal de alguna condición en el proceso; todo funciona como un conjunto de control, que es caracterizado por la integración de una serie de subsistemas de control llámese lazos o bucles de control cerrados, abiertos, alarmas, interruptores, etc; y desde luego los dispositivos electrónicos encaminados a manejar enclavamientos lógicos denominados controladores lógicos programables, integrado, como se había mencionado, en un sistema de control distribuido. Por lo que para efectos de operatividad de procesos, es más importante la funcionalidad de este conjunto integral, que el costo de cualquiera de sus partes; pues ello afectará directamente la rentabilidad del proceso.
- 3) Para llegar a la aplicación de los instrumentos industriales es necesario primero comprender su funcionamiento y su propósito de ser, y en esto debe puntualizarse que todos los instrumentos son diferentes, aun en los de su mismo tipo. Por tal motivo, la selección y la especificación de los mismos, debe realizarse cuidadosamente, considerando cuales son las necesidades del proceso y con que se debe cumplir en el mismo. En esto puede observarse fácilmente que un instrumento o sistema de control, conforme su diseño implique una mayor sofisticación, mayor cantidad de componentes y mayor capacidad de realización de trabajos o tareas, de igual forma, tanto más será su complejidad, por lo que el cuidado en su especificación técnica también debe de incrementarse.
- 4) La instrumentación ha evolucionado y seguirá evolucionando conforme al desarrollo tecnológico, y esto a hecho posible que las teorías de control también evolucionen y puedan ver reflejada su aplicación en la instrumentación industrial, desde el empleo de la simple señal neumática, hasta la actual era electrónica y la señal digital. Las teorías de control nacen de la necesidad de implementar mecanismos que manipulen correctamente las variables de proceso y que puedan gobernar satisfactoriamente alguno con ciertas características, no pretenden ser únicas, inmutables, ni aplicables a todos los casos, de hecho permanecen en constante evolución. Pues aunque los procesos son esencialmente parecidos entre sí, todos son diferentes en cuanto a niveles de operatividad y ello involucra la estabilidad, que dependerá de las filosofías de operación y el diseño y funcionalidad de los sistemas de control.
- 5) No existe una filosofía de operación universal, pues no existe ningún instrumento o sistema de control de diseño único que funcione correctamente para todas las aplicaciones. El diseño cambia y se adapta a las necesidades del proceso. Por ello no es correcto tratar de establecer si una clase de control es mejor con respecto a la otra, o un instrumento con respecto a otro; si no que debe de conocerse la aplicación de cada uno de ellos y cubrir con lo que el proceso demande. Ningún sistema de control o instrumento es efectivo si no es correctamente empleado.

- 6) La instrumentación industrial es una aplicación de la ingeniería para la cual, desde sus inicios, no fue perfectamente establecido la especialidad del ingeniero que podría ejercerla. Al principio fue el ingeniero de proceso el encargado de llevarla a cabo, con el transcurrir del tiempo, a este le siguieron el ingeniero mecánico, mecánico-electricista, eléctrico, electrónico, industrial y en muy pocos casos el ingeniero químico. En la actualidad, el ingeniero químico ha logrado incursionar mayormente y de forma muy satisfactoria en la aplicación de la instrumentación industrial, ya que este posee una formación que le proporciona un panorama y un conocimiento de los procesos tal, que le permite comprender fácilmente las necesidades del mismo. La instrumentación industrial es ya ahora, definitivamente, un área más donde puede desenvolverse adecuadamente un ingeniero químico.
- 7) En nuestros días, no es concebible la existencia de ninguna planta de producción sin la utilización de la instrumentación, las exigencias en la calidad del producto, en las condiciones críticas del proceso y las demandas de un mercado cada vez más competitivo que fuerzan procesos más rentables, elevan también las exigencias en los procesos, los cuales solamente pueden ser correctamente controlados a través de la instrumentación. Los instrumentos industriales son vitales para la operación de plantas de proceso. Esto hace que necesariamente cualquier gente involucrada en los procesos industriales, deba poseer conocimientos en instrumentación. Por su parte, el diseño en instrumentación industrial, es una actividad multidisciplinaria, que se lleva a buen efecto en conjunción con otras áreas, como son proceso, tuberías, mecánico, eléctrico, civil, procura y programación. Las actividades que el departamento de instrumentación y control efectúa, sea en diseño o en construcción, requieren de la participación en conjunto con cada una de estas áreas.

## Anexo A

Como es bien conocido, el proceso básico al que se somete el petróleo crudo en una refinería consiste en separarlo en sus principales componentes por medio de la destilación fraccionada. De las corrientes de salida de las torres fraccionadoras se obtienen productos tales como el nafta, queroseno, gasolina, gasóleo, residuos atmosféricos, residuos de vacío, etc., que poseen grandes propiedades energéticas, pero que presentan el riesgo constante de incendio y consecuente explosión debido a su capacidad combustible.

Es por ello que en las filosofías de operación se trata de que los sistemas de control actúen correctamente y se evite a toda costa la presencia de alguna chispa o llama (tal es el caso de la seguridad intrínseca) que pudiera ocasionar un evento emergente indeseable o hasta un desastre. Pero si aun así llega a existir fuego y las líneas de operación se ven afectadas, lo que se intenta es controlar los flujos de los combustibles y cerrar la alimentación de estas líneas para aumentar las probabilidades de que los sistemas contraincendio operen y se pueda controlar la situación. Ante tales circunstancias, la situación es de emergencia, y es precisamente como se les conoce a las válvulas diseñadas para controlar el flujo a los tanques acumuladores o a otras partes del proceso que llevan alguno de los componentes que requieren una segunda etapa de destilación.

Sin importar que el proceso de destilación se efectúe en una etapa, dos, atmosférico, a presión o al vacío, el peligro es permanente en cualquier caso. Por tal razón es que normalmente se instalan válvulas de corte denominadas de “emergencia” en las líneas de salida de las torres fraccionadoras. Aunque la principal función de estas válvulas es modular el flujo, su diseño es especial, pues están construidas para que puedan operar aun bajo circunstancias de fuego expuesto a temperatura de 2000 °F (1093.7 °C) durante 20 minutos, con cero fuga; por lo que puede apreciarse que en realidad su verdadera función es otra.

Un caso particular en donde típicamente se instala este tipo de válvulas es en la obtención del gasóleo o gasoil. Este producto es una mezcla de hidrocarburos obtenida por destilación fraccionada del petróleo crudo. Se emplea como combustible para motores de compresión (diesel) y para la calefacción doméstica.

El gasoil ligero es la fracción que hierve entre 230 y 300 °C y contiene hidrocarburos con cadenas carbonadas de entre 13 y 17 átomos de carbono. El gasoil pesado es la fracción que hierve entre 300 y 400 °C y contiene hidrocarburos de hasta 25 átomos de carbono.

En el proceso, en la mayoría de los casos, el gasoil ligero pasa directamente a los depósitos de almacenamiento, mientras que parte del gasoil más pesado pasa a la unidad de craqueo catalítico, donde se descompone en gasolina y gas.

Consideremos el caso en donde se hacen pasar 95.3 m<sup>3</sup>/hr (flujo max 102.5 m<sup>3</sup>/hr/flujo mínimo 83.9 m<sup>3</sup>/hr) de gasóleo pesado a una unidad agotadora V-305, a través de una línea con identificación 8”P2413-A10A, a una presión de operación de 1.7 Kg/cm<sup>2</sup> (max 2.0 Kg/cm<sup>2</sup>). La temperatura máxima de operación es de 331 °C y la mínima de 325 °C. La gravedad específica del gasóleo pesado es de 0.731, su peso molecular es de 324.74 gr/cm<sup>3</sup> y su viscosidad es de 0.4415 cp.

A continuación se detalla la especificación general y la hoja de datos para la válvula de emergencia HXV-305.

## Especificación General

1. La válvula debe de ser de un cuarto de vuelta (Turn-Quarter) para operación de corte y con construcción del cuerpo a prueba de fuego (Fire Safe).
2. Debe de proporcionar cierre hermético (cero fuga), en situaciones de exposición a fuego tanto parcial como totalmente en cumplimiento con los estándares API-607 y API-598.
3. El tamaño del cuerpo indicado de la válvula es el de la línea y debe ser suministrado por el proveedor, verificando que la caída de presión a 100% de apertura cumpla con lo requerido.
4. El material de los empaques de la válvula debe ser grafitado, no son aceptables materiales a partir de asbesto. No deben de usarse juntas de asbesto en ninguna parte de la válvula.
5. El fabricante debe cotizar el tipo de bonete adecuado para las condiciones de temperatura de operación especificadas, debiendo considerar bonete de extensión para temperaturas mayores a 453 °F (234 °C) y para temperaturas menores a 32 °F (0 °C).
6. Las válvulas deben ser con conexiones bridadas y cumplir con los requerimientos del estándar ANSI B16.5.
7. El actuador debe de ser del tipo pistón neumático de doble acción para válvulas de cuarto de vuelta, con conectores y tubing de acero inoxidable, el cual debe ser protegido contra el fuego en conjunto con todos sus accesorios. En caso de usar cubierta contra fuego en el actuador esta debe ser removible.
8. El actuador debe ser adecuado para montaje en la parte superior de la válvula, con volante lateral.
9. El actuador debe ser presurizado tanto para carrera de apertura como de cierre y debe ser diseñado para impartir un torque de salida de al menos 1 ½ veces el punto medio de rotación (45° de rotación) salida de torque a inicio y final del pistón (0° y 90° de rotación).
10. El actuador debe tener ajuste externo independiente de paro de carrera de suficiente tamaño para absorber la salida de torque máximo. Los ajustes de carrera deben ser adecuados para permitir una completa apertura y cierre de la válvula.
11. El conjunto de válvula/actuador debe ser capaz de operar cuando se encuentre expuesto a fuego de hasta 2000 °F mínimo por un lapso de 20 minutos. Por lo que la válvula/actuador, las líneas de suministro eléctrico y de aire deben ser protegidos contra fuego. El aislamiento debe ser resistente a radiaciones solares y el medio ambiente, también debe soportar el chorro de agua de las mangueras contraincendio.
12. La construcción del actuador incluyendo todas las características y componentes requeridos para la operación segura al fuego debe ser de autocontenido en una unidad sencilla.
13. La construcción de todos los materiales seleccionados debe ser resistente al choque térmico y esfuerzos por alta temperatura para soportar apropiadamente una situación de fuego.



14. La válvula debe cerrar en un tiempo máximo de 10 segundos, a menos que se especifique diferente, por lo que debe suministrarse un control de velocidades para prevenir velocidades excesivas.
15. Se deben proporcionar dos (2) interruptores de límite (válvula abierta/cerrada), con contactos doble polo doble tiro, con suministro de 24 vcd, con caja adecuada para seguridad intrínseca para áreas Clase 1, Div 1, Grupos A, B y C, con conexión al conduit de ¾" NPTH.
16. La válvula de emergencia debe suministrarse con una válvula de solenoide de acuerdo a la siguiente especificación:
  - a) Tipo 4 vías normalmente desenergizada.
  - b) Material del cuerpo en acero inoxidable.
  - c) Material del disco y sello en buna "N".
  - d) Partes en contacto con el fluido en buna "N".
  - e) El tamaño de las conexiones debe de ser de ¼" NPTF.
  - f) La caja de la válvula solenoide debe ser adecuada para sistemas con seguridad intrínseca en áreas Clase 1, Div 1, Grupos A, B y C.
  - g) El suministro de energía eléctrica debe de ser de 24 vcd.
17. El actuador debe contar con placa de identificación con la siguiente información:
  - Número de serie
  - Modelo del fabricante
  - Torque en Lb-Ft
18. La válvula de emergencia debe suministrarse con placa metálica permanentemente asegurada (no se aceptan uniones con adhesivos) con la siguiente información:
  - Identificación y servicio
  - Nombre del fabricante y modelo
  - Material de los internos
  - Rango de operación

## Hoja de Datos

### General

|                           |                                       |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Número de identificación: | HXV-305.                              |
| Servicio:                 | Corte gasóleo pesado a agotador V-305 |
| Número de la línea:       | 8”P2413-A10A                          |
| Tamaño de la línea:       | 8”                                    |

### Cuerpo

|                                |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Tipo:                          | Mariposa                    |
| Tamaño:                        | 8”                          |
| Material del cuerpo:           | ASTM A217                   |
| Conexiones:                    | 150 # R.F.                  |
| Material del sello junta:      | AI-316                      |
| Material del asiento:          | AI-316                      |
| Material del disco:            | AI-316                      |
| Tipo de bonete:                | Aletas de radiación         |
| Tipo de cierre API-598:        | Cero Fuga                   |
| Material del vástago o flecha: | AI-316                      |
| Empaque del vástago o flecha:  | Grafito                     |
| Operación de la válvula:       | Cierre hermético            |
| Torque de la válvula:          | Por fabricante              |
| Velocidad de cierre:           | Cierre total en 10 segundos |
| Lubricante:                    | Por fabricante              |

### Actuador

|  |                     |
|--|---------------------|
| Tipo de actuador:                          | Pistón doble acción |
| Posición a falla:                          | Última posición     |
| Tamaño:                                    | Por fabricante      |
| Volante/Orientación:                       | Si/Lateral          |
| Mínima/máxima presión requerida (psig):    | Por fabricante      |
| Presión Sum. Aire Disponible (psig):       | 60                  |
| Min/Máx presión de aire disponible (psig): | 40/100              |

### Accesorios

|                               |               |
|-------------------------------|---------------|
| Filtro regulador:             | Si            |
| Manómetro de suministro:      | Si            |
| Interruptor límite:           | Si            |
| Tipo/Cantidad:                | Leva/2        |
| Contactos/Punto de actuación: | DPDT/2        |
| Válvula solenoide de 4 vías:  | Si            |
| Reposición/Suministro:        | Manual/24 VCD |

## Condiciones de operación

|                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| Fluido:                 | Gasóleo pesado            |
| Flujo normal:           | 95.3 m <sup>3</sup> /hr   |
| Flujo mínimo:           | 83.9 m <sup>3</sup> /hr   |
| Flujo máximo:           | 102.5 m <sup>3</sup> /hr  |
| Presión normal entrada: | 1.7 Kg/cm <sup>2</sup>    |
| Presión máxima entrada: | 2.0 Kg/cm <sup>2</sup>    |
| Temperatura máxima:     | 325 °C                    |
| Temperatura mínima:     | 331 °C                    |
| Gravedad específica:    | 0.731                     |
| Peso molecular:         | 324.74 gr/cm <sup>3</sup> |
| Viscosidad:             | 0.4415 cp                 |

## Marcas y Modelos

|         |               |
|---------|---------------|
| Marca:  | Por proveedor |
| Modelo: | Por proveedor |

## Notas

El actuador debe contar con placa de identificación con la siguiente información:

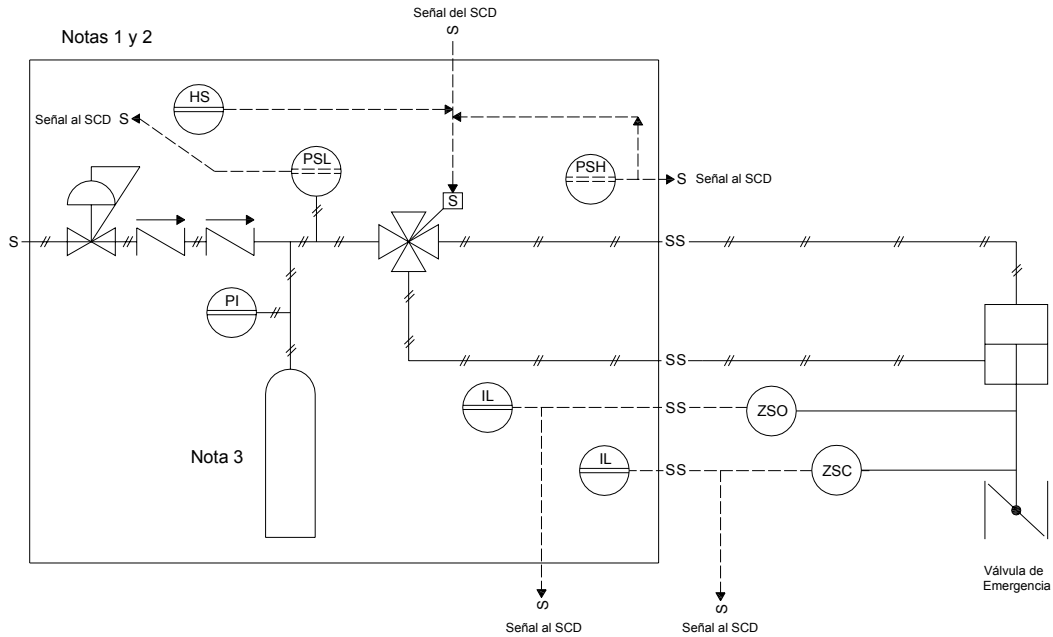
- Número de serie
- Modelo del fabricante
- Torque en Lb-Ft

La válvula de emergencia debe suministrarse con placa metálica permanentemente asegurada (no se aceptan uniones con adhesivos) con la siguiente información:

- Identificación y servicio
- Nombre del fabricante y modelo
- Material de los internos
- Rango de operación

La filosofía de operación en diseños de este tipo considera la instalación de una operación remota (una por cada válvula) para la acción de esta clase de válvulas tal como se muestra a continuación:

### Estación de Operación Remota



Simbología:

Montaje en panel frontal accesible al operador

Montado atrás de panel no accesible al operador

Nota 1: Es responsabilidad del proveedor suministrar una estación de operación remota con la instrumentación mostrada en la figura anterior.

Nota 2: La estación de operación remota deberá localizarse a 15 metros (horizontalmente) del equipo que protege.

Nota 3: El cilindro proporcionado deberá tener la capacidad suficiente para efectuar dos cierres de la válvula de emergencia.

## GLOSARIO

**Actuador.-** Dispositivo cuyo propósito es el de suministrar la fuerza o energía necesaria para mover una válvula a través de todo su rango.

**Alarma.-** Es un dispositivo que indica la existencia de alguna condición anormal mediante una señal audible y/o visible emitida para atraer la atención.

**Alcance (span).-** Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. Ejemplo: en el campo de 100 a 300 °C vale 200 °C.

**Amplificador.-** Instrumento cuya señal de salida equivale a la entrada incrementada y que se alimenta de una fuente distinta de la señal de entrada.

**Amplificador operacional.-** Amplificador de c.c. de alta ganancia que constituye la base de los controladores electrónicos.

**Atrás del Tablero.-** Es un término que se aplica cuando un instrumento:

- (a) Se encuentra dentro del área que contiene el tablero de instrumentos.
- (b) Está dentro o atrás del tablero o no es accesible al operador para su uso normal.
- (c) No es designado como local.

**Automatización.-** Es una parte de la instrumentación que cubre las funciones de supervisión, regulación o control del sistema.

**Banda proporcional.-** Porcentaje de variación de la variable controlada necesaria para provocar una carrera completa del elemento final de control. Es el recíproco de la ganancia.

**Bias o polarización.-** Excitación aplicada a cualquier instrumento para determinar su punto de trabajo.

**Bit.-** Unidad de información o dígito binario.

**Bucle abierto de control.-** Es el camino que sigue la señal sin realimentación.

**Bucle cerrado de control.-** Camino que sigue la señal desde el controlador hacia la válvula, al proceso y realimentándose a través del transmisor hacia un punto de suma con el punto de consigna.

**Campo de medida (range).-** Conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos. Ejemplo: -25 a 100 °C, 0-50 kg/cm<sup>2</sup>.

**Campo de medida con elevación de cero.-** Campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es mayor que el valor inferior del campo. Ejemplo: -40 a 120 °C, -100 a 0 °C.

**Campo de medida con supresión de cero.-** Campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es menor que el valor inferior del campo. Ejemplo: 20 a 100 °C, 10 a 100 l/h.

**Capacidad.-** Medida de la máxima cantidad de energía o de material que puede almacenarse dentro del recinto de un equipo.

**Capacitancia.-** Variación de la capacidad contenida por unidad de variación de una variable de referencia.

**Célula fotoeléctrica.-** Componente que varía de características cuando se expone a la luz.

**Circuito de instrumentación y control.-** Es la combinación de uno o más instrumentos interconectados, dispuestos para medir y/o controlar una variable de proceso.

**Compensación.-** Provisión de un aparato suplementario o de materiales especiales para contrarrestar fuentes conocidas de error.

**Conductividad.-** Recíproco de la resistividad.

**Consistencia.-** Propiedad que presenta un fluido de resistir los cambios permanentes de su forma al someterse a un esfuerzo cortante.

**Control anticipativo.-** Sistema de control en el que se miden una a más variables de entrada al proceso que pueden perturbar la variable controlada y se toma una acción de corrección en la variable manipulada a través del elemento final de control. Este tipo de control puede combinarse con otros tipos de control, usualmente con el de realimentación para reducir las desviaciones de la variable controlada.

**Control avanzado.-** Técnicas que se apartan del control convencional PID y que aplican en procesos muy complejos, no lineales, con retardos importantes y acoplamiento entre las variables. Se emplean en general para mejorar el rendimiento económico del proceso.

**Control de realimentación.-** Sistema de control en el que se compara una variable medida con un valor deseado (punto de consigna) y la señal de error obtenida actúa de tal modo que reduce la magnitud de este error.

**Control de relación.-** Sistema de control en el que una variable de proceso es controlada en una razón dada con relación a otra variable.

**Control derivativo.-** Forma de control en la que existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control.

**Control digital directo (DDC).-** Sistema de control que realiza una computadora y establece directamente las señales que van a los elementos finales de control.

**Control distribuido.-** Control digital realizado “distribuyendo” el riesgo del control único por ordenador en varios controladores o tarjetas de control del tipo universal con algoritmos de control seleccionables por software. Los transmisores electrónicos en campo, las tarjetas de control y la estación del operador están unidos mediante una vía de comunicaciones en forma de cable coaxial y cada componente se ubica en el lugar más idóneo de la planta.

**Control en cascada.-** Sistema de control en el que la señal de salida de un controlador (primario) es el punto de consigna de otro controlador (secundario).

**Control flotante.-** Forma de control en el que el elemento final se mueve a una velocidad única independientemente de la desviación.

**Control integral.-** Forma de control en el que el elemento final se mueve de acuerdo con una función integral en el tiempo de la variable controlada.

**Control proporcional.-** Forma de control en la que existe una relación lineal entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control.

**Control selectivo.-** Sistema de control en el que se selecciona automáticamente uno de varios controladores según el valor de sus variables de entrada, generalmente con el objeto de evitar daños en el proceso o en el producto.

**Control supervisor.-** Sistema de control en el cual los bucles de control operan independientemente sujetos a acciones de corrección intermitente a través de sus puntos de consigna.

**Control todo-nada.-** Forma de control en que el elemento final de control adopta dos posiciones fijas.

**Controlador.-** Es un dispositivo que produce una señal de salida, la cual puede ser variada para mantener la variable en un valor específico o dentro de límites específicos, o que puede alterar la variable de una manera específica.

**Controlador de acción directa.-** Controlador en el que la señal de salida aumenta (o disminuye) al aumentar (o disminuir) la señal de entrada.

**Controlador de acción inversa.-** Controlador en el que la señal de salida disminuye (o aumenta) al aumentar (o disminuir) la señal de entrada.

**Controlador lógico programable.-** Instrumento basado en microordenador que realiza funciones de secuencia y enclavamiento de circuitos y, como complemento funciones de PID.

**Convertidor.-** Es un dispositivo que recibe información en forma de señal estándar de un instrumento, altera la forma de la información y envía una señal de salida estándar resultante. Un convertidor es una forma especial de relevador. El convertidor es también designado como un transductor y aunque transductor es un término completamente general y es usado específicamente para conversión de señales, no se recomienda su uso para este propósito.

**Corriente parásita.-** Corriente inducida en el cuerpo de una masa conductora por variación de flujo magnético.

**Cuerpo negro.-** Cuerpo que absorbe toda la energía radiante que recibe. Experimentalmente es un recinto cerrado provisto de una pequeña abertura.

**Deriva.-** Variación de la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Viene expresada en tanto por ciento del alcance. Ejemplo: 0.2% de 100 es igual a  $\pm 0.2$  °C.

**Diafragma.-** Elemento sensible formado por una membrana colocada entre dos volúmenes. La membrana es deformada por la presión diferencial que le es aplicada.

**Elemento final de control.-** Es el dispositivo que cambia directamente el valor de la variable manipulada de un circuito de control.

**Elemento primario.-** La parte de un circuito o de un instrumento que detecta primeramente el valor de una variable de proceso y asume un estado predeterminado generando una señal de salida correspondiente a la detección. El elemento primario puede estar separado o integrado con otro elemento funcional del circuito. El elemento primario es también conocido como detector o sensor.

**Elevación de cero.-** Cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del campo. Ejemplo: en el campo  $-25$  a  $100$  °C es  $25$  °C o bien  $(25/125) \times 100 = 20\%$ .

**Error.-** Diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.

**Error de cero.-** Desplazamiento constante de todos los valores de salida del instrumento con relación a la recta que relaciona la variable de entrada con la salida de un instrumento ideal sin error.

**Estabilidad.-** Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.

**Estación de carga manual.-** Dispositivo que tiene una salida ajustable manualmente y que es usada para accionar uno o más dispositivos remotos. Aunque dichos dispositivos remotos pueden ser elementos controladores, la estación no se utiliza como unidad selectora de modos de control manuales y automáticos en un circuito.

**Estación de control.-** Una estación de carga manual que también tiene un interruptor selector de modos de control manual-automático de un circuito de control. También se le conoce como estación manual-automática o estación auto-selector.

**Exactitud.-** Es la cualidad de un instrumento de medida que tiende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida.

**Fiabilidad.-** Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de los límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.

**Fluido o agente de control.-** Es el proceso, energía o material correspondiente a la variable manipulada.

**Frecuencia.-** Número de ciclos por unidad de tiempo. Es el recíproco del periodo.

**Función.-** Propósito o acción desarrollada por un dispositivo.

**Galga extensiométrica.-** Dispositivo que convierte la variable medida en una variación de resistencia debida a la deformación en dos o en los cuatro brazos de un puente de Wheatstone.

**Galvanómetro.-** Instrumento que mide una pequeña corriente eléctrica a partir de fuerzas electromagnéticas o electrodinámicas que se traducen en un movimiento mecánico.

**Ganancia.-** Es la relación de magnitudes entre la señal de salida resultante y la señal de entrada de excitación.



**Histéresis.-** Es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos ascendente y descendente. Se expresa en tanto por ciento de alcance de la medida. Ejemplo: si un termómetro de 0 a 100% , en los 40 °C la aguja marca 39.9 al subir la temperatura desde 0, e indica 40.1 al bajar la temperatura desde 100 °C, el valor de la histéresis para el valor de 40 °C de la variable medida será:  $[(40.1-39.9)/(100-0)]100 = \pm 0.2\%$ .

**Identificación.-** Es la secuencia de letras o dígitos o ambos, usados para designar un instrumento particular o un circuito.

**Interruptor.-** Es un dispositivo que conecta, desconecta o transfiere uno o más circuitos y no es designado como controlador, relevador o válvula de control.

**Instrumento.-** Cualquier aparato o dispositivo cuyo objeto es la medición detección, transmisión, registro, indicación, procesamiento y/o control de variables y/o señales.

**Instrumentación.-** Es la aplicación de los instrumentos.

**Local.-** La localización de un instrumento que no está ni frente ni atrás de un tablero. Los instrumentos locales están comúnmente en la vecindad de un elemento primario o un elemento final de control.

**Luz Piloto.-** Es una luz que indica un cierto número de condiciones normales existentes en un sistema o en un dispositivo. Esta es diferente a una luz de alarma, la cual indica una condición anormal. La luz piloto, es también conocida como luz monitor.

**Medición.-** Es la determinación de la existencia o magnitud de una variable. Los instrumentos de medición incluyen todos los dispositivos usados directa o indirectamente para este propósito.

**Montado en Tablero.-** Término aplicado a un instrumento que es montado en un tablero y que es accesible al operador para su uso normal.

**Multiplexado.-** Transmisión simultánea de dos o más señales a través de un canal único. Los dos métodos básicos de multiplexado implican la separación de señales por división del tiempo o de la frecuencia.

**Offset.-** Desviación permanente que existe en el régimen de control proporcional cuando el punto de consigna esta fijo.

**Piezolectricidad.-** Propiedad que tiene algunos cristales naturales o artificiales de presentar un momento de dipolo eléctrico cuando se les deforma. Este efecto es reversible.

**Potenciómetro.-** Divisor de tensión ajustable formado por un reóstato de tres terminales, uno de ellos móvil. Este es un instrumento que mide una fuerza electromotriz desconocida mediante su compensación contra una diferencia de potencial conocida producida en un circuito por corrientes conocidas.

**Precisión.-** Es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento, esto es un intervalo donde es admisible que se sitúe la magnitud de la medida. Esta suele expresarse ya sea en tanto por ciento de una lectura con una precisión determinada o en tanto por ciento de unidades de la variable medida directa. Ejemplo: para una lectura de 150 °C y una precisión de  $\pm 0.5\%$  el valor real de la temperatura estará comprendido dentro de los 149 y 151 °C.

**Proceso.-** Cualquier operación o secuencia de operaciones que involucran un estado de cambio de energía, de composición, de dimensión o de otra forma que pueda ser definida con respecto a un dato. El término proceso en instrumentación suele ser aplicado a todas las variables que nos sean señales de instrumentos.

**Programador.-** Instrumento que ajusta su propio punto de consigna o bien el punto de consigna de otro instrumento controlador de acuerdo con un programa prefijado.

**Puente.-** Término empleado para designar la configuración eléctrica general de ciertos elementos transductores. Es también una abreviación de puente de Wheatstone.

**Punto de Consigna.-** Variable de entrada en el controlador que fija el valor deseado de la variable controlada. Es el valor que se desea que tenga la variable regulada.

**Punto de prueba.-** Una conexión a proceso en la cual un instrumento no está conectado permanentemente, pero cuya intención es que sirva como conexión temporal, intermitente o futura para dicho instrumento.

**Radiación.-** Emisión y propagación de energía en forma de ondas a través del espacio o a través de un material.

**Radiactividad.-** Fenómeno de transformación espontánea de un núcleo atómico.

**Rayos gamma.-** Quantum de radiación electromagnética emitida por un núcleo atómico como resultado de la transición entre dos niveles de energía.

**Realimentación.-** Parte de la señal de salida de un sistema que vuelve a la entrada.

**Rango.-** Región entre límites dentro de los cuales una cantidad es medida, recibida o transmitida; generalmente es expresada por un valor bajo y uno alto.

**Relevador.-** Dispositivo que recibe información en forma de señal de uno o más instrumentos y modifica esta información si se requiere, emite una o más señales de salida resultantes y no es designado como controlador, interruptor, ni otra forma. El término relevador es también aplicado a un interruptor eléctrico que es accionado remotamente por una señal eléctrica.

**Relevador Computador.-** Es un relevador que lleva a cabo uno o más cálculos o funciones lógicas o ambas, y envía una o más señales de salida resultantes.

**Repetibilidad.-** Capacidad de reproducción de los valores de salida del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación recorriendo todo el campo. Se expresa en tanto por ciento del alcance. Ejemplo:  $\pm 0.1\%$  de 150 =  $\pm 0.15$  °C.

**Resolución.-** El cambio más pequeño en la variable de proceso que produce un cambio detectable de señal. Expresado en tanto por ciento de la salida de toda la escala de medida.

**Resolución infinita.-** Capacidad de proporcionar una señal de salida progresiva y continua en todo el campo de trabajo del instrumento.

**Ruido.-** Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.

**Seguridad aumentada.-** Sistema de seguridad que adopta medidas para impedir la existencia de cualquier tipo de arco o chispa que pueda provocar la ignición de una mezcla explosiva.

**Seguridad intrínseca.-** Sistema de seguridad para atmósferas peligrosas que limita la capacidad de un circuito para producir chispas eléctricas que tengan la suficiente energía para provocar la ignición de la mezcla explosiva. Se emplean en esta técnica las barreras Zener y la Galvánicas.

**Sensibilidad.-** Razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona después de haberse alcanzado el estado de reposo. Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida. Ejemplo:  $\pm 0.05\%$  de 200 =  $\pm 0.1$  °C (campo de 100 a 300 °C).

**Señal.-** Salida o información que emana de un instrumento. Información representativa de un valor cuantificado.

**Señal de salida.-** Señal producida por un instrumento que es función de la variable medida.

**Señal de salida Analógica.-** Señal de salida del instrumento que es una función continua de la variable medida.

**Señal de salida Digital.-** Señal de salida del instrumento que representa la magnitud de la variable medida en forma de una serie de cantidades discretas codificadas en un sistema de notación. Se distingue de la señal de salida analógica.

**Supresión de Cero.-** Cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Ejemplo: en un campo de 10 a 100 l/h es 10 l/h, o  $(10/90) \times 100 = 11.1\%$ .

**Tablero.-** Es una estructura metálica diseñada para sostener un grupo de instrumentos que controlen un sistema de proceso, que registren e indiquen sus funciones fundamentales. El tablero puede estar formado por una o más secciones, cubículos, mesas o bastidores.

**Tablero Local.-** Un tablero que no es el central o principal. Los tableros locales están comúnmente en la vecindad de sub-áreas.

**Temperatura de Servicio.-** Campo de temperaturas en el cual se espera que trabaje el instrumento dentro de límites de error especificados.

**Termistor.-** Resistencia cuyo valor varía con la temperatura en una forma definida deseada.

**Termopar.-** Par de conductores de materiales distintos unidos entre sí que generan una fuerza electromotriz cuando las dos uniones están a distintas temperaturas.

**Termopila.-** Grupo de termopares conectados en serie y utilizados para medir la potencia de radiaciones.

**Termoresistencia.-** Hilo de material cuya resistencia varía con la temperatura, generalmente en forma lineal.

**Tiempo de acción derivada.-** Equivale al tiempo en minutos con que la acción derivada se anticipa al efecto de la acción proporcional en el elemento final de control.

**Tiempo de acción integral.-** Equivale al tiempo en minutos por repetición de la acción proporcional. También se suele expresar como el recíproco de repeticiones por minuto.

**Tiempo Muerto.-** Tiempo entre el inicio de un cambio de señal de entrada y el inicio de la respuesta resultante. No confundirlo con banda diferencial o banda muerta o zona muerta.

**Transductor.-** Término general para un dispositivo que recibe información en forma de una o más cantidades físicas, modifica la información o su forma, si se requiere y envía una señal de salida resultante. Dependiendo de su aplicación, el transductor puede ser un elemento primario, un transmisor, un convertidor u otro dispositivo.

**Transmisor.-** Dispositivo que detecta una variable de proceso mediante un elemento primario y produce a la vez una señal de salida cuya magnitud varía solamente como una función predeterminada de la variable de proceso. El elemento primario puede estar o no integrado con el transmisor.

**Transmisor inteligente.-** Transmisor que tiene incorporada funciones adicionales tales como compensación de no linealidades del sensor, calibración innecesaria, cambio fácil del campo de medida mediante un intercomunicador.

**Unidad de medida.-** La unión de medida de un termopar es la unión que esta a la temperatura que desea medirse.

**Unión de referencia.-** Es la unión que esta a la temperatura conocida o de referencia en un termopar.

**Válvula de Control.-** Es un dispositivo que manipula el flujo de una o más corrientes de fluido. Su función es la de modular el flujo de un fluido del proceso de acuerdo a una señal usualmente generada por un controlador.

**Variable Controlada o Regulada.-** Dentro del bucle de control es la variable que se capta a través del transmisor y que origina una señal de realimentación.

**Variable Manipulada.-** Cantidad o condición del proceso variada por el elemento o elementos finales de control.

**Variable Medida.-** Cantidad, propiedad o condición física que es medible en un proceso (presión, flujo, nivel, etc).

**Vida útil de servicio.-** Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo o intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de tolerancias especificadas.

**Zona Muerta (Banda diferencial o muerta).-** Campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o señal de salida del instrumento. Se expresa en tanto por ciento de alcance de la medida. Ejemplo:  $\pm 0.1\%$  de 90 l/h =  $\pm 0.09$  l/h en un campo de 10 a 100 l/h.

## BIBLIOGRAFIA

- 📖 Boletín núm J-67D: Dynatrol-density-specific-gravity control, Automation Products Inc.
- 📖 Catalogo Beckman, model j, process pH analyzer.
- 📖 Catalogo Daniel Measurement and Control, Liquid Level Gases and Valves.
- 📖 Catalogo Endress+Hauser, Técnica de medición y automatización para toda la industria.
- 📖 Catalogo Grupo Pifusa medición de temperatura.
- 📖 Catalogo Honeywell AB-18: Water and Waste control Instrumentation for the practicing engineer.
- 📖 Catálogo de Productos Surex, instrumentos para la medición de Presión y Temperatura.
- 📖 Catalogo de Productos Wika, Pressure and Temperature.
- 📖 Control Valves for the Chemical Process Industries, Bill Fitzgerald, McGraw-Hill Inc.1995.
- 📖 Control Valve Selection and Sizing. L. R. Driskell 1983, Instrument Society of America.
- 📖 Developments in Process Gas Chromatography, F. D. Martin, Dow Chemical, USA, Instrumentation Technology, enero 1997.
- 📖 Electric final control elements by R. E. Fishburn, Honeywell, 1963.
- 📖 Fieldbus: How a worldwide standard will benefit the HPI, P.L. Early, Jr., & J. Miller, Hydrocarbon processing. Diciembre 1993, Vol. 72, No. 12.
- 📖 Flow Meter Engineering Handbook, C. F. Cusick, Honeywell: Automation-Industrial Division.
- 📖 Foxboro Technical Information 37-3a, Metric Signal Pressure range for pneumatic transmsion.
- 📖 Fundamentals of Industrial Instrumentation, Honeywell automation, catalogo G3-10 M. diciembre 1984.
- 📖 Handbook of Control Valves, 2<sup>da</sup> ed., 1997, Fischer Controls.
- 📖 Honeywell flame rod application, catalogo 50-8082, 6/67.
- 📖 Honeywell: Guía de detectores de llama por radiación, boletín 71-2904, junio 1990.
- 📖 Industrial Instrumentation Fundamentals, Austin E. Fribance, McGraw-Hill Book Company.
- 📖 Ingeniería de Proyecto, Howard F. Rase, Compañía Editorial Continental.
- 📖 Installation and use of Chromel-alumel thermocouples, Hoskins Manufacturing Company; Catalogo A. P. 15M-2/69.

- 📖 Instruction Manual 7300-7301 on SCR: Electronic Control Systems.
- 📖 Instrument Engineering Handbook, Bela G. Liptak, Chilton Book Company, 1985.
- 📖 Instrumentación Industrial, Antonio Creus, Marcombo, 6ta. Edición, 1997.
- 📖 Instrumentation in Industry, Harold E. Soisson, John Wiley and Sons.
- 📖 Instrumentation in the Processing Industries, Bela G. Liptak, Chilton Book Company, 1973.
- 📖 Instruments to measure and control slurries and viscous materials, Bela D. Liptak, Crawford & Russell Inc., Chemical Engineering, 13 febrero 1987.
- 📖 Mass Metering and Precision Volumetrics Abound in Flow Control S. J. Bailey. Control Engineering, marzo 1987.
- 📖 Manual de Instrumentación de Ingeniería Química, agosto 1983.
- 📖 Manual de Instrumentación para la Industria del Gas, Sedigas, 1994.
- 📖 Measuring level: A guide for CPI users, Sarah Parker, Fisher Rosemount, Chemical Engineering, mayo 1995.
- 📖 Measuring Process Variables, Dennis E. Zientara, Taylor Instruments Process Control Div., Sybron Corp., Chemical Engineering, 11 septiembre 1992.
- 📖 Measurement Systems, Application and Design, Ernest O. Doebelin, McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- 📖 Medición de caudales en procesos industriales, J. Meyer, Endress + Hauser S.A., Automática e Instrumentación, no. 258, noviembre 1995.
- 📖 Norma ISA-S5.1-1984 Instrumentation Symbols and Identification.
- 📖 Norma ISA-S5.2-1976 Binary Logic Diagrams for Process Operation.
- 📖 Norma ISA-S5.3-1983 Graphics Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems.
- 📖 Norma 2.451.01 para Proyectos de Obras, I.M.P., Instrumentos y Dispositivos de Control, 2da. Edición 1991.
- 📖 Nuclear gages for density and level control, Snowden Rose y H. L. Cook, Jr. The Ohmart Corp., Chemical Engineering, 27 enero -1989.
- 📖 Nuclear radiation sees it all, Raúl Brenner. Chemical Engineering, agosto 1994.
- 📖 Parallel operation from one thermocouple, vol. 17, núm. 4, 1984, by Thomas J. Glaggett, Instrumentation Magazine, Honeywell.

- 📖 Pneumatic Transmission Distances, especificación EN31-0053 Honeywell Application Data.
- 📖 Pressure Measurement by C. F. Cusick, Honeywell Instrumentation Magazine.
- 📖 Process Instruments and Control Handbook, Douglas M. Considine, McGraw-Hill Book Company, 3ra. Edición, 1985.
- 📖 Process Measurement and control terminology, SAMA 1970, Standar PMC20-2-1970.
- 📖 Principles of Automatic Process Control, 1968, by Instrument society of America.
- 📖 Principles and Practice of Flow Meter Engineering, L. K. Spink. The Foxboro Company.
- 📖 Rotary Actuators for quarter - turn valves, Vaughn R. Anderson, Chemical Engineering. agosto 1988.
- 📖 Smart Instrumentation, Cecil I. Smith, Chemical Engineering, mayo de 1985.
- 📖 Standard and Practices for Instrumentation, ISA 1988.
- 📖 Temperature measurement and sensor selection, T. J. Claggett y R.W. Worrall, volumen; 20, núm. 4, Instrumentation Magazine Honeywell.
- 📖 Ultrasonic Instruments for Level and Flow, B. G. Liptak, Crawford & Russell, R. K. Kaminski, Instrumentation Technology, septiembre 1994.