



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**MANUAL DE PRÁCTICAS DEL SIMULADOR (UNIDAD DE
CONTROL) DE LA NAVE 1000 DE INGENIERIA QUIMICA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

PRESENTAN:

**EMBARCADERO GARCIA LUIS ALBERTO
TORREZ CUANDON DIEGO**

ASESOR: ING. JESUS HERRERA MARTINEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

DEDICATORIAS y AGRADECIMIENTOS:

A Dios

Por el simple hecho de permitirme seguir con vida en esta etapa de mi vida con Salud y con el cariño de mi familia.

A mi Padre Jaime y a mi Madre Juana

Por su valioso apoyo moral y espiritual, por sus sabios consejos que me han ayudado a lo largo de toda mi vida pero sobre todo por su amor, cariño, comprensión y paciencia que me tuvieron.

A mis Hermanos Gustavo y Jaime

Por que siempre han estado conmigo apoyándome y he compartido con ellos los momentos mas especiales de nuestras vidas. Les agradezco todo y es un orgullo saber que cuento con ustedes.

A mi Madrina Margarita

Por que ha sido una segunda mama para mí ofreciéndome su amor.

A mi Padrino Gustavo

Por sus sabias palabras y consejos en momentos clave de mi vida.

A Guadalupe Nataly Cruz Martínez

"Quien diría que tu y yo estaríamos juntos de la mano". Por que contigo viví la mejor experiencia de mi vida, por tu amor y dulces palabras, por los consejos y tu confianza, te agradezco que siempre estés hay a pesar de mis errores.

A mis tíos(as) y primos(as) y Abuelos

Por ser una gran familia solidaria y cariñosa.

A mi Amigo Diego

Por que supo aceptarme tal como soy, logrando ser un gran apoyo para mí, compartiendo experiencias a lo largo de toda la carrera convirtiéndose en un hermano para mi y por su interés y apoyo en la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Jesús Herrera Martínez

Por que gracias a el fue posible concluir este trabajo, sobrepasando la barrera de asesor y profesor, convirtiéndose en un verdadero amigo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por brindarme la oportunidad de cursar y concluir la Carrera.

Mención honorífica a mis amigos los "Motos": Arturo, David, Martín y Roberto. Que a pesar de tener altibajos, nuestra amistad siempre fue, y lo será, de corazón. A mi Amiga Lulu. A pesar de que existen miles y miles de palabras nunca encontraría la forma de agradecerles a todos la gran ayuda que me han brindado. Solo les diré que prometo ejercer mi carrera con toda la honestidad del mundo, siempre respaldado por las personas que amo, de todo corazón:

GRACIAS

Luis Alberto

Agradecimientos

A Dios y a la vida por permitirme llegar a ser lo que soy y tener a las personas maravillosas que me rodean.

A mis Padres María Félix y Gilberto por darme la vida, ellos son la fuente de motivación su apoyo, amor y comprensión me hacen seguir adelante en las buenas y en las malas.

A mis Hermanos María del Rosario, Enrique, José Gpe y Jesús Torres Cuandon por soportarme y brindarme su apoyo y cariño incondicional.

A mis Tíos(a) y Primos(a) que de alguna forma me brindan su apoyo y se que cuento con ellos.

A mi amigo Luis Alberto que a lo largo del camino me brindo su amistad confianza incondicional los momentos buenos y malos y juntos realizamos este esfuerzo. A Martín, David, Roberto y Arturo que juntos vivimos alegrías tristezas y enojos. Por soportarme y aceptarme como soy siempre los recordare aunque estemos distanciados. A todos los compañeros de carrera que iniciamos con un mismo objetivo convertimos en Ingenieros Químicos

A Mi Asesor Ing. Jesús Herrera Martínez por brindarme su apoyo total en esta tesis por sus conocimiento y consejos, por su paciencia, disposición y dedicación.

A mis sinodales Dr. Ricardo Paramont, I.Q María Eugenia. M.C Gilberto y I.Q María Teresa por haber tenido la paciencia de revisar esta tesis y enriquecerla.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme abierto las puertas al conocimiento y formarme como profesional.

Me parece poco expresar con palabras todo mi agradamiento admiración y respeto.

A todos gracias por ayudarme y comprenderme los quiero!!!!!!!!!!!!!!

Diego

Índice

Prefacio.....	1
Objetivos.....	1
Introducción.....	2
Capítulo I Resumen de Teoría.....	3
1.1 Sistemas de control.....	3
1.2 Simbología y notaciones usados en instrumentación.....	4
1.3 Definición de variable.....	10
1.4 Clasificación de las variables.....	10
a. Variables térmicas.....	10
b. Variables de radiación.....	10
c. Variables de fuerza.....	10
d. Variables de velocidad.....	10
e. Variables de cantidad.....	10
f. Variables de tiempo.....	11
g. Variables geométricas.....	11
h. Variables de propiedades físicas.....	11
i. Variables de composición química.....	11
j. Variables eléctricas.....	11
1.5 Clasificación por señal de medición.....	11
a. Movimiento.....	12
b. Fuerza.....	12
c. Señales eléctricas.....	12
d. Señales de medición de tiempo modulado.....	12
1.6 Relación del instrumento y el control de procesos.....	13
1.7 Errores de medición.....	13
1.8 Definición de error.....	13
1.9 Tipos de medición.....	14
a. Comparación directa.....	14
b. Ajuste hasta la igualdad.....	14
c. Acción directa de algún sistema físico.....	14
1.10 Fuentes de error.....	14
a. Ruido en las mediciones.....	14
b. Tiempo de respuesta.....	14
c. Limitaciones de diseño.....	16
d. Errores de observación y de interpretación.....	16
1.11 Clasificación de los errores.....	16
a. Errores sistemáticos.....	16
b. Errores casuales.....	17
1.12 Exactitud del instrumento.....	18
1.13 Señales.....	18
1.14 Tipos de señales.....	19
1.15 Señal Analógica.....	19
1.16 Señal Discreta.....	19
1.17 Señal Eléctrica.....	19
1.18 Señal Neumática.....	19
1.19 Señal Hart.....	20
1.20 Transmisión de la señal.....	20
1.21 Unidad terminal remota (RTU).....	21
1.22 Unidad de lógica y procesamiento (PLC).....	21
1.23 Normas.....	21
a. Resumen Norma ISA-S5.1.....	21
b. Resumen Norma ISA-S5.2.....	39
c. Resumen Norma ISA-S5.3.....	39
1.24 Tipos de instrumentos.....	42

a. Según la función.	42
b. Según la variable de proceso.	43
c. Funcionamiento analógico y digital.	44
1.25 Los elementos de un instrumento.	44
1.26 Elementos activos y pasivos.	45
1.27 Transductores.	46
1.28 Conversores.	47
a. Conversores D/A.	48
b. Conversores A/D.	50
1.29 Válvulas de control de diafragma neumático.	50
1.30 Modos de control.	56

Capítulo II Variable Flujo.....64

2.1 Medición de flujo.	64
2.2 Factores que afectan el flujo de un fluido.	64
a. Velocidad del fluido.	64
b. Fricción del fluido en contacto con la tubería.	67
c. Viscosidad del fluido.	67
d. Densidad del fluido.	68
e. Efectos de la presión y de la temperatura del fluido.	69
2.3 Medidores de flujo diferenciales.	69
a. Placas orificio.	72
b. Tubo Venturi.	74
c. Tobera.	76
d. Tubo Pitot.	76
e. Medidor de impacto.	77
2.4 Medidores de flujo de desplazamiento positivo.	78
2.5 Medidores de flujo de área variable.	79
2.6 Medidores de flujo volumétricos.	80
2.7 Medidores de flujo másico.	86
a. Medidor térmico.	86
b. Medidores de flujo tipo Coriolis.	87

Capítulo III Variable Presión.....89

3.1 Principios básicos de la presión.	89
3.2 Tipos de instrumentos para medir presión.	90
a. Instrumentos mecánicos.	90
b. Instrumentos electromecánicos y electrónicos.	90
3.3 Descripción de los instrumentos de medir presión.	91
a. Columnas de líquido.	91
b. Instrumentos elásticos.	92
c. Instrumentos electrónicos.	94

Capítulo IV Variable Temperatura.101

4.1 Medición de temperatura.	101
4.2 Tipos de instrumentos para medir temperaturas.	101
a. Termómetros de bulbo.	101
b. Termómetros bimetalicos.	104
c. Termopares.	105
c.1 Leyes termoeléctricas.	102
c.2 Conversión de voltaje a temperatura.	107
c.3 Tipos de termopares.	109
c.4 Termopozos.	110
c.5 Instalación de termopares.	111
d. Termómetros de resistencia.	113
e. Termistores.	114
f. Pirómetros de radiación.	115

Capítulo V Variable Nivel.....	117
5.1 Medición de nivel.	117
5.2 Tipos de instrumentos para medir nivel.....	117
5.3 Métodos visuales para medición de nivel.	120
a. Tubos de vidrio.	120
b. Cintas graduadas.....	121
5.4 Flotadores.	121
5.5 Desplazadores.	123
5.6 Instrumentos de nivel de tipo hidrostático.	125
a. Aplicación de transmisores de nivel.	128
b. Otros métodos hidrostáticos.	129
5.7 Métodos electrónicos para medir nivel.	130
a. Sensores de nivel de tipo capacitivo.	130
b. Sensores de nivel de tipo conductivo.....	130
5.8 Métodos térmicos para medir nivel.	131
5.9 Sensores de nivel de tipo ultrasónico.	131
5.10 Sensores de nivel de tipo fotoeléctrico.	132
5.11 Sensores de nivel de tipo radioactivo.	132
5.12 Sensores de nivel de tipo microondas.....	133
Capítulo VI Practicas Propuestas.....	134
6.1 Descripción general.....	134
a. Circuito de Flujo.....	142
b. Circuito de control de Nivel.	142
c. Control de Presión.	143
d. Control de Temperatura.	143
e. Simulador de fallas.	143
f. Operación de controladores de Nivel y Flujo en cascada.....	144
g. Uso de Registradores.....	144
h. Modos de Control.....	145
6.2 Practicas.....	147
a. Practica de Nivel.....	147
b. Practica de Temperatura.....	149
c. Practica de Presión.....	151
d. Practica de flujo.....	153
Conclusiones.....	155
Bibliografía.....	156

Prefacio.

Redactar una tesis no es sencillo, lo es aun mas cuando se trata de un tema tan completo y complejo como lo es el control de procesos que día con día se vuelve mas sofisticado gracias a los avances en la tecnología que resulta necesario conocer para cada Ingeniero interesado en darle calidad al proceso que maneje.

Al realizar este trabajo se culmina con el gran esfuerzo realizado durante la estancia en la universidad y marca la línea entre el ser un alumno y convertirse en un Ingeniero que es el comienzo de una nueva etapa en nuestra vida y así adquirir todas las responsabilidades que conlleva el ser nombrado con ese calificativo.

Sinceramente deseamos que este libro sea de gran utilidad para las personas que estén interesadas en el área de instrumentación y control de procesos.

Es completamente una satisfacción agradecerle a el Ingeniero Jesús Herrera Martínez, por la gran ayuda brindada para la realización de este trabajo.

Objetivos:

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar prácticas en las cuales el alumno manipule un proceso real, como el que ofrece el Simulador (Unidad de Control), en el cual interactué de manera directa con equipos e instrumentos además de detectar, medir, transmitir controlar, registrar y cortar las principales variables mas importantes de cualquier proceso: Temperatura, Nivel, Flujo y Presión, y así capacitarse y ganar experiencia para su futura vida profesional.

Ofrecer al Estudiante de Ingeniería Química de manera sencilla y simplificada una recopilación información en el área de instrumentación y control de procesos, ya que es un tema extenso y por otro lado le sea útil a lo largo de su trayectoria en la carrera.

Introducción:

En el presente trabajo se muestra el material didáctico de la materia Instrumentación Industrial con los avances tecnológicos que están actualmente en el mercado en forma de dispositivos de medición, control, detección, transmisión, registro, alarma y paro. Estos dispositivos son empleados en todas las industrias de proceso, tanto continuos como por lotes, para mantener las especificaciones del producto dentro de los límites establecidos por las exigentes normas de calidad y seguridad vigentes. Lo cual servirá para determinar si el mismo va encaminado hacia donde deseamos, y de no ser así, podremos usar la instrumentación para actuar sobre algunos parámetros del sistema y proceder de forma correctiva.

El origen de este compendio de información radica en que la bibliografía actual de la materia no cubre en su totalidad todo el programa, es por lo que se pretende resumir y actualizar de la forma más breve el conocimiento básico que requieren los estudiantes de la licenciatura de Ingeniería Química.

Se pretende a través del trabajo mostrar el conocimiento básico elemental necesario para comprender los principios de trabajo de cualquier tecnología empleada para la medición.

El control automático de procesos se usa fundamentalmente porque reduce el costo de los procesos industriales, lo que compensa con creces la inversión en equipo de control así como la eliminación de errores que es otra contribución positiva del uso del control automático. La teoría de la instrumentación y el control de procesos así como la simbología utilizada en esta materia es necesario dominarla y entenderla para la correcta interpretación y diseño de los diagramas tubería e instrumentación y para entender el funcionamiento que realizaran los instrumentos en un circuito de control determinado, por lo que en los capítulos I, II, III, IV y V se resume la teoría de instrumentación y control que nos ayudara en lo antes mencionado y para después aplicarla a la unidad de control en las practicas que proponemos en el capitulo VI.

A menudo, la teoría de control, establecida desde un punto de vista general, presenta muy poca ayuda en la resolución de los problemas reales que se presentan en el control de un proceso industrial debido a la falta de experiencia de manejo de instrumentos y equipos reales.

El presente trabajo tiene como objetivo que el alumno se capacite en el área de instrumentación y control mediante el uso de un proceso real como el que ofrece la unidad de control además, que reafirme, y aplique conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y así ganar experiencia, familiarizarse con términos y equipos comúnmente usados en la industria, de cierta forma desarrollar un criterio a través de la experiencia de controlar un proceso real.

Otro de los fines que se persigue es conocer la gran importancia de medir, cuantificar, controlar, detectar, registrar, alarmar y cortar las variables mas comúnmente usadas en cualquier proceso y así darle calidad a este siempre teniendo en cuenta los costos, el tiempo y los beneficios.

Capítulo I Resumen de Teoría

Introducción

Antes de cualquier práctica es necesario conocer la teoría que respalda a esta para su mejor entendimiento por lo que en este capítulo se resumirá parte de la teoría de la instrumentación y control de procesos.

En los inicios de la era industrial, el operario llevaba a cabo un control manual de estas variables utilizando sólo instrumentos simples, manómetros, termómetros, válvulas manuales, etc., control que era suficiente por la relativa simplicidad de los procesos. Sin embargo, la gradual complejidad con que éstos se han ido desarrollando ha exigido su automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control. Estos instrumentos han ido liberando al operario de su función de actuación física directa en la planta y al mismo tiempo, le han permitido una labor única de supervisión y de vigilancia del proceso desde centros de control situados en el propio proceso o bien en salas aisladas separadas; además, gracias a los instrumentos ha sido posible fabricar productos complejos en condiciones estables de calidad y de características, condiciones que al operario le serían imposibles o muy difíciles de conseguir, realizando exclusivamente un control manual.

Toda industria que maneja procesos requiere cuantificar las cantidades de productos que entran o salen de un recipiente, tubería etc. En plantas de procesos por lo general hay que medir también las propiedades (temperatura, presión, masa, densidad, etc.). La medición de las cantidades involucradas permite controlar el proceso, por ejemplo agregando otro componente a la mezcla, reduciendo o incrementando la temperatura y/ o la presión, en fin, permite tomar decisiones acerca del paso siguiente para lograr un objetivo.

La cuantificación de las cantidades se realiza a través de dispositivos que emiten señales dependientes por lo general del cambio en la cantidad involucrada, definiéndose entonces la señal como un estímulo externo o interno a un sistema que condiciona su comportamiento.

Matemáticamente la señal se representa como una función de una o mas variables independientes que contienen información acerca de la naturaleza o comportamiento de algún fenómeno, los sistemas responden a señales particulares produciendo otras señales.

1.1 Sistemas de control

Algunas aplicaciones de los instrumentos de medida pueden caracterizarse por tener esencialmente una función de monitorización. Los termómetros, barómetros y anemómetros sirven para ese propósito, simplemente indican la condición del medio ambiente y sus lecturas no sirven como función de control en sentido ordinario, al igual los medidores de agua, gas y electricidad del hogar cuentan las cantidades que se consumen de esos fluidos para poder cancelar el monto a pagar por el usuario. En el caso de las empresas que trabajan con elementos radioactivos, sus trabajadores deben llevar consigo una película que sirve para acusar la exposición acumulativa del portador.

Todos estos elementos de medición reportan beneficios, pero no sirven para poder controlar procesos dinámicos como los empleados hoy por cualquier industria. En este caso, al sistema de control se le llama de circuito abierto, ejemplo de ello esta ilustrado en la figura 1.1, el elemento final de control puede ser una válvula que se abre o cierra cuando se desea controlar el fluido.

Cuando se desea controlar un proceso, se debe realizar una comparación de las medidas de salida (variable controlada) con las referencias deseada y ajustar entonces las variables de entrada para poder alcanzar la meta deseada. La figura 1.2 ilustra un ciclo de circuito cerrado.

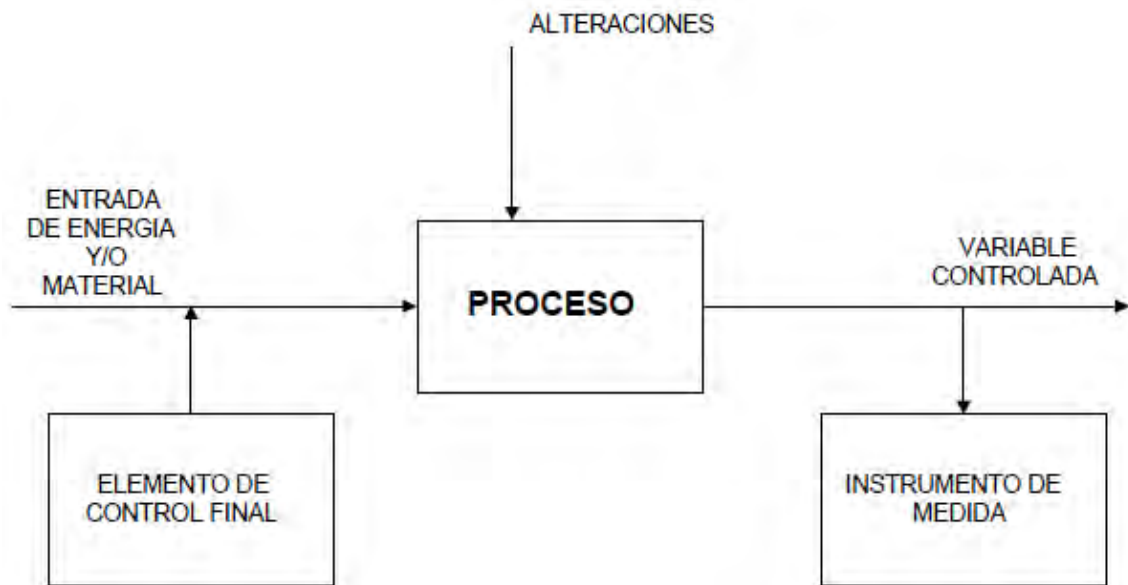


Figura 1.1. Circuito abierto de control.

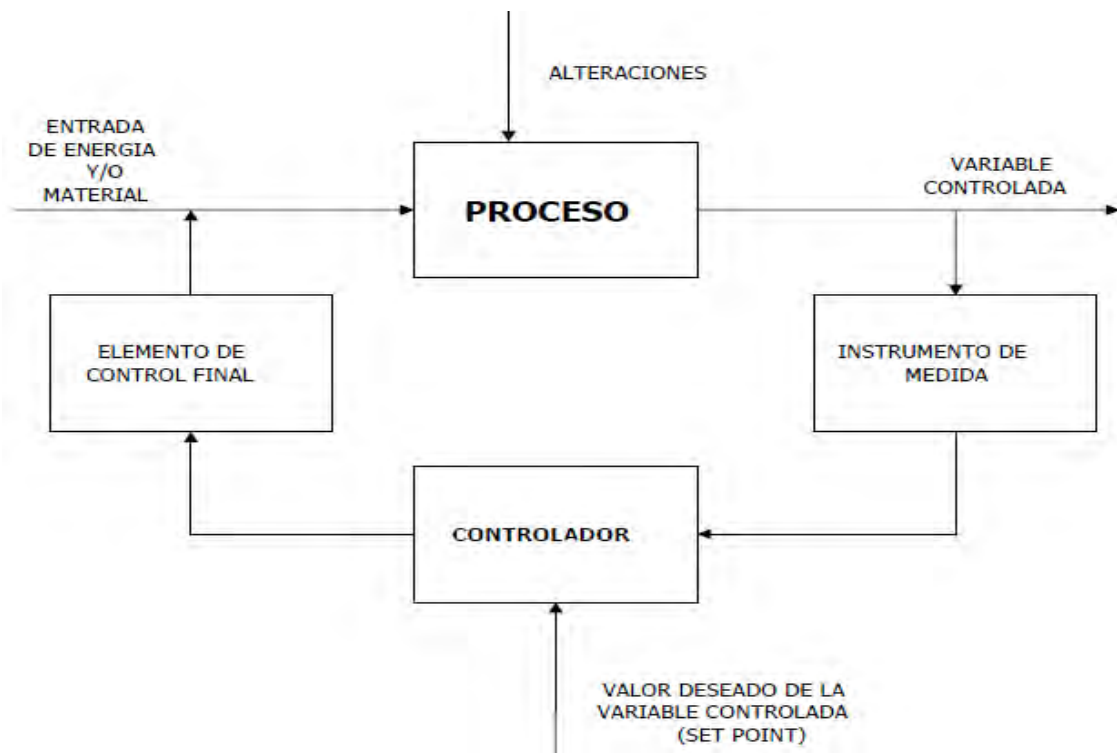


Figura 1.2. Circuito cerrado de control.

1.2 Simbología y notaciones usados en instrumentación.

No obstante la gran variedad de instrumentos que han sido desarrollados, todos ellos caen en categorías funcionales comunes. Lo que en esta sección se describirá será apropiado para usarse en Industrias químicas, petroleras, generadoras de energía, alimentos, metalúrgicas, farmacéuticas, entre otras más.

Definiciones.

Por razones de claro entendimiento y consistencia de terminología, algunos términos usados en relación a la medición y control de procesos se definen a continuación.

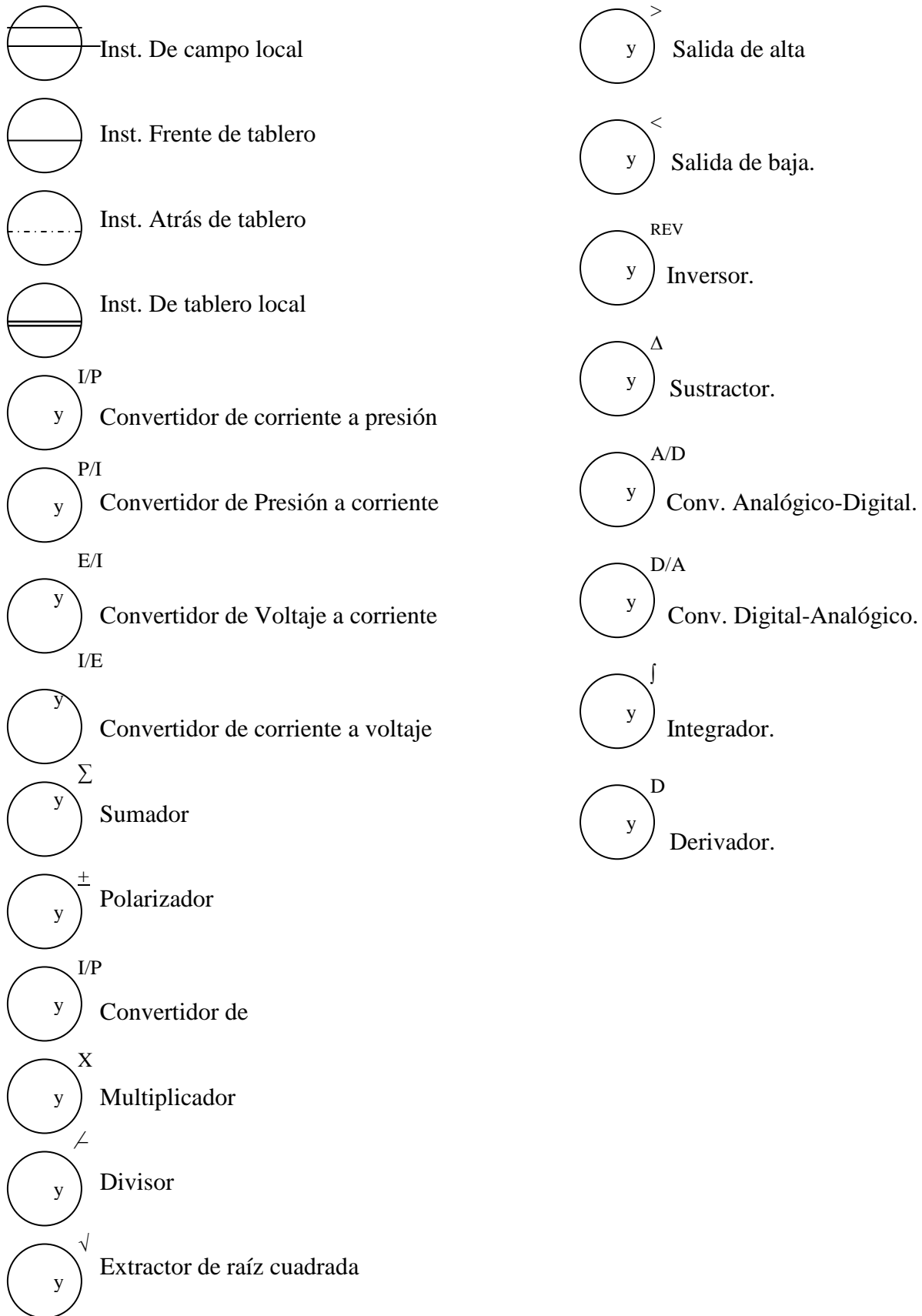
1. Alarma: dispositivo que señala la existencia de una condición anormal, mediante un cambio discreto audible o visible o ambos, con el fin de llamar la atención.
2. Amortiguamiento: manera en la cual la salida adquiere su valor de estado estacionario después de un cambio en el valor de la señal medida.
3. Analizador: instrumento que continuamente monitorea un corriente de proceso para una o más componentes químicos de la corriente.
4. Atenuación: decremento en la magnitud de la señal entre dos puntos, o entre dos frecuencias.
5. Banda muerta: rango a través del cual puede variarse una entrada sin que se inicia la respuesta. Generalmente se expresa como un porcentaje de rango de operación.
6. Circuito de instrumentación: una combinación de uno o más instrumentos interconectados en un arreglo para medir y/o controlar una variable de proceso.
7. Constante de tiempo (para un sistema de 1er orden: el tiempo requerido para que la salida complete el 63.2% de la subida o decaimiento total como resultado de un cambio en escalón en la entrada).
8. Controlador: dispositivo cuya salida puede ser variada para mantener una variable controlada en un valor específico dentro de ciertos límites especificados o para alterar la variable de una manera específica.
9. Convertidor: dispositivo que recibe información en la forma de una señal de instrumento (corriente, voltaje presión, etc.), altera la forma de la información y envía una señal de salida resultante. Un convertidor es una forma especial de relevador. Un convertidor se conoce también como un transductor, aunque transductor es un término completamente general y su uso no se recomienda específicamente para conversión de señal.
10. Corriente abajo: lado de la salida del instrumento.
11. Corriente arriba: lado de la entrada del instrumento.
12. Corrimiento: cambio no deseado en la salida sobre un periodo de tiempo, cuyo cambio no está relacionado con la entrada, condiciones de operación, o carga. El corrimiento generalmente se expresa como el cambio en la salida en un tiempo específico con una entrada fija y condiciones de operación.
13. Corrimiento del cero: cualquier cambio paralelo de la curva entrada-salida.
14. Efecto piezoeléctrico: fenómenos en que algunos cristales se deforman ligeramente, cuando se les aplican gradientes de potencial en el circuito en direcciones particulares e inversamente; cuando son deformados aparece una carga eléctrica.
15. Elemento final de control: dispositivo que cambia directamente el valor de la variable manipulada de un circuito de control.
16. Elemento primario: parte de un circuito o de un instrumento que primeramente detecta el valor de una variable de proceso, y que asume un estado o salida predeterminada e inteligible. El elemento primario puede estar separado de o integrado con otro elemento funcional de un circuito. También se conoce como al elemento primario como detector o sensor.
17. Estación de control: estación manual de carga que también proporciona la transferencia entre los modos de control manual y automático de un circuito de control. Se conoce también como estación auto-manual.

18. Estación manual de carga: dispositivo que cuenta con una salida ajustable manualmente que se usa para uno o mas dispositivos remotos, pero no puede ser usada para transferir entre los modos de control automático y manual de un circuito de control
19. Estado estacionario: una característica una condición, tal como valor, razón, periodicidad, amplitud, que exhibe solo cambios despreciables en un periodo largo o arbitrario de tiempo. Puede describir una condición en la cual algunas características son estática y otras dinámicas.
20. Error: la cantidad de falla al especificar exactamente la magnitud de una variable de proceso o de la discrepancia entre el valor real y el establecido de una variable de proceso. Un error positivo denota que la indicación del instrumento es más grande que el valor real.
21. Exactitud: limites dentro de los cuales puede variar el valor establecido de una propiedad del proceso con respecto a su valor real. Se expresa generalmente en porcentaje de la escala total.
22. Frecuencia natural: la frecuencia a la cual el sensor, bajo condiciones de carga, resonara con algunas fuentes de frecuencia externa.
23. Función: propósito de o acción realizada por un dispositivo.
24. Histéresis: la diferencia en la señal de medición para un valor dado de una propiedad de proceso cuando se alcanza primero desde una carga cero y después desde la escala total.
25. Identificación: secuencia de letras y/o dígitos usados para designar un instrumento individual o un circuito.
26. Instrumento: dispositivo usado directa o indirectamente para medir y /o controlar una variable. El término incluye válvulas de control, válvulas de seguridad y dispositivos eléctricos tales como anunciadores y botones de paro.
27. Instrumentación: la aplicación de los instrumentos.
28. Interruptor: dispositivo que conecta, desconecta o transfiere uno o más circuitos y que no es designado como un controlador, un relevador, o una válvula de control.
29. Linealidad. La linealidad se define como la desviación máxima a partir de una línea recta que conecta el valor de la señal de medición a cero carga con la señal de medición a una carga dada.
Porcentaje de no linealidad = $(100A)/B$ donde A=máxima divergencia a partir de la línea recta mencionada y B=valor de escala total de la señal de medición.
30. Local: localización de un instrumento que no esta en el tablero ni atrás de tablero. Los instrumentos locales están comúnmente en la vecindad de un elemento primario o de un elemento final de control.
31. Longitud de inmersión: longitud desde el extremo libre del bulbo o pozo al punto de inmersión en el medio al cual se esta midiendo la temperatura.
32. Luz piloto: luz que indica la existencia de un número de condiciones normales de un sistema o dispositivo. También se le conoce como luz monitora.
33. Medición: determinación de la existencia o magnitud de una variable. Los instrumentos de medición incluyen todos los dispositivos usado directa o indirectamente para este propósito.
34. Modo de control: método con el cual un controlador contrarresta las desviaciones de una señal de su punto de ajuste.

35. Montado en tablero: Término aplicado a un instrumento que está montado en un tablero y que es accesible al operador para su uso normal.
36. Parte posterior del tablero: término aplicado al área que se encuentra atrás del tablero y que contiene a los instrumentos que no son necesarios que se encuentren accesibles al operador para su uso normal.
37. Proceso: cualquier operación o secuencia de operaciones que involucre un cambio de estado de energía de composición, de dimensión, o de otra propiedad que pueda definirse con respecto a un dato.
38. Punto de ajuste: magnitud predeterminada de una variable de proceso que el controlador trata de mantener.
39. Punto de prueba: conexión de proceso en la cual no hay un instrumento conectado permanentemente, pero la cual es colocada para usarse temporal, intermitente o para la conexión futura del instrumento.
40. Rango: región entre cuyos límites una cantidad se mide, recibe o transmite. Se expresa estableciendo los valores de más bajo y más alto rango.
41. Rango de operación (SPAN): diferencia algebraica entre los valores de más bajo y más alto rango.
42. Rango compensado de temperatura: rango de temperatura sobre el cual el sensor se compensa para mantener el rango de operación y el balance del cero dentro de los límites especificados.
43. Rangeabilidad: la relación entre los valores de más alto y más bajo rango.
44. Relevador: dispositivo que recibe información en la forma de una o más señales de instrumento, modifica la información o su forma, o ambas si se requiere, envía a una o más señales resultantes de salida, y no es designado como controlador, interruptor o algún otro. El término relevador se aplica específicamente también a un interruptor eléctrico que es actuado remotamente por una señal eléctrica.
45. Relevador computador(o de cálculo): relevador que realiza uno o más cálculos y/o funciones lógicas y envía una o más señales resultantes de salida.
46. Reluctancia: oposición que presenta una sustancia magnética al flujo magnético. Se expresa como la relación de la diferencia de potencial magnético al flujo correspondiente.
47. Repetibilidad: la capacidad de un instrumento de generar una señal de medición cuya magnitud permanecerá dentro de los límites establecidos de repetibilidad bajo idénticas condiciones de proceso sucediendo en tiempos diferentes.
48. Resolución: el cambio más pequeño en la variable de proceso que produce un cambio detectable en la señal de medición expresada en porcentaje de la escala total.
49. Respuesta: comportamiento de la salida de un dispositivo como función de la entrada, ambos con respecto al tiempo.
50. Ruido: perturbaciones externas o cualquier otra señal que no aporta información útil.
51. Sensitividad (sensibilidad): la razón de cambio en la salida causado por un cambio en la entrada, después que se ha alcanzado el estado estacionario. Se expresa como la relación numérica, en unidades de medición de las dos cantidades establecidas.
52. Señal: información acerca de una variable, que puede ser transmitida.

53. Señal de medición: un cambio en la variable de proceso en el caso de prácticamente todos los detectores se convierte a un cambio en alguna otra variable, que esta vista en el dispositivo de lectura. Esta otra variable se conoce como señal de medición.
54. Tablero: una estructura que tiene un grupo de instrumentos montados en el y al cual se le da una designación individual. Puede consistir de una o más casillas, secciones, escritorios o paneles.
55. Tablero local: un tablero que no es central o principal. Los tableros locales se encuentran comúnmente en la vecindad de subsistemas de la planta.
56. Telemetría: la practica de transmitir y recibir la medición de una variable para lectura u otros usos. El término se aplica comúnmente a sistemas de señal eléctrica.
57. Termistor. Resistor eléctrico cuya resistencia vario con la temperatura.
58. Tiempo de respuesta: intervalo tiempo requerido para que la señal de medición de un detector alcance un porcentaje especifico de su valor final como resultado de un cambio en escalón en una variable de proceso.
59. Tiempo muerto: intervalo de tiempo entre la iniciación de un cambio en la entrada y el comienzo de la respuesta resultante.
60. Transductor: termino general para un dispositivo que recibe información en la forma de una o más cantidades físicas, modifica la información y/o su forma, y envía una señal de salida resultante. Dependiendo de la aplicación, puede ser un elemento primario, un transmisor, un relevador, un convertidor u otro dispositivo.
61. Transmisor: dispositivo que detecta una variable de proceso por medio de un elemento primario, y que tiene una salida cuyo valor de estado estacionario varia solo como una función predeterminada de la variable de proceso. El elemento primario puede o no ser integral al transmisor.
62. Valor de más alto rango: la cantada más alta que puede medir un dispositivo ajustado en un rango dado.
63. Valor de más bajo rango: la cantidad más baja que puede medir un dispositivo ajustado en un rango dado.
64. Válvula de control: dispositivo diferente a una válvula todo o nada actuada manualmente, que directamente manipula el flujo de una o más corrientes de proceso.
65. Variable: cualquier fenómeno que no es de estado estacionario sino que involucra condiciones continuamente cambiantes.
66. Variable de proceso: cualquier propiedad variable de un proceso.

Figura 1.3 simbología básica en instrumentación y control



1.3 Definición de variable

Las cantidades o características que se miden (las cuales sirven de base de control) se denominan variables, frecuentemente reciben el nombre de variables de medición, variables de instrumentación o variables de proceso.

1.4 Clasificación de las variables

Las características que se miden, las variables de medición, se han clasificado según el campo a la cual están dedicados, así entonces se pueden establecer:

a. Variables térmicas

Las variables térmicas se refieren a la condición o carácter de un material que depende de su energía térmica. Para cuantificar la energía térmica de un material se requiere conocer las condiciones:

- ✓ **Temperatura:** Se define como la condición de un cuerpo o material que determina la transferencia de calor hacia o desde otros cuerpos.
- ✓ **Calor específico:** Es la propiedad de un cuerpo que define la relación entre el cambio de temperatura y la variación del nivel de energía térmica.
- ✓ **Variables de energía térmica:** Se evalúan a partir de la entalpía y entropía relacionadas con la energía térmica total y la disponible en un cuerpo.
- ✓ **Valor calorífico:** Representa la característica de un material que determina la cantidad de energía térmica (calor) que se produce o absorbe por un cuerpo sometido a condiciones específicas.

b. Variables de radiación

Las variables de radiación se refieren a la emisión, propagación y absorción de energía a través del espacio o de algún material en la forma de ondas; y por extensión, la emisión, propagación y absorción corpuscular. Deben incluir las variables fotométricas (color, brillo, reflectancia, etc.) relacionadas con la luz visible y las variables acústicas que incluyen los sonidos perceptibles y las ondas imperceptibles que se propagan a través de cualquier medio, tales como las ondas ultrasónicas.

- ✓ **Radiación nuclear:** Es la radiación asociada con la alteración del núcleo del átomo.
- ✓ **Radiación electromagnética:** El espectro de radiación electromagnética incluye la energía radiante desde la emisión a frecuencias de potencia pasando por las bandas de transmisión de radio; calor radiante, luz infrarroja, visible y ultravioleta y los rayos X y cósmicos. Una forma de radiación electromagnética son los rayos gamma procedentes de fuentes de suministro nucleares.

c. Variables de fuerza

Las variables de fuerza son aquellas cantidades físicas que modifican la posición relativa de un cuerpo, la modificación puede incluir hasta la alteración de las dimensiones en forma permanente (deformaciones plásticas) o en forma transitoria (deformaciones elásticas), las fuerzas pueden tener un carácter estático (peso propio) o dinámico. Las pueden producir desplazamientos y/o deformaciones lineales, flexionantes y/o torsionantes.

Las cargas que representan interés son las fuerzas totales, momentos flexionantes, momentos o par de torsión, la presión o vacío (variable dependiente de la fuerza y del área sobre la que actúa).

d. Variables de velocidad

Estas variables están relacionadas con la velocidad a la que un cuerpo se mueve hacia o en dirección opuesta a un punto de referencia fijo. El tiempo siempre es uno de los componentes de la variable velocidad, el término velocidad se asocia a un fluido a través del flujo o caudal, en caso de cuerpos se puede apreciar la rapidez con que el cuerpo recorre una medida por unidad de tiempo, la medida puede ser lineal o angular. La variable velocidad puede también cambiar en el tiempo dando origen a otra variable representada por la aceleración.

e. Variables de cantidad

Las variables de cantidad se refieren a la cantidad total de material que existe dentro de ciertos límites específicos, así por ejemplo: la masa es la cantidad total de materia dentro de límites específicos. En este caso, el peso es la medida de la masa en base a la atracción de la gravedad.

f. Variables de tiempo

Las variables de tiempo son las medidas del lapso transcurrido, es la duración de un evento en unidades de tiempo, la cantidad de periodos que se repiten en una unidad de tiempo se define como la frecuencia, la cual por lo general se mide en Hertz.

g. Variables geométricas

Estas se refieren a la posición o dimensión de un cuerpo. Las variables geométricas están relacionadas con el estándar fundamental de longitud. Se puede apreciar como variable la posición de un cuerpo con respecto a una referencia, se puede dimensionar un cuerpo tomando la distancia relativa entre dos puntos, se puede determinar la superficie de un cuerpo partiendo del área encerrada por al menos tres puntos de distancias entre sí conocidas. Se puede apreciar la forma, el contorno según la localización relativa de un grupo de puntos representativos de la superficie que se mide. Dentro de las variables geométricas debe considerarse al nivel de un líquido o sólido representado por la altura o distancia desde la referencia base.

h. Variables de propiedades físicas

Las variables de propiedades físicas se refieren a las propiedades físicas de sustancias, sin considerar aquellas que están relacionadas con la masa y la composición química.

Por ejemplo:

Densidad y Peso Específico: Por definición la densidad es la cantidad de masa de una materia contenida en una medida de volumen unitario, mientras que el peso específico es la relación entre la densidad del material y la densidad del agua a condiciones especificadas.

Humedad: Es la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. La humedad absoluta es el peso de agua en la unidad de volumen, en algunas ocasiones se expresa en términos de la presión del vapor de agua. La humedad relativa es la relación entre la presión existente del vapor de agua en cierta atmósfera y la presión del vapor de agua saturado a la misma temperatura. El contenido de humedad es la cantidad de agua libre que se encuentra en una sustancia.

Viscosidad: Es la resistencia que ofrece un fluido a su deformación por corte.

Características estructurales: Son las propiedades cristalinas, mecánicas o metalúrgicas de las sustancias. Dureza, ductilidad, estructura metalúrgica, etc.

i. Variables de composición química

Son las propiedades químicas de las sustancias referidas a su composición, a su acidez o alcalinidad.

j. Variables eléctricas

Las variables eléctricas son las necesarias para evaluar energía eléctrica, por ejemplo: diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, corriente eléctrica que circula por un conductor (impedancia), resistencia que ofrece un elemento al paso de corriente (resistividad), capacidad de un cuerpo en retener energía eléctrica (capacitancia) o inducir campos magnéticos (inductancia).

1.5 Clasificación por señal de medición

Para la mayoría de las mediciones el cambio en la variable que se mide se transforma en el cambio de alguna otra variable (señal de medición), la cual a su vez opera el dispositivo e inicia la acción de control o puede convertirse en una señal de medición. Así por ejemplo, la medición de flujo utilizando una placa orificio o un tubo Venturi (elemento primario) desarrolla una presión diferencial (señal de medición), la cual puede operar directamente un indicador, registrador o puede convertirse en una segunda señal de medición (neumática o eléctrica) que operará al dispositivo. La señal (analógica) eléctrica o neumática en los dispositivos modernos se convierte en una señal digital que a su vez puede enviarse a una computadora u otro dispositivo de control. La señal analógica se remite a un transductor que es un dispositivo que tiene la misión de recibir energía de una naturaleza eléctrica, mecánica, acústica, etc., y suministrar otra energía de diferente naturaleza, pero de características dependientes de la que recibió, como ejemplo: un convertidor analógico - digital (A/D C).

El uso de señales de medición permite la medición de todas las diferentes variables mediante una combinación de transductores primarios especializados, junto con un número pequeño de sistemas de respuesta asociados con un pequeño número de señales de medición.

Las señales de medición se incluyen dentro de diez divisiones sencillas:

a. Movimiento

Todas las manifestaciones del valor de la variable medida están basadas en alguna forma de movimiento, el cual es una entrada singular a los transductores, controladores, computadoras y otros sistemas de respuesta a la medición.

Movimiento mecánico: El desplazamiento de un indicador, plumilla de registro o de otro elemento sólido es la forma más usual del efecto que se mide. El movimiento mecánico (lineal o angular) se toma también como un efecto de entrada a otros sistemas de respuesta.

Desplazamiento líquido: Se emplea como manifestación en los termómetros con vástago de vidrio, los manómetros con tubo de vidrio y otros similares. También se emplea como señal de transmisión en los sistemas de termómetro llenos de líquido y de tubo metálico, y en otros sistemas.

Movimiento de una luz o haz de electrones: Se emplea como manifestación en los osciloscopios, oscilógrafos, galvanómetros de haz de luz y otros semejantes. También se utiliza como elemento sensible de posición en algunas aplicaciones donde se requiere que la fuerza de reacción del elemento sensible sea despreciable.

b. Fuerza

Es un tipo común de señal utilizada en la conversión, transmisión y utilización de las mediciones.

Fuerza mecánica total: Se usa con frecuencia como entrada de control, como elemento de conversión en los dispositivos de fuerzas balanceadas y para la transmisión de señales a distancias medidas en unidades de longitud. Se puede derivar y convertir en movimiento, o en presión diferencial o estática.

Presión: La fuerza por unidad de área en los fluidos es una señal de medición que emplea para la transmisión de la medición. Se utiliza tanto como presión estática como la diferencial con valores que varían desde presiones diferenciales de pulgadas de agua, las cuales se desarrollan mediante una placa orificio, hasta presiones de 1.000 lb/pulg² desarrolladas en sistemas con termómetro lleno de gas y sellados. Las presiones neumáticas que se aceptan como estándar son 3 a 15 lb/pulg² (poco usual de 3 a 27 lb/pulg²) para la transmisión neumática de las señales de medición y control.

c. Señales eléctricas

Se dispone de transductores para transformar prácticamente todas las variables a las señales de medición eléctricas correspondientes, la cual, en la actualidad, en la casi totalidad de los instrumentos modernos se convierte en una señal digital que muestra una pantalla adicionada al instrumento o es enviada a una computadora para su evaluación, procesamiento, toma de decisiones.

Señal de voltaje o corriente: Las señales de voltaje o corriente tienen una relación fija entre la variable medida y la señal de voltaje o de corriente.

Señal de relación de voltaje y corriente: Las señales de relación de voltaje y corriente son aquellas en que la relación entre el voltaje y la corriente es la característica significativa de la señal de medición. Cuando el cambio en la variable que se mide produce un cambio de impedancia en el circuito de medición, la relación entre el voltaje y la corriente, o entre los voltajes o corrientes de entrada y de salida, define el valor medido.

d. Señales de medición de tiempo modulado

Para la transmisión de las mediciones, particularmente a grandes distancias se utiliza cierto número de señales de tiempo modulado del tipo “abierto – cerrado”.

Señal de duración de un pulso: Generalmente operan con la duración de un ciclo constante que varía entre 1 y 15 segundos, en donde la relación entre el tiempo que el circuito está cerrado y el tiempo en que el circuito se encuentra abierto, durante cada ciclo, representa el valor de la variable. Las señales con duración de un pulso también se utilizan para la integración, sin que importe la distancia de transmisión.

Señal de frecuencia: La señal de la frecuencia representa el cambio del valor de la variable que se mide, se emplean con frecuencia para la transmisión de la medición, particularmente sobre circuitos portadores y circuitos radiotransmisores. La velocidad rotacional a veces se transforma a frecuencia como señal de medición, sin que tenga importancia la distancia de transmisión.

Señal de modulación de pulsos clave: La señal de medición puede ser simplemente la cuenta del número de pulsos dentro de cierto intervalo de tiempo, o puede ser una señal binaria totalmente codificada o decimal binario. Los pulsos clave se utilizan frecuentemente en las computadoras digitales, en los registradores que operan con datos digitales.

1.6 Relación del instrumento y el control de procesos

La figura 1.4 muestra como es posible controlar el proceso de giro de un motor al conocer la posición de salida sensada por la variación de la posición de un cursor sobre una resistencia variable. Otro forma simple es sensar la presión y/o temperatura de un proceso con las cuales se puede determinar a partir de la ecuación de estado la variable dependiente y comparar el valor obtenido con un valor de referencia (set point), de esta forma se puede alterar controlando con una válvula la entrada de mas o menos vapor que dará incrementos de temperatura hasta alcanzar el valor de referencia. También simplemente se puede leer de un termómetro una temperatura que auxiliará al operador a tomar decisiones.

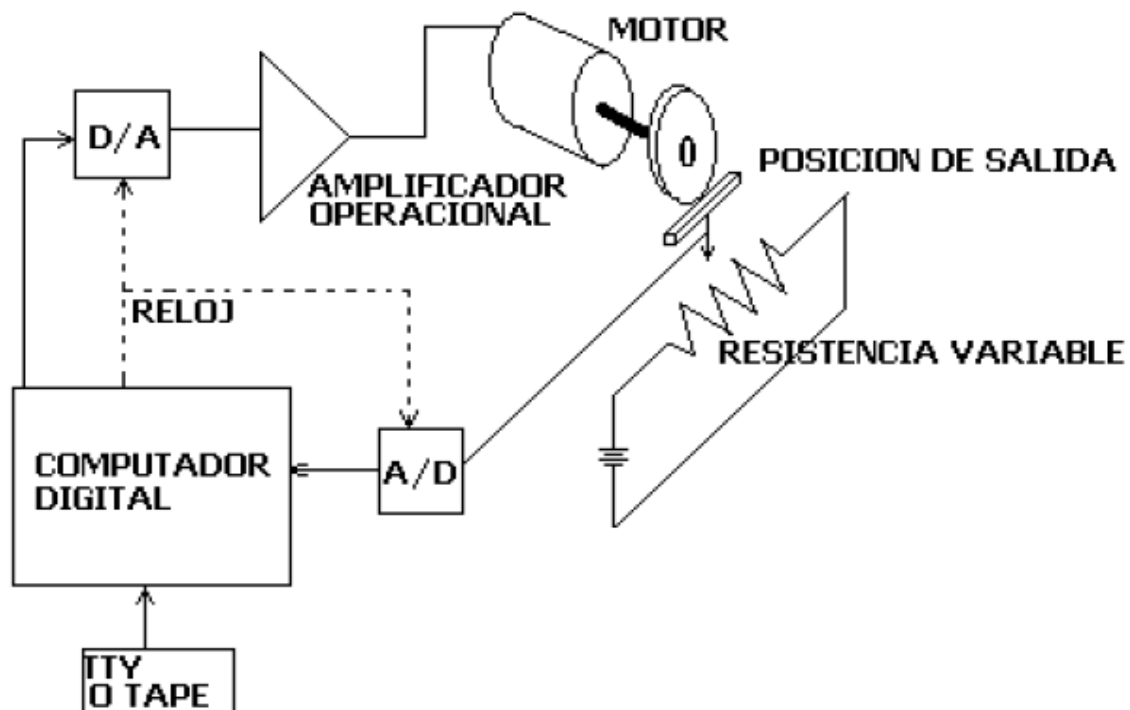


Figura 1.4. Ilustración del censado de la variable desplazamiento.

1.7 Errores de medición

La presencia universal de lo incierto en las mediciones físicas debe reconocerse como punto de partida en el tratamiento de los errores en los sistemas de medición. El error de hace presente por el sistema de medición adoptado y por los patrones empleados para la calibración del instrumento de medida.

1.8 Definición de error

La magnitud de cualquier cantidad física que se desea medir estará integrada por un valor, formado en cierta unidad seleccionada de forma adecuada y de un valor numérico asociado. Así por ejemplo, en la medición de temperatura se puede seleccionar °F o °C, el valor numérico puede ser 110 que dependerá de la unidad, si se selecciona °C, la magnitud medida será 110 °C. El grado de falla en cuanto a especificar exactamente este valor depende de factores que se estudiaran en este tema, la desviación del valor establecido con respecto al valor verdadero de la cantidad, constituye el error de la medición.

1.9 Tipos de medición

Cuando se consideran y valoran los errores de medición, es de utilidad mantener en mente el esquema de medición empleado, a continuación se describen algunos de los tipos de medición más comunes:

a. Comparación directa

La medición puede consistir de la comparación entre la cantidad que se mide con un patrón de la misma naturaleza física. En tales casos, la relación entre, o la diferencia del patrón con respecto a la magnitud desconocida es lo que se determina. Como ejemplo: El puente de Wheatstone para determinar el valor de una resistencia en términos de una resistencia y de una relación conocida.

b. Ajuste hasta la igualdad

Una magnitud conocida se ajusta mediante cantidades conocidas hasta que se iguala a la desconocida. Ejemplo: Determinación de la masa por medio de una balanza química, en eléctrica se aplica el potenciómetro para determinar voltaje.

c. Acción directa de algún sistema físico

Alguna propiedad de la variable que se mide es la que se utiliza para operar un sistema indicador adecuado y su magnitud se lee en una escala apropiada. Ejemplo: La magnitud de la corriente eléctrica puede medirse a partir del par de torsión que se produce en el sistema móvil de un amperímetro y el valor se lee considerando la deflexión angular del indicador del instrumento. La temperatura puede medirse por la expansión de un líquido en un tubo capilar (conjunto denominado termómetro) y su valor se lee a partir de la altura alcanzada por el líquido en el tubo capilar.

1.10 Fuentes de error

Cualquiera que sea el esquema de medición que se utilice, el valor numérico asignado como resultado de la medición para describir la magnitud de la variable medida tendrá cierto error de mayor o menor grado, es decir existirá cierta desviación con respecto al valor real de la cantidad; el arte de las mediciones consiste en la reducción de los errores hasta límites permisibles adecuados al propósito. A los efectos de conocer la exactitud de los instrumentos se mantienen patrones estándar para muchas magnitudes, por ejemplo: El National Bureau of Standards en Washington, Estados Unidos, mantienen modelos primarios que generan los patrones de medida que se consideran exactos para la apreciación de la resistencia (ohmios) y voltaje, en Sevres, Francia se encuentra la Oficina Internacional de Pesos y Medidas donde esta una barra métrica y un kilogramo patrón. Los instrumentos de medición mientras más cercana sea su apreciación al valor real se dirá que son más precisos, en equipos de laboratorio se pueden conseguir aparatos de medición con incertidumbre del valor real cercana a la centésima del 1% y menores. Además de los errores que por necesidad resultan de la calibración defectuosa del sistema de medición, existe cierto número de fuentes de procedencia de errores, los cuales se detallan a continuación:

a. Ruido en las mediciones

El ruido es cualquier señal que no transmite ninguna información de utilidad. Las perturbaciones extrañas generadas en los sistemas de medición mismos o procedentes del exterior por lo general constituyen factores subordinados en contra de los cuales debe efectuarse la lectura de la señal.

Ejemplo: La realimentación de la señal medida (feedback) en el caso de la radio, genera ruidos incómodos, la vibración o desplazamiento repentino de la señal móvil puede generar sumatoria de ondas (resonancia) en la medición. Los ruidos son corregibles a partir de su fuente de procedencia, en muchos casos deben emplearse filtros de carácter electrónico. Los ruidos pueden generarse en:

1. El sistema sensible primario
2. El canal de comunicación o unión intermedia
3. El elemento indicador del sistema

b. Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta en un sistema de medición a una señal también puede contribuir a la incertidumbre de la medición. Si la señal no es constante en su valor, resultará el retraso de la respuesta del sistema en cuanto a la indicación cuyo valor depende de una secuencia de valores del medio estimulante dentro de cierto intervalo de tiempo. Ejemplo: Quien desee medir los cambios de temperatura en el ambiente de la cámara de combustión de un motor recíprocante no podrá emplear un termómetro por su baja capacidad de respuesta.

Considérese un sistema simple formado por un indicador de presión consistente en unos fuelles conectados a la fuente de procedencia de la presión por medio de un tubo de pequeño diámetro, por el tubo debe fluir gas que incrementará la presión del fuelle y lo hará expandirse. Tal sistema de medición se conoce como un sistema de primer orden, ya que su respuesta dinámica puede expresarse por medio de una ecuación diferencial de primer orden. Esta respuesta se muestra en la figura 1.5 (a) para un cambio en una etapa y expresarse por las ecuaciones 1.1 y 1.2 siguientes:

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_f \quad 1-1$$

$$\theta = \theta_f \left(1 - e^{-t/T}\right) \quad 1-2$$

Y la figura 2.3 (b) para un cambio lineal y expresarse por las ecuaciones 1.3 y 1.4 siguientes:

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = Kt \quad 1-3$$

$$\theta = K(t - T) + KT e^{-t/T} \quad 1-4$$

Para ambos tipos de cambio, la ecuación de respuesta contiene un término transitorio que describe la respuesta inicial y un término de estado uniforme (valor asintótico de la curva de respuesta) que describe el comportamiento del sistema después de un intervalo que es largo comparado con el tiempo de respuesta T. La indicación del sistema es una función de su tiempo de respuesta, así como de los cambios de la variable que se mide.

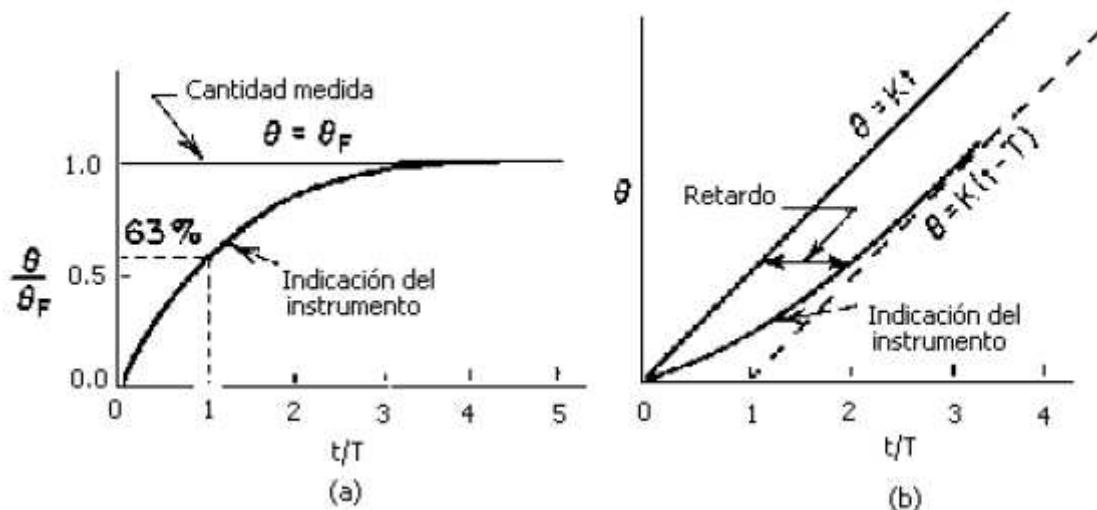


Figura 1.5. Respuestas de un sistema de medición.

En el caso de situaciones o sistemas mas complicados, la solución requiere de análisis aproximados, sin embargo, puede establecerse que, para cualquier sistema que tenga un tiempo de respuesta definido, la indicación en cualquier momento es el resultado de los eventos que sucedieron en un intervalo de tiempo previo y la magnitud de la indicación no solo

depende de la variación en la señal dentro del intervalo de tiempo previo a la observación, sino que también puede depender de un modo mas o menos complicado de las características del sistema mismo.

c. Limitaciones de diseño

Las limitaciones y defectos en el diseño y construcción de los sistemas de medición también constituyen factores de incertidumbre, así por ejemplo, en los sistemas que poseen partes mecánicas, la fricción contribuye con cierto grado de amortiguamiento, en los sistemas no aislados un campo magnético también puede ser factor de alteración, en equipos que requieren un cambio de energía proveniente de la misma fuente que se desea medir, el valor de la variable que se mide quedará afectada por esta última, en los sistemas que emplean energía proveniente de otra fuente de suministro auxiliar, el valor de la variable medida puede quedar alterado por el acoplamiento al sistema de medida y el consiguiente retorno de energía. Puede también producirse interferencia en la interacción de un elemento del sistema con la acción de la variable que se mide, ejemplo de ello es la presencia de una placa orificio en un tubo que transporta un fluido, en dispositivos eléctricos se puede observar este fenómeno al medir la corriente eléctrica en un circuito de baja resistencia, ya que el miliamperímetro introduce una resistencia adicional y puede alterar el valor medido de la corriente. La transmisión de la información desde el elemento sensible hacia el indicador puede ser afectada por cualquiera o por todos los siguientes tipos de errores:

- Atenuación de la señal al ser consumida o absorbida en el canal de comunicación.
- Distorsión de la señal a causa de la atenuación, resonancia o fenómenos de retardo selectivos en los diversos componentes de la señal.
- Pérdidas por fugas.

Otra de las limitaciones en los sistemas de medición son producidos por el deterioro debido al desgaste físico o químico que puede ocasionar cambios en la respuesta (oxidación de pesas, variación de resistencia eléctrica, desgaste en una placa orificio, etc.); no puede dejar de mencionarse las influencias del medio ambiente (temperatura, humedad, presión barométrica, elementos contaminantes).

d. Errores de observación y de interpretación

Los errores personales en la observación, interpretación y registro de los datos son fuente de incertidumbre en cuanto a las mediciones. A continuación se describen errores comunes en los sistemas de medición:

- **Errores de paralaje:** En el caso de dispositivos de toma de datos por un operador, es difícil no cometer errores de paralaje, pues dependiendo de la posición relativa del operador respecto al cristal la lectura tendrá distintos valores.

El grado del error dependerá de la altura del operador y del seno del ángulo entre la visual y la perpendicular al cristal del dispositivo.

- **Interpolación lineal de escalas:** Cuando la escala del dispositivo esta dividida en subdivisiones relativamente grandes y es necesario apreciar un valor entre las dos subdivisiones dependerá de una interpolación entre los valores extremos y la distancia lineal entre las subdivisiones al punto de ubicación del indicador.

- **Influencia personal del observador:** Algunos operadores pueden apreciar que el indicador se encuentra exactamente en la mitad de la distancia geométrica entre dos subdivisiones, pero cuando el indicador se desplaza ligeramente ya la apreciación dependerá de la experiencia, de tal manera que dos operadores pueden dar valores distintos a una misma medida.

- **Equivocaciones:** Las fallas en el libro de anotaciones debidas a la escritura incorrecta de un dígito o transposición de dígitos son errores del observador.

1.11 Clasificación de los errores

Al determinar la magnitud de la incertidumbre o error en el valor asignado a una cantidad resultante de una medición, es necesario establecer la diferencia entre dos clases de error:

a. Errores sistemáticos

El error sistemático es aquel que se repite constantemente cada vez que se realiza el experimento.

Uno de estos es debido a la calibración defectuosa del sistema de medición o al cambio en el sistema que provoque cierta desviación entre la medida apreciada y el valor real. Los errores sistemáticos los puede provocar la pérdida o envejecimiento de los resortes y diafragmas en

los sistemas de medición de presión, también se puede observar la reducción de potencia de un magneto debido al choque o cambio causado con el tiempo.

Los errores sistemáticos son difíciles de apreciar, para valorarlos se deben comparar valores definidos en aquellos parámetros de la variable que se mide que están bajo el control del operador y utilizar cuando es posible diferentes instrumentos y/o programas de calibración y certificación permanente. A veces es posible medir algo cuya magnitud se conoce con precisión, tal medición constituye una comprobación del sistema de medición y sirve de ayuda para la valoración de los errores sistemáticos.

b. Errores casuales

Los errores casuales son aquellos que se presentan en forma accidental y cuya magnitud y signo fluctúa de tal modo que no pueden predecirse a partir del conocimiento del sistema de medición y de las condiciones en que se efectúa la medición.

En la medición de cualquier cantidad física, las observaciones están influidas por una cantidad de factores, los cuales se denominan parámetros de medición. Las observaciones repetidas de la magnitud de cierta cantidad pueden diferir como resultado de la falla del dispositivo. Si se supone que los diversos parámetros que se encuentran fuera del control del operador (y los residuos incontrolables de aquellos parámetros que el operador trata de mantener fijos) actúan en una forma completamente al azar la teoría de la probabilidad puede emplearse para deducir algunos resultados de utilidad. La combinación de las circunstancias que produce grandes desviaciones del valor observado con respecto al valor verdadero se presentan con menos frecuencia que aquellos que causan pequeñas desviaciones y cada influencia puede suponerse que dé lugar tanto a una desviación positiva como a una negativa. En consecuencia, la tendencia general de los efectos pertenecientes a todas las influencias será el de cancelarse con alguna otra en lugar de ser aditiva.

Si todos los errores de medición fueran consistentes con las leyes de la probabilidad, podría esperarse que el valor verdadero de una cantidad fuera el promedio de un número infinito de observaciones.

La tabla 1.1 indica una clasificación para las distintas fuentes de procedencia del error con respecto al tipo de error que se produce.

Fuente de procedencia del error	Tipo de error	
	Casual	Sistemático
Ruido	Generalmente	Puede ser
Tiempo de respuesta	Pocas veces	Casi siempre
Limitaciones de diseño	Normalmente	Algunas veces
Energía de interacción	Puede ser	Normalmente
Transmisión	Algunas veces	Normalmente
Deterioro	Pocas veces	Normalmente
Influencia del medio ambiente	Normalmente	Puede ser

Tabla 1.1. Tipos y fuentes de procedencia de los errores de medición.

1.12 Exactitud del instrumento

Una vez que el instrumento de medición primario se encuentra montado en forma satisfactoria con respecto al proceso, ¿Qué tan bien corresponde la salida del instrumento con el elemento primario?

Considerando el ejemplo del termómetro, ¿qué tan cercana se encuentra la temperatura indicada a la temperatura real del elemento primario? Esta pregunta concierne a la exactitud del instrumento es la que con frecuencia constituye el principal factor en lo que se refiere a la selección del instrumento.

Por lo general, el aumento de exactitud se logra a mayor costo. Los informes de exactitud y de funcionamiento que suministran los fabricantes de instrumentos constituyen una guía digna de confianza. Normalmente es más conveniente escoger el instrumento de medición de mayor costo que el de menor costo. Por otra parte las especificaciones imprácticas que indican un funcionamiento dificultoso y con frecuencia innecesario, no sólo dan lugar a costos iniciales excesivos, sino que pueden resultar en la selección de un instrumento de medición demasiado complicado que requiere de una gran cantidad de trabajo de mantenimiento.

La exactitud casi siempre se especifica en la base de estado uniforme. El funcionamiento dinámico (esto es, como responde la salida de medición con el tiempo a los cambios en el valor que se mide) apenas ha empezado a recibir la atención que merece. Por ejemplo, en la práctica industrial, el elemento primario del termómetro casi siempre se encuentra montado en un termopozo para protegerlo en contra del fluido de proceso y para permitir su remoción, comprobación y reemplazo del elemento sin interrumpir la operación del proceso. El termopozo, trabajando en las mejores condiciones, introduce una pérdida considerable de tiempo en cuanto, a la respuesta de la medición. Cuando la medición se utiliza para el control, este retraso puede llegar a resultar en efectos de mayor importancia.

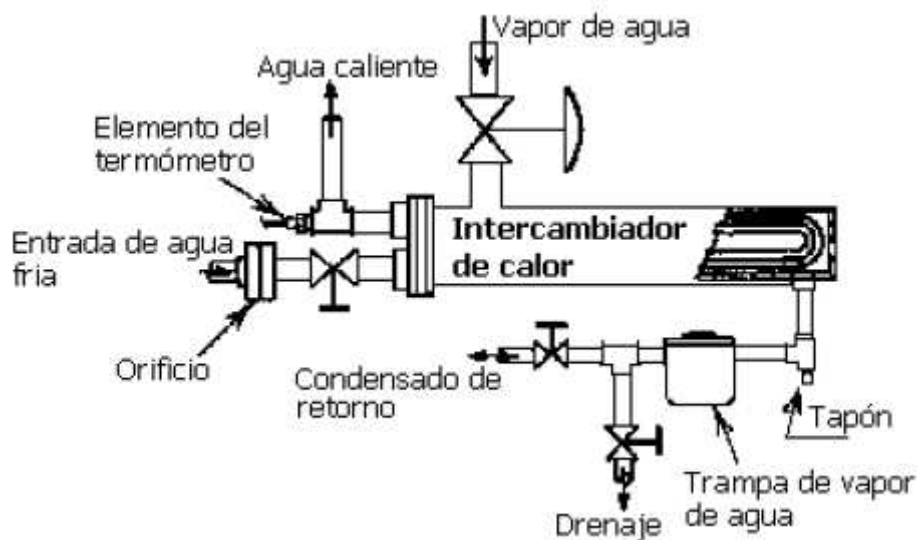


Figura 1.6 Ubicación de elementos primarios de medición de temperatura

La figura 1.6 ilustra la ubicación de los elementos primarios de medición de temperatura de un fluido que sale de un intercambiador de calor, la cual se mide por medio de un termómetro de resistencia colocado en un termopozo y mediante un segundo termómetro de resistencia de alta velocidad localizado directamente en el vapor de agua. En este caso la temperatura del fluido que fluye hacia fuera del intercambiador de calor es la variable que se mide. Por lo general se emplean dos sistemas de medición (redundancia) separados, uno de ellos un termómetro convencional montado en un casquillo estándar sumergido en la línea; el otro es un termómetro de resistencia de alta velocidad de tipo especial sumergido directamente en la corriente para disponer de una respuesta rápida a la temperatura de la corriente.

1.13 Señales

Los conceptos de señales y sistemas aparecen en una variedad muy amplia de campos, las ideas y técnicas asociadas con estos conceptos juegan un papel importante en áreas tan

diversas de la ciencia y tecnología como comunicaciones, aeronáutica y astronáutica, diseño de circuitos, acústica, sismología, ingeniería biomédica, sistemas de generación y distribución de energía, control de procesos químicos y procesamiento de voz.

Si bien la naturaleza física de las señales y sistemas que aparecen en estas disciplinas tan diversas pueden ser diametralmente diferentes, todos ellos tienen en común dos características básicas.

Mientras que las señales son funciones de una o más variables independientes y contienen información acerca de la naturaleza o comportamiento de algún fenómeno, los sistemas responden a señales particulares produciendo otras señales.

Los voltajes y corrientes como funciones del tiempo en un circuito eléctrico son ejemplos de señales, y el circuito es, en sí, un ejemplo de un sistema, el cual, en este caso, responde a los voltajes y corrientes que se le aplican. Por citar otro ejemplo, cuando el conductor de un automóvil presiona el pedal del acelerador, el automóvil responde incrementando la velocidad del vehículo. En este caso, el sistema es el automóvil, la presión sobre el pedal del acelerador es la entrada del sistema, y la velocidad del automóvil la respuesta.

Un programa de computadora para el diagnóstico automático de electrocardiogramas puede ser considerado como un sistema, que tiene como entrada un electrocardiograma digitalizado y como salida produce estimaciones de parámetros como el ritmo cardíaco. Una cámara es un sistema que recibe luz directa de diferentes fuentes y/o reflejada desde los objetos, y produce una fotografía.

En la gran variedad de contextos en los que aparecen las señales y los sistemas, hay una diversidad de problemas y cuestiones que se deben tomar en cuenta. En algunos casos, se presenta un sistema específico y debe ser caracterizado con detalle para entender cómo responderá a diversas entradas.

Otra clase muy importante de aplicaciones en las que aparecen los conceptos y técnicas del análisis de señales y sistemas son aquellas en las que se desea modificar las características de un sistema dado, quizá a través de la selección de señales de entrada específicas o combinando el sistema con otros sistemas. Un ejemplo de esta clase de aplicaciones es el control de plantas químicas, un área en general referida como control de procesos. En esta clase de aplicaciones, un conjunto de sensores miden las señales físicas, como temperatura, humedad, proporciones químicas y otras, y con base en estas mediciones, un sistema regulador genera señales de control para regular el proceso químico en marcha. Un segundo ejemplo está relacionado con el hecho de que algunos aviones de características muy avanzadas son representativos de sistemas inherentemente inestables, en otras palabras, sus características aerodinámicas son tales que sin señales de control diseñadas en forma cuidadosa, serían inmanejables. Tanto en este caso, como en el ejemplo anterior del control de procesos, el concepto conocido como retroalimentación juega un papel principal.

1.14 Tipos de señales

En el párrafo anterior se comentó acerca de las señales y su tipo, para resumir básicamente se reconocen las señales como analógicas las cuales a su vez pueden ser continuas o discretas, las señales analógicas para poder ser tratadas por computadoras requieren de su conversión a señales digitales.

1.15 Señal analógica

Se define como funciones continuas, como una gráfica de voltaje contra tiempo, o desplazamiento contra presión.

1.16 Señal discreta

Consiste en un número de pulsos discretos y discontinuos cuya relación de tiempo contiene información referente a la magnitud o naturaleza de la cantidad.

1.17 Señal eléctrica

Una señal eléctrica es una señal analógica que puede tener características discretas o continuas, usualmente se mide en Voltios (V), milivoltios (mV), Amperios (A) o miliamperios (mA). En instrumentación se emplea un rango entre 4 y 20 mA c. c. para definir la corriente de salida del instrumento de medición. En este caso la señal captada debe ser transformada haciendo que el valor menor de la escala de valores a ser sensados coincida con 4 mA y el mayor con 20mA.

1.18 Señal neumática

Como su nombre lo indica una señal neumática emplea aire como salida del instrumento de medición. La presión estándar está en el rango de 3 a 15 psi.

1.19 Señal Hart

Las señales "HART" Highway Addressable Remote Transducer" es un protocolo de comunicación que funciona con datos digitales que se transmiten a lo largo de una señal analógica de 4 a 20 mA, sin interferir la señal analógica. Además, permite comunicación bidireccional, posee la modalidad digital que permite conectar hasta 15 instrumentos a un solo cable; esta señal permite manejar hasta 256 variables en cada dispositivo de campo.

Por muchos años, el estándar de comunicación para equipos de procesos automáticos, ha sido fijado en una señal de corriente analógica en miliamperios (mA). La señal de corriente en mA, varía entre 4 y 20 mA en proporción a la variable que se esté midiendo. En una aplicación típica, la señal de 4 mA correspondería al límite inferior del rango de calibración, mientras que 20 mA, corresponderá al límite superior. Si un sistema está calibrado de 0 a 100 Psi, entonces una señal analógica de 12 mA (50 % del Rango), correspondería a 50 Psi.

Virtualmente todos los sistemas utilizan este estándar internacional para comunicar variables de proceso.

Es necesaria la conversión de señales analógica de los sensores, (bien sean del tipo de Celda de carga o por Variación de Capacitancia) en señales digitales, para poder tanto comparar con las tablas en memoria, que permiten ajustar y compensar por efectos tales como la Temperatura (Patrones de Calibración), como definir la calibración del instrumento dentro de la Rangeabilidad del sensor. Los Transmisores con esta habilidad son los llamados TRANSMISORES INTELIGENTES, y para poder Configurarlos, se necesita definir un sistema de comunicación.

El protocolo de Comunicación HART, para instrumentos de campo (los Transmisores de Presión son Instrumentos de Campo), extiende el estándar 4-20 mA, para mejorar la comunicación con instrumentos de campo Inteligentes. HART permite comunicación digital direccional a lo largo de los conductores de la señal analógica 4 - 20 mA, sin alterar su integridad. Esto permite que los valores de presión sean transmitidos con una señal de 4 - 20 mA, mientras que al mismo tiempo se intercambie información adicional con el Transmisor (Configuración del Transmisor, Calibración, Diagnóstico, etc.). En el protocolo HART la señal digital se transmite por medio de dos frecuencias individuales, 1200 Hz y 2200 Hz, representando respectivamente bits 1 y 0. El seno de la onda de frecuencia se superpone en la corriente directa. El tiempo de respuesta es de aproximadamente 500 ms, por cada dispositivo del campo. Esto se logra con la asignación de direcciones a cada instrumento, ejemplo: 1, 2, 3,..., 15, etc.

El protocolo HART, utiliza el Código Estándar de Cambio de Frecuencia Bell 202, para súper imponer señales digitales de comunicación, a bajo nivel, sobre la señal de 4 - 20 mA. (Bell 202 Frequency Shift Keying o FSK).

El Protocolo HART, se comunica a 1200 bps, sin interrumpir la señal de 4 - 20 mA y le permite al Maestro (en una aplicación residente) tener dos o más actualizaciones por segundo de los Instrumentos de Campo (esclavos). Como la señal digital FSK es de fase continua, no hay interferencia con la señal 4 - 20 mA.

Entonces HART es un protocolo del tipo Maestro - Esclavos, lo que significa que los instrumentos de campo o sea, los Esclavos, sólo hablan cuando el Maestro les habla. Esto no significa (que no se pueda establecer una comunicación tipo BURST, con un sólo Transmisor el cual está transmitiendo continuamente). En este caso la actualización es de 3 a 4 veces por segundo.

Esto permite comunicación de campo Bidireccional, además de hacer posible el intercambio de información, mas allá de la Variable de Proceso, desde y hacia el instrumento de campo Inteligente.

Esta es la razón por la cual este tipo de comunicación se haya impuesto (estimados 1.4 millones de aparatos con habilidad HART se han instalado mundialmente), ya que ha mejorado substancialmente la eficiencia de plantas alrededor del mundo. Esto explica el porqué la fundación HART, que comenzó por un puñado de fabricantes de equipos, que deseaban estandarizar la comunicación entre sus instrumentos de campo, se haya convertido en una organización cuyo directorio está compuesto por varias decenas de manufactureras, llegando aún a fabricar sus comunicadores, a pesar de ser una corporación sin fines de lucro.

La Fundación de Comunicación HART, apoya a la industria en general, y a sus miembros, como la fuente oficial de información a nivel mundial en lo que a Tecnología HART se refiere.

1.20 Transmisión de la señal

Se emplean los transmisores para captar la variable de proceso (a través de un sensor o elemento primario) y la transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Los transmisores pueden ser neumáticos o

electrónicos, dependiendo de ello, la señal será de 3 a 15 psi o de 4 a 20 mA. El elemento primario puede ser o no parte integral del transmisor.

1.21 Unidad terminal remota (RTU)

Son unidades que tienen por función recoger toda la información de los instrumentos instalados en campo y transmitir los datos a la Unidad Terminal Maestro (MTU), localizadas en las salas de control o las salas externas a la estación. Las estaciones remotas transmiten información de los equipos en campo a través de unidades de interfaces de procesos normales, usándose como plataforma de comunicación corrientes analógicas, señales de circuitos digitales y/o cualquier red de comunicación digital.

1.22 Unidad de lógica y procesamiento (PLC)

El sistema del PLC "Programmable Logic Controller" consiste en una unidad central que recoge todas las señales de entradas lógicas de los procesos de la planta, posee un sistema de procesador central, el cual esta formado por uno o más microprocesadores que le dan rendimiento a la señal y le ayuda al operador de la planta a dirigir todos los procesos que están enlazados al sistema.

Esta especificación es requisito genérico de un sistema de PLC, a continuación se dan detalles de los requerimientos para implantar un sistema de control en una planta de proceso real donde los procesos son dirigidos por un sistema de PLC:

- Los diagramas de control de proceso.
- Los detalles de medida y funciones de control.
- Los diagramas circuitos
- El programa del instrumento.
- El diagrama del bloque de sistema.
- El suministro de energía.
- Sistema conectado a tierra.

1.23 Normas.

El proyecto de sistemas instrumentados de control de procesos requiere del auxilio de diagramas del circuito de instrumentos donde se indique claramente los tipos de instrumentos, señales con las que se comunicarán, ubicación relativa de los elementos que conformarán el circuito, etc... La Sociedad de Instrumentación de los Estados Unidos (**ISA**: Instrument Society of America) es una de las organizaciones mas importantes que han dedicado esfuerzo en la normalización de este campo de trabajo, ella tiene por objeto establecer sistemas de designación (código y símbolos) de aplicación a las industrias químicas, petroquímica, aire acondicionado, etc.

A continuación se presenta un resumen de las normas ISA-S5.1 de ANSI/ISA 1984, anteriormente ANSI Y32.20, sobre instrumentación de medición y control, de ISA-S5.2 Binary Logic Diagrams for Process Operations 1973 sobre símbolos de operaciones binarias de procesos, y de ISA-S5.3 Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems 1982, sobre símbolos de sistemas de microprocesadores con control compartido. Hay que señalar que estas normas no son de uso obligatorio sino que constituyen una recomendación a seguir en la identificación de los instrumentos en la industria.

a) Resumen Norma ISA-S5.1

Generalidades

A) Cada instrumento debe identificarse con sistema de letras que lo clasifique funcionalmente. Una identificación representativa es la siguiente:

<i>TRC</i>		<i>2A</i>	
Primera Letra	Letras sucesivas	Número del circuito	Sufijo (No se usa normalmente)
Identificación Funcional		Identificación del circuito	

B) El número de letras funcionales para un instrumento debe ser mínimo, no excediendo de cuatro.

Para ello conviene:

a) Disponer las letras en subgrupos. Por ejemplo, un transmisor registrador de relación de caudales con un interruptor de alarma de relación de caudales puede identificarse con dos círculos uno con FFRT-3 y el otro FFS-3.

b) En un instrumento que indica y registra la misma variable medida puede omitirse la letra (indicación).

c) Los circuitos de instrumentos de un proyecto o secciones de un proyecto deben identificarse con una secuencia única de números. Ésta puede empezar con el número 1 o cualquier otro número conveniente, tal como 301 o 1201 que puede incorporar información codificada tal como área de planta.

d) Si un circuito dado tiene más de un instrumento con la misma identificación funcional, es preferible añadir un sufijo, ejemplo FV-2A, FV-2B, FV-2C, etc., o TE-25-1, TE-25-2, TE-25-3, etc. Estos sufijos pueden añadirse obedeciendo a las siguientes reglas:

1. Deben emplearse letras mayúsculas. A, B, C, etc.

2. En un instrumento tal como un registrador de temperatura multipunto que imprime números para identificación de los puntos, los elementos primarios pueden numerarse TE-25-1, TE-25-2, TE-25-3, etcétera.

3. Las subdivisiones interiores de un circuito pueden designarse por sufijos formados por letras y números.

4. Un instrumento que realiza dos o más funciones puede designarse por todas sus funciones. Por ejemplo, un registrador de caudal FR-2 con pluma de presión PR-4 se designa preferentemente FR-2/PR-4 o bien UR-7; un registrador de presión de dos plumas como PR-7/8; y una ventanilla de alarma para temperatura alta y baja como TAH/L-9.

5. Los accesorios para instrumentos tales como rotámetros de purga, filtros manorreductores y potes de sello que no están representados explícitamente en un diagrama de flujo, pero que necesitan una identificación para otros usos deben tenerla de acuerdo con su función y deben emplear el mismo número del bucle que el del instrumento asociado. Alternativamente, los accesorios pueden emplear el mismo número de identificación que el de sus instrumentos asociados, pero con palabras aclaratorias si ello es necesario. Por consiguiente, una brida para una placa-orificio FE-7 debe designarse como FX-7 o bien como FE-7 brida. Un rotámetro regulador de purga asociado con un manómetro PI-8 debe identificarse como FICV-8, pero puede también marcarse PI-8 purga. Una sonda empleada con un termómetro TI-9 será TW-9, o bien, TI-9 sonda.

TABLA 1.2. Letras de Identificación

1º Letra		Letras sucesivas		
Variable medida (3)	Letra de modificación	Función de lectura pasiva	Función de salida	Letra de modificación
A Análisis (4)	Alarma	.....	.....
B Llama (quemador)	Libre (1)	Libre (1)	Libre (1)
C Conductividad	Control	.....
D Densidad o peso específico	Diferencial (3)	.....	.....	.....
E Tensión (f.e.m.)	Elemento primario	.....	.....
F Caudal	Relación (3)	.....	.....	.....
G Calibre	Vidrio (8)	.....	.....
H Manual	Alto (6) (13) (14)
I Corriente eléctrica	Indicación (9) o indicador	.....	.....
J Potencia	Exploración (6)	.....	.....	.....
K Tiempo	Estación de control	.....
L Nivel	Luz piloto (10)	.....	Bajo (6) (13) (14)
M Humedad	Medio o intermedio (6) (13)
N Libre (1)	Libre	Libre	Libre
O Libre (1)	Orificio	.....	.....
P Presión o vacío	Punto de prueba	.....	.....
Q Cantidad	Integración (3)	.....	.....	.....
R Radiactividad	Registro	.....	.....
S Velocidad o frecuencia	Seguridad (7)	.....	Interruptor	.....
T Temperatura	Transmisión o transmisor	.....
U Multivariable (5)	Multifunción(11)	Multifunción(11)	Multifunción(11)
V Viscosidad	Válvula	.....
W Peso o Fuerza	Vaina	.....	.....
X Sin clasificar (2)	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y Libre (1)	Relé o computador (12)	.....
Z Posición	Elemento final de control sin clasificar	.....

Notas Aclaratorias Para la Tabla 1.2

1. Para cubrir las designaciones no normalizadas que pueden emplearse repetidamente en un proyecto se han previsto letras libres. Estas letras pueden tener un significado como primera letra y otro como letra sucesiva. Por ejemplo, la letra N puede representar como primera letra el módulo de elasticidad y como sucesiva un osciloscopio.
2. La letra sin clasificar X, puede emplearse en las designaciones no indicadas que se utilicen sólo una vez o un número limitado de veces. Se recomienda que su significado figure en el exterior del círculo de identificación del instrumento. Ejemplo: XR-3 registrador de vibración.
3. Cualquier letra primera si se utiliza con las letras de modificación D (diferencial), F (relación) o Q (integración) o cualquier combinación de las mismas cambia su significado para representar una nueva variable medida. Por ejemplo, los instrumentos TDI y TI miden dos variables distintas: la temperatura diferencial y la temperatura, respectivamente.
4. La letra A para análisis, abarca todos los análisis no indicados en la tabla 1.2, que no están cubiertos por una letra libre. Es conveniente definir el tipo de análisis al lado del símbolo en el diagrama de proceso.
5. El empleo de la letra U como multivariable en lugar de una combinación de primeras letras, es opcional.
6. El empleo de los términos de modificaciones alto, medio, bajo, medio o intermedio y exploración, es preferible pero opcional.

7. El término seguridad, debe aplicarse sólo a elementos primarios y a elementos finales de control que protejan contra condiciones de emergencia (peligrosas para el equipo o el personal). Por este motivo, una válvula autorreguladora de presión que regula la presión de salida de un sistema, mediante el alivio o escape de fluido al exterior, debe ser PCV, pero si esta misma válvula se emplea contra condiciones de emergencia, se designa PSV. La designación PSV se aplica a todas las válvulas proyectadas para proteger contra condiciones de emergencia de presión sin tener en cuenta si las características de la válvula y la forma de trabajo la colocan en la categoría de válvula de seguridad, válvula de alivio, o válvula de seguridad de alivio.

8. La letra de función pasiva vidrio, se aplica a los instrumentos que proporcionan una visión directa no calibrada del proceso.

9. La letra indicación se refiere a la lectura de una medida real de proceso. No se aplica a la escala de ajuste manual de la variable si no hay indicación de ésta.

10. Una luz piloto que es parte de un bucle de control debe designarse por una primera letra seguida de la letra sucesiva L. Por ejemplo, una luz piloto que indica un período de tiempo terminado se designará KL. Sin embargo, si se desea identificar una luz piloto fuera del bucle de control, la luz piloto puede designarse en la misma forma o bien alternativamente por una letra única L. Por ejemplo, una luz piloto de marcha de un motor eléctrico puede identificarse EL, suponiendo que la variable medida adecuada es la tensión, o bien XL, suponiendo que la luz es excitada por los contactos eléctricos auxiliares del arrancador del motor, o bien simplemente L. La actuación de la luz piloto puede ser acompañada por una señal audible.

11. El empleo de la letra U como multifunción en lugar de una combinación de otras letras, es opcional.

12. Se supone que las funciones asociadas con el uso de la letra sucesiva Y se definirán en el exterior del símbolo del instrumento cuando sea conveniente hacerlo así.

13. Los términos alto, bajo y medio o intermedio deben corresponder a valores de la variable medida, no a los de la serial a menos que se indique de otro modo. Por ejemplo, una alarma de nivel alto derivada de una señal de un transmisor de nivel de acción inversa debe designarse LAH incluso aunque la alarma sea actuada cuando la señal cae a un valor bajo.

14. Los términos alto y bajo, cuando se aplican a válvulas, o a otros dispositivos de cierre apertura, se definen como sigue:

Alto: indica que la válvula está, o se aproxima a la posición de apertura completa.

Bajo: denota que se acerca o está en la posición completamente cerrada.

La figura 1.7 ilustra los símbolos a emplear en los planos y dibujos de representación de instrumentos en los procesos industriales.

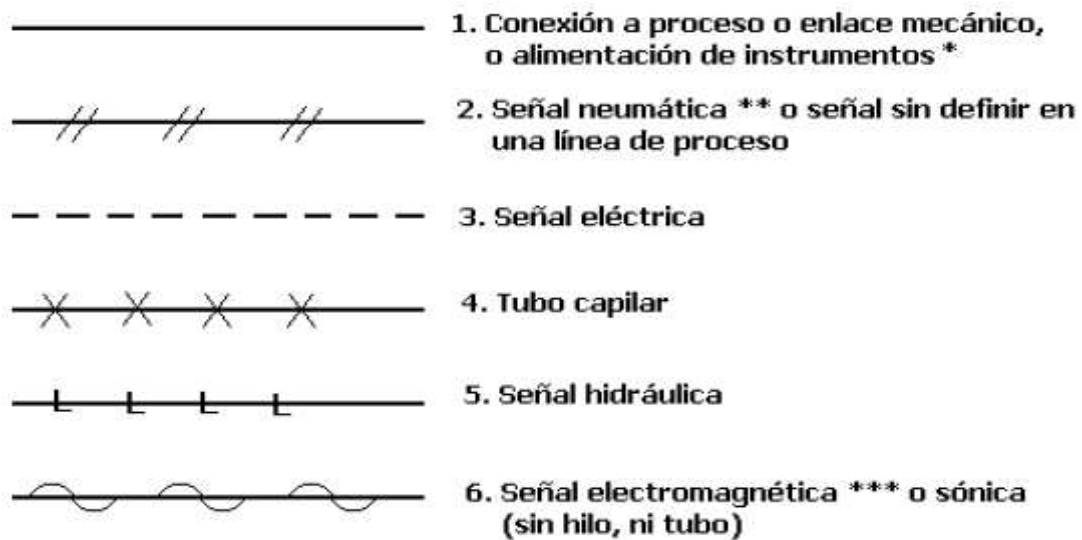


Figura 1.7. Simbología a emplear en planos y dibujos de representación de instrumentos en procesos industriales. (Ver Tabla 1.3, nota de llamada con *).




TABLA 1.3. Abreviaturas sugeridas para representar el tipo de alimentación (o bien de purga de fluidos)




*	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

** El símbolo se aplica también a cualquier señal que emplee gas como medio de transmisión. Si se emplea un gas distinto del aire debe identificarse con una nota al lado del símbolo o bien de otro modo.


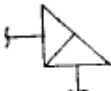



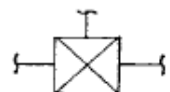
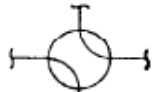
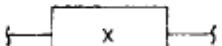
*** Los fenómenos electromagnéticos incluyen calor, ondas de radio, radiación nuclear y luz. En las próximas páginas se mostrarán la representación de los Símbolos generales, símbolos para válvulas de control, símbolos para actuadores, autorreguladores y muchos otros. Estos símbolos es un resumen de la norma ISA.

Símbolos generales



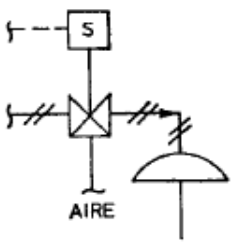
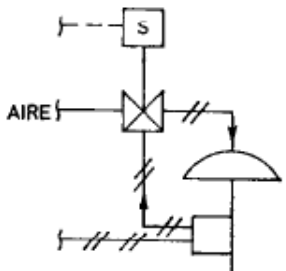
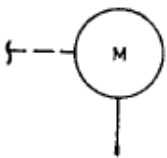
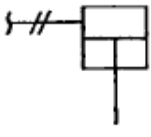
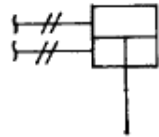
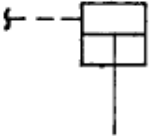


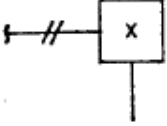
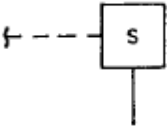

 <p>Ø aprox. 7/16" = 11,1mm</p> <p>LOCAL</p>	 <p>1</p> <p>MONTAJE EN PANEL 1</p>	 <p>MONTAJE DETRAS DEL PANEL</p>	
<p>INSTRUMENTO PARA UNA VARIABLE MEDIDA CON CUALQUIER NÚMERO DE FUNCIONES</p>			

 <p>MONTAJE LOCAL</p>	 <p>MONTAJE EN PANEL</p>	 <p>AUX.</p> <p>MONTAJE DETRAS DE PANEL AUXILIAR</p>	
<p>INSTRUMENTO PARA DOS VARIABLES MEDIDAS. OPCIONALMENTE INSTRUMENTO CON MÁS DE UNA FUNCIÓN. PUEDEN AÑADIRSE CÍRCULOS ADICIONALES SI SE PRECISAN</p>			


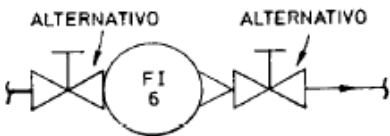
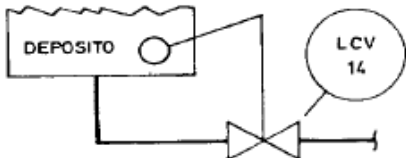

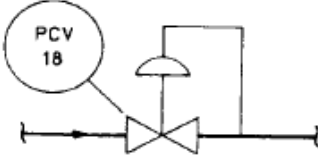
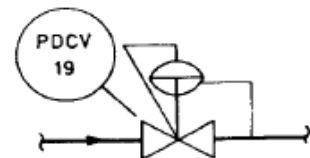
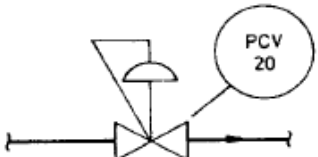
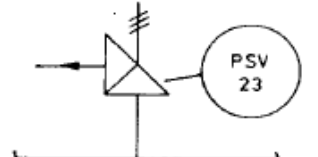
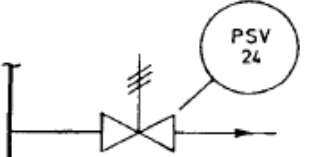
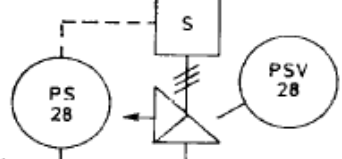
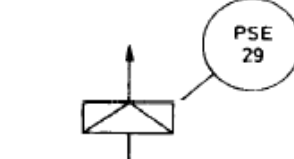
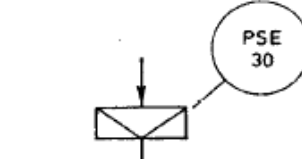
Símbolos para válvulas de control

 <p>GLOBO, COMPUERTA U OTRA</p>	 <p>ANGULO</p>	 <p>MARIPOSA, PERSIANA O COMPUERTA</p>	 <p>OBTURADOR ROTA- TIVO O VÁLVULA DE BOLA</p>
 <p>TRES VIAS</p>	 <p>ALTERNATIVA 1</p>	 <p>ALTERNATIVA 2</p>	
<p>CUATRO VIAS</p>			
 <p>SIN CLASIFICAR</p>			

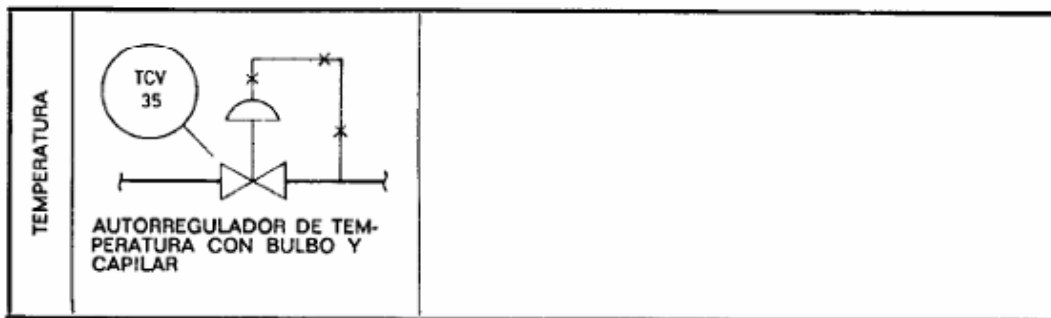
Simbolos para actuadores

 <p>SIN POSICIONADOR</p>	 <p>PREFERIDA PARA DIAFRAGMA CON PILOTO (POSICIONADOR VALVULA SOLENOIDE, ...)</p>	 <p>PREFERIDO</p>	 <p>OPCIONAL</p>
<p>DIAFRAGMA CON MUELLE</p>		<p>DIAFRAGMA CON MUELLE, POSICIONADOR Y VALVULA PILOTO QUE PRESURIZA EL DIAFRAGMA AL ACTUAR</p>	
 <p>MOTOR ROTATIVO</p>	 <p>SIMPLE ACCIÓN</p>  <p>DOBLE ACCIÓN</p> <p>CILINDRO SIN POSICIONADOR U OTRO PILOTO</p>		
 <p>PREFERIDO PARA CUALQUIER CILINDRO</p>	 <p>ACTUADOR MANUAL</p>	 <p>ELECTROHIDRAULICO</p>	
 <p>SIN CLASIFICAR</p>	 <p>SOLENOIDE</p>	 <p>PARA VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD (DENOTA UN MUELLE, PESO, O PILOTO INTEGRAL)</p>	

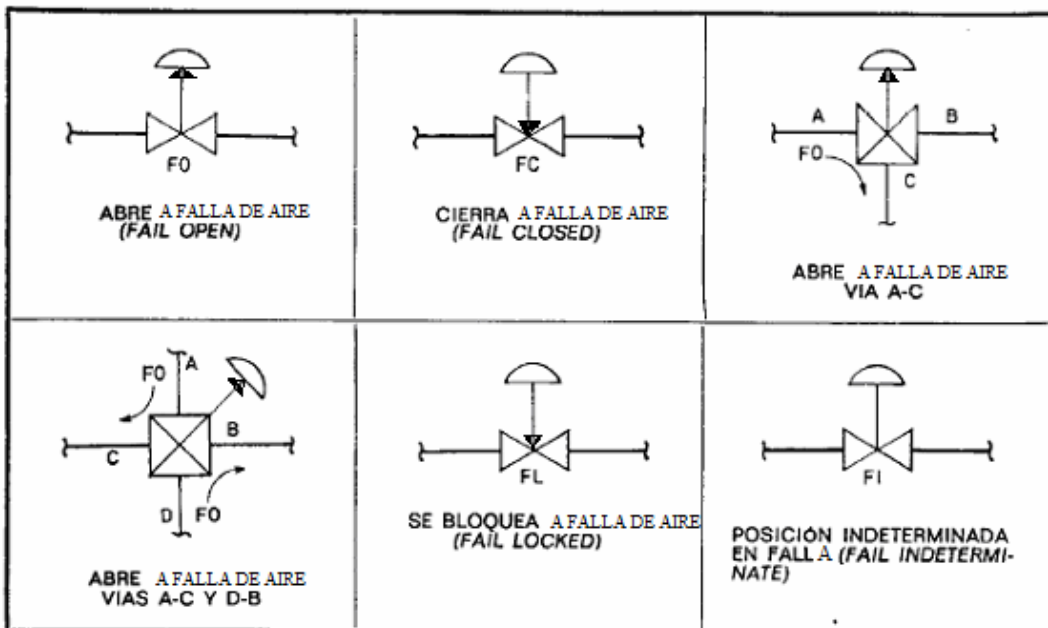
Autoreguladores

CAUDAL	 <p>REGULADOR AUTOMÁTICO CON INDICACIÓN INTEGRAL DEL CAUDAL</p>	 <p>ALTERNATIVO ALTERNATIVO</p> <p>ROTAMETRO INDICADOR CON VALVULA 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 INTERIOR Y EXTERIOR</p>
	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN POSTERIOR CON TOMA INTERIOR</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ANGULO</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE PASO RECTO</p>
	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ANGULO DISPARADA POR SOLENOIDE</p>	 <p>DISCO DE RUPTURA PARA PRESIÓN</p>	 <p>DISCO DE RUPTURA PARA VACIO</p>

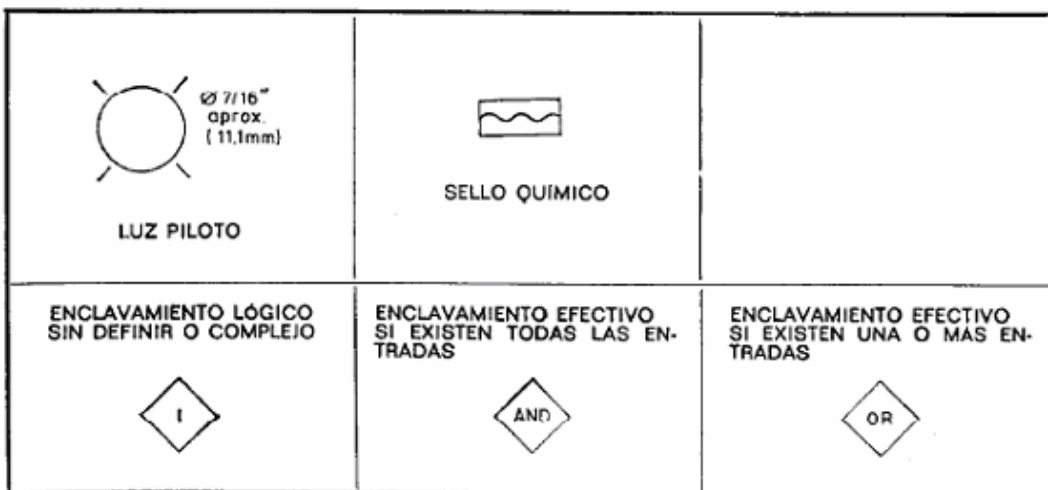
Autorreguladores (Cont.)



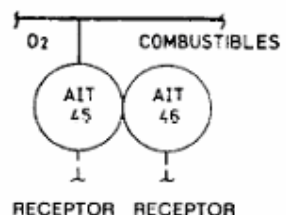
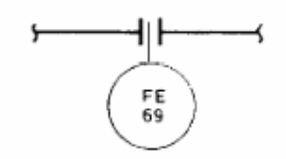
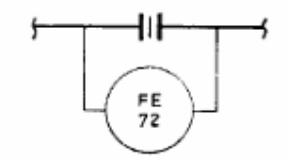
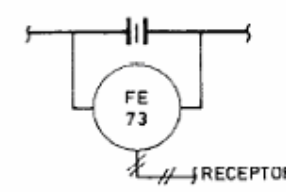
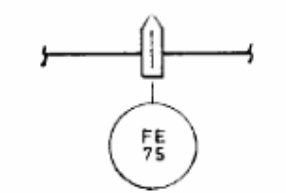
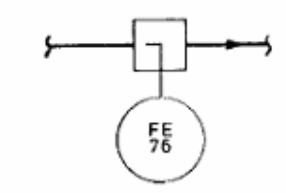
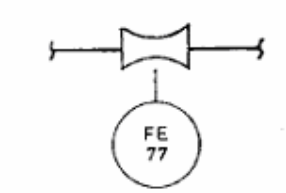
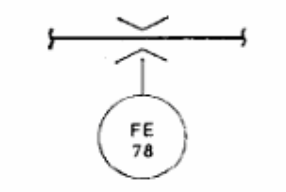
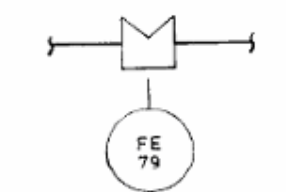
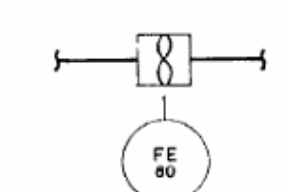
Acción del actuador en caso de fallo de aire (o de potencia)



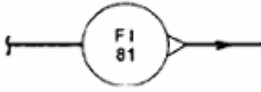

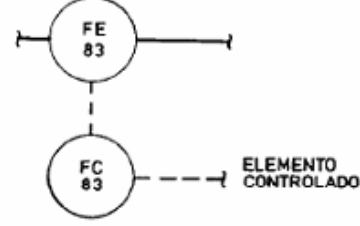
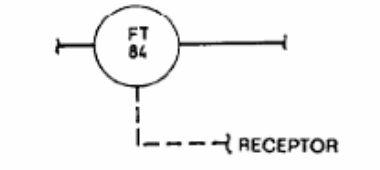
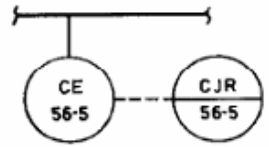
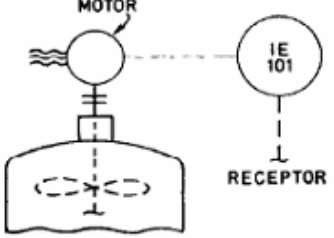
Símbolos varios



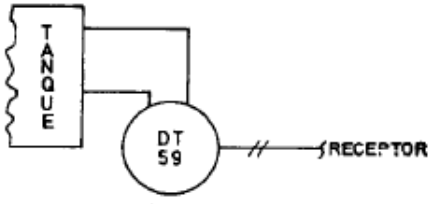
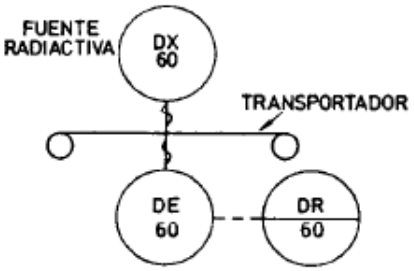
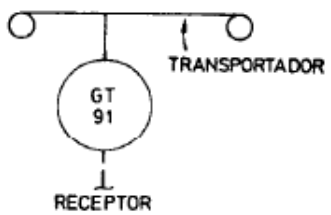
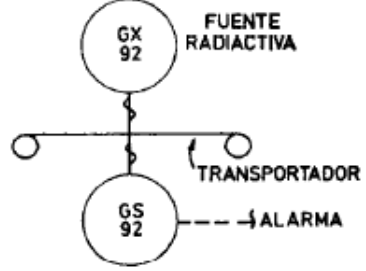
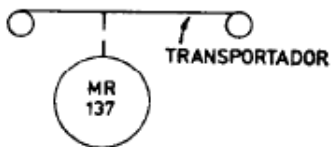
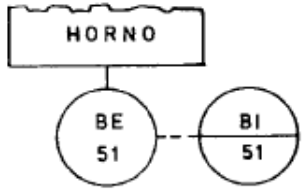
Elementos primarios

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">ANALISIS</p> <p style="text-align: center;">A</p>	 <p style="text-align: center;">RECEPTOR RECEPTOR</p> <p style="text-align: center;">ANALISIS DOBLE DE OXI- GENO Y COMBUSTIBLE</p>		
	 <p style="text-align: center;">PLACA-ORIFICIO CON TO- MAS EN LA BRIDA O EN LA CAMARA ANULAR</p>	 <p style="text-align: center;">PLACA-ORIFICIO CON TO- MAS EN LA VENA CONTRAI- DA, RADIALES O EN LA TU- BERIA</p>	 <p style="text-align: center;">PLACA-ORIFICIO CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PRE- SION DIFERENCIAL</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">FLUJO</p> <p style="text-align: center;">F</p>	 <p style="text-align: center;">PLACA-ORIFICIO CON AC- CESORIO DE CAMBIO RA- PIDO</p>	 <p style="text-align: center;">TUBO PITOT O TUBO VENTURI-PITOT</p>	 <p style="text-align: center;">TUBO VENTURI O TOBERA</p>
	 <p style="text-align: center;">CANAL MEDIDOR</p>	 <p style="text-align: center;">VERTEDERO</p>	 <p style="text-align: center;">ELEMENTO DE TURBINA</p>


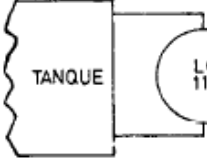
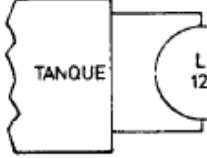
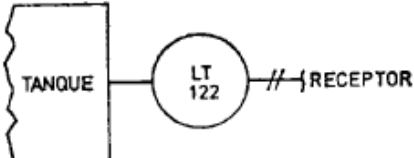
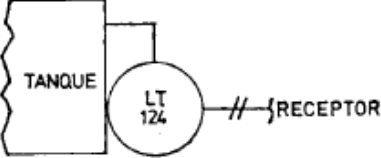
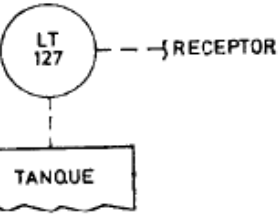
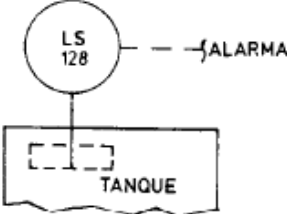
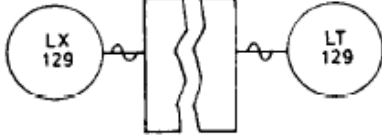
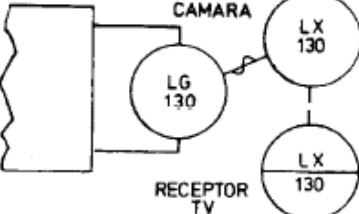
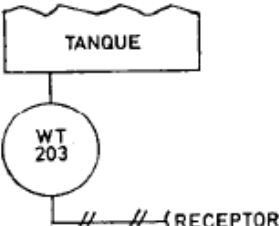
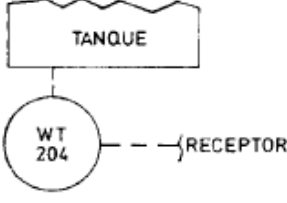
Elementos primarios (Cont.)

<p>F FLUJO</p>	 <p>F1 81</p> <p>ROTÁMETRO INDICADOR DE FLUJO</p>	 <p>FQI 82</p> <p>TOTALIZADOR INDICADOR DE CAUDAL DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO</p>	 <p>FE 83</p> <p>FC 83</p> <p>ELEMENTO CONTROLADO</p> <p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR, CONECTADO A UN CONTROLADOR DE FLUJO</p>
	 <p>FT 84</p> <p>RECEPTOR</p> <p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR CON TRANSMISOR</p>		
<p>G CONDUCTIVIDAD</p>	 <p>CE 56-5</p> <p>CJR 56-5</p> <p>CÉLULA DE CONDUCTIVIDAD CONECTADA AL PUNTO 5 DE UN REGISTRADOR MÚLTIPLE</p>		
<p>I CORRIENTE</p>	 <p>MOTOR</p> <p>IE 101</p> <p>RECEPTOR</p> <p>TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD MIDIENDO CORRIENTE DE UN MOTOR</p>		

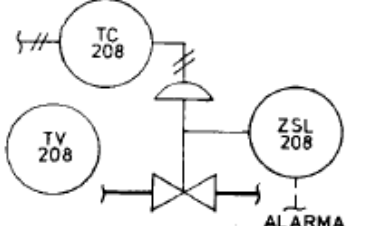
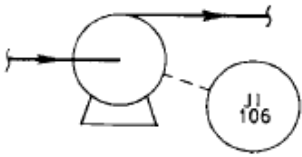
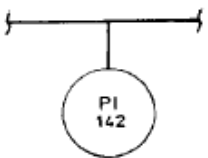
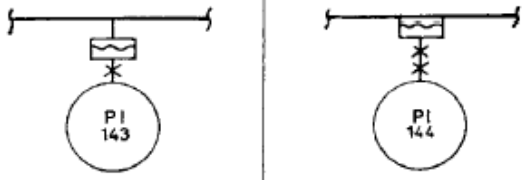
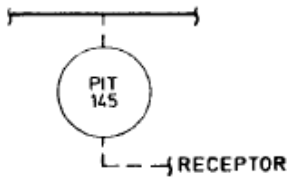
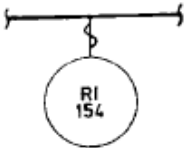
Elementos primarios (Cont.)

<p>D DENSIDAD O PESO ESPECIFICO</p>	 <p>TRANSMISOR DE DENSIDAD DE PRESION DIFERENCIAL</p>	 <p>ELEMENTO RADIATIVO DE DENSIDAD CONECTADO A UN REGISTRADOR EN PANEL</p>
<p>G ESPESOR</p>	 <p>TRANSMISOR DE RODILLO</p>	 <p>INTERRUPTOR DE ESPESOR RADIATIVO</p>
<p>M HUMEDAD</p>	 <p>REGISTRADOR DE HUMEDAD</p>	
<p>B LLAMA</p>	 <p>DETECTOR DE LLAMA CONECTADO A UN INDICADOR DE INTENSIDAD DE LLAMA</p>	

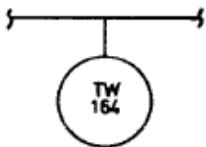
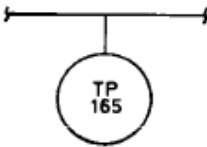
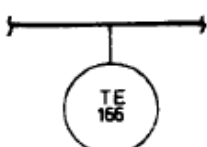
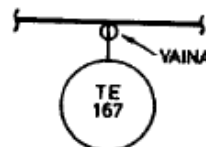
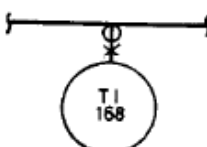
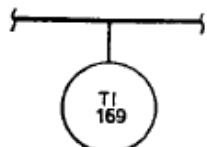
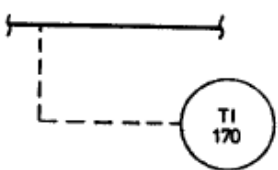
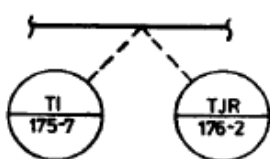
Elementos primarios (Cont.)

	 <p>TANQUE LG 117</p> <p>NIVEL DE VIDRIO INTEGRAL CON EL TANQUE</p>	 <p>TANQUE LG 118</p> <p>NIVEL DE VIDRIO DE CO-NEXIÓN EXTERNA</p>	 <p>TANQUE LI 120</p> <p>INDICADOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DE DESPLAZAMIENTO</p>	
L NIVEL	 <p>TANQUE LT 122 RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DESPLAZAMIENTO MONTADO EN EL EXTERIOR DEL TANQUE</p>	 <p>TANQUE LT 124 RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL DE PRESIÓN DIFERENCIAL MONTADO EN EL TANQUE</p>		
	 <p>LT 127 RECEPTOR</p> <p>TANQUE</p> <p>ELEMENTO DE NIVEL DE CAPACIDAD CONECTADO A UN TRANSMISOR DE NIVEL</p>	 <p>LS 128 ALARMA</p> <p>TANQUE</p> <p>INTERRUPTOR DE NIVEL DE SÓLIDOS DE PALETAS</p>		
	 <p>LX 129 RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL RADIATIVO O SONICO</p>	 <p>CAMARA LG 130 LX 130 LX 130</p> <p>RECEPTOR TV</p> <p>VISIÓN REMOTA DE UN NIVEL DE VIDRIO MEDIANTE CÁMARA DE TELEVISIÓN</p>		
W PESO O FUERZA	 <p>TANQUE WT 203 RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE PESO DE CONEXIÓN DIRECTA</p>	 <p>TANQUE WT 204 RECEPTOR</p> <p>GALGA EXTENSOMÉTRICA CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PESO</p>		

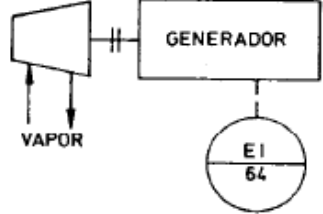
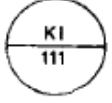
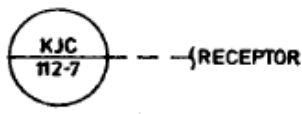
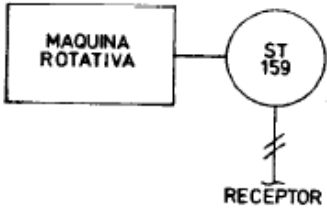
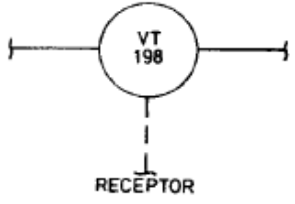
Elementos primarios (Cont.)

<p>Z</p> <p>POSICIÓN</p>	 <p>INTERRUPTOR DE FIN DE CARRERA ACCIONADO CUANDO LA VALVULA CIERRA A UNA POSICION PREDETERMINADA</p>	
<p>J</p> <p>POTENCIA</p>	 <p>VATIMETRO CONECTADO AL MOTOR DE UNA BOMBA</p>	
<p>P</p> <p>PRESION O VACIO</p>	 <p>MANÓMETRO</p>	 <p>CON LINEA DE PRESIÓN MONTAJE EN LINEA</p> <p>MANÓMETRO CON SELLO</p>
	 <p>ELEMENTO DE PRESION DE GALGA EXTENSOMETRICA CONECTADO A UN TRANSMISOR INDICADOR DE PRESION</p>	
<p>R</p> <p>RADIATIVIDAD</p>	 <p>INDICADOR DE RADIATIVIDAD</p>	

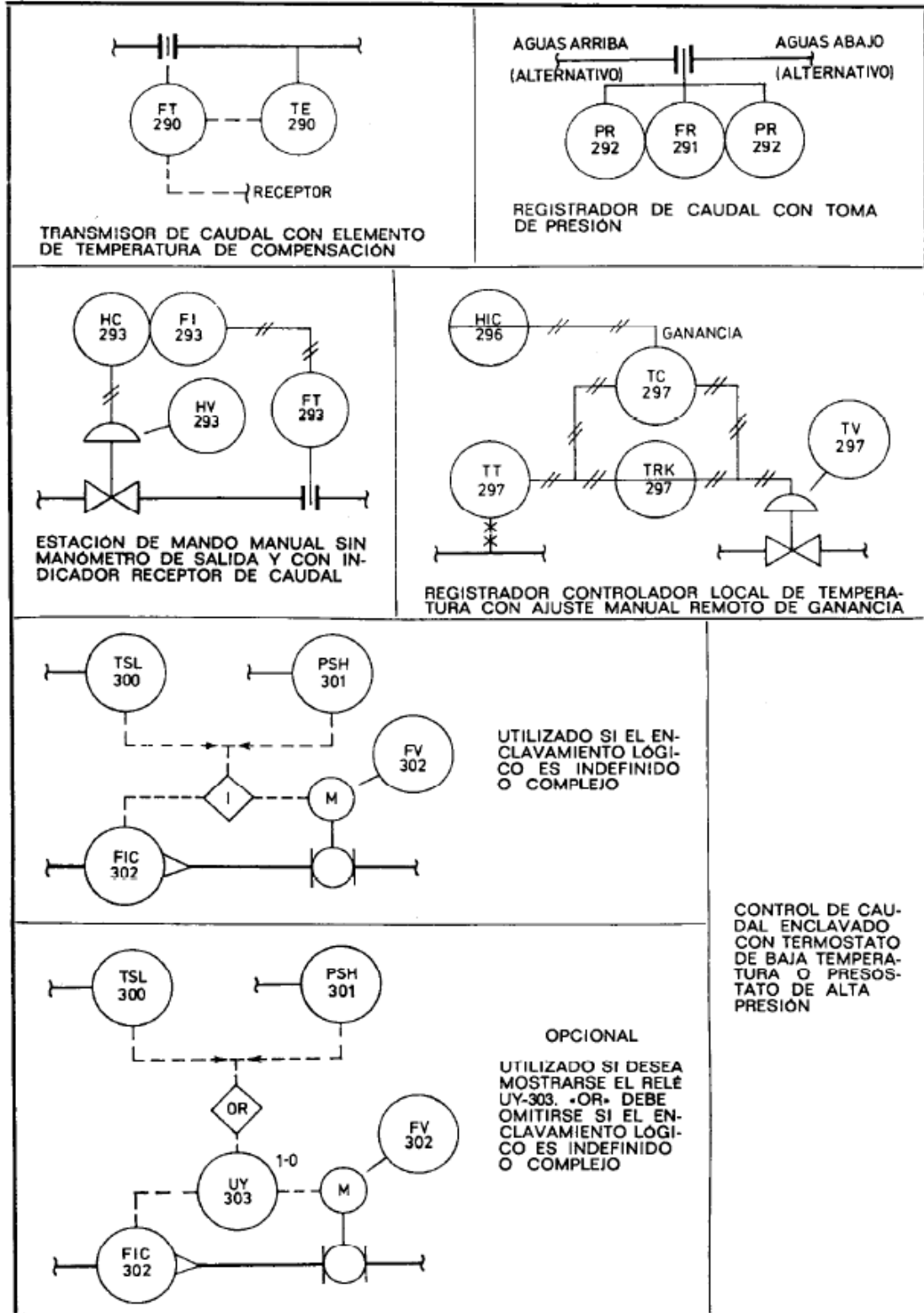
Elementos primarios (Cont.)

<p>T</p> <p>TEMPERATURA</p>			
	<p>CONEXIÓN DE ENSAYO DE TEMPERATURA CON VAINA</p>	<p>CONEXIÓN DE ENSAYO DE TEMPERATURA SIN VAINA</p>	<p>ELEMENTO DE TEMPERATURA SIN VAINA</p>
			
	<p>ELEMENTO DE TEMPERATURA CON VAINA</p>	<p>INDICADOR DE TEMPERATURA DE BULBO Y CAPILAR CON VAINA</p>	<p>TERMOMETRO BIMETALICO O DE VIDRIO U OTRO LOCAL</p>
			
<p>INDICADOR DE TEMPERATURA DE TERMOPAR O DE SONDA DE RESISTENCIA</p>			
			
<p>TERMOPAR DOBLE CONECTADO A UN INDICADOR Y UN REGISTRADOR MULTIPLE DE TEMPERATURA</p>			

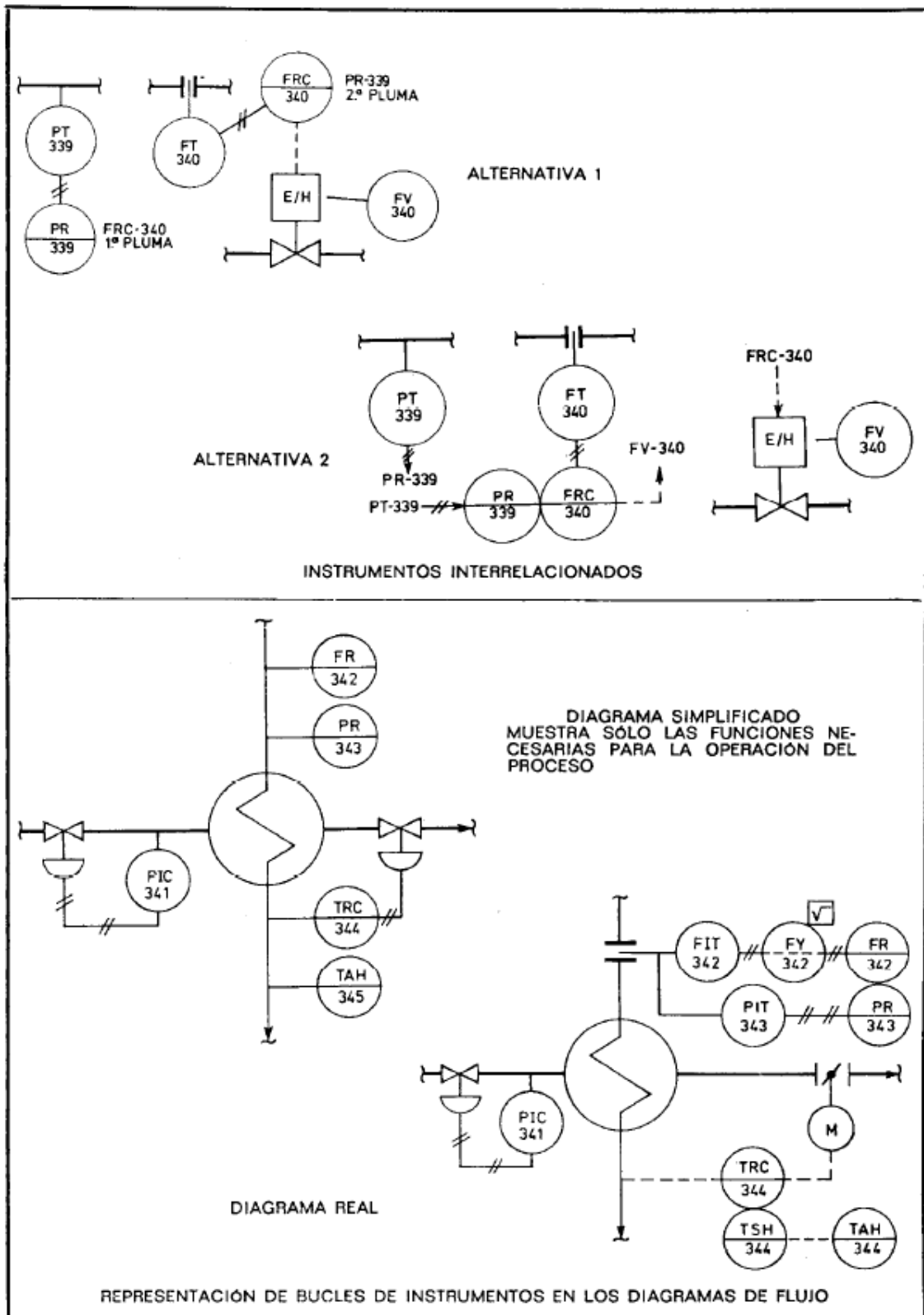
Elementos primarios (Cont.)

<p>E TENSION</p>	 <p>VOLTIMETRO INDICADOR CONECTADO A UN GENERADOR DE TURBINA</p>	
<p>K TIEMPO O PROGRAMADOR</p>	 <p>RELOJ</p>	 <p>PUNTO 7. PROGRAMADOR MULTIPUNTO. TODO-NADA</p>
<p>S VELOCIDAD O FRECUENCIA</p>	 <p>TRANSMISOR DE VELOCIDAD</p>	
<p>V VISCOSIDAD</p>	 <p>TRANSMISOR DE VISCOSIDAD</p>	

Sistemas varios



Sistemas varios (Cont.)



b) Resumen Norma ISA-S5.2

Esta norma lista los símbolos lógicos que representan operaciones de proceso binarias realizadas por cualquier clase de hardware, sea eléctrico, neumático, hidráulico u otro.

La existencia de una señal lógica puede corresponder físicamente a la existencia o no de una señal de instrumentos, dependiendo del tipo particular del sistema de hardware y de la filosofía del diseño del circuito. Por ejemplo, el proyectista puede diseñar una alarma de alto caudal para que sea accionada por un interruptor eléctrico en el que los contactos abran, o bien cierren, cuando el caudal es alto. Por lo tanto, la condición de caudal alto puede ser representada físicamente por la ausencia o por la presencia de una señal eléctrica.

El flujo de información está representado por líneas que interconectan estados lógicos. La dirección normal del flujo es de izquierda a derecha o de arriba abajo. Para mayor claridad del diagrama, y siempre que sea necesario, pueden añadirse flechas a las líneas de flujo.

Es posible que una condición lógica específica no sea comprendida cuando trate a un aparato con dos estados alternativos específicos. Por ejemplo, si una válvula no está cerrada, puede ser debido a que la válvula está totalmente abierta, o bien a que la válvula no está cerrada y está en una posición intermedia entre casi cerrada y totalmente abierta. La interpretación literal del diagrama indica que la segunda posibilidad es la correcta.

En las válvulas todo-nada el diagrama debe especificar exactamente lo proyectado. De este modo, si la válvula debe estar abierta, así debe establecerse; no debe indicarse que la válvula no está cerrada.

En contraste, un dispositivo tal como una bomba accionada por un motor, siempre está funcionando o parada salvo algunas situaciones especiales. El señalar que una bomba no está en funcionamiento significa que está parada.

Las siguientes definiciones se aplican a los aparatos que tienen posiciones abiertas, cerradas o intermedias:

- **Posición abierta:** Posición que está 100 % abierta.
- **Posición no abierta:** Posición que es menor de 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.

En un sistema lógico que tenga un estado de entrada derivado de modo inferencial o indirecto, puede presentarse una condición que conduzca a una conclusión errónea. Por ejemplo, la suposición de que existe caudal si una bomba está excitada, puede ser falsa porque una válvula puede estar cerrada, o porque el eje de la bomba esté roto o por otra causa.

La pérdida de alimentación —eléctrica, neumática u otra— a memorias o a otros elementos lógicos, puede afectar la operación del proceso, por lo que la fuente de alimentación o su pérdida debe entrarse como entrada lógica al sistema o a los elementos lógicos individuales. En las memorias, la fuente de alimentación puede entrarse como una entrada lógica o en la forma indicada en los diagramas. También puede ser necesario mostrar el efecto de la restauración de la alimentación.

Definiciones

En la tabla que aparece en las páginas anteriores se representan y definen los símbolos lógicos; los símbolos con tres entradas A, B y C son típicos de funciones lógicas con cualquier número de dos o más entradas. En las tablas de verdad, 0 indica la no existencia de la entrada lógica o de la señal de salida o el estado dado en la cabecera de la columna. 1 indica la existencia de la señal o estado de entrada lógica. D indica la existencia de la señal o estado de salida lógica como resultado de las entradas lógicas apropiadas.

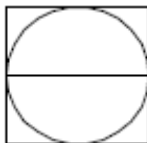
c) Resumen Norma ISA-S5.3

El objeto de esta norma es documentar los instrumentos formados por ordenadores, controladores programables, mini ordenadores y sistemas a microprocesador que disponen de control compartido, visualización compartida y otras características de interfase. Los símbolos representan la interfase con los equipos anteriores de la instrumentación de campo, de la instrumentación de la sala de control y de otros tipos de hardware.

El tamaño de los símbolos debe ser conforme a la norma ISA-S5.1, a la que complementa.

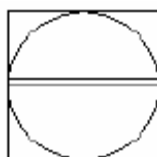
Símbolos de visualización del control distribuido /compartido

1. Accesible normalmente al operador-indicador /controlador /registrado o punto de alarma.



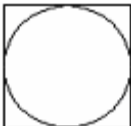
- (1) Visualización compartida.
- (2) Visualización y control compartidos.
- (3) Acceso limitado a la red de comunicaciones.
- (4) Interfase del operador en la red de comunicaciones.

2. Dispositivo de interfase auxiliar del operador.



- (1) Montado en panel; carátula analógica; no está montado normalmente en la consola principal del operador.
- (2) Controlador de reserva o estación manual.
- (3) El acceso puede estar limitado a la red de comunicaciones.
- (4) Interfase del operador vía la red de comunicaciones.

3. No accesible normalmente al operador.

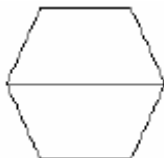


- (1) Controlador ciego compartido.
- (2) Visualización compartida instalada en campo.
- (3) Cálculo, acondicionamiento de la señal en controlador compartido.
- (4) Puede estar en la red de comunicaciones.
- (5) Normalmente operación ciega.
- (6) Puede ser alterado por la configuración.

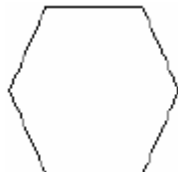
Símbolos del ordenador

A utilizar cuando los sistemas incluyen componentes identificados como ordenadores, diferentes de un procesador integral que excita las varias funciones de un sistema de control distribuido. El componente ordenador puede ser integrado en el sistema, vía la red de datos, o puede ser un ordenador aislado.

4. Normalmente accesible al operador-indicador / controlador / registrador o punto de alarma. Utilizado usualmente para indicar la pantalla video.



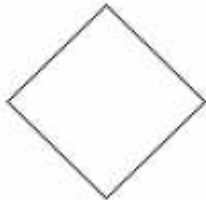
5. Normalmente no accesible al operador.



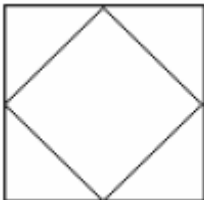
- (1) Interfase entrada / salida.
- (2) Cálculo / acondicionamiento de señal dentro de un ordenador.
- (3) Puede usarse como controlador ciego o como módulo de cálculo de software.

Símbolos de control lógico y secuencial

6. Símbolo general. Para complejos no definidos interconectando control lógico secuencial (ver ISA –S5.1)

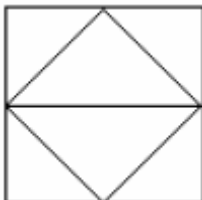


7. Control distribuido interconectando controladores lógicos con funciones lógicas binarias o secuenciales.



- (1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido.
- (2) No accesible normalmente al operador.

8. Control distribuido interconectando un controlador lógico con funciones lógicas binarias o secuenciales.



- (1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido.
- (2) Accesible normalmente al operador.

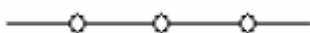
9. Cálculo / acondicionamiento de señal.



- (1) Para identificación de bloques consulte ISA-S5.1 tabla 2 "Designaciones de funciones para relés".
- (2) Para requerimientos de cálculos amplios, use la designación "C". Escriba aclaraciones en documentación suplementaria.
- (3) Utilizado en combinación con válvulas de alivio según ISAS5.1.

Símbolos comunes

10. Red del sistema.



- (1) Usado para indicar una red de software, o conexiones entre funciones suministradas en el sistema del fabricante.
- (2) Alternativamente, la red puede ser mostrada implícitamente por símbolos contiguos.
- (3) Puede utilizarse para indicar una red de comunicaciones a opción del usuario.

1.24 Tipos de instrumentos

Los instrumentos se pueden clasificar según la función que realizan y según la variable de proceso que evaluarán, por lo tanto:

a). **Según la función**, los instrumentos se agrupan en:

• **Instrumentos ciegos:** Estos son aquellos que no tienen indicación visible de la variable.

Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, tales como presostatos y termostatos (interruptores de presión y temperatura respectivamente) que poseen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar la variable el valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.

• **Instrumentos indicadores:** Estos disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en indicadores concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos.

• **Instrumentos registradores:** Estos 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.

Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de 1 revolución en 24 horas mientras que en los de gráfico rectangular la velocidad normal del gráfico es de unos 20 mm./hora.

• **Elementos primarios:** Ellos 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:** Estos 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./cm²) por lo cual, también se emplea la señal en unidades métricas 0,2 a 1 bar (0,2 a 1 Kg./cm²). 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., la señal normalizada es de 4-20 mA c.c. La señal digital utilizada en algunos transmisores inteligentes es apta directamente para ordenador. El elemento primario puede formar o no parte integral del transmisor; el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capilar y el segundo un transmisor de caudal con la placa orificio como elemento primario.

• **Transductores:** Estos 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 PP/I (presión de proceso a intensidad), un convertidor PP/P (presión de proceso a señal neumática), etc.

• **Convertidores:** Estos 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. 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). Este último término es general y no debe aplicarse a un aparato que convierta una señal de instrumentos.

• **Receptores:** Estos 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.

• **Controladores:** Estos comparan la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación. La variable controlada la pueden recibir directamente, como controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor.

• **Elemento final de control:** Este recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. En el control neumático, el elemento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su carrera completa de 3 a 15 psi (0,2-1 bar). En el control electrónico la válvula o el servomotor anteriores 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 eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico. Las señales neumáticas (3-15 psi o 0,2-1 bar o 0,2-1 Kg./cm²) 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.

b). Según la variable de proceso, los instrumentos se clasifican en:

Instrumentos de flujo, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, 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; 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, flujo, nivel o cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente; un registrador potenciométrico puede ser un instrumento de temperatura, de conductividad o de velocidad, según sean las señales medidas por los elementos primarios de termopar, electrodos o dínamo. Así mismo, 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 flujo, etc. En la figura 1.8 pueden verse la representación de los diversos instrumentos descritos.

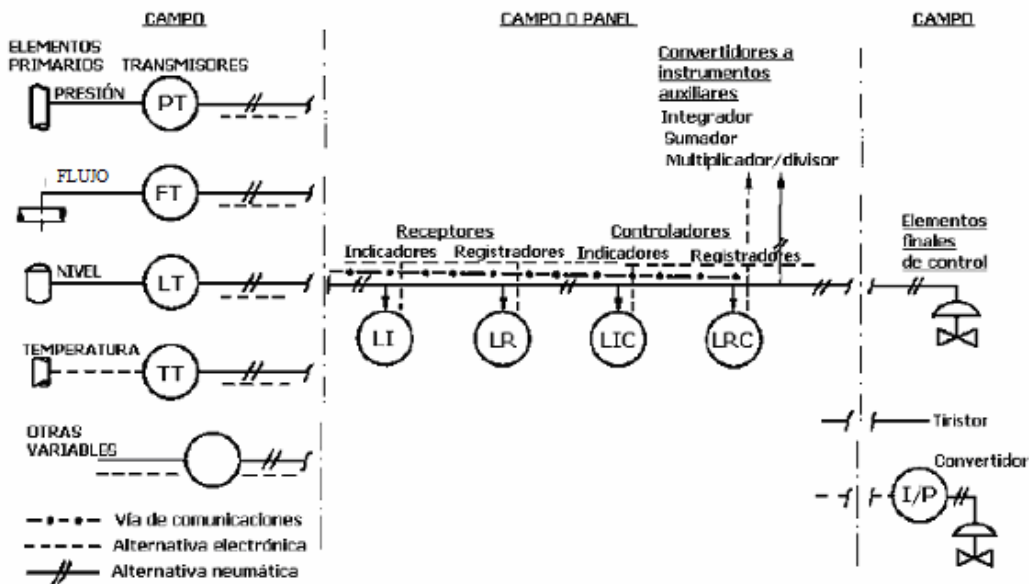


Figura 1.8. Representación de instrumentos en un diagrama de instrumentación

c). Funcionamiento analógico y digital

Es posible, además, clasificar la forma en que pueden ejecutarse las funciones básicas enfocando la atención a la naturaleza continua o discreta de las señales que representa la información. Las señales que varían en forma continua y que pueden tomar una infinidad de valores en cualquier intervalo dado, se llaman señales analógicas; los dispositivos que producen esas señales se llaman dispositivos analógicos. (Esto es rigurosamente cierto en un sentido macroscópico, ya que todos los efectos físicos se convierten en discretos en consideraciones atomísticas.) En contraste, las señales que varían en pasos discretos y pueden así tomar solamente un número finito de valores diferentes, se describen como señales digitales; los aparatos que producen estas señales se llaman aparatos digitales. La mayoría de los aparatos de medida actuales son del tipo analógico. Está aumentando la importancia de los instrumentos digitales, quizá principalmente debido al uso creciente de las computadoras digitales, tanto en los sistemas de reducción de datos como en los automáticos de control. Como la calculadora digital trabaja solo con señales digitales, cualquier información que se le suministre debe ser en la forma digital. La salida de la computadora tiene también forma digital. Así, cualquier comunicación con la computadora en el extremo de la entrada o de la salida deberán darse en señales digitales. Como la mayor parte de las medidas actuales y aparatos de control son de naturaleza analógica, es necesario tener tanto convertidores analógicos a digitales (a la entrada de la computadora) como convertidores digitales a analógicos (a la salida de la computadora). Estos dispositivos sirven de "traductores" que permiten al calculista comunicarse con el mundo exterior, que es en su mayor parte de naturaleza analógica.

1.25 Los elementos de un instrumento

Es posible y conveniente describir tanto la operación como el rendimiento (grado en que se aproxima a la perfección) de los instrumentos de medida y equipo auxiliar, en general, sin recurrir a aparatos de física específicos. La operación puede describirse en función de los elementos activos de los sistemas de instrumentos, y el rendimiento se define en función de las características de rendimiento estático y dinámico, en esta sección se desarrolla el concepto de elementos activos de un instrumento o sistema de instrumentos. Si se examinan diversos instrumentos de física con el fin de generalizar, pronto se reconoce en los elementos de los instrumentos un patrón de semejanza que se repite con respecto a la función, lo que conduce a la idea de dividir los instrumentos en un número de tipos limitados de elementos, de acuerdo con la función general ejecutada por el elemento. Esta división puede hacerse de varias maneras, y en la actualidad no se usan esquemas estandarizados aceptados universalmente. Un esquema que puede ayudar a comprender la operación de cualquier instrumento nuevo con el que pueda estar en contacto y también planificar el proyecto de un instrumento nuevo, se presenta en la figura 1.9



Figura 1.9 Elementos activos de un instrumento o sistema para medir

El diagrama de la figura 1.9 representa una posible disposición de los elementos activos en un instrumento e incluye todas las funciones básicas que se consideran necesarias para la descripción de cualquier instrumentó. El elemento sensor principal es el que primero recibe energía del medio medido y produce una salida que, de algún modo, depende de la cantidad medida. Es importante notar que un instrumento siempre extrae alguna energía del medio medido; por tanto, la cantidad medida resulta siempre alterada en el acto de la medida, siendo la causa de que una medida perfecta resulte teóricamente imposible. Los buenos instrumentos se proyectan de manera que disminuyan al mínimo este efecto, pero está siempre presente en menor o mayor grado.

La señal de salida del elemento sensor principal es alguna variable física, como un desalojamiento o un voltaje. Para que el instrumento ejecute la función deseada, puede ser necesario convertir esta variable en otra más adecuada, sin dejar de conservar el contenido de información de la señal original. Un elemento que ejecuta una función así se llama elemento de conversión variable.

Debe notarse que no todos los instrumentos necesitan incluir un elemento de conversión variable mientras que algunos requieren varios. Además, los "elementos" de que se habla son elementos activos, no físicos. Es decir, la figura 1.9 muestra un instrumento cuyos elementos

activos han sido claramente separados en bloques, lo cual puede hacer pensar que el aparato físico se puede separar con precisión en subconjuntos que ejecutan las funciones específicas mostradas. En general, este no es el caso; por ejemplo, una pieza específica de utilería puede ejecutar varias funciones básicas.

Al ejecutar su propio trabajo, un instrumento puede requerir que una señal representada por alguna variable física se manipule de alguna manera. Por manipulación se entiende, específicamente, un cambio en valor numérico de acuerdo con alguna regla definida, pero conservando la naturaleza física de la variable. Así, un amplificador electrónico acepta una señal de pequeño voltaje como entrada y produce una señal de salida que es también un voltaje, pero es un número constante de veces mayor que la entrada. Un elemento que ejecuta esta función se llamará elemento de manipulación variable. No es necesario que invariablemente un elemento de manipulación variable siga a un elemento de conversión variable; puede precederlo, aparecer en otro lugar en la cadena, o no aparecer del todo.

Cuando los elementos funcionales de un instrumento están en realidad separados materialmente, es necesario transmitir los datos de uno a otro. Al elemento que ejecuta esta función se le llama elemento transmisor de datos. Puede ser tan sencillo como un cojinete y un eje, o tan complicado como un sistema de telemetría, para transmitir por radio señales de los proyectiles espaciales al equipo de tierra.

Si la información referente a la cantidad medida se va a comunicar a los seres humanos para monitorización, control o análisis, debe ponerse en una forma que pueda reconocer alguno de los órganos de los sentidos. El elemento que ejecuta esta función de "traducción" se llama elemento de presentación. Esta función incluye la simple indicación de un índice moviéndose en una escala, y también el registro de una estilográfica moviéndose en una hoja de registro. La indicación y el registro pueden también efectuarse en elementos discretos (en vez de en forma continua).

Mientras que la mayoría de los instrumentos se comunican con la gente por medio del sentido de la vista, el uso de otros sentidos es compatible, como el oído y el tacto. En algunos métodos de registro pueden presentarse los datos de manera que no sean apreciables directamente por los sentidos humanos. Un ejemplo digno de mencionar es la grabadora de cinta magnética. En este caso, se requieren los instrumentos adecuados para extraer la información almacenada cuando se desee y convertirla en una forma inteligible para el hombre.

La figura 1.9 se considera como un vehículo para presentar el concepto de elementos activos y no como un esquema físico de un instrumento general. Un instrumento dado puede incluir las funciones básicas en cualquier número o combinación; no necesitan aparecer en el orden de la figura 1.9. Un componente físico dado puede servir para varias funciones básicas. Como ejemplo de los conceptos anteriores, se considera el manómetro rudimentario de la figura 1.10. Una de las varias interpretaciones posibles es la que sigue: el elemento sensor principal es el pistón, que también sirve para la función de conversión variable, ya que convierte la presión del líquido (fuerza por unidad de área) en una fuerza resultante en la cara del pistón. Se transmite la fuerza por la biela al resorte, que la convierte en un desalojamiento proporcional. Este desalojamiento de la biela se amplifica (manipulado) por la transmisión de palancas para que se produzca en el índice un desalojamiento mayor. El índice o manecilla y la escala indican la presión, sirviendo así como elementos presentadores de datos. Si fuera necesario ubicar el manómetro a alguna distancia de la fuente de presión, un tubo pequeño podría servir como elemento transmisor de datos.

La figura 1.11 representa un termómetro del tipo de presión. El bulbo lleno de líquido actúa como sensor principal y como elemento de conversión variable, ya que un cambio de temperatura se convierte en un aumento de presión dentro del bulbo, debido a la dilatación térmica del líquido confinado que lo llena. Esta presión se transmite por el tubo a un manómetro del tipo Bourdon que convierte la presión en desalojamiento. Este desalojamiento se manipula por la transmisión de palancas y los engranes para amplificar el movimiento de la manecilla. La escala y la manecilla sirven para la presentación de datos.

1.26 Elementos activos y pasivos

Una vez que se han identificado ciertas funciones básicas comunes a todos los instrumentos, es oportuno ver la posibilidad de hacer algunas generalizaciones de cómo pueden ejecutarse estas funciones. Una de estas generalizaciones es la que se refiere a la energía. Al ejecutar cualquiera de las funciones generales indicadas en la figura 1.9, un componente físico puede actuar como transductor activo o como transductor pasivo.

Aquellos componentes en los que la energía de salida la proporciona casi en su totalidad la señal de entrada se llaman comúnmente transductores pasivos. Las señales de entrada y de salida pueden estar formadas por energía de la misma forma (ambas pueden ser mecánicas) o puede haber conversión de energía cambiando de una forma a otra (de mecánica a eléctrica) (En mucha literatura técnica el término transductor se restringe a los dispositivos en los que hay conversión de energía, pero, ajustándose a la definición que de este término da el diccionario, no se hará esta restricción). Por otra parte, el transductor activo, tiene una fuente auxiliar de potencia que suministra gran parte de la potencia de salida, mientras que la señal de entrada suministra solamente una porción insignificante. Además, puede haber o no conversión de una forma a otra de la energía.

1.27 Transductores

Otro transductor activo de gran importancia práctica, el servomecanismo de instrumentos, se muestra en forma simplificada en la figura 1.12. Este es en realidad un sistema de instrumentos formado de componentes, algunos de los cuales son transductores pasivos y otros transductores activos. Sin embargo, cuando se considera como entidad, con voltaje de entrada e_i y desalojamiento de salida x_o , satisface la definición de un transductor activo y conviene considerarlo así. El objeto de este aparato es hacer que el movimiento x_o siga las variaciones del voltaje e_i en forma proporcional. Como el par motor es proporcional al voltaje de error e_e , es claro que el sistema puede estar en reposo solamente si e_e es cero. Esto ocurre solo cuando $e_i = e_{si}$; como e_{si} es proporcional a x_o , esto significa que x_o debe ser proporcional a e_i en el caso estático. Si e_i varía, x_o tenderá a seguirlo, y con un proyecto correcto será posible obtener un "seguimiento" preciso de e_i por x_o .

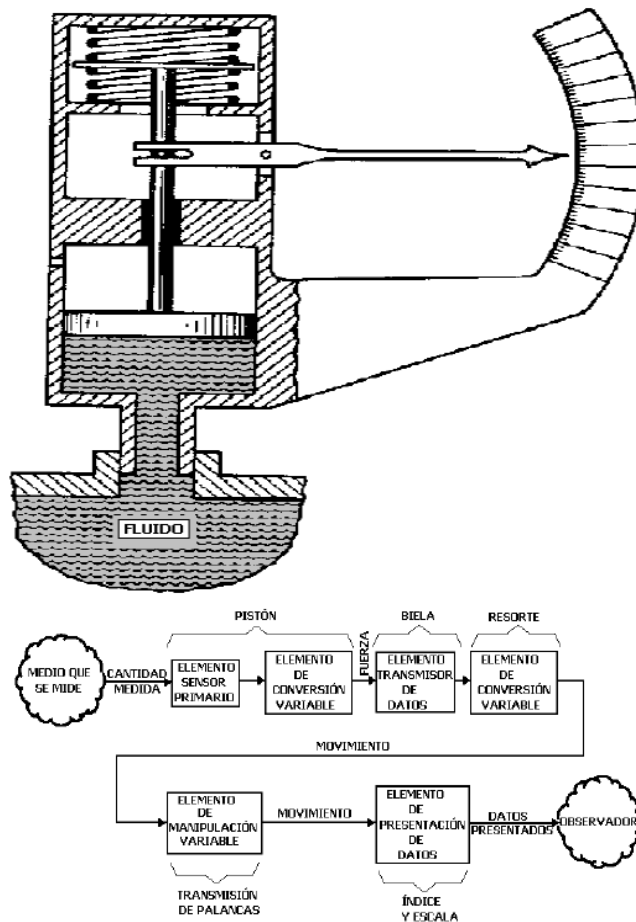


Figura 1.10 Manómetro y la identificación de sus elementos.

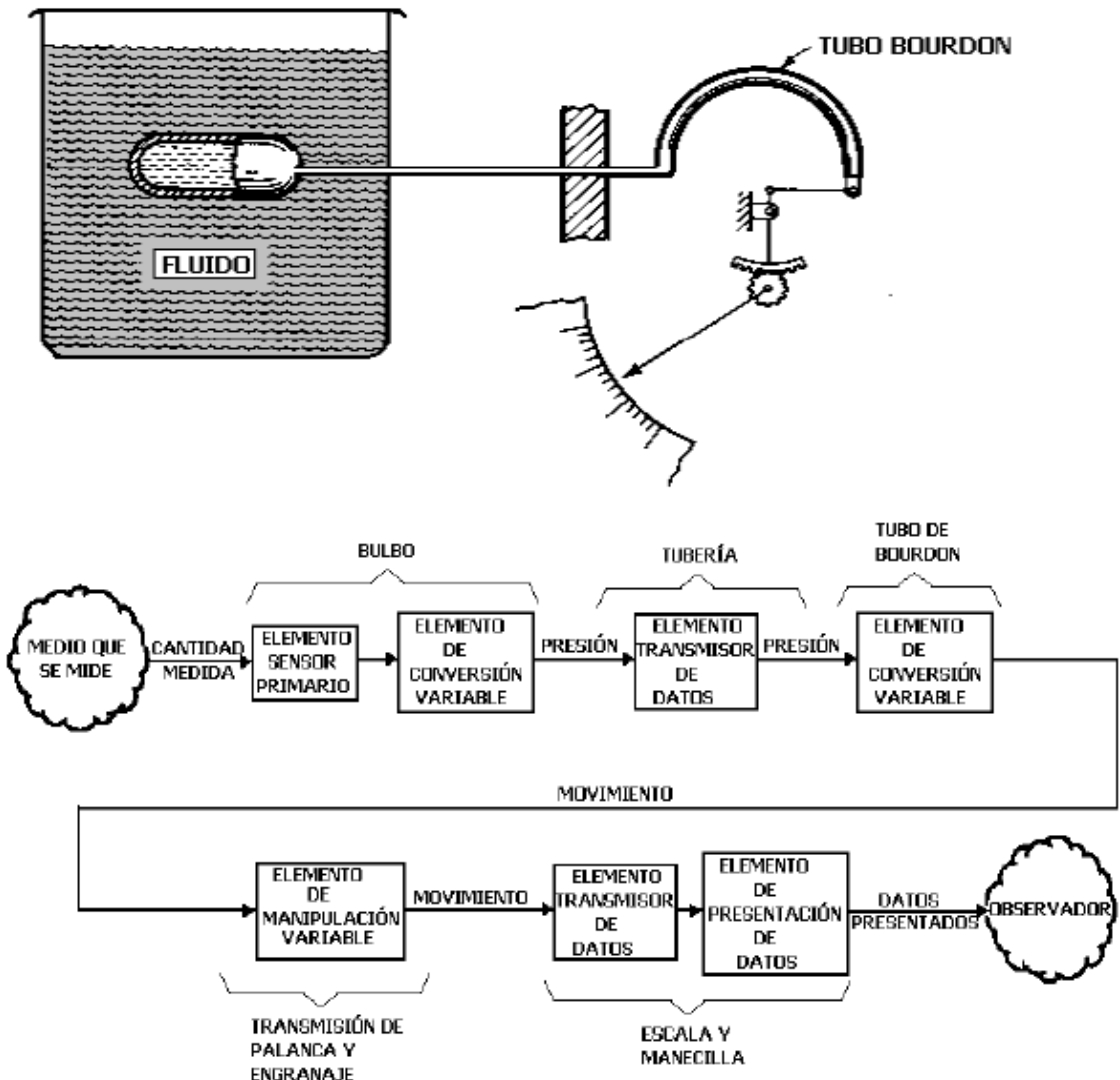


Figura 1.11. Termómetro de presión.

1.28 Conversores

La conversión A/D y D/A, el principio de funcionamiento de los ordenadores está basado en el mundo de la lógica binaria de los circuitos en los que sólo son tenidos en cuenta dos niveles de tensión: el nivel alto que se hace corresponder matemáticamente en lógica positiva a un uno y el nivel bajo que se hace corresponder a un cero.

Con estos dos niveles funcionan la totalidad operacional de los computadores, microprocesadores y periféricos. Los programas son también transformados en último término a ceros y unos para ser introducidos en memoria. De lo dicho se deduce que difícilmente un ordenador podría tomar contacto con el amplio mundo analógico que le rodea, por ejemplo, para procesar temperaturas, tensiones o cualquier otro parámetro analógico, con un número indeterminado de niveles; de ahí la necesidad de la conversión analógico-digital (A/D) o digital-analógica (D/A) como paso intermedio o interfaz entre el mundo de lo lógico y el mundo de lo analógico.

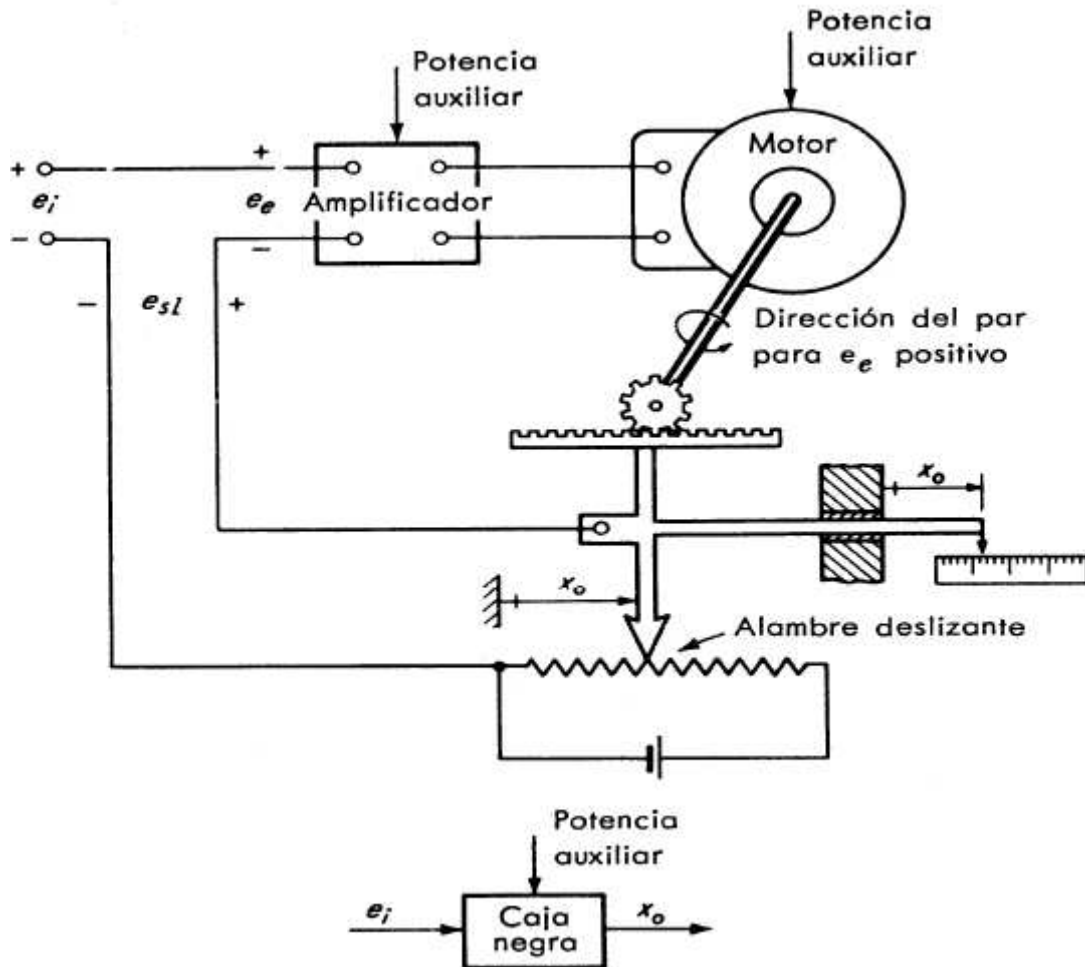


Figura 1.12. Servomecanismo para instrumentos.

a). Conversores D/A

En la conversión D/A a cada valor binario de la entrada le corresponde un nivel de tensión a la salida. Existen varios métodos para obtener la conversión digital-analógica, de los cuales describimos aquí algunos, de modo algo simplificado para alcanzar la finalidad conceptual que se pretende.

Llegados a este punto, es preciso remarcar que en los procesos de conversión siempre intervienen dos factores que es necesario apreciar al máximo para obtener éxito en los resultados. Por una parte está la precisión de la medida, lo cual conlleva un rechazo máximo de los errores de conversión, cosa que complica visiblemente el circuito, y por otra parte, los ruidos eléctricos, muy abundantes en el ambiente y que perjudican y alteran la precisión. En nuestra descripción funcional de un D/A prescindimos de estas protecciones en aras de una mayor simplicidad.

Convertir un dato en binario a un nivel analógico no es más que atribuir un valor de tensión a cada valor binario; así, el rango de valores en hexadecimal desde 00 hasta FF (FF = 256 en decimal) se corresponderá con otros tantos 256 valores niveles o valores de tensión.

Para conseguir pasar un valor en binario a un nivel de tensión, se recurre a una red de resistencias que, debidamente conectadas y con unos valores concretos, genere una tensión en función de los niveles eléctricos binarios que se encuentren en un momento dado en cada uno de los bits que intervienen en la conversión. La mencionada red resistiva es, por tanto, la clave de la conversión.

Existen dos redes perfectamente diferenciadas que cumplen este cometido: la red de resistencias ponderadas y la red R, 2R. Para explicar este concepto, supongamos que disponemos de un registro de cuatro bits que puede ser cargado con cualquier valor desde 0 a F.

Una red ponderada de resistencias consistiría en conectar una resistencia a cada salida, los valores de estas resistencias están en función del peso de cada salida del registro, de ahí lo de ponderadas, de manera que los valores de las resistencias a conectar desde el bit de mayor peso al menor son:

R , $2R$, $4R$ y $8R$. Si una vez conectadas estas resistencias, se aplicaran los valores binarios 0 a F consecutivamente se observaría una rampa ascendente de 16 escalones, cada uno de los escalones se correspondería con un valor binario. Obsérvese que los valores de las resistencias siguen en orden inverso al valor del exponente binario de las salidas del registro.

Por el mismo procedimiento se puede continuar la red resistiva, si se desea mayor precisión hacen falta más escalones y, por ende, más bits. Para mayor comprensión véanse las figuras 1.15 y 1.16. También puede efectuarse por otro procedimiento denominado red resistiva R , $2R$. En este sistema a cada bit de salida se le conecta una resistencia de valor $2R$, al otro extremo de las resistencias se coloca otra de valor R . En esta red el valor óhmico de las resistencias denominadas R es el que determina el valor de $2R$, que evidentemente será el valor doble de R . Este sistema tiene la ventaja respecto al sistema de resistencias ponderadas que emplea únicamente dos valores distintos de resistencias, siendo R un valor cualquiera. La salida analógica se toma después de la resistencia en serie del bit de mayor peso. El sistema posee un registro de cuatro bits que puede ser cargado con cualquier valor binario. En sus salidas se conecta la red R , $2R$. En la salida de la red se encontrará instantáneamente el valor analógico de tensión correspondiente al dato hexadecimal que está. Dado que el registro de nuestro ejemplo es de cuatro bits, la red R , $2R$ será capaz de entregar hasta 16 niveles distintos de tensión. Si se cargaran de forma consecutiva en el registro los valores hexadecimales del 0 al F , la red R , $2R$ entregarían su salida una rampa lineal escalonada.

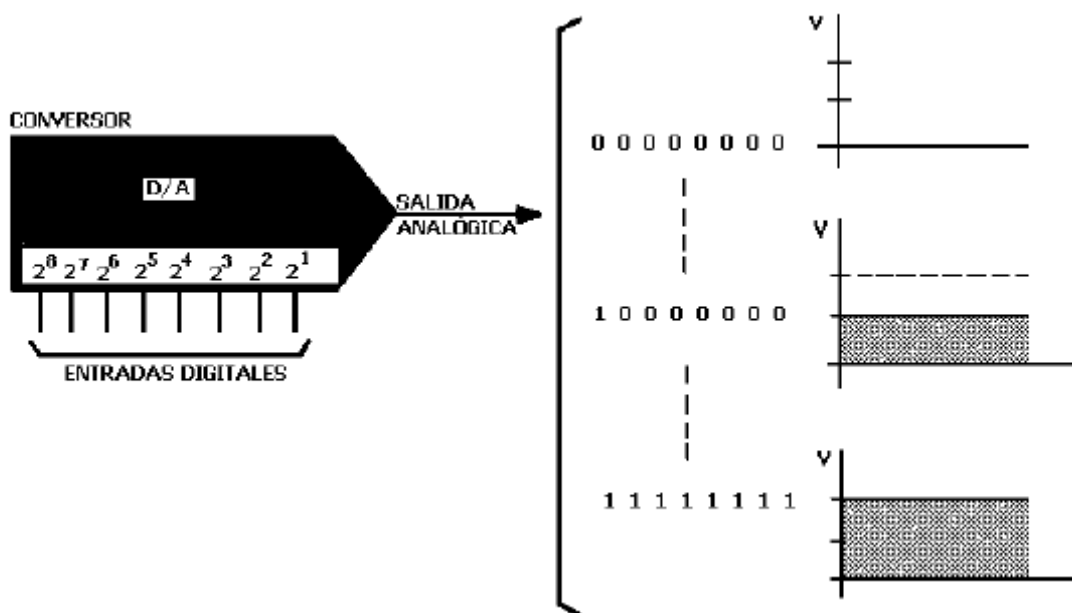


Figura 1.13. En la conversión D/A a cada valor binario de la entrada le corresponde un nivel de tensión en la salida.

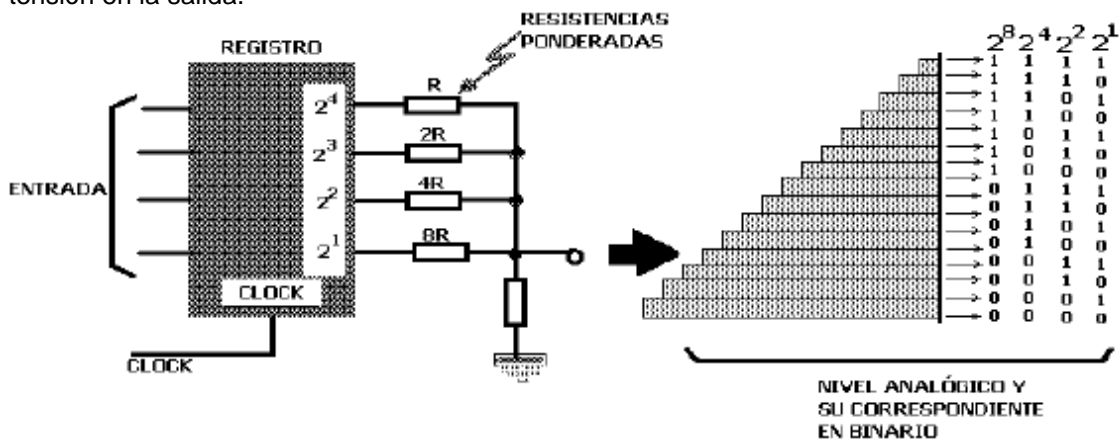


Figura 1.14. Conversor digital analógico D/A por el sistema de resistencias ponderadas.

b). Conversores A/D

La conversión analógica-digital consiste en convertir valores analógicos en digitales. En esencia es el proceso inverso a la conversión digital-analógica. En la conversión A/D a cada valor de la entrada, o mejor, a cada margen de valores analógicos le corresponde un valor digital a la salida, dado que dentro del citado margen de valores analógicos que le corresponden a cada valor binario de salida, el dispositivo siempre tomará uno de ellos, lo que establece una cierta imprecisión en la conversión; por lo que siempre se le atribuye a ésta el error de ± 1 dígito, lo que determina, entre otras razones de diseño, que si se desea mayor precisión habrá que aumentar el número de bits de salida en la conversión, atribuyéndosele siempre al bit de menor peso el error constante de ± 1 .

1.29 Válvulas de Control de Diafragma Neumático

Regulan el caudal del fluido de forma automática, con objeto de mantener constantes algunas características que, en determinados puntos de la red, pueden variar, tales como: presión, temperatura, concentración, nivel, etc. Las más empleadas son las de accionamiento neumático.

Estas válvulas cierran o abren, parcial a totalmente, según las indicaciones de un instrumento medidor de la característica en cuestión. También existen válvulas de control de accionamiento manual, aparte de que muchas de estas válvulas disponen de un volante para accionamiento en caso de avería del sistema automático.

Es frecuente que el paso de estas válvulas sea inferior (un 75% aproximadamente) al diámetro de la tubería en la que están instaladas. Generalmente son válvulas de doble asiento, al objeto de equilibrar las reacciones de la corriente de fluido y disminuir el esfuerzo necesario para mover el obturador.

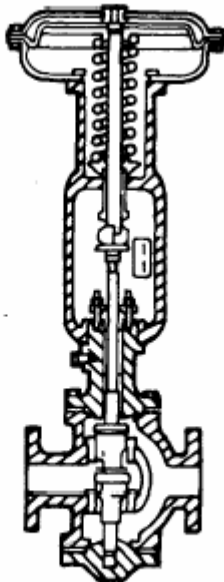


Fig. 1.15 válvula de control con actuador de diafragma

Composición y funcionamiento:

Estas válvulas se componen del conjunto servomotor y actuador y de la válvula propiamente dicha, que puede ser de simple asiento, doble asiento (2 o 3 vías), de membrana, de mariposa, etc. (aunque por estar limitada la carrera del vástago, no son adaptables las válvulas de compuerta, que precisan grandes cursos para su apertura y cierre).

Para el accionamiento de estas válvulas se precisa poseer una fuente auxiliar de aire comprimido; pueden ser dirigidas desde cualquier distancia y actuadas por distintos instrumentos: termostatos, presostatos, termómetros, manómetros, reguladores de nivel, interruptores, etc.

Los elementos de control actúan directamente sobre una válvula electromagnética que permite la entrada del aire comprimido a la cubierta de la membrana de accionamiento de la válvula de control.

El aire a presión entra por la parte superior de la cubierta, e incide sobre la cara superior de la membrana. Con el incremento de la presión del aire desciende el vástago accionador, mientras que si se corta la presión, el vástago asciende a su posición más elevada. Existen actuadores que operan al revés, al incidir el aire comprimido sobre la cara inferior de la membrana.

Partes principales:

1. Cubierta.
2. Membrana.
3. Placa de membrana.
4. Muelle del actuador.
5. Vástago accionador.
6. Asiento del muelle.
7. Tornillo regulador.
8. Conector de vástagos.
9. Tirante.
10. Placa índice.
11. Escala indicadora.

Actuador

Tipos de Actuador

El fabricante será responsable del tamaño seleccionado del actuador, tomando en consideración las condiciones de operación y estas especificaciones. 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.

-Materiales

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.

-Funcionamiento.

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 depresionado. 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.

Cuerpo

Cada válvula de control debe diseñarse y seleccionarse para proveer una operación y control confiable a las condiciones de operación y diseño especificadas. El dimensionamiento de una válvula de control generalmente debe basarse en ISA S75.01 que son las ecuaciones de flujo para dimensionar válvulas de control.

El fabricante debe de seleccionar una válvula de control junto con su actuador y evaluar cuidadosamente el requerimiento mínimo de funcionamiento de sus internos.

Los cálculos de capacidad de la válvula para todas las condiciones de operación deben de darse. Las bases de cálculo y resultados deben ser mostradas por medio de cálculos en forma manual o por computadora.

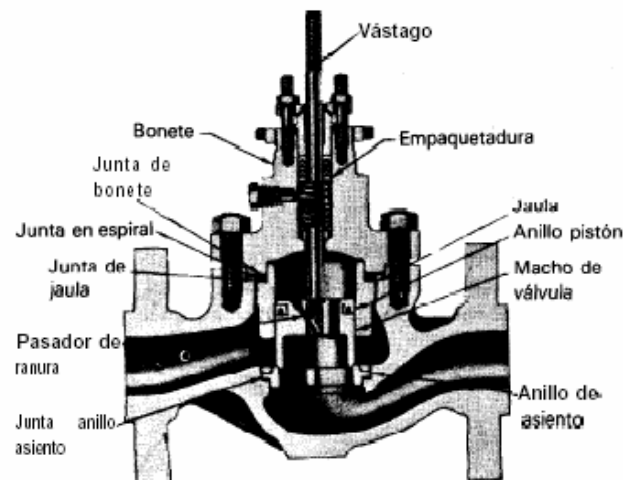


Fig 1.16
Cuerpo de la válvula

La capacidad seleccionada de los internos de la válvula de control C_v deben de cumplir con lo siguiente:

Para una característica de igual porcentaje los internos deben operar al 95% de carrera a máximo flujo.

Para característica lineal y de apertura rápida los internos deben de operar al 90 % a máximo flujo.

Cuando se menciona 95 o 90 % se refiere a la abertura que debe de mostrar la válvula de control con el flujo máximo. A la capacidad requerida C_v que cumpla con el criterio mencionado se le llama "Cv requerida". A la capacidad C_v actual de la válvula se le llama "Cv seleccionada".

Las aplicaciones específicas pueden requerir una capacidad Cv sobre dimensionada, lo cual debe ser especificado por el usuario.

Debe de tomarse en cuenta el factor FP cuando la válvula de control se va a colocar entre reductores u otros accesorios, por lo que la Cv calculada debe ser corregida debido a la reducción de capacidad de la válvula, de acuerdo a lo que se menciona en ISA S75.01.

Los internos de una válvula de control pueden ser muy sencillos pero reducen su área de paso mientras mas ocupan espacio dentro del cuerpo. El cuerpo de una válvula de control con internos reducidos deben de ser considerados para aplicaciones con las condiciones siguientes:

Caídas de presión > 750 psi

Velocidades de salida de gas o vapor que excedan 0.3 Mach

Nivel de ruido alto > 85 decibeles audibles

Estrangulación de flujo

Vaporización instantánea sostenida

> 5 % del líquido que se trate

Fluidos erosivos

Si se proyecta aumento de capacidad en el futuro.

Para cualquier caso el tamaño del cuerpo de la válvula no debe de exceder el tamaño de la tubería que la contendrá.

El tamaño de cada válvula de control seleccionada debe de cumplir con cualquier variación de flujo a todas las condiciones de operación especificadas. La condición de flujo mínimo especificada debe ser totalmente controlable.

El cuerpo de la válvula de control debe de calcularse para que tenga el grueso suficiente debido a las condiciones de presión y temperatura especificadas. Para válvulas con bridas, la clase de la válvula debe ser al mínimo igual a la de las bridas que usan. La clase de las bridas de una válvula de control menor a 16 pulgadas debe ser como mínimo ASME 300. La clase de las bridas de una válvula mayor de 16 pulgadas debe ser mínimo ASME 150.

Los materiales del cuerpo deben de alcanzar o exceder los requerimientos de la aplicación. El material del cuerpo y sus internos deben de cumplir los requerimientos de temperatura.

Internos

Los internos de una válvula de control en inglés lo llaman *trim*.

Los internos tienen una parte fija y una parte móvil que es la que permite que la válvula se mantenga abierta o cerrada. La parte móvil es el ensamble del tapón con la parte de el 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.

Para las aplicaciones de servicio severo, cuando un fabricante proponga el diseño de ciertos internos, debe de haber probado durante cinco años este diseño lo cual debe de certificarlo.

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 hacerlo 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. Las especificaciones que se mencionan en los libros especializados como el de Crane y de la ISA son el resultado de las experiencias recopiladas en los últimos 50 años y muy someramente se mencionan.

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 hacerlo pasar por el número suficientes de etapas que resultan de aplicar la Ecuación de Darcy. La velocidad del líquido se debe alcanzar SIN artificios en la tubería anterior y posterior de la válvula de control.

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. Ésto 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 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.

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.

Hermeticidad de las válvulas de control

Considerando que en las instalaciones automatizadas y con válvulas de control hay grandes pérdidas por fugas internas en los asientos de las válvulas cuando están cerradas, y además situaciones anómalas de operación cuando una válvula al estar cerrada deja pasar constantemente el fluido que maneja provocando que se pierda el sello de una fase líquida hacia una gaseosa.

La norma que rige la hermeticidad de las válvulas de control es FCI 70-2 y se tienen clase IV, V, VI, donde una clase IV tiene menos hermeticidad que la clase V, y la clase VI tiene una hermeticidad superior, pero la VI utiliza asientos no metálicos que a temperaturas elevadas y con fluidos que caviten o vaporicen no deben de utilizarse, entonces para una aplicación de servicio severo que requiera hermeticidad muy buena se especifica clase VI cuando se pueda, y clase V donde los asientos del tapón y de la válvula son metálicos. Pero si se requiere una mejor hermeticidad, cuando el usuario específico “fuga cero”, entonces en comparación con las válvulas de bloqueo se especifica hermeticidad tipo válvula de bloqueo cuya norma es MSS – SP61.

Hay válvulas de control que pueden diseñarse con hermeticidad MSS-SP61. ¿Por qué las válvulas de diferente clase son más o menos herméticas? Esto es porque cada válvula se diseña con un *actuador* más o menos potente (mas o menos grande) que mantiene mejor cerrada la válvula, esto es que la fuerza disponible por el actuador aprieta el asiento del tapón contra el asiento del cuerpo de la válvula. Esto puede ser suficiente pero cuando el tamaño del actuador ya es muy grande o no da la fuerza requerida, entonces los internos de ciertas válvulas de control cuentan con avances que aumentan la fuerza de cierre del tapón utilizando la presión disponible del fluido antes de la válvula.

Analizando por qué la hermeticidad de una válvula de control es tan importante, se comenta que si una válvula con alta caída de presión debe de permanecer cerrada la mayor parte del tiempo, pero si no se mantiene muy bien cerrada, tiende a haber fuga y ésta aumenta con el tiempo pues la energía debido a la diferencial de presiones es muy alta y el fluido se abrirá camino, erosionando mas y mas a los asientos ya sea del tapón o del cuerpo de la válvula. Si se compara lo que fuga una válvula clase V vs una MSS SP61, debe de hacerse en función del Cv provocado por las condiciones de operación. Comparativamente la hermeticidad de las válvulas de control depende de la fuerza de que disponen para mantener cerrada la válvula como se ve enseguida:

Fuerza requerida para clase mantener cerrada la válvula

IV 5.4 kgsf/mm de la circunferencia del Asiento

V 8.9 kgsf/mm.

La circunferencia del asiento se define como la línea de contacto entre el tapón y el asiento en el cuerpo de la válvula cuando la válvula está en la posición totalmente cerrada. Por esto es necesario solicitar la memoria de cálculos del actuador y / o los internos de la válvula que solo o juntos darán la fuerza de cierre necesaria para la hermeticidad escogida.

Aplicaciones de servicio severo

Como ya se ha mencionado las aplicaciones de servicio severo son aquellas cuando va a haber caída alta de presión a través de la válvula de control. En la industria de la fuerza hay muchas aplicaciones de servicio severo por ejemplo:

Recirculación de condensado; Control de nivel del desaerador;

Control de nivel del domo; Recirculación o flujo mínimo del agua de alimentación; Agua de atemperación; Vapor auxiliar;

Soplado de hollín; Bypass de turbina.

En la industria del petróleo:

Válvulas choke; Recirculación o flujo mínimo en bombas de crudo del tercer separador; Válvulas de antisurge y recirculación de gas en compresores; Flujo mínimo en bombas de carga de cualquier planta; Control de presión de agua de conra incendio; Manejo de condensados del gas; gas al quemador de campo; Control de nivel de separadores de alta presión; Manejo de fluidos en plantas criogénicas, etc.

Posicionador

Los posicionadores neumáticos tienen transductores para transformar la señal de un instrumento en una posición de la válvula, en vez de utilizar la señal neumática directamente en el actuador. Con algunos estudios se ha visto que los posicionadores se utilizan a menudo en donde los amplificadores neumáticos serían una mejor elección. Además, en muchos casos se puede lograr mejor control sin utilizar ni amplificador ni posicionador. Las razones principales para utilizar un posicionador o un amplificador neumático son:

- Se requiere un intervalo dividido.
- Se desea una carga máxima de presión en vez de la señal del instrumento.
- Se desea el mejor control posible.

Los ejemplos podrían incluir recuperación rápida después de las alteraciones o minimización del exceso de control o sobreimpulso. La selección del posicionador o del amplificador tiene escasa relación con los aspectos dinámicos del proceso, pero no con el tamaño de la válvula, desequilibrio, fricción en la empaquetadura o longitud de la línea o la tubería de transmisión.

1.30 Modos de control

La teoría de los modos de control es muy amplia por lo que solo se mencionaran brevemente, y son los siguientes:

a.- El controlador on/off(abierto-cerrado)

La figura 1.17 muestra un controlador on/off. El dispositivo detector usado en todos los controladores neumáticos es la unidad boquilla - palometa. El dispositivo, que es suministrado con aire limpio, cuenta con una pequeña boquilla y una palometa que regula la salida del aire de la boquilla.

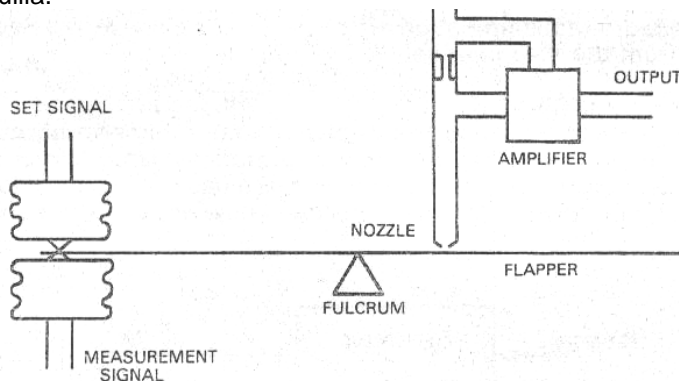


Fig. 1.17 El controlador (Encendido apagado) on/off

El sistema es sensible, por lo que un movimiento muy pequeño de la palometa, del orden de 0.02 mm, causará un cambio de alrededor de 5 kN/m² en la presión de salida de la boquilla, esta presión varía linealmente con el movimiento de la palometa. El cambio de presión es amplificado neumáticamente y regula la presión de salida del controlador en un rango de 20-100 kN / m².(3-15 psig)

La palometa esta montada sobre una barra con cierta posición angular la cual es controlada por dos unidades de fuelle flexibles actuando en oposición. La presión que corresponde a la

señal fijada punto de ajuste o referencia (set point) es aplicada al fuelle superior, mientras la presión que corresponde a la señal medida es aplicada a la unidad de abajo. Será evidente, que si la señal medida tiene un valor debajo de la señal del punto de ajuste o referencia (set point), la posición de la barra cambiará de dirección, causando que la palometa se acerque a la boquilla, resultando un aumento en la presión antes de la boquilla y por lo tanto en la presión de salida del controlador.

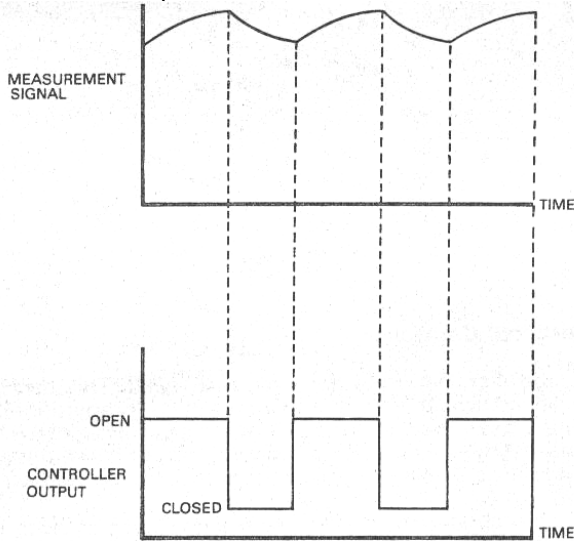
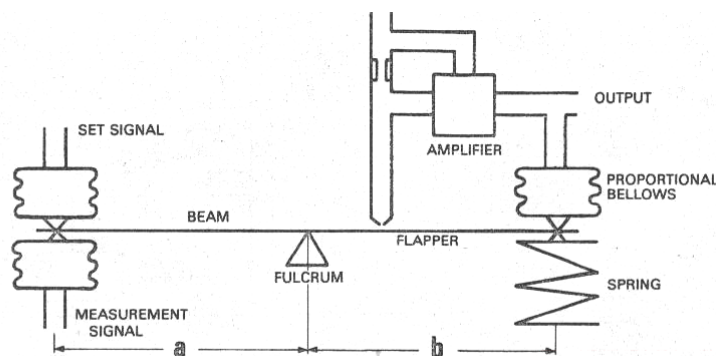


Fig. 1.18

Cuando la señal medida excede la señal fijada, la barra cambiará de lugar en dirección contraria, resultando una caída en la presión de salida.

Si insertamos este arreglo en el circuito mostrado en figura 1.18 será evidente que funcionará como un controlador (abierto/cerrado) on/off. Si el flujo en la línea excede el valor fijado, incluso por una cantidad muy pequeña, la barra irá cambiando de lugar en dirección del sentido de las agujas del reloj, reduciendo la presión de salida a un mínimo y cerrando la válvula de control de flujo. Si el flujo de circulación cae debajo del valor fijado la acción opuesta ocurrirá y la válvula será abierta completamente. La válvula de control pasará por un ciclo continuamente, manteniendo el flujo en aproximadamente el valor deseado.

Un controlador (abierto/cerrado) on/off es satisfactorio para ciertas situaciones, por ejemplo la reposición periódica de un recipiente, en muchos casos el ajuste es deseado si se requiere el control abriendo la válvula en un valor intermedio.



Proporcional Fig. 1.19 El controlador

b.- El Controlador Proporcional

Un controlador proporcional es mostrado en la figura 1.19. Este dispositivo es esencialmente similar al controlador (abierto/cerrado) on/off, con la adición de un fuelle proporcional. Este fuelle actúa sobre la barra en el lado opuesto del punto de apoyo a la señal del set point y al

fuelle de señal de salida. Es llenado con aire en la salida del control y se opone con un resorte que esta fijado en la barra

El resorte es ajustado para ejercer una fuerza igual a lo ejercido por el fuelle proporcional cuando la presión de salida está a medio rango, 60 kN/m^2 generalmente. Considere una secuencia de los cambios de presión en el sistema ahora. En figura 1.20 (a) el controlador está en una condición operativa estable con la válvula de control a la mitad de su abertura, corresponde a una señal de medición, correspondiente a una presión de salida de 70 kN/m^2 y a una relación de flujo correspondiendo a una señal de medición de 70 kN/m^2 , exactamente a la señal fijada

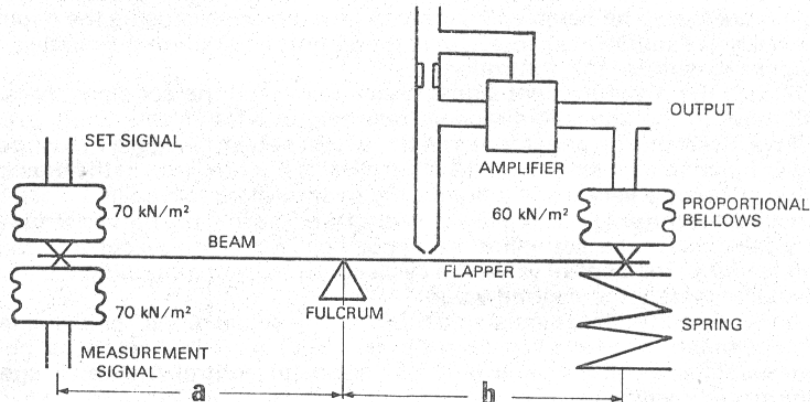


Fig. 1.20 (a)

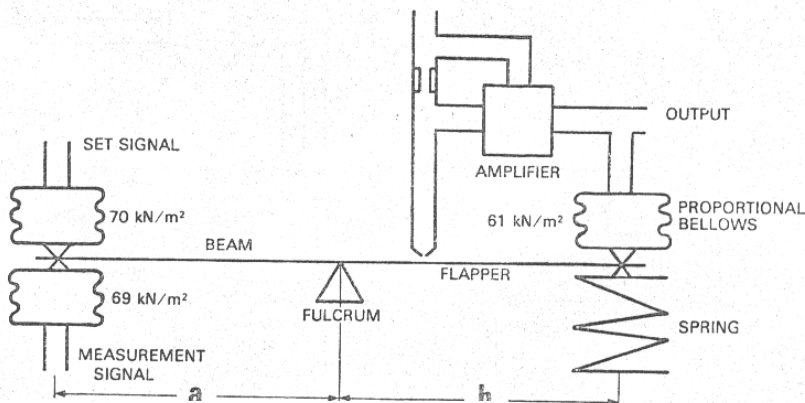


Fig. 1.20(b)

Imagine que un ocurre un pequeño disturbio en el sistema; por ejemplo la resistencia de circulación corriente debajo de la válvula de control puede aumentar ligeramente como consecuencia el flujo disminuye y la presión de señal de medición cae. Como consecuencia el equilibrio de la barra está perturbado y gira ligeramente en una dirección en sentido contrario a las agujas del reloj, reduciendo el espacio libre entre la palometa y la boquilla y aumenta la presión de salida. Resultando en un aumento de la apertura de la válvula de control, un aumento en el flujo y un aumento de la señal de medición. La Figura 1.21 (a) indica esquemáticamente una respuesta de un controlador proporcional para tal cambio repentino en la resistencia de flujo.

Al final, si el controlador es ajustado correctamente para dar la operación estable, el controlador se asentará a una nueva posición de equilibrio como esta mostrado en figura 1.20 (b). La señal medida ha bajado de 70 kN/m^2 a 69 kN/m^2 cuando la presión de salida ha aumentado a 61 kN/m^2 y gracias a la acción del fuelle proporcional, el equilibrio de la barra ha sido restablecido.

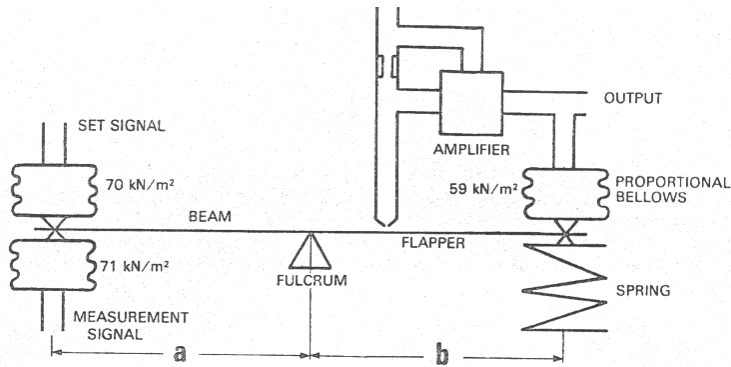


Fig. 1.20 (c)

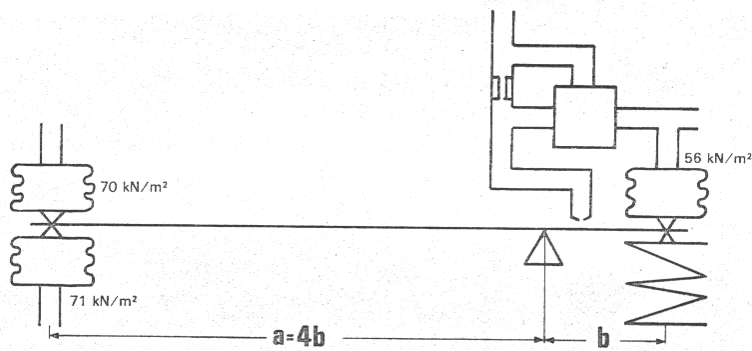


Fig. 1.20(d)

↑ 25% after increase in flow rate.

En la práctica, el aumento en la presión de salida es, probablemente, ligeramente menor que la diferencia correspondiente entre la señal del punto de ajuste (set point) y la señal medida debido a la rigidez del resorte y unidades de fuelle.

La barra en figura 1.20 (b) muestra un movimiento en sentido contrario a las agujas del reloj en comparación con la posición en figura 1.20 (a), que corresponde a una reducción pequeña de espacio entre palometa y boquilla, necesaria para aumentar la presión de salida. Por consiguiente un poco del momento que resultará de la diferencia entre señal del set point y la señal de medición será contrapesado por la rigidez flexible del resorte y unidades de fuelle y el aumento correspondiente en la salida será ligeramente menor que $1 \text{ kN} / \text{m}^2$.

La Figura 1.20 (c) y figura 1.21 (b) muestran la reacción correspondiente del controlador para un aumento repentino del flujo resultando una disminución en la resistencia del flujo corriente abajo de la válvula de control. En este caso, después de que el disturbio oscilatorio ha sido amortiguado, el controlador se asienta con una señal de medición ligeramente superior a la señal del set point y con la válvula de control ligeramente cerrada. Otra vez la barra del controlador está en el equilibrio.

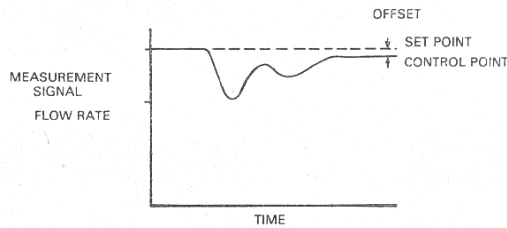


Fig. 1.21 (a)

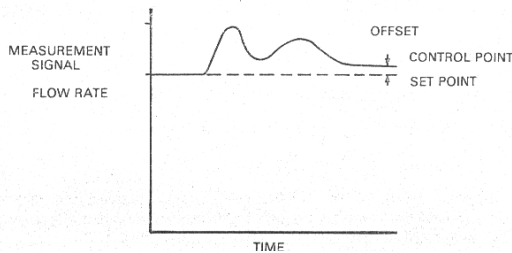


Fig. 1.21 (b)

Será evidente de esta discusión que el controlador ajusta la válvula de control a la medición por una cantidad que es proporcional a la desviación, la diferencia entre la señal del set point y la señal medida, por lo tanto se tiene un controlador proporcional.

Estará también claro que, con el arreglo descrito de arriba, el cambio de unidad en la señal de medición resultará en el cambio de unidad en la señal de salida. La válvula de control se desplazará de completamente cerrado a la oposición completamente abierta como una consecuencia de un cambio en el flujo de cero a máximo. La relación entre el flujo y la apertura de la válvula (o señal de medición y salida, es lo mismo) son mostradas en la figura 1.22(a). La proporción del cambio en la salida que corresponde al cambio de la señal medida en relación con la que la señal es descrita en términos de una cantidad conocida como "banda proporcional" descrito como $PB = 100\%$, un 100% de cambio en la señal medida es requerido para causar un 100% de cambio en la apertura de válvula.

Si modificamos la posición del apoyo sobre el cuál gira la barra, como se muestra en figura 10 (d), podemos cambiar el ancho de la banda proporcional. La figura 1.20 (d) corresponda a la situación de la figura 1.20 (c) luego de un disturbio en el incremento del flujo, pero en este caso $a=4b$. Para restituir el equilibrio de la barra, ahora la presión de salida debe haber caído por 4kN/m^2 que corresponde a una diferencia entre la señal medida y la señal del set point de 1kN/m^2 . La relación correspondiente entre señal medida y la señal de salida es mostrada en la figura 1.22 (b). La válvula de control va ahora de completamente cerrado a la posición completamente abierta que corresponde a un cambio en la señal medida de solamente 20kN/m^2 . El controlador funcionaria con un ancho de banda proporcional de 25% correspondiendo a un cambio en la señal de medición del 25% del rango. La banda proporcional de más de 100% son también posibles.

Será evidente que entre mas estrecha sea la banda proporcional será más grande la sensibilidad del controlador. Entre más grande es su respuesta a cualquier disturbio en la condición controlada y la tendencia más grande a la inestabilidad. Hasta ahora hemos estado hablando de la respuesta del controlador para los cambios repentinos en la carga, la carga en este caso es representada por la resistencia de flujo corriente abajo de la válvula de control. La respuesta del controlador proporcional para un cambio repentino en el set point es esencialmente similar y el cambio en la señal de medición que corresponde a un aumento repentino en la señal del punto de ajuste es mostrado en la figura 1.21 (c).

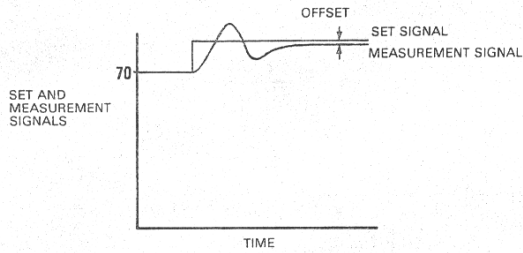


Fig. 1.21 (c)

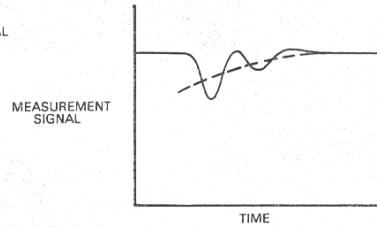


Fig. 1.21 (d)

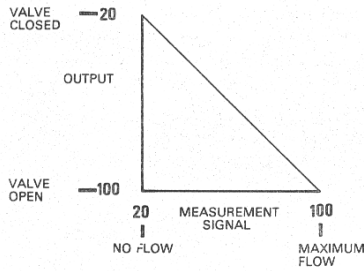


Fig. 1.22 (a)

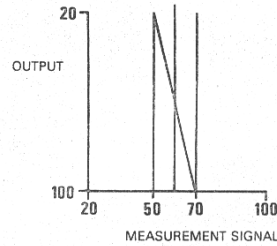


Fig. 1.22 (b)

c.- El Controlador Proporcional mas Reajuste Automático

Una característica de todas las curvas en la figura 1.21 es que, después de la desviación de la condición original, el flujo, como indica la señal de medición, nunca regresa al valor de la señal del set point: hay un intervalo, conocido como el "Offset"(corrimiento), entre el set point y el punto de control. En el caso de la figura 1.21 (a) un incremento en la resistencia de flujo da como resultado una reducción pequeña pero permanente en el flujo. En el caso de la figura 1.21 (b) una reducción en la resistencia ha causado que el flujo exceda el valor deseado mientras en la figura 1.21 (c) el aumento en el flujo que corresponde a un aumento en la señal del set point es ligeramente más pequeño que el caso donde las señales de medición se quedarán exactamente ajustadas. El set point y el punto de control coinciden solamente para unas condiciones específicas, en el presente caso cuando la válvula de control esta 50 % abierta y el flujo corresponde a una señal de medición de $70 \text{ kN} / \text{m}^2$. Para otras condiciones el Offset (corrimiento) está presente.

El Offset (corrimiento) puede ser eliminado por la adición de una acción integral o una acción de reajuste automático al controlador, el cual alimenta a la salida del controlador por medio de un ajuste

La figura 1.23 muestra un controlador proporcional más integral. El cambio comparado con la figura 17 es que el resorte es reemplazado por otra unidad de fuelle de la misma sección transversal.

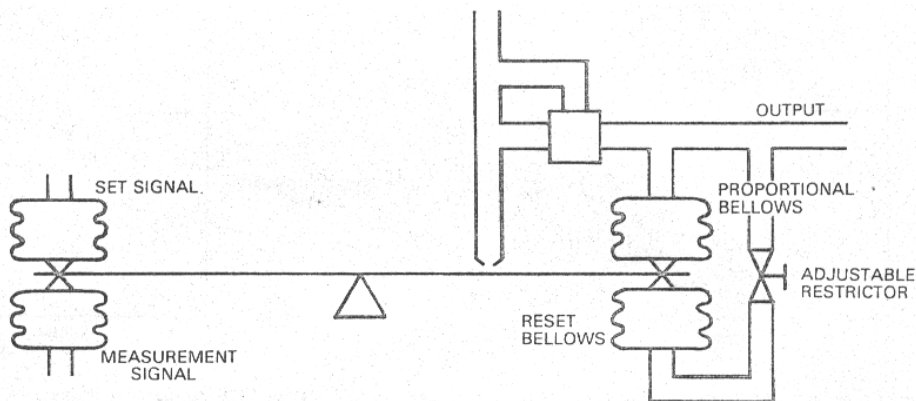


Fig. 1.23 el controlador proporcional mas reajuste automático

Un controlador proporcional mas reajuste reacciona inicialmente a un cambio en la carga o a la señal del set point de la misma manera como un controlador proporcional. Cualquier cambio en la señal del punto de ajuste (set point) o en la señal de medición resultará un cambio en la presión de salida que será comunicada inmediatamente a los fuelles proporcionales, ajustando la posición de la barra. Sin embargo, el cambio en la presión de salida también será comunicado a los fuelles de reajuste, más lento que a los fuelles proporcionales, la relación depende del ajuste. El resultado es que la presión en los fuelles de reajuste se aproximara a los fuelles proporcionales y al final la presión en ambas unidades de fuelle se igualara. El equilibrio de la barra requiere que la señal de el set point y la señal de medida también deban ser iguales y el offset (corrimiento) será eliminado. La Figura 1.21 (d) muestra la respuesta de un controlador proporcional mas reajuste para un aumento repentino en la carga y puede ser comparado con la figura 1.21 (a). El disturbio oscilatorio de la señal medida es superpuesto en la curva de tendencia asintótica al set point, correspondiendo al proceso de igualamiento de presión en los fuelles de reajuste.

La acción de reajuste automático es conocida como acción integral porque la extensión de la corrección aplicada por los fuelles de reajuste es una función integral de la desviación (la diferencia entre la señal del set point y la señal de medición) con el tiempo.

La acción integral o reajuste es definida cuantitativamente en términos del tiempo de reajuste automático, figura 1.25 (a).

Esta muestra la respuesta de las acciones proporcionales e integrales del controlador para un cambio repentino en carga o en la señal del set point. El resultado de la acción proporcional es un cambio inmediato en la presión de salida mientras la acción de reajuste resulta un cambio progresivo en dirección contraria. El tiempo de reajuste automático se define como una tangente a la curva definida por la acción de reajuste en el momento inicial del cambio en la medición del tiempo después de la acción de reajuste automático, continuando en esta acción inicial se incrementa en un cambio en una salida igual de lo que resulta de la acción proporcional.

El funcionamiento de los controladores no es usualmente sensitivo a los reajustes del tiempo, el cual es comúnmente acercado a un valor aproximadamente al periodo de oscilación del sistema.

d.- el controlador proporcional- reajuste automático más derivativo

Hasta ahora hemos estado considerando la respuesta del controlador cuando hay cambios repentinos en la medición o en las señales del set point. En realidad los disturbios no ocurren usualmente en forma abrupta: el flujo u otras cantidades se desvían del set point gradualmente y en ésta sección se mencionan las operaciones que involucran el control de la temperatura. La Figura 1.25 (b) muestra la respuesta de un controlador proporcional mas reajuste al cambio gradual o de "Rampa" en la señal de medición. El controlador ajusta su salida y por lo tanto la posición de la válvula de control o de otro elemento de control, en respuesta al aumento de la desviación.

Es a menudo deseable, para la operación estable de un proceso, que el controlador debe reaccionar rápidamente a la primera señal de una desviación y esto es conseguido por la incorporación de una acción derivativa.

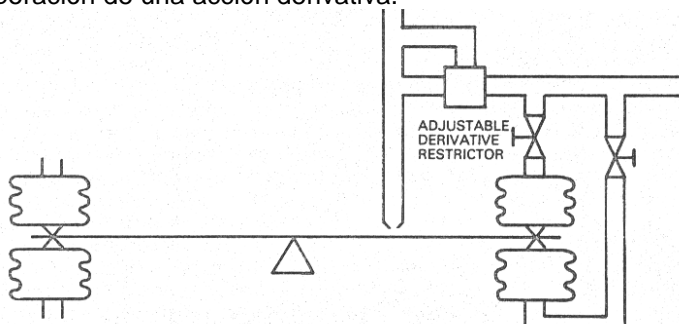


Fig. 1.24 el controlador proporcional- derivativo – mas reajuste

La Figura 1.24 muestra el controlador proporcional- derivativo – mas reajuste. Un ajuste es puesto entre la salida del controlador y los fuelles proporcionales, su efecto es retrasar la transmisión de cualquier cambio en la presión de salida para los fuelles proporcionales. Esto es

una característica de la combinación de boquilla – palometa que es sumamente sensible a los movimientos del controlador. En la falta de la realimentación a los fuelles proporcionales, una desviación muy pequeña entre las señales de medición y del set point, tal como ocurre al principio de un cambio de rampa, el ajuste es capaz de dar un cambio importante en la presión de salida del controlador.

La consecuencia es que una diferencia de presión apreciable es mandado al otro lado del ajuste derivativo casi inmediatamente y la salida del controlador cambia muy rápidamente por la cantidad ab (figura 1.25(c)), dando el aumento en el ajuste al cambio de posición de de la válvula de control.

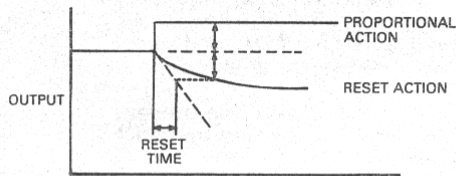


Fig. 1.25(a)

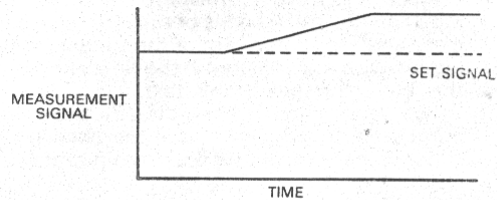


Fig 1.25 (b)

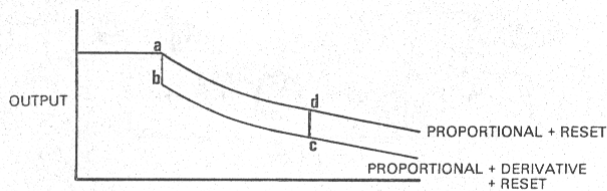


Fig. 1.25(c)

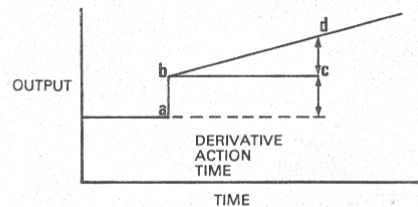


Fig 1.25 (d)

En la rampa el cambio en la señal continúa en una relación uniforme, la salida del controlador también cambia uniformemente después del punto b, la diferencia de presión del ajuste derivativo se queda constante. Al final del cambio de rampa la diferencia de presión desaparece y la presión de salida se estabiliza, el rendimiento en conjunto del controlador equivale a un controlador con acción proporcional mas reajuste.

El grado de acción de derivativa es descrita por una función conocida como "Tiempo derivativo", mostrado en la figura 1.25 (d). La respuesta de un controlador que tiene acción derivativa para el inicio repentino de un "Cambio de rampa" en la carga o punto de ajuste es un cambio en ab de la salida, la magnitud que es proporcional tanto al ángulo de rampa y al ajuste de acción derivativa. El tiempo de acción derivativa es definido como el tiempo que debe transcurrir antes del cambio en la salida cd , correspondiente al movimiento proporcional del controlador en respuesta al cambio de rampa, igual al cambio de acción derivativa ab .

Los controladores prácticos incluyen la acción derivativa de varias maneras. En algunos casos los ajustes derivativos y de reajuste son organizados en paralelo, en otros casos se conectan en serie con la derivada. En otros casos el reajuste automático se arregla en serie, en otros los fuelles proporcionales consisten en dos fuelles (usualmente arreglo concéntrico) uno de los fuelles se comunica con la salida mientras que el segundo se conecta a la salida por medio de una derivada.

Capítulo II Variable Flujo

Introducción

En este capítulo se mencionan instrumentos de medición de flujo y se pretende resaltar que la medición de flujo es uno de los aspectos más importantes en el control de procesos; de hecho, bien puede ser la variable más comúnmente medida. Existen muchos métodos confiables y precisos para medir flujo. Algunos son aplicables solamente a líquidos, otros solamente a gases y vapores; y otros a ambos. El fluido puede ser limpio o "sucio", seco o húmedo, erosivo o corrosivo. Las condiciones del proceso tales como presión, temperatura, densidad, viscosidad, etc., pueden variar.

2.1 Medición de flujo

Todos estos factores afectan la medición y deben ser tomados en cuenta en el momento de seleccionar un medidor de flujo. Es necesario por lo tanto, conocer el principio de operación y características de funcionamiento de los diferentes medidores de flujo disponibles. Sin tal conocimiento, es difícil seleccionar el medidor más apropiado para una determinada aplicación.

De acuerdo al principio de operación, los medidores de flujo pueden ser agrupados de la siguiente manera:

- ✓ Medidores diferenciales (Head Meters).
- ✓ Medidores de desplazamiento positivo.
- ✓ Medidores de área variable.
- ✓ Medidores volumétricos.
- ✓ Medidores de flujo másico.

La Tabla 2.1 muestra las características principales de varios tipos de medidores de flujo utilizados comúnmente en la industria petrolera y la Tabla 2.2 los tipos de transductores.

2.2 Factores que afectan el flujo de un fluido a través de una tubería

Los factores que mayormente afectan el flujo de un fluido a través de una tubería son:

- ✓ La velocidad.
- ✓ La fricción del fluido en contacto con la tubería.
- ✓ La viscosidad.
- ✓ La densidad (gravedad específica).
- ✓ La temperatura.
- ✓ La presión.

a. Velocidad del fluido (V)

Un fluido en una tubería se puede mover de acuerdo a un patrón de flujo determinado, dependiendo en alto grado, de su velocidad. Estos patrones de flujo se conocen como "laminar" y "turbulento". El flujo laminar es referido, algunas veces, como un flujo viscoso que se distingue por que las moléculas del fluido siguen trayectorias paralelas cuando el fluido se mueve a través de la tubería, tal como se muestra en la figura 2.1. El flujo turbulento, por otra parte, se caracteriza por patrones erráticos debido a que la turbulencia crea remolinos que mueven las moléculas del fluido a lo largo de trayectorias irregulares, tal como se muestra en la figura 2.1. El término de velocidad, cuando se aplica al flujo de fluido en tuberías se refiere a la velocidad promedio del mismo fluido.

Se debe utilizar la velocidad promedio ya que la velocidad del fluido varía a través de la sección transversal de la tubería.

Tabla 2.1. Características de los medidores de flujo

Medidor de flujo	Servicio Aplicable						Máxima temperatura (°C)	Máxima presión (psi)	ΔP
	Líquido		Lodos	Gas o vapor	Vapor				
	Limpio	Sucio								Viscoso
Desplazamiento positivo	A	C	A	C	A	C	300	1.300	Alta
Placa de orificio concéntrico	A	B	B	B	A	A	>300	Por transmisor	Medía
Orificio integral Venturi	A	C	C	C	A	C	>300	Por transmisor	Alta
Tobera	A	B	B	B	A	B	>300	Por transmisor	Baja
Codo	A	B	B	B	A	A	>300	Por transmisor	Medía
Tubo Pitot	A	B	C	C	B	B	>300	Por transmisor	Baja
Impacto (Target)	A	B	A	B	A	A	400	10.000	Medía
Rotámetro vidrio	A	B	B	B	A	C	200	300	Medía
Rotámetro metal	A	B	B	B	A	C	900	1.300	Medía
Turbina	A	B	B	B	A	C	400	3.000	Alta
Electromagnético	A	A	A	A	C	C	100	1.500	No
Vórtice	A	B	B	C	A	A	200	1.500	Medía
Ultrasónico tiempo	A	B	B	C	C	C	250	Tubería	No
Ultrasónico Doppler	C	A	B	B	C	C	130	Tubería	No
Térmico (flujo másico)	A	B	C	C	A	A	100	Tubería	Baja
Coriolis (flujo másico)	A	B	A	B	C	C	300	1.300	Baja

Nota:

- A: Aplicable para este servicio
- B: Posiblemente aplicable. Consultar con el fabricante
- C: No aplicable

Medidor	Sistema	Elemento		Tipo de transmisor	
Medidores volumétricos	Presión diferencial	Placa-orificio	Conectados a tubo U o a elemento de fuelle o de diafragma	Equilibrio de fuerzas de Silicio difundido	
		Tobera			
		Tubo Venturi			
		Tubo Pitot			
		Tubo Annubar			
	Área variable	Rotámetro		Equilibrio de movimientos Potenciométrico Puente de impedancia	
	Velocidad	Vertedero con flotador en canales abiertos		Potenciométrico	
		Turbina			
		Sondas ultrasónicas		Piezoeléctrico	
	Fuerza	Placa de impacto		Equilibrio de fuerzas Galgas extensométricas	
Tensión inducida	Medidor magnético		Convertidor potenciométrico		
Desplazamiento positivo	Disco giratorio		Generador tacométrico o transductor de impulsos		
	Pistón oscilante				
	Pistón alternativo	Cicloidal			
	Medidor rotativo	Birrotor Oval			
Torbellino	Medidor de frecuencias de termistancia, o condensador o ultrasonidos		Transductor de resistencia		
Medidores de caudal, masa	Compensación de presión y temperatura en medidores volumétricos			Puente de Wheatstone	
	Térmico	Diferencia de temperatura en dos sondas de resistencia			
	Momento	Medidor axial Medidor axial de doble turbina		Convertidor de par	
	Par giroscópico	Tubo giroscópico			
	Fuerza de Coriolis Presión diferencial	Tubo en vibración Puente hidráulico		Equilibrio de fuerzas	

Tabla 2.2. Tipos de transductores

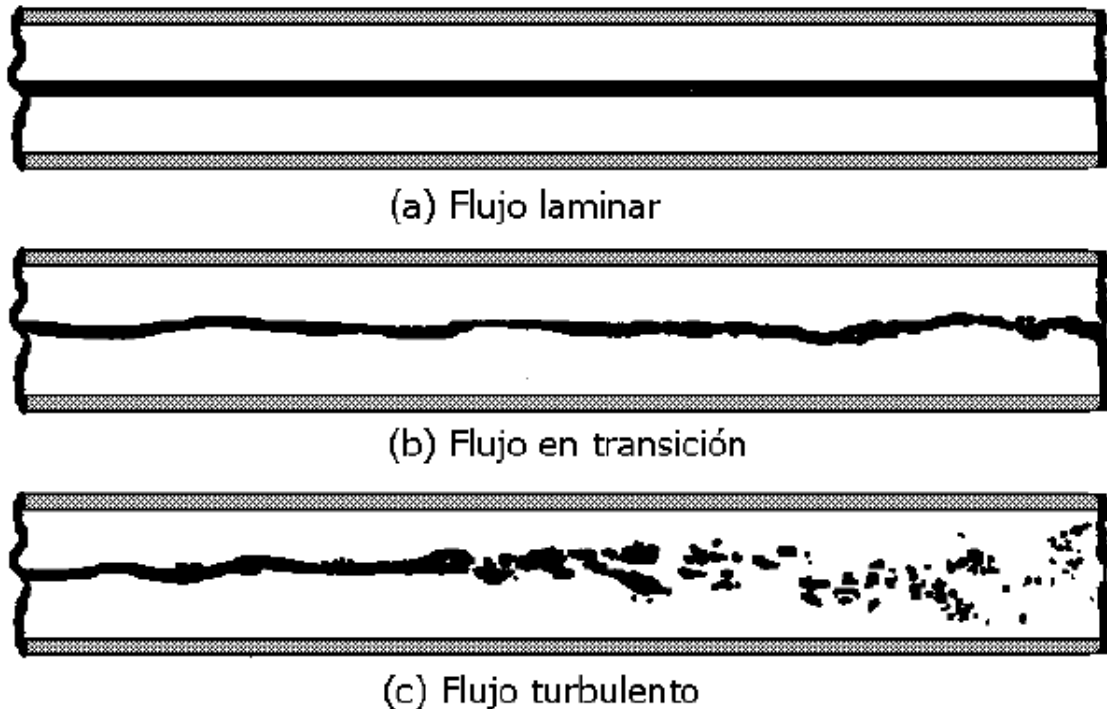


Figura 2.1. Tipos de flujo en una tubería

b. Fricción del fluido en contacto con la tubería

La fricción de la tubería reduce la velocidad del fluido, por lo tanto, se considera un factor negativo.

Debido a esta fricción, la velocidad del fluido es menor cerca de la pared que en el centro de la tubería, mientras más lisa es la tubería, menor es el efecto de la fricción sobre la velocidad del fluido.

La ecuación de Darcy permite calcular la pérdida por fricción. ec. (2.1)

$$h = \left(\frac{f L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Donde:

D: Diámetro de la tubería (pies).

L: Longitud de la tubería (pies).

V: Velocidad del fluido (pies/seg.).

f : Factor de fricción de Fanny.

g: Constante de la gravedad (32,17 pies/seg² ó 9,8 m./seg²).

El factor de fricción **f** es una función del número de Reynolds y de la rugosidad de la tubería.

c. Viscosidad del fluido (μ)

Otro factor que afecta la velocidad de un fluido es la viscosidad (μ). La viscosidad es una medida cuantitativa de la tendencia del fluido a resistir la deformación. Los fluidos que fluyen libremente tienen viscosidades bajas; los fluidos que parecen resistir a fluir libremente tienen viscosidades altas. La viscosidad se mide en unidades de centipoise, (cp = grs. / cm. seg.) la cual es referida como una unidad de viscosidad absoluta.

Otro tipo de viscosidad llamada viscosidad cinemática se expresa en unidades de centistokes. Se obtiene dividiendo los centipoises por la gravedad específica del fluido.

Algunos medidores de flujo se calibran para un valor de la viscosidad del fluido que pasa por el medidor. Si la viscosidad cambia, también lo hace el factor de calibración, afectando la exactitud de la medición.

Otros medidores de flujo, como los medidores que utilizan el principio de presión diferencial, tienen limitaciones de viscosidad. Esto se debe a que por encima de ciertos valores de viscosidad, los factores de flujo que intervienen en la ecuación del medidor, ya no pueden ser considerados constantes.

La viscosidad de un líquido depende principalmente de su temperatura y en menor grado de su presión. La viscosidad de los líquidos generalmente disminuye al aumentar la temperatura y la viscosidad de los gases normalmente aumenta al aumentar la temperatura. La presión tiene muy poco efecto sobre la viscosidad de los líquidos. Su efecto sobre la viscosidad de gases solamente es significativo a altas presiones.

d. Densidad del fluido (Gravedad específica)

La densidad de una sustancia se define como su peso por unidad de volumen. La densidad de los líquidos cambia considerablemente con la temperatura, mientras que los cambios por variaciones en la presión son despreciables. La densidad de los gases y vapores es mayormente afectada por los cambios en la presión y la temperatura. Muchas mediciones de flujo se realizan sobre la base de mediciones de volumen, de modo que la densidad del fluido debe ser conocida o medida para determinar la verdadera masa de flujo.

La gravedad específica (Sg) de un fluido es la relación de su densidad con respecto a una densidad patrón. El patrón para líquidos es el agua ($= 1 \text{ gr./cm}^3$ a 4°C y 1 atm). El patrón para gases es el aire ($= 1,29 \text{ gr./lt}$ a 0°C y 1 atm).

Se ha determinado que los factores de flujo más importantes pueden ser correlacionados juntos en un factor adimensional llamado el **Número de Reynolds**, el cual describe el flujo para todas las velocidades, viscosidades y diámetros de tubería. En general, el Número de Reynolds define la relación de la velocidad del fluido en función de su viscosidad. El número de Reynolds se expresa a través de la siguiente ecuación: ec.(2.2)

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

D: Diámetro interno de la tubería

ρ : Densidad del fluido

μ : Viscosidad del fluido

A bajas velocidades o altas viscosidades, Re es bajo y el fluido fluye en forma de suaves capas o láminas, con la velocidad más alta en el centro de la tubería y velocidades bajas cerca de la pared de la tubería donde las fuerzas viscosas lo retienen. Este tipo de flujo es llamado “**flujo laminar**” y está representado por Números de Reynolds (Re) menores que 2.000. Una característica significativa del flujo laminar es la forma parabólica de su perfil de velocidad como puede verse en la figura 2.2.

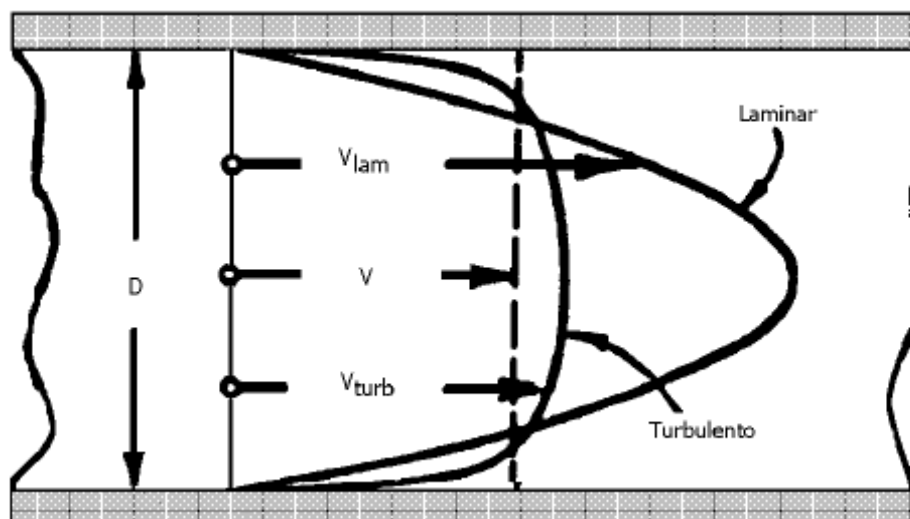


Figura 2.2. Características de la velocidad del fluido

A altas velocidades o bajas viscosidades el fluido se descompone en turbulentos remolinos con la misma velocidad promedio en toda la tubería. En este “flujo turbulento” el perfil de velocidad tiene una forma mucho más uniforme. El flujo turbulento está representado por

Números de Reynolds mayores que 4.000. En la zona de transición con Número de Reynolds entre 2.000 y 4.000 el flujo puede ser laminar o turbulento.

e. Efectos de la presión y de la temperatura del fluido

Los efectos de la presión y la temperatura ya han sido descritos en el análisis que se hizo sobre la densidad y la viscosidad. El método más común de medición de flujo, es decir, el método de presión diferencial, supone que tanto la presión como la temperatura permanecen constantes.

En algunas aplicaciones esta suposición es válida. En otras es necesario hacer compensación por cambios en la presión y/o temperatura del fluido.

2.3 Medidores de flujo diferenciales

Los medidores de flujo de tipo diferenciales son los más comúnmente utilizados. Entre ellos pueden mencionarse: la placa de orificio, el tubo Venturi, el tubo Pitot, la tobera y el medidor de impacto

(Target). Estos miden el flujo de un fluido indirectamente, creando y midiendo una presión diferencial por medio de una obstrucción al flujo. El principio de operación se basa en medir la caída de presión que se produce a través de una restricción que se coloca en la línea de un fluido en movimiento, esta caída de presión es proporcional al flujo. La proporcionalidad es una relación de raíz cuadrada, en la cual el flujo es proporcional a la raíz cuadrada del diferencial de presión.

Esta relación hace que la medición de flujos menores del 30% del flujo máximo, no sea práctica debido a la pérdida de precisión.

Los medidores de flujo de tipo diferencial generalmente están constituidos por dos componentes: el elemento primario y el elemento secundario. El elemento primario es el dispositivo que se coloca en la tubería para obstruir el flujo y generar una caída de presión. El elemento secundario mide la caída de presión y proporciona una indicación o señal de transmisión a un sistema de indicación o control. **El elemento primario se calcula y se selecciona de acuerdo al fluido y las características del proceso.** Se han desarrollado ecuaciones que toman en cuenta casi todos los factores que afectan la medición de flujo a través de una restricción. La ecuación básica a partir de la cual fueron desarrolladas estas ecuaciones, es la ecuación de Bernoulli.

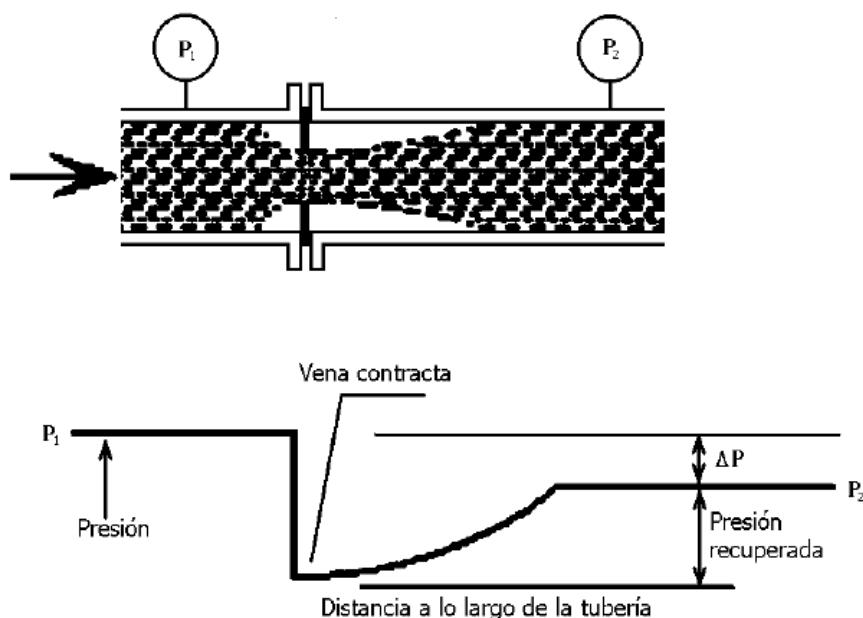


Figura 2.3. Caída de presión a través de una restricción

Tomando como referencia la figura 2.3; si P_1 , P_c , V_1 , V_c son las presiones absolutas y velocidades en la zona antes de la restricción y en la vena contracta respectivamente; y si A y a son el área transversal de la tubería y de la restricción respectivamente; al aplicar la ecuación de Bernoulli entre estos dos puntos, resulta: ec. (2.3)

$$\frac{P_1}{\tau} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_c}{\tau} + \frac{V_c^2}{2g}$$

Reordenando términos, queda la ecuación 2.4

$$\left(\frac{P_1 - P_c}{\tau}\right) = \left(\frac{V_c^2 - V_1^2}{2g}\right)$$

Si se hace a H_w : el diferencial de presión efectiva medida en unidades de altura (mm H₂O, pulgadas

H₂O etc.), entonces: ec. (2.5)

$$H_w = \left(\frac{P_1 - P_c}{\tau}\right)$$

Y ec. (2.6)

$$H_w = \left(\frac{V_c^2 - V_1^2}{2g}\right)$$

Como el flujo Q_1 es igual al flujo a través de la restricción, entonces $Q_1 = Q_c$, con lo cual se tiene: ec.(2.7)

$$V_1 = V_c \left(\frac{a}{A}\right)$$

Reemplazando en la ecuación 6.6 el valor de V_1 , entonces: ec. (2.8)

$$H_w = \left[\frac{V_c^2 - V_c^2 \left(\frac{a}{A}\right)^2}{2g} \right]$$

De la ecuación 2.8 se despeja a V_c , quedando: ec. (2.9) y (2.10)

$$V_c^2 = \frac{2g H_w}{\left(1 - \frac{a^2}{A^2}\right)} = \frac{2g H_w}{\left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)}$$

$$V_c = \sqrt{\frac{2g H_w}{\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right]}}$$

Donde:

d: Diámetro del orificio

D: Diámetro de la tubería

Para expresar el flujo en unidades de volumen o peso, se supone que el área a la cual la velocidad es igual a V_c es el área de la restricción del elemento primario de medición. ec.(2.11)

$$Q_t = V_c a = a \sqrt{\frac{2g H_w}{(1 - \beta^4)}}$$

Donde:

Q_t : Flujo teórico

β : Relación de diámetros d/D

En términos del flujo másico se puede escribir la ecuación siguiente: ec.(2.12)

$$W_t = Q_t \rho = \rho a \sqrt{\frac{2 g H_w}{(1-\beta^4)}}$$

Para corregir las ecuaciones 2.11 y 2.12 y expresar el flujo como **flujo real** y no como flujo teórico, se debe introducir un factor de corrección basado en datos experimentales conocido como coeficiente de descarga **C**. ec.(2.13)

$$C = \frac{\text{Flujo real o actual}}{\text{Flujo teórico}} = \frac{Q}{Q_t}$$

Al introducir el coeficiente de descarga en las ecuaciones 2.11 y 2.12 se obtienen: ec.(2.14 y 2.15)

$$Q = C_a \sqrt{\frac{2 g H_w}{(1-\beta^4)}}$$

$$W = C_a \rho \sqrt{\frac{2 g H_w}{(1-\beta^4)}}$$

Como **C** y β son constantes para un mismo conjunto de condiciones, pueden agruparse como: ec.(2.16)

$$K = \frac{C}{(1-\beta^4)}$$

Donde K es el coeficiente de descarga, incluyendo el factor de aproximación de velocidad. El término $(1/(1-\beta^4))$ se conoce comúnmente como **factor de aproximación**.

Reemplazando el valor de K en las ecuaciones 2.14 y 2.15, resultan: ec.(2.17 y 2.18).

$$Q = K a \sqrt{2 g H_w}$$

$$W = K a \rho \sqrt{2 g H_w}$$

Las ecuaciones 2.17 y 2.18 se aplican básicamente para cualquier restricción, pero están limitados a flujos incompresibles. Al emplear unidades consistentes estas ecuaciones se convierten en: ec (2.19 y 2.20).

$$Q = \frac{359 C d^2 \sqrt{\frac{H_w}{\rho}}}{1-\beta^4} \left(\frac{\text{pie}}{\text{seg}} \right)$$

$$W = \frac{359 C d^2 \sqrt{H_w}}{1-\beta^4} \left(\frac{\text{lb}}{\text{seg}} \right)$$

Donde:

H_w : Diferencial de presión efectiva en pulgadas de H_2O

d: Diámetro del orificio en pulgadas

ρ : Densidad del fluido en lb./pie^3

Corrección para gases y vapores: cuando la medición se hace para gases o vapores, otro factor de corrección "Y" debe ser aplicado para corregir la ecuación del fluido al pasar desde

una región de alta presión, a una de baja presión. En placas de orificio el factor de expansión se determina en forma experimental. La ecuación de flujo para gases y vapores es: ec. (2.21)

$$W = \frac{359 C Y d^2 \sqrt{H_w}}{1 - \beta^4}$$

Las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.21 se aplican para cualquier tipo de restricción. La aplicación de estas ecuaciones para medidores de flujo comerciales requiere factores de corrección adicionales.

Actualmente existe una gran variedad de programas de computación que permiten calcular el flujo o las dimensiones de la restricción, en base a las características del fluido y las condiciones de proceso suministradas por el usuario del programa; y en los cuales se incorporan los factores de corrección mencionados anteriormente.

La instalación correcta de todos los medidores de flujo diferenciales, requiere la existencia de tramos rectos de tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor con el fin de garantizar un perfil simétrico o uniforme de velocidad antes de la restricción. En la figura 6.4 se indican los requerimientos de tubería recta, aguas arriba y aguas abajo del medidor, en función de la configuración de la instalación.

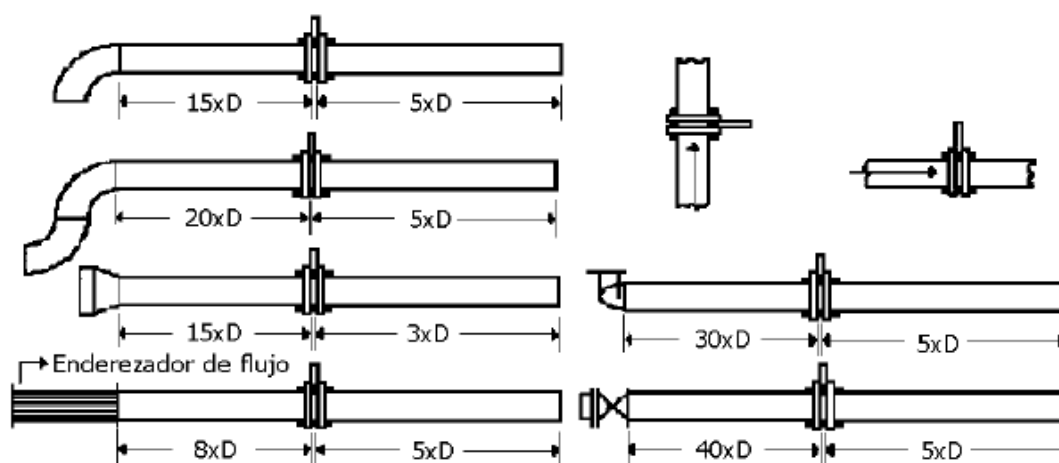


Figura 2.4. Requerimientos mínimos de tubería recta para colocar placas orificio

Para el cálculo de placas orificios (diafragmas) se recomiendan como referencia obligatoria las Normas:

- **5167-1980 Medida del flujo de fluidos por medio de placas-orificio, toberas o tubos Venturi, insertados en conductos de sección circular.** International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza.

- **ASME 19.5 — Flowmeter Computation Handbook.** American Society for Mechanical Engineers, New York, 1971

- **A. P. I. 2530 — Septiembre 1985 para gas natural.**

- **Principle and Practice of Flow Meter Engineering.** L. K. Spink (1978)

- **Normas AGA-3 y AGA-7 – Gas Measurement Committee Report –** American Gas Association, Cleveland, Ohio.

La referencia [Creus S., Antonio. **INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**] en la página 124 muestra el listado de un programa Basic para el cálculo de elementos diprimógenos según la Norma ISO **5167-1980** el cual se recomienda como parte de las herramientas técnicas que debe tener un Ingeniero Mecánico, algunos proveedores suministran programas para cálculos hidráulicos como apoyo a sus productos.

a. Placas orificio

La placa de orificio esta constituida por una placa delgada perforada, la cual se instala en la tubería utilizando bridas especiales, las placas orificio se muestran en la figura 2.5.

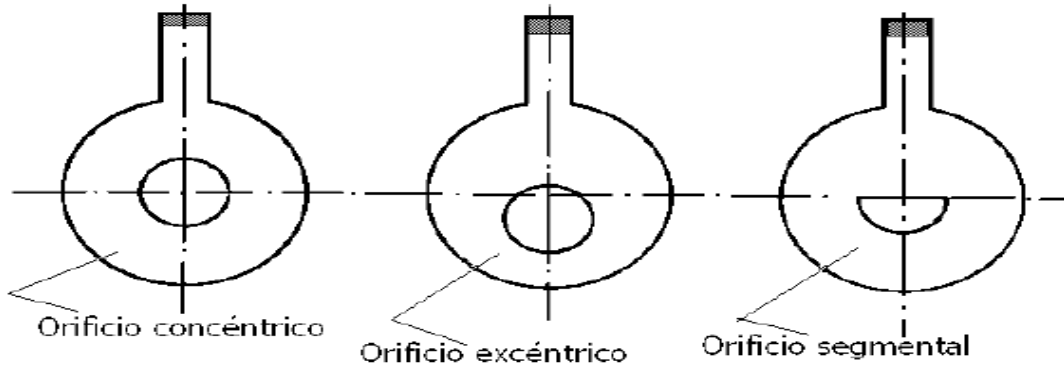


Figura 2.5. Tipos de placas orificios (diafragmas)

Generalmente se construye de acero inoxidable con un espesor que oscila entre 1/8 y 1/2 pulgada.

Otros tipos de materiales tales como Monel, níquel, Hastelloy, se utilizan cuando se necesita prevenir la corrosión o contaminación. Dos tomas de presión colocadas antes y después de la placa, captan la presión diferencial producida por la placa de orificio. La disposición de las tomas de presión puede verse en la figura 2.6 (a), (b) y (c). Los tipos de tomas de presión comúnmente más utilizados son:

-Tomas sobre la brida: es el tipo más comúnmente utilizado, figura 2.6 (a). En este caso las tomas están taladradas sobre las bridas que soportan la placa y están situadas a una distancia de 1 pulgada de la misma. Este tipo de tomas no se recomienda para diámetros de tubería menores de dos pulgadas (2"), debido a que la vena contracta puede estar a menos de 1 pulgada de la placa de orificio.

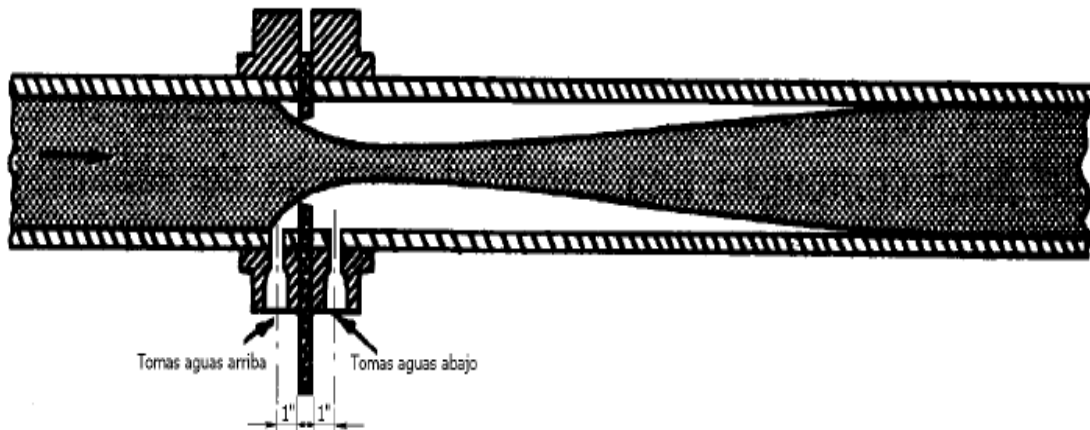


Figura 2.6 (a) Disposición de las tomas de presión diferencial con tomas en la brida

-Tomas en la vena contracta: localizados a una distancia de $1 D$ (D = diámetro nominal de la tubería) aguas arriba de la placa, y $1/2 D$ aguas abajo de la placa, o sea sobre la vena contracta, figura 2.6 (b). Sin embargo, el punto de la vena contracta varía con la relación de diámetros d/D , produciéndose errores en la medición si se cambia el diámetro del orificio.

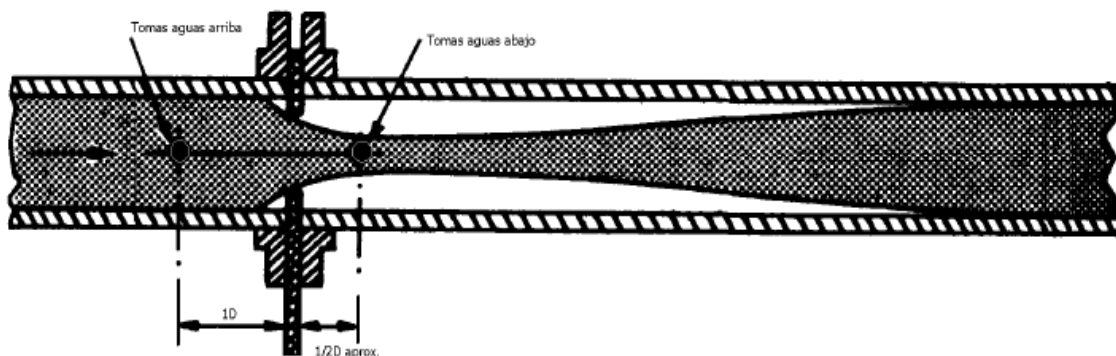


Figura 2.6 (b) Disposición de las tomas de presión diferencial en la vena contracta

-Tomas en la tubería: están localizadas a una distancia de $2 \frac{1}{2} D$ aguas arriba y $8 D$ aguas abajo de la placa, figura 2.6 (c). Miden la pérdida de presión permanente a través de un orificio. Este tipo de tomas requiere mayor cantidad de tramos rectos de tuberías.

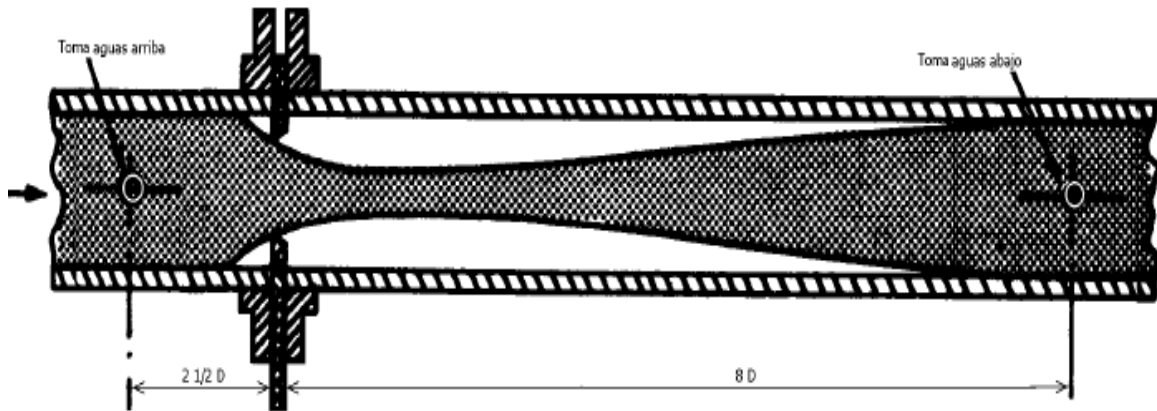


Figura 2.6 (c) Disposición de las tomas de presión diferencial en la tubería

El orificio de la placa puede ser de tres tipos, figura 2.5: concéntrico, excéntrico y segmental. Las placas de orificio de tipo excéntrico y segmental se utilizan principalmente en aplicaciones de fluidos que contienen materiales en suspensión o condensado de vapor. Las placas de orificio de tipo concéntrico se recomiendan para aplicaciones de líquidos limpios, de baja viscosidad; para la mayoría de los gases; y vapor a baja velocidad.

La relación del diámetro del orificio con respecto al diámetro interno de la tubería se llama "relación beta" ($\beta = d/D$). Para la mayoría de las aplicaciones, esta relación debe estar entre 0,20 y 0,70.

Los valores óptimos de β están entre 0,4 y 0,6. Para una misma velocidad de flujo una alta relación beta produce menor caída de presión que una baja relación.

La práctica normal en el diseño de una placa de orificio es la de suponer un diferencial de presión (H_w) estándar (Ejemplo: 100 pulgadas de columna de agua), y luego calcular el diámetro del orificio para la máxima tasa de flujo. Todas las placas del orificio pueden ser diseñadas para que produzcan un H_w estándar.

Esto permite que el mismo transmisor o elemento secundario pueda ser utilizado con todas las placas de la planta. A pesar de ser simple, la placa de orificio es un elemento de precisión. La exactitud depende de la uniformidad y del espesor de la placa, y del maquinado del orificio. La calidad de la instalación también afecta la exactitud. Las conexiones, válvulas y otros elementos distorsionantes del flujo pueden cambiar el perfil de velocidad creando remolinos que afectan la medición, las longitudes rectas de tubería aguas arriba y aguas abajo de la placa, se establecen como normas para garantizar la calidad de la medición. Las longitudes de los tramos rectos de tubería antes y después de la placa dependen del tipo de instalación.

b. Tubo Venturi

El tubo Venturi clásico está caracterizado por su entrada convergente y salida divergente, tal como se muestra en la figura 2.7.

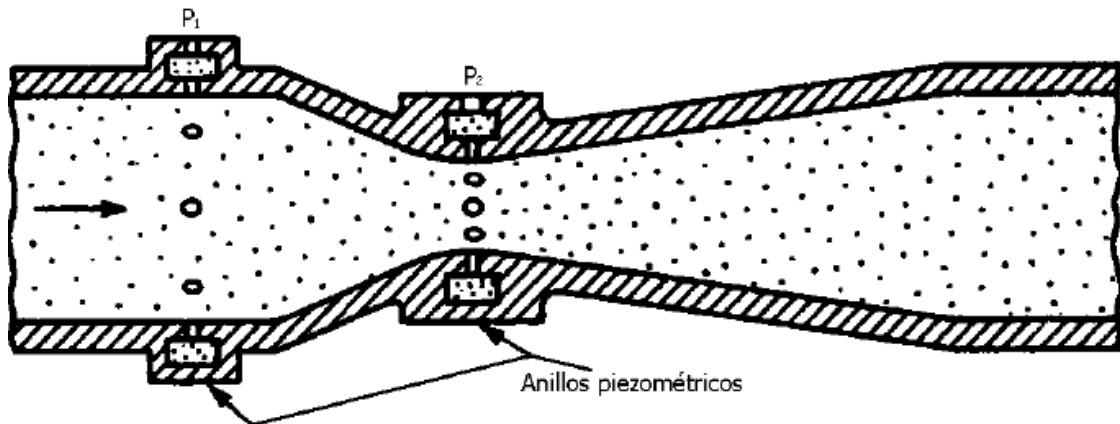


Figura 2.7. Tubo Venturi

La presión interna se mide en su sección de entrada, la cual tiene el mismo diámetro que la tubería.

Luego sigue una sección de transición, en la cual el diámetro interno se reduce hasta el diámetro de la sección de la garganta. La presión estática se mide en la sección de la garganta, la cual se dimensiona para producir un diferencial de presión deseado a una determinada tasa de flujo. En la sección de salida del tubo Venturi, el diámetro de la garganta incrementa gradualmente hasta hacerse igual al diámetro de la tubería. El tubo Venturi se utiliza para medir flujo de líquidos y gases, cuando se quiere minimizar la pérdida de presión. Su medidor puede manejar entre un 25 y 50% mayor flujo que una placa de orificio, para diámetros de tubería y pérdidas de presión comparables.

No tiene partes móviles y no existe la posibilidad de que se puedan acumular partículas en la garganta; esto trae como consecuencia un bajo mantenimiento, lo que lo hace atractivo para manejar flujos viscosos o lodos. El coeficiente de descarga para el tubo Venturi clásico oscila entre 0,984 y 0,985. La relación de diámetro recomendable es $0,4 < \beta < 0,75$. Para fluidos compresibles se tiene la siguiente limitación. ec.(2.22)

$$\frac{\text{Diferencial de presión}}{\text{presión aguas arriba}} \leq 0,25$$

Existen modificaciones del diseño del tubo Venturi clásico, la selección del modelo correcto se debe realizar con el auxilio de las Normas previamente mencionadas.

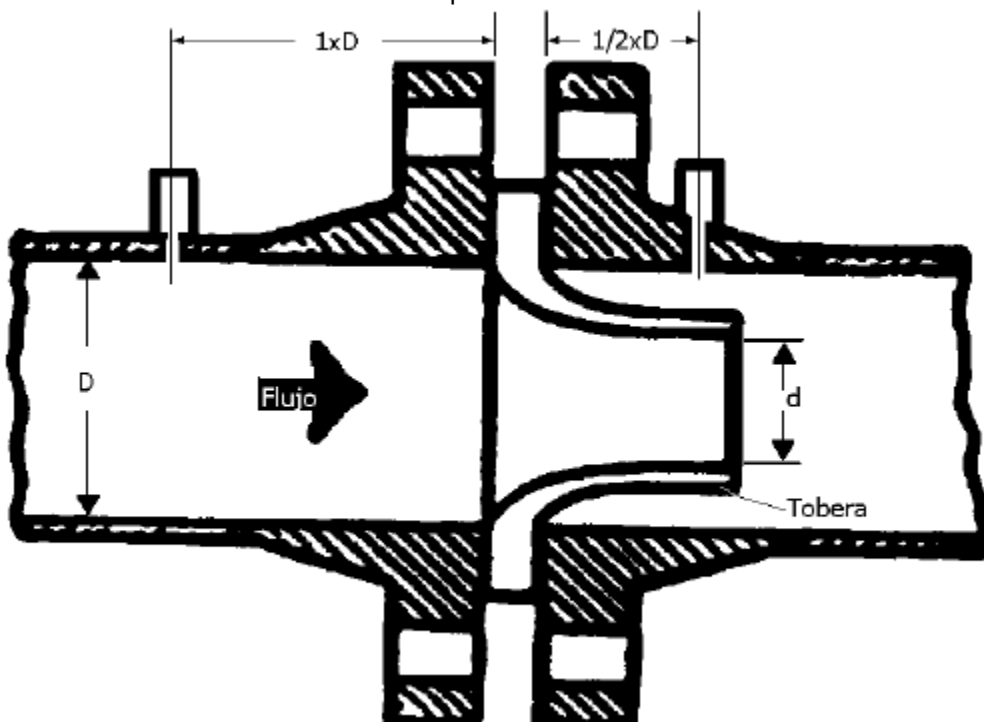


Figura 2.8. Tobera

c. Tobera

La tobera puede considerarse como una variación del tubo Venturi. La abertura de la tobera es una restricción elíptica tal como se muestra en la figura 6.8.

Las tomas de presión se localizan aproximadamente $\frac{1}{2} D$ aguas abajo y $1 D$ aguas arriba; donde D es el diámetro de la tubería. La tobera se utiliza principalmente cuando la turbulencia es alta ($Re > 50.000$), tal como flujo de vapor a altas temperaturas. La caída de presión que se produce en la tobera es mayor que en un tubo Venturi pero menor que en una placa de orificio.

d. Tubo Pitot

Un tubo Pitot mide dos presiones simultáneamente: presión de impacto (P_t) y presión estática (P_s).

La unidad para medir la presión de impacto es un tubo con el extremo doblado en ángulo recto hacia la dirección del flujo. El extremo del tubo que mide presión estática es cerrado pero tiene una pequeña ranura en un lado. Los tubos se pueden montar separados o en una sola unidad. En la figura 6.9 se muestra un esquema de un tubo Pitot.

La presión diferencial medida a través del tubo Pitot puede calcularse utilizando la ecuación de Bernoulli, y resulta ser proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido: ec.(2.23) y (2.24)

$$P_t - P_s = \frac{\rho V^2}{2}$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}}$$

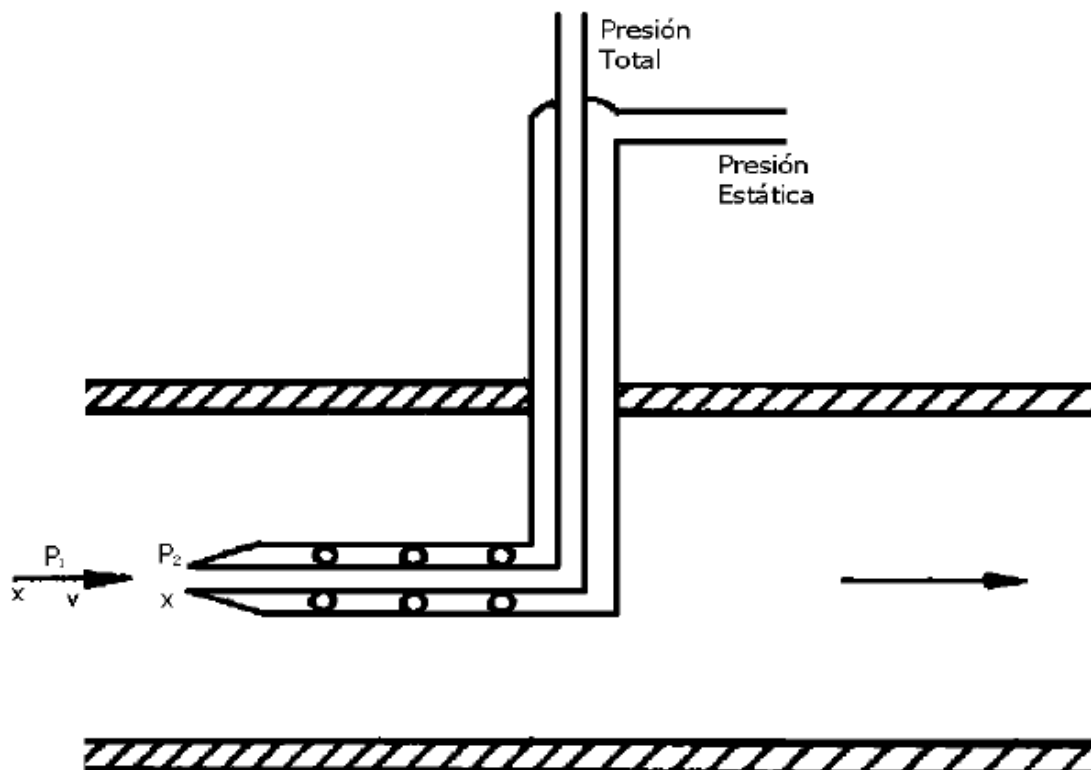


Figura 2.9. Tubo Pitot

Cambios en los perfiles de velocidad del flujo pueden causar errores significativos. Por esta razón los tubos Pitot se utilizan principalmente para medir flujo de gases, ya que en este caso, los cambios en la velocidad del flujo no representan un inconveniente serio. Los tubos Pitot tienen limitada aplicación industrial debido a que pueden obstruirse fácilmente con las partículas que pueda tener el fluido.

e. Medidor de impacto Target

El último desarrollo de interés en medidores diferenciales es el medidor de impacto (figura 2.10).

Puede ser visto como una placa de orificio instalada al revés. En realidad, el elemento primario es un disco sólido circular montado perpendicularmente al flujo y suspendido al nivel del eje de la tubería por una barra de fuerza controlada por un sistema electrónico o neumático. Este sistema mide la fuerza de impacto F_i sobre el disco, la cual se expresa por la ecuación 2.25.

$$F_i = C_d \rho \frac{V^2}{2} A$$

Donde:

C_d : Coeficiente de arrastre (drag), determinado experimentalmente en laboratorio.

ρ : Densidad del fluido.

V : Velocidad promedio del fluido.

A : Área del disco.

De acuerdo al teorema de Bernuolli, esta fuerza F_i , es proporcional a la diferencia entre la presión total y la presión estática, de tal manera que el caudal Q_v , puede obtenerse una vez más por la relación de raíz cuadrada.

Este tipo de medidor es apropiado para flujos "sucios" y de bajo número de Reynolds, donde el elemento primario clásico no es adecuado; también pueden usarse para líquidos limpios y gas natural. Una vez efectuada su calibración y adecuada instalación, el medidor de impacto provee buena exactitud, pero sus mejores características son su rangeabilidad y rápida respuesta dinámica.

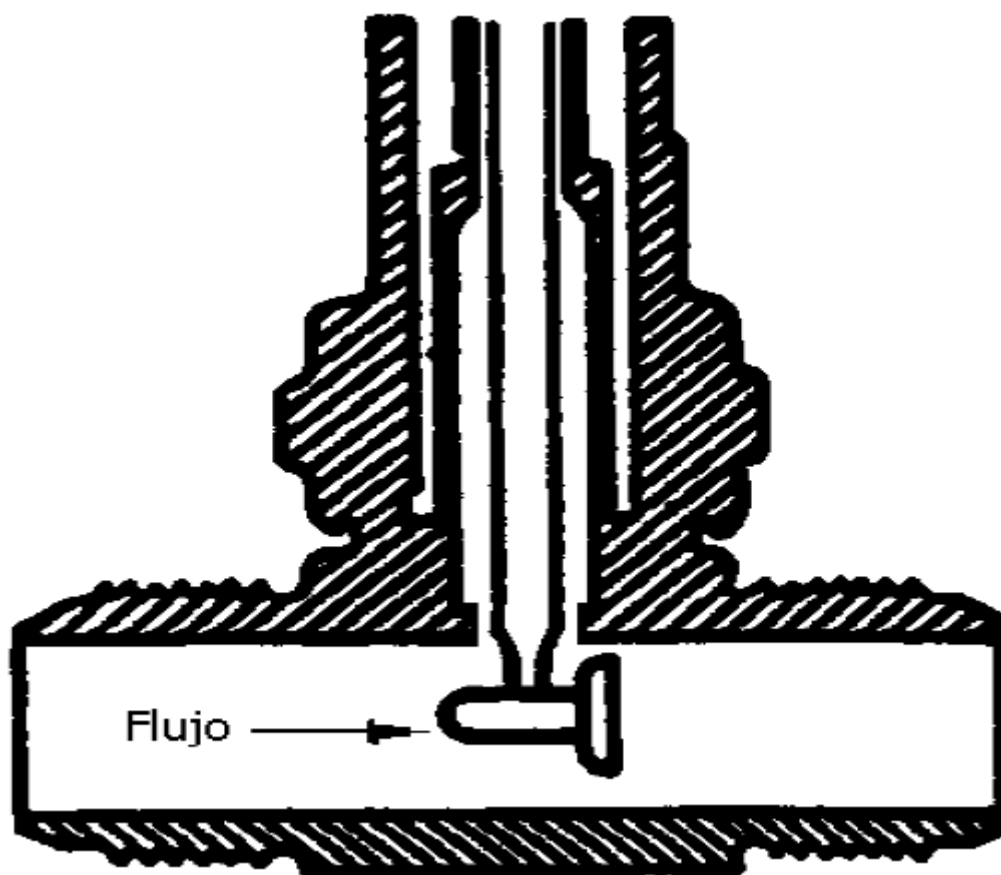


Figura 2.10. Medidor de impacto.

2.4 Medidores de flujo de desplazamiento positivo

Los medidores de desplazamiento positivo son dispositivos que separan la corriente de flujo en segmentos volumétricos individuales. Un volumen conocido de fluido se aísla mecánicamente en el elemento del medidor, y es pasado desde la entrada de este hasta su salida, llenando y vaciando alternadamente los compartimientos o cámara del medidor, (figura 2.11). Las partes mecánicas del medidor se mueven aprovechando la energía del fluido. El volumen total de fluido que pasa a través del medidor en un período de tiempo dado, es el producto del volumen de la muestra por el número de muestras. Los medidores de flujo de desplazamiento positivo frecuentemente totalizan directamente el flujo en un contador integral, pero también pueden generar una salida de pulso que puede ser leída localmente o transmitida a una sala de control.

Los medidores de desplazamiento positivo se adaptan excelentemente a aplicaciones de procesos discontinuos y a aquellos que requieren una totalización del volumen que pasa a través del medidor.

En la instalación de un medidor de desplazamiento positivo se recomienda instalar un retenedor o filtro, aguas arriba, para evitar que partículas extrañas entren en la cámara del medidor. También se recomienda un mecanismo para eliminar las burbujas de aire presentes en el líquido, ya que el medidor registrará el volumen de aire con el líquido. Los medidores de flujo de desplazamiento positivo son sensibles a los cambios de viscosidad. Para viscosidades por debajo de 100 centistokes el medidor debería ser calibrado para el fluido específico. Por encima de este valor, cambios en la viscosidad no afectan el funcionamiento. Los medidores de desplazamiento positivo pueden clasificarse, de acuerdo al movimiento del elemento de medición, en:

- ✓ Disco oscilante
- ✓ Pistón oscilante
- ✓ Tipo rotación
- ✓ Pistón reciprocante

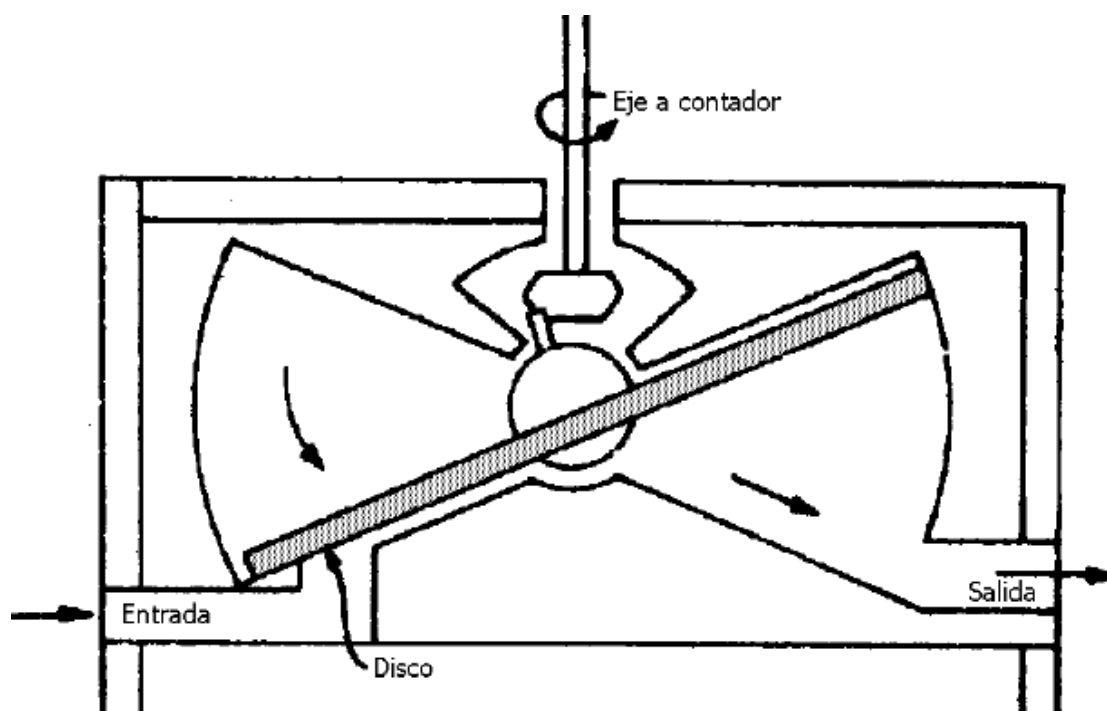


Figura 2.11. Medidor de disco oscilante

La mayoría de estos medidores se utilizan en aplicaciones para líquidos, sin embargo, existen algunas versiones disponibles para gases. La configuración interna de estos medidores puede tomar diferentes formas, pero solamente dos tipos, el de disco oscilante y el de engranaje tipo óvalo serán descritos en estos apuntes.

El medidor de disco oscilante utiliza una cámara de medición cilíndrica dentro de la cual se produce el movimiento oscilante (o tipo bamboleo) del disco al pasar el flujo, permitiendo la rotación del eje.

El movimiento del eje es transmitido a un magneto el cual se usa para mover una magneto externa al medidor. Esta rotación puede utilizarse para conducir el mecanismo de un registrador o un transmisor. La operación de este tipo de medidor se muestra en la figura 2.11. Como este medidor atrapa o encierra una cantidad fija de flujo cada vez que el eje rota, entonces el caudal es proporcional a la velocidad de rotación del mismo.

Este tipo de medidor encuentra su mayor aplicación en agua y en servicios donde la precisión no es de mayor importancia.

El medidor de engranaje tipo óvalo encuentra su mayor aplicación en el manejo de fluidos viscosos, donde a menudo se hace difícil la aplicación de otros medidores debido a limitaciones del número de Reynolds. Su diseño tolera en menor grado el manejo de líquidos con sólidos en suspensión; sin embargo, ello podría ocasionar daños en los dientes de los engranajes afectando su precisión.

El diferencial de presión a través del medidor de flujo, origina las fuerzas que actúan sobre el par de engranajes y los hace rotar (figura 2.12).

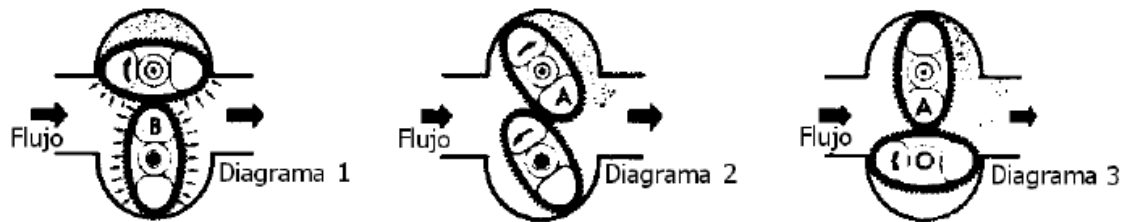


Figura 2.12. Principio de operación del medidor de engranaje tipo óvalo

2.5 Medidores de flujo de área variable

Mientras que la placa de orificio mantiene una restricción constante al flujo, y la caída de presión resultante aumenta al aumentar el flujo, el rotámetro varía el área de la restricción para mantener una caída de presión constante.

Un rotámetro está constituido por un tubo vertical de área interna variable, a través del cual se mueve el flujo en sentido ascendente, figura 2.13. Un flotador, bien sea esférico o cónico, que tiene una densidad mayor que la del fluido, crea un pasaje anular entre su máxima circunferencia y el interior del tubo. En un rotámetro clásico el flotador se mueve hacia arriba y hacia abajo dentro del tubo, el cual se encuentra graduado para indicar la tasa de flujo a la posición del flotador. Si el tubo no es transparente (por ejemplo metálico), la posición del flotador puede indicarse eléctrica o neumáticamente. La exactitud de un rotámetro puede variar entre 0,5 y 5% de la tasa de flujo. El rango puede variar desde una fracción de cm./min. Hasta 3.000 gpm. Puede medir flujo de líquidos, gases y vapores, y es insensible a las configuraciones de tubería aguas arriba.

Los rotámetros se encuentran disponibles en una amplia variedad de estilos. Los materiales del tubo, la forma y materiales del flotador, el tipo de conexiones, las longitudes de escala, la presión y la temperatura a las que puede operar, varían para cubrir un amplio rango de condiciones de servicio.

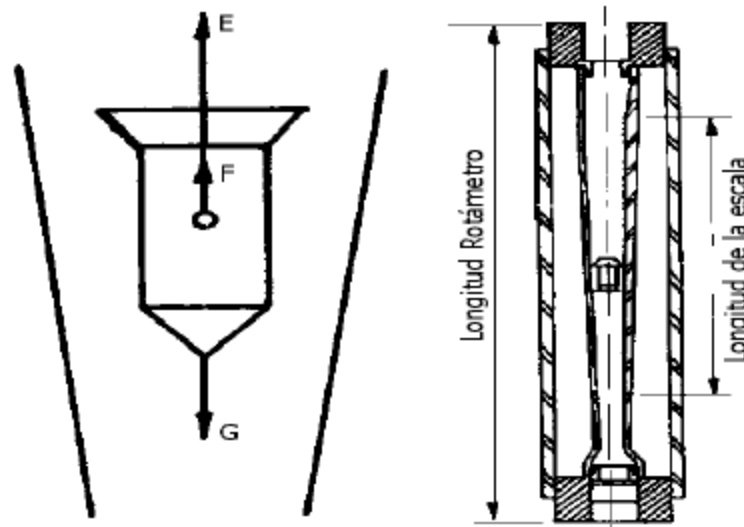


Figura 2.13. Principio de operación del rotámetro

La capacidad de un rotámetro se calcula en base al flujo de aire equivalente para servicios de gas o vapor; y en base al flujo de agua equivalente para servicios de líquido. Los fabricantes proporcionan las tablas de capacidad para varios diámetros de tubos y para diferentes tipos de flotador, basados en flujos de agua y aire a condiciones estándar. El flujo actual del fluido a ser medido con el rotámetro, debe convertirse a gpm de agua equivalente o a scfm de aire equivalente para poder utilizar las tablas de capacidad dadas por el fabricante, y así seleccionar el tamaño correcto del rotámetro. Para hacer esta conversión deben utilizarse las siguientes ecuaciones: (2.26 para líquidos y 2.27 para gases respectivamente)

$$gpm H_2O = gpm Fluido \sqrt{\frac{7,02 \rho}{(\rho_F - \rho)}}$$

$$Scfm Aire = Scfm Fluido \sqrt{\frac{8,02 SG 14,7 T_{op}}{\rho_F P_{op} 530}}$$

Donde:

SG: Gravedad específica del gas a condiciones estándar

T_{op} : Temperatura absoluta a condiciones de operación, $^{\circ}R$

P_{op} : Presión absoluta a condiciones de operación, psia

ρ : Densidad del fluido a condiciones de operación, gr./cm³

ρ_F : Densidad del flotador requerido

2.6 Medidores de flujo volumétricos

Un medidor de velocidad, utilizado para medir flujo volumétrico, puede definirse como un medidor en el cual la señal del elemento primario es proporcional a la velocidad del fluido. Utilizando la ecuación: ec. (2.28)

$$Q=AV$$

Donde:

Q: Tasa de flujo.

V: Velocidad del fluido.

A: Área transversal de la tubería.

Puede observarse que la señal generada es lineal con respecto al flujo volumétrico. Los medidores de tipo volumétricos son menos sensibles a las variaciones en el perfil de velocidad del fluido, cuando se les compara con los medidores de flujo de tipo diferencial. Debido a que existe una relación lineal con respecto al flujo, no existe una relación de raíz cuadrada como en el caso de los medidores diferenciales; lo cual explica su mayor relación de flujo máximo a flujo mínimo. Los medidores de flujo de tipo volumétrico descritos a continuación tienen una amplia aplicación en la industria petrolera.

- **Medidores tipo turbina:** Un medidor tipo turbina esta constituido por un rotor con aspas o hélices instalado dentro de un tramo recto de tubería, axialmente en la dirección del flujo, tal como se muestra en la figura 2.14. El rotor generalmente está soportado por cojinetes para reducir la fricción mecánica y alargar la vida de las partes móviles. A medida que el fluido pasa a través del tubo, el rotor gira a una velocidad proporcional a la velocidad del fluido. En la mayoría de los medidores, un dispositivo de bobina magnética, colocado fuera de la tubería, detecta la rotación de las aspas del rotor. A medida que cada aspa del rotor pasa por la bobina, se genera un pulso de voltaje en la bobina. El número total de pulsos es proporcional a la cantidad total de fluido que pasa a través del rotor, mientras que la frecuencia de los pulsos es proporcional a la tasa de flujo.

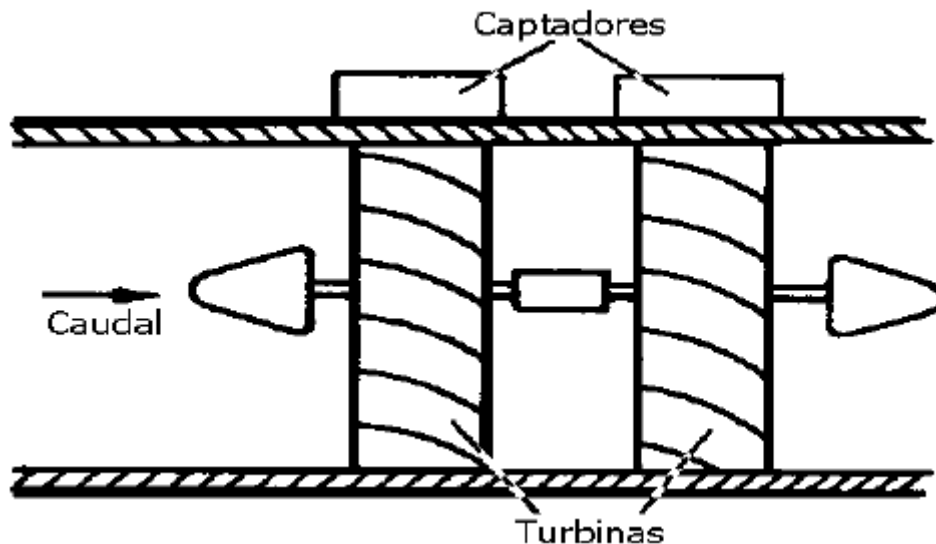


Figura 2.14. Medidor de flujo, tipo turbina

También se utilizan detectores de radio frecuencia para señalar el movimiento de las aspas. En este caso, una señal de alta frecuencia es aplicada sobre la bobina. A medida que las aspas rotan, la señal de alta frecuencia es modulada, amplificada y retransmitida. Un detector de alta frecuencia tiene la ventaja de que no obstaculiza el rotor como lo hace el detector magnético. La fibra óptica también ha sido utilizada para detectar la rotación de las aspas. Este sistema opera por medio de la luz reflectada de las aspas del rotor.

El medidor tipo turbina es adecuado para medir flujos de líquidos, gases y vapores y es especialmente útil en sistemas de mezclas en la industria del petróleo. Es uno de los medidores más exactos para servicio de líquidos. Los tamaños van hasta 24 pulgadas y el rango puede ir desde 0,001 hasta 40.000 gpm en líquidos; y hasta 10.000.000 scfm de gases. Cada medidor se calibra para determinar el coeficiente de flujo o factor K, que representa el número de pulsos generados por unidad de volumen del fluido. Su exactitud, por lo tanto, es la exactitud del tren de pulsos y oscila entre +0,15% y +1% de la lectura. El factor K se representa por la ecuación: ec.(2.29)

$$K = \frac{60 f}{Q}$$

Donde:

f: Número de pulsos por segundo

Q: Tasa de flujo en gpm.

K: Pulsos por galón

En la selección de un medidor tipo turbina se debe tener en cuenta el tipo de fluido ya que los agentes corrosivos, sucio, sólidos y la acción erosiva del fluido puede dañar el mecanismo del medidor. Así, estos medidores son limitados a fluidos limpios haciéndose obligatorio el uso de coladores y de una instalación apropiada.

-Medidor de Flujo de Tipo Electromagnético: El medidor de flujo magnético, figura 2.15, representa uno de los medidores de flujo más flexibles y aplicables. Proporciona una medición sin obstruir el flujo, es prácticamente insensible a las propiedades del fluido, y es capaz de medir los fluidos más erosivos.

Se instala igual que un segmento convencional de tubería, y la caída de presión que produce no es mayor que la producida por un tramo recto de tubería de longitud equivalente. Los medidores de flujo magnéticos son por lo tanto muy adecuados para medir químicos, lodos, sólidos en suspensión y otros fluidos extremadamente difíciles de medir. Su principio de medición proporciona una medición de flujo con una señal inherentemente lineal al flujo volumétrico independientemente de la temperatura, presión, densidad, viscosidad o dirección del fluido. La única limitación que tienen es que el fluido debe ser eléctricamente conductor y no magnético.

El principio de operación de un medidor de flujo magnético está basado en la Ley de Faraday que establece que cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, se produce un voltaje inducido, cuya magnitud es directamente proporcional a la velocidad del

conductor, a la longitud del mismo y al campo magnético. Cuando las bobinas electromagnéticas que rodean al tubo se energizan, generan un campo magnético dentro de él.

El fluido del proceso que pasa a través del campo magnético funciona como un conductor en movimiento induciendo un voltaje en el fluido. Los electrodos colocados en el interior de la tubería establecen una conexión eléctrica con el fluido del proceso, captando el voltaje que ésta presenta. V es la velocidad de un fluido conductor en una tubería no-conductora, el cual fluye a través de un área de campo magnético B , y con electrodos espaciados una distancia D . La velocidad del fluido conductor, los electrodos y el campo magnético se encuentran formando ángulos rectos uno al otro. Bajo estas condiciones la Ley de Faraday puede escribirse como: ec. (2.30).

$$E = KBDV$$

Donde:

E: Fuerza electromotriz (Fem.) resultante, voltios

K: Constante de proporcionalidad

D: Distancia entre electrodos

V: Velocidad del fluido

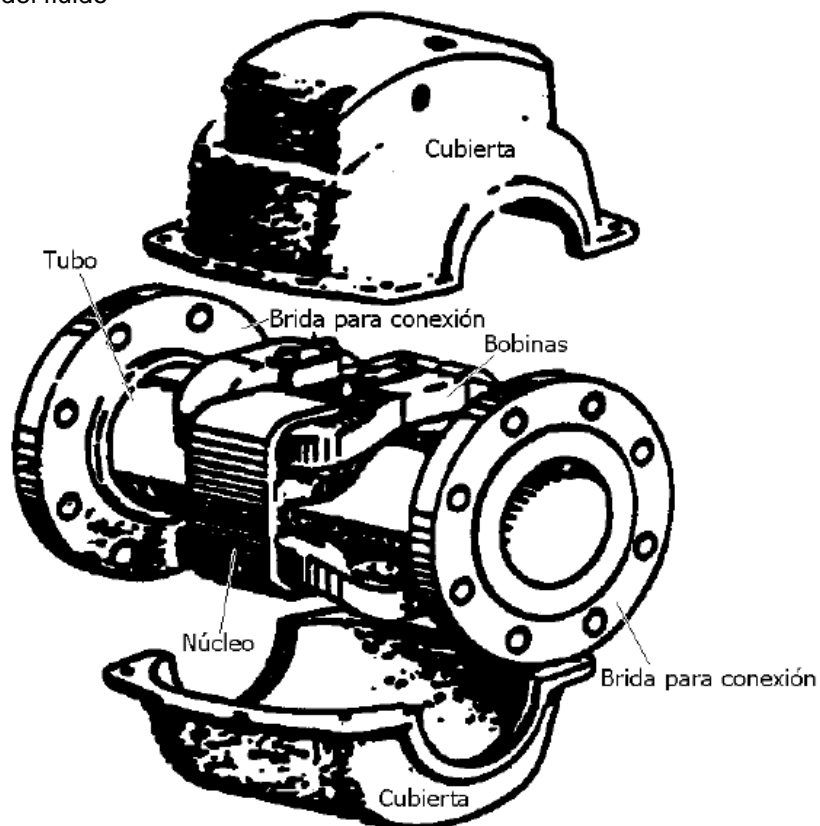


Figura 2.15. Medidor de flujo tipo electromagnético

La velocidad lineal se reemplaza por el flujo volumétrico (Q) para hacerla más útil en aplicaciones de medición de flujo. $Q = A \cdot V$, donde A es el área transversal de la tubería. Sustituyendo en la ecuación anterior resulta: ec. (2.31).

$$E = \frac{KBDQ}{A}$$

Esta ecuación demuestra la relación lineal que existe entre el voltaje inducido y el flujo. La limitación que tienen los medidores de flujo magnético es que el fluido debe ser conductor y no magnético.

La unidad para medir conductividad es el micro siemens por centímetro $\mu S/cm$. Los requerimientos mínimos de conductividad pueden diferir de un fabricante a otro pero $2 \mu S/cm$ es aproximadamente el valor mínimo de conductividad. Por debajo del límite mínimo de conductividad, la resistencia del electrodo puede producir un error en la señal del flujo.

- **Medidor de flujo de tipo ultrasónico:** Los medidores de flujo de tipo ultrasónico utilizan ondas de sonido para determinar el flujo de un fluido. Un transductor piezoeléctrico genera

pulsos de ondas, los cuales viajan a la velocidad del sonido, a través del fluido en movimiento, proporcionando una indicación de la velocidad del fluido. Este principio se utiliza en dos métodos diferentes; existiendo por lo tanto dos tipos de medidores de flujo de tipo ultrasónico.

a. **Medidor ultrasónico de flujo que mide el tiempo de viaje de la onda ultrasónica:** este tipo de medidor ultrasónico utiliza el método de medición del tiempo de viaje de la onda de sonido. El medidor opera de la siguiente manera: se colocan dos transductores en posición opuesta, de modo que las ondas de sonido que viajan entre ellos forman un ángulo de 45° con la dirección del flujo en la tubería, figura 2.16.

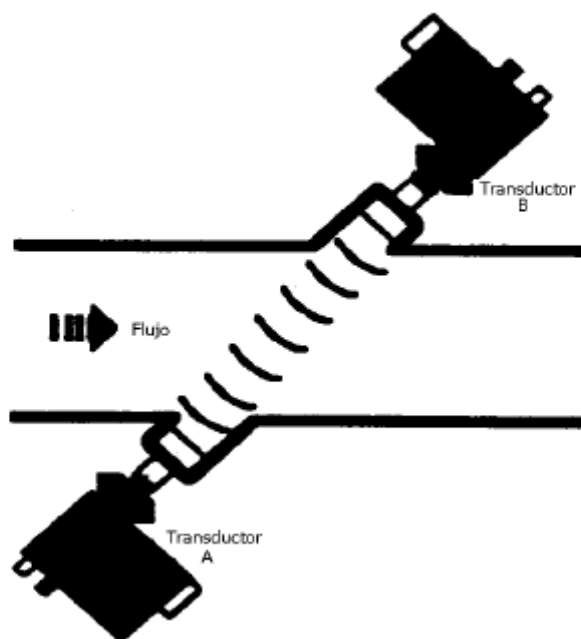


Figura 2.16. Medidor de flujo tipo ultrasónico

La velocidad del sonido desde el transductor colocado aguas arriba (A) hasta el transductor colocado aguas abajo (B) representa la velocidad inherente del sonido en el líquido, más una contribución debido a la velocidad del fluido. De una manera similar, la velocidad medida en la dirección opuesta B a A representa la velocidad inherente del sonido en el líquido, menos la contribución debido a la velocidad del fluido. La diferencia entre estos dos valores se determina electrónicamente y representa la velocidad del fluido, la cual es directamente proporcional al flujo del mismo fluido. El flujo se determina a partir del tiempo medido, expresado por la ecuación: ec. (2.32)

$$t = \frac{L}{C_0 + V \cos \phi}$$

Donde:

t : Tiempo de viaje de la onda de sonido

C_0 : Velocidad del sonido en el fluido (en agua $C_0 = 1.481$ m/s a 20°C)

ϕ : Ángulo entre la dirección del flujo y la dirección de la onda de sonido

L : Distancia entre el transmisor y el receptor

Despejando la velocidad, se obtiene: ec.(2.33)

$$V = \frac{1}{\cos \phi} \left(\frac{L}{t} - C_0 \right)$$

Como la velocidad del sonido en el fluido puede variar con la temperatura y la densidad del fluido, normalmente se emplean dos series de pulsos de frecuencia conocida. La serie aguas arriba se resta de la serie aguas abajo. La diferencia de frecuencias medidas (Df) es una función directa de la velocidad del fluido, y es independiente de la velocidad del sonido.

Los transductores pueden estar incorporados en un tramo recto de tubería, o pueden colocarse exteriormente sobre la tubería existente. Este tipo de medidor se utiliza principalmente en fluidos limpios ya que es recomendable que el fluido este libre de partículas que pueden producir la dispersión de las ondas de sonido. La exactitud de estos medidores

esta entre +1% y +5% del flujo. Burbujas de aire o turbulencia en la corriente del fluido, causada por conexiones o accesorios aguas arriba, pueden dispersar las ondas de sonido provocando inexactitud en la medición.

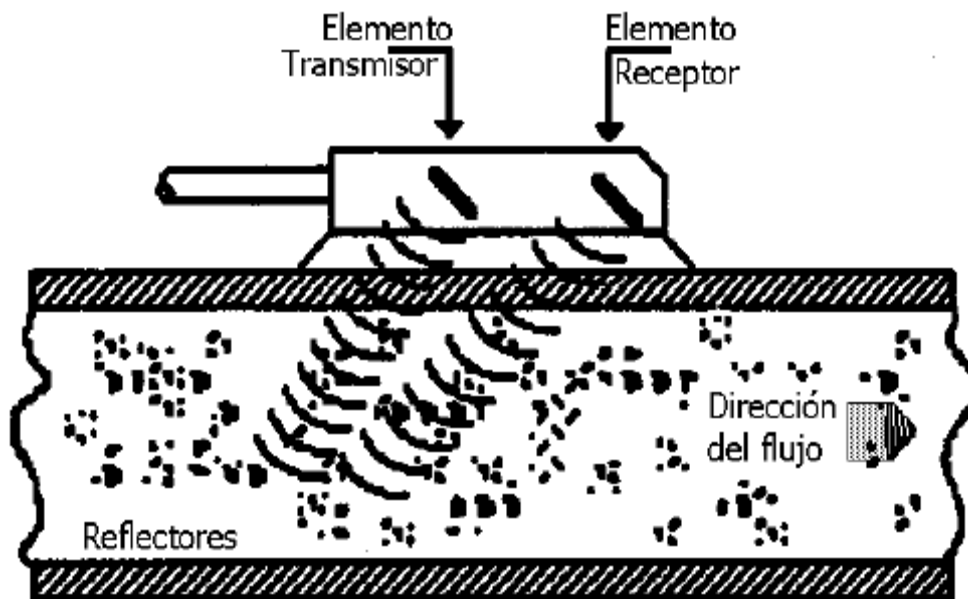


Figura 2.17. Medidor de flujo tipo ultrasónico tipo Doppler

b.- **Medidor ultrasónico tipo Doppler.** Este tipo de medidor también utiliza dos transductores. En este caso están montados en un mismo compartimento sobre un lado de la tubería tal como se muestra en la figura 2.17. Una onda ultrasónica de frecuencia constante se transmite al fluido por medio de uno de los elementos. Partículas sólidas o burbujas presentes en el fluido reflejan la onda de sonido hacia el elemento receptor. El principio Doppler establece que se produce un cambio en la frecuencia o longitud de onda cuando existe un movimiento relativo entre el transmisor y el receptor. En el medidor Doppler el movimiento relativo de las partículas en suspensión que posee el fluido, tienden a comprimir el sonido en una longitud de onda más corta (mayor frecuencia). Esta nueva frecuencia se mide en el elemento receptor y se compara electrónicamente con la frecuencia emitida. El cambio de frecuencia es directamente proporcional a la velocidad del flujo en la tubería.

Estos medidores normalmente no se utilizan en fluidos limpios, ya que se requiere que una mínima cantidad de partículas o burbujas de gas estén presentes en la corriente del fluido. El medidor Doppler Clásico requiere un máximo de 25 ppm de sólidos suspendidos en la corriente del fluido, o burbujas de por lo menos 30 micrones. La exactitud de estos medidores generalmente es de +2% a +5% del valor medido. Debido a que las ondas ultrasónicas pierden energía cuando se transmiten a través de la pared de la tubería, estos medidores no deben ser utilizados con materiales tales como concretos que impiden que la onda atraviese la pared de la tubería.

-Medidor de flujo tipo torbellino (Vortex): Básicamente este tipo de medidor está constituido por un objeto en forma de barra que se coloca dentro de la tubería para obstruir el flujo, figura 2.18, lo que hace que se produzcan torbellinos o remolinos aguas abajo de la obstrucción.

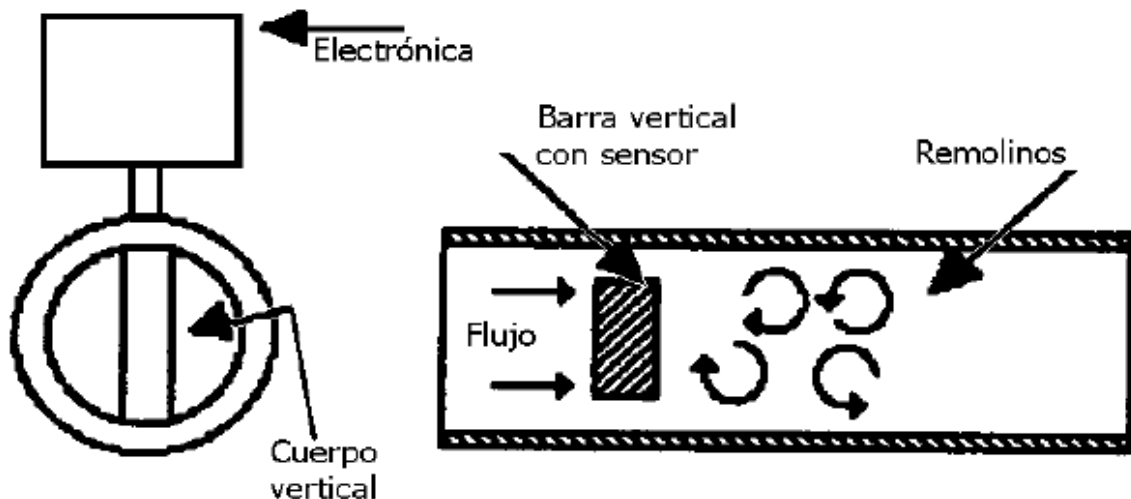


Figura 2.18. Medidor de flujo tipo torbellino (Vortex)

La zona de remolinos es donde el fluido se mueve a mayor velocidad si se compara con el resto de la corriente del fluido que la rodea. Debido a esto, se trata de una zona de baja presión. Los remolinos generados aguas abajo del objeto que produce la obstrucción, crean una zona de baja presión en la corriente del fluido. La frecuencia de estos remolinos (vórtices), es directamente proporcional a la velocidad del fluido. Cerca del cuerpo que produce la obstrucción, se colocan sensores sensibles a las fluctuaciones de presión que miden esta frecuencia; la cual es independiente de las propiedades del fluido; teniendo como única limitación un valor mínimo del número de Reynolds. La tasa de flujo se determina a partir de esta medición.

Diferentes tipos de sensores han sido utilizados para detectar la frecuencia de los remolinos, entre éstos se incluyen: transductores piezoeléctricos, transductores magnéticos, transductores sónicos y fibra óptica. Un diseño mejorado utiliza sensores de tipo capacitivo, los cuales son inmunes a las vibraciones y son compatibles con la mayoría de los fluidos. Los medidores de flujo de tipo torbellino pueden ser utilizados para medir flujo de líquidos, gases o vapores, requieren tramos rectos de tubería similares a los requeridos por una placa de orificio con una relación β igual a 0,70. Bajo condiciones similares producen una caída de presión que es aproximadamente igual a 0,56 ó 0,66 veces a la producida por una placa de orificio. El comportamiento oscilatorio descrito arriba puede comprenderse a través del concepto de la relación complementaria entre un avión impulsado por motores jet y su estela.

Estos resultados experimentales y un análisis dimensional confirman la linealidad de la relación entre la frecuencia y el flujo volumétrico dentro del rango del número de Reynolds, donde el número de Strouhal (**S**) puede ser considerado constante, las ecuaciones siguientes demuestran la relación entre la frecuencia de oscilación f , la velocidad del fluido y el número de Strouhal.

$$\frac{h}{l} = 0,283$$

$$S = \frac{f h}{V}$$

$$V = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}$$

$$S = \frac{f h}{\left(\frac{4 Q}{\pi D^2}\right)} = \frac{\pi f h D^2}{4 Q}$$

$$\frac{f}{Q} = \frac{4 S}{\pi h D^2}; \quad f = \frac{0,185 V}{h}$$

2.7 Medidores de flujo másico

La necesidad de tener medidores de flujo más precisos en procesos de transferencia de masa, ha incentivado el desarrollo de medidores de flujo de masa. Existen dos tipos principales de medidores de flujo que determinan directamente el flujo másico. Estos medidores son el Medidor Térmico y el Medidor Coriolis. A continuación se describe el principio de operación y sus características:

a. Medidor térmico:

Estos medidores generalmente son de dos tipos: unos que miden la velocidad de pérdida de calor de un cuerpo caliente debido al paso de una corriente de fluido a través de él; y otros que miden el incremento de temperatura de una corriente de fluido a medida que pasa sobre o a través de un cuerpo caliente. En ambos casos el flujo de masa se determina a partir de las propiedades físicas del fluido tales como conductividad y calor específico, los cuales, dentro de ciertos límites, son independientes de la temperatura y presión. Si las propiedades térmicas del fluido que están siendo medidas son constantes y se conocen, la diferencia entre dos lecturas de temperatura es proporcional al flujo másico. Si la absorción de calor en el lado de la pared de la tubería es despreciable, el balance de energía del fluido se expresa por la siguiente ecuación: ec. (2.39)

$$Q = m c_p (T_a - T_b) = R I^2$$

Donde:

Q: Potencia térmica.

M: Flujo másico.

C_p : Calor específico a presión constante.

T_a : Temperatura del fluido después del calentador.

T_b : Temperatura del fluido antes del calentador.

R: Resistencia del calentador.

I: Corriente eléctrica.

La figura 2.19 muestra los componentes de un sensor térmico utilizado para medir flujo másico. En este diseño se colocan dos detectores de temperatura (RTD de platino), exactamente iguales, un compensador y un elemento de calentamiento dentro de la cápsula del sensor.

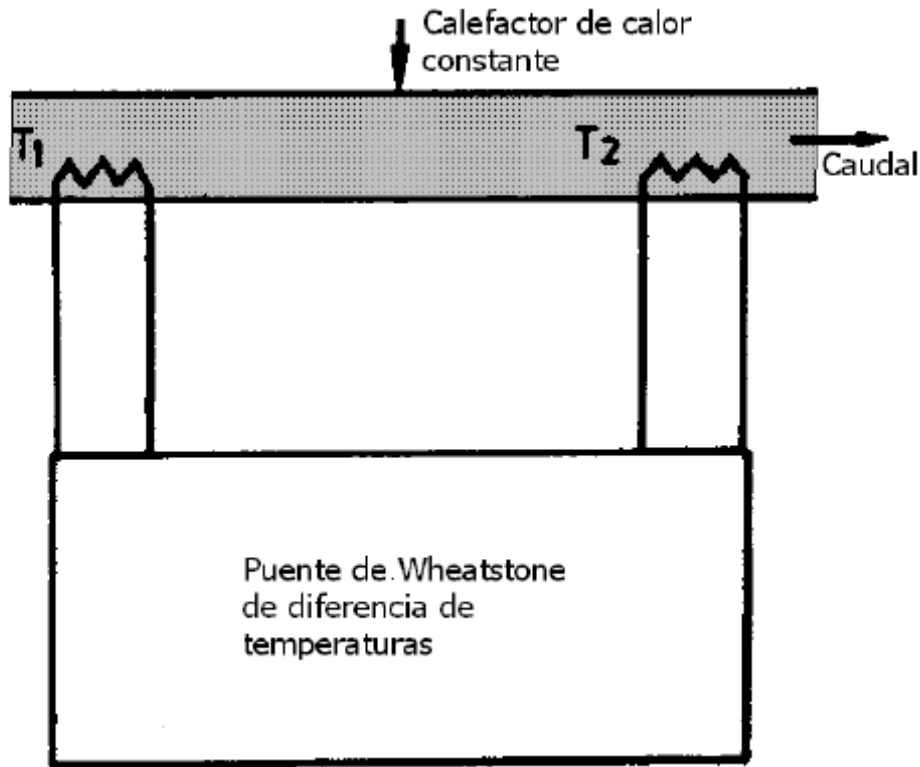


Figura 2.19. Medidor de flujo másico tipo térmico

El elemento de calentamiento aumenta la temperatura en uno de los RTD produciéndose una diferencia de temperatura entre los RTD, la cual es mayor a cero flujo, y disminuye a medida que el fluido pasa a través del sensor enfriando la RTD calentada. Los cambios en el flujo afectan directamente la disipación de calor y consecuentemente, la diferencia de temperatura entre los dos RTD. Esta diferencia se convierte electrónicamente en una señal de salida linealizada, proporcionando una medición del flujo másico, exacta y repetitiva. El compensador instalado en el sensor asegura que los cambios en la temperatura del medio afecten de la misma forma al elemento de calentamiento, y a las dos RTD. Esto permite mantener la exactitud del medidor, aun en presencia de fluctuaciones en la temperatura del medio. Estos medidores deben ser calibrados para un fluido específico, debido a que el calor específico varía de acuerdo al tipo de fluido. Generalmente se utilizan para medir flujo de gas. Su exactitud es de aproximadamente +1% del flujo.

b. Medidor de flujo tipo Coriolis:

Un objeto que se mueve en un sistema de coordenadas que rota con una velocidad angular, experimentará una fuerza de Coriolis proporcional a la masa, a la velocidad del objeto y a la velocidad angular del sistema. Esta fuerza es perpendicular a la velocidad del objeto y a la velocidad angular del sistema de coordenadas.

En la nueva generación de los medidores de Coriolis, comercialmente disponibles, el fluido a la entrada del medidor se divide entre dos tubos en forma de U, los cuales tienen un diámetro menor que el de la tubería del proceso. El flujo sigue la trayectoria curva de los tubos, y converge a la salida del medidor. Estos tubos se hacen vibrar a su frecuencia natural por medio de un mecanismo magnético. Si en vez de hacerlos rotar continuamente los tubos vibran, la magnitud y dirección de la velocidad angular es alternada. Esto crea una fuerza Coriolis alterna. Si los tubos en forma de U son suficientemente elásticos, las fuerzas de Coriolis inducidas por la masa del fluido producen una pequeña deformación elástica. A partir de ella se mide y calcula el flujo de masa.

La figura 2.20 muestra la configuración de un medidor tipo Coriolis; debido a que la masa no cambia, el medidor es lineal y no tiene que ser ajustado para variaciones en las propiedades del líquido. También elimina la necesidad de compensar por variaciones en la presión y temperatura.

Este medidor es útil especialmente para líquidos cuya viscosidad varía con la velocidad. La exactitud típica de estos medidores está entre un +0,20% a +0,40% del valor máximo del flujo de diseño.

Generalmente se emplean con fluidos líquidos, aunque también puede utilizarse con gases secos y vapor sobrecalentado.

La limitación principal del uso de estos medidores está en su alto costo, el cual independientemente de sus bondades (gran precisión), puede hacer su adquisición no atractiva.

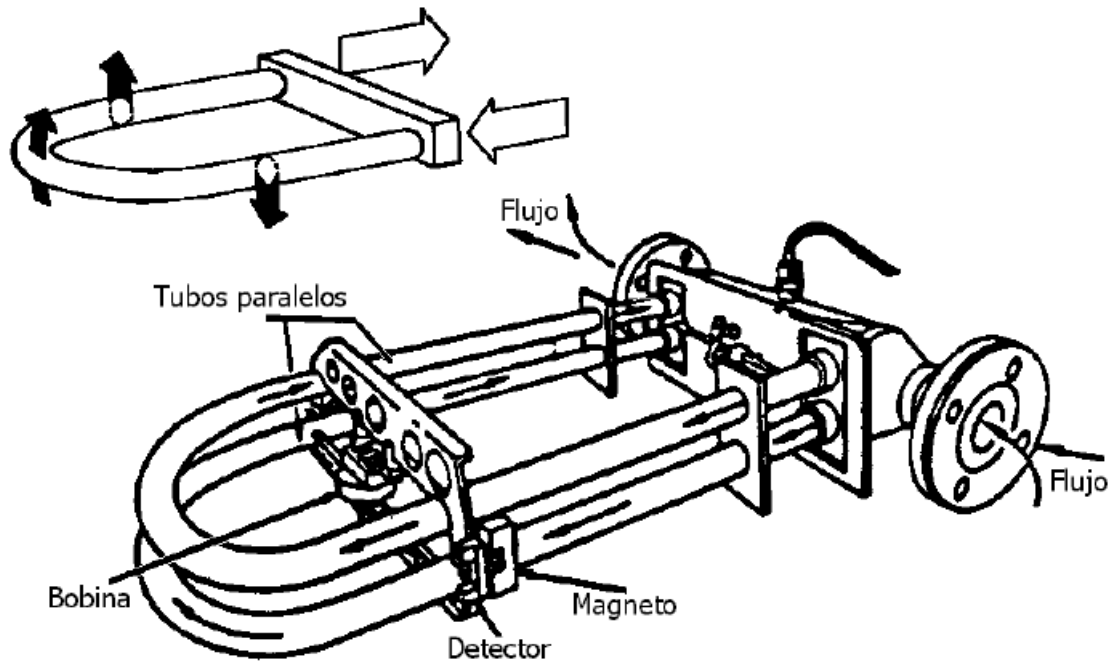


Figura 2.20. Medidor de flujo Coriolis

Capítulo III Variable Presión

Introducción

En este capítulo se estudiarán los principales métodos o principios mecánicos y electromecánicos utilizados en la medición de presión. También se hará una breve descripción sobre interruptores y transmisores de presión.

Existen muchas razones por las cuales en un determinado proceso se debe medir presión. Entre estas se tienen:

- Calidad del producto, la cual frecuentemente depende de ciertas presiones que se deben mantener en un proceso.
- Por seguridad, como por ejemplo, en recipientes presurizados donde la presión no debe exceder un valor máximo dado por las especificaciones del diseño.
- En aplicaciones de medición de nivel.
- En aplicaciones de medición de flujo.

3.1 Presión

La presión se define como fuerza ejercida sobre una superficie por unidad de área. En ingeniería, el término presión se restringe generalmente a la fuerza ejercida por un fluido por unidad de área de la superficie que lo encierra. De esta manera, la presión (P) de una fuerza (F) distribuida sobre un área (A), se define como:

$$P = F/A$$

Tipos de Presión

Presión absoluta: Es la presión medida sobre un vacío perfecto o arriba del cero absoluto.

Presión atmosférica: se llama también presión barométrica y es la presión absoluta ejercida por la atmósfera terrestre y comúnmente medida con un barómetro. Al nivel del mar (altitud cero) su valor medio aproximado es de 29.9 inHg (a 32 °F) o 760 mmHg o 14.7 psi su valor cambia al modificarse la altitud.

Presión manométrica: es la presión que se mide arriba de la presión atmosférica, se podría decir también que la presión manométrica en un recipiente o proceso dado es la diferencia entre la presión absoluta en ese punto y la presión atmosférica.

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

Presión de Vacío: Es la presión que se mide por debajo de la presión atmosférica también se le conoce como presión manométrica negativa.

Presión diferencial: es la diferencia entre dos presiones medidas tales como la entrada y salida de una línea de proceso, de un intercambiador de calor, o de filtros y sirve para indicar la pérdida o caída de presión, o en otro caso para la medición de flujo en orificios.

Presión estática: También llamada presión de línea, es la fuerza por unidad de área actuando sobre las paredes de una tubería por un fluido circulante o estático.

Presión de velocidad: es aquella debido a la velocidad del flujo, también conocida como carga de velocidad o presión de impacto. Realmente es la presión que se genera al desacelerar un fluido de una velocidad finita a cero.

Presión total: es la presión que actúa en un plano perpendicular a la dirección del fluido.

Presión hidrostática: también llamada carga hidrostática, es la presión en un punto bajo la superficie de un líquido debido al peso del mismo arriba de él.

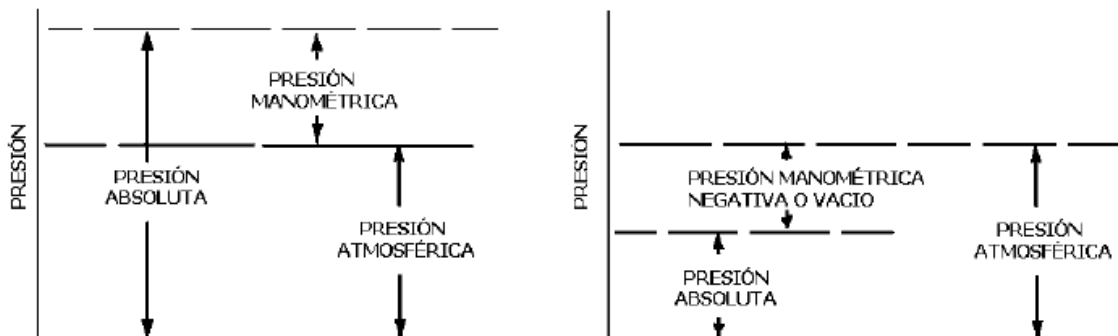


Figura 3.1 Tipos de Presión

3.2 Instrumentos para medición de la presión

a) Instrumentos mecánicos

Los instrumentos mecánicos utilizados para medir presión cuyas características se resumen en la tabla, pueden clasificarse en:

- ✓ **Columnas de Líquido:**
 - Manómetro de Presión Absoluta.
 - Manómetro de Tubo en U.
 - Manómetro de Pozo.
 - Manómetro de Tubo Inclinado.
 - Manómetro Tipo Campana.

- ✓ **Instrumentos Elásticos:**
 - Tubos Bourdon.
 - Fuelles.
 - Diafragmas.

b). Instrumentos electromecánicos y electrónicos

Los instrumentos electromecánicos y electrónicos utilizados para medir presión pueden clasificarse en:

- ✓ Medidores de Esfuerzo (Strain Gages)
- ✓ Transductores de Presión Resistivos
- ✓ Transductores de Presión Capacitivos
- ✓ Transductores de Presión Magnéticos
- ✓ Transductores de Presión Piezoeléctricos

Tabla 3.1 Principales características de los instrumentos para medir presión

Tipo de instrumento	Campo de medida o Rango Óptimo	Exactitud (%)
Tubo en U	20~120 cm H ₂ O	0,5~1,0
Manómetro de pozo	10~300 cm H ₂ O	0,5~1,0
Tubo inclinado	1~120 cm H ₂ O	0,5~1,0
Manómetro campana	0,5~100 cm H ₂ O	0,5~1,0
Bourdon simple	0,5~600 kg/cm ²	2,0
Bourdon espiral	0,5~2500 kg/cm ²	1,5
Bourdon helicoidal	0,5~5000 kg/cm ²	1,5
Fuelle	10 cm H ₂ O~2 kg/cm ²	2,0
Diafragma	5 cm H ₂ O~2 kg/cm ²	1,5
Transductor resistivo	0,5~350 kg/cm ²	0,5
Transductor capacitivo	0~420 kg/cm ²	0,2
Transductor magnético	0~700 kg/cm ²	0,2
Transductor piezoeléctrico	0~350 kg/cm ²	0,2

3.3 Descripción de los instrumentos de medición de presión

a. Columnas de líquido

Estos instrumentos se conocen principalmente como “**Manómetros**”. En ellos la presión aplicada se balancea contra una columna de líquido. La forma más simple consiste de un tubo vertical sellado en un extremo, que contiene líquido; por el otro extremo se aplica la presión que se quiere medir. El líquido sube en el tubo hasta que el peso de la columna balancea la presión aplicada.

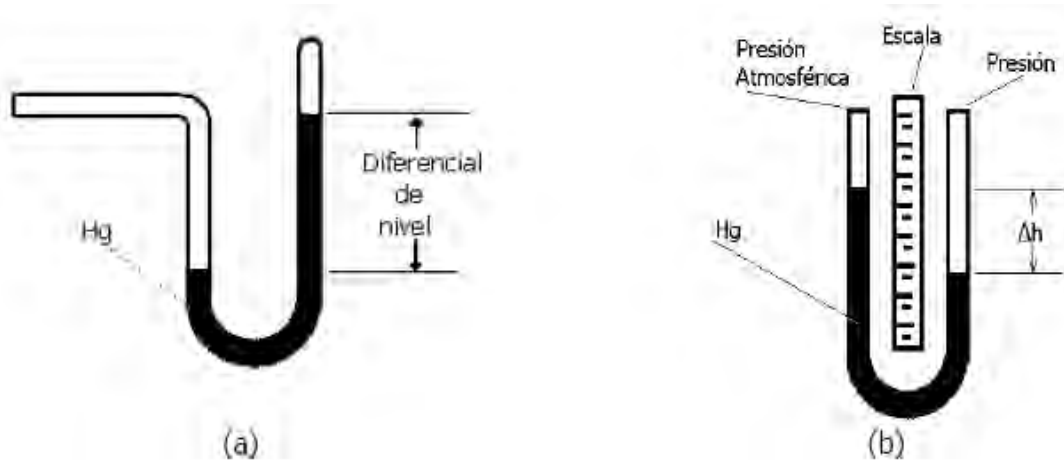


Figura 3.2 (a) Manómetro de presión absoluta, (b) Manómetro de tubo en “U”

Estos instrumentos encuentran su mayor aplicación en laboratorios y como patrones para calibración de otros instrumentos de presión.

El líquido utilizado depende del rango de presión a medir, pero generalmente se emplea agua, compuestos orgánicos y mercurio. A continuación se mencionan varios tipos de medidores de columnas de líquido:

- **Manómetro para medición de Presión Absoluta:** es simplemente un tubo en "U" que tiene un extremo sellado y al vacío y el otro extremo abierto a la presión absoluta que se va a medir, figura 3.2(a). La ecuación que permite calcular el balance estático del instrumento es:

$$P=h*sg$$

Donde:

P: Presión Absoluta

h: Diferencia de altura en los dos cuerpos del tubo

sg: Gravedad específica del líquido

- **Manómetro de tubo en "U":** se utiliza para medir presión diferencial. Consiste en un tubo en forma de "U" lleno de líquido. En cada una de las ramas del tubo se aplica una presión. La diferencia de altura del líquido en las dos ramas es proporcional a la diferencia de presiones. Un esquema característico puede verse en la figura 3.2 (b).

- **Manómetro de Pozo:** en este tipo de manómetro una de las columnas del tubo en "U" ha sido sustituida por un reservorio o pozo de gran diámetro, de forma tal que la presión diferencial es indicada únicamente por la altura del líquido en la rama no eliminada del tubo "U". Un ejemplo es mostrado en la figura 3.3(a).

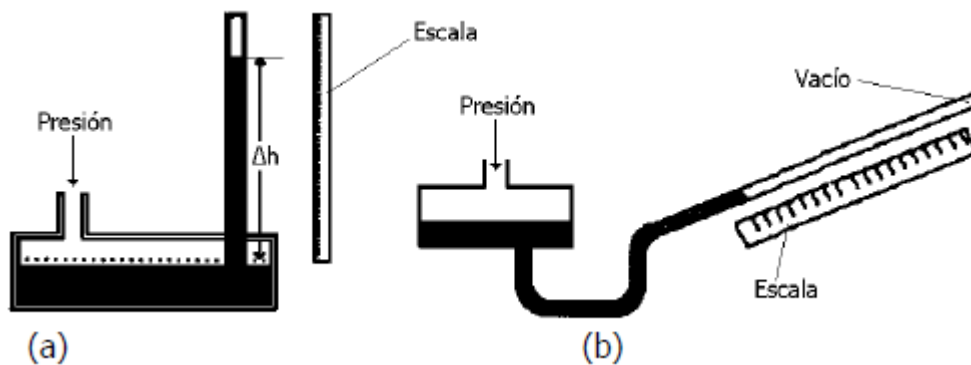


Figura 3.3. (a) Manómetro de pozo, (b) Manómetro de tubo inclinado

- **Manómetro de Tubo Inclinado:** se utiliza para mediciones de presiones diferenciales pequeñas. En este tipo de manómetro, la rama del tubo de menor diámetro está inclinada con el objeto de obtener una escala mayor, ya que en este caso $h = L \sin \theta$, figura 3.3(b).
- **Manómetro de Tipo Campana:** este tipo de sensor es una campana invertida dentro de un recipiente que contiene un líquido sellante. La campana está parcialmente sumergida en el líquido. La señal de mayor presión se aplica sobre el interior de la campana invertida; la señal de menor presión se aplica sobre el interior del recipiente que contiene el líquido. El movimiento vertical de la campana es proporcional al diferencial de presión. Para un balance estático puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$P_2 - P_1 = \frac{Kr \cdot h}{A}$$

Donde:

Kr: Constante del resorte

h: Desplazamiento de la campana

A: Área del interior de la campana

P2-P1: Diferencial de presión

b. Instrumentos elásticos

Existen tres tipos de instrumentos elásticos principales utilizados para medir presión. Ellos son:

- ✓ • Tubos Bourdon.
- ✓ • Fuelles.
- ✓ • Diafragmas.

Básicamente están diseñados bajo el principio que establece la deflexión que sufre un elemento elástico que es proporcional a la presión aplicada. En la tabla 3.1 se indican los diferentes tipos de instrumentos elásticos, sus rangos óptimos de operación y precisión.

• **Tubos Bourdon:** Funcionan bajo el siguiente principio mecánico: un tubo enrollado, cerrado por un extremo, tiende a enderezarse cuando por el otro extremo del tubo se le aplica un gas o líquido bajo presión. Cuando el enrollado "Coil" se diserta correctamente y el material utilizado también es el correcto, la deformación que sufre el tubo, debido a la presión aplicada, es altamente repetitiva, pudiendo el sensor ser calibrado para producir precisiones que en muchos casos alcanzan 0,05% del span. Tal como se muestra en la figura 3.4, el movimiento del extremo libre del tubo Bourdon se convierte, por medio de engranajes y eslabones, en un movimiento proporcional de una aguja o una plumilla del indicador o registrador. El movimiento de tubo Bourdon también puede ser acoplado electrónicamente a un transmisor o transductor. Materiales de construcción: los tubos Bourdon pueden fabricarse de varios materiales, entre los cuales se tiene: acero inoxidable 316 y 403, Cobre Berilio, K Monel, Monel y Bronce Fosforado. El material seleccionado determina tanto el rango como la resistencia del tubo a la corrosión. Por ejemplo, un tubo espiral de bronce es adecuado para presiones hasta 300 psig, mientras que uno de acero, puede manejar presiones de hasta 4.000 psig.

- ✓ • **Tubo Bourdon tipo "C":** se utilizan principalmente para indicación local en medidores de presión, que están conectados directamente sobre recipientes de proceso y tuberías.

- ✓ • **Tubo Bourdon en Espiral:** se construyen enrollando el tubo, de sección transversal plana, en una espiral de varias vueltas en vez de formar un arco de 270° como en el tipo "C". Este arreglo da al espiral un mayor grado de movimiento por unidad de cambio en la presión si se compara con el tubo Bourdon tipo "C".
- ✓ • **Tubo Bourdon Helicoidal:** se construye de forma similar al tubo en espiral, pero enrollando el tubo en forma helicoidal.

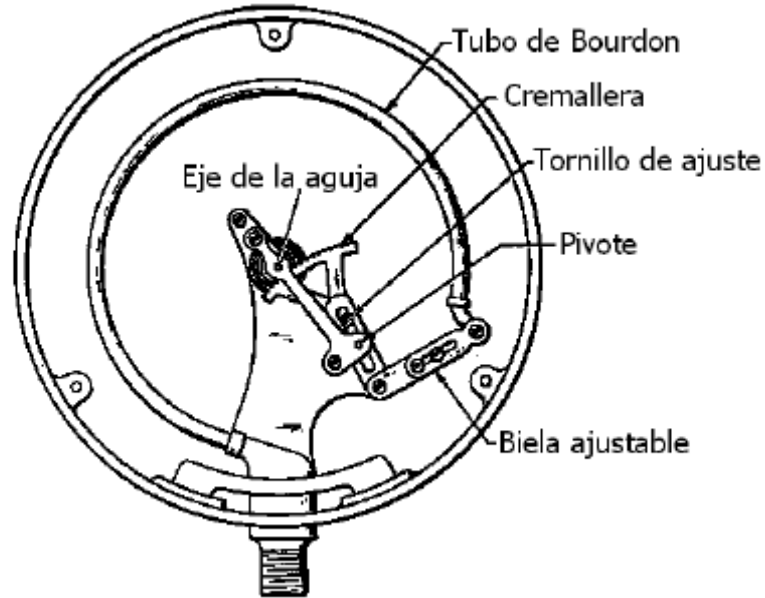


Figura 3.4. Principio de operación del tubo Bourdon.

Aplicaciones: los tubos Bourdon se utilizan como instrumentos de medición directa y como instrumentos de presión en ciertos tipos de controladores, transmisores y registradores.

El tipo de Bourdon utilizado se determina principalmente por el espacio disponible en la caja del instrumento. Como una regla general, el tubo Bourdon tipo "C", es el menos sensible y el espiral es el más sensible.

Ventajas y desventajas: entre las ventajas y desventajas de los medidores de presión de tubo Bourdon se incluyen:

• **Ventajas**

- ✓ Bajo costo.
- ✓ Construcción simple.
- ✓ Cobertura de rangos bajos y altos.
- ✓ Una buena relación precisión/costo.
- ✓ Muchos años de experiencia en su aplicación.

• **Desventajas**

- ✓ Pérdida de precisión por debajo de 50 psig.
- ✓ Usualmente requieren amplificación, la cual introduce histéresis.

• **Fuelles:** Un fuelle puede definirse como un tubo flexible, el cual cambia su longitud de acuerdo a la presión aplicada. Este cambio de longitud es mucho mayor que el que se obtendría si se utilizara un tubo Bourdon de las mismas características. En muchas aplicaciones el fuelle se expande muy poco, pero la fuerza que produce es significativa. Esta técnica se emplea frecuentemente en mecanismos de balance de fuerzas. Para producir una relación lineal entre el desplazamiento del fuelle y la presión aplicada, es práctica común colocar un resorte dentro del fuelle, tal como se muestra en la figura 3.5. La utilización de un fuelle con un resorte tiene varias ventajas: el procedimiento de calibración se simplifica, ya que el ajuste se hace únicamente sobre el resorte. Un resorte construido a partir de un material estable presentará estabilidad por un largo tiempo, lo cual es esencial en cualquier componente. Cuando se requiere medir presión absoluta o diferencial se utilizan mecanismos especiales formados por dos fuelles, uno de los cuales actúa como compensación o referencia.

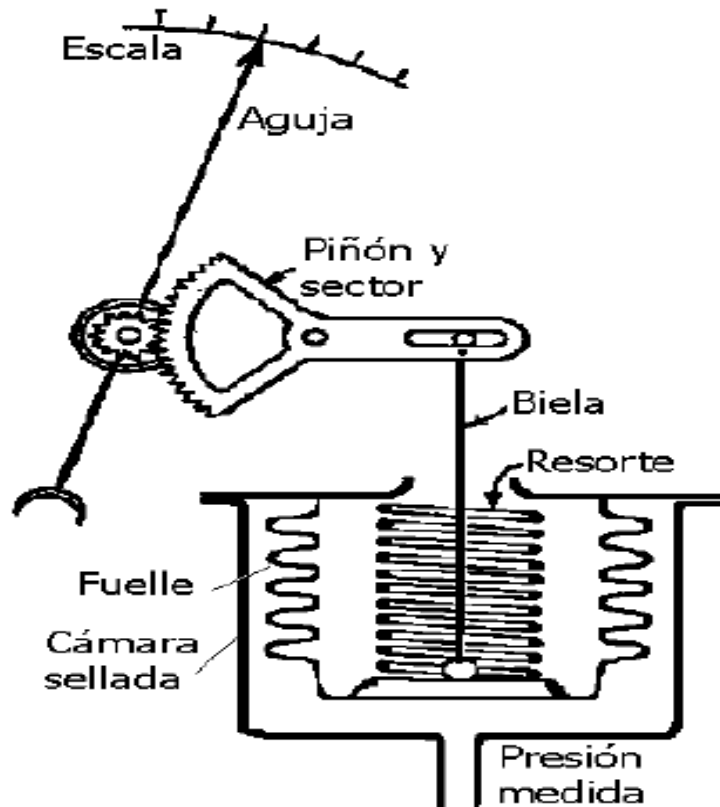


Figura 3.5 Manómetro de tiro del tipo de fuelle

Los fuelles pueden ser metálicos o no metálicos. Los rangos típicos, cuando se utilizan fuelles de bronce o de acero inoxidable, van desde 0-100 mm Hg. (abs.) hasta 0-60 in Hg. (abs.).

Aplicaciones: los fuelles se utilizan en aplicaciones de medición de presión absoluta y medición de presión diferencial. Además, son parte importante en instrumentos tales como transmisores, controladores y registradores.

- **Diafragmas:** El principio de operación es similar al de los fuelles, pero su construcción es diferente. El diafragma es un disco flexible generalmente con corrugaciones concéntricas, tal como se muestra en la figura 3.6. (a). Los diafragmas pueden ser metálicos y no metálicos. Entre los materiales comúnmente más utilizados se encuentran: bronce, cobre-berilio, acero inoxidable, Monel, neopreno, siliconas y teflón. El diafragma puede ser utilizado independientemente como un sensor de presión, pero también es componente básico de un elemento conocido como "cápsula", figura 3.6. (b). Una "cápsula" está formada por dos diafragmas unidos alrededor de su periferia. Existen dos tipos de cápsulas: convexas en las cuales la orientación de las corrugaciones de los dos diafragmas es opuesta; y tipo "nido" (nested) donde la orientación de las corrugaciones coincide. La cápsula de diafragma es utilizada por los transmisores neumáticos y electrónicos de presión diferencial.

Aplicaciones: los diafragmas se emplean en medición de bajas presiones y vacío; y en mediciones de presión absoluta y diferencial.

c. Instrumentos electrónicos

Una desventaja común que presentan los instrumentos mecánicos, es el método utilizado para transmitir el movimiento del elemento de medición de presión a un indicador, tal como un puntero o una plumilla. Un eslabón mecánico, sufre de desgaste, tiene un alto grado de histéresis, lo cual limita la precisión, velocidad de respuesta y repetibilidad de la medición. Los avances en la tecnología electrónica han dado la respuesta a este problema, sensando electrónicamente el movimiento del elemento de medición de presión. El resultado de esto es: respuesta mucho más rápida, menor desgaste e histéresis, mejor compensación de la temperatura, y una salida, la cuál es una señal eléctrica proporcional al movimiento del elemento de presión. Esta señal puede ser aplicada y condicionada luego para que reúna los requerimientos del sistema de control.

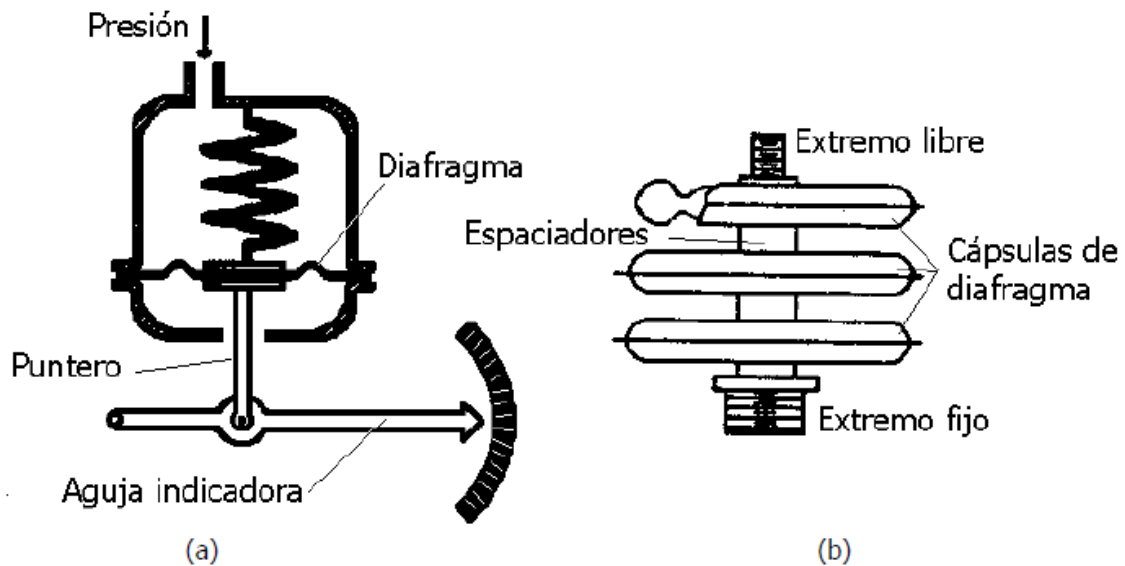


Figura 3.6. Diafragmas

La mayoría de los instrumentos electromagnéticos de presión, incorporan uno de los instrumentos primarios de medición de presión discutidos previamente (instrumentos elásticos). El hecho de que la energía del proceso sea transformada en una señal eléctrica, a partir de un movimiento mecánico, hace que a estos instrumentos se les dé el nombre de "Transductores".

Entre estos instrumentos electromagnéticos utilizados para medir presión se pueden mencionar:

- ✓ • Medidores de esfuerzo (Strain Gages o Estensómetros).
- ✓ • Transductores Resistivos.
- ✓ • Transductores Capacitivos.
- ✓ • Transductores Magnéticos.
- ✓ • Transductores Piezoeléctricos.

La mayoría de los transductores de presión mencionados anteriormente, utilizan un circuito eléctrico básico, conocido como circuito de puente Wheatstone. Algunas características de un circuito de puente de Wheatstone son:

La figura 3.7 muestra un diagrama básico de un circuito de un puente de Wheatstone. Los cuatro elementos del puente pueden ser inductancias, capacitores o resistencias. Para la medición de presión, generalmente se utilizan resistencias. En cualquiera de estos casos, un pequeño cambio en una de las resistencias del puente produce un cambio instantáneo del voltaje a través de los extremos del puente. De este modo, el voltaje de salida, es una función de voltaje de entrada y de las resistencias del puente. Tomando como referencia la figura 3.7 se tiene:

$$E_{out} = E_{in} \left[\frac{R_1}{(R_1 + R_2)} - \frac{R_3}{(R_3 + R_4)} \right]$$

Si las resistencias de los cuatro elementos del puente son afectadas por la temperatura en la misma forma, cualquier cambio tiende a balancearlas evitando errores inducidos por variaciones en la temperatura, los cuales, de otro modo, se detectarían como un cambio en la presión.

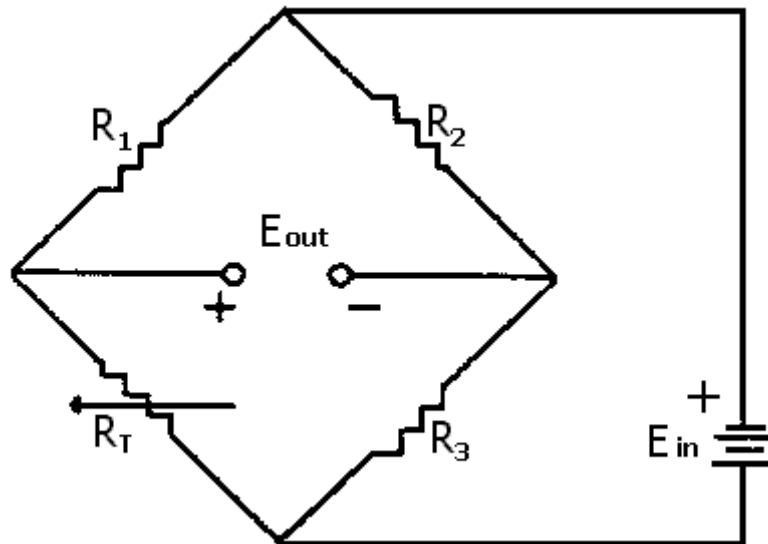


Figura 3.7. Puente de Wheatstone

Si la salida de un sensor de presión se transmite a una de las ramas del puente, el desbalance resultante en el voltaje debido a una variación de presión, puede ser amplificado, escalado y calibrado en unidades de presión. Ciertos semiconductores, tales como la silicón, son piezoresistivos (cambios en la resistencia debido a esfuerzo). De este modo las resistencias de un circuito del puente de Wheatstone pueden ser implantadas, o "difundidas" en un circuito muy pequeño (chip). Si esto se conecta apropiadamente a un sensor de presión tipo diafragma, proporcionará una señal analógica repetitiva, proporcional a la presión aplicada al diafragma.

- **Strain Gage (Medidor de Esfuerzo):** los transductores de presión tipo Strain Gage proporcionan un medio conveniente y confiable para medir presión de gases y líquidos. Son especialmente adecuados para ser utilizados en sistemas viscosos y corrosivos. Un Strain Gage (medidor de esfuerzo), es un mecanismo que utiliza el cambio de la resistencia eléctrica de un alambre o elemento semiconductor de resistencia, sometido a esfuerzo, para medir presión. El Strain Gage cambia un movimiento mecánico en una señal eléctrica cuando la resistencia varía por compresión o tensión. El cambio en la resistencia es una medida de la presión que produce la distorsión mecánica. La figura 3.8 ilustra el principio de operación de un Strain Gage.

Independientemente del tipo de Strain Gage utilizado, casi siempre se emplea un circuito eléctrico con un puente de Wheatstone. La variación en la resistencia cambia el voltaje de salida del puente. Esta señal frecuentemente requiere compensación por cambios en la temperatura del proceso. El método más común para realizar esta compensación, es utilizando una resistencia de compensación en el puente de Wheatstone.

Ventajas:

- ✓ Muy buena exactitud (0,1 %).
- ✓ No sensible a golpes y vibración.
- ✓ Rango entre 10 y 10.000 psi.
- ✓ Excelente estabilidad.
- ✓ Buena repetibilidad.
- ✓ Efecto de temperatura despreciable si se compensa.

Desventajas:

- ✓ Limitaciones por alta temperatura.
- ✓ Requiere compensación por temperatura.
- ✓ Requiere fuente de poder externa.
- ✓ Requiere conversión de señal.

- **Transductores resistivos:** Estos transductores operan bajo el principio de que un cambio en la presión produce un cambio en la resistencia del elemento sensor. Están constituidos por un elemento elástico (tubo Bourdon, fuelle, diafragma), el cual hace variar la resistencia de un

potenciómetro en función de la presión. La figura 3.9 muestra dos tipos de transductores resistivos

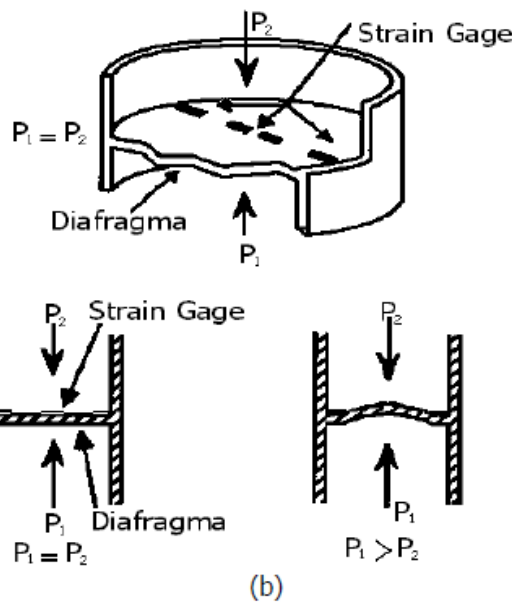
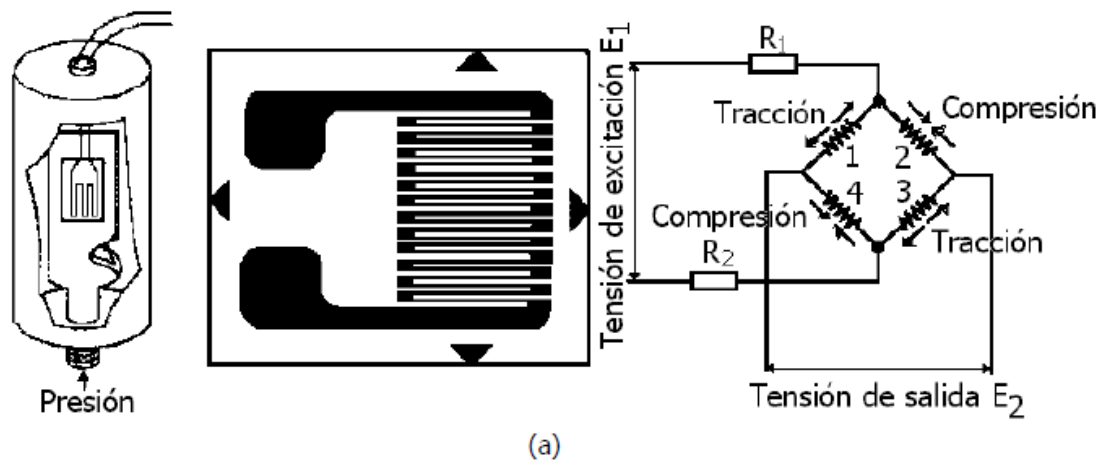


Figura 3.8. Principio de operación de un sensor con Strain gage.

En uno de ellos el elemento sensor lo constituye un fuelle y el otro un diafragma. La figura 3.10 muestra un tipo de transductor resistivo en el cual no se utiliza un elemento elástico como sensor.

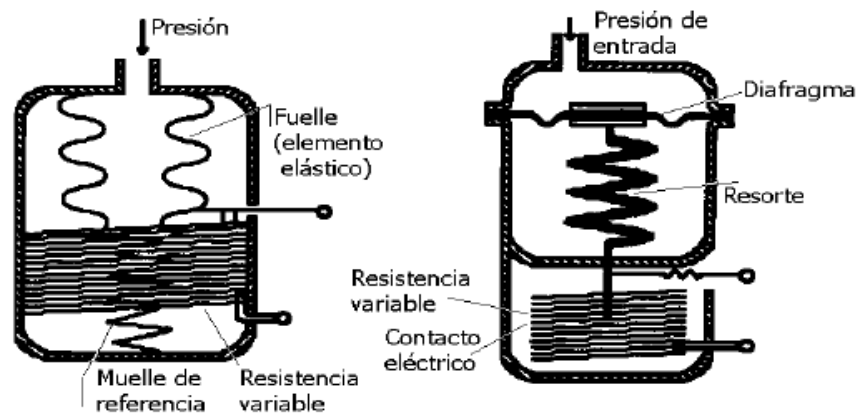


Figura 3.9. Transductores resistivos de fuelle y diafragma

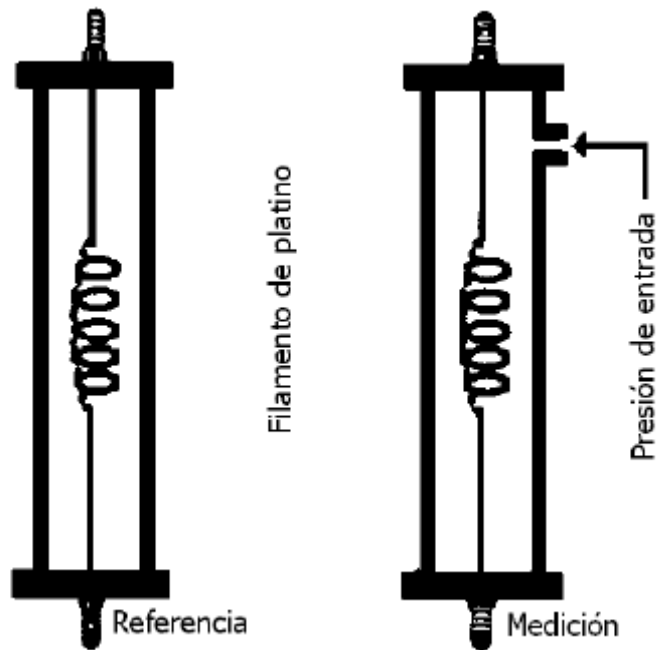


Figura 3.10. Transductor resistivo de temperatura

En este caso, la variación en la resistencia se produce por una variación en la temperatura. El principio de operación es el siguiente: se hace pasar corriente eléctrica a través de un filamento colocado en una cámara presurizada; por efecto de esta corriente el filamento se calienta. La temperatura del filamento y por consiguiente su resistividad varían inversamente con la presión del gas. El elemento sensor está constituido por dos bulbos o cámaras presurizadas: una de medición, y otra de referencia. El elemento resistivo está constituido por un filamento de platino o tungsteno. Este tipo de medidor se puede utilizar para medir densidad, presión o velocidad de gases. Su construcción es simple y no requiere de amplificación.

• **Transductores Capacitivos:** La figura 3.11 muestra un sensor de presión que utiliza capacitancias en vez de resistencias como elementos del puente de Wheatstone. En este caso, el elemento sensor es un diafragma que está en contacto con la presión del proceso. Cuando la presión aplicada produce una deflexión en el diafragma, la capacitancia del elemento cambia en proporción a la presión aplicada; ya que la capacitancia es función del material dieléctrico entre las placas del capacitor y de las distancias entre las placas. Este cambio en la capacitancia produce un cambio en la señal de voltaje d.c. del circuito del puente. Esta variación de voltaje se convierte en una señal estándar de 4-20 mA.

Estos transductores pueden censar presiones bajas, se usan frecuentemente en transmisores de presión manométrica así como diferencial y en aplicaciones de medición de presión, flujo y nivel.

Ventajas:

- ✓ Muy buenos para medir presiones bajas.
- ✓ Construcción rígida.
- ✓ No es afectado por vibración.

Desventajas:

- ✓ Sensibles a la temperatura.
- ✓ Se requiere electrónica adicional para producir una señal de salida estándar.
- ✓ Requiere fuente de poder externa.

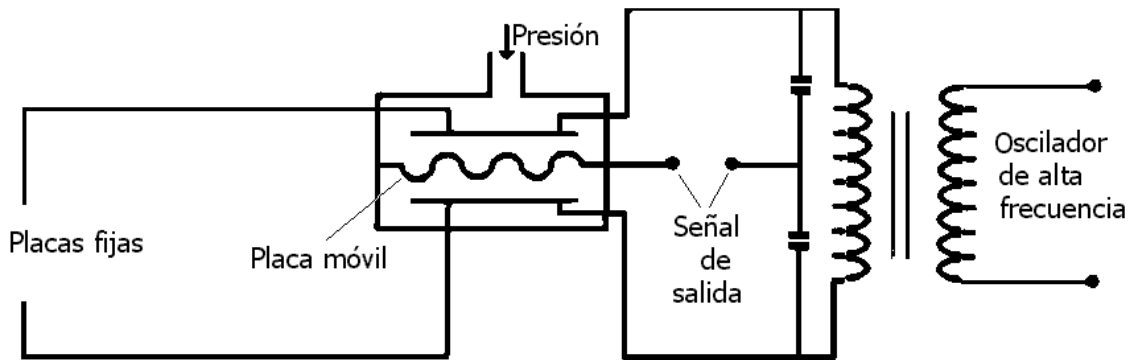


Figura 3.11. Transductor de presión capacitivo

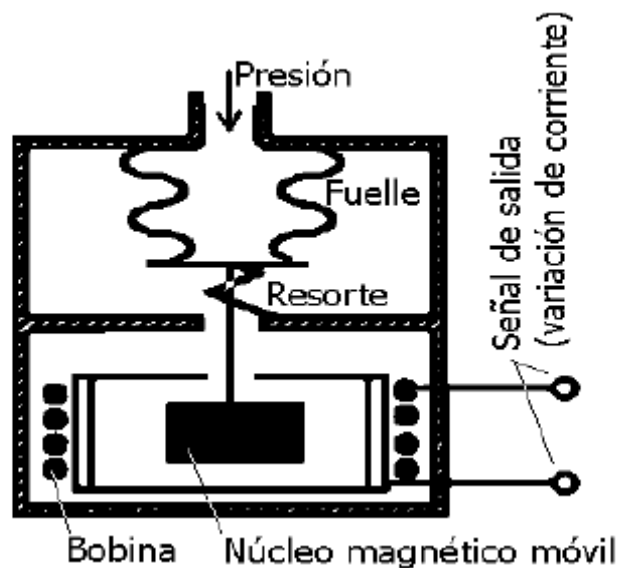


Figura 3.12. Transductor de inductancia

* **Transductores magnéticos:** Existen dos tipos, los de inductancia variable y los de reluctancia variable.

* **Transductores de Inductancia Variable:** Utilizan una bobina con un núcleo magnético móvil. La inductancia en la bobina varía proporcionalmente según la posición que ocupe el núcleo dentro de la bobina. De este modo, variaciones de presión sobre el sensor producen cambios en la posición del núcleo, lo que a la vez origina un cambio en la inductancia (figura 3.12). Este tipo de sensor ha venido siendo utilizado para detectar pequeños desplazamientos de cápsulas y otros instrumentos.

* **Transductores de Reluctancia Variable:** En este caso existe un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético (figura 3.13). El circuito magnético se alimenta de una fuerza magnetomotriz constante, de este modo, al variar la presión en el sensor, varía la posición de la armadura produciéndose un cambio en la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Los dos tipos de transductores magnéticos utilizan como sensor un elemento elástico y circuitos eléctricos constituidos por un puente de Wheatstone.

Aplicaciones: estos transductores se utilizan en algunos instrumentos para medición de presión absoluta, manométrica y diferencial, y en aplicaciones de medición, flujo y nivel. También se utilizan en ciertos convertidores presión/voltaje.

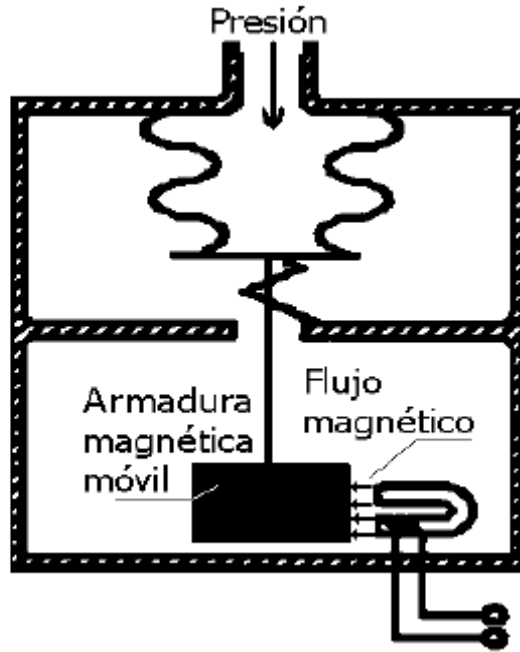


Figura 3.13. Transductor de reluctancia variable

Transductores piezoeléctricos: La piezoelectricidad se define como la producción de un potencial eléctrico debido a la presión sobre ciertas sustancias cristalinas como el cuarzo, titanato de bario, etc. En un sensor piezoeléctrico la presión aplicada sobre varios cristales produce una deformación elástica. Un semiconductor piezoresistivo se puede describir como un elemento que produce un cambio en la resistencia, causado por un esfuerzo aplicado sobre un diafragma. De esta manera, resistencias de estado sólido se pueden utilizar como instrumentos de presión, del mismo modo que los alambres de un Strain Gage, pero con varias ventajas. La alta sensibilidad o factor de medida es aproximadamente 100 veces mayor que en los Strain Gages de alambre. Las piezoresistencias están difundidas en un medio homogéneo de silicona cristalino. De esta manera, las resistencias están integradas al elemento sensor. La figura 3.14 muestra un corte transversal del elemento sensor con los cables soldados a los contactos metálicos. El elemento sensor está formado por cuatro piezoresistencias iguales difundidas o ensambladas en la superficie del diafragma delgado de silicona. Contactos de oro en la superficie del diafragma de silicona proveen la conexión a las piezoresistencias. Un cambio en la presión hace que el diafragma se deforme, induciendo un esfuerzo en él y también en la resistencia. El valor de la resistencia cambiará dependiendo de la cantidad de presión aplicada al diafragma.

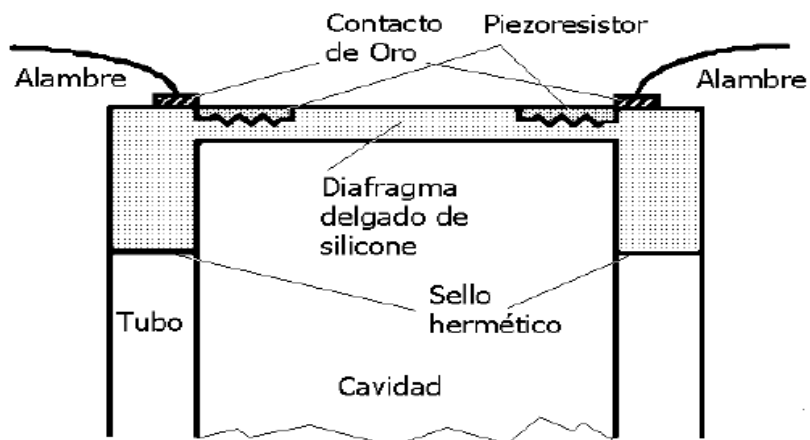


Figura 3.14. Transductor piezoeléctrico

Capítulo IV Variable Temperatura

Introducción

En este capítulo se mencionan los instrumentos más comunes para la medición de temperatura. La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío. Por lo general, un objeto más "caliente" tendrá una temperatura mayor. Físicamente es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico. Más específicamente, está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como "energía sensible", que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida que es mayor la energía sensible de un sistema se observa que está más "caliente" es decir, que su temperatura es mayor.

4.1 Medición de temperatura

El crédito de la invención del termómetro se atribuye a Galileo en el año 1592. Mejoras al diseño del termómetro de Galileo fueron introducidas por otros investigadores utilizando diversas escalas termométricas, todas ellas basadas en dos o más puntos fijos. No fue sino hasta el año 1700, cuando Gabriel Fahrenheit produjo termómetros repetitivos y exactos. Fahrenheit utilizó una mezcla de agua y sal. Esta fue la temperatura más baja que pudo reproducir, y la llamó "cero grados".

Para la temperatura más alta de su escala, utilizó la temperatura del cuerpo humano y la llamó 96 grados. Esta escala de Fahrenheit ganó popularidad principalmente por la calidad y repetibilidad de los termómetros construidos por él. Cerca de 1742 Anders Celsius propuso que el punto de fusión del hielo y el punto de ebullición del agua fuesen utilizados como puntos iniciales y finales de la escala de temperatura, de esta manera el cero grado fue seleccionado como punto de fusión del hielo y 100 grados como punto de ebullición del agua. Esta escala denominada Celsius, se le dio oficialmente el nombre en el año 1948. Otras escalas de temperatura llamadas Kelvin y Rankine, introducen el concepto del cero absoluto y se utilizan como estándares en la termometría.

4.2 Tipos de instrumentos para medir temperaturas

Existen diferentes sensores que se utilizan en la industria de procesos para medir la temperatura, entre los que se pueden mencionar:

- ✓ Termómetro de bulbo (líquido, gas y vapor).
- ✓ Termómetros bimetalicos.
- ✓ Termopares.
- ✓ Termómetros de resistencia.
- ✓ Termistores.
- ✓ Pirómetros de radiación.

La selección y especificación apropiada de un instrumento de temperatura, depende mucho del conocimiento de los diferentes tipos de sensores disponibles, de sus limitaciones y de consideraciones prácticas.

A continuación se describen los principales tipos de sensores utilizados en la industria para la medición de temperatura. En esta descripción se incluyen aspectos tales como: principio de funcionamiento, características y aplicaciones.

a. Termómetros de bulbo

Los Termómetros de Bulbo de uso industrial están diseñados para proveer una indicación o registro de la temperatura a distancia del punto de medición. El sistema generalmente está formado por un elemento sensitivo a la temperatura (Bulbo); un elemento sensitivo a los cambios de presión o volumen (Bourdon, Fuelle, Diafragma); un medio para conectar estos elementos (tubo capilar); y un mecanismo para indicar, registrar o transmitir la señal relacionada con la temperatura. La figura 4.1 muestra un termómetro de bulbo con un sistema para indicación local. Dependiendo del fluido que está dentro del bulbo, estos termómetros se clasifican de la siguiente manera:

- ✓ Sistema Clase I (bulbo lleno de líquido, excluyendo mercurio).
- ✓ Sistema Clase II (bulbo lleno de vapor).
- ✓ Sistema Clase III (bulbo lleno de gas).
- ✓ Sistema Clase V (bulbo lleno de mercurio).

Observación: Actualmente no está permitido el uso de **Sistema Clase V** en la industria petrolera por ser el mercurio altamente contaminante.

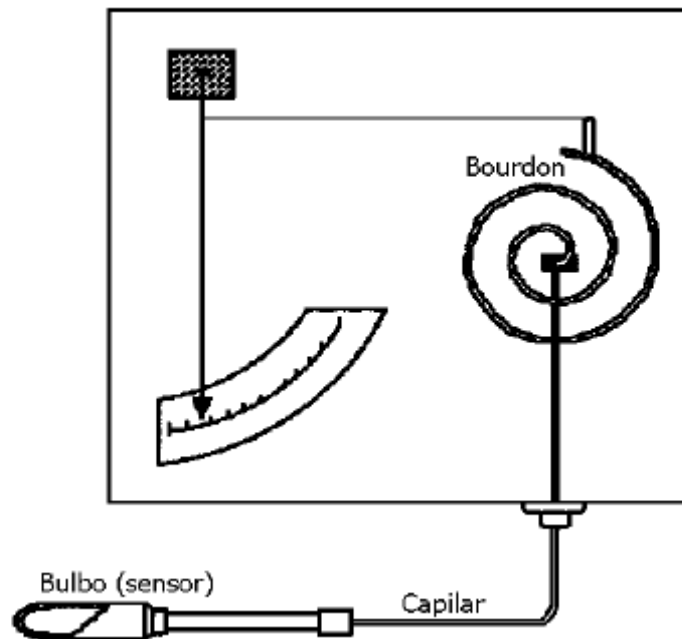


Figura 4.1 Elementos de un termómetro de bulbo

Los sistemas clase I y V operan bajo el principio de expansión volumétrica del líquido con la temperatura y dan una respuesta aproximadamente lineal frente a los cambios de temperatura. Entre los líquidos utilizados se encuentran mercurio, éter, xileno y alcohol. El rango de medición oscila entre $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ y depende del líquido utilizado. La figura 4.2 muestra un termómetro de bulbo clase I con un sistema de compensación, la cual se requiere cuando la longitud del capilar excede los 6 u ocho metros.

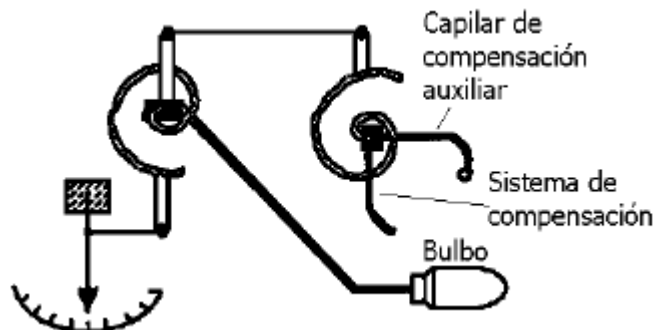


Figura 4.2. Termómetro clase I con sistema de compensación

Los sistemas de Clase II (bulbo lleno de vapor) operan bajo el principio del cambio en la presión de vapor de un líquido volátil con la temperatura; dando una relación no lineal entre la presión de vapor y la temperatura. El rango de medición oscila entre $-254\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $315\text{ }^{\circ}\text{C}$ y depende del fluido utilizado. Estos sistemas a su vez se clasifican en sistemas Clase IIA, IIB, IIC, IID dependiendo de la temperatura a la cual operan. Los sistemas Clase IIA están diseñados para operar con la temperatura medida mayor que la del resto del sistema térmico. Debido a que el vapor condensa en la parte más fría, el capilar y el tubo Bourdon deben ser llenados con el líquido, figura 4.3 (a).

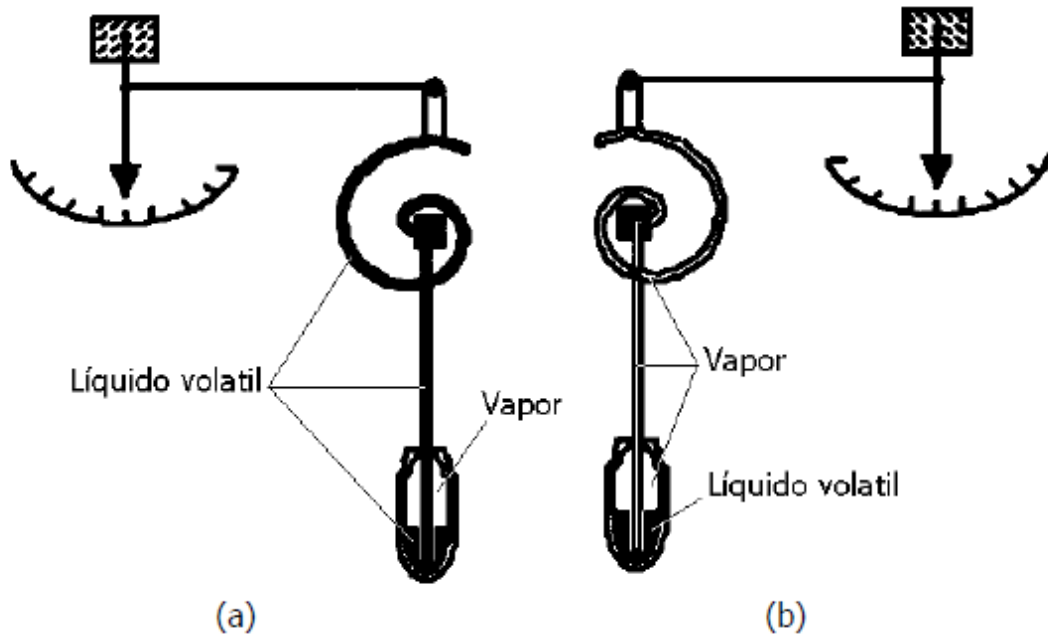


Figura 4.3. (a) Sistema Clase IIA, utilizado para medir temperatura mayor que la temperatura ambiente, (b) Sistema Clase IIB, utilizado para medir temperatura menor que la temperatura ambiente.

De esta forma el nivel de interfase permanece en el bulbo. Los sistemas Clase IIB están diseñados para operar con la temperatura medida menor que la del resto del sistema térmico. El vapor en este caso tiende a condensar en el bulbo; por lo tanto el capilar y el Bourdon no deben tener líquido. El Bulbo debe estar lleno hasta la mitad a temperatura ambiente, figura 4.3 (b).

Los sistemas Clase IIC están diseñados para operar a una temperatura mayor o menor que la del resto del sistema térmico. Es una combinación de los sistemas IIA y IIB. La figura 4.4 (a) muestra un termómetro de este tipo. Los Sistemas Clase IID están diseñados para operar a una temperatura mayor, menor o igual a la del resto del sistema térmico. El líquido volátil es confinado en el bulbo por un líquido transmisor no volátil el cual llena el capilar y el Bourdon, figura 4.4 (b).

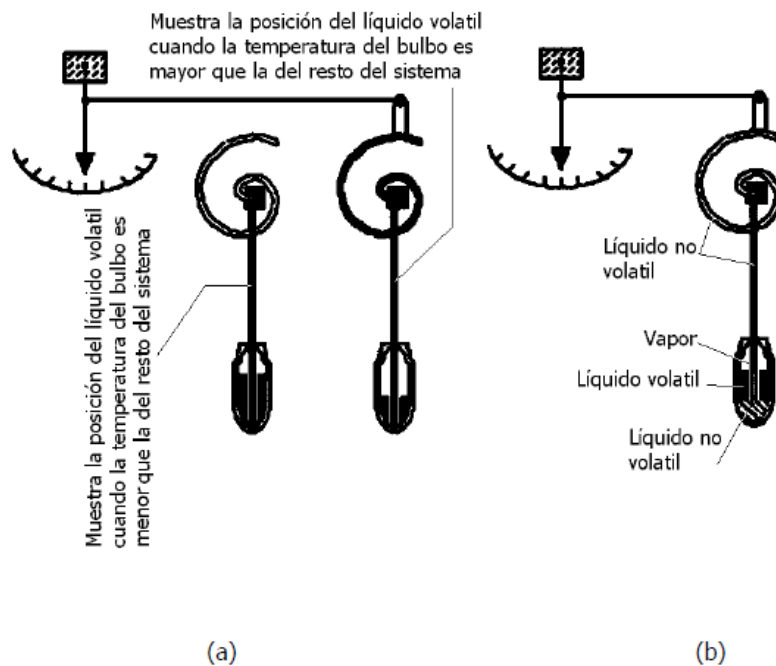


Figura 4.4. (a) Sistema Clase IIC, (b) Sistema Clase IID

Los sistemas Clase III (bulbo lleno de gas), operan bajo el principio del cambio en la presión del gas con la temperatura. Tienen una relación no lineal ya que puede aplicarse la Ley de los Gases ideales para relacionar la temperatura con la presión. El rango de medición depende del gas utilizado y va desde 270 °C hasta 760 °C. En la figura 4.5 se muestran los diferentes componentes de un termómetro de gas.

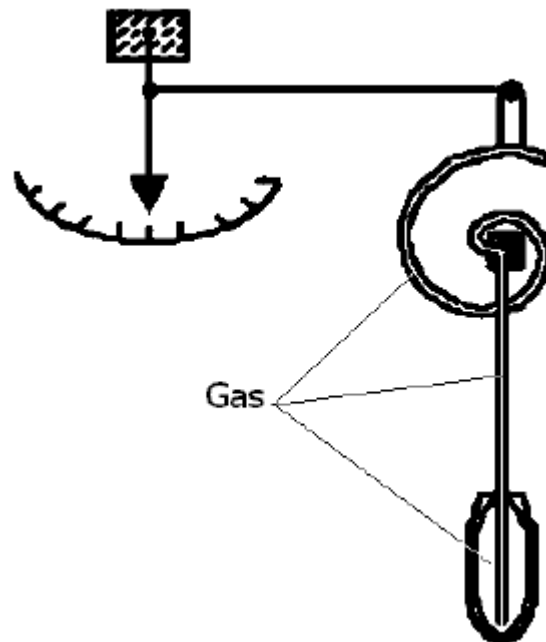


Figura 4.5. Termómetro de gas Clase III

Tabla 4.1 Características principales de los termómetros de bulbo

<i>TIPO</i>	<i>LÍQUIDO</i>	<i>VAPOR</i>	<i>GAS</i>
<i>Principio de operación</i>	Cambio en el volumen	Cambio en la presión	Cambio en la presión
<i>Clase</i>	I	II	III
<i>Fluido</i>	Líquidos orgánicos	Líquidos orgánicos, agua	Gases puros
<i>Rango</i>	-130 °C ~ +135 °C	-254 °C ~ +315 °C	-270 °C ~ +760 °C
<i>Alcance (span) Mín ~ Máx</i>	25 °C ~ 330 °C	40 °C ~ 215 °C	70 °C ~ 550 °C
<i>Tamaño del sensor</i>	Más pequeño	Mediano	Mayor
<i>Efecto de elevación</i>	Ninguno	Clase IIA	Ninguno
<i>Escala</i>	Uniforme	No Uniforme	Uniforme
<i>Precisión</i>	±0,5 ~ ±1% de Span	±0,5 ~ ±1% de Span	±0,5 ~ 1% de Span
<i>Velocidad de respuesta</i>	Más lento	Más rápido (Clase IIA) Moderada (Clase IIB)	Moderada
<i>Costo comparativo</i>	Mayor	Menor	Moderado
<i>Aplicación típica</i>	Almacenamiento de productos, tuberías	Procesos de lotes (Batch), secadores, criogénia	Ductos de aire, vapor, hornos

b. Termómetros bimetalicos

Todos los metales se dilatan cuando son calentados y la cantidad de dilatación depende de la temperatura y del coeficiente de dilatación de cada metal. Si dos láminas de metal con coeficientes de dilatación diferentes se funden la una a la otra, ocurre una distorsión al ser

calentados ya que uno de los metales tratará de dilatarse más que el otro. Este es el principio de operación de los termómetros bimetalicos.

Para uso industrial como indicador de temperatura, la cinta bimetalica generalmente se dobla en forma helicoidal, un extremo del cual es fijo, de modo que al calentarse se produce un movimiento de rotación, el cual se utiliza para mover una aguja de indicación sobre una escala. La figura 4.6 muestra los componentes de un termómetro bimetalico. Tanto la longitud del vástago como el diámetro de la caja mostrados en la figura 4.6 pueden ser seleccionados de acuerdo a las necesidades de la aplicación. Según la Norma SAMA las longitudes de los vástagos van desde 2 ½" hasta 60". Los rangos óptimos de medición van desde aproximadamente -50 °C hasta +425 °C.

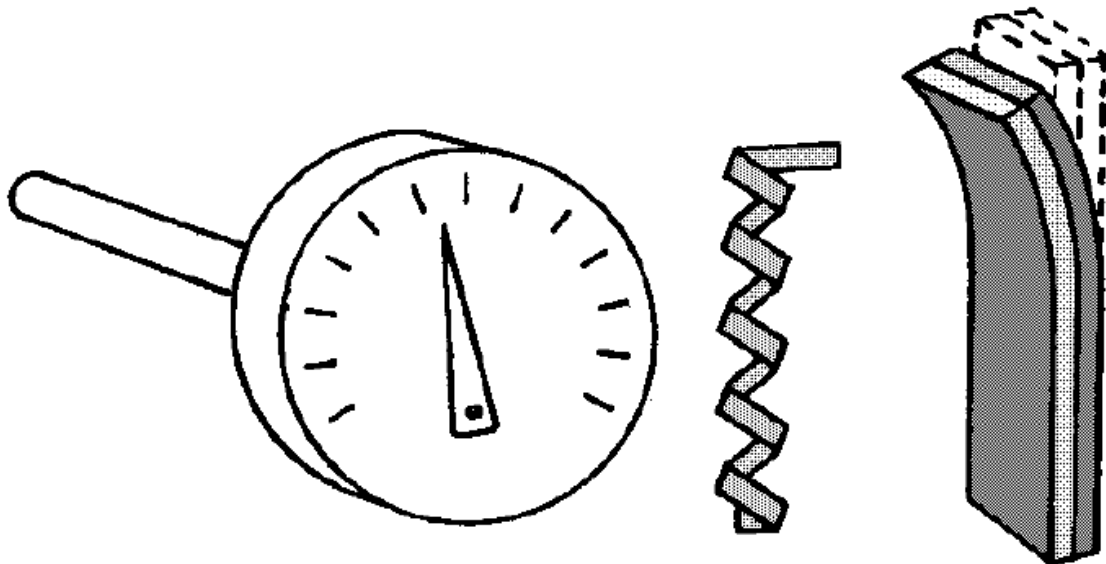


Figura 4.6. Elementos de un termómetro bimetalico

c. Termopares

El termopar es uno de los sensores más comunes y simples usados para determinar la temperatura de los procesos. Básicamente, un termopar está constituido por dos metales diferentes tales como alambres de hierro y Constantano.

En 1821 T. J. Seebeck descubrió que cuando se aplica calor a la unión de dos metales diferentes, se genera una fuerza electromotriz (Fem.), la cual puede ser medida en el otro extremo de estos dos metales (conductores). Este es el principio en el cual se basa la medición de temperatura utilizando termopares, figura 4.7.

La "Junta de Medición" o "junta Caliente" es el extremo que se coloca en el medio cuya temperatura se quiere medir. La "junta de Referencia" o "junta Fría" es el extremo del termopar que se conecta a los terminales del instrumento de medición.

Los conductores de un termopar forman un circuito eléctrico, por el cual fluye la corriente como resultado de la Fem. Generada. Esta Fem. Es proporcional a la diferencia de temperatura entre las dos juntas. La corriente fluirá en el circuito siempre y cuando T1 sea distinto de T2.

c.1 Leyes termoeléctricas

A continuación se describen varios fenómenos que se conocen como leyes de termopares, las cuales son útiles para comprender los circuitos de los termopares:

-Ley de Metales Intermedios: la incorporación de un metal homogéneo al circuito de un termopar no cambia la Fem desarrollada.

-Ley de Temperaturas Interiores: cuando las juntas de dos metales homogéneos diferentes, se mantienen a diferentes temperaturas, no es afectada por los gradientes de temperatura a lo largo de los conductores.

- Ley de Metales Interiores: en un circuito formado por dos metales homogéneos diferentes, que tienen las dos juntas a diferentes temperaturas, la Fem desarrollada no es afectada cuando un tercer metal homogéneo se agrega al circuito, siempre y cuando las temperaturas de sus dos juntas sea la misma.

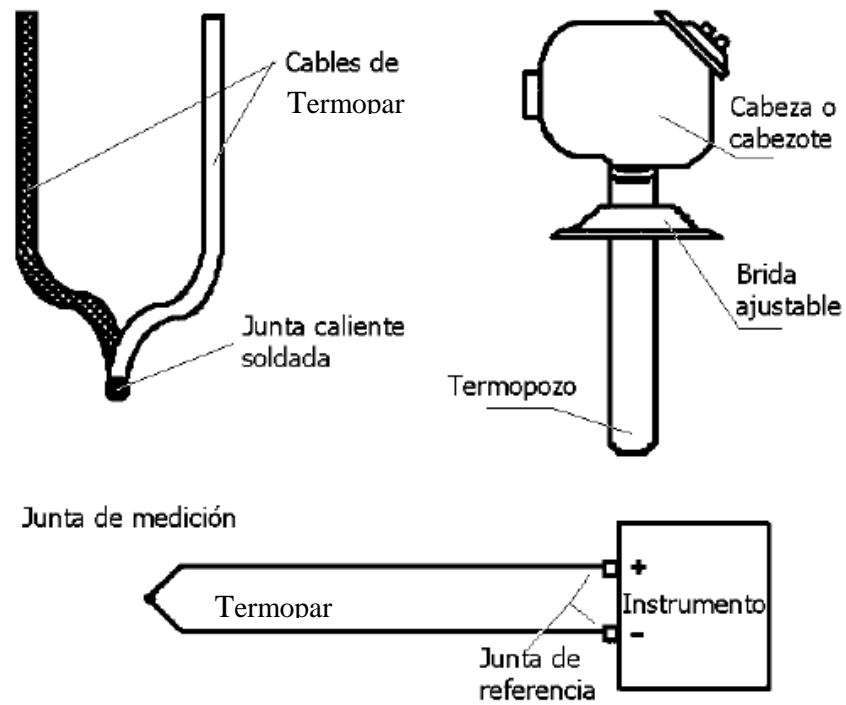


Figura 4.7. Esquema de un termopar

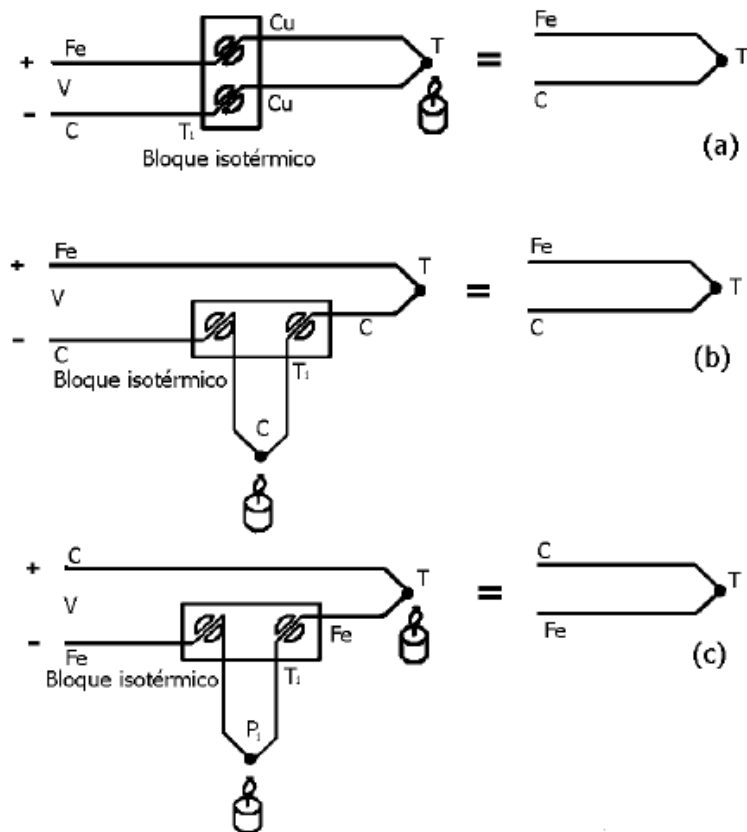


Figura 4.8. (a) Ley de los metales intermedios, (b) Ley de temperaturas interiores y (c) Ley de metales interiores

c.2 Conversión de voltaje a temperatura

La figura 4.9 muestra la relación entre el voltaje de salida versus temperatura para los termopares más comunes. Se puede observar que no se mantiene una relación lineal entre la temperatura y el voltaje. La conversión de este voltaje a temperatura se explica a continuación.

El voltaje generado por un termopar no puede medirse directamente, ya que primero debe conectarse un voltímetro al termopar, y los cables del voltímetro crean ellos mismos un nuevo circuito termoeléctrico (termopar). Considere un voltímetro conectado a un termopar cobre-Constantano (Tipo T), como se muestra en la figura 4.10. Lo que se quiere es que el voltímetro indique solamente el voltaje V_1 , que es el voltaje de salida de la junta J1; pero al conectar el voltímetro al termopar, se formaron dos juntas metálicas adicionales J2 Y J3.

Debido a que J3 es una junta cobre-cobre, no se crea una Fem. En esta junta ($V_3 = 0$); pero J2 es una junta cobre-Constantano, la cual desarrolla una Fem. (V_2) en oposición a V_1 . La lectura resultante en el voltímetro será la diferencia de temperaturas entre J1 y J2. Por lo tanto, la temperatura de J1 no puede conseguirse a menos que primero conozcamos la temperatura de J2.

Un medio para determinar la temperatura de J es el de colocar la junta J2 en un baño de hielo como se muestra en la figura 4.11, haciendo que su temperatura sea 0°C y estableciendo J como la "Junta de Referencia". Ahora, la lectura del voltímetro será:

$$\begin{aligned}V &= V_1 - V_2 = T_{j1} - T_{j2} \\T_{j1} (^{\circ}\text{K}) &= T_{j1} (^{\circ}\text{C}) + 273,15 \\V &= V_1 - V_2 = (T_{j1} + 273,15) - (T_{j2} + 273,15) \\V &= T_{j1} - T_{j2} = T_j - 0 \\V &= T_{j1}\end{aligned}$$

Sumando el voltaje de la junta de referencia se ha referido la lectura V a 0°C . El punto de hielo o punto de referencia a 0°C es utilizado por el National Bureau of Standards (NBS) como el punto de referencia fundamental para sus tablas de termopares. De este modo, se pueden utilizar las tablas NBS y convertir directamente el voltaje V a la temperatura T_{j1} .

Casi en la totalidad de los casos la medición del voltaje generado por un termopar, se realiza a una temperatura T_{ref} diferente a la de la temperatura de referencia de 0°C . En este caso, al voltaje leído en el voltímetro habrá que sumarle el voltaje que generaría un termopar similar desde la T_{ref} hasta la temperatura de referencia de 0°C . De este modo se "traslada" la junta de referencia desde T_{ref} hasta $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$, pudiéndose entonces utilizar las tablas NBS de termopares, las cuales como se dijo anteriormente están basadas en $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$.

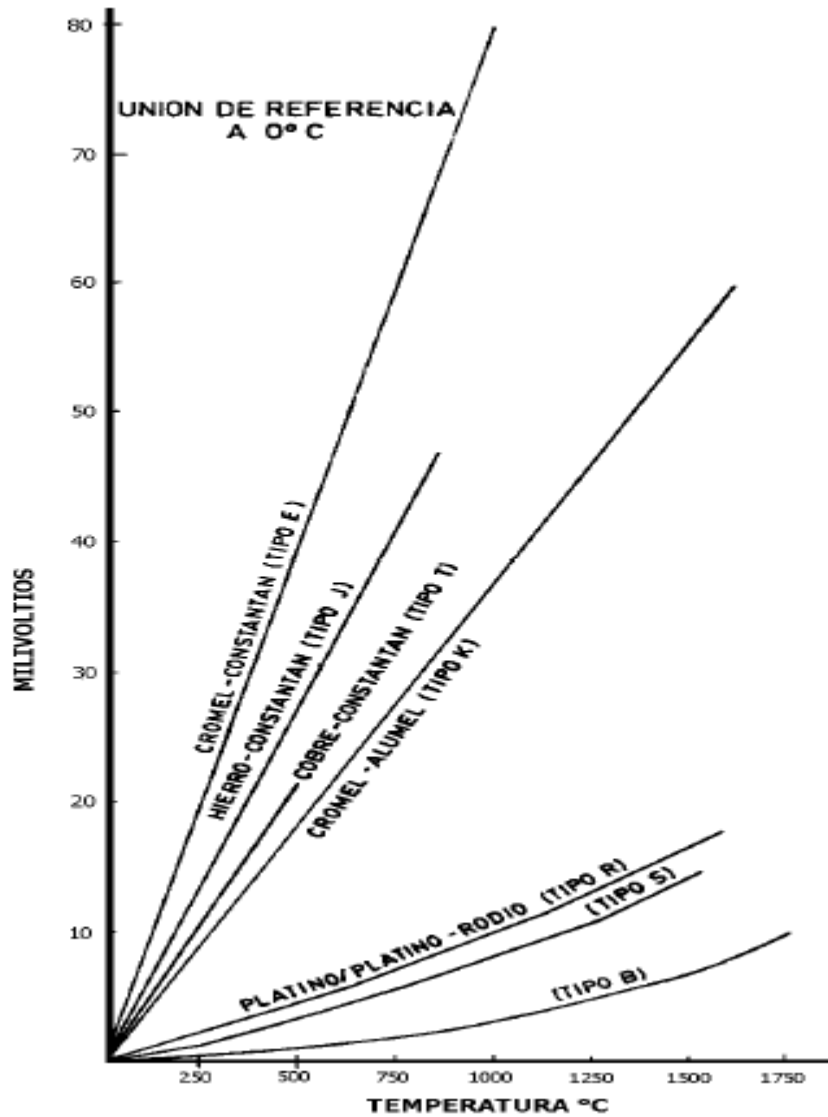


Figura 4.9. Relación de voltaje contra temperatura para los termopares mas comunes

No siempre es posible mantener la junta de referencia a la temperatura deseada; pero si la temperatura de la junta de referencia se mide o se conoce, entonces es posible aplicar correcciones a la Fem obtenida. Para asegurar una lectura precisa, muchos termopares son instalados con instrumentos que proveen compensación automática de la junta de referencia. En muchos instrumentos, esto se realiza haciendo pasar corriente a través de una resistencia sensible a la temperatura, la cual mide las variaciones en la temperatura de referencia y automáticamente provee la Fem necesaria para la compensación.

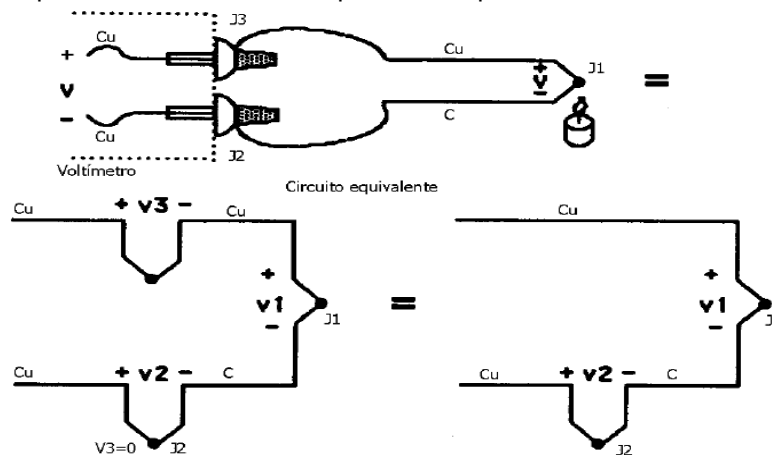


Figura 4.10. Utilización de un voltímetro para medir la Fem en un termopar

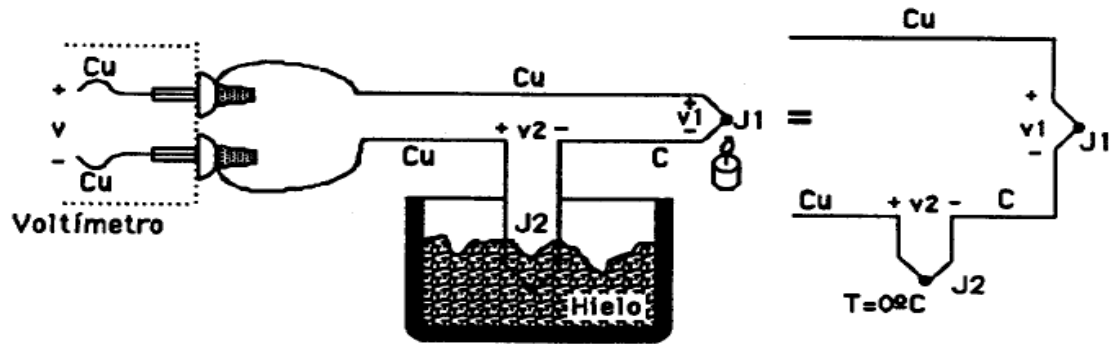


Figura 4.11. Junta de referencia externa

c.3 Tipos de termopares

La tabla 4.2 muestra los tipos de termopares comúnmente más utilizados en la industria de procesos. El rango indicado en la tabla se refiere al rango recomendable. Es decir, el rango sobre el cual existe una relación aproximadamente lineal entre la temperatura y la Fem generada. Los materiales constituyentes de cada tipo de termopar también se indican en la tabla 4.2. Los cables de los termopares han sido codificados con colores para evitar errores en las conexiones. La tabla 4.2 muestra la codificación de colores para cables de termopares recomendados por la Instrument Society of América (ISA) (ANSI C96-1 -1964). El cable negativo siempre es de color rojo. Otra forma de clasificar los termopares es según el tipo de junta. La junta de un termopar, figura 4.12 puede ser:

- ✓ Expuesta (a)
- ✓ Sin aterrarse (b)
- ✓ Aterrada (c)

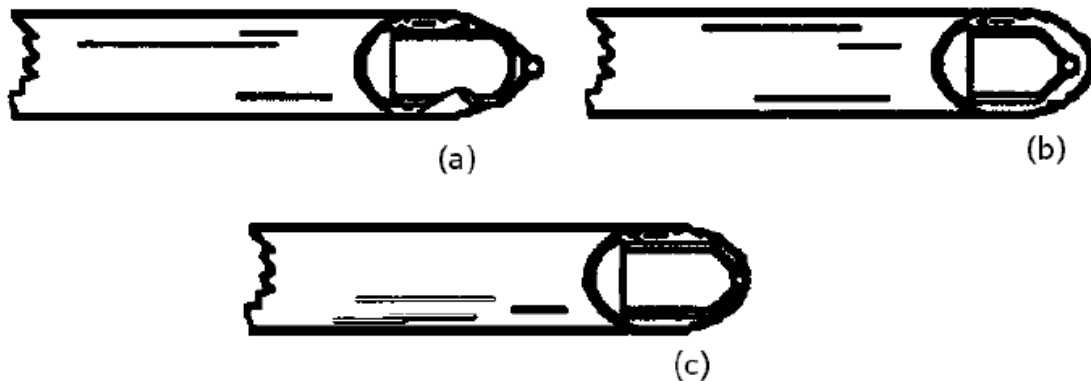


Figura 4.12. Tipos de juntas de un termopar

Tabla 4.2. Tipos de termopares

Tipos de termopares	Metales	Cable de termopar Color del aislante	Rango en °C
E	Cromo (+) Constantano(-)	Morado Rojo	-100 a 1000
J	Hierro (+) Constantano(-)	Blanco Rojo	0 a 760
K	Cromo (+) Aluminio (-)	Amarillo Rojo	0 a 1360
R	Platino 13% Radio (+) Platino (-)	Negro Rojo	0 a 1000
S	Platino 10% Radio (+) Platino (-)	Negro Rojo	0 a 1750
T	Cobre (+) Constantano (-)	Azul Rojo	-160 a 400

- ✓ Junta Expuesta: un termopar con junta expuesta es aquel en la cual la junta de medición está expuesta al medio cuya temperatura se quiere medir. Este tipo de junta es recomendable para medir temperaturas de gases no corrosivos, donde se requiere una respuesta rápida. La junta se extiende fuera de la protección metálica para dar una respuesta rápida. La protección metálica se sella en el punto donde se extiende la junta, para evitar la penetración de humedad o gas que puedan producir error.
- ✓ Junta sin aterrizar: un termopar con junta sin aterrizar es aquel en la cual la junta de medición está aislada eléctricamente de la protección metálica. Esto es recomendable cuando se mide temperatura en áreas donde existe ruido eléctrico. El protector metálico debe estar aterrado eléctricamente.
- ✓ Junta Aterrada: la junta aterrada combina las ventajas de un tiempo de respuesta excelente con la protección que le brinda un protector sellado. Este tipo de junta se recomienda para medición de temperaturas de gases y líquidos y para aplicaciones de alta presión. La junta de un termopar aterrada está soldada al protector metálico, permitiendo una respuesta más rápida que en el caso de la junta sin aterrizar.

c.4 Termopozos

En la mayoría de las aplicaciones de medición de temperatura no es recomendable exponer el elemento sensor al fluido del proceso. La utilización de un termopozo, a pesar de que introduce retardos en la medición, es recomendable para proteger al elemento sensor de la corrosión, erosión y altas presiones además de permitir su remoción o cambio mientras la planta o el proceso está en operación. El termopozo puede tener varias configuraciones y formas para su montaje, tal como se muestra en la figura 4.14. El termopozo puede ser de forma recta, cónica o escalonada. La forma de conexión al proceso puede ser roscada o por medio de bridas.

La longitud de inserción "U" de un termopozo, es la distancia desde el extremo libre del termopozo hasta, pero no incluyendo, la rosca externa u otro medio de conexión al recipiente o tubería, figura 4.14. La longitud de inmersión "R", es la distancia desde el extremo libre del termopozo hasta el punto de inmersión en el medio cuya temperatura está siendo medida. La longitud de inmersión requerida para obtener una exactitud y tiempo de respuesta óptimos es una función de factores mecánicos tales como: tipo de elemento sensor, espacio disponible y diseño de la conexión del termopozo al recipiente o tubería. La inmersión óptima también depende de las consideraciones de transferencia de calor determinadas por las propiedades físicas del fluido, tales como su velocidad, entre otras.

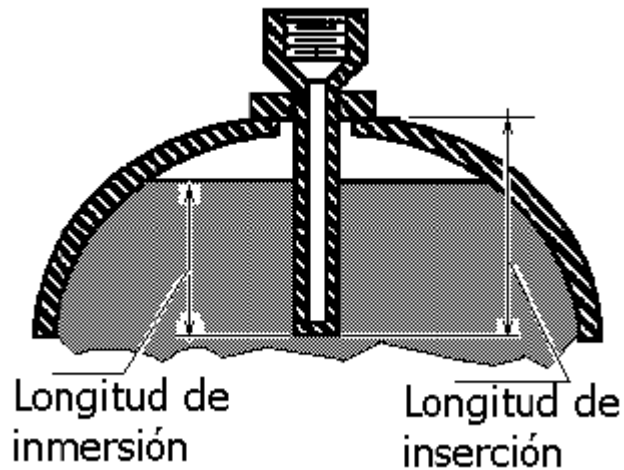


Figura 4.13. Inserción e inmersión de un termopozo

c.5 Instalación de termopares

Las instalaciones industriales de termopares generalmente están constituidas por el termopar con su termopozo, nivel de extensión, cabeza de conexión, figura 4.15. Se requiere también una longitud de cable de extensión y un instrumento indicador, registrador o controlador con compensación automática de la junta de referencia. Los cables de extensión son generalmente del mismo material de los elementos del termopar, o pueden ser de otros materiales los cuales generen esencialmente el mismo mili voltaje que el termopar.

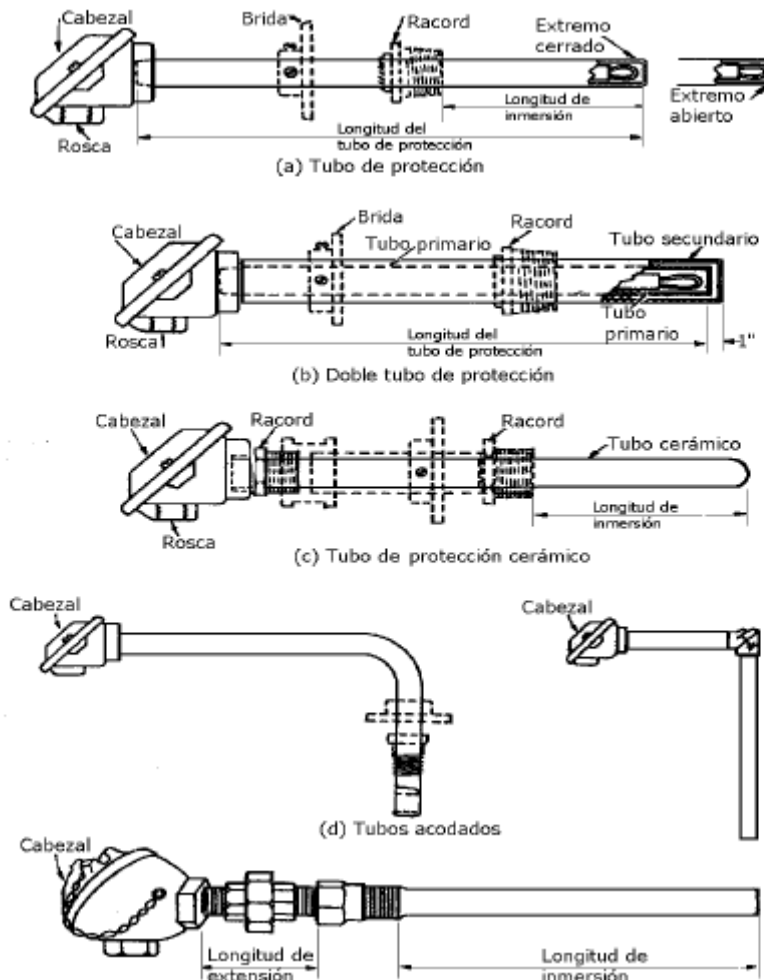


Figura 4.14. Tipos de Termopozos

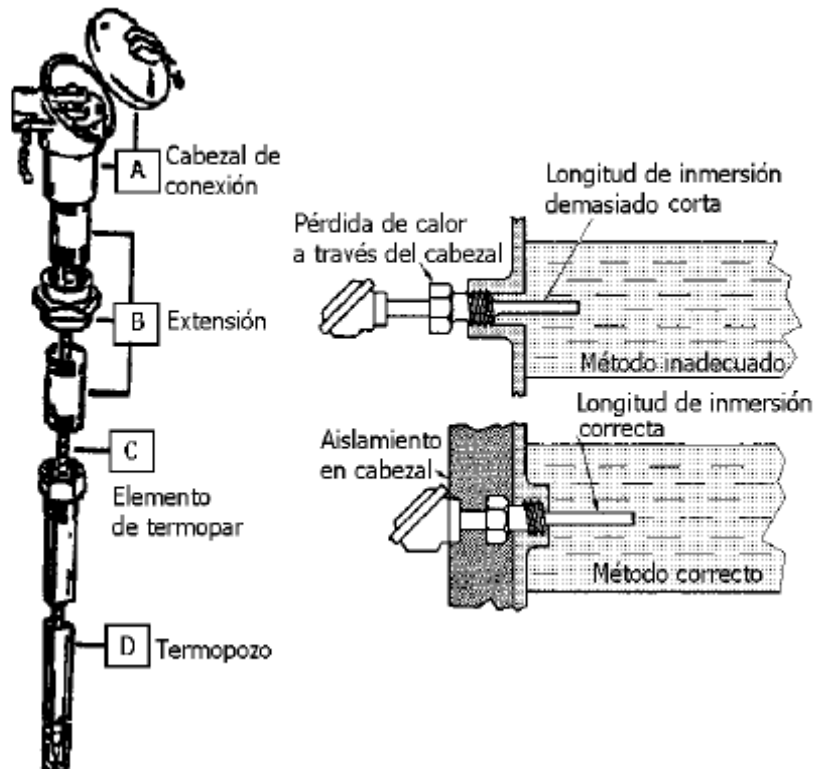


Figura 4.15. Termopar con cabezal de conexión

A los efectos de realizar una buena instalación del termopar, se debe tener en cuenta los factores siguientes:

- ✓ Conexión de la junta
- ✓ Descalibración
- ✓ Ruido
- ✓ Medición de temperaturas promedio y diferencias de temperaturas

Conexión de la Junta:

Existen varias formas de conectar dos cables de termopar: soldadura de plata y soldadura eléctrica. Las termopares comerciales son soldadas con equipos especiales para garantizar uniformidad en la soldadura. Una mala soldadura puede resultar en un “circuito abierto”.

Descalibración:

La descalibración es el proceso de alteración de las características físicas del cable del termopar, de modo que no reproduce los valores dados por la NBS dentro de límites especificados. La descalibración puede producirse por la difusión de partículas atmosféricas dentro del metal causada por haber sometido el termopar a temperaturas extremas o por “trabajo en frío” del metal (un efecto que puede ocurrir cuando el cable es estirado a través de un conduit o sometido a esfuerzo por manejo inadecuado o vibración).

Ruido:

Los circuitos de termopares están sujetos a tres tipos principales de ruido: estático, magnético y común. El ruido estático es causado por un campo eléctrico radiado por una fuente de voltaje que esté siendo acoplada capacitivamente en el circuito del termopar. La mejor forma para evitar el ruido estático es colocando el circuito dentro de una pantalla, la cual aísla el par de cables del termopar de la influencia exterior. La pantalla debe ser aterrada. El ruido magnético es producido por corrientes que fluyen a través de conductores y piezas de equipos eléctricos, tales como motores, generadores, etc. La mejor forma de reducir este tipo de ruido es utilizando cables trenzados. Los cables trenzados hacen que el ruido se cancele en secciones adyacentes del cable. El ruido común es un problema que se presenta cuando hay dos tierras diferentes en un circuito con corriente fluyendo a través de ellas. La mayoría de los termopares utilizados son del tipo “aterrados”; esto es, la junta de medición está conectada física y eléctricamente al termopozo en el cual está instalada. Cuando el circuito de tierra (o pantalla) de un termopar (o cualquier objeto metálico cercano tal como el conduit, bandeja, etc.); está a

un potencial diferente del de la junta de medición, fluyen corrientes en el cable de extensión produciéndose interferencias en la señal del termopar. El método común para evitar problemas de ruido común es aterrando el circuito de tierra del cable de extensión en la junta de medición.

Medición de Temperaturas Promedio y Diferencias de Temperaturas:

Para medir la temperatura promedio de un proceso o equipo se pueden usar termopares conectados en paralelo. El voltaje en el instrumento es el promedio de los voltajes generados por cada uno de los termopares conectados en paralelo. Este voltaje es la suma de los voltajes individuales dividido por el número de termopares. Todos los termopares deben ser del mismo tipo y deben ser conectados utilizando los cables de extensión apropiados. Para evitar un flujo de corriente a través del circuito de tierra, los termopares no deben aterrarse. Para minimizar el efecto de resistencias no deseadas en los termopares y en sus cables de extensión en el punto de conexión paralela, se utiliza una resistencia en serie con cada termopar. Esta resistencia previene el flujo de corriente entre los termopares, lo cual podría inducir errores de medición. El valor de esta resistencia debería ser alto comparado con la resistencia total del circuito. Una resistencia de 1.500 Ohms, generalmente trabaja bien. Dos termopares pueden ser utilizados para medir la diferencia de temperatura entre dos puntos. Los termopares deben ser similares y se conectan utilizando cables de extensión del mismo material del termopar. La conexión debe hacerse de forma tal que los voltajes generados se opongan uno al otro. Al igual que en el caso de termopares en paralelo, los termopares no deben aterrarse.

d. Termómetros de resistencia (RTD)

El principio de operación de los detectores de temperatura tipo resistencia (RTD), está basado en el hecho de que la resistencia eléctrica de los metales varía directamente con la temperatura. La magnitud de este cambio frente a 1 °C de cambio en la temperatura, se conoce como el "coeficiente de resistencia de temperatura" (α). Para la mayoría de los metales puros, este coeficiente es constante dentro de un rango de temperatura.

El cambio en la resistencia es una función del coeficiente de resistencia de temperatura y puede ser expresado por la ecuación:

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

Donde:

R_t: Resistencia en Ohms a la temperatura T.

R₀: Resistencia en Ohms a la temperatura de referencia (generalmente 0 °C).

α: Coeficiente de resistencia de temperatura.

Los metales comúnmente utilizados en el diseño de detectores de resistencia son: platino el cual tiene un coeficiente de 0,00392 Ohms/ Ohms °C y se utiliza para medir temperaturas en el rango de -263 °C a + 545 °C, y níquel, el cual tiene un coeficiente de 0,0063 Ohms/ Ohms °C, utilizado para medir temperaturas en el rango de -190 °C a + 310 °C. Otros materiales utilizados son: plata, tungsteno, cobre y oro. Las características principales de los elementos utilizados como detectores de resistencia, están listados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Características de los elementos más utilizados como RTD

<i>Material</i>	<i>Coeficiente de Temperatura (α) entre 0° y 100 °C Ohms/Ohms °C</i>	<i>Resistividad a 0°C μOhms cm.</i>	<i>Rango útil de Temperatura °C</i>
Platino (Pt)	0,00392	9,81	-220 ~ +850
Cobre (Cu)	0,0043	1,529	- 70 ~ +150
Níquel (Ni)	0,00681	5,91	-100 ~ +300

La construcción industrial del RTD es prácticamente idéntica a la de los termopares, en su apariencia externa generalmente no existe diferencia física. Los RTD se construyen de varios tipos:

-En un circuito básico de dos cables se utiliza principalmente el tipo de conexión de dos hilos, con una conexión a cada terminal de la RTD. En este diseño, la resistencia de los cables de conexión, así como también las variaciones de resistencia por cambios en la temperatura

ambiente, se incluyen en la medición de la resistencia de la RTD. Este tipo de configuración puede ser utilizado cuando los cables de conexión son cortos, de tal manera que su resistencia total sea despreciable, por ejemplo en transmisores-RTD integrados.

- El tipo de 3-hilos es el normalizado. Los cables que conectan el RTD al circuito de medición tienen resistencias cuyos efectos ya mencionados, tienden a cancelarse.

- La configuración de 4-hilos, es decir, dos hilos más lazo de compensación, proporciona mayor exactitud en la medición que las configuraciones anteriores.

Si los cuatro hilos son del mismo diámetro, longitud y material, y están sujetos a los mismos cambios de temperatura ambiente, y los dos pares de hilos están en pares opuestos del circuito del puente de Wheatstone, la resistencia de los cables no tiene ningún efecto sobre la medición de la resistencia del RTD. En este tipo de configuración, los cuatro hilos están conectados al RTD, dos en cada extremo. Una corriente constante se suministra al RTD a través de los cables externos, y el voltaje del RTD se mide por medio de un voltímetro de alta impedancia, colocado en los dos hilos internos.

De las configuraciones descritas, la más usada es la de 3 hilos, ya que proporciona suficiente exactitud para la mayoría de las mediciones industriales.

Los detectores de resistencia proporcionan una medición más exacta que la que es posible lograr cuando se utilizan termopares. Por lo tanto, los detectores de resistencia se utilizan en aquellas instalaciones donde se desea una gran exactitud.

e. Termistores

Los Termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado, por lo que presentan unas variaciones rápidas y extremadamente grandes para los cambios relativamente pequeños en la temperatura. Los Termistores se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio y otros metales, y están encapsulados.

La relación entre la resistencia del termistor y la temperatura viene dada por la expresión:

$$R_t = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Donde:

R_t : Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta T_t

R_0 : Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia T_0

β : Constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas

Así como el RTD, el termistor es también una resistencia sensible a la temperatura, mientras que el termopar es el transductor de temperatura más versátil; y el RTD es el más estable, el termistor es el más sensible. Los Termistores generalmente están constituidos de materiales semiconductores.

La mayoría de los Termistores tienen un coeficiente de temperatura negativo; esto es, su resistencia disminuye al aumentar la temperatura. La mayoría de los Termistores exhiben grandes coeficientes de temperatura (lo que les permite detectar cambios mínimos en la temperatura), y una respuesta altamente no lineal.

La figura 4.16 muestra la variación del voltaje o la resistencia en función de la temperatura para termopares, RTD y Termistores. En esta figura puede notarse que mientras el termopar y el RTD exhiben una respuesta más o menos lineal, los Termistores producen una respuesta no lineal.

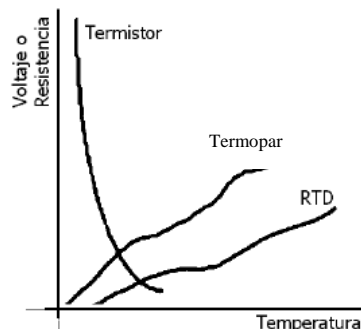


Figura 4.16. Comparación de variación de voltaje o resistencia contra temperatura

Otro tipo de configuración de 4 hilos se utiliza para mediciones de alta precisión. En este tipo de circuito, los cuatro hilos conectan al sensor (dos en cada extremo). A través de los dos hilos externos se suministra una corriente constante al RTD. El voltaje a través del RTD se mide con un voltímetro de alta impedancia conectado a través de los dos hilos internos. Debido a que los Termistores están constituidos por semiconductores, son más susceptibles a descalibrarse a altas temperaturas, si se les compara con los termopares o los RTD. El uso de los Termistores generalmente está limitado a rangos de temperatura de 100 a 400 °C aproximadamente. En la tabla 10.4 se presenta un cuadro comparativo entre termopares, RTD y Termistores.

f. Pirómetros de radiación

La mayoría de las mediciones de temperatura se realizan colocando el sensor dentro de un termopozo en contacto con el medio cuya temperatura se quiere medir. Sin embargo, el contacto del sensor con el medio es difícil o impráctico cuando el objeto se está moviendo, el ambiente es corrosivo, abrasivo, está a una temperatura extremadamente alta, o el objeto es muy pequeño, muy largo, o muy frágil, está inaccesible o la medición está siendo realizada al vacío. Bajo estas condiciones es más conveniente utilizar un sensor que no entra en contacto con el objeto o el medio. Estos sensores son los Pirómetros de Radiación.

Tabla 4.4 Comparación entre elementos de medida de temperatura

INSTRUMENTO	TERMOPAR	RTD	TERMISTOR
VENTAJAS	Simple	Más exacta	Señal de salida alta
	Robusta	Más estable	Rápido
	Económica	Más lineal que las termocuplas	Medición a dos hilos
	Diferentes formas		Más sensible
	Rangos altos de temperatura		
	No requiere fuente de poder		
DESVENTAJAS	No lineal	Costosa	No lineal
	Bajo voltaje (señal)	Lenta	Temperatura limitada
	Requiere referencia	Requiere fuente de poder	Frágil
	Menos estable	Poca variación en la resistencia	Requiere fuente de poder
	Menos sensible	Resistencia absoluta baja	Auto calentamiento
		Auto calentamiento	

Los pirómetros de radiación permiten medir temperatura sin contacto físico con el medio. Esto es posible debido a que todos los objetos emiten energía radiante, siendo la intensidad de esta radiación proporcional a la temperatura. La medición de temperatura utilizando pirómetros de radiación está basada en la ley que establece que: "entre dos cuerpos que están a diferentes temperaturas, existe una transferencia neta de energía radiante desde el cuerpo más caliente hacia el cuerpo más frío". Esta ley también establece que la cantidad de energía transferida por unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos, esta ley se conoce como la Ley de Stefan-Boltzmann y viene dada por la siguiente ecuación:

$$E = K(T_b^4 - T_a^4)$$

Donde:

K : Constante de Boltzmann : $5,57 \times 10^{-5}$ erg / seg / cm² K⁴.

T_b : Temperatura del cuerpo caliente K.

T_a : Temperatura del cuerpo frío K.

La radiación es un fenómeno ondulatorio análogo a la luz y ocupa un lugar definido en el espectro.

Los pirómetros que responden a todas las longitudes de onda y por lo tanto operan bajo la ecuación de Stefan-Boltzmann, se denominan **Pirómetros de Radiación Total**. Otra clase de pirómetros que utilizan solamente bandas angostas de longitud de onda en el espectro visible, se conocen con el nombre de **Pirómetros Ópticos**. Por lo tanto un pirómetro de radiación total es no selectivo, mientras que un pirómetro óptico es selectivo. Otro tipo de pirómetro que es parcialmente selectivo se denomina **Pirómetro de Radiación Parcial**.

Capítulo V Variable Nivel

Introducción

La medición del nivel puede definirse como la determinación de la posición de una interfase que existe entre dos medios separados por la gravedad, con respecto a una línea de referencia. Tal interfase puede existir entre un líquido y un gas, entre dos líquidos, entre un sólido granulado o sólido fluidizado y un gas, o entre un líquido y su vapor. Existen muchas situaciones en la industria petrolera donde estas interfases deben ser establecidas dentro de límites específicos, por razones de control del proceso o de la calidad del producto. Hay una gran variedad de técnicas por medio de las cuales se puede medir el nivel de líquidos o sólidos en equipos de procesos

5.1 Medición de nivel

La selección de la instrumentación adecuada depende de la naturaleza del proceso; del grado de exactitud y control requeridos y del aspecto económico. Es muy importante que el usuario conozca los diferentes medidores disponibles, para que así pueda hacer una selección apropiada. A continuación se describen los principales métodos e instrumentos utilizados en la medición de nivel.

5.2 Tipos de instrumentos para medir nivel

Al igual que otras variables de proceso, el nivel puede ser medido por métodos directos o métodos indirectos. Los métodos e instrumentos utilizados para medición de nivel pueden clasificarse de la siguiente manera:

- ✓ Métodos visuales.
- ✓ Instrumentos actuados por flotadores.
- ✓ Desplazadores.
- ✓ Instrumentos de nivel de tipo hidrostáticos.
- ✓ Métodos electrónicos.
- ✓ Métodos térmicos.
- ✓ Métodos sónicos.
- ✓ Instrumentos fotoeléctricos.
- ✓ Instrumentos radioactivos.

La referencia [Creus, Antonio. INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL] plantea que los instrumentos de medición directa se dividen en:

- ✓ Sonda
- ✓ Cinta y plomada
- ✓ Nivel de cristal
- ✓ Instrumentos de flotador

Mientras que los instrumentos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática se dividen en:

Medidor manométrico, Medidor de tipo burbujeo, Medidor de membrana Medidor de presión diferencial de diafragma.

La citada referencia clasifica también a los instrumentos de medición de nivel según las características eléctricas del fluido en:

-Medidor resistivo, Medidor capacitivo, Medidor de radiación, Medidor conductivo, Medidor ultrasónico, Medidor de láser.

En las tablas 5.1 y 5.2 se presentan cuadros comparativos que sirven como una guía para la selección de medidores de nivel.

Tabla 5.1 Medidores de nivel de líquidos

<i>Instrumento</i>	<i>Campo de medida</i>	<i>Precisión % escala</i>	<i>Presión máxima, bar</i>	<i>Temperatura máxima del fluido en °C</i>	<i>Desventajas</i>	<i>Ventajas</i>
Sonda	Limitado	0,5 mm	atm	60	Manual, sin olas. Tanques abiertos	Barato, preciso
Cristal	"	"	150	200	Sin transmisión	Seguro, preciso
Flotador	0 ~ 10 m.	±1~2%	400	250	Posible agarrotamiento	Simple, independiente, naturaleza líquida
Manométrico	Altura tanque	±1%	atm	60	Tanques abiertos, fluidos limpios	Barato
Membrana	0 ~25 m.	±1%	"	60	Tanques abiertos	Barato
Burbujeo	Altura tanque	±1%	400	200	Mantenimiento, contaminación líquido	Barato, versátil
Presión diferencial	0,3 m.	±0,15% ~ ±0,5%	150	200	Posible agarrotamiento	Interfase líquido
Desplazamiento	0 ~25 m.	±0,5%	100	170	Expuesto a corrosión	Fácil limpieza, robusto, interfaces
Conductivo	Ilimitado	-	80	200	Líquido conductor	Versátil
Capacitivo	0,6 m.	±1%	80~250	200~400	Recubrimiento electrodo	Resistencia corrosión
Ultrasónico	0,3 m.	±1%	400	200	Sensible a densidad	Todo tipo de tanques y líquidos
Radiación	0~2,5 m.	±0,5% ~ ±2,0%	-	150	Fuente radiactiva	Todo tipo de tanques y líquidos y sin contacto líquido
Láser	0~2,0 m.	±0,5% ~ ±2,0%	-	1500	Láser	Todo tipo de tanques y líquidos y sin contacto líquido

Tabla 5.2 Características de los medidores de nivel de sólidos

Tipo	Punto fijo		Continuo	Precisión en % de toda la escala	Temperatura máxima de servicio °C	Tanques		Desventajas	Ventajas
	Alto	Bajo				Abiertos	Cerrados		
Diafragma	Sí	Sí	No	50 mm	60	Sí	Sí	No admite materiales granulares > 80 mm. Tanques a baja presión	Bajo coste, sensible a materiales de variada densidad
Cono suspendido	Sí	Sí	No	50 mm	60	Sí	No	Debe estar protegido	Bajo coste
Varilla flexible	Sí	No	No	25 mm	300	Sí	No	Relé retardo, solo nivel alto	Muy sensible
Conductivo	Sí	Sí	No	25 mm	300	Sí	Sí	Conductividad materiales	Tanques a presión
Paletas rotativas	Sí	Sí	No	25 mm	60	Sí	No	Tanques abiertos o a baja presión	Materiales diversos, a prueba de explosión
Sondeo electromecánico	-	-	Sí	± 1%	60	Sí	No	Resistencia mecánica media	Sencillo
Báscula	-	-	Sí	± 0,5 ~1%	900	Sí	Sí	Coste elevado	Preciso y seguro, alta presión y temperatura
Capacitivo	-	-	Sí	15 mm	150	Sí	Sí	Materiales aislantes, calibración individual, adherencia a productos	Bajo coste
Presión diferencial	-	-	Sí	-	300	Sí	Sí	Coste medio, posible obstrucción orificio purga	Respuesta rápida
Ultrasonidos	Sí	Sí	Sí	± 0,5 ~1%	150	Sí	Sí	Coste medio	Materiales opacos y transparentes, a prueba de explosión
Radiación	Sí	Sí	Sí	± 0,5 ~1%	1300	Sí	Sí	Coste elevado, supervisión seguridad, calibración individual, varias fuentes	Tanques sin aberturas, productos corrosivos y peligrosos, altas presiones y temperaturas

5.3 Métodos visuales para medición de nivel

Los métodos visuales para medición de nivel son las más antiguas y simples. No tienen partes móviles, por lo tanto no están sujetas a fallas mecánicas. Entre estos tipos de medidores se pueden mencionar: los tubos de vidrio y las cintas graduadas.

a. Tubos de vidrio

Los medidores o tubos de vidrio pueden ser considerados como manómetros en los cuales el nivel alcanza la misma posición que el nivel dentro del envase. La simplicidad de este instrumento lo hace popular en aquellas aplicaciones donde se requiere una indicación local del nivel. Existen dos tipos de medidores: el tubo transparente y el de reflexión. El transparente se utiliza en servicios donde el material dentro del recipiente tiene color o es viscoso, para detección de interfase o cuando el fluido es corrosivo. En la figura 5.1 se muestra un medidor de este tipo.

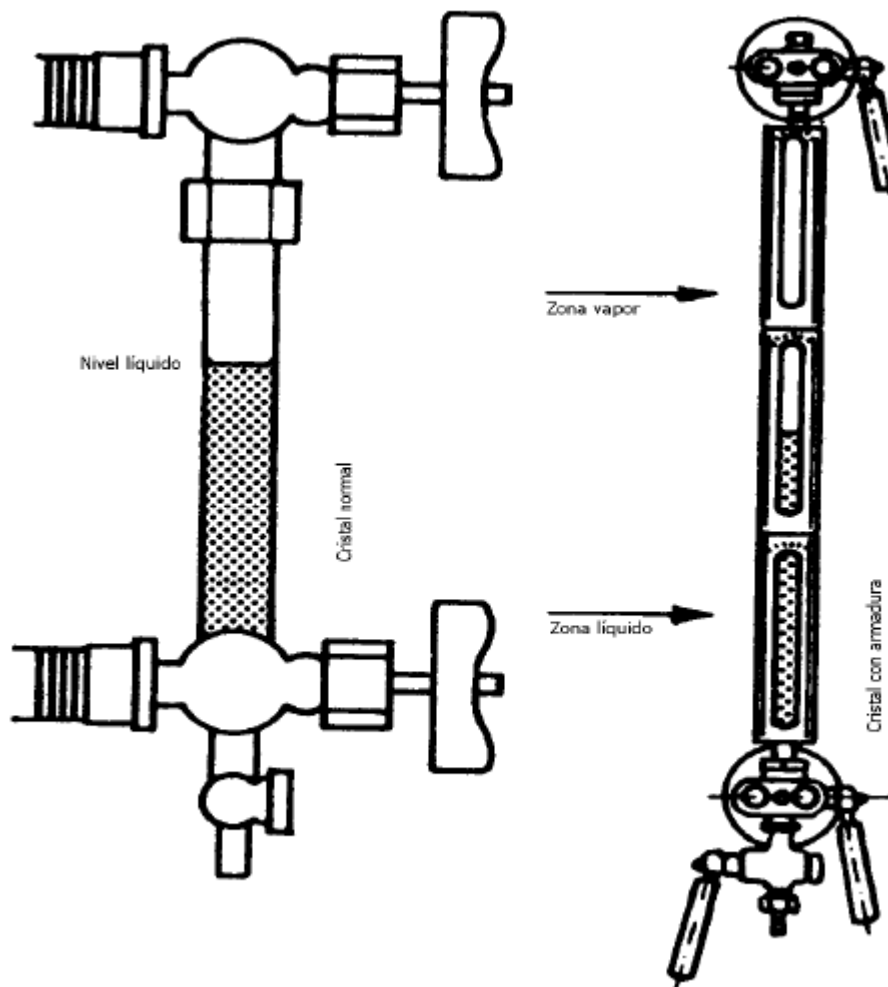


Figura 5.1. Tubo de vidrio transparente para indicación de nivel

El tubo tipo reflexión utiliza el fenómeno óptico de la refracción de la luz, que cambia la reflexión en el ángulo crítico de los rayos incidentes, figura 5.2. Cuando el tubo de reflexión está vacío, la luz incidente es reflejada desde las superficies prismáticas, haciendo que el vidrio tenga una apariencia plateada; a medida que el líquido sube en el vidrio, el ángulo crítico cambia debido a que el índice de refracción del líquido que sube, es diferente a la de los vapores encima de él. La luz visible es refractada en el fluido, haciendo que el vidrio se vea oscuro en la zona cubierta por el líquido. De esta manera, un tubo de reflexión que contiene líquido muestra una clara demarcación entre el área oscura del líquido y el área plateada del vapor encima del líquido.

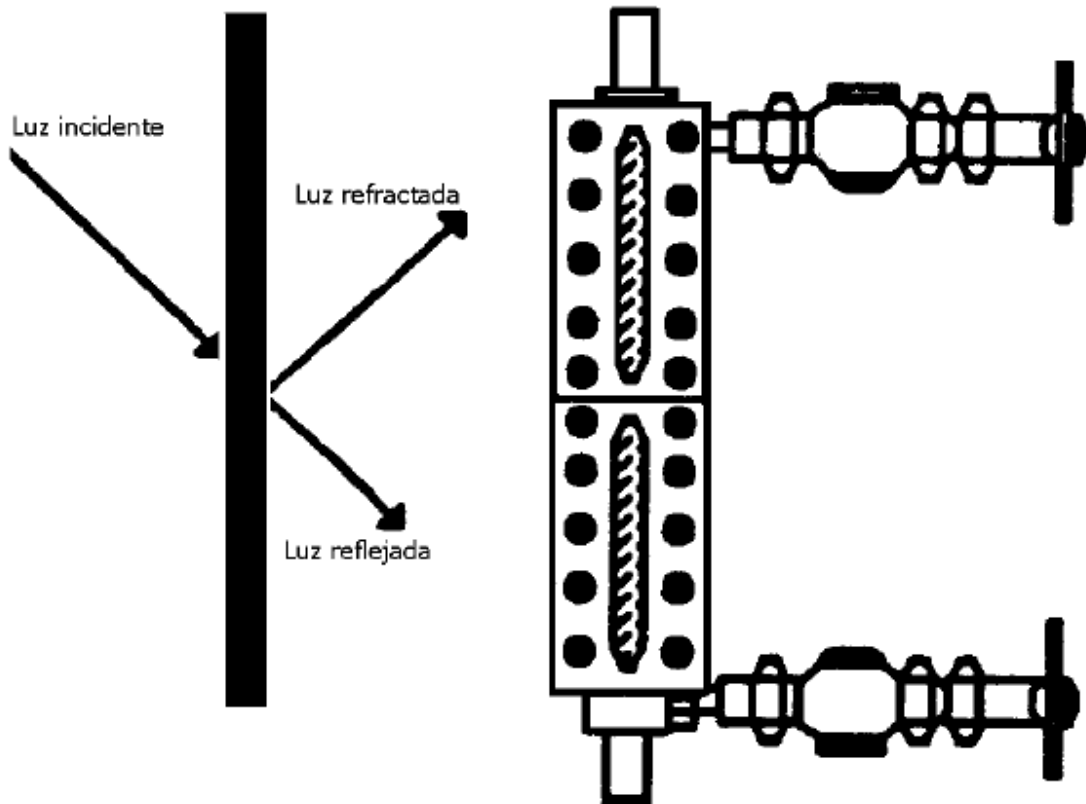


Figura 5.2. Fenómeno de refracción y reflexión y tubo de vidrio tipo reflexión

La figura 5.2 muestra un tubo de vidrio tipo reflexión. Estos medidores vienen en longitudes estándares. La máxima longitud está limitada a 1,8 m. (6 pies). Los tubos de vidrio tipo reflexión se utilizan principalmente para líquidos incoloros y no viscosos.

b. Cintas graduadas

Este método para medición de nivel consiste en una cinta graduada con una pesa que tiene una gravedad específica mayor que la del fluido que está siendo medido. La cinta se hace descender en el tanque que contiene el fluido y la superficie mojada de la cinta provee una indicación del nivel del líquido. Su aplicación está limitada a tanques abiertos a la atmósfera.

5.4 Flotadores

Los instrumentos de medición de nivel constituidos por flotadores, operan por el movimiento del flotador. El principio básico de flotación establece que "un cuerpo (flotador), sumergido en un líquido es empujado hacia arriba por una fuerza que es igual al peso del líquido desplazado", la ecuación utilizada para determinar la fuerza de flotación disponible es: ec. (5.1)

$$F_b = V_f Sg$$

Donde:

F_b : Fuerza de flotación.

V_f : Volumen del flotador.

Sg : Gravedad específica del líquido.

El flotador se mueve hacia arriba y hacia abajo con los cambios en el nivel del líquido. Este movimiento del flotador puede ser transformado por diversos medios en una acción de indicación, registro o control. Generalmente son utilizados para medir interfases líquido-gas y líquido-líquido.

Comercialmente existe una gran variedad de estos instrumentos utilizados en aplicaciones de nivel de líquido. Los más comunes son los flotadores horizontales y los flotadores verticales.

El diseño mostrado en la figura 5.3 permite que el movimiento del flotador pueda ser usado para operar un interruptor (switch) neumático o eléctrico.

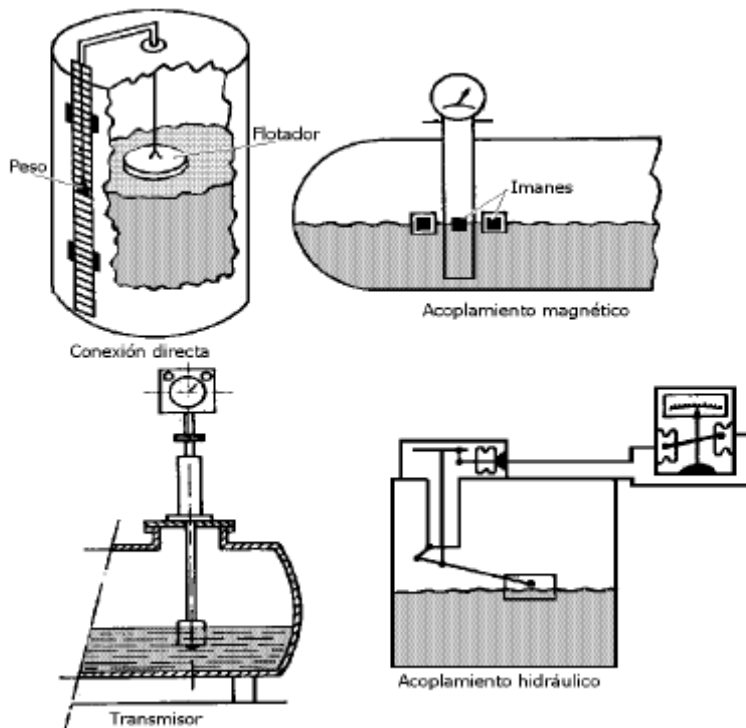


Figura 5.3. Instrumento de medición de nivel de tipo flotador

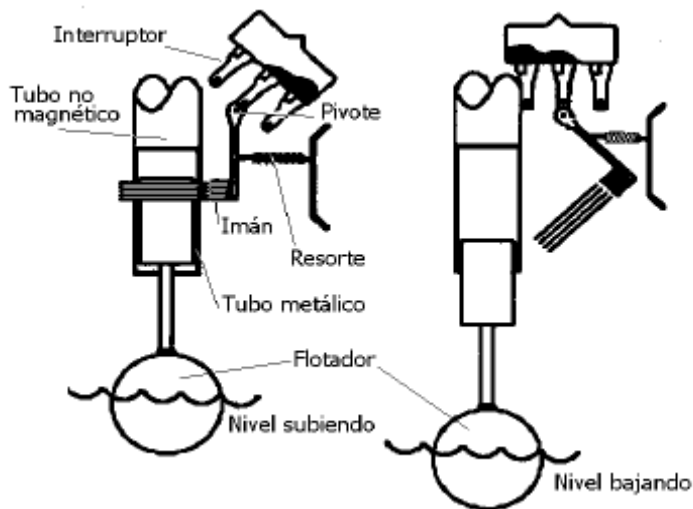


Figura 5.4. Interruptor magnético activado por flotador

Los ejemplos anteriores utilizan un mecanismo de multiplicación de la fuerza (palanca), de esta manera, un flotador pequeño puede ser utilizado en aplicaciones de baja gravedad específica.

Cambiando o ajustando la longitud de la palanca, se regula el rango de medición.

La figura 5.3 muestra un instrumento constituido por un flotador y una cinta que acciona un indicador y un contador. Un motor mantiene una tensión constante sobre la cinta. Este mecanismo puede ser equipado con interruptores por alto y bajo nivel para activar alarmas, reguladores (relés), válvulas, solenoides y otros equipos.

Existen otros sistemas como el mostrado en la figura 5.3 en el cual se hace uso de fuerzas magnéticas para detectar la posición del flotador.

Como se muestra en la figura 5.3 un flotador posiciona un pistón magnético conectado al brazo del flotador. Fuera de la cámara donde se mueve el flotador existe un imán permanente conectado a un brazo pivote montado con un interruptor. El movimiento del flotador hace que el pistón magnético pueda abrir y cerrar el interruptor, ya que este se mueve por la acción del

pistón magnético sobre el imán. Este tipo de instrumento se utiliza en aplicaciones del nivel límite de líquidos, para producir señales de alarma, o control del tipo **ON-OFF**.

Estos flotadores de movimiento vertical, prácticamente se mueven la misma distancia que se mueve el nivel del líquido. Debido a esto normalmente se emplean en aplicaciones de alarmas por alto o bajo nivel.

El montaje de este tipo de sensor puede hacerse directamente sobre el recipiente o utilizando una jaula o cámara, en el cual se encuentra el flotador, y que puede ser conectada al recipiente por medio de bridas. La figura 5.4 muestra diferentes esquemas de conexión.

Los interruptores de nivel activados por flotadores son los dispositivos electromecánicos más ampliamente utilizados en la detección de nivel de líquido. El mantenimiento de estos equipos es sencillo, son altamente confiables y utilizan una propiedad del líquido que generalmente es constante en la mayoría de las aplicaciones.

Ventajas y desventajas: la aplicación de flotadores para medición y control de nivel del líquido presenta algunas ventajas y desventajas, mencionadas a continuación:

• **Ventajas:**

- ✓ Fácil instalación.
- ✓ Método de medición probado y confiable.
- ✓ No requiere calibración.
- ✓ Adecuado para aplicaciones en altas temperaturas, hasta 530 °C.
- ✓ Adecuado para aplicaciones de altas presiones, hasta 5.000 psig.
- ✓ Turbulencia y espuma en la superficie del líquido no afectan de manera significativa la medición.

• **Desventajas:**

- ✓ El encostramiento o depósitos de materiales sobre el flotador pueden impedir la operación de algunos flotadores.
- ✓ La exactitud normalmente está limitada a 1/4".
- ✓ No son adecuados para aplicaciones de líquidos viscosos.
- ✓ Las partes móviles están sujetas a desgastes requiriendo mantenimiento frecuente.

5.5 Desplazadores

La operación del desplazador está basado en el principio de Arquímedes, el cual establece que un cuerpo sumergido en un líquido será empujado hacia arriba por una fuerza igual al peso del líquido que él desplaza.

Cuando aumenta el nivel del líquido en el recipiente, el desplazador pierde peso (este peso es igual al peso del líquido desplazado). Para relacionar la pérdida de peso del desplazador con el nivel del líquido en el recipiente, normalmente se utilizan dos tipos de mecanismos. Uno de ellos utiliza una barra de torsión sobre la cual está soportado el desplazador. La pérdida de peso del desplazador, por efecto del aumento del nivel en el recipiente, hace que varíe la fuerza ejercida sobre la barra de torsión, produciéndose en esta un movimiento de rotación proporcional al cambio, en el nivel de líquido. La conversión del movimiento de rotación en la barra de torsión, en una señal proporcional a la variación del nivel, puede hacerse neumática o electrónicamente.

El otro mecanismo utiliza un resorte sobre el cual está soportado el desplazador. A medida que el desplazador pierde peso, la fuerza ejercida sobre el resorte disminuye haciendo que este se mueva.

Tal movimiento se utiliza para producir una señal proporcional al nivel o para activar un interruptor.

La fórmula utilizada para determinar el alcance (span) de la fuerza de flotación para aplicaciones de nivel de líquido es: ec. (5.2)

$$F_b = V \left(\frac{L_w}{L} \right) B Sg$$

Donde:

F_b : Alcance (Span) de la Fuerza de Flotación (lb_f o Newton)

V : Volumen total del desplazador (pulg³ o cm³)

L_w : Longitud de trabajo del desplazador (pulgadas o mm)

L: Longitud total del desplazador (pulgadas o mm)
 B: Constante ($0,036 \text{ lbf/pulg. } 09.8 \times 10^{-3} \text{ N/cm}^3$)
 Sg: Gravedad específica del fluido

Los desplazadores se diferencian de los flotadores, debido a que en lugar de flotar sobre la superficie del líquido, están soportados por brazos que les permiten muy poco movimiento vertical a medida que el nivel cambia.

Todas las mediciones de nivel que utilizan desplazadores son de interfase, ya que la variable medida es el nivel entre dos medios que tienen diferente gravedad específica. La magnitud del movimiento del desplazador depende del cambio de interfase y de la diferencia de gravedad específica entre el medio superior e inferior.

En aplicaciones de nivel de líquido, la medición se realiza a medida que el líquido varía sobre la longitud total del desplazador. Las longitudes estándares de desplazadores van desde 0,3 hasta 3 metros (11,8 hasta 118 pulgadas). En aplicaciones de nivel de interfase, la medición se realiza a medida que el nivel de interfase entre dos líquidos inmiscibles de diferente gravedad específica, varía a lo largo de la longitud total del desplazador. Los desplazadores también pueden ser utilizados para medir densidad de líquidos; en este caso la medición se realiza con el desplazador completamente sumergido.

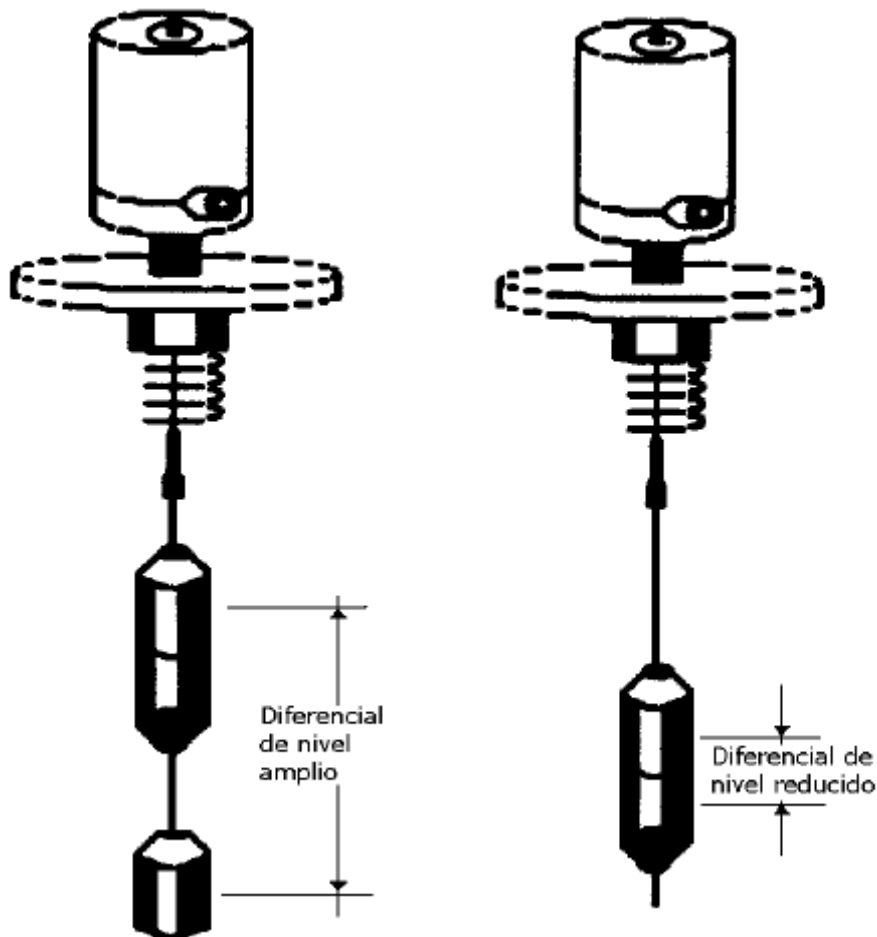


Figura 5.5. Interruptor de nivel tipo desplazador

Al igual que los flotadores, los desplazadores también se utilizan en aplicaciones de alarmas o control **on-off**. En vez de un flotador que activa un interruptor en respuesta a un cambio en el nivel de líquido, los desplazadores se conectan a un resorte por medio de un cable de suspensión, tal como se muestra en la figura 5.5. El cambio en la fuerza ejercida sobre el resorte, debido a la pérdida de peso del desplazador, activa un interruptor; el cual a la vez activa una alarma o arranca o para una bomba. También existen configuraciones de interruptores dobles o triples con los cuales se pueden controlar más de una bomba o configurar más de un punto de alarma.

Los sensores de nivel de tipo desplazador pueden ser instalados directamente sobre el recipiente, o en forma lateral utilizando una jaula o cámara dentro de la cual se coloca el desplazador. Esta jaula se conecta, por medio de bridas, al tanque en forma similar como el caso de los flotadores.

Ventajas y desventajas: las ventajas y desventajas en la aplicación de desplazadores para medición de nivel son las siguientes:

Ventajas:

- ✓ Instalación sencilla.
- ✓ Principio de operación confiable y probado.
- ✓ Calibración ajustable en campo.
- ✓ Permite medición continua.
- ✓ Capacidad para trabajar a altas presiones y temperaturas (5.000 psig/540°C).
- ✓ No lo afectan la turbulencia ni la espuma.

Desventajas:

- ✓ Es afectado por depósitos de materiales sobre el desplazador.
- ✓ La exactitud normalmente está limitada a $\pm 1/4$ ".
- ✓ No es apropiado para líquidos viscosos.
- ✓ Partes móviles sujetas a desgastes.
- ✓ La medición es afectada por los cambios en la gravedad específica del fluido.

Aplicaciones:

- ✓ Medición de nivel de líquidos de gravedad específica constante.
- ✓ Medición de interfase líquido-líquido.
- ✓ Control de bombas.
- ✓ Interruptores para señal de alarma.
- ✓ La figura 5.6 se muestra algunas aplicaciones de los desplazadores.

5.6 Instrumentos de nivel de tipo hidrostático

En los instrumentos de nivel de tipo hidrostático, el nivel se mide por medio del peso que ejerce una columna de líquido sobre el sensor de presión. La siguiente relación define la medición de presión debido a una columna de líquido, la cual puede ser convertida a altura del nivel sobre una línea de referencia determinada: ec. (5.3)

$$H = \frac{P}{Sg}$$

Donde:

P: Presión debido a la columna de líquido.

Sg: Gravedad específica del líquido.

H: Altura del nivel.

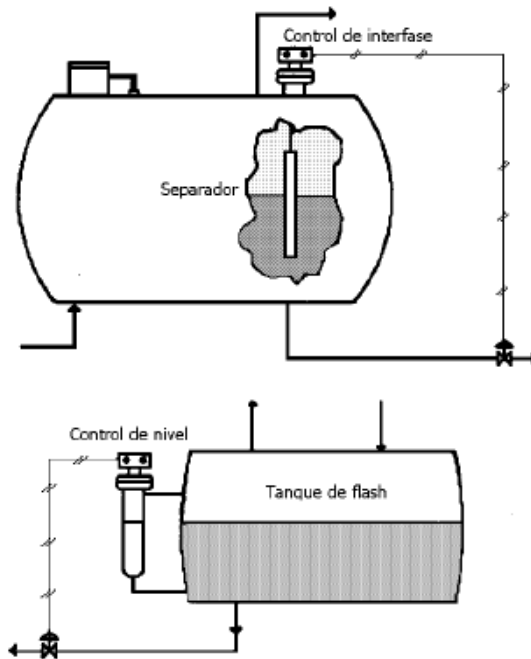


Figura 5.6. Aplicaciones de uso de los desplazadores

En este caso se supone que la densidad del líquido es constante, sin embargo, las variaciones en la temperatura pueden afectar considerablemente la densidad del líquido afectando la exactitud de la medición.

El método más común para medir nivel con sensores de tipo hidrostático, es utilizando transmisores de diferencial de presión (D/P cell), o transmisores de presión manométrica (gage). En los de presión diferencial, la presión ejercida por la columna de líquido actúa sobre una celda de presión diferencial, cuyo movimiento es utilizado para transmitir una señal neumática o electrónica proporcional a la altura del nivel. En la figura 5.7 se muestran unas celdas de presión diferencial. Estos transmisores tienen precisiones que van de +0,2% a +0,25% del alcance (span).

Se utilizan diferentes métodos para convertir la señal de presión hidrostática en una señal electrónica proporcional al nivel en el recipiente. En el ejemplo de la figura 5.8, se utiliza una celda de capacitancia que detecta los cambios en la presión hidrostática producidos por cambios en el nivel del recipiente.

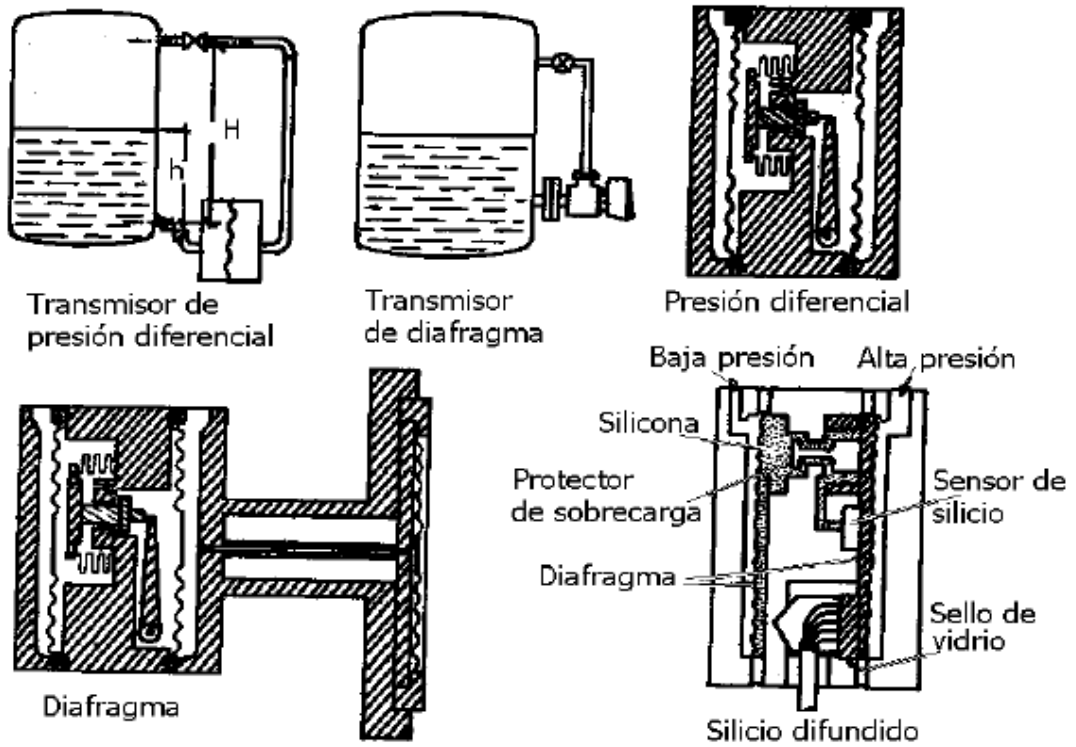


Figura 5.7. Aplicaciones de uso de los transmisores de presión diferencial

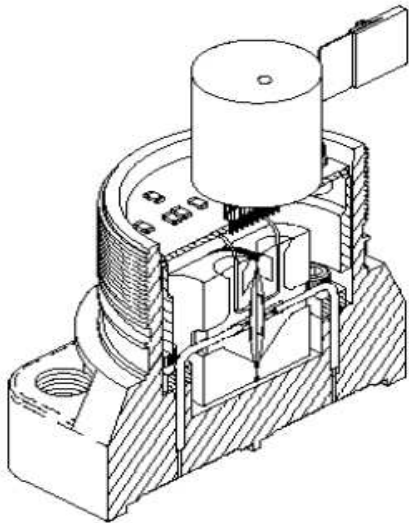


Figura 5.8. Corte de un módulo sensor (celda de presión diferencial)

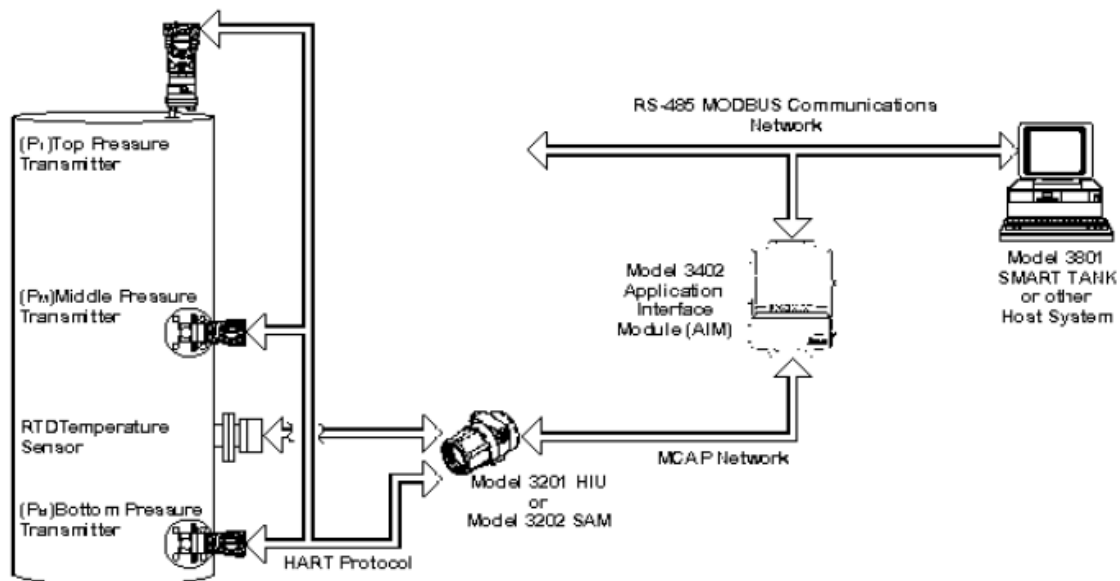


Figura 5.9. Arquitectura de un sistema de medición de un tanque

a. Aplicación de transmisores de nivel

Los transmisores de presión manométrica o diferencial, utilizados para medir nivel de líquido, miden la presión hidrostática. Esta presión es igual a la altura del líquido sobre la conexión o toma multiplicada por la gravedad específica del líquido y es independiente del volumen o forma del recipiente.

- Aplicación para Tanques Abiertos:

En tanques abiertos, un transmisor de presión instalado cerca del fondo del tanque medirá la presión correspondiente a la altura del líquido sobre él. La conexión se hace en el lado de alta presión del transmisor. El lado de baja presión del transmisor se ventea a la atmósfera. Si el transmisor está por debajo del valor inferior del rango del nivel deseado; entonces debe hacerse una supresión de cero.

- Aplicación para Tanques Cerrados:

En tanques cerrados, la presión encima del líquido afecta la presión medida en el fondo. La presión en el fondo del tanque es igual a la altura del líquido multiplicada por su gravedad específica, más la presión en el tanque. Para medir el nivel real, la presión del tanque debe restársele a la medición. Esto se hace colocando una toma de presión en el tope del tanque y conectándola al lado de baja presión del transmisor. De este modo, la presión del tanque se aplica igualmente en los lados de alta y baja presión del transmisor. La presión diferencial resultante es proporcional a la altura del líquido multiplicada por la gravedad específica.

Cuando el gas que está sobre el líquido en el recipiente, puede condensar a la temperatura y presión de operación, en la tubería de la toma de baja presión el transmisor se llenará lentamente de líquido, produciendo un error en la medición. Para eliminar este error potencial, la tubería se llena con un fluido de referencia. El fluido de referencia producirá una presión sobre el lado de baja presión del transmisor, haciendo necesario realizar una elevación de cero.

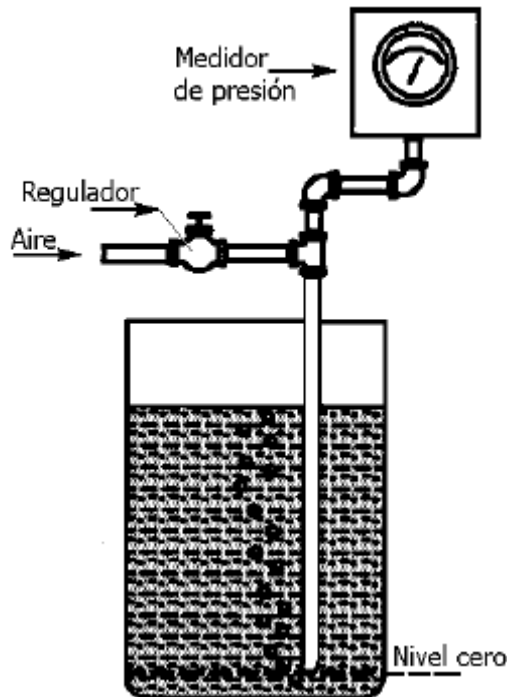


Figura 5.10. Método de burbujeo para medición de nivel

b. Otros métodos hidrostáticos

El Método de Burbujeo utiliza la variación de presión hidrostática causada por la columna de líquido.

Dentro del recipiente cuyo nivel se quiere medir, se instala una tubería vertical. El extremo abierto de la tubería se hace coincidir con el punto de "nivel cero", tal como se muestra en la figura 5.10.

El otro extremo de la tubería se conecta a una fuente de aire regulada y a un medidor de presión.

Cuando se va a realizar una medición de nivel, el aire de alimentación se ajusta de modo que la presión sea ligeramente superior que la presión ejercida por la columna de líquido. Esto se consigue regulando la presión del aire hasta que se observan burbujas saliendo del extremo de la tubería colocado dentro del recipiente. La presión indicada por el medidor está relacionada con el nivel a través de la ecuación 5.3. El método de burbujeo es útil en aquellas aplicaciones donde los líquidos son corrosivos o tienen sólidos suspendidos. Provee indicación local, es fácil de instalar y económico. Debe ser utilizado en aplicaciones de líquidos de gravedad específica constante y donde no se requiera una gran exactitud.

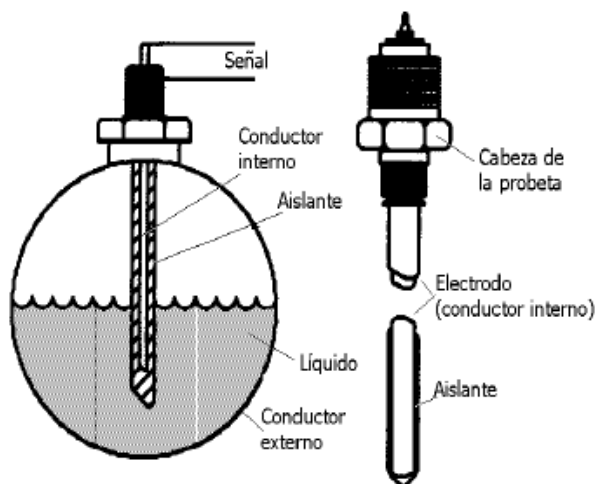


Figura 5.11. Componentes de un sensor capacitivo

5.7 Métodos electrónicos para medir nivel

Las técnicas electrónicas para medición de nivel están basadas en los principios de capacitancia, conductividad y resistencia.

Estos principios pueden ser aplicados para medir nivel de líquidos o sólidos. La selección del principio de medición depende del medio a ser medido, de las condiciones de operación, de la configuración del recipiente y del tipo de funcionamiento requerido (control, alarma, indicación).

a. Sensores de nivel de tipo capacitivo

La base de este método de medición radica en las características físicas de un condensador. La capacitancia de un condensador depende de la separación entre los electrodos o placas "d"; de su superficie "A" y de la constante dieléctrica del material entre las placas "E".
ec. (5.4)

$$C = \frac{A E}{d}$$

Un sensor de nivel tipo capacitivo sirve para medir el nivel de la mayoría de los líquidos y sólidos. El sensor está constituido por un electrodo o probeta de capacitancia que se introduce en el tanque.

El cambio en la capacitancia, producido por un aumento o disminución del nivel en el recipiente, se mide utilizando la probeta de capacitancia, la cual está conectada a un circuito electrónico, que puede ser un interruptor de nivel para control **ON-OFF**, o un transmisor de nivel para medición de nivel continuo. Si el líquido es no conductor, el capacitor está formado por la probeta de capacitancia (electrodo primario) y la pared del tanque, los cuales conforman las placas del capacitor.

El líquido cuyo nivel se quiere medir actúa como el dieléctrico. A medida que el líquido sube entre el espacio de las dos placas, se produce una variación en la capacitancia la cual se monitorea y se utiliza para dar una señal proporcional al nivel. En esta aplicación de líquidos no conductores la probeta de capacitancia debe estar aislada eléctricamente del tanque.

Si el líquido es conductor, la probeta de capacitancia o electrodo primario se aísla eléctricamente del tanque y del líquido, generalmente se utiliza una cubierta de teflón sobre el electrodo. En este caso, el líquido actúa como la segunda placa del capacitor y el aislante sobre el electrodo primario actúa como el dieléctrico.

Los problemas más comunes que se presentan con este tipo de medidores son: instalación incorrecta, encostramiento de la probeta, pérdida del aislante y falsa señal causada por espuma.

La figura 5.11 muestra los componentes y algunas aplicaciones de los sensores de nivel capacitivo.

Ventajas y desventajas: las ventajas y desventajas más importantes en la aplicación de sensores de nivel Capacitivos son:

-Ventajas:

- ✓ Requieren mínimo mantenimiento.
- ✓ Pueden ser utilizados para medición continua o puntual.
- ✓ Valor deseado o Set Point ajustable.
- ✓ Compatible con gran cantidad de líquidos, polvos, sólidos, lodos; materiales conductivos y no conductivos.
- ✓ Resistente a la corrosión con la probeta adecuada.
- ✓ Se ajustan a cualquier tipo de recipiente.

- Desventajas:

- ✓ Cambios en la constante dieléctrica del material, causan errores en la señal.
- ✓ Normalmente requieren calibración en campo.
- ✓ Depósito de materiales altamente conductores sobre la probeta, pueden afectar la exactitud y la repetibilidad.

b. Sensores de nivel de tipo conductivo

Los sensores de nivel de tipo conductivo pueden ser utilizados para dar señales de alarma por alto y bajo nivel. Su aplicación está limitada a líquidos altamente conductores tales como materiales a base de agua.

La figura 5.12 ilustra la aplicación de un sensor de nivel de tipo conductivo. El sistema consiste en instalar electrodos en el tanque en los puntos de detección de nivel, pero aislados eléctricamente del tanque y alimentados con una fuente de bajo voltaje. Cuando el líquido en el

recipiente se pone en contacto con el electrodo, fluye una corriente de bajo voltaje entre éste y la pared del tanque.

La resistencia eléctrica se mide utilizando un puente de Wheatstone. La resistencia es alta (> 1 M ohm) cuando el tanque está vacío, pero tan pronto como el líquido conductor toca la probeta, la resistencia disminuye. Este cambio en la resistencia se amplifica y se utiliza para operar un relé.

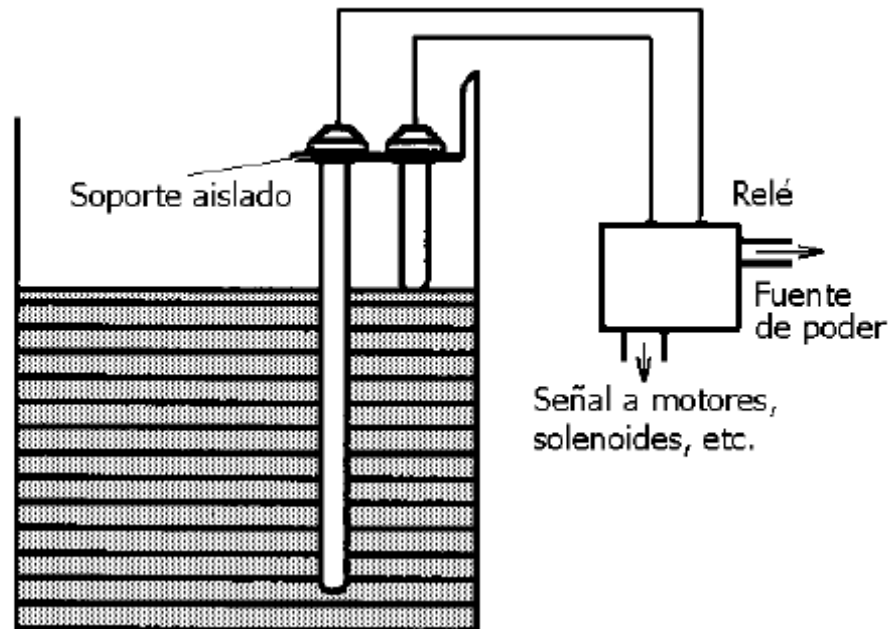


Figura 5.12. Sensor de nivel de tipo conductivo

Los sensores de nivel de tipo conductivo también pueden aplicarse para medir el nivel de interfase entre dos líquidos, uno de los cuales debe ser conductor. Ejemplo: Interfase aceite - agua.

5.8 Métodos térmicos para medir nivel

Los sensores que utilizan este método están basados en la diferencia entre las características térmicas de los fluidos. Se utilizan como detectores de nivel límite de líquidos y sólidos.

Generalmente consisten en un termistor calentado eléctricamente, instalado en el tanque. La temperatura del termistor y consecuentemente su resistencia eléctrica, incrementa a medida que la conductividad térmica del fluido, en el cual está sumergido, disminuye. Pueden ser utilizados para detectar interfases líquido-vapor, debido a que la conductividad térmica de los líquidos es mucho mayor que la de los vapores y están sujetos al encostramiento.

5.9 Sensores de nivel de tipo ultrasónico

La figura 5.13 muestra el principio de operación de un sensor de nivel de tipo ultrasónico no intrusivo para aplicaciones de nivel continuo. En estos sensores, se mide el tiempo empleado por el sonido en su trayecto desde un emisor hasta un receptor. El instrumento tiene un emisor que proporciona breves impulsos sónicos. Estos impulsos son reflejados por la superficie del material en el recipiente y llegan de nuevo al emisor, que actúa ahora como receptor. El tiempo transcurrido es una medida de la distancia entre el material y el emisor-receptor. Un convertidor electrónico proporciona la medida del nivel. El instrumento puede incluir un sensor de temperatura para compensar los cambios en la temperatura del aire.

Para aplicaciones de nivel puntual (control **on-off**, alarma), se utilizan interruptores de tipo intrusivo, el principio de operación de estos interruptores es transmitir una onda ultrasónica desde un cristal piezoeléctrico a través de un espacio (gap), de aproximadamente $\frac{1}{2}$ " hasta un cristal receptor. Cuando este espacio del sensor se llena con el líquido, la señal se transmite. Cuando el espacio está lleno de aire o de un vapor, la señal no se transmite. Cuando la señal transmitida se recibe, el circuito se completa y el amplificador entra en oscilación.

Para aplicaciones de alto nivel se utiliza un sensor especial que oscila mientras está seco. Este sensor utiliza la misma técnica de dos cristales, pero la diferencia consiste en que cuando el

líquido comienza a cubrir el sensor, la energía ultrasónica es absorbida por el líquido y la oscilación del sensor cesa.

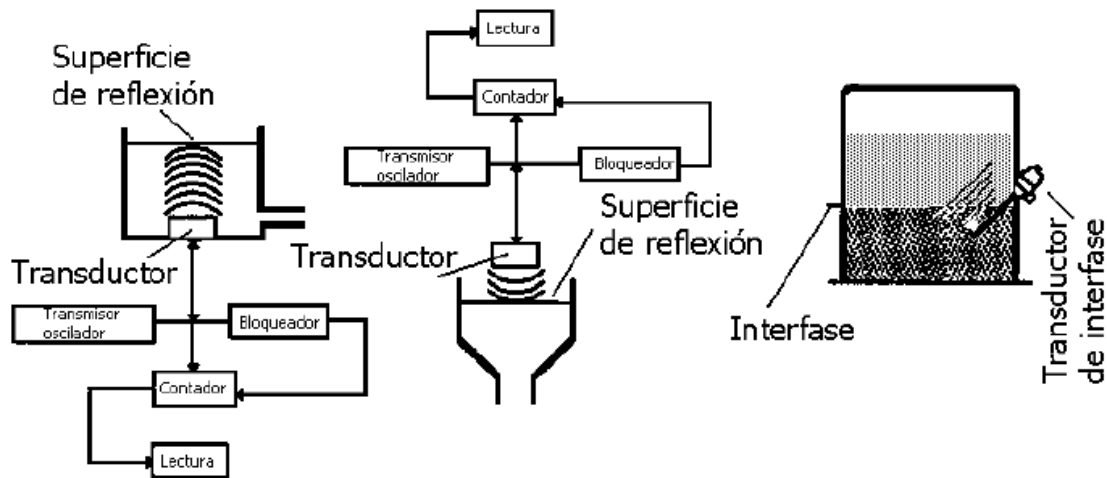


Figura 5.13. Principio de operación de un sensor de nivel ultrasónico

Ventajas y desventajas: algunas de las ventajas y desventajas en la aplicación de sensores ultrasónicos son los siguientes:

- Ventajas:

- ✓ Disponibilidad de sensores no intrusivos para evitar problemas de corrosión y contaminación.
- ✓ Medición continua y puntual.
- ✓ No posee partes móviles. Menor mantenimiento.
- ✓ Se utiliza para líquidos y sólidos, conductivos y no conductivos.

- Desventajas:

- ✓ La medición puede ser afectada por el movimiento del material en el tanque.
- ✓ La espuma del líquido puede absorber la señal transmitida.
- ✓ La presencia de partículas o vapor en el aire puede interferir la señal de los sensores de tipo no intrusivo.

5.10 Sensores de nivel de tipo fotoeléctrico

La detección del nivel está basada en el cambio de refracción que ocurre cuando el extremo cónico de un conductor lumínico de cuarzo es sumergido en el líquido. La luz infrarroja desde un diodo emisor de luz (L) pasa a través de un conductor de luz (Q) y es reflejada por su extremo cónico si está rodeado de aire, gas, o vapor. La luz reflejada es detectada por un fototransistor (P).

Cuando el conductor de luz es sumergido en el líquido, la refracción en el extremo cambia y la luz es dispersada en el líquido. De esta forma, el fotorreceptor P, no recibe luz produciéndose un cambio en la resistencia del circuito, la cual es utilizada para dar una señal del nivel.

Estos sensores son capaces de operar en casi todos los líquidos. La medición no es afectada por cambios en la viscosidad, densidad, conductividad o color. Se utilizan en tanques de almacenamiento a baja presión, tanques de buques con petróleo, químicos, gases licuados, tanques de combustible, etc.

5.11 Sensores de nivel de tipo radioactivo

En este tipo de sensores, una fuente radioactiva emite un haz de rayos (gamma, alfa, etc.) que viaja a través del tanque y de su contenido, hasta un detector ubicado en el lado opuesto. En el detector existe un contador Geiger que produce un impulso eléctrico en respuesta a cada fotón que llega al detector. Estos pulsos son integrados y transformados en una señal de corriente directa proporcional a la radiación recibida en el contador. Si el nivel del material en el envase está por debajo del haz de rayos, la radiación recibida en el contador es mayor que cuando el material está en la trayectoria del rayo.

Los sensores de nivel de tipo radioactivo pueden ser utilizados para medir niveles límites o nivel continuo. Pueden ser utilizados para detectar el nivel de casi cualquier líquido, sólido o material viscoso almacenado en un recipiente. Todos los elementos del sensor son externos al recipiente; de modo que la presión, el vacío, la temperatura, o materiales altamente viscosos, corrosivos, abrasivos o muy pesados; no afectan al sistema de medición.

El material radioactivo del sensor está contenido en una doble cápsula de acero inoxidable soldada, de modo que en ningún caso hay peligro de que pueda escapar dicho material. Debido a que el material radioactivo irradia en todas las direcciones, se le coloca en el interior de un cabezal protector que permite la salida de radiación por un solo lado, precisamente sólo en la dirección donde está situado el detector.

5.12 Sensores de nivel de tipo microondas (radar)

Un sensor de nivel de tipo microondas es un sensor no intrusivo. El sistema de medición está formado principalmente por un módulo electrónico de microondas, una antena, sensores adicionales (principalmente sensores de temperatura), y una unidad local o remota de indicación. El principio de operación está basado en el cambio de frecuencia de la señal de radar emitida hacia la superficie del líquido. La señal reflectada por la superficie del líquido en el recipiente tiene una frecuencia diferente a la de la señal transmitida. Esta diferencia de frecuencia es proporcional a la distancia que existe entre el transmisor y la superficie del líquido.

La señal de microondas es emitida por una antena la cual direcciona la señal perpendicularmente hacia la superficie del líquido. Existen dos tipos principales de antena: la antena parabólica y la antena tipo corneta.

Algunas aplicaciones incluyen: medición de nivel de productos de hidrocarburos / petróleo, asfalto, químicos, gas natural licuado (GNL), también se puede medir el nivel de sólidos. Una aplicación muy común es la medición de nivel en tanques de techo fijo y tanques de techo flotante, en la industria petrolera y petroquímica.

Capítulo. VI Prácticas Propuestas

Introducción

Teniendo en cuenta la teoría de instrumentación y control de procesos analizados en los anteriores capítulos, se proseguirá a describir el funcionamiento del simulador, identificar cada uno de los equipos que lo componen así como los instrumentos con ayuda de fotografías y del DTI del equipo, para después redactar las prácticas que proponemos.

Esta Unidad de Control de entrenamiento esta desarrollada para la capacitación, en el área de instrumentación y control, de alumnos de Ingeniería Química, y para profesionistas interesados en el área como mecánicos instrumentistas, operadores de procesos de refinación y ex alumnos, esta ubicada en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario de Ingeniería Química y sirve para simular procesos de control típicos de cualquier planta química. El simulador permite estudiar las maneras de controlar las variables encontradas en cualquier planta química, la medición y control: del flujo, la presión, el nivel y la temperatura. Incluye ejemplos de modos de control:

- Proporcional.
- Proporcional mas integral (reajuste).
- proporcional mas integral mas derivativo.
- También pueden funcionar como un simple controlador (Encendido/Apagado) on/off.

La Unidad de Control brinda muchas facilidades para el entrenamiento y la educación para comprender muchos aspectos de ingeniería de control en un proceso. El operador en entrenamiento puede estudiar métodos de operación de un transmisor, un registrador, un controlador y válvulas de control que son utilizadas en las industrias. Puede observar la operación de circuitos de control de varias clases, incluyendo las operaciones de controladores en cascada. Adquiere la experiencia de poder resolver defectos y fallas que pueden aparecer en las operaciones de una planta de proceso.

La Unidad de Control ofrece al ingeniero de mantenimiento en entrenamiento o al mecánico de instrumentos la oportunidad de adquirir la confianza de instalar, calibrar y ajustar los instrumentos de una planta de proceso.

Finalmente, para el ingeniero profesional y el diseñador, la planta ofrece la posibilidad de estudiar el rendimiento de un sistema complicado que involucra las interacciones entre los circuitos de control, circuitos de control en cascada y el efecto de la distancia / velocidad de los lapsos de transferencia.

6.1 Descripción general del funcionamiento del simulador (Unidad de Control).

La Unidad de Control, consta de 2 unidades principales: La Planta (Unidad de Control) (figura 6.1) y el Tablero de Control (figura 6.2).

La planta cuenta con el siguiente equipo e instrumentos:

- ✓ Tres tanques, se especifican sus medidas en la siguiente tabla:

Tabla 6.1

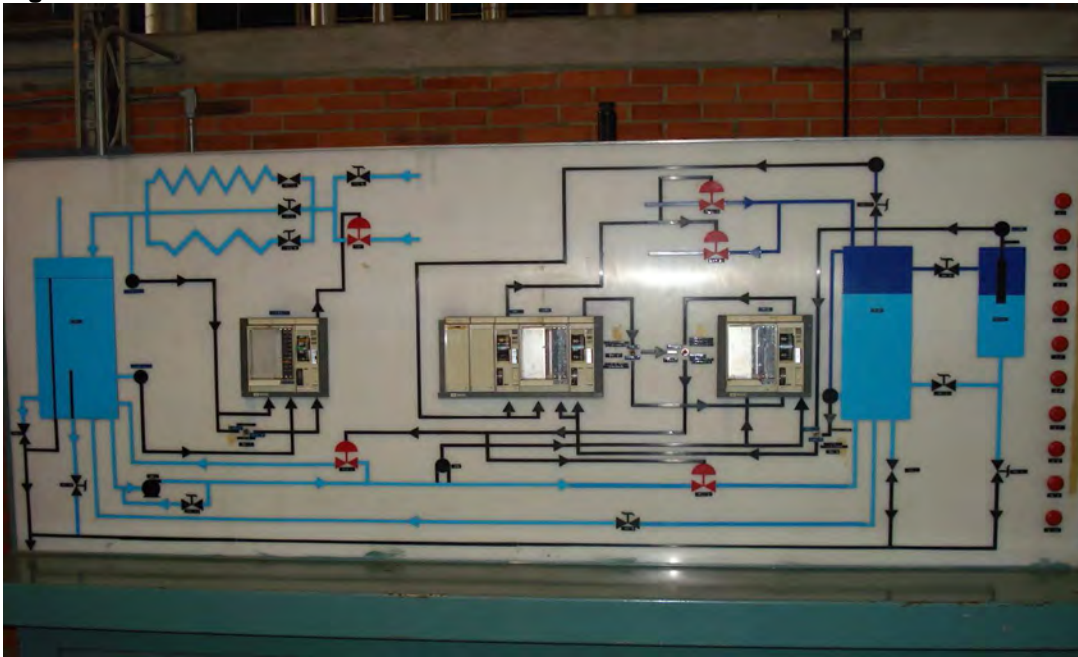
Tanque(identificación)	Longitud(m)	Diámetro(cm)
C1	1.60	30
C2	1.60	15
C3	1.15	10

*C3 Es parte del desplazador.

Figura 6.1. Simulador. (Unidad de Control).



Figura 6.2 Tablero de control.



- ✓ 1 Bomba.
 - ✓ 13 Válvulas manuales.
- Codificación: (HV).

- ✓ 5 Válvulas de Control.
- 2 para flujo (FCV1 y FCV2).
- 2 Para Presión (PCV1 y PCV2).
- 1 Para Temperatura (TCV).



Figura 6.3 Válvula de control.

- ✓ 5 Transmisores:

-2 de Temperatura, TT1 y TT2, ambos termopares.



Figura 6.4 Termopar 1 (TT1).

-1 de flujo, FT, Placa de orificio $d=0.44''$.



Figura 6.5. FT(al frente se observa la Placa de orificio, atrás se observa el transmisor)

-2 de Nivel, LT1 que es una celda de presión diferencial y LT2 tipo desplazador.



Figura 6.6. LT2 (C3 y el transmisor).

-1 de presión, PT.



Figura 6.7 PT.

- ✓ 1 Intercambiador de calor de doble tubo.



Figura 6.8 Intercambiador de calor de la Unidad de Control.

- ✓ 3 Indicadores de tipo local.
2 de nivel LT1 Y LI2 (Vidrios de nivel en C1 y C2).
1 de Presión PI, (Manómetro, escala de 0 a 7 Kg/cm²)

La nomenclatura anterior se puede observar en la figura 6.9 que es el DTI del equipo.

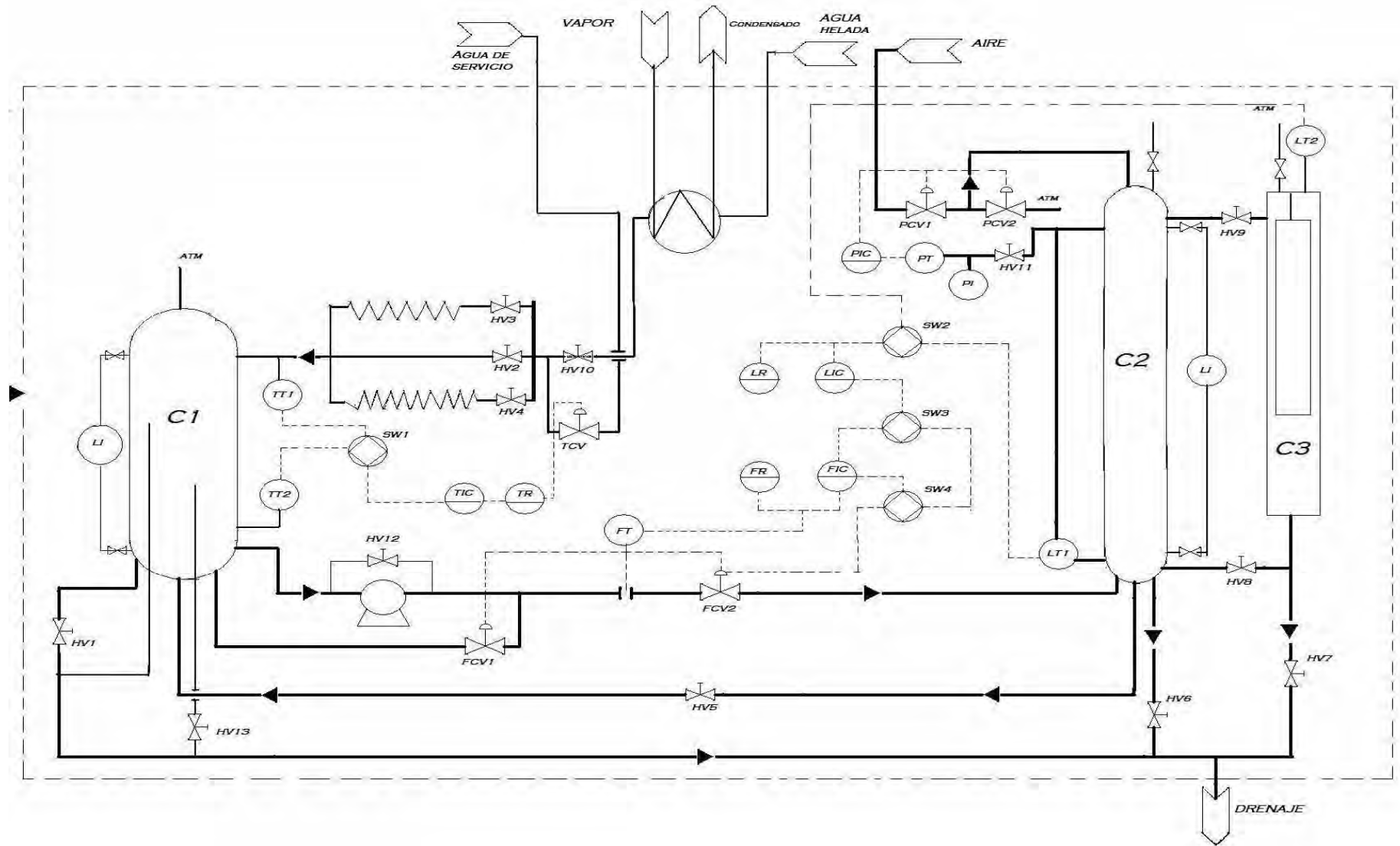


Figura 6.9 Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) del simulador.

El Tablero de control cuenta con los siguientes instrumentos:

✓ Controladores, indicadores.

LIC Indicador Controlador de Nivel.
FIC Indicador Controlador de Flujo.
TIC Indicador Controlador de Temperatura.
PIC Indicador Controlador de Presión.

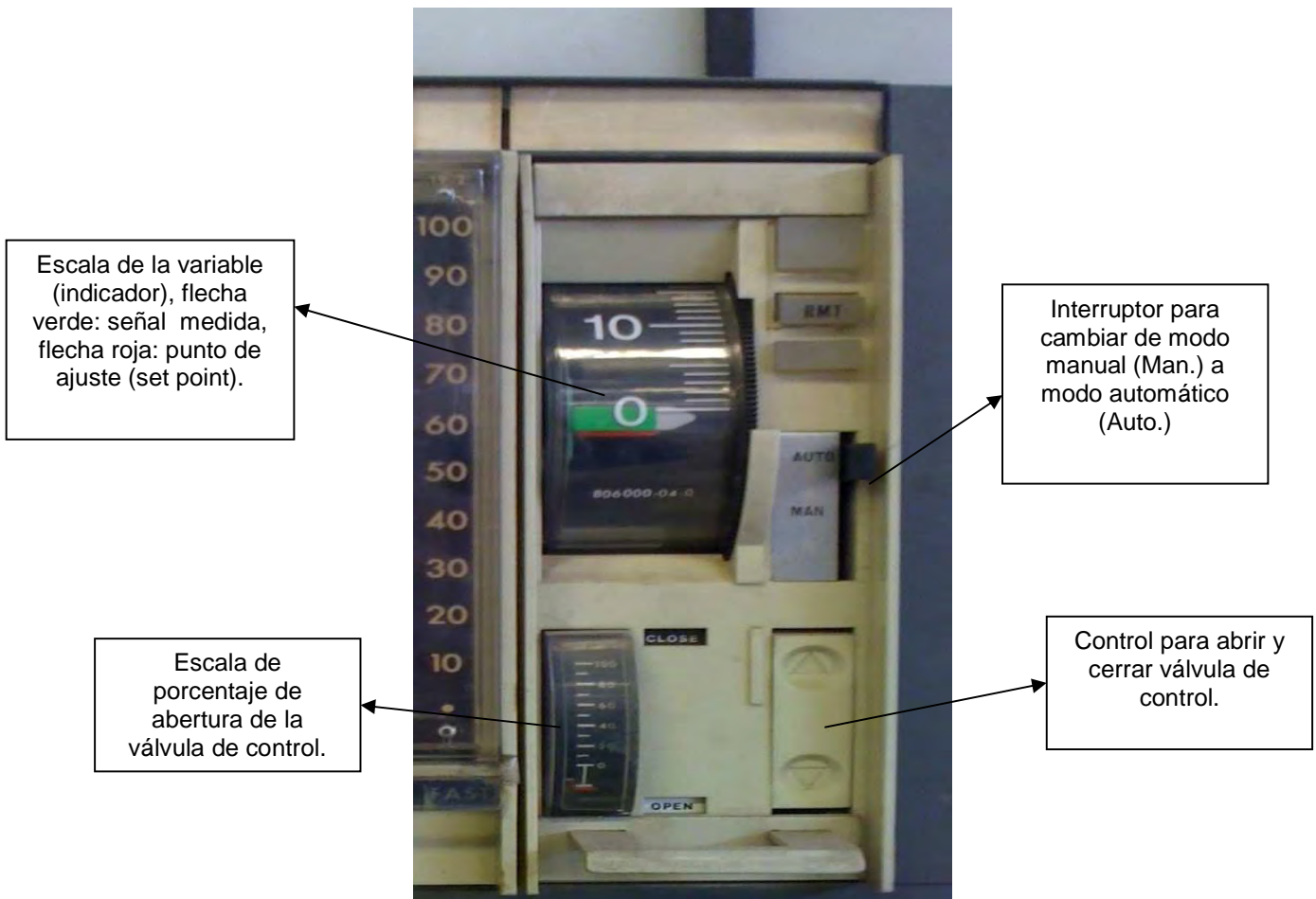


Figura 6.10 Indicador, Controlador.

✓ Registradores:

LR Registrador de Nivel.
TR Registrador de Temperatura.
FR Registrador de Flujo.



Figura 6.11 Registrador (puntero rojo: punto de ajuste, puntero azul: Señal medida).

- ✓ 4 Interruptores, SW Cuya función es la siguiente:

SW1.

Posición 1- señal de TT1 a TIC.

Posición 2- señal de TT2 a TIC.

SW2.

Posición 1- señal de LT1 a LIC.

Posición 2- señal de LT2 a LIC.

SW3.

Posición 1- Operación con Flujo en Cascada.

Posición 2- Señal de LIC a FCV 1 Y FCV2.

SW4.

Posición 1- Operación con Flujo en Cascada.

Posición 2- Señal de FIC a FCV 1 Y FCV2.

- ✓ 8 botones para simular fallas (su funcionamiento se explicara más adelante).

Una vez identificada la nomenclatura anterior se describe brevemente el Proceso:

a. Circuito de Control de Flujo.

El fluido de trabajo es el agua con temperaturas de hasta aproximadamente 60° C, el tanque C2 puede ser presurizado con aire hasta presiones cerca de los 400kN / m².

Una bomba centrífuga manda el agua de C1 a C2. La cantidad de entrega para C2 es regulada por las válvulas de control, FCV1 y FCV2. FCV2 regula la entrega a C2 y FCV1 regula un bypass que devuelve el agua a C1. Las dos válvulas controlan la carga de la bomba para que se quede constante.

El agua regresa del tanque C2 al C1, regulado por la válvula de operación manual HV 5.

El tanque C2 puede ser presurizado mientras C1 y C3 están abiertos a la atmósfera. C3 que es de vidrio, puede ser conectado con C2 por válvulas manuales HV8 y HV9; el nivel en los dos recipientes es igual.

El nivel de agua en C1 puede ser mantenido constante mediante tubos internos, uno colocado a tres cuartos de su capacidad y el otro a un tercio además de contar con una salida al drenaje controlada por HV1.

C1 es proporcionado con agua vía un circuito de mezclado. La provisión de agua caliente es regulada por HV10, mientras la circulación de agua fría es controlada por TCV (válvula de control de temperatura). El agua fría y el agua caliente son mezcladas y entran a C1 por tres diferentes tuberías, controladas por una válvula manual cada una de ellas HV2, HV3 y HV4), estas tuberías difieren en forma y diámetro (1 tubería recta y dos serpentines). Esto permite la introducción del agua al sistema en diferentes lapsos de distancia / velocidad.

Cuando las válvulas HV8 y HV9 están cerradas, por lo tanto, aislando C3 del circuito de flujo, C2 puede ser presurizado con aire comprimido vía PCV1.

Finalmente, el sistema puede ser drenado abriendo HV1, HV6 y HV7

El flujo de agua que manda la bomba de C1 a C2 es medido por una placa de orificio conectada a un transmisor de flujo (FT). La señal de este transmisor es llevada al FIC utilizada en diferentes caminos, según la posición del interruptor 3 y 4, y así controlar por medio de FCV1 y FCV2. El flujo de entrega para C2 es determinado por el punto de ajuste (set point) sobre FICA y es independiente del nivel en C2.

b. Circuito de Control de Nivel.

La función de la instrumentación relacionada con el circuito de control de nivel es la regulación de los niveles de agua en C2 y C3. Esto es conseguido por la regulación del agua de entrada a los tanques, condicionado por el ajuste de FCV1 y FCV2.

El nivel de agua en los tanques es monitoreado por dos métodos diferentes, que son los más usuales para la indicación de nivel. Un LT1 (conectado a una celda de presión diferencial), detecta la diferencia en la presión entre el aire en la parte superior de C2 y el agua en un punto cerca de la parte inferior. El transmisor funciona con una pierna seca: es necesario para la operación correcta del transmisor que no debe haber agua en el tubo que conecta el transmisor con la parte superior del tanque. Será evidente que la señal generada por el transmisor depende solamente sobre el nivel de agua en C2 y es independiente del nivel general de la presión en el tanque.

Como una alternativa, el nivel de agua puede ser medido por un transmisor de tipo desplazador (LT2) ubicado en C3. Este transmisor consta de una masa cilíndrica larga, de densidad más grande que la del agua, colgada por una barra de fuerza.

El peso aparente del cilindro depende del nivel de agua en el tanque y puede ser convertido en una señal apropiada para demostrar este nivel.

C3 esta construido de vidrio y está abierto a la atmósfera; LT2 puede ser usado solamente cuando C2 está también abierto a la atmósfera.

La señal de cualquier transmisor de nivel LT1 o LT2 pueden ser llevado al LICA, la elección depende de la posición del SW2. La señal de salida de LICA es llevada a las válvulas FCV 1 y FCV 2.

c. Control de Presión.

Es un sistema simple para regular la presión del recipiente C2, las válvulas están en un rango de presión atmosférica y 400 KN/m^2 . (35 lb/in^2)

Recordando que cuando las válvulas HV8 y HV9 están cerradas, C2 puede ser presurizado con aire comprimido vía PCV1.

La presión en el tanque C2 es detectada por PT y transmite la señal al PIC.

El PIC manda la señal a las válvulas PCV1 y PCV2, la primera suministra el aire y es regulado con ayuda de PCV2 que tiene salida a la atmósfera y también nos permite regresar el agua de C2 a C1

d. Control de Temperatura.

El objetivo del sistema es controlar cualquier temperatura deseada del agua en el recipiente C1. El controlador de temperatura ofrece muchos y variados ejemplos de control de temperatura, incluyendo los efectos de distancia y velocidad. La velocidad del flujo de agua caliente esta controlada por la válvula HV10. El flujo de agua fría es regulado por la válvula TCV. Los controladores reciben la señal de cualquiera de los dos transmisores de temperatura TT1 y TT2, dependiendo la posición de SW1. TT1 esta localizado en la tubería en la que se mezcla agua fría y caliente, antes de entrar al recipiente C1, mientras TT2 es localizado al final del recipiente C1.

e. Simulador de Fallas.

Es necesario experimentar lo que pasaría en caso de alguna falla de cualquier suministro, ya sea aire o electricidad, para estar preparado en caso de que este problema se presentara al operador en algún proceso productivo.

Para simular fallas, se interrumpe la señal eléctrica del transmisor o convertidor a el controlador con ayuda de interruptores (push buttons) colocados en el lado derecho del tablero y que tienen la nomenclatura Bx ($x = 1, 2, 3, \dots, 8$)

PB1.

Interrumpe la señal de salida de TT2 a TIC.

PB2.

Interrumpe la señal de TT1 a TIC. Por lo que en el indicador de T se mostrara una temperatura mas baja que la real y cada vez mayor en C1.

PB3.

Interrumpe la señal de salida del TIC a la válvula control de temperatura TCV.

PB4.

Se interrumpe la señal de salida del FICA. Se observara un aumento en el nivel de los recipientes C2 /C3 mientras el FI muestra un valor mínimo.

PB5.

Interrumpe la señal de salida de FICA o LICA a las válvulas de control de flujo FCV1 y FCV2. La consecuencia es que FCV2 es cerrada completamente, FCV1 se abre completamente y la entrega del agua a los recipientes C2 y C3 cesa. El efecto es similar al de la falta de bomba.

PB6.

Interrumpe la señal de salida de LICA. Si las válvulas de control de flujo están bajo control de LICA el efecto es que FCV2 se cierra, FCV1 se abre y la entrega del agua a los recipientes C2 y C3 cesa.

PB7/PB8.

Interrumpe la señal de salida de los transmisores de nivel LT1/LT2 que indican incorrectamente que el nivel del agua en los recipientes C2/C3 ha caído a un mínimo. Al mismo tiempo el controlador indicador de nivel LICA entrega máxima a los recipientes. Se observara una caída evidente en el nivel del agua acompañado por entrega máxima. Los síntomas son lo contrario a los exhibidos cuando se presiona PB4, puesto que ahora observamos una caída evidente en el nivel acompañado por entrega máxima a los recipientes en comparación con una subida del nivel acompañado por una entrega cero.

PB9.

Interrumpe la señal de salida de las válvulas de control de presión PCV1 y PCV2 da como resultado la caída de presión en C2

PB 10.

Esto da lugar a la interrupción de la señal del transmisor de presión PT al controlador indicador de presión PIC. La presión de aire en el recipiente C2 baja, al parecer, a cero mientras que el PIC se esfuerza para aumentar la presión al grado posible máximo.

f. Operación de Controladores de Nivel y Flujo en cascada.

Es posible mejorar frecuentemente la calidad del control de un proceso operando dos controladores en cascada: un controlador maestro, en lugar de regular el proceso directamente, determina el punto de referencia del controlador filial que hace el ajuste necesario al sistema. Este arreglo, que es de gran importancia práctica, puede ser estudiado operando el LICA en cascada con el FICA. El LICA, en lugar de controlar directamente la posición de las válvulas FCV1 y FCV2, determina el flujo que requiere FICA que regula la posición de las válvulas de control de flujo.

g. Uso de Registradores.

Al estar controlando una variable de proceso es necesario tener un registro del comportamiento de esta para fines muy prácticos, por lo cual el uso de registradores es vital en cualquier proceso.

La mayoría de los registradores funcionan a velocidades de 10 mm/hora y a velocidades más altas, 20 mm/minuto.

El índice de respuesta de la planta de entrenamiento es mucho más alto que el de una instalación comercial típica, los registradores deben funcionar generalmente en la velocidad para los propósitos de la demostración. Se cuenta con los siguientes registradores:

-Registrador de Flujo.

Flujo ala entrada del agua al recipiente C2 según lo indicado por el transmisor de flujo FT.

-Registrador de Nivel.

Nivel del agua en el recipiente C2 según lo indicado por transmisor de nivel LT1 1 o el nivel de agua del recipiente C3 según lo indicado por el transmisor de nivel LT2.

-Registrador de Presión.

Presión en el recipiente C2 según lo transmitido por el transmisor de presión PT.

-Registrador de Temperatura.

Temperatura del agua en el recipiente C1 según lo transmitido por TT1 o TT2.

Es importante señalar que los registradores no cuentan con tinta en los punteros y algunos presentan fallas, debido a las nuevas tecnologías es difícil encontrar piezas para reparar dichos instrumentos pero algunos funcionan correctamente como el de nivel.

h. Modos de control

Los controladores de esta unidad cuentan con modos de control típicos para cada variable como se muestra a continuación:

Controlador Registrador de Nivel: proporcional solamente.

Controlador Registrador de Presión: proporcional/reajuste.

Controlador Registrador del Flujo: proporcional/reajuste.

Controlador Registrador de Temperatura: proporcional/derivativo/reajuste.

También se puede cambiar de modo manual a automático, el interruptor para lograr esto se encuentra a un lado de la escala del controlador que esta ubicado en el tablero de control (ver figura 6.10), también cuenta con un puntero de color rojo, para establecer un punto de ajuste (set point) en la variable a controlar.

El ajuste de un controlador es un proceso complejo y requiere un conocimiento a fondo del tema por lo que se describirá brevemente como ajustar de un controlador: (para lograr esto se requiere sacar el controlador del tablero y en su parte lateral se encuentran los interruptores, figura 6.12)



Figura 6.12 parte lateral del controlador.

- Fijar el tiempo derivativo al mínimo, así reduciendo al mínimo el efecto de la acción de derivativo en el funcionamiento del controlador.

- Fijar el tiempo de reajuste al máximo, así reduciendo al mínimo la influencia de la función de reajuste en el funcionamiento del controlador.

-El instrumento ahora funcionará con eficacia como un controlador proporcional simple. Comenzando un ajuste ancho de la banda proporcional, se observará la respuesta del controlador a un cambio en el punto de ajuste, usando el registrador que funciona en la velocidad máxima.

-Reducir progresivamente la anchura de la banda proporcional hasta que la señal de entrada comience a mostrar oscilación.

-Aumentar el tiempo derivativo poco a poco hasta que desaparece al completar un ciclo. No es muy útil aumentar el tiempo derivativo a un valor mayor que el valor cercano a un período de oscilación del sistema ya que se aumenta la inestabilidad.

-Si aun esta presente la oscilación, aumentar la anchura de la banda proporcional poco a poco.

-Ahora reducir el tiempo de reajuste. El ajuste no es crítico y comúnmente será encontrado satisfactorio ajustar esto para aproximadamente igualar el período de la oscilación. Esto asegurará la eliminación de "compensación".

6.2 Practicas

a. Practica de Nivel:

Objetivos:

-Por medio de la práctica el alumno conocerá la importancia del control de nivel en los procesos y los diferentes instrumentos con los que se puede medir y controlar.

Problema experimental.

-Operar correctamente el circuito de nivel en la Unidad de control, comparando tres métodos de medición de nivel (vidrio de nivel, celda de presión diferencial, desplazador).

Material y servicios.

Flexo metro.

Cronometro.

Aire.

Agua.

Conocimientos previos:

-Investigar los diferentes tipos de instrumentos de medición nivel.

Indicaciones experimentales:

Procedimiento de arranque

-Verificar haya servicios auxiliares

- Cerrar válvulas HV3, HV4, HV6, HV7, HV11.

-Abrir válvulas HV1, HV2, HV8, HV9. Las válvulas de drenaje deben estar cerradas.

-Abrir la válvula HV10 utilizando la tubería recta y llenar de agua la mitad del recipiente C1 Y después cerrar la válvula HV10.

-Drenar la celda de presión diferencial.

Para el aire:

-Abrir la válvula del suministro de aire.

-Regular la presión del aire suministrado a las válvulas de control.

Los rangos de presión especificados son los siguientes:

Válvulas de control: aire abierto: 200-240 KN/m². (29 a 35 lb/in²).

Válvulas de control: aire cerrado: 170-200 KN/m². (25 a 29 lb/in²).

Controles y transmisores: 140-150 KN/m². (20-22 lb/in²).

Energía eléctrica:

Prender la fuente de alimentación.

Operación del Circuito de Nivel:

Tener en cuenta la posición de los siguientes interruptores:

Cualquier posición SW1.

Cualquier posición SW2.

Posición 1 SW3.

Posición 2 SW4.

El controlador de nivel LIC debe estar en manual.

1.-Posicionar las válvulas FCV1 y FCV2 a cierto porcentaje (por ejemplo 50 % de su escala).

2.-Prender la bomba y llenar a la mitad el tanque C2 con ayuda del vidrio de nivel.

-Se recomienda hacer una escala en el vidrio de nivel con ayuda del flexometro

3.-Cuando esto suceda apagar la bomba

-Se recomienda cerrar FCV2 para que el agua no se regrese de C2 a C1

- 4.-Como la posición del SW2 es la 1, el indicador de nivel en el tablero mostrara el nivel registrado por la celda de presión diferencial
 - El puntero tiene que estar al porcentaje escogido por el alumno de la escala total, en caso de que no sea así se deberá calibrar la celda moviendo los tornillos que se encuentran en la parte posterior de esta hasta que el puntero del indicador muestre el porcentaje requerido.
- 5.-Cambiar la posición del SW2 a la 2. El indicador de nivel en el tablero mostrara el nivel registrado por el desplazador
 - El puntero tiene que estar al mismo porcentaje de la escala total.
- 6.-Abrir FCV2 y prender la bomba hasta llenar C2 a otro porcentaje mas alto.
- 7.-Observar el movimiento del puntero del indicador en el tablero.
- 8.-Comprobar con ayuda del SW2 que el indicador este al mismo porcentaje en cualquier posición de este interruptor.
- 9.-Regrese el agua a C1.

Procedimiento de paro

- Apagar la bomba.
- Drenar los tanques abriendo las válvulas.
- Cortar el suministro de aire.
- Apagar la fuente de alimentación del panel de control por medio del interruptor en la parte posterior.

b. Practica de Temperatura.

Objetivos:

-Por medio de la práctica el alumno conocerá la importancia del control de temperatura en los procesos y los diferentes instrumentos con los que se puede medir y controlar.

Problema experimental

-Operar correctamente el circuito de temperatura teniendo en cuenta los efectos de distancia velocidad que influyen en esta variable.

Material y servicios.

Termómetro.
Cronometro.
Aire.
Agua.
Vapor.

Conocimientos previos:

-Repasar conocimientos de transferencia de calor.
-Investigar los diferentes tipos de instrumentos de medición temperatura.

Indicaciones experimentales:

Procedimiento de arranque.

-Verificar que haya servicios auxiliares.
- Cerrar válvulas HV3, HV2, HV4, HV6, HV11.
-Abrir válvulas HV10. Las válvulas de drenaje deben estar cerradas.
- Válvulas cerradas HV7, HV8 y HV9 aislando el recipiente C3 del circuito.
Para el aire.
-Abrir la válvula del suministro de aire.
-Regular la presión del aire suministrado a las válvulas de control.
Los rangos de presión especificados son los siguientes:

Válvulas de control: aire abierto: 200-240 KN/m². (29 a 35 lb/in²).
Válvulas de control: aire cerrado: 170-200 KN/m². (25 a 29 lb/in²).
Controles y transmisores: 140-150 KN/m². (20-22 lb/in²).
Energía eléctrica.
Encender la fuente de alimentación.

Para el vapor:

-Drenar el intercambiador de calor ubicado en la parte de arriba del simulador.
-Operar el intercambiador de calor.

Operación del Circuito de Temperatura

Tener en cuenta la posición de los siguientes interruptores

-Posición 1 SW1.
-Cualquier posición SW2.
-El controlador de temperatura debe estar en modo manual

- 1.-Verificar la posición de la válvula de control TCV se encuentre abierta.
- 2.-Fijar una temperatura a la que se desee llegar (por ejemplo 50 °C).
- 3.-Suministrar agua fría y agua caliente, llenando una tercera parte o menos del tanque cerrando las válvulas cuando esto suceda.

Suministre agua fría abriendo la válvula HV2 (las válvulas HV3 y HV4 deben estar cerradas). Suministre agua caliente vía TCV.

4.- Observar el indicador de temperatura, el cual, debido a la posición de SW1 indica lo transmitido por TT1 y registrar el valor.

5.- Cambiar la posición del SW1 a la 2. (El indicador muestra lo transmitido por TT2) registrar y comparar lo observado con TT1.

6.- Abrir HV1 y con ayuda del termómetro Tomar la temperatura en la salida al drenaje. Registrar y comparar este valor con lo indicado por TT1 y TT2.

7.- Dependiendo del valor obtenido con el termómetro, suministrar agua fría y agua caliente, y llegar al valor fijado tomando la temperatura con el termómetro en la salida al drenaje.

- Opere TCV con el controlador de temperatura.

- Una vez obtenida la temperatura deseada, cortar el suministro de agua fría y agua caliente.

- Drenar el sistema.

8.- Repetir la secuencia anterior, ahora suministrando agua fría vía HV3 (las válvulas HV2 y HV4 deben estar cerradas)

- Observar los efectos distancia velocidad.

Cambie el controlador de temperatura a automático.

1.- Fijar un valor deseado (set point) en el controlador de Temperatura.

- Abrir la válvula HV2 y cerrar las válvulas de HV3 y HV4. La mínima longitud de tubería de agua fría y agua caliente mezclada y el transmisor de temperatura TT1, proporcionando a una mínima distancia y velocidad. Notar la respuesta del sistema y los cambios del punto de ajuste (set point) de la temperatura sobre el TIC.

Se recomienda cambiar la posición del SW1 observando y comparando los valores transmitidos por TT1 y TT2.

- Repetir lo anterior. Ahora, válvula abierta HV3 y las válvulas HV2 y HV4 deben estar cerradas. Note los efectos de distancia y velocidad.

- Repetir con la válvula abierta HV4 y válvulas HV2 y HV3 deben estar cerradas.

- Notar la respuesta lenta del sistema.

Procedimiento de paro.

- Apagar la bomba.

- Colocar el controlador en manual.

- Drenar los tanques abriendo las válvulas.

- Cortar el suministro de aire.

- Apagar la fuente de alimentación del panel de control por medio del interruptor en la parte posterior.

c. Practica de Presión.

Objetivos:

-Por medio de la práctica el alumno conocerá la importancia del control de presión en los procesos y los diferentes instrumentos con los que se puede medir y controlar.

Problema experimental.

-Operar correctamente el circuito de presión.

Material y servicios.

Aire
Agua

Conocimientos previos:

-Investigar los diferentes tipos de presión y sus unidades.
-Investigar los diferentes tipos de instrumentos de medición presión.

Indicaciones experimentales:

Procedimiento de arranque.

-Verificar haya servicios auxiliares.
- Cerrar válvulas HV3, HV2, HV4, HV6, HV11.
-Abrir válvulas HV10. Las válvulas de drenaje deben estar cerradas.
- Válvulas cerradas HV7, HV8 y HV9 aislando el recipiente C3 del circuito.

Para el aire:

-Abrir la válvula del suministro de aire.
-Regular la presión del aire suministrado a las válvulas de control.
Los rangos de presión especificados son los siguientes:

Válvulas de control: aire abierto: 200-240 KN/m². (29 a 35 lb/in²).
Válvulas de control: aire cerrado: 170-200 KN/m². (25 a 29 lb/in²).
Controles y transmisores: 140-150 KN/m². (20-22 lb/in²).

Energía eléctrica

Encender la fuente de alimentación.
El PIC debe estar en modo manual.

Procedimiento experimental.

- 1.-Llenar el tanque C1 a la tercera parte de su capacidad abriendo HV3.
- 2.-Operar el circuito de flujo y pasar el agua hacia C2.
- 3.-Aislar el tanque C2.
- 4.-Abrir la válvula reguladora de aire.
- 5.-Abrir lentamente HV11.
Observar el indicador de presión local (manómetro) cuidando que no llegue a 2 Kg/cm² de presión.
-Operar las válvulas PCV1 y PCV2 y observar la posición.
Comparar la presión mostrada del indicador local con el indicador montado en el tablero
- 6.-Abrir HV5 y regresar el agua hacia C1 operando PCV1 y PCV2.
- 7.-Cambiar el controlador a modo automático.
-Operar el circuito de flujo ajustando un set point que el alumno crea conveniente de la escala del PIC y controlando el nivel de agua en C2 con ayuda del LIC.
-Observar la respuesta del nivel y el circuito de control de presión a los cambios de nivel sobre LIC y la presión sobre el PIC.

Procedimiento de paro.

- Apagar la bomba.
- Colocar el controlador en manual.
- Drenar los tanques abriendo las válvulas.
- Cortar el suministro de aire.
- Apagar la fuente de alimentación del panel de control por medio del interruptor en la parte posterior.

d. Practica de flujo.

Objetivos:

- Por medio de la práctica el alumno conocerá la importancia del control de flujo en los procesos y los diferentes instrumentos con los que se puede medir y controlar.
- Familiarizarse con la unidad de control, para futuras prácticas.

Problema experimental

- Operar correctamente el circuito de flujo en la Unidad de control.

Material y servicios.

Cronometro.

Aire.

Agua.

Energía Eléctrica

Conocimientos previos:

- Repasar conocimientos de Flujo de fluidos.
- Investigar los diferentes tipos de instrumentos de medición flujo.

Indicaciones experimentales:

Procedimiento de arranque.

-Verificar haya servicios auxiliares.

- Cerrar válvulas HV3, HV4, HV6, HV7, HV11.

-Abrir válvulas HV1, HV2, HV8, HV9. Las válvulas de drenaje deben estar cerradas.

-Abrir la válvula HV10 utilizando la tubería recta y llenar la tercera parte del recipiente C1 Y después cerrar la válvula HV10.

Para el aire:

-Abrir la válvula del suministro de aire.

-Regular la presión del aire suministrado a las válvulas de control.

Los rangos de presión especificados son los siguientes:

Válvulas de control: aire abierto: 200-240 KN/m². (29 a 35 lb/in²).

Válvulas de control: aire cerrado: 170-200 KN/m². (25 a 29 lb/in²).

Controles y transmisores: 140-150 KN/m². (20-22 lb/in²).

Energía eléctrica.

Encender la fuente de alimentación.

-Operación del circuito de flujo.

Tener en cuenta la posición de los siguientes interruptores.

-Cualquier posición SW1.

-Cualquier posición SW2.

-Posición 1 SW3.

-Posición 2 SW4.

-El controlador de flujo debe estar en modo Manual.

1.-Verificar la posición de las válvulas de control FCV1 y FCV2, empezando con FCV2 abierta y FCV1 cerrada (con ayuda del controlador, mover el puntero a 100 en la escala y también comprobarlo en la escala de las válvulas, que se encuentra bajo el actuador de estas).

2.-Encender la bomba, para que el agua pase de C1 a C2.

-Tener en cuenta el nivel del tanque 1, para que la bomba no tenga problemas de cavitación.

-Tomar el tiempo en que tarda en llenarse C2.

3.-Apagar la bomba.

4.-Regresar el agua de C2 a C1 abriendo HV5.

- 5.-Mover el controlador a un porcentaje de la escala, que el alumno crea conveniente (observar el movimiento de las válvulas FCV1 y FCV2)
- 6.-Repetir del paso 2 al 4.
- 7.-Mover el controlador al 0% de la escala (observar el movimiento de las válvulas FCV1 abierta y FCV2 cerrada).
- 8.-Prender la bomba y observar la recirculación, después apagarla. (No debe pasar agua hacia C2)
-Abrir HV5.
- 9.-Mover el controlador a modo automático y fijar un valor punto de ajuste (set point).
- 10.-Encender la bomba.
-Observar el movimiento del puntero del controlador (oscilación) y tomar el tiempo que tarda en estabilizarse, así como el movimiento de las válvulas.
- 11.-Sin apagar la bomba, mover el punto de ajuste a otro porcentaje de la escala.
- 12.-Una vez que se estabilice mover el punto de ajuste a los valores de la escala que el alumno considere tratando de alcanzar un régimen permanente.
-Durante esta parte de la práctica se recomienda revisar que el nivel del tanque C1 sea bajo y no llegue a producir cavitación en la bomba).
-Como complemento una vez alcanzado régimen permanente con cualquier valor de la escala, presionar PB 5 y observar lo que sucede.

-Operación de LIC y FIC en cascada

- 13.- Ajuste el Punto de ajuste (set point) de LIC y FIC al valor que el alumno crea conveniente
- 14.- verificar que la posición de los SW sea la siguiente
Cualquier posición SW1.
Posición 2 SW2.
Posición 1 SW3.
Posición 1 SW4.
- 15.-Cambiar el controlador de LIC y FIC de modo manual a automático.
- 16.- Opere el circuito de flujo. Note la respuesta del sistema a los cambios de nivel en el recipiente C2 y los cambios en el retorno de flujo que es regulado por la válvula HV5.
-Observe el movimiento de los punteros y tome en cuenta el tiempo que tarda en estabilizarse.

Procedimiento de paro

- Apagar la bomba
- Colocar el controlador en modo manual.
- Drenar los tanques abriendo las válvulas.
- Cortar el suministro de aire.
- Apagar la fuente de alimentación del panel de control por medio del interruptor en la parte posterior del tablero.

Conclusiones:

El objetivo principal de esta tesis fue desarrollar prácticas en las cuales el alumno manipule un proceso real, como el que ofrece el Simulador, en el cual interactúe de manera directa con equipos e instrumentos además de detectar, medir, transmitir controlar, registrar y cortar las principales variables de cualquier proceso y así capacitarse y ganar experiencia para su futura vida profesional. Al redactar las prácticas propusimos que el alumno debe ser el que tiene que indicar las condiciones de operación del Simulador, para que al momento de experimentar siguiendo la redacción de las practicas pueda, en base a su criterio, escoger las condiciones mas favorables de acuerdo con lo que el alumno crea mas conveniente, en base a esto el objetivo principal se ha cumplido.

Otro objetivo se cumplió al ofrecer al lector (estudiante) un conocimiento de los diversos instrumentos utilizados a nivel industrial para el control de procesos y para respaldar las prácticas con esta teoría, ya que, como en cualquier rama de la ciencia, el establecimiento de las relaciones existentes entre la teoría y la práctica es el resultado de muchos años de investigación y desarrollo. Debido al constante avance en la tecnología y de que el tema de medición de variables e instrumentación y control es sumamente extenso, no fue posible ampliar más el tema, sin embargo se ha logrado el objetivo, por que en los capítulos I, II ,III, IV y V, se hace mención a la medición de presión, flujo, nivel y temperatura que son las variables mas usadas en la industria en general, las cuales están directamente relacionadas con la unidad de control del Laboratorio Experimental Multidisciplinario (LEM). Cualquier otra variable debe ser estudiada de forma detallada por separado.

La tesis esta dirigida a los estudiantes de nivel superior de Ingeniería, principalmente de las áreas Química, Mecánica, Petroquímica, Metalmeccánica, Alimentos e Ingeniería Ambiental. Así mismo, se recomienda al personal técnico de la industria de procesos, por otra parte se analizan de manera sencilla y entendible algunos componentes importantes del sistema de control, como sensores, transmisores y válvulas de control comunes.

Bibliografía.

A. Smith. B. Corripio. **“CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS TEORÍA Y PRACTICA”**, 1a Ed, Limusa. Mexico, 1991.

Luyben, W. L. (1990). **PROCESS MODELING, SIMULATION AND CONTROL FOR CHEMICAL ENGINEERS**. McGraw-Hill. USA.

Considine. D. M., Ross, S. D. (1971). **MANUAL DE INSTRUMENTACIÓN APLICADA**. Editorial Continental, S. A. México.

Felder, R. M., Rousseau, R. W. (1991). **PRINCIPIOS ELEMENTALES DE LOS PROCESOS QUÍMICOS**. Editorial Addison Wesley Iberoamericana. USA.

Creus A. (1989). **INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**. Editorial Alfa Omega, S. A. México.

Doebelin, E. O. (1980). **DISEÑO Y APLICACIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN**. Editorial Diana. México.

“INSTRUMENTATION SYMBOLS AND IDENTIFICATION,” INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA,

Standard ISA-SS-I, Enero 31, 1975, Research Triangle Park, N:C.

American National Standard. (1992) ANSI/ISA.S5.1-1984 (R1992). **INSTRUMENTATION SYMBOLS AND IDENTIFICATION**.

Artículos Técnicos y minicursos de la revista **ISATECH** de la ISA.

Creus S, A.; **“CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES – CRITERIOS DE IMPLANTACIÓN”**, 6ª edición, Marcombo, Barcelona España, 1988.

Harriot, M. **“PROCESS CONTROL”**, Ed Mc Graw Hill, New York, 1964.

Johnson, E, F. **“AUTOMATIC PROCESS CONTROL”**, Ed Mc Graw Hill, New York, 1967

K. Ogata, **“INGENIERIA DE CONTROL MODERNA”**, 3a Ed. Prentice Hall. New Jersey, 1997.

Lipták, B. G. **“INSTRUMENT ENGINEERS . HANDBOOK : VOL. 1: PROCESS MEASUREMENT AND ANALYSIS VOLUME 2: PROCESS CONTROL AND OPTIMIZATION”**, 4a. ed, Chilton Book Company, Philadelphia, 2003.

Shiskey F.G . **“PROCESS CONTROL SYSTEMS”**, 2a. Ed, Mc Graw Hill, New York, 1989.