



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

•• CUAUTITLAN ••

LA INSTRUMENTACION Y EL CONTROL EN
EL DISEÑO DE PLANTAS INDUSTRIALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A

JUAN JESUS LUNA AVILA

DIRECTOR DE TESIS: ING. JESUS HERRERA MARTINEZ

CUAUTITLAN, EDO. DE MEX.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

I N D I C E

ALCANCE		1
Objetivo		1
INTRODUCCION		4
CAPITULO I	DESARROLLO DE LA INSTRUMENTACION	5
	El uso de los instrumentos en la industria ..	6
	Productos del petróleo	8
	Compuestos químicos	9
	Pulpa de madera y papel	10
CAPITULO II	TERMINOLOGIA Y SIMBOLOGIA	12
	Terminología en instrumentos	12
	Identificación	16
	Simbología	21
CAPITULO III	FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMATICO	37
	Terminología básica del control automático ..	37
	Consideraciones básicas de control	40
	Sistemas de control de circuito abierto	42
	Sistemas de control de circuito cerrado	42
	Modos de control	44
	Dos posiciones (on-off)	45
	Flotante	49
	Integral	52
	Proporcional	53
	Derivativo	56
	Proporcional más integral	58
	Proporcional más derivativo	60
	Proporcional más integral más derivativo	63
	Selección de modos de control	65

Circuito de control en cascada	67
Circuito de control de relación	69
Circuito de control de gama partida	71
Circuito de control de predominio por selec - tor	73
Circuito de control prealimentado	74
CAPITULO IV INSTRUMENTOS DE MEDICION	76
FLUJO	76
Placa de orificio	77
Tubo venturi	84
Tobera de flujo	85
Tubo pitot	87
Tubo anubar	87
Tipo área variable o rotámetro	89
Tipo magnético	90
Tipo turbina	92
Tipo impacto	94
Tipo remolino	95
Tipo termal	96
NIVEL	99
Medidores de regleta móvil y fija	99
Vidrios de nivel	100
Tipo flotador.....	104
Tipo desplazador	105
Tipo burbujeo	108
Tipo caja de diafragma	109
Tipo conductivo	111
Tipo capacitivo	113
Tipo radiactivo	115
PRESION	117
Tipo tubos de bourdon.....	117

Tipo diafragma	120
Tipo fuelle	122
Tipo electrónico	124
Principales partes y conexiones de los manómetros	130
TEMPERATURA	133
Termómetro de vidrio	133
Termómetros bimetalógicos	133
Sistemas termales llenos	137
Termopares	141
Termómetros de resistencia	149
Termistores	153
Pirómetros de radiación	155
CAPITULO V ELEMENTOS FINALES DE CONTROL	159
Generalidades	159
Tipos de cuerpo	165
Globo	165
Mariposa	165
Bola	167
Diafragma	167
Dimensionamiento de válvulas de control	170
Características de control	177
Lineal	178
Igual porcentaje	178
Apertura rápida	178
Accesorios para válvulas	182
Selección de válvulas de control	184
CAPITULO VI CRITERIOS GENERALES DE CALCULO Y SELECCION DE INSTRUMENTOS	187
Instrumentos	187
Cálculo de medidores de flujo	187

Selección de instrumentos	196
CAPITULO VII HOJAS DE ESPECIFICACION	202
CAPITULO VIII APLICACIONES	205
Control de reactores	205
Control de calentadores a fuego directo	211
Control de calentadores y vaporizadores de proceso	212
Control en torres de destilación	221
BIBLIOGRAFIA	235

ALCANCE

Objetivo. El presente trabajo tiene como objetivo exponer en forma general los conceptos relacionados con los instrumentos de medición y control con el fin de facilitar la adecuada especificación de los instrumentos respectivos y así, facilitar su adquisición.

El propósito es servir como una guía de referencia para -- los interesados en el tema de instrumentación y control.

El trabajo consta de ocho capítulos. A continuación se da una introducción del tema o temas que se tratarán en cada capítulo.

CAPITULO I. DESARROLLO DE LA INSTRUMENTACION. En este capítulo se describe el desarrollo de la instrumentación y algunas de las aplicaciones que tiene la instrumentación en la industria.

CAPITULO II. TERMINOLOGIA Y SIMBOLOGIA. En este capítulo se definen los términos que definen a los instrumentos, se da un código para su identificación y se presentan los símbolos empleados dentro de la instrumentación y que tienen como fin el transmitir ideas e información de diagramas de flujo y otros dibujos.

CAPITULO III. FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMATICO. En este capítulo se describen los principios de los sistemas de control utilizados, examinando además otros tipos de control que consti

tuyen mejoras de los clásicos (proporcional, integral y derivativo).

CAPITULO IV. INSTRUMENTOS DE MEDICION. En este capítulo se describen las características de los principales tipos de instrumentos que se emplean para la medición de las variables en los procesos industriales, en particular, el flujo, el nivel, la presión y la temperatura, que son consideradas más importantes por ser medidas y controladas más a menudo que las otras.

CAPITULO V. ELEMENTOS FINALES DE CONTROL. En este capítulo se estudian los elementos finales de control que constituyen una de las partes más importantes del control, en particular las válvulas. Se describen sus elementos y se dan las fórmulas de cálculo correspondientes.

CAPITULO VI. CRITERIOS GENERALES DE CALCULO Y SELECCION DE INSTRUMENTOS. En este capítulo se dan los criterios más específicos para la selección de los instrumentos más usados para medición de las variables fundamentales de proceso. Para la variable flujo se dan los métodos de cálculo que son necesarios hacer después de haber seleccionado el elemento primario de flujo.

CAPITULO VII. HOJAS DE ESPECIFICACION. En este capítulo se da la información requerida para el llenado de las hojas de datos; las cuales, son de gran importancia ya que en ellas se encuentra toda la información necesaria para especificar y seleccionar adecuadamente los instrumentos de un proyecto o de una planta en operación.

CAPITULO VIII. APLICACIONES. En este capítulo se presentan

varias aplicaciones típicas en la industria. Se presentan sólo unos pocos procesos y todavía de forma simple, ya que un estudio exhaustivo requeriría una obra dedicada exclusivamente a aplicaciones.

INTRODUCCION

En la mayoría de los procesos industriales que exigen el control de los diversos productos obtenidos, es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas variables como el flujo, nivel, presión, temperatura, pH, conductividad, humedad, etcétera. Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas variables en condiciones más idóneas que las que el propio operador podría realizar.

La gradual complejidad con que los procesos se han ido desarrollando ha exigido su automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control, permitiendo al operador 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.

Asimismo, gracias a los instrumentos y a la correcta interpretación de los principios y técnicas de medición y control, 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.

La instrumentación no solamente tiene aplicación en el campo de los procesos industriales, sino también en otros campos; encontramos instrumentación al conducir un automóvil, en un avión, en un barco, en una nave espacial, en las comunicaciones, etc, sin embargo en este trabajo se tratará solamente lo relacionado a la instrumentación de procesos industriales.

C A P I T U L O I

DESARROLLO DE LA INSTRUMENTACION

Por muchos años el control de los procesos fué un arte más que una ciencia. Uno de los primeros hombres en operar un control automático fué James Watt, quien inventó una máquina de vapor en el año de 1775, dando así una gran contribución a la tecnología mundial y marcando el principio de la Revolución Industrial. La máquina de vapor de Watt usaba un flotador gobernador para controlar su velocidad; ésta fué la primera aplicación de un sistema de control retroalimentado.

Sin embargo, el control automático tuvo sus primeras aplicaciones en los procesos industriales, hasta el año de 1930.

La instrumentación y el control automático, se considera -- como uno de los pilares de los procesos continuos, y el perfeccionamiento de éstas operaciones así como de sus sistemas de -- control, se han llevado a cabo de manera casi simultánea.

Dentro de éstos procesos continuos se tiene la refinación del petróleo, el cual exige que cada uno de sus pasos se lleve a cabo en condiciones rigurosamente controladas en todo momento. Por consiguiente, la aportación de instrumentos a las industrias de proceso no debe considerarse como una cosa superflua, -- sino como una necesidad absoluta. Y aunque hay operaciones intermitentes que pueden funcionar a veces con un mínimo de instrumentos, es necesario resaltar que el funcionamiento de muchos procesos continuos modernos serían casi imposibles sin una aportación adecuada de instrumentos.

El enorme desarrollo de la ciencia y la tecnología en los últimos años ha propiciado una aparente falta de coordinación -- entre las distintas disciplinas del pensamiento humano. Los co-

nocimientos de instrumentación, automatización y la llamada teoría moderna del control, no constituyen una excepción, por el contrario, la terminología empleada demuestra que son varias -- las ciencias y especialidades que han intervenido independientemente en su evolución.

La importancia de la instrumentación en nuestra época es -- evidente, encontramos instrumentación al conducir un automovil, en un avión, en un barco o nave espacial, en la producción industrial, en la medicina, en las comunicaciones, etc.

Por definición, un instrumento es cualquier artefacto o -- dispositivo que sustituye o complementa al hombre en el manejo de algún equipo. Para los conocimientos de éste tema, instrumento es cualquier aparato o dispositivo cuyo objeto sea la medición, transmisión, procesamiento o control de variables o de señales moduladas provenientes de dichas variables.

El uso de los instrumentos en la industria. Al escribir este tema, se tratará de demostrar algunas de las aplicaciones posibles que tiene la instrumentación en la industria, sobre todo, en aquellas que producen materias esenciales para el bienestar, la comodidad y la seguridad del hombre.

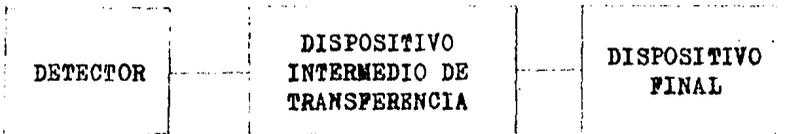
Los instrumentos son herramientas indispensables que sirven para conseguir y conservar la calidad con que se identifica el producto que se está manufacturando. Se utilizan para controlar las variables de un proceso o sistema en forma tan exacta como se necesite para satisfacer las especificaciones del -- producto en lo que respecta a composición, forma, color o acabado.

El instrumento o el sistema de instrumentos puede ser meccánico, neumático, hidráulico, eléctrico, electrónico o una combinación de dos o más de éstas formas básicas, por ejemplo: electromecánicos. Cada instrumento o sistema de instrumentos tiene--

tres funciones básicas que son:

- 1.- Detector
- 2.- Dispositivo intermedio de transferencia
- 3.- Dispositivo final

Estos tres elementos se ilustran en el diagrama de bloques de la siguiente figura:



El dispositivo de entrada debe captar la señal y transferirla a algún sistema de salida. El tipo de instrumento o sistema depende de las variables que se van a controlar o medir y de la rapidez y la precisión con que se debe efectuar la medición o el control.

La automatización, que requiere del control y la recolección de datos por computadora, ha fomentado el uso de instrumentos para mediciones y control, tanto de una sola estación como de sistemas complejos en todas las industrias modernas. Estos van desde una simple estación de control manual, hasta un complejo centro de actividad y control utilizando computadoras. Para cada aplicación debe existir una comprensión clara y concisa del funcionamiento de cada instrumento y de sus limitaciones en el sistema de medición y control. Es esencial que se conozca la teoría adecuada, la operación funcional y las interacciones entre los componentes en el proceso que se va a medir y/o controlar.

La utilidad de un instrumento en cualquier sistema de medición y control, depende de la medida en que se pueda poner en marcha con éxito un dispositivo de control y del grado de seguridad con que se logre reproducir la iniciación del control. -- Tanto la exactitud como la seguridad de un instrumento dependen de su construcción y de la manera en que se conserve su calibración. Un instrumento mal calibrado produce un riesgo de medición y no sirve al utilizarlo para medir. Para que un instrumento industrial sea útil en un proceso, se debe calibrar de acuerdo con una norma ya aceptada.

La instrumentación hace posible la producción en masa y permite establecer y mantener límites superiores e inferiores. El uso de las normas de calibración, fija las mediciones y controles en la fabricación y permite que un productor se especialice en un artículo y actúe como abastecedor de otros fabricantes o de grupos de ensambladores.

Para ilustrar la forma en que los instrumentos se usan en la industria, se hará un breve análisis de algunas aplicaciones de los instrumentos en la industria que son esenciales para el éxito de ésta y de sus productos.

Productos del petróleo. Aquí se requieren controles minuciosos y precisos. Las temperaturas y las presiones son críticas durante la refinación. En estos procesos siempre hay problemas debidos a fugas de líquidos volátiles. No solo es necesario que la instrumentación de medición sea exacta, sino también confiable para que el proceso se mantenga dentro de los límites de seguridad al producir aceites para motor de grado específico, combustible diesel o gasolina. La medición exacta del flujo, la presión y la temperatura hacen que ésta industria sea relativamente segura. En el diagrama de la Fig. I.1 se presentan algunos requisitos básicos.

PROCESO	PRODUCTO	MEDICION O CONTROL
SELECCION DE MATERIAS PRIMAS	PETROLEO GRUDO	VOLUMEN PRESION
DESCOMPOSICION TERMICA	VOLATILES NO VOLATILES	TEMPERATURA PRESION FLUJO
REFINACION	GASOLINA BENCENO QUEBROSENO ACEITES GRASA ASFALTO	TEMPERATURA PRESION TIEMPO FLUJO COMPOSICION
EMPAQUETADO O DISTRIBUCION	LATAS BARRILES CAMIONES CISTERNA BOTELLAS TUBERIAS U OLEODUCTOS	VOLUMEN PRESION

Fig. I.1 Medición y control básico en la industria del petróleo

Compuestos químicos. En la elaboración de compuestos químicos se requiere controlar con precisión el flujo de líquidos, la presión y la temperatura a las que se producen las reacciones químicas, así como medir con exactitud la cantidad de cada sustancia empleada. Los requisitos básicos se muestran en el diagrama de bloques de la Fig. I.2. Cualquier medición y control inexacto de las variables puede ser peligroso; en muchas ocasiones, las explosiones químicas han causado la pérdida de vidas, instalaciones o incluso pequeñas comunidades.

PROCESO	MATERIAL	MEDICION O CONTROL
SELECCION DE MATERIAS PRIMAS	SOLIDOS LIQUIDOS GASES	PESO VOLUMEN FIUJO
MEZCLADO O COMBINADO	SOLIDOS LIQUIDOS GASES SOLIDOS Y LIQUIDOS LIQUIDOS Y GASES	TIEMPO TEMPERATURA PRESION VOLUMEN FIUJO COMPOSICION
EMPAQUETADO	BOLSAS CAJAS CILINDROS BARRILES TANQUES BOTELLAS	PESO VOLUMEN PRESION HUMOS

Fig. I.2 Requisitos básicos de medición y control en procesos químicos

Pulpa de madera y papel. En la industria papelera, se necesita descortezar y cortar los troncos en trozos pequeños que -- después se mezclan con compuestos químicos para llevar a cabo -- un proceso de digestión a la temperatura apropiada hasta que -- las fibras se separan de los otros ingredientes. Entonces, éstas fibras se envían a los ciclos de secado y presión y los compuestos químicos se hacen pasar por un proceso de recuperación. Después de secar y prensar la pulpa, ésta se convierte en papel mediante un proceso de laminado. El control de la presión de la minado y la velocidad de los rodillos determinan el espesor del papel. Es muy importante la regulación de la velocidad en el ro

dillo recogedor ya que de otra manera, el papel se rompería por que debe reducirse su velocidad conforme el rollo aumenta de tamaño. Por ende, el control de peso, el flujo, la presión y la velocidad de rotación son esenciales en la industria del papel, como se puede ver en el diagrama de bloques de la Fig. 1.3.

PROCESO	MATERIAL	MEDICION O CONTROL
SELECCION DE MATERIAS PRIMAS	TRONCOS COMPUESTOS QUIMICOS ALGODON LINO	PESO FLUJO
ASTILLADO O DESMENUZADO	ASTILLAS FIBRAS DE CELULOSA	RUIDO TAMANO PESO
DIGESTION	PULPA FIBRAS COMPUESTOS QUIMICOS	TEMPERATURA VOLUMEN CONCENTRACION HUMOS Y OLORES
RECUPERACION DE COMPUESTOS QUIMICOS		
SECADO	PULPA FIBRAS	TEMPERATURA HUMEDAD
PRENSADO	PULPA FIBRAS	TEMPERATURA HUMEDAD PRESION
ARROLLADO	PAPEL	PRESION VELOCIDAD

Fig. 1.3 Elaboración básica de pulpa y papel

C A P I T U L O I I

TERMINOLOGIA Y SIMBOLOGIA

En este capítulo se presentan los principales términos y símbolos empleados dentro de la instrumentación y que tienen como fin el transmitir ideas e información de diagramas de flujo y otros dibujos.

Terminología en instrumentos. En orden para comunicar sus ideas e información de una manera efectiva y concisa, los ingenieros de control hacen uso de un sistema de términos y símbolos; los cuales, deben ser entendidos por el ingeniero responsable del diseño, selección, operación o mantenimiento de sistemas de control para los servicios mecánicos y eléctricos.

Se han hecho varios intentos para estandarizar la terminología de instrumentos, de ellos los esfuerzos realizados por la ISA (Asociación de Instrumentistas de América) y la ASME (Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos) son los que han tenido mayor éxito. A continuación se presentan en orden alfabético las definiciones que se aplican para los propósitos del estándar elaborado por la ISA.

ALARMA. Es un dispositivo que señala la existencia de una condición anormal por medio de un cambio audible y/o visible que es emitido para atraer la atención.

CIRCULO. Es un símbolo usado para denotar un instrumento o la identificación de un instrumento.

CIRCUITO. Es una combinación de dos o más instrumentos interconectados para medir y/o controlar una o más variables de proceso.

CONTROLADOR. Es un dispositivo que tiene una salida que --

puede ser variada para mantener una variable controlada en un valor específico o dentro de límites especificados o que puede alterar la variable en una manera específica.

CONVERTIDOR. Es un dispositivo que recibe información en la forma de una señal de instrumento, altera la forma de la información, y envía fuera una señal resultante de salida.

DETRAS DEL TABLERO. Un término aplicado a la localización que (1) está dentro de un área que contiene el tablero de instrumentos, y (2) está dentro o atrás del tablero o no es accesible al operador para su uso normal y (3) no está designado como local.

ELEMENTO FINAL DE CONTROL. El dispositivo que directamente cambia el valor de la variable manipulada de un circuito de control.

ELEMENTO PRIMARIO. La parte de un circuito o de un instrumento que detecta antes que nadie el valor de una variable de proceso y que asume un estado predeterminado e inteligible o bien una señal que corresponde a la detección. El elemento primario puede estar separado o integrado con otro elemento funcional del circuito. El elemento primario es también conocido como detector o sensor.

ESTACION DE CARGA MANUAL. Es un dispositivo que tiene una salida manualmente ajustable que es usada para actuar uno o más dispositivos remotos. Aunque los dispositivos remotos pueden ser elementos controlantes, la estación no se emplea como unidad selectora de modos de control. La estación puede tener medidores, luces u otros aditamentos. También es conocida como estación manual o cargador manual remoto.

ESTACION DE CONTROL. Una estación de carga manual que también tiene un interruptor selector de modos de control manual y automático de un circuito de control. Es también conocida como

estación auto-manual y estación auto-selector.

EXPLORADOR. Dispositivo que analiza intermitentemente cada una de las entradas . También puede suministrar adicionalmente- funciones tales como registro o alarma.

FUNCION. El proposito o acción realizado por un dispositivo.

IDENTIFICACION. La secuencia de letras y/o dígitos usados- para designar un instrumento individual o un circuito.

INSTRUMENTACION. La aplicación de los instrumentos.

INSTRUMENTO. Un dispositivo usado directamente o indirectamente para medir y/o controlar una variable. El término incluye válvulas de control, válvulas de alivio y dispositivos eléctricos tales como anunciadores y botones de contacto. El término - no se aplica a partes internas como receptores, diafragmas o un resistor, que son componentes internos de un instrumento.

INTERRUPTOR. Es un dispositivo que conecta, desconecta o - transfiere uno o más circuitos y no es designado como un controlador, un relevador o una válvula de control. El término es también aplicado a las funciones realizadas por los interruptores.

LOCAL. Es la localización de un instrumento que no está al frente ni detrás del tablero. Los instrumentos locales están comunmente en la vecindad de un elemento primario o un elemento - final de control.

LUZ PILOTO. Es una luz que indica la existencia de alguna- condición normal de un sistema o dispositivos, dentro de un número dado de tales condiciones normales. Es diferente a la luz- de alarma, ya que ésta indica una condición anormal. La luz pi- loto también es conocida como luz monitor.

MEDIDA. La determinación de la existencia o magnitud de -- una variable. Los instrumentos de medida incluyen todos los digpositivos usados directa o indirectamente para este propósito.

MONTADO EN TABLERO. Un término aplicado a un instrumento - que está montado sobre un tablero y que es accesible al operador para su uso normal.

PROCESO. Cualquier operación o secuencia de operaciones -- que involucren un estado de cambio de energía, de composición, de dimensión o de otra propiedad que puede ser definida con respecto a un dato.

PUNTO DE PRUEBA. Conexión o proceso en el cual no hay un instrumento colocado permanentemente, pero cuyo propósito es -- que sirva como conexión temporal, intermitente o futura.

RELEVADOR. Es un dispositivo que recibe información en forma de señal de uno o más instrumentos, modifica la información y/o su forma si se requiere y emite una o más señales de salida resultantes. No es designado como controlador, interruptor, ni de otra forma.

El término relevador es también específicamente aplicado a un interruptor eléctrico que es accionado remotamente por una señal eléctrica. Sin embargo para los propósitos de este estándar, el término no es tan restringido.

El término es también aplicado a las funciones realizadas por los relevadores.

RELEVADOR COMPUTADOR. Un relevador que realiza uno o más cálculos y/o funciones lógicas y envía una o más señales de salida resultantes.

TABLERO. Es una estructura que tiene un grupo de instrumentos montados sobre sí y que tiene una identificación individual. El tablero puede consistir de una o más secciones componentes, compartimientos, escritorios o bastidores.

TABLERO LOCAL. Un tablero que no es central ni principal. Los tableros locales están comúnmente en las cercanías de subsistemas o subáreas de la planta.

TELEMEDICION. La práctica de transmitir y recibir la medición de una variable para lectura u otros usos. El término es comúnmente más aplicado a sistemas de señales eléctricas.

TRANSDUCTOR. Término general para un dispositivo que recibe información en la forma de una o más cantidades físicas; modifica la información y/o la forma si se requiere y emite una señal de salida resultante. Dependiendo de la aplicación, el transductor puede ser un elemento primario, un transmisor, un relevador, un convertidor u otro dispositivo.

TRANSMISOR. Un dispositivo que detecta una variable de proceso por medio de un elemento primario y que tiene una salida cuyo valor varía únicamente en función de la variable de proceso. El elemento primario puede o no estar integrado al transmisor.

VALVULA DE CONTROL. Un dispositivo diferente a una válvula actuada manualmente abierta-cerrada, que manipula directamente el flujo de una o más corrientes del fluido de proceso. En algunas aplicaciones, es comúnmente conocida como amortiguador o perciana.

VARIABLE DE PROCESO. Cualquier propiedad variable de un proceso.

Identificación y Simbología de Instrumentos. Los detalles de instrumentos e instrumentación son identificados y representados por un sistema de letras y números, junto con un número de símbolos ilustrativos para ilustrar los detalles en diagramas de flujo y otros dibujos.

Identificación. La identificación deberá consistir de una combinación de letras utilizadas para establecer la identificación general del detalle con su propósito y funciones. Para algunos requerimientos esto será suficiente y completo; pero -----

usualmente será seguido por un número que servirá para establecer la identificación específica del detalle. Las identificaciones deberán ser usadas para la completa designación del detalle en trabajos escritos y en combinación con símbolos ilustrativos para la representación de diagramas de flujo y otros dibujos.

Identificación General. La identificación general deberá consistir de letras como las presentadas en la Tabla II.1 usadas en combinación como se muestra en la Tabla II.2.

La Tabla II.1 muestra las letras que pueden ser empleadas, la definición o significado de cada una y la posición o posiciones permisibles en las cuales pueden ser usadas cuando se combinan.

La Tabla II.2 muestra las combinaciones permisibles de letras de identificación y muestra el significado de cada una tal que complete la identificación general.

En el uso de las letras o sus combinaciones se deben aplicar las siguientes reglas e instrucciones.

a) Las letras de identificación se escribirán en todos los casos como mayúsculas, excepto las letras d, r y p (ésta última en la combinación pH únicamente).

b) La primera letra representará la variable de proceso y las siguientes el servicio o función que desempeña el instrumento.

c) Cada letra tiene un solo significado al usarse como primera letra. De manera similar cada letra tiene un solo significado cuando se utiliza como letra complementaria.

d) La identificación funcional de un instrumento será de acuerdo a la función y no de acuerdo a su construcción. Entonces un registrador de presión diferencial usado para medición de flujo será FR.

e) En un circuito de instrumentación la primera letra de la

LETRA MAYUSCULA	PRIMERA LETRA		LETRAS COMPLEMENTARIAS		
	VARIABLE DE PROCKSO	COMO MODIFICADOR	FUNCION PRINCIPAL	FUNCION SECUNDARIA	COMO MODIFICADOR
A	ANALISIS		ALARMA		
B	FLAMA		A ESCOJER	A ESCOJER	A ESCOJER
C	CONDUCTIVIDAD (ELECTRICA)			CONTROL	
D	DENSIDAD O GRAVEDAD ESPECIFICA	DIFERENCIAL			
E	VOLTAJE (FEM)		ELEMENTO PRIMARIO		
F	FLUJO	RELACIONADOR			
G			VIDRIO (NO MIDE)		
H	MANUAL				ALTO
I	CORRIENTE (ELECTRICA)		INDICADOR		
J	POTENCIA	EXPLORADOR			
K	TIEMPO			ESTACION DE CONTROL	
L	NIVEL		LUZ PILOTO		BAJO
M	HUMEDAD				INTERMEDIO
N	A ESCOJER		A ESCOJER	A ESCOJER	A ESCOJER
O	A ESCOJER		ORIFICIO DE RESTRICCION		
P	PRESION O VACIO		PUNTO (CONEXION DE PRUEBA)		
Q	CANTIDAD	INTEGRADOR O TOTALIZADOR			
R	RADIOACTIVIDAD		REGISTRADOR O IMPRESOR		
S	VELOCIDAD O FRECUENCIA	SEGURIDAD		INTERRUPTOR	
T	TEMPERATURA			TRANSMISOR	
U	MULTIVARIABLE		MULTIFUNCION	MULTIFUNCION	MULTIFUNCION
V	VISCOSIDAD			VALVULA	
W	PESO O FUERZA		POZO		
X	SIN CLASIFICACION		SIN CLASIFICACION	SIN CLASIFICACION	SIN CLASIFICACION
Y	A ESCOJER			CONVERTIDOR O TRANSDUCTOR ACTUADOR O ELEMENTO FINAL DE CONTROL SIN CLASIFICACION	
Z	POSICION				

TABLA II.1 Significado de las letras de identificación

SEGUNDA Y TERCERA LETRAS - TIPO DE MECANISMO

	Ira. LETRA VARIABLE DEL PROCESO	MECANISMO CONTROLADOR				VALVULA DE REGULACION (RELEVO)	MECANISMO DE MEDICION		APARATO DE CRISTAL SOLO PARA OBSERVAR (NO WIDE)	MECANISMO DE ALARMA			ELEMENTO PRIMARIO
		CONTROLADORES SEPARADOS			VALVULA REGULACION AUTOMATICA		REGISTRO	INDICADOR		REGISTRO	INDICADOR	ALARMA	
		REGISTRO	INDICADOR	CONTROL									
		-RC	-IC	-C	-CV	-SV	-R	-I	-G	-RA	-IA	-A	-E
TEMPERATURA	T-	TRC	TIC	TC	TCV	TSV	TR	TI	///	TRA	TIA	TA	TE
FLUJO	F-	PRC	PIC	FC	FCV		FR	FI	PG	PRA	FIA	FA	FE
NIVEL	L-	LRC	LIC	LC	LCV		LR	LI	LG	LRA	LIA	LA	LE
PRESION	P-	PRC	PIC	PC	PCV	PSV	PR	PI	///	PRA	PIA	PA	PE
DENSIDAD	D-	DRC	DIC	DC	DCV		DR	DI	///	DRA	DIA		DE
MANUAL	H-		HIC	HC	HCV		///	///	///	///	///		///
CONDUCTIVIDAD	C-	CRC	CIC	CC	CCV		CR	CI	///	CHA	CIA	CA	CE
RAPIDEZ	S-	SRC	SIC	SC	SCV	SSV	SR	SI	///	SRA	SIA	SA	SE
VISCOSIDAD	V-	VRC	VIC	VC	VCV		VR	VI	VG	VRA	VIA		VE
PESO	W-	WRC	WIC	WC	WCV		WR	WI		WRA	WIA		WE

-19-

TABLA II.2 Identificación general completa
(combinaciones permisibles)

identificación funcional será seleccionada de acuerdo a la variable controlada o medida y no de acuerdo a la variable manipulada. Entonces una válvula que controle el flujo de vapor para mantener la temperatura en un tanque será TCV.

f) Se pueden adicionar letras modificadoras tanto a la primera letra como a las letra complementarias, cuando sucede esto con la primera letra debe entenderse como una nueva variable, - por ejemplo PD1 y PI, miden 2 diferentes variables, presión diferencial y presión respectivamente. Estas letras modificadoras siempre deben seguir inmediatamente a las letras que modifican.

g) El número de letras que formen la identificación funcional de un instrumento se debe tratar de mantener al mínimo y no debe exceder de 4.

Identificación Específica. En la mayoría de los casos, es necesario agregar a la identificación general un sistema numérico para establecer la identificación específica. Cualquier sistema de números en serie puede ser usado. En un trabajo escrito el número va inmediatamente después de las letras y separado de estas por un guión como se ve en el ejemplo siguiente:

P	I	C	-	100
---	---	---	---	-----

PRIMERA LETRA	LETRAS COMPLEMENTARIAS	SISTEMA NUMERICO
---------------	------------------------	------------------

IDENTIFICACION FUNCIONAL	IDENTIFICACION POR CIRCUITO
--------------------------	-----------------------------

IDENTIFICACION DEL INSTRUMENTO

Los componentes de un circuito de instrumentación se deben identificar utilizando un solo número para todos. Así un circuito formado por un elemento primario, un registrador controlador

y una válvula de control se podrá identificar:

FE-21, FRC-21, FV-21

Esta es la forma de identificación en México.

Además de la forma anterior de identificación existe otra que no existe en México pero presentada por la ISA y que consiste en identificar a todos los componentes de un circuito con un solo grupo de letras y números adicionándoles un sufijo a cada uno de ellos de acuerdo a su función. Por ejemplo para un circuito de control de flujo designado como FRC-4, el elemento primario sería FRC-4E, el transmisor FRC-4T y la válvula de control FRC-4V.

Más recientemente debido a los nuevos tipos de instrumentos y computadoras ha surgido un nuevo sistema de identificación que pretende satisfacer las necesidades actuales. En este se emplean las letras y símbolos utilizados por la ISA, de esta manera la transición de la práctica presente a una nueva revisión completa será efectuada lentamente y con esfuerzo mínimo. En este sistema se propone que la identificación de un circuito de control sea reducida a una sola letra y número. Cada componente puede ser identificado separadamente por la adición de una letra sufijo.

Por ejemplo, para el circuito de control de flujo utilizado previamente, el elemento primario sería identificado como F4E, el transmisor F4T, el registrador controlador F4RC y la válvula de control F4V.

Lo mencionado hasta aquí es la práctica general, pero en algunos casos, el cliente que contrata los servicios de ingeniería tiene su propio sistema de identificación.

Simbología. Para la localización de los instrumentos en los diagramas de tubería e instrumentación se utilizan símbolos

cuyo uso requiere de ciertas reglas.

a) El círculo que se emplea para localizar la posición de cada instrumento propiamente dicho, se recomienda que sea de $7/16$ " de diámetro, pero el tamaño puede definirse de acuerdo a las necesidades del proyecto.

b) Los símbolos pueden ser dibujados con alguna orientación. Cuando sea necesario se deben adicionar flechas para aclarar la dirección de las señales.

c) Es recomendable no representar los suministros eléctricos, neumáticos u otros en los DTI.

d) En general una línea es suficiente para representar las interconexiones entre dos instrumentos en los DTI, aunque físicamente pueden estar conectados por más de una línea.

e) No es necesario representar componentes menores (manómetros, termómetros).

f) Si es necesario, puede agregarse una pequeña nota junto al símbolo para aclarar la función o propósito del circuito de control, ya que una pequeña nota evita el usar una gran variedad de símbolos complicados.

A continuación se representan los símbolos básicos:

A) Símbolos de líneas de instrumentos

-----	CONEXION A PROCESO, ENLACE MECANICO O SUMINISTRO A INSTRUMENTO
---//---//---//---//---	SEÑAL NEUMATICA
-----	SEÑAL ELECTRICA
---x---x---x---x---	TUBO CAPILAR (SISTEMA LLENO)
---L---L---L---L---	SEÑAL HIDRAULICA

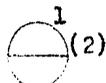
B) Símbolos generales de círculos

INSTRUMENTO PARA UNA VARIABLE MEDIDA CON CUALQUIER NUMERO DE FUNCIONES

Ø APROX. 7/16"



INSTALADO
LOCALMENTE



INSTALADO EN EL TABLERO 1
(O TABLERO 2). TABLERO 2
PUEDE ALTERNATIVAMENTE SER
DESIGNADO POR UNA DOBLE LI
NEA HORIZONTAL



INSTALADO DE-
TRAS DEL TA-
BLERO

INSTRUMENTO PARA DOS VARIABLES MEDIDAS. OPCION PARA INSTRUMENTOS DE UNA VARIABLE CON MAS DE UNA FUNCION



INSTALADO
LOCALMENTE



INSTALADO EN EL
TABLERO PRINCIPAL

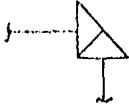


INSTALADO ATRAS
DEL TABLERO
AUXILIAR

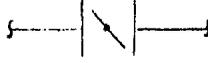
C) Símbolos para cuerpos de válvulas de control



GLOBO, COMPUESTA U OTRA



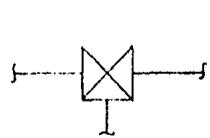
ANGULO



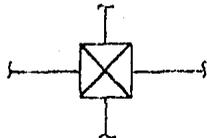
MARIPOSA



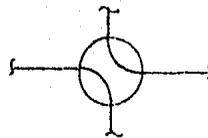
TAPON ROTATORIO O BOLA



TRES VIAS

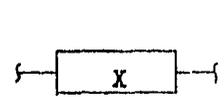


ALTERNATIVA 1



ALTERNATIVA 2

CUATRO VIAS



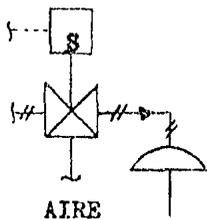
PARA CUERPOS EN LINEA NO IDENTIFICADOS

D) Símbolos para actuadores

DIAFRAGMA Y RESORTE



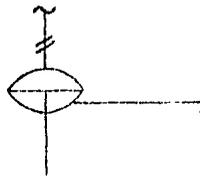
SIN POSICIONADOR NI PILOTO



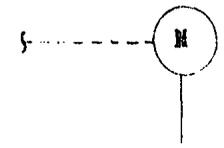
CON POSICIONADOR Y PILOTO

AIRE

VARIOS



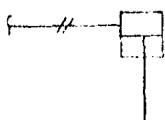
DIAPHRAGMA DE PRESION BALANCEADA



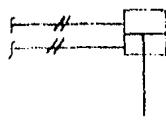
MOTOR ROTATIVO

D) Símbolos para actuadores (continuación)

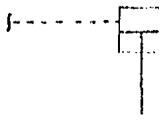
CILINDRO



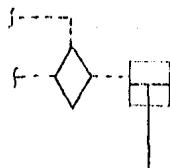
SIMPLE ACCION



DOBLE ACCION



CON PILOTO Y OPERADO POR UNA ENTRADA DE CONTROL

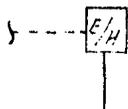


CON PILOTO ALTERNATIVA

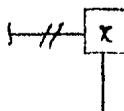
SIN POSICIONADOR U OTRO PILOTO



MANUAL



ELECTRO-HIDRAULICO



SIN CLASIFICAR



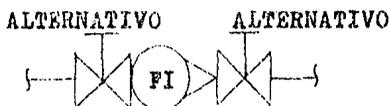
SOLENOIDE

E) Símbolos para autorreguladores, válvulas y otros dispositivos

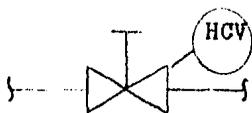
FLUJO



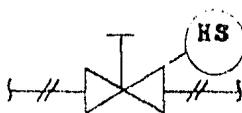
REGULADOR AUTOMATICO CON INDICADOR INTEGRAL DE FLUJO



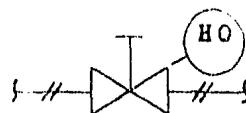
ROTAMETRO INDICADOR CON VALVULA DE CONTROL MANUAL



VALVULA DE CONTROL MANUAL EN LINEA DE PROCESO



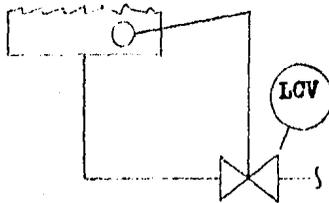
VALVULA DE CORTE MANUAL EN LINEA DE SEÑAL NEUMATICA



ORIFICIO DE RESTRICCIÓN MANUALMENTE AJUSTABLE EN LINEA DE SEÑAL NEUMATICA

E) Símbolos para autorreguladores (continuación)

NIVEL

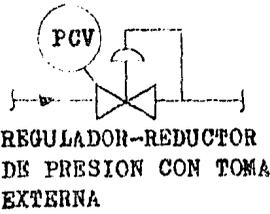


CONTROLADOR DE NIVEL CON OPERADOR MECANICO

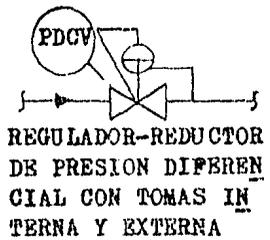
PRESION



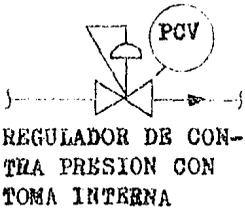
REGULADOR-REDUCTOR DE PRESION CON TOMA INTERNA



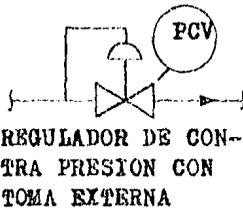
REGULADOR-REDUCTOR DE PRESION CON TOMA EXTERNA



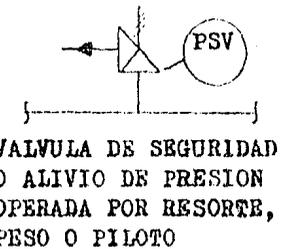
REGULADOR-REDUCTOR DE PRESION DIFERENCIAL CON TOMAS INTERNA Y EXTERNA



REGULADOR DE CONTRA PRESION CON TOMA INTERNA



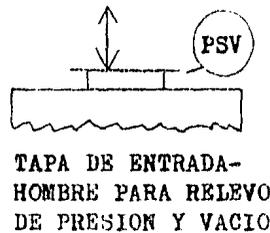
REGULADOR DE CONTRA PRESION CON TOMA EXTERNA



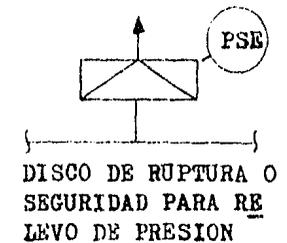
VALVULA DE SEGURIDAD O ALIVIO DE PRESION OPERADA POR RESORTE, PESO O PILOTO



VALVULA DE RELEVO PARA VACIO OPERADA POR RESORTE, PESO O PILOTO



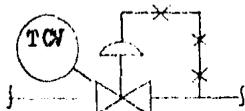
TAPA DE ENTRADA-HOMBRE PARA RELEVO DE PRESION Y VACIO



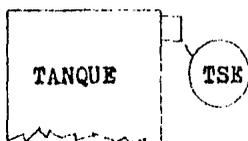
DISCO DE RUPTURA O SEGURIDAD PARA RELEVO DE PRESION

F) Símbolos para autorreguladores (continuación)

TEMPERATURA

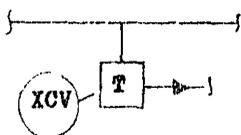


REGULADOR DE TEMPERATURA
DE TIPO SISTEMA LLENO

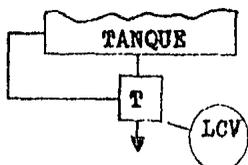


DISCO O TAPON FUSIBLE

TRAMPAS

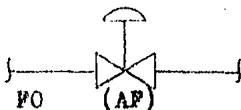


TODAS LAS TRAMPAS DIFEREN
TES A LA DE PLOTADOR

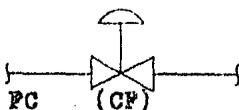


TRAMPA DE DRENAJE CONTINUO
TIPO PLOTADOR CON CONEXION
IGUALADORA

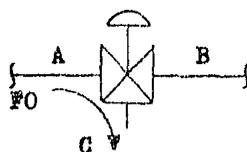
F) Símbolos de acción del actuador en caso de fallo de aire (o energía). (Válvulas de control operadas por diafragma)



VALVULA DE DOS
VIAS, ABRE A
FALLA

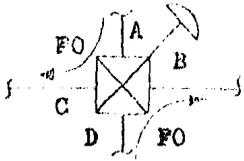


VALVULA DE DOS
VIAS, CIERRA A
FALLA

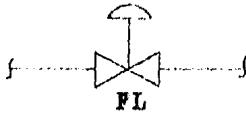


VALVULA DE TRES VIAS
ABRE A FALLA LOS
PUERTOS A-C

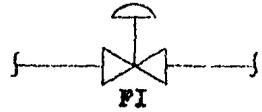
F) Símbolos de acción del actuador (continuación)



VALVULA DE CUATRO VIAS, ABRE A FALLA LOS PUERTOS A-C Y D-B

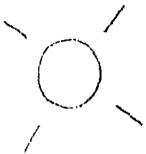


CUALQUIER VALVULA ASEGURADA EN SU POSICION A FALLA



CUALQUIER VALVULA POSICION INDEFINIDA A FALLA

G) Símbolos varios



LUZ PILOTO



CONEXION



DISPOSITIVO DE PURGA O FIJO EN CIRCULACION CONTINUA



REPOSICION PARA ACTUADOR



SELO QUIMICO



GENERALIZADO PARA INTERCONEXIONES COMPLEJAS LOGICAS O INDEFINIDAS



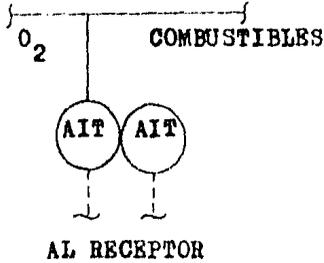
COMPUERTA LOGICA "Y" VALIDA SOLO SI EXISTEN TODAS LAS ENTRADAS



COMPUERTA LOGICA "O" VALIDA SOLO SI EXISTE UNA O MAS ENTRADAS

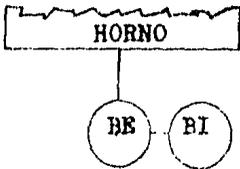
H) Símbolos de elementos primarios

ANALISIS (A)

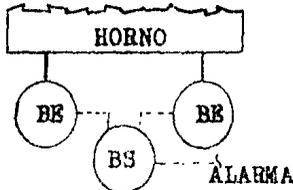


TRANSMISOR INDICADOR DE ANALISIS
DUAL PARA O₂ Y COMBUSTIBLES

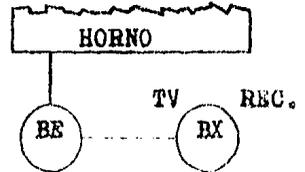
FLAMA DE QUEMADOR (B)



DETECTOR DE FLAMA
CONECTADO A UN IN
DICADOR DE INTEN
SIDAD DE FLAMA

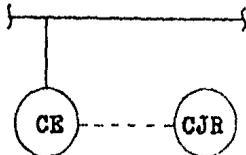


DOS SENSORES DE FLAMA
CONECTADOS A UN INTE
ERRUPTOR COMUN



CANARA DE TV Y RECEP
TOR PARA MIRAR LA
FLAMA

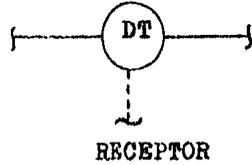
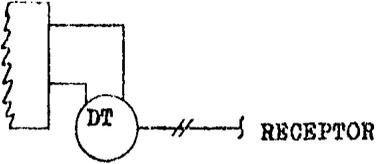
CONDUCTIVIDAD (C)



CELDA DE CONDUCTIVIDAD CON SALIDA
A UN REGISTRADOR MULTIPUNTO

H) Símbolos de elementos primarios (continuación)

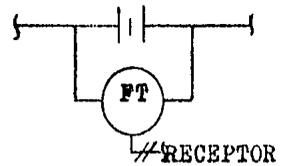
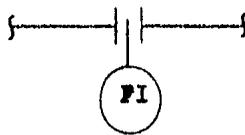
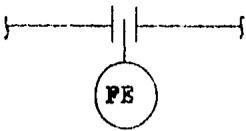
DENSIDAD O GRAVEDAD ESPECIFICA (D)



TRANSMISOR DE DENSIDAD DEL TIPO PRESION DIFERENCIAL EXTERNAMENTE INSTALADO

TRANSMISOR DE GRAVEDAD ESPECIFICA DEL TIPO INSERTADO EN LINEA

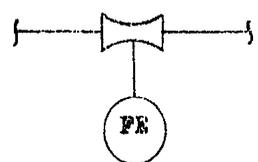
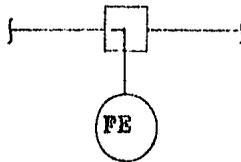
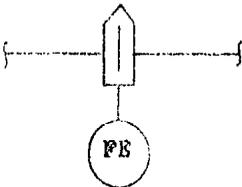
FLUJO (F)



PLACA DE ORIFICIO CON TOMAS EN BRIDA O EN ESQUINA

INDICADOR DE FLUJO DEL TIPO PRESION DIFERENCIAL

TRANSMISOR DE FLUJO DEL TIPO PRESION DIFERENCIAL CON TOMAS EN VENA CONTRACTA



PLACA DE ORIFICIO CON DISPOSITIVO DE CAMBIO RAPIDO

TUBO PITOT

TUBO VENTURI O TOBERA DE FLUJO



ROTAMETRO



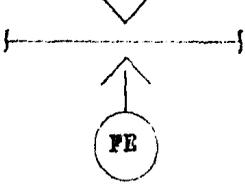
MEDIDOR TIPO MAGNETICO



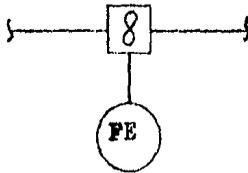
MIRILLA DE FLUJO SIMPLE O DE ROTOR, PALETA, ETC.

H) Símbolos de elementos primarios (continuación)

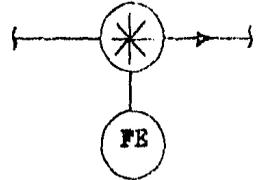
FLUJO (F)



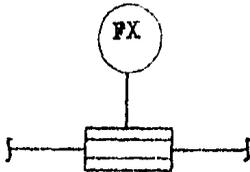
MEDIDOR DE CANAL



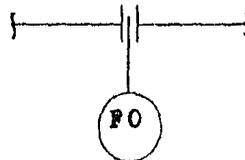
MEDIDOR DE TURBINA



MEDIDOR DE TIPO
DESPLAZAMIENTO
POSITIVO



VENAS RECTIFICADORAS
DE FLUJO

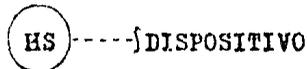


ORIFICIO DE RESTRICCIÓN
PIJO

MANUAL (H)



ESTACION DE CARGA MANUAL
CON INDICACION DE SALIDA



INTERRUPTOR ELECTRICO
MANUAL

TIEMPO (K)



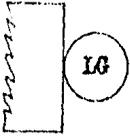
RELOJ



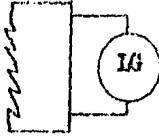
PROGRAMADOR MULTIPUNTO
TODO-NADA

H) Símbolos de elementos primarios (continuación)

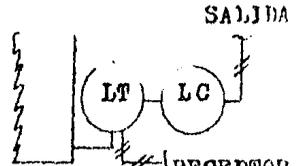
NIVEL (L)



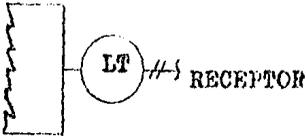
NIVEL DE VIDRIO INTEGRAL CON EL TANQUE



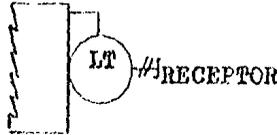
NIVEL DE VIDRIO DE CONEXION EXTERNA



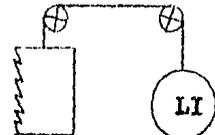
TRANSMISOR-CONTROLADOR DIFERENCIAL DE NIVEL TIPO DESPLAZADOR O PLOTADOR EXTERNO



TRANSMISOR DE NIVEL TIPO DESPLAZADOR O PLOTADOR CON MONTAJE LATERAL

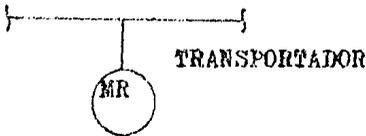


TRANSMISOR DE NIVEL DE PRESION DIFERENCIAL MONTADO AL TANQUE

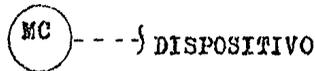


INDICADOR DE NIVEL TIPO PLOTADOR CON REGLITA O CINTA MONTADO ABAJO

MEZCLA O HUMEDAD (M)

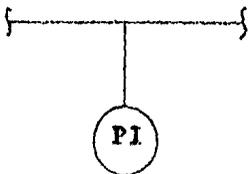


REGISTRADOR DE MEZCLA

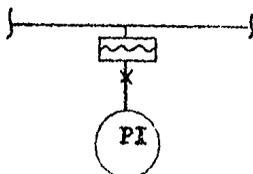


CONTROLADOR DE HUMEDAD

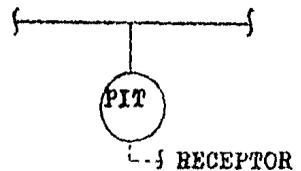
PRESION (P)



MANOMETRO



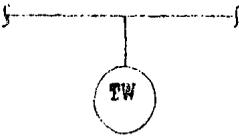
MANOMETRO CON SELLO QUIMICO CON PROTECTOR SISTEMA LLENO



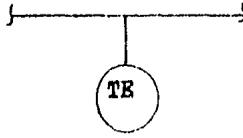
TRANSMISOR INDICADOR DE PRESION CON ELEMENTO TIPO MEDIDOR DE ESFUERZOS

H) Símbolos de elementos primarios (continuación)

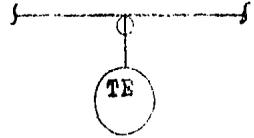
TEMPERATURA (T)



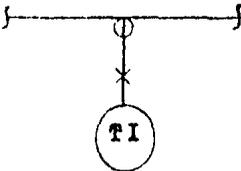
TERMOPOZO DE PRUEBA



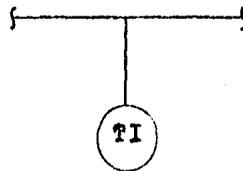
ELEMENTO PRIMARIO DE
TEMPERATURA SIN TERMO
POZO



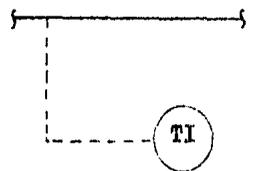
ELEMENTO PRIMARIO DE
TEMPERATURA CON TERMO
POZO



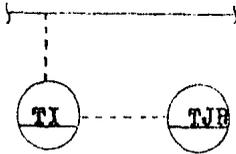
INDICADOR DE TEMPE
RATURA TIPO SISTEMA
LLENO CON TERMOPOZO



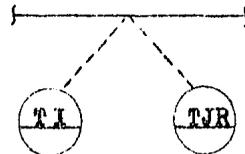
TERMOMETRO BIMETALICO
O VIDRIO O CUALQUIER
OTRO TIPO NO CLASIFI
CADO INDICADOR DE TEM
PERATURA



TERMOPAR O BULBO DE
RESISTENCIA CONECTA
DO A UN INDICADOR



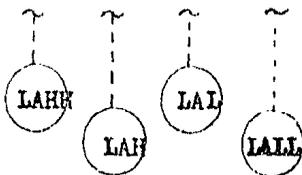
TERMOPAR SENCILLO CON SEÑAL
A UN INDICADOR MULTIPUNTO
DE TEMPERATURA



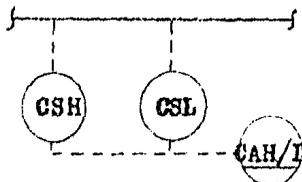
TERMOPAR DOBLE CONECTADO
A UN INDICADOR Y UN REGIS
TRADOR MULTIPUNTO DE TEM
PERATURA

1) Símbolos de función

ALARMA (A)

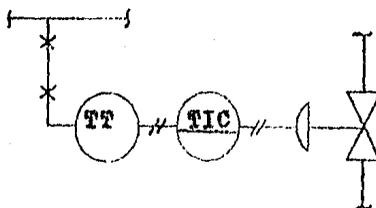


ALARMAS SEPARADAS PARA NIVEL MUY ALTO, ALTO, BAJO Y MUY BAJO

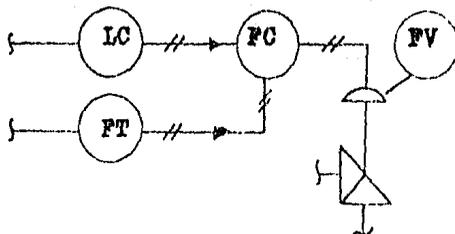


ALARMA ANUNCIADOR COMUN PARA ALTA Y BAJA CONDUCTIVIDAD

CONTROL



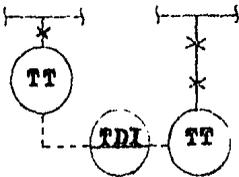
CONTROLADOR INDICADOR DE TEMPERATURA



CONTROL EN CASCADA; CONTROLADOR DE FLUJO REAJUSTADO POR CONTROLADOR DE NIVEL

I) Símbolos de función (continuación)

DIFERENCIAL (D)

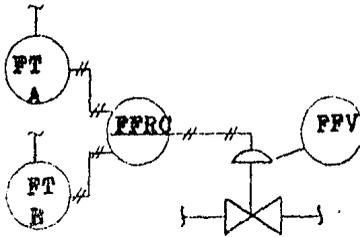


ALARMA

INDICADOR DE TEMPERATURA DIFERENCIAL

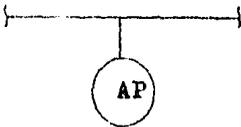
INTERRUPTOR DE ALTA PRESION DIFERENCIAL

RELACION (F)

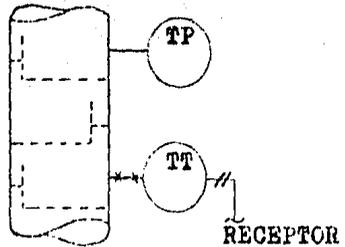


CONTROLADOR DE RELACION DE FLUJO CON REGISTRADOR DE RELACION DE FLUJO

PUNTO (P)



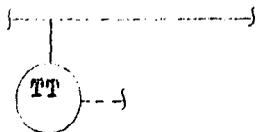
PUNTO DE PRUEBA PARA ANALISIS



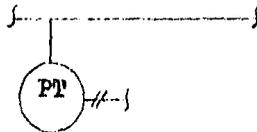
ALTERNATIVA DE LOCALIZACION DE SENSOR TRANSMISOR DE TEMPERATURA EN TORRE DE DESTILACION

I) Símbolos de función (continuación)

TRANSMISION (T)

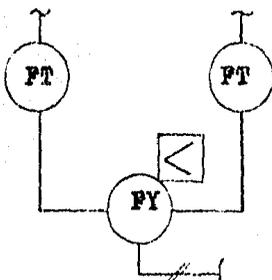


TRANSMISOR DE TEMPERATURA CON SALIDA ELECTRICA



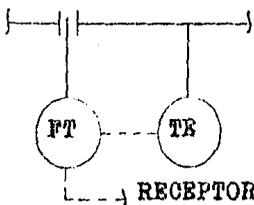
TRANSMISOR DE PRESION CON SALIDA NEUMATICA

CALCULO (Y)

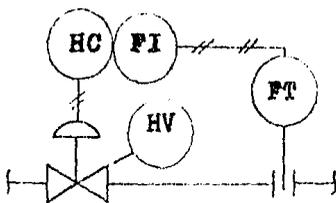


SELECTOR DE BAJA SEÑAL

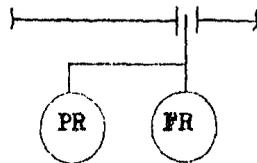
J) Sistemas varios



RECEPTOR
TRANSMISOR DE FLUJO
COMPENSADO POR TEMPERATURA



ESTACION DE CONTROL
MANUAL CON INDICADOR DE
FLUJO



REGISTRADOR DE FLUJO
CON REGISTRADOR DE
PRESION ESTATICA

C A P I T U L O I I I

FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO.

En este capítulo se da una introducción a los principios de control automático los cuales pueden ser provechosos en la selección, aplicación y ajuste de equipo de control automático.

Terminología Básica del Control Automático. En el capítulo anterior se definieron algunos términos relacionados con el control automático de procesos; términos complementarios son definidos a continuación.

ACTUADOR. Es el elemento final de control sobre el cual la señal de control actúa para modificar las condiciones del proceso y corregir el error existente.

AMORTIGUAMIENTO. Es la progresiva reducción o supresión de la oscilación de un sistema.

AMPLIFICADOR. Frecuentemente tanto la señal de error como la salida del controlador no tienen un nivel de potencia adecuado para manejar el proceso, cuando sucede esto se emplea como elemento de enlace entre el controlador y el proceso un dispositivo que es conocido como amplificador de potencia.

BANDA PROPORCIONAL. Se define como el cambio en el valor de la señal de medición que origina que la salida del controlador cambie en todo su rango y en consecuencia provoque un desplazamiento total del elemento final de control.

CAPACITANCIA. Es una medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía o de material con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia. No debe confundirse con capacidad del proceso que representa simplemente las características propias-

de almacenar energía o material.

COMPARADOR. Es el dispositivo que hace la comparación entre la señal correspondiente a la referencia y la señal correspondiente a la salida del elemento de medición o transmisor, la señal de salida del comparador es la señal de error.

CORRIMIENTO. Es la diferencia entre el valor del punto de control y el valor deseado de la variable controlada.

DESVIACION O ERROR. Es la diferencia entre la variable controlada y el valor deseado de la variable.

ESTADO ESTACIONARIO. Significa que las variables no son función del tiempo.

EXACTITUD. Es el límite dentro del cual puede variar el valor establecido de la variable, generalmente se expresa en porcentaje de la escala total.

MEDIO CONTROLADO. Es la energía del proceso o el material con el cual la variable es medida y controlada.

MODO DE CONTROL. Es la forma en que el controlador maneja la señal de entrada de manera que se establezca la acción correctiva de un sistema de control con respecto a la desviación (error) entre la magnitud medida y la magnitud del punto de referencia.

OSCILACION O CICLAJE. Es un cambio periódico de la variable controlada de un valor a otro.

PERTURBACION. Es una señal de entrada no deseada que afecta el valor de la variable controlada.

PUNTO DE AJUSTE. Es la posición a la cual se ajusta el mecanismo que mueve el índice de control. Esta posición da la señal de referencia para inducir una acción específica en el proceso.

PUNTO DE CONTROL. Es el valor de la variable controlada mantenido por el controlador.

RANGO. Son los límites entre los cuales una señal eléctrica, neumática, mecánica u otra señal puede ser indicada, registrada, medida o transmitida.

RANGO DE OPERACION. Es la diferencia algebraica entre los valores más altos y más bajos.

REPTIBILIDAD. Es la estrechez de correlación entre un número de medidas consecutivas de una medida para un mismo valor bajo las mismas condiciones de operación.

RESPUESTA. Es una señal causada por una reacción de la variable.

SENSIBILIDAD. Es la rapidez de respuesta en la señal de salida con respecto a un cambio específico de la señal de entrada.

SISTEMA DE MEDICION. Consiste en aquellos elementos de un controlador automático los cuales comunican al sistema de control ya sea el valor de la variable controlada, el error o la desviación.

TIEMPO MUERTO. Es el tiempo que tarda un elemento primario en detectar un cambio en la variable controlada.

TIEMPO DE RESPUESTA. Es el tiempo en la medida de una respuesta.

UNIDAD DE POTENCIA. Es la porción del sistema de control que proporciona potencia al elemento final de control.

VALOR DESEADO. Es el valor en el cual se desea mantener la variable controlada.

VARIABLE CONTROLADA. Es una característica o condición del sistema que es medida por los elementos de medición y comparada con el valor deseado de la variable.

VARIABLE MANIPULADA. Es la variable sobre la cual actúa el elemento final de control para mantener la variable controlada de un estado estacionario o punto de control.

Algunos otros términos empleados en el control automático son definidos durante el desarrollo del capítulo.

Consideraciones Básicas de Control. Básicamente el control automático es relativamente fácil de comprender. En muchas maneras es casi parecido al control manual. Sin embargo, el controlador automático no necesariamente repite lo que el operador humano hace manualmente. El controlador automático puede computar y registrar pero no puede razonar para nuevas condiciones ; no puede pronosticar más allá de los datos estructurados dentro de él, lo que constituye las diferencias básicas entre el control manual y el control automático.

La mayor parte de los procesos, sean controlados manualmente o automáticamente, pueden desempeñarse bien y eficientemente solo cuando los valores de ciertas variables de proceso están contenidas dentro de ciertos límites dados. Estas variables de proceso pueden cambiar por lo que la función fundamental de un proceso de control es manejar la relación de energía (o material) recibida a producida así como también conservar las variables de proceso dentro de límites deseados.

Un controlador automático puede ser definido como un mecanismo que mide el valor de una variable de proceso y opera para limitar la desviación de esa variable del punto de ajuste.

Una variable de proceso que es conservada dentro de los límites es denominada variable controlada. El controlador automático regula la variable controlada haciendo correcciones a otra variable de proceso la cual es denominada variable manipulada. En la Fig. III.1 se representa un ejemplo típico de un proceso de intercambio de calor; el cual se tomará como base para posteriores definiciones.

En este proceso, la variable controlada es la temperatura-

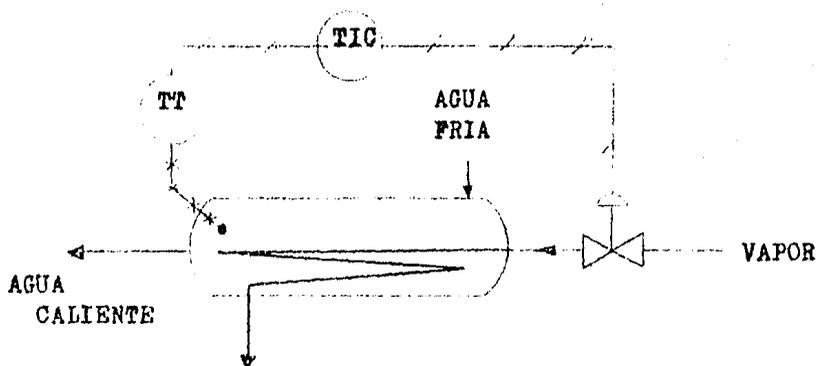


Fig. III.1 Proceso típico de intercambio de calor

del agua caliente. El punto de ajuste es la temperatura deseada del agua caliente. La variable manipulada es el flujo de vapor. Cualquier cambio en la apertura de la válvula de vapor dictada por el controlador automático comprende una corrección a la variable manipulada. Así, es posible conservar o cambiar la temperatura del agua caliente manejando el balance de energía recibida a energía producida.

La justificación de porqué se deben controlar automáticamente los procesos industriales, involucra normalmente los siguientes factores:

- Aumentar la productividad
- Reducir los costos de producción
- Obtener productos de mayor calidad
- Proporcionar seguridad en la operación del proceso.

Un sistema de control automático se integra con cinco partes principales:

- 1.- El proceso
- 2.- Los medios de medición
- 3.- El detector de error
- 4.- El controlador
- 5.- El elemento final de control

Los cinco componentes antes mencionados se pueden integrar de dos maneras:

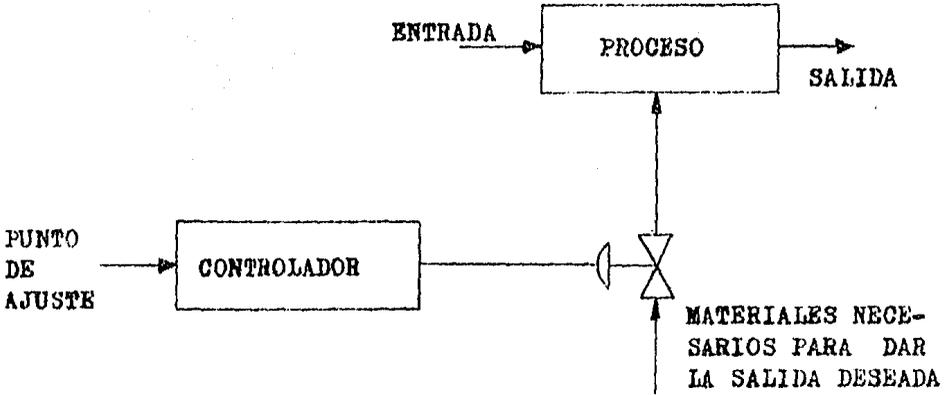
- a) En circuito abierto
- b) En circuito cerrado.

Sistemas de control de circuito abierto. Este sistema simplemente involucra la realización de un estimado de la forma de acción necesaria para obtener un objetivo deseado y su base radica en la predicción. No se hace una comprobación (no hay retroalimentación) para determinar si la acción correctiva ha cumplido con el objetivo deseado. En la Fig. III.2a se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de circuito abierto.

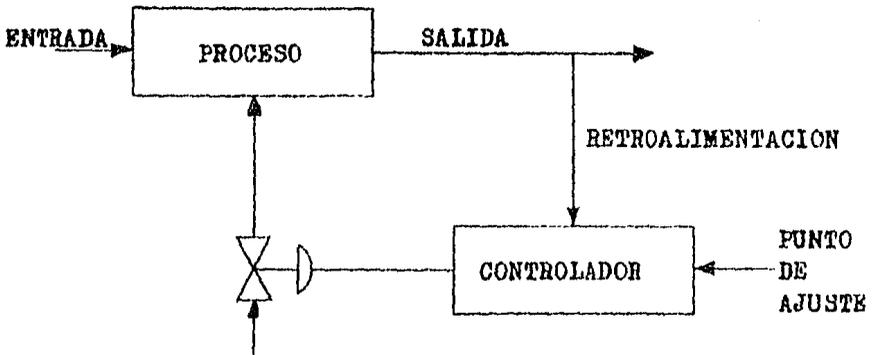
La exactitud del sistema depende de la calibración; en presencia de perturbaciones no cumple su función asignada.

Sistemas de control de circuito cerrado. La diferencia entre un sistema de control de circuito abierto y un sistema de control de circuito cerrado estriba en que éste último hace una comparación final y continua (si hay retroalimentación) sobre los resultados deseados y actual, y si no son iguales (existe un error), el controlador opera para corregir el error a través de un elemento final de control. En la Fig. III.2b se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de circuito cerrado.

Comparación entre estos dos sistemas. Una ventaja del sistema de circuito cerrado es que el uso de la retroalimentación hace al sistema en su respuesta relativamente insensible a perturbaciones externas y a variaciones internas de parámetros del sistema. De este modo es posible utilizar componentes relativamente sencillos y económicos y lograr la exactitud de control requerida en determinado proceso, mientras que esto sería difícil en el caso de un circuito abierto.



(a)



(b)

Fig. III.2 Sistemas de control (a) de circuito abierto, (b) de circuito cerrado

Desde el punto de vista estabilidad, en el sistema de control de circuito abierto es más fácil de lograr; por otro lado, en los sistemas de circuito cerrado la estabilidad siempre es importante por la tendencia a sobre corregir errores que pueden producir errores de amplitud variable o constante.

Hay que recalcar que para sistemas en los que las entradas son conocidas previamente y en los que no hay perturbaciones es preferible utilizar el control de circuito abierto. Los sistemas de control de circuito cerrado tienen ventajas si se presentan perturbaciones no previsibles y/o variaciones imprevisibles de componentes del sistema. El circuito de control cerrado es por lo anterior el más utilizado.

Modos de control. El modo de control o la acción de control es la forma en la cual un sistema de control hace correcciones para mantener el proceso dentro del ajuste deseado.

Los instrumentos modernos de control industrial están usualmente fabricados para producir una o una combinación de las siguientes acciones o modos de control:

- 1.- Dos posiciones (on-off)
- 2.- Flotante
- 3.- Integral
- 4.- Derivativo
- 5.- Proporcional
- 6.- Proporcional más Integral
- 7.- Proporcional más Derivativo
- 8.- Proporcional más Integral más Derivativo

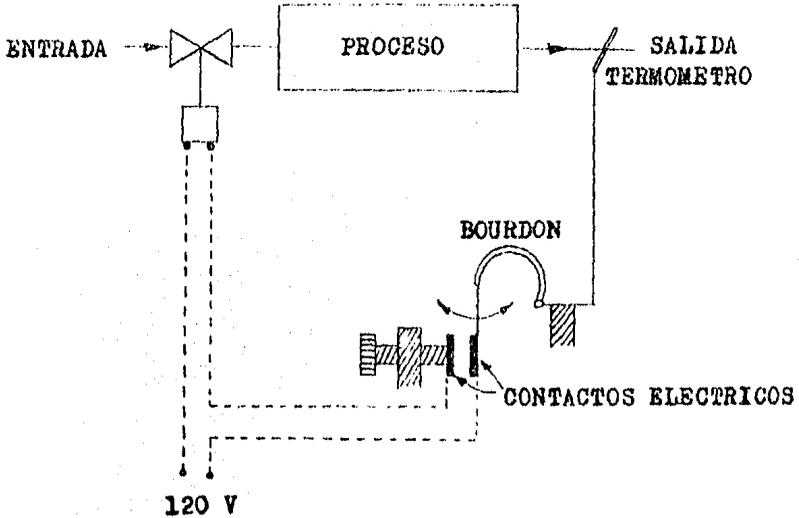
Cada modo de control tiene sus ventajas y limitaciones características; en general, lo más difícil en un proceso es el control, por tanto, es muy importante conocer completamente las características de cada modo de control para hacer una selección adecuada.

1.- Dos posiciones (on-off). En este modo de control el elemento final de control adopta una de dos posiciones extremas. Una válvula de control estará completamente cerrada o completamente abierta dependiendo si el error con respecto al punto de ajuste (set-point) es positivo o negativo. Para que tal cosa suceda, el actuador de dicha válvula debe recibir solo dos valores diferentes de presión, lo cual implica que la salida del controlador sea la mínima o máxima presión posible.

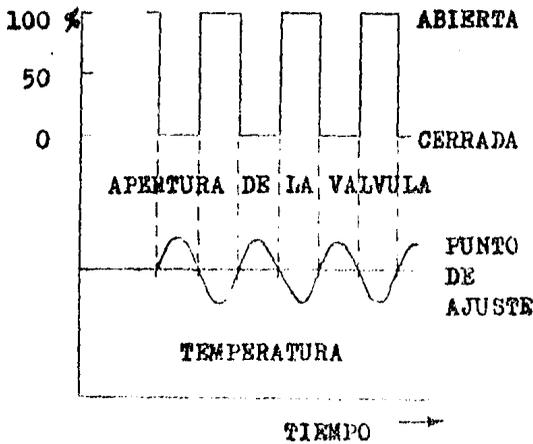
Puesto que las dos posiciones del elemento final de control son usualmente abierta o cerrada, este modo es frecuentemente llamado control on-off. Un ejemplo típico de un sistema de control eléctrico es mostrado en la Fig. III.3a. Cuando la temperatura en el proceso de intercambio de calor de la Fig. III.1 está por arriba del punto de ajuste, el contacto se cierra y la válvula se cierra; cuando la temperatura está por abajo del punto de ajuste, el contacto se abre y la válvula abre. En la Fig. III.3b se muestra la posición de la válvula en función del tiempo cuando la temperatura se desvía arriba y abajo del punto de ajuste.

La señal de control oscila constantemente alrededor del punto de ajuste y no se puede lograr una corrección exacta, la corrección siempre es mayor o menor que el error detectado.

Este modo de control es el más simple y económico y es satisfactorio cuando los atrasos de transmisión y tiempo muerto son despreciables y cuando los cambios de carga no son grandes ni frecuentes.



(a)



(b)

Fig. III.3 (a) Sistema de control típico de dos posiciones operado eléctricamente. (b) Relación entre la posición de la válvula y la variable controlada en la acción de dos posiciones.

Control de dos posiciones con zona diferencial (Differential Gap). Esta es una variación común del control de dos posiciones.

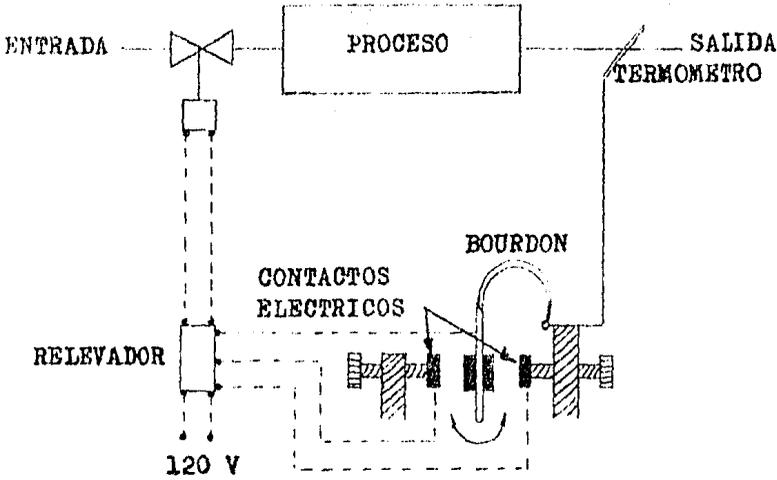
En esta variación existe una zona diferencial alrededor del punto de ajuste. Cuando la variable medida excede el límite superior de la zona, el elemento final de control se cierra y permanecerá cerrado hasta que la variable medida llegue abajo del límite inferior. El elemento final de control permanecerá abierto hasta que la variable medida exceda de nueva cuenta el límite superior. En la Fig. III.4a se muestra un sistema de control de dos posiciones con zona diferencial operado eléctricamente y en la Fig. III.4b se muestran las correcciones características de la válvula cuando la variable temperatura pasa a través de la zona diferencial. Hay que notar que cuando la variable está dentro de la zona diferencial, no ocurre acción alguna en la válvula.

Este modo de control se utiliza para evitar arranques y paros muy frecuentes del equipo.

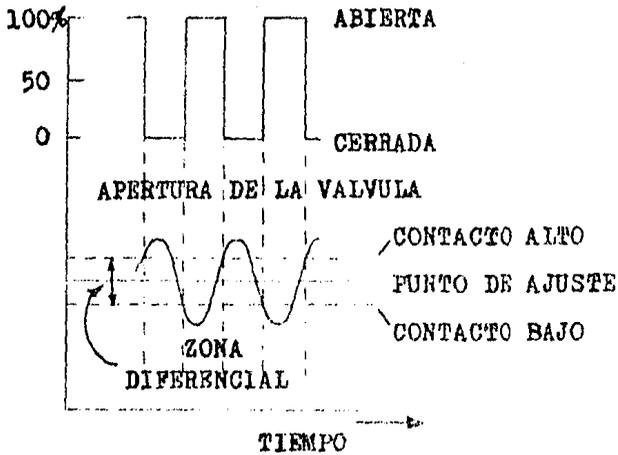
Control de multiposiciones. En esta acción de control, el elemento final de control es movido a una de tres o más posiciones determinadas, cada una correspondiente a un rango definido de valores de la variable controlada. El instrumento de control de la Fig. III.4 puede producir una acción de tres posiciones si es usado con un elemento final de control que tome una tercera posición cuando el valor de la variable esté dentro de la zona diferencial. Las correcciones características de la válvula en el control de tres posiciones se muestra en la Fig. III.5.

Puesto que el control de multiposiciones es capaz de hacer un número limitado de correcciones, ésta acción de control raramente produce una corrección exacta para cualquier condición de

CARGA .



(a)



(b)

Fig. III.4 (a) Sistema de control típico de dos posiciones con zona diferencial operado eléctricamente. (b) Relación entre la posición de la válvula y la variable controlada en este modo de control.

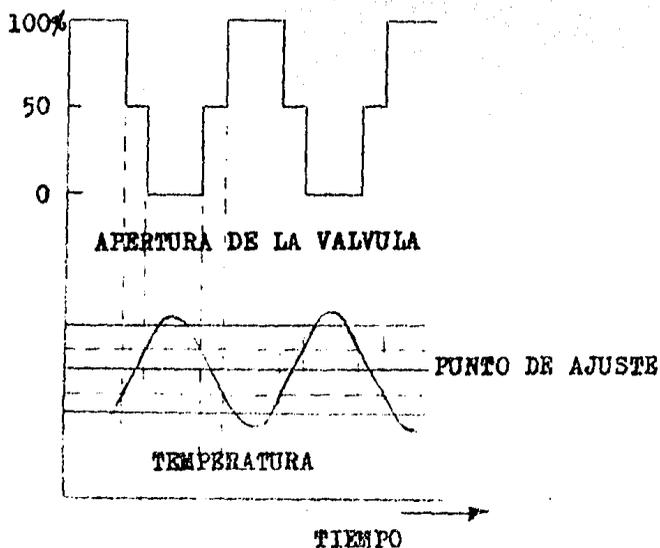


Fig. III.5 Relación entre la posición de la válvula y la variable controlada en la acción de control de multiposiciones.

2.- Flotante. En este modo de control existe una predeterminada relación entre la desviación y el porcentaje de viaje del elemento final de control. El elemento final de control se mueve relativamente despacio hacia cualquiera de sus dos posiciones extremas o flota en una posición parcialmente abierta dependiendo en si la variable controlada está arriba o abajo del punto de ajuste. Los tres tipos comunes de acción flotante se describen a continuación:

Flotante de una sola velocidad. En esta acción de control-

el elemento final de control se mueve a una sola velocidad sin reconocer la magnitud de la desviación y reacciona solamente en el tiempo de la desviación. Este tipo de control se puede realizar con el mismo equipo de la Fig. III.3a utilizando una válvula motorizada eléctricamente. Cuando la temperatura está arriba del punto de ajuste, la válvula puede correr hacia su posición cerrada a una sola velocidad (Fig. III.6a). Cuando la temperatura está abajo, la válvula puede correr hacia su posición abierta a la misma velocidad.

En la práctica, esta acción de control es poco utilizada ya que como en el control de dos posiciones, produce continuamente control cíclico.

Flotante de una sola velocidad con zona neutra. Este tipo de control opera de la misma manera con excepción de que tiene una zona neutra que se emplea para evitar las idas y vueltas de demasiado frecuentes del motor. Cuando el valor de la variable controlada está dentro de la zona neutra entre la postura del contacto, no hay contacto y la válvula queda inmóvil; su porcentaje de carrera es cero. Es posible producir en este sistema de control casi una corrección exacta para cualquier condición de carga. Por tanto, este sistema puede reducir la desviación casi a cero y puede, si se ajusta correctamente, eliminar el movimiento de la válvula, excepto para siguientes cargas o cambios en el punto de ajuste. Véase Fig. III.6b.

Flotante con varias velocidades. En esta acción de control el elemento final de control es movido a dos o más velocidades; cada velocidad correspondiente a un definido rango de valores de desviación (Fig. III.6c). En otras palabras, a cual de diferentes velocidades se mueve el elemento final de control, depende de la magnitud de la desviación.

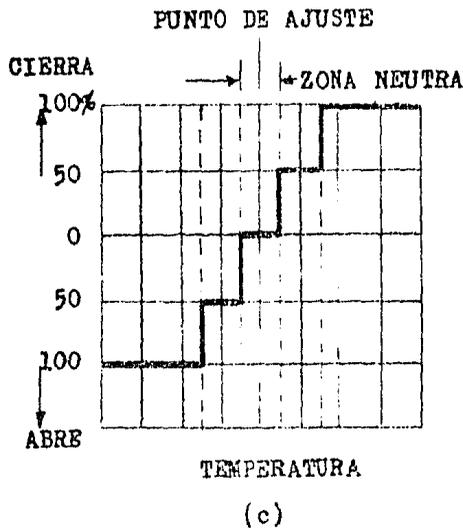
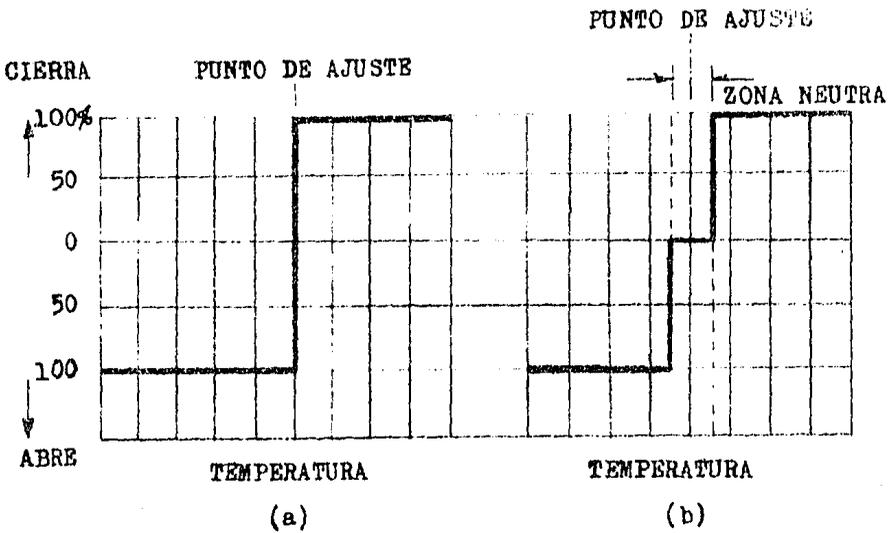


Fig. III.6 (a) Relación entre la proporción de viaje de la válvula y la variable controlada en la acción flotante de una sola velocidad. (b) Una sola velocidad con zona neutra. (c) con varias velocidades.

3.- Integral o flotante de velocidad proporcional. En la Fig. III.7 se muestra la relación característica temperatura-posición de la válvula en la acción de control integral (velocidad proporcional). Notar que la relación en la carrera de la válvula es proporcional a la desviación. Por ejemplo, cuando la desviación es máxima (tiempo 1/2 min), la velocidad de la carrera de la válvula también es máxima. El factor de mayor importancia es que mientras la desviación continúa, la corrección a la posición de la válvula también continúa.

El modo de control integral responde tanto a la amplitud como al tiempo de duración de la desviación. Mientras mayor sea la desviación y más tiempo dure, mayor será la acción de la velocidad proporcional. Así, este modo de control continúa en operación hasta lograr una corrección exacta para cualquier cambio de carga. Esta es una ventaja única del modo de control integral sobre cualquier otro modo.

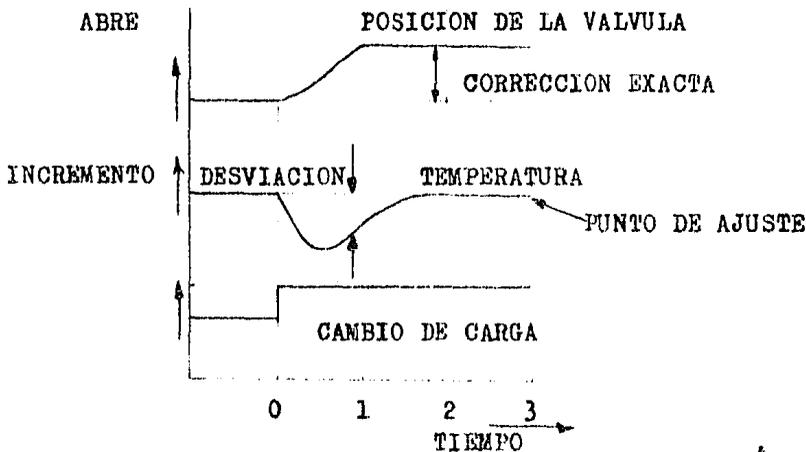


Fig. III.7 Acción del modo de control integral.

Un conocimiento de las ventajas de este modo de control es importante porque, cuando se combina con el modo de control proporcional, es usado para producir el popular modo de control -- proporcional más integral.

El modo de control integral se aplica en donde se requiere mayor precisión en la regulación de la variable controlada y en donde sea necesario eliminar las limitaciones del control proporcional que a continuación se describirá.

4.- Proporcional. En la acción de control proporcional existe una continua relación lineal entre el valor de la variable -- controlada y la posición del elemento final de control (dentro la banda proporcional). En otras palabras, la válvula se mueve la misma magnitud para cada unidad de desviación.

En la Fig. III.8 se muestra la relación característica entre la posición de la válvula y la variable controlada para este modo de control. Notar que la posición de la válvula cambia en exacta proporción a la desviación. También se muestra como -- este modo de control responde solo a la magnitud de la desviación y es insensible a la duración de la desviación. Notar que a 2 y 4 minutos, cuando la temperatura regresa a su valor inicial, la válvula también regresa a su valor inicial; o sea, no existe corrección en la válvula sin desviación.

Banda proporcional. Es el cambio en el valor de la variable controlada que es necesario para provocar el desplazamiento total del elemento final de control. En la Fig. III.8 se muestra la relación entre la posición de la válvula y la temperatura para dos diferentes bandas proporcionales.

La banda proporcional de un instrumento particular es ---- usualmente expresado como un porcentaje de su rango total.

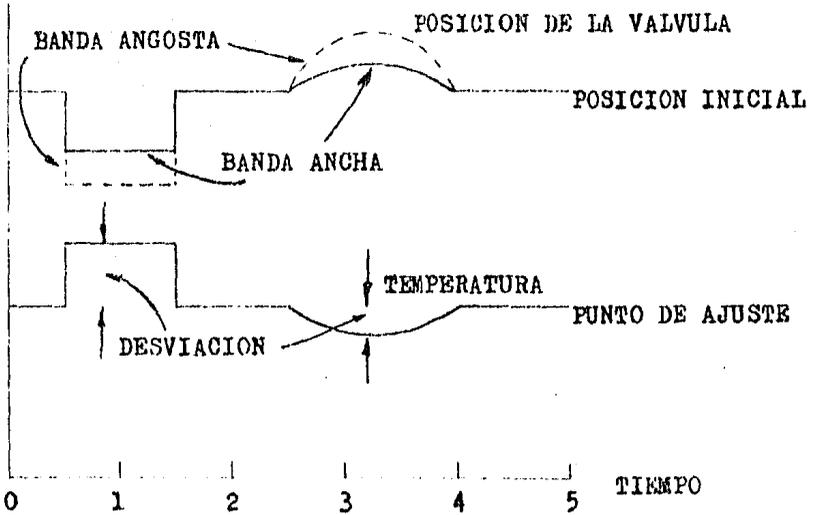


Fig. III.8 Relación entre la posición de la válvula y la variable controlada bajo la acción proporcional

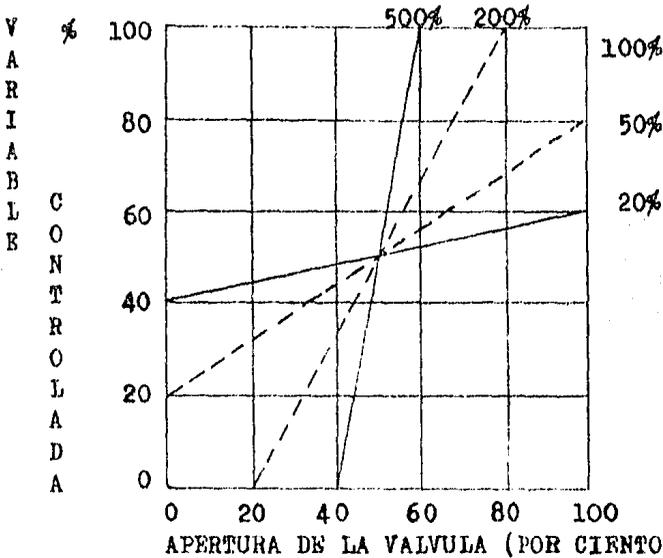


Fig. III.9 Relación entre el viaje de la válvula y la variable controlada bajo varios valores de banda proporcional.

La ecuación que describe el funcionamiento del controlador proporcional es:

$$Y = \frac{1}{B} X + b$$

En donde B es la banda proporcional; Y es la salida; b es la ordenada al origen (generalmente 50%) y X es el error que está dado por la ecuación:

$$X = P - E$$

Siendo E la variable controlada y P el punto de ajuste.

Otro concepto importante para expresar la proporcionalidad es la ganancia o sensibilidad. Este término describe la relación entre la entrada y la salida de un dispositivo de control. Matemáticamente la ganancia es recíproca de la banda proporcional:

$$G = \frac{1}{B} \times 100$$

De la ecuación anterior se ve que a mayor ganancia la banda proporcional es más estrecha y viceversa. La Fig. III.9 ayuda a explicar los conceptos relacionados al modo de control proporcional.

Se puede notar que cuando la banda proporcional es más de 100%, es imposible abrir o cerrar completamente la válvula, aún cuando la variable controlada se sitúe en cero o en el 100% de la escala del controlador.

En la Fig. III. 10 se muestra el comportamiento de la posición del elemento final de control para un proceso de control de temperatura en un intercambiador de calor. Inicialmente, el punto de ajuste está fijado en 100°. Al cambio de un minuto, ocurre un cambio de carga. Notar que la temperatura no regresa a su valor inicial por control proporcional, pero balancea a un nuevo valor de 90°.

El modo de control proporcional puede producir una corrección exacta para solo una condición de carga; para otras cargas

siempre existirá alguna desviación. Este error es llamado desviación sostenida (offset) y es una característica inherente del modo de control proporcional. En la Fig. III. 10 se observa que la desviación sostenida para las unidades de tiempo de 3 a 8 minutos fué de 10° .

Esta desviación puede ser eliminada por restablecimiento manual al punto de ajuste. En la Fig. III.10 a los 8 minutos el punto de ajuste fué manualmente restablecido para llevar la temperatura al valor deseado de 100° .

Se debe enfatizar sin embargo, que tal restablecimiento manual elimina la desviación sostenida para un solo valor de carga. El factor de fundamental importancia en relación al modo de control proporcional es que es un poderoso modo de control estabilizante, capaz de un amplio ajuste y aplicación, pero tiene la inconveniente característica de la desviación sostenida.

5.- Derivativo (rate). La acción del control derivativo se ve en la Fig. III.11. En este modo de control, la salida del controlador es proporcional a la variación del error con respecto al tiempo:

$$Y = \frac{R}{B} \frac{dx}{dt}$$

donde:

B = banda proporcional

R = tiempo derivativo

Tiempo derivativo es el tiempo requerido por la salida del modo proporcional para duplicar la salida del controlador derivativo y es una indicación directa de cantidad de anticipación dada para un error; es decir, que las unidades de la acción derivativa están en función de la acción proporcional. De hecho, la acción derivativa nunca existe sola sino en combinación con el control proporcional o proporcional más integral.

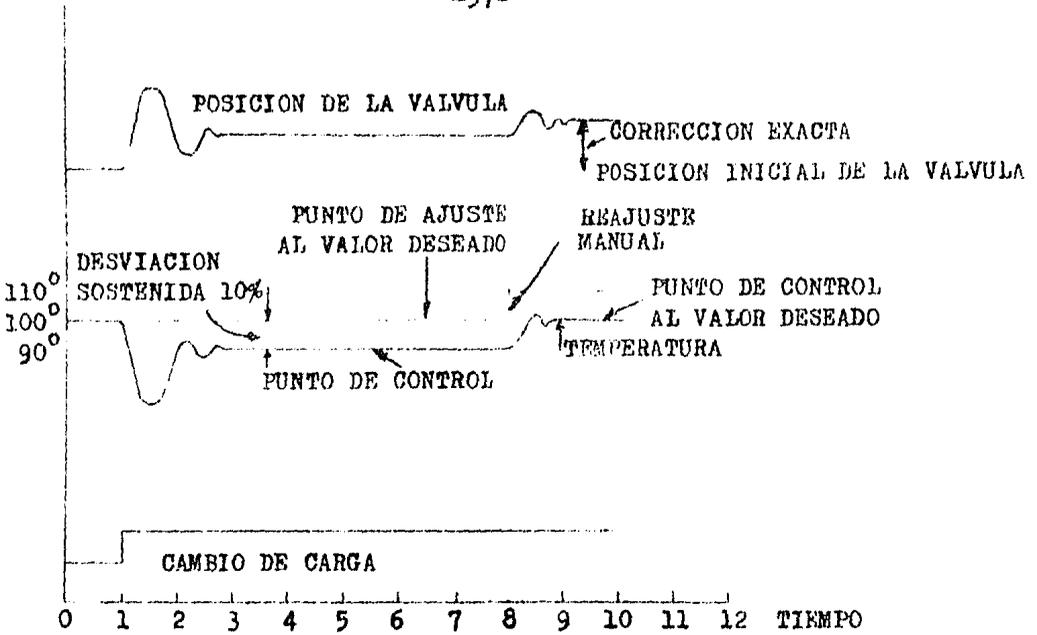


Fig. III.10 Ilustración de la desviación sostenida (offset) de la acción de control proporcional.

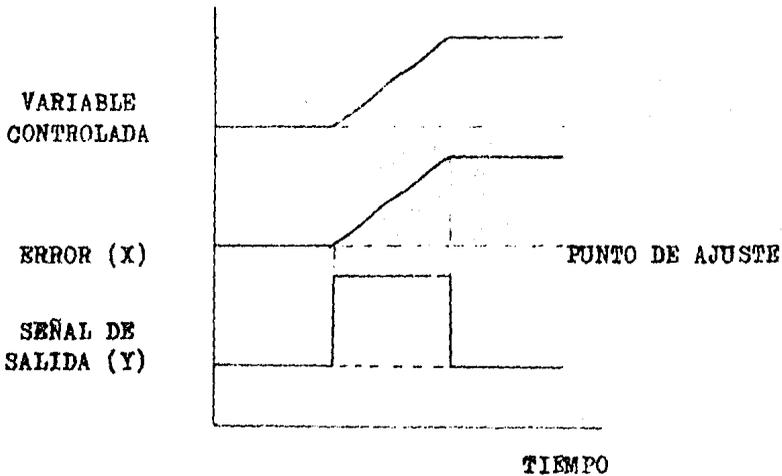


Fig. III.11 Acción del control derivativo

En la ecuación anterior se puede notar que la derivada actuará solo cuando exista velocidad de cambio en la variable controlada y que mientras más rápido sea ese cambio, mayor será la acción aplicada por el controlador. En otras palabras, el movimiento del elemento final de control es proporcional a la velocidad de cambio de la variable controlada.

La derivada se aplica con el control proporcional y/o integral en procesos donde existe tiempo muerto y se desea una estabilización más rápida con mínima desviación, características que, en este caso el control proporcional con integral no se pueden conseguir.

6.- Proporcional más integral. Se tiene entendido que la única ventaja del modo de control integral es la continua corrección en la posición de la válvula mientras persiste la desviación. De este modo, adicionando el modo de control integral al modo de control proporcional, la indeseable característica de la desviación sostenida del modo de control proporcional puede ser superada. La adición del modo de control integral hace automáticamente el reajuste que se hacía manualmente. Este modo de control combinado es usualmente llamado integral (reajuste automático o simplemente reajuste).

La mejor manera de explicar la operación de este modo de control combinado es describir separadamente las componentes del movimiento de la válvula debido a cada acción de control y observar lo que cada una contribuye a la posición resultante de la válvula.

La Fig. III.12 muestra la componente del movimiento de la válvula debido al modo de control proporcional combinado con el modo de control integral.

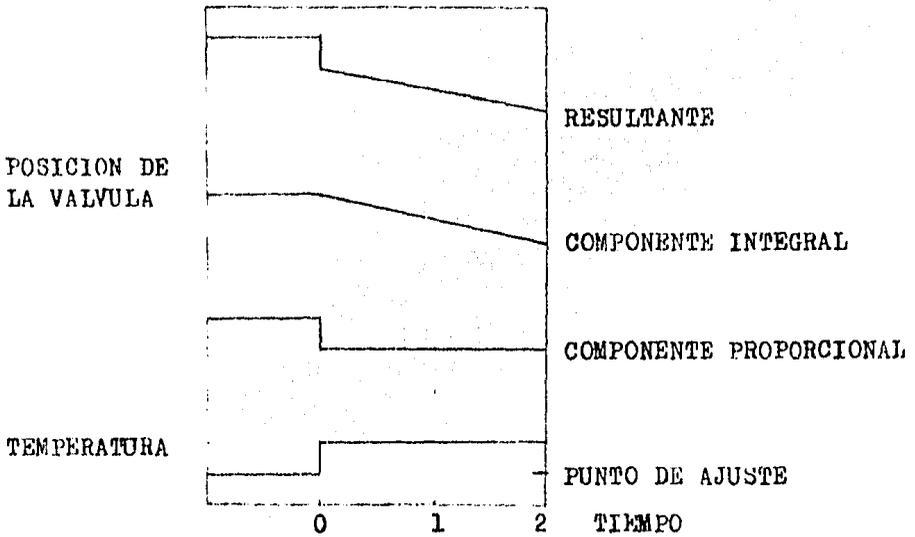


Fig. III.12 Acción de control proporcional más integral.

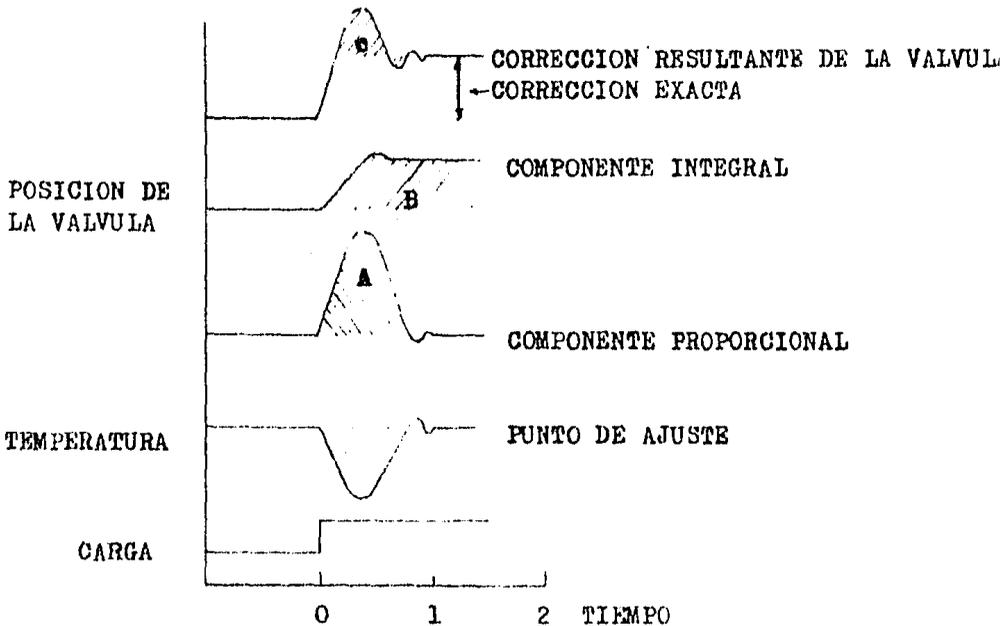


Fig. III.13 Relación entre la posición de la válvula y la temperatura (variable controlada) bajo la acción de control combinada proporcional más integral siguiendo un cambio de carga al tiempo cero.

Inicialmente ocurre una desviación. La componente debido a la acción proporcional ocurre instantáneamente; pero, a causa de la componente integral, la válvula continúa moviéndose a velocidad constante.

La Fig. VII.13 muestra un análisis similar de las componentes de la posición de la válvula bajo un control de proceso --- real. Inicialmente ocurre un incremento en la carga. A causa de la acción proporcional, una corrección grande es impuesta en la válvula a medida que la temperatura se desvía y posteriormente es retirada a medida que la temperatura regresa al punto de --- ajuste. Pero debe notarse que la corrección exacta final es aplicada completamente por la componente de la acción integral. El área sombreada A, bajo la curva de la componente proporcional, representa la energía añadida por la acción proporcional. El área B representa la energía añadida por la acción integral. El área C, bajo la posición resultante de la válvula, representa el exceso de corrección que es aplicada y retirada por la acción proporcional.

Los hechos de mayor importancia en conexión con el modo de control proporcional más integral son que el control sin el error de la desviación sostenida, es posible para todas las condiciones de carga, pero la acción integral por sí sola, no contribuye a la estabilidad del circuito de control.

7.- Proporcional más derivativo. En este modo existe una continua relación lineal entre la velocidad de cambio (es decir, primero derivativa) de la variable controlada y la posición del elemento final de control. En otras palabras, el movimiento de la válvula es proporcional a la velocidad a la cual la variable está cambiando.

Un camino cómodo para explicar la acción proporcional más-

derivativo, es describiendo separadamente las componentes del movimiento de la válvula debido a cada modo, como se muestra en la Fig. III.14.

Aquí se observa que el tamaño de la corrección de la acción derivativa es proporcional a la velocidad de cambio (pendiente) de la curva variable controlada. Cuando la variable está cambiando lo más rápido (tiempo cero), la corrección de la acción derivativa es la más grande. Cuando la variable es invertida (tiempo 0.4), su velocidad de cambio es cero; así la componente de la acción derivativa también es cero. Cuando la variable está cambiando fuera del punto de ajuste, la acción derivativa agrega la energía representada por el área A para oponerse a este cambio. Cuando la variable está cambiando alrededor del punto de ajuste, la acción derivativa sustrae la energía representada por el área B para oponerse a este cambio. Así, la acción derivativa tiene un gran efecto estabilizante sobre el control. Hay que notar sin embargo, que la variable deja de cambiar (tiempo 1), y solo la corrección de la válvula debido a la acción proporcional es permitida. Así, la acción derivativa no tiene efecto directo sobre el error offset o desviación sostenida.

Los factores de primordial importancia en conexión con la acción derivativa son que para la oposición al cambio, la acción derivativa tiene un gran efecto estabilizante sobre el control pero no elimina la característica indeseable de la desviación sostenida de la acción proporcional.

El ajuste derivativo es expresado en tiempo derivativo, el cual es el tiempo en minutos por el cual la acción derivativa adelanta el efecto de la acción proporcional sobre el elemento final de control. Esto se muestra gráficamente en la Fig. III.15.

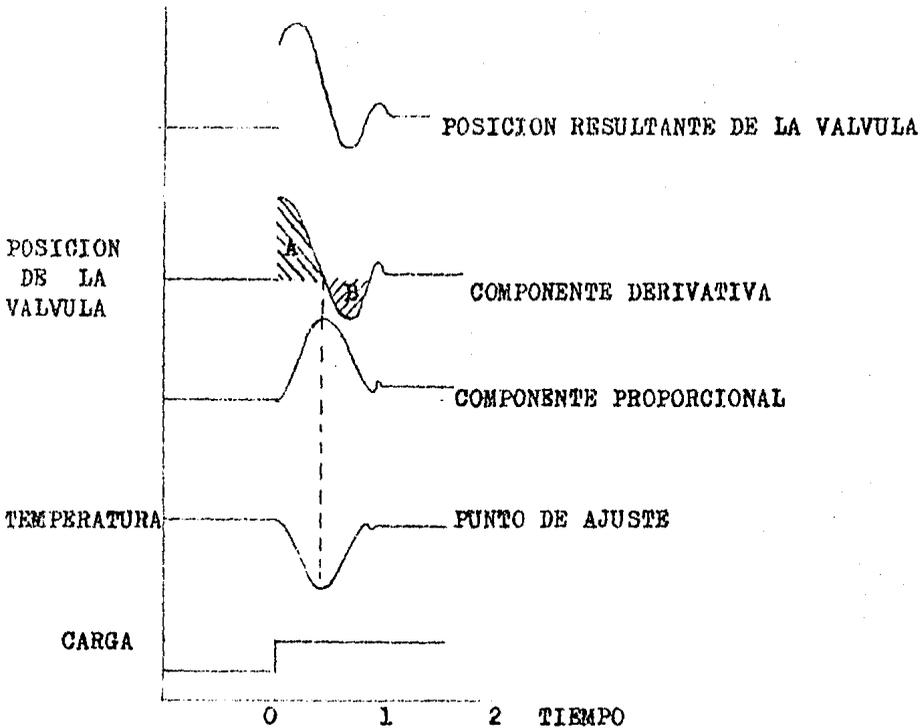


Fig. III.14 Relación de la posición de la válvula y la temperatura bajo la acción de control proporcional más derivativo siguiendo un cambio de carga al tiempo cero.

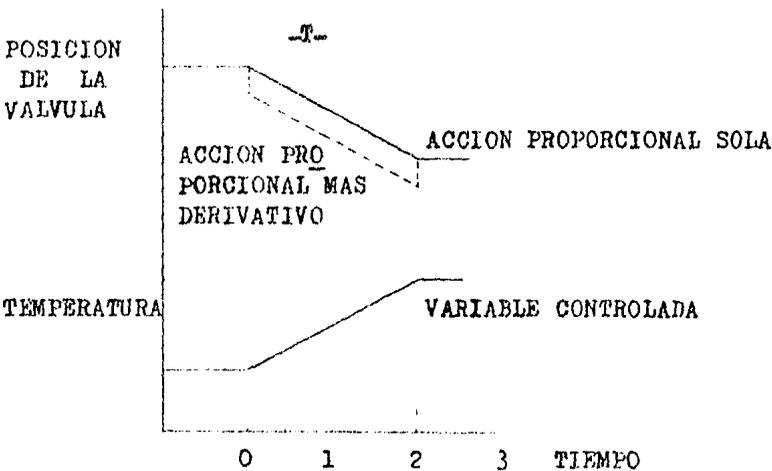


Fig. III.15 Representación gráfica del tiempo derivativo. La acción proporcional más derivativo produce la posición de la válvula antes que la acción proporcional sola. El tiempo derivativo es de 0.6 min.

La acción proporcional solo puede propucir la posición de la válvula mostrada por la línea sólida. Pero la acción proporcional más derivativa puede producir ésta misma posición pero - en un tiempo T menor que el de la acción proporcional sola, co- se muestra por la línea punteada. Este tiempo T , en minutos es- el tiempo derivativo. En la Fig. III.15 el tiempo derivativo es de 0.6 min.

8.- Proporcional más Integral más Derivativo. Los tres mo- dos de control previamente descritos pueden ser combinados en - un instrumento de control para obtener todas sus ventajas.

En la Fig. III.16 se muestra separadamente las componentes del movimiento de la válvula producido por cada acción después- de un cambio en la carga al tiempo cero. La Fig. III.16 sinteti- za las discusiones previas.

a). La componente de la acción proporcional corrige la po- sición de la válvula por una cantidad proporcional a la desvia- ción y así produce temporalmente un incremento de la energía re- cibida representada por el área A.

b). La componente de la acción integral (reset) corrige la posición de la válvula a una velocidad proporcional a la desvia- ción y así produce un incremento permanente de la energía reci- bida representada por el área D.

c). La componente de la acción derivativa corrige la posi- ción de la válvula por una cantidad proporcional a la velocidad de cambio de la variable controlada. La corrección derivativa - primero agrega la energía representada por el área B y después- sustrae la energía representada por el área C.

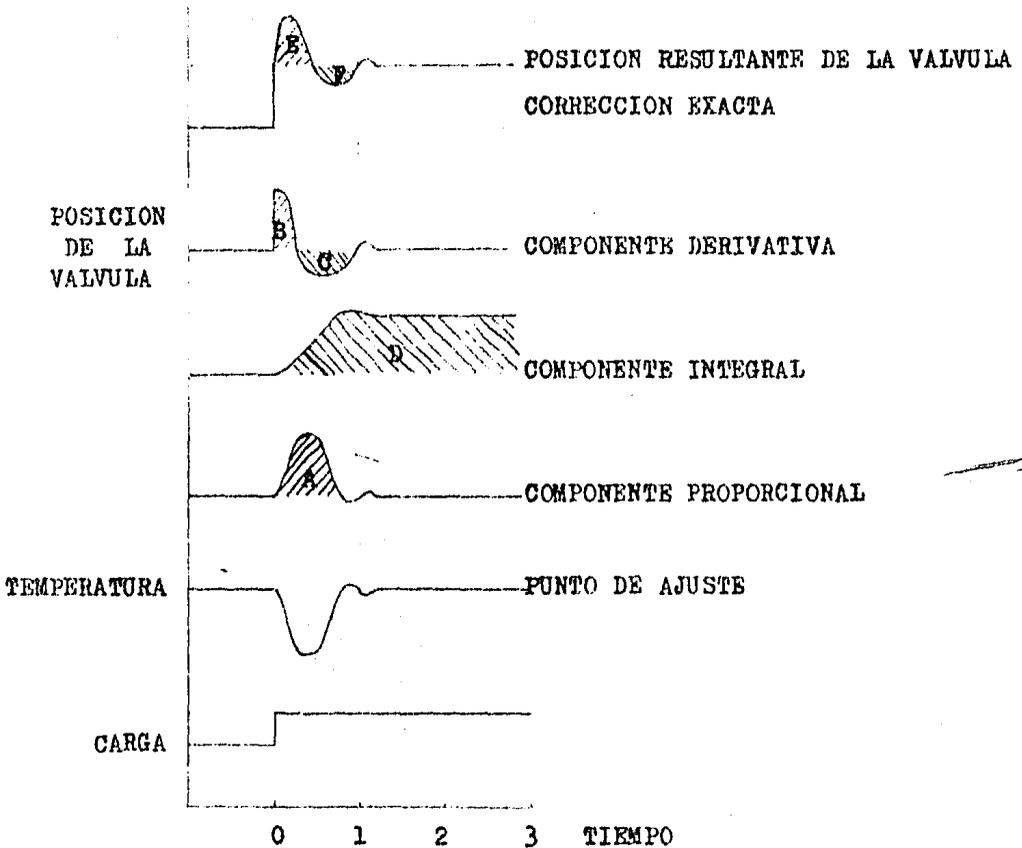


Fig. III.16 Relación de la posición de la válvula y la temperatura bajo la acción de control proporcional más integral más derivativo siguiendo un cambio de carga al tiempo cero.

La curva resultante de la posición de la válvula muestra - que, primero un exceso de corrección es aplicado para oponerse - al cambio de la variable fuera del valor deseado. Este exceso - de energía recibida está representado por el área E. Entonces, - una corrección exacta menor es aplicada a medida que la varia--

ble regresa al valor deseado (área F). Notar que finalmente la acción proporcional y derivativa no producen corrección alguna; solo la acción integral produce la nueva corrección de la válvula que exactamente satisface la nueva condición de carga.

Selección de Modos de Control. Probablemente la más difícil decisión en la instrumentación de un proceso es la selección del modo de control más adecuado y económico. La solución es usualmente un compromiso entre el control de calidad obtenido y el costo del sistema de control. El sistema de control debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia del proceso; pero no debe incluir refinamientos más allá de los requeridos, o su costo puede ser excesivo. Pero si se tiene alguna duda, debe seleccionarse una instrumentación completamente adecuada, -- porque las pérdidas económicas debidas a una "sobreinstrumentación" son despreciables comparadas con las pérdidas en la calidad y cantidad del producto cuando se escatima en la selección del equipo de control.

En tal selección no hay sustituto para la experiencia adquirida en el control de procesos similares o iguales al proceso en estudio.

A continuación se hace un resumen de los modos de control más utilizados en el control de las variables fundamentales --- (flujo, nivel, presión y temperatura).

Flujo. El flujo es un proceso de respuesta rápida. Los mayores atrasos de tiempo ocurren en las secciones de transmisión y control del sistema: transmisor, válvula de control y línea de transmisión. El flujo de fluidos se regula siempre con la suma de los modos de control proporcional y reajuste automático, -- debido al requerimiento de alta precisión para balances de materia. La mayoría de los controles de procesos de flujo requirieron

una banda proporcional ancha con reajuste rápido. Esto evita la acción del control sobre las perturbaciones transitorias, pero asegura la corrección rápida de cualquier señal de error que persista.

Nivel. El control de nivel es similar al control de presión, casi siempre tiene una capacidad muy grande. Algunos sistemas tienen un tiempo muerto considerable; sin embargo, los retrasos de transferencia son pequeños. La capacitancia contribuye a la autoregulación del nivel del líquido en recipientes atmosféricos. La autoregulación es generalmente pequeña cuando el recipiente está sometido a presión.

Esta variable generalmente se controla unicamente con el modo proporcional, salvo en aquellos casos en donde se desee mayor precisión en la regulación se agrega reajuste automático.

Presión. El control de presión se caracteriza por su gran capacidad, un pequeño atraso de transferencia y un tiempo muerto pequeño.

Cuando el sistema tiene una gran capacidad, el modo proporcional es generalmente adecuado para el control. El reajuste automático se usa cuando no se pueden tolerar desviaciones del punto de control.

Temperatura. Debido a la naturaleza de la transferencia de calor, los procesos de temperatura se caracterizan por capacidades mayores que en caso de flujos, presiones y niveles. La velocidad de reacción del proceso es lenta. El tiempo muerto es frecuentemente grande. La temperatura generalmente se regula con la suma de los tres modos: proporcional, reajuste automático y derivativo, debido a la existencia de tiempo muerto y a la alta precisión que se requiere.

Los sistemas de control vistos hasta ahora forman la herramienta básica de la instrumentación de los procesos industriales, sin embargo existen ocasiones en que es necesario utilizar esquemas de control más complejos con el objeto de incrementar y mejorar la estabilidad del sistema, esos esquemas son los llamados circuitos de control multivariable. A continuación se analizarán las características generales de cada uno de ellos.

Circuito de control en cascada. Para controlar la variable controlada es necesario cambiar el valor de la variable manipulada por medio del elemento final de control.

Cuando en un proceso se presentan varios cambios en la variable manipulada y que no obedecen a variaciones efectuadas por el elemento final de control, estas variaciones (perturbaciones) se reflejan por un cambio en la variable controlada, el cual puede tomar poco o mucho tiempo dependiendo del proceso (su tiempo de respuesta y su tiempo muerto). Para solucionar este problema se coloca un controlador que se encarga de controlar las perturbaciones de la variable manipulada en forma local (sin afectar apreciablemente el valor de la variable controlada) y a la vez recibe la señal del controlador de la variable controlada en forma de punto de ajuste.

A este sistema se le conoce como control en cascada; en la Fig. III.17 se muestra el diagrama de bloques de este sistema.

Como ejemplo podemos mencionar el control de un cambiador de calor, en el cual la temperatura de salida depende del vapor que circula (Fig. III.18). El controlador secundario (esclavo) o de flujo recibe la señal del controlador primario (maestro) o de temperatura, para ajustar la cantidad de vapor necesaria para mantener la temperatura de salida en el valor preestablecido. Debido a la acción del controlador secundario o de flujo, las -

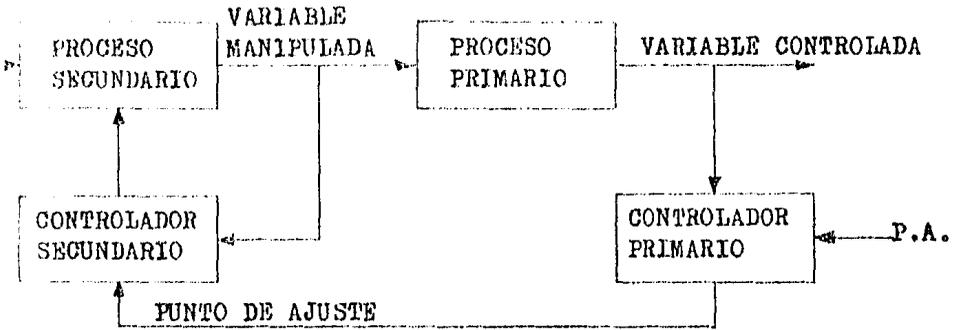


Fig. III.17 Circuito de control en cascada (diagrama de bloques)

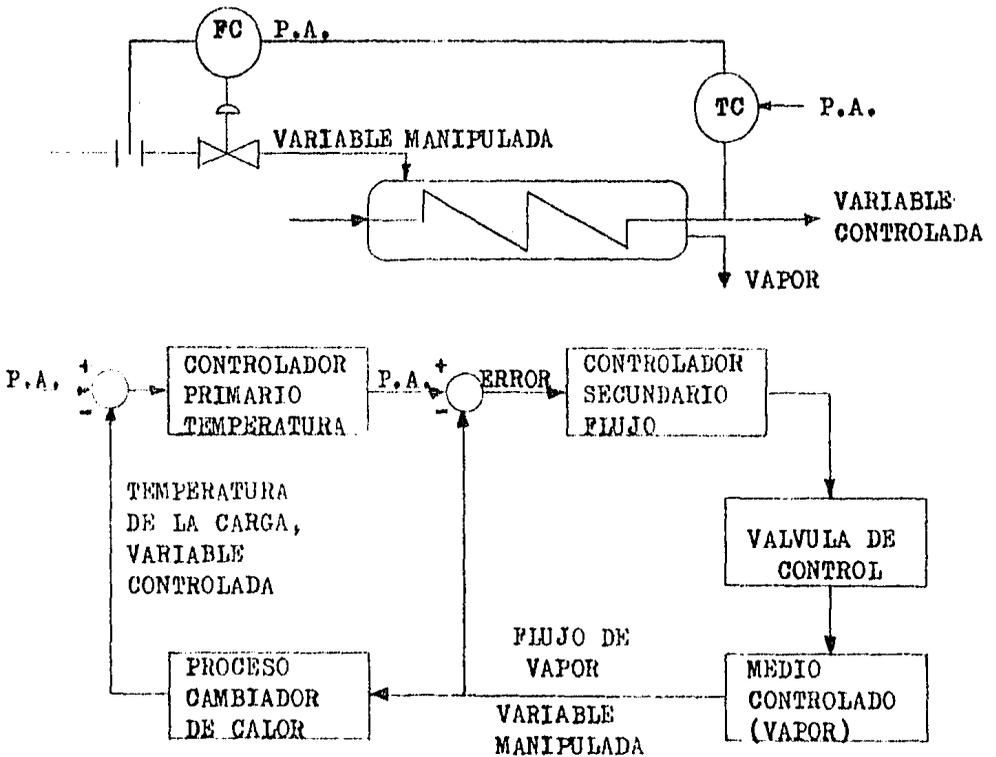


Fig. III.18 Ejemplo de un circuito de control en cascada

variaciones en la cantidad de vapor se controlan por medio de este controlador, dando la ventaja de que no sea necesario esperar a que cambie la temperatura de salida y actúe el controlador primario o de temperatura.

Circuito de control de relación. Estos se aplican cuando es necesario controlar una relación de valores de variables.

Las principales formas de control de relación son las siguientes:

Control de relación con estación de relación. En este sistema la variable dependiente se controla en una relación directa con otra variable independiente. En la Fig. III.19 se muestra el diagrama de bloques. El transmisor de la variable independiente manda la señal a la estación de relación, donde se multiplica por una constante mayor o menor que la unidad, la cual se ajusta en la estación de relación, esta a su vez manda su señal como punto de ajuste al circuito de la variable dependiente.

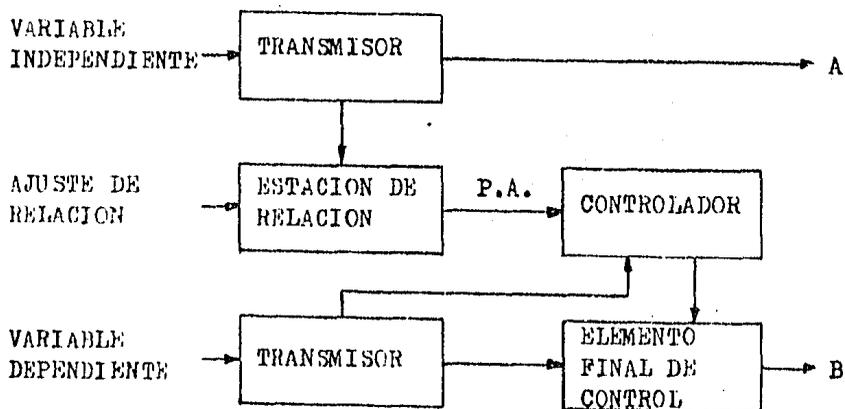


Fig. III.19 Diagrama de bloques del control de relación con estación de relación

El ajuste de la estación de relación es una función de los rangos de los transmisores y de la relación deseada de la variable independiente y dependiente.

La fórmula que nos da el ajuste de la estación de relación es:

$$\text{Ajuste} = \frac{V_B}{V_A} \frac{R_A}{R_B}$$

en donde:

V_A = valor deseado de la variable independiente

V_B = valor deseado de la variable dependiente

R_A = rango del transmisor no controlado o independiente

R_B = rango del transmisor controlado o dependiente

La ecuación anterior define la relación del valor de la variable controlada por unidad de señal del transmisor entre el valor de la variable no controlada por unidad de señal de transmisión.

Las condiciones que deben tomarse en cuenta para que este sistema funcione son:

- 1.- Que los transmisores sean lineales o cuadráticos, evitar mezclarlos.
- 2.- Que el rango de señalización sea el mismo, por ejemplo 3-15 psig, 4-20 mA.

Sistema de relación para presión. Este sistema de control es particular y se aplica para el caso en que la variable manipulada tenga o deba tener un valor mayor que la variable independiente. Este tipo de problemas se presentan muy frecuentemente cuando se tienen servicios de alimentación de vapor y aceites combustibles. En la Fig. III.20 se muestra el diagrama de bloques de este sistema.

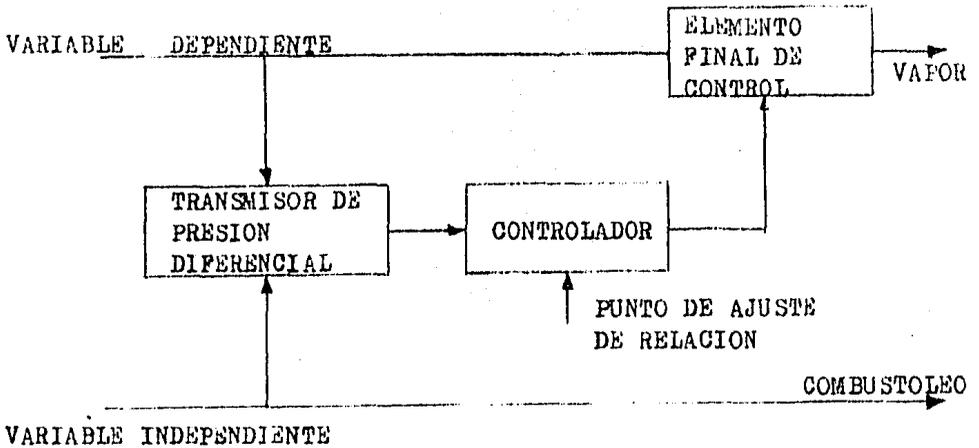


Fig. III.20 Sistema de relación para presión

El circuito consta de un transmisor de presión diferencial el cual manda su señal al controlador, en el que se fija la relación deseada mediante el punto de ajuste.

Circuito de control de gama partida. Es una forma de control en el que una variable manipulada tiene preferencia en relación a otra u otras del proceso.

En la Fig. III.21 puede verse este tipo de control aplicado a dos intercambiadores de calor en serie. La instalación se utiliza para calentar un producto cuyo flujo es muy variable; cuando es bajo basta un solo intercambiador para calentarlo y cuando la fabricación es la máxima son necesarios los dos.

Suponemos que desde el punto de vista seguridad, las válvulas deben cerrar en caso de fallo de aire, por lo cual el controlador de temperatura debe ser de acción inversa (al aumentar la temperatura baja la señal de salida). Si el flujo de producto es bajo, actuará la válvula de vapor V-1 porque la señal de-

salida estará comprendida entre 50 y 100% (9-15 psi). A medida que aumenta el flujo, el controlador de temperatura baja la señal gradualmente hasta que, cuando la señal baja de 50% (9 psi), la válvula V-1 permanece totalmente abierta con el primer intercambiador trabajando al máximo, y la válvula de control V-2 empieza a abrir iniciando el funcionamiento del segundo intercambiador. A un flujo máximo determinado, las dos válvulas de control están abiertas y los dos intercambiadores trabajan al máximo.

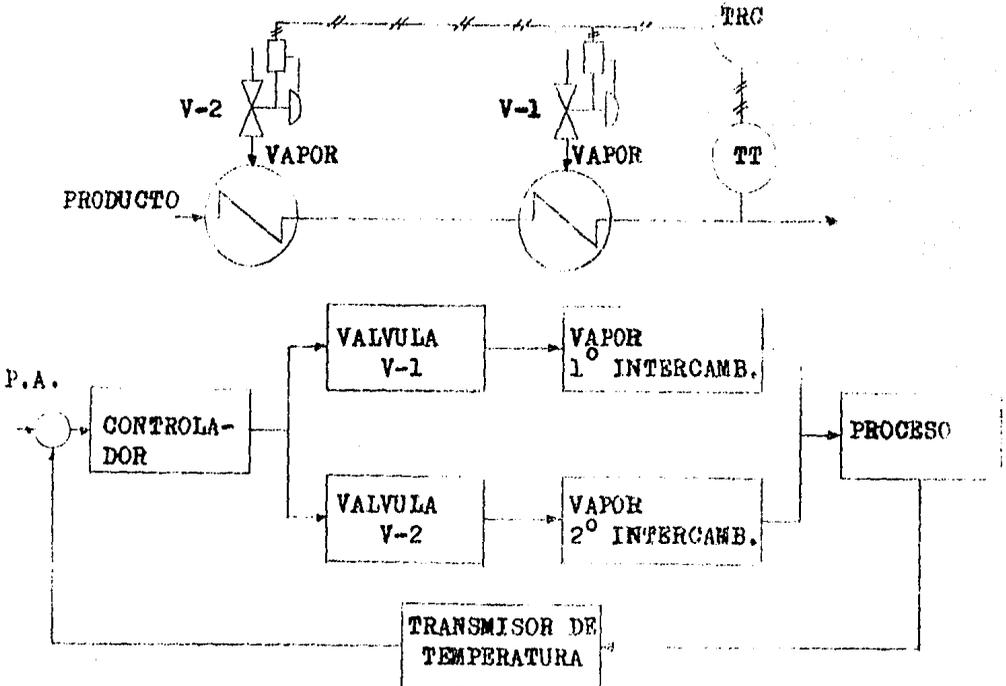


Fig. III.21 Control de gama partida en dos intercambiadores de calor en serie

Circuito de control del predominio por selector. Cuando el control normal de una variable afecta a otra en forma tal que pueda producirse acción normal o peligrosa, se instala un segundo controlador que sólo toma el mando cuando dicha variable se acerca o rebasa su límite preestablecido. Una aplicación típica es el predominio de la temperatura al flujo como se muestra en la Fig. III.22. La variable normalmente controlada es el flujo. La temperatura es la variable secundaria y la que domina al circuito de flujo a través de un selector de alta señal. Normalmente el controlador de flujo opera la válvula.

Si la temperatura alcanza un valor alto o anormal, la salida de este controlador aumentará arriba de la del controlador de flujo. El selector de alta señal deja pasar la señal del controlador de temperatura y bloquea la señal del controlador de flujo, realizándose la operación de la válvula por medio del controlador de temperatura, con lo que reduce la cantidad de vapor (flujo) al recipiente.

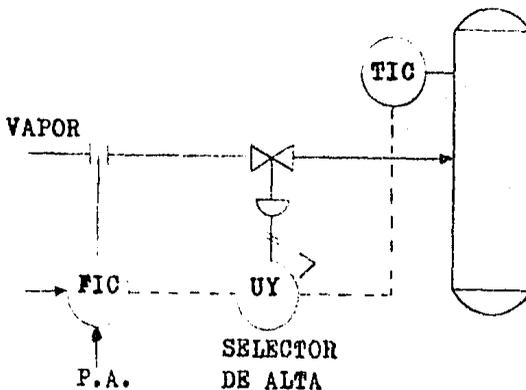


Fig. III.22 Circuito de control del predominio por selector

Circuito de control prealimentado (feed forward). La diferencia básica entre el control retroalimentado y el control prealimentado es la siguiente:

En el control retroalimentado se detectan las perturbaciones a la salida del proceso y posteriormente se hacen las correcciones al proceso.

En el control prealimentado, se detectan las perturbaciones antes de que entren al proceso y posteriormente se hacen las correcciones para evitar que afecten al proceso.

Estos sistemas de control se aplican a procesos con grandes tiempos muertos, los cuales ocasionan que cuando el controlador efectúa su acción de control, probablemente el proceso ya no requiera dicha acción; debido a que la variable ya no está actuando y la acción de control en lugar de estabilizar ocasiona una nueva perturbación y el sistema se desestabilice.

La forma más elemental de este sistema de control es la aplicación del relevador de impulso (que no es otra cosa que un derivador y un sumador).

En la implementación de un sistema de control prealimentado se hace necesario el conocimiento del modelo matemático del proceso incluyendo tanto sus características en estado estacionario como sus características dinámicas. En este tipo de sistema de control, se efectúa un balance dinámico continuo sobre el proceso por la implementación de sus ecuaciones de balance de materia y/o energía; cuando se detecta una variación de carga, la variable manipulada se ajusta automáticamente al valor preestablecido de tal manera que el proceso se mantenga continuamente en equilibrio; teóricamente es posible mantener un control perfecto, aunque en la práctica esto no es posible.

La primera etapa en el diseño de un sistema de control prealimentado es establecer el modelo matemático del proceso en --

estado estacionario; la ecuación resultante se resuelve para la variable manipulada y se implementa el sistema, finalmente la variable controlada se sustituye por su valor preestablecido y se introduce como comando del sistema.

En la Fig. III.23 se muestra el flujo de información de un sistema prealimentado.

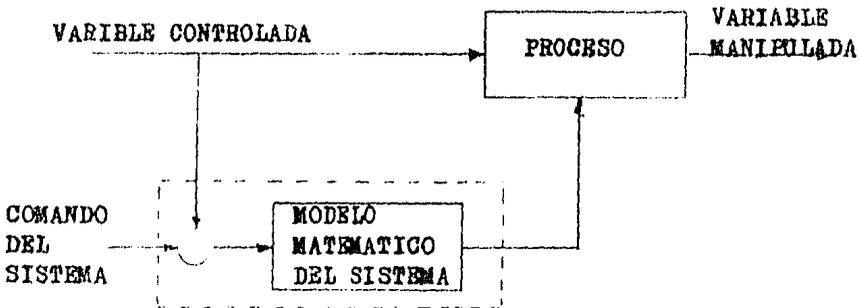


Fig. III.23 Circuito de control prealimentado (feed forward)

C A P I T U L O I V

INSTRUMENTOS DE MEDICION

Este capítulo tiene la finalidad de describir las características de los diferentes tipos de instrumentos más comunes -- que se emplean en la medición de las variables flujo, nivel, -- presión y temperatura.

FLUJO

Algunos tipos de dispositivos para la medición de flujo se clasifican en:

- Tipo diferencial
- Tipo área variable o rotámetro
- Tipo magnético
- Tipo turbina
- Tipo impacto
- Tipo remolino
- Tipo termal

Tipo diferencial. El principio de operación de los medidores de flujo del tipo diferencial, se basa en la relación que existe entre la velocidad del fluido y la pérdida de presión al pasar este a través de una restricción colocada dentro de la tubería. Esta relación dice que la pérdida de presión causada por la restricción es proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido.

La restricción, conocida como elemento primario, hace que el fluido se contraiga, y ya que el flujo permanece constante, la velocidad de este aumenta al pasar por la restricción al mismo tiempo que la presión estática disminuye según la ley de la-

conservación de la energía (Teorema de Bernoulli). La diferencia entre las presiones antes y después de la restricción y llamada comunmente diferencial, representa un índice de la velocidad del fluido. Para determinar el caudal del fluido, basta simplemente multiplicar el índice de velocidad por el área de la restricción dando como resultado la ecuación básica para flujo:

$$Q = C A V$$

donde:

Q = cantidad de flujo

C = coeficiente de descarga

A = área de la restricción

V = velocidad del fluido después de la restricción

La presión diferencial es medida y convertida a unidades de flujo por medio de un aparato secundario de medición. La forma más sencilla de este aparato es un tubo de vidrio en forma de U y el flujo se determina midiendo la diferencia de altura entre las dos columnas.

En la Fig. IV.1 se muestra representativamente la presión diferencial, la distribución del flujo antes y después de la restricción (vena contracta) y la forma de un aparato secundario de medición.

Elementos primarios. Diferentes tipos de elementos primarios son usados como dispositivos restrictivos; entre los cuales se encuentran los tres tipos de placa de orificio, tubos Venturi, tobera de flujo, tubos Pitot y Annubars.

La placa de orificio es el instrumento medidor de flujo más usado entre los que provocan una caída de presión. Consiste básicamente de una placa circular perforada con la suficiente resistencia para no pandearse bajo las presiones diferenciales

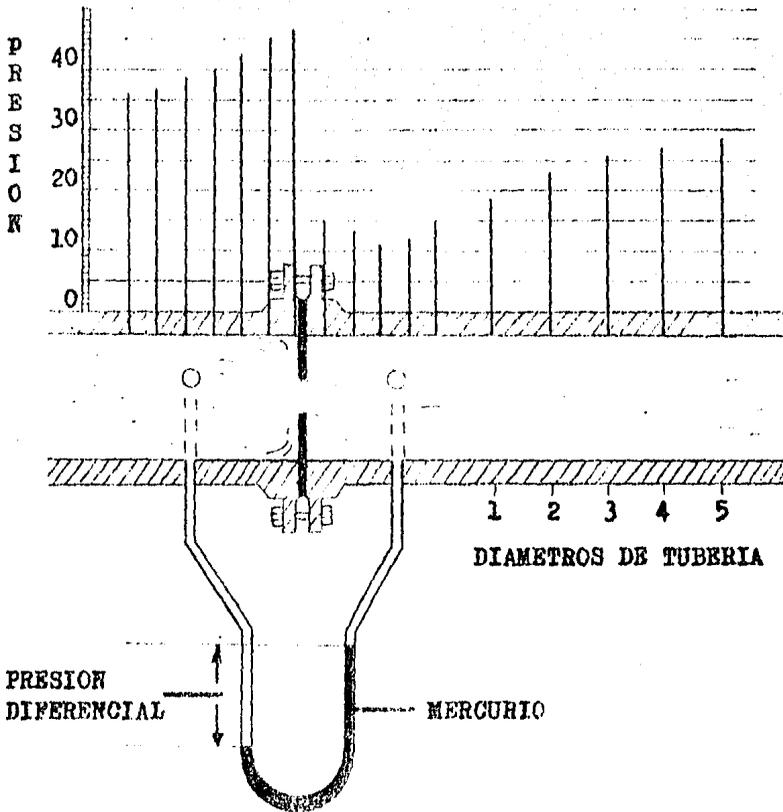


Fig. IV.1 Presión diferencial, vena contracta y aparato secundario de medición

que tiene que soportar estando en servicio.

Sus principales características son:

- a) Mayor caída de presión permanente comparada a la de los otros elementos primarios más comunes.
- b) Fácil de instalar y desmontar.
- c) Es fácilmente reproducible

- d) Proporciona un alto grado de exactitud.
- e) Es el de más bajo costo.
- f) Es inadecuada en la medición de fluidos con sólidos en suspensión.
- g) Errático comportamiento en su uso con fluidos viscosos.

Existen tres tipos de placa de orificio: concéntrica, excéntrica y segmental. El tipo concéntrico se utiliza para gas, líquido y vapor limpios; los tipos excéntrico y segmental son utilizados con líquidos que llevan sólidos en suspensión que pueden depositarse del lado de alta presión, modificando las características de flujo y produciendo errores. Ocasionalmente las placas de orificio excéntrico y segmental se utilizan en la medición de flujos de gas que arrastran condensables.

En la parte superior o inferior del orificio se puede tener un pequeño orificio para cuando el fluido a medir sea un líquido con gas, cuando es un gas o bien vapor con líquido.

Usualmente la placa es de acero inoxidable con los espesores indicados en la siguiente tabla:

Diámetro de la Tubería	Espesor de la placa
Hasta 4"	1/16"
De 4" a 16"	1/8"
Para mayores de 16"	1/4"

Para asegurar resultados consistentes de medición, la cara de corriente arriba de la placa con orificio debe ser plana y perpendicular al eje del tubo una vez que queda instalada. El borde corriente arriba del orificio debe ser a escuadra, en un corte limpio. El espesor del borde del orificio no debe ser mayor que 1/8" para aberturas mayores de 1/2" de diámetro y no mayor que 1/16" para aberturas más pequeñas que 1/2" de diámetro.

Cuando se necesitan espesores mayores para soportar las presiones de la aplicación dada, los espesores de la pared en la abor

tura del orificio se pueden reducir biselando la cara corriente abajo, a un ángulo de 45° o mayor, para obtener el espesor apropiado. En la Fig. IV.2 se ilustran los tres tipos de placa de orificio.

Las placas de orificio casi siempre se montan en coples de brida. Los tipos de brida portaorificio más comunes son:

Roscaadas, Tipo Deslizable (slip-on), Tipo Cuello Soldable (welding neck) y Tipo con anillo de unión (ring joint).

Bridas Roscaadas. Son bridas para ser adaptadas a la tubería por medio de rosca, su uso se encuentra limitado a diámetro pequeño por la dificultad existente de hacer roscas a tuberías grandes (mayores de 2").

Bridas Deslizables. Esta es la más comúnmente usada ya que la tubería puede ser acoplada al ras con las caras de la brida.

Bridas Cuello Soldable. Se recomiendan para flujos a alta presión.

Bridas con Anillo de Unión. Estas son usadas en donde las presiones o los líquidos a medir impiden el uso de empaques para hacer una junta hermética.

Una vez instalada en la tubería, la placa de orificio se conecta al instrumento medidor, indicador o transmisor por medio de tomas de presión.

Existen cinco tipos de localizaciones axiales para las tomas de presión y su designación va de acuerdo con su localización:

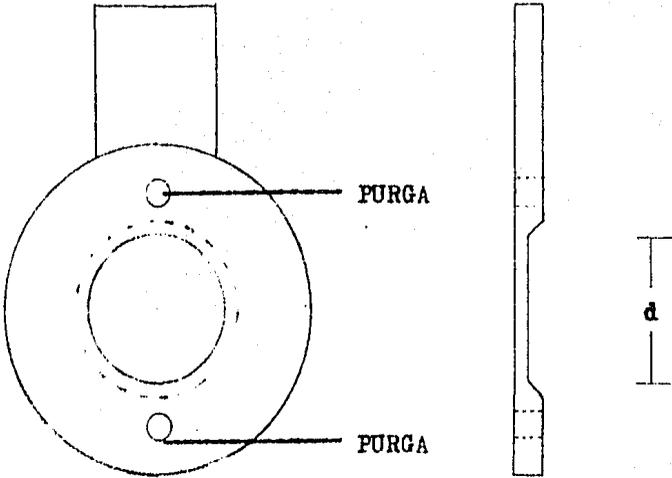
Tomas de brida

Tomas de esquina

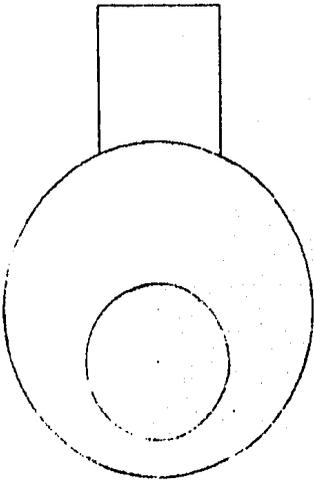
Tomas de vena contracta

Tomas de radio

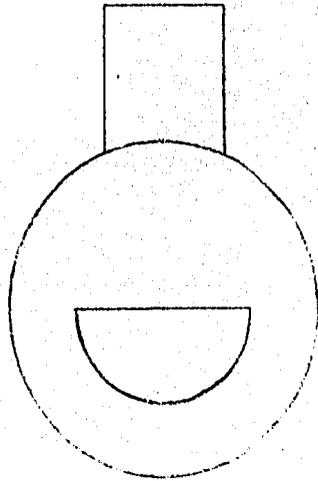
Tomas de tubería



(a)



(b)



(c)

Fig. IV.2 Tipos de placa de orificio. (a) Concéntrica (b) Exoéntrica (c) Segmental

Tomas de brida. Estas se usan para tuberías de 2" y mayores. Estas tomas las proporciona el fabricante de las bridas a una pulgada arriba y abajo de la superficie de las caras de la placa de orificio. Las tomas de brida no son recomendables para tuberías menores de 2" en donde la toma de baja presión se encuentra localizada en una región de flujo inestable.

Tomas de esquina. Son muy similares a las tomas de brida -- excepto que la presión se mide en la esquina, entre la placa de orificio y la pared de la tubería. Su principal aplicación es -- en Europa y son particularmente usadas en diámetros de tubería -- menores de 2". El principal inconveniente son los espacios tan pequeños de medición los cuales se pueden tapar.

Tomas de vena contracta. La toma de alta presión se coloca un diámetro antes del orificio y en la vena contracta la toma -- de baja presión. Esta última se acostumbra localizarla medio -- diámetro después de la placa.

Con tomas de vena contracta se mide la máxima diferencial -- posible con recuperación posterior de presión.

Tomas de radio. La toma de alta presión se localiza a un -- diámetro corriente arriba y la toma de baja presión se localiza a medio diámetro corriente abajo de la placa.

Tomas de tubería. La toma de alta presión se localiza a -- 2 1/2 diámetros antes de la placa y la toma de baja presión se localiza a 8 diámetros después de la placa.

Con este tipo de tomas se mide la pérdida total de presión sin recuperación posterior.

La disposición de las tomas puede verse en la Fig. IV.3.

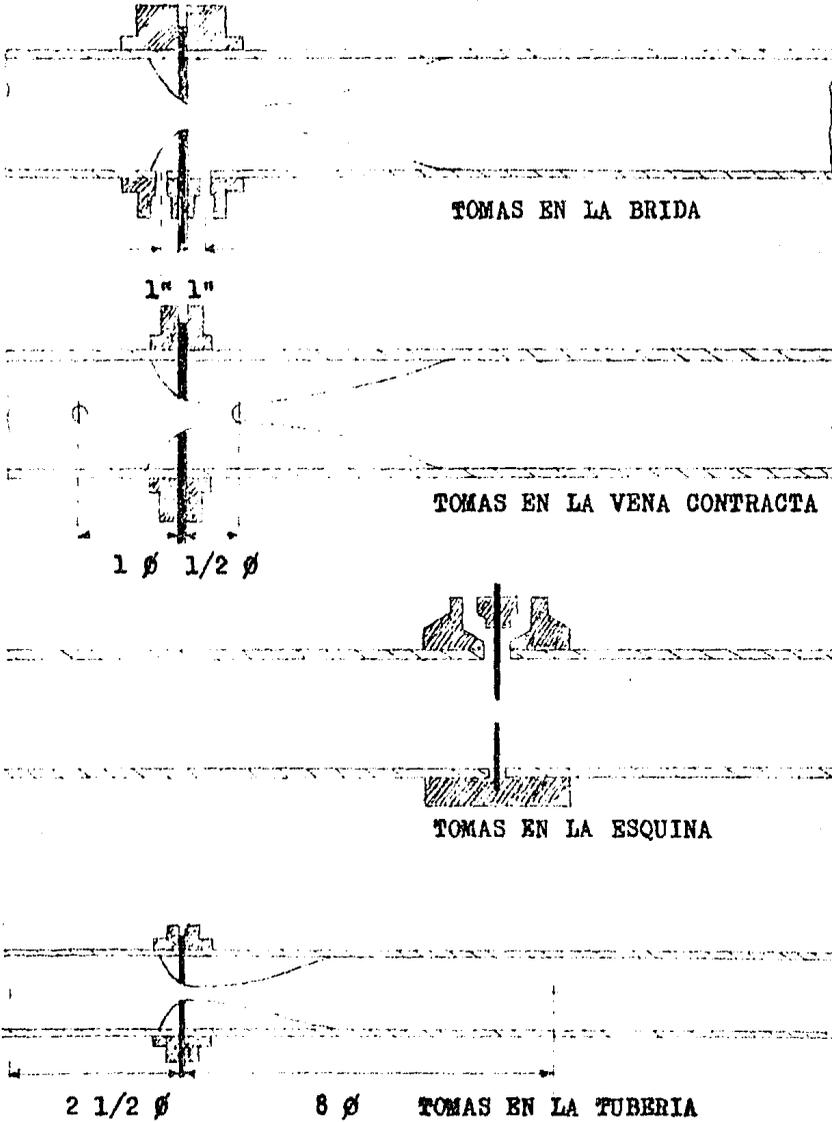


Fig. IV.3 Disposición de las tomas de presión diferencial.

El tubo venturi presenta un contacto continuo entre el flujo y su superficie, en contraste con la línea de contacto entre el flujo y la placa de orificio. Cabe señalar que el acabado de la superficie puede presentar efectos significativos en la medición de flujo.

El tubo venturi consiste de una sección cónica convergente de entrada en la cual el flujo disminuye su sección transversal aumentando su velocidad y disminuyendo su presión; además consta de una garganta cilíndrica la cual sirve para la medición de la presión mínima y de un cono divergente en el cual disminuye la velocidad y aumenta la presión, la toma de alta presión se localiza a un diámetro arriba del cono de entrada.

El tubo venturi se recomienda principalmente donde se requiere el máximo de exactitud en la medición de fluidos altamente viscosos o con sólidos en suspensión y también cuando las circunstancias obligan a mantener una mínima caída de presión que justifiquen el alto costo de inversión inicial.

La pérdida de presión es del orden del 10 al 25% con lo cual se ahorra una gran cantidad de energía. El ángulo de convergencia del cono de entrada es de 19° a 23° , la garganta cilíndrica tiene una longitud aproximada al diámetro de la tubería y el ángulo del cono de salida varía de 5° a 15° dependiendo de la recuperación de presión.

Existen cuatro tipos de tubos venturi: convencional, forma corta, forma larga e insertado entre bridas.

El venturi convencional encuentra uso en servicios de alta presión y temperatura; comparado con los otros venturis, es el de más bajo costo. Tiene características de poca longitud y alta recuperación de presión. Puede ser usado para lodos y líquidos conteniendo sólidos. Está disponible en diámetros de 1" a 12".

El venturi forma corta siente presiones promedio en sus tomas por lo tanto es insensible a irregularidades en la distribución de velocidad del fluido. Este tipo es recomendable para servicios de gases y líquidos limpios.

El venturi forma larga tiene una caída permanente de presión menor que el de forma corta.

Las mediciones con los venturis formas corta y larga casi no se ven afectadas por disturbios en el flujo corriente arriba. Están disponibles en diámetros de 1" a 48".

El venturi insertado entre bridas es un tipo muy económico con una alta recuperación de presión. Se encuentra desde 4" hasta 42".

La precisión de estos tipos de elementos primarios es del orden del 0.75% de toda la escala.

Los materiales más comunes de construcción son: acero al carbón, acero inoxidable y fibra de vidrio.

En la Fig. IV.4 se muestra un tipo de tubo venturi.

La tobera de flujo es un tubo corto con una sección cónica como se ve en la Fig. IV.5.

Se usa para grandes flujos en donde la placa de orificio no sería suficientemente exacta (relación de diámetros de 0.7). Es de mayor costo que la placa de orificio, su pérdida de presión está muy cercana a la de la placa de orificio, por lo que en su selección no deberá ser considerada esta como una ventaja sobre la placa. Sus tomas de presión se localizan en la tubería a un diámetro antes y medio diámetro después de la entrada de la tobera. Su aplicación principal es donde existen altas presiones y medición de grandes capacidades de flujo.

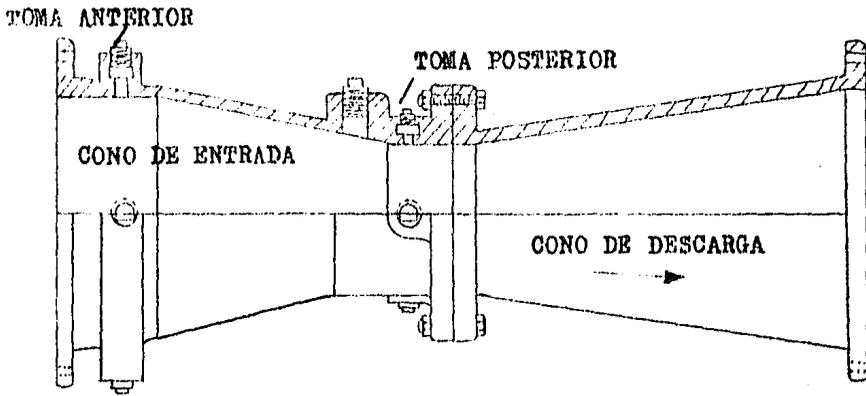


Fig. IV.4 Tubo Venturi

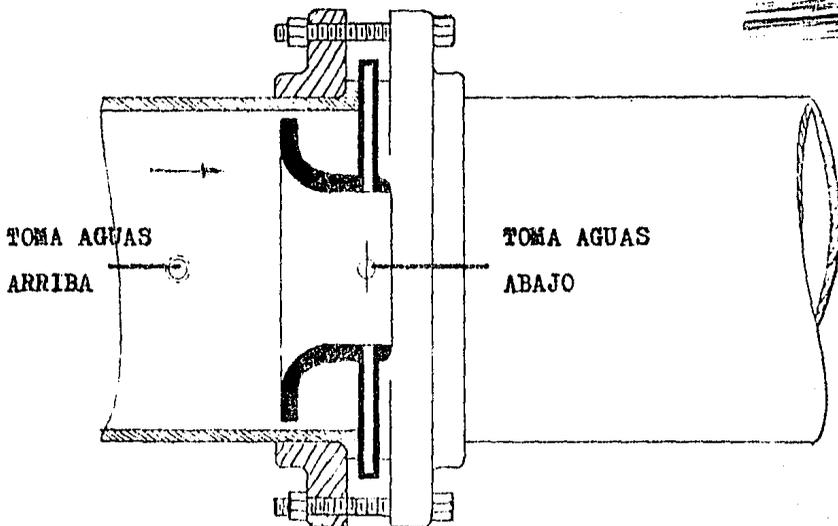


Fig. IV.5 Tobera de flujo

El tubo pitot es un tubo que se inserta perpendicularmente a la dirección del flujo y que tiene dos pequeños orificios en el extremo inferior colocados a 90° uno del otro por donde sienta la presión, como se muestra en la Fig. IV.6.

Este elemento primario mide la presión dinámica y estática del flujo, en donde la diferencia entre estas es una función de la rapidez del flujo, este solamente se mide en el punto en donde la toma dinámica y estática están expuestas, por lo tanto, -- cuando la distribución de velocidad de flujo no es uniforme, no es recomendable, así como cuando se manejan líquidos que contienen sólidos en suspensión.

Comparado con los otros elementos primarios de medición, -- para tamaños grandes de tubería es económico y a medida que esta va disminuyendo en tamaño, va aumentando su costo.

El tubo pitot es un elemento de una precisión de 1.5 a 4% de toda la escala.

En algunos casos, cuando el perfil de velocidad de un fluido en una tubería no es constante, para detectar las velocidades en varios puntos del perfil de velocidades y posteriormente obtener el promedio de velocidades, se emplea un tubo pitot modificado llamado tubo annubar (Fig. IV.7).

El tubo annubar tiene diferentes formas, pero en una forma general, todos tienen un tubo que abarca de la superficie interior a la inferior con cuatro orificios para detectar la presión de velocidad, y un tubo con orificio opuesto para detectar la presión estática.

Este elemento es más o menos barato, relativamente sencillo de instalar, de peso ligero, con una precisión de 1 a 3% de toda la escala y seguro para efectuar mediciones de flujo a través de tuberías o ductos circulares de 1/2 a 90 pulgadas de diámetro.

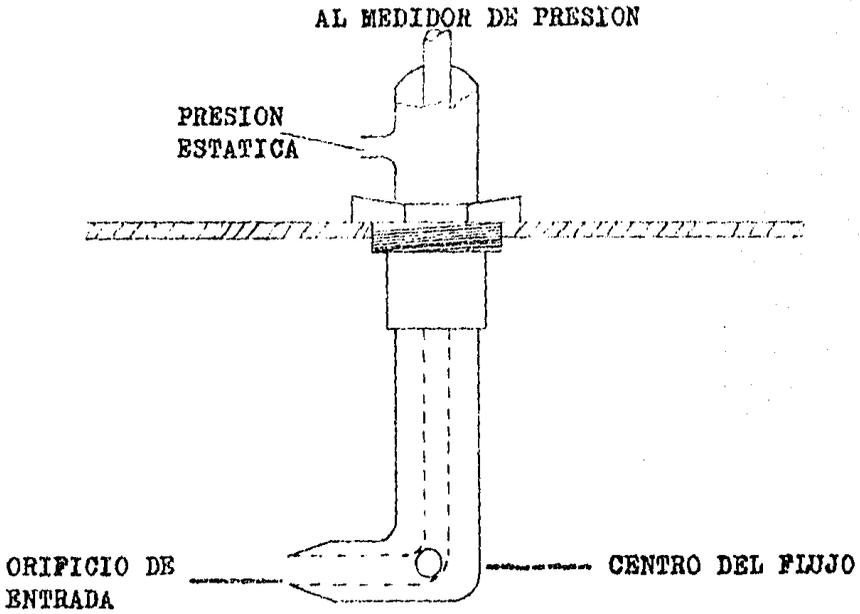


Fig. IV.6 Tubo Pitot

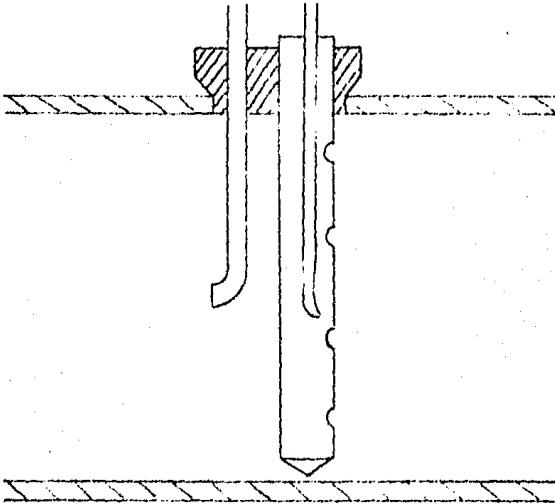


Fig. IV.7 Tubo Annubar

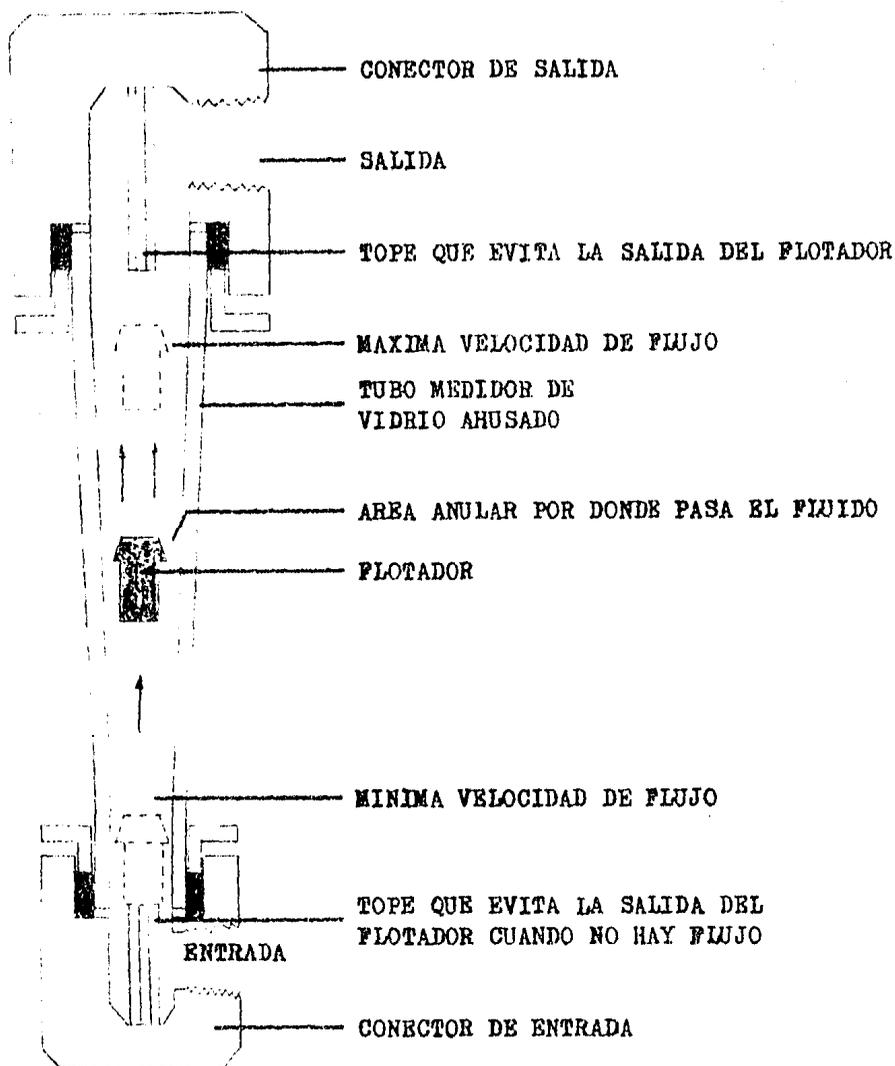


Fig. IV.8 Medidor de flujo de área variable (Rotámetro)

Tipo área variable o rotámetro. Estos medidores consisten-
de un tubo medidor cuya área varía gradualmente entre el tubo y
el flotador que se mueve libremente de arriba a abajo dentro --
del tubo. Véase Fig. IV.8.

El rotámetro se monta verticalmente con el extremo más re-
ducido hacia abajo.

El fluido corre a través del tubo de abajo hacia arriba y, cuando no hay ningún flujo de líquidos o gases, el flotador descansa en la base del tubo ahuecado y su diámetro máximo se selecciona casi siempre de manera que bloquee casi por completo el extremo pequeño. Cuando se inicia un flujo dentro de la tubería y el fluido llega al flotador, el efecto boyante hace que el flotador ascienda. Por lo común, el flotador tiene una densidad mayor que la del fluido, de tal manera que el efecto, por sí solo, no basta para elevar el flotador. El pasaje del flotador permanece cerrado hasta que la presión, en combinación con el efecto boyante del material, sobrepasa la presión descendente debida al peso del flotador. Entonces, el flotador se eleva y flota dentro del fluido en proporción al flujo y a una presión dada. El flotador sigue ascendiendo hasta que el pasaje anular es lo bastante grande para dar paso a todo el material que recorre la tubería. La presión debida a la velocidad del fluido también desciende hasta que en combinación con el efecto boyante del fluido, equivale justamente al peso del flotador. Esto permite que el flotador descanse en equilibrio dinámico.

El tubo medidor de vidrio tiene una escala marcada, la cual es lineal, debido a la variación del área interior del tubo. Para el caso donde el vidrio no es satisfactorio se usa un tubo metálico. En estos casos, la posición del flotador se determina por medios magnéticos; por este método, el rotámetro se puede usar como transmisor.

Los materiales más comunes para el tubo son: vidrio de borosilicato, acero inoxidable, hastelloy, monel, etc. y para el flotador: bronce, acero inoxidable, titanio, níquel, etc.

Tiene una precisión de 1 a 2% de la escala total.

Tipo magnético. (Fig. IV.9) Estos medidores basan su funcionamiento en la ley de Faraday de la inducción para hacer la

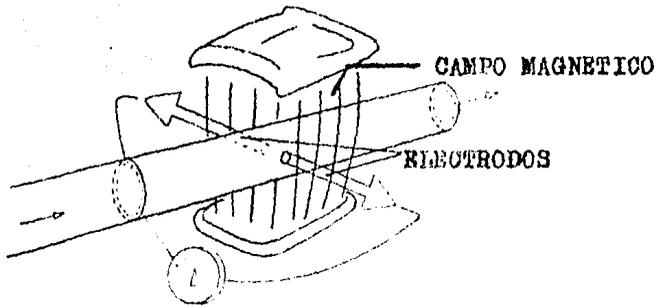


Fig. IV.9 Medidor tipo magnético

medición de flujo. Esta ley establece que el movimiento relativo a ángulos de 90° entre un conductor y un campo magnético desarrolla una diferencia de potencial eléctrico en el conductor.

El voltaje inducido es proporcional a la velocidad relativa del conductor y al campo magnético. Para fines de medición - el fluido debe tener una conductividad mínima para actuar como conductor.

Este tipo de medidor se construye de un tubo no magnético por el cual pasa el fluido, el cual debe tener una conductividad mínima.

Rodeando al tubo medidor, se tienen las bobinas que generan el campo magnético a todo lo ancho del tubo. A medida que - el fluido conductor se mueve a través del campo magnético, se genera un voltaje proporcional al gasto volumétrico. El voltaje generado se detecta por medio de dos sensores electrónicos que están en contacto con el fluido. La señal de salida es igual al gasto volumétrico e independiente del perfil de velocidad.

Lo anterior implica que este medidor es independiente de - cambios de viscosidad, densidad, de turbulencias y variaciones en la tubería.

Este medidor es aplicable a fluidos con conductividades -- desde 0.1 a 20 micromhos. Es conveniente aclarar que arriba del umbral de conductividad, el medidor no es afectado por cambios de conductividad, pero el efecto de la temperatura de operación del fluido sobre la conductividad del fluido debe considerarse.

Este medidor tiene una precisión de 0.5 a 1% de la escala total, es muy costoso y de mantenimiento difícil; los materiales comunes de construcción son: Para la tubería: materiales no magnéticos tales como: fibra de vidrio, neopreno, poliuretano, hule, teflón, acero inoxidable, inconel, etc.; para los electrodos: hastelloy "C", platino, acero inoxidable, tantalio, titanio, etc.

Tipo turbina. Este tipo de medidores proporcionan una señal de salida de frecuencia que varía linealmente con el flujo volumétrico. En la Fig. IV.10 se muestra un medidor de este tipo.

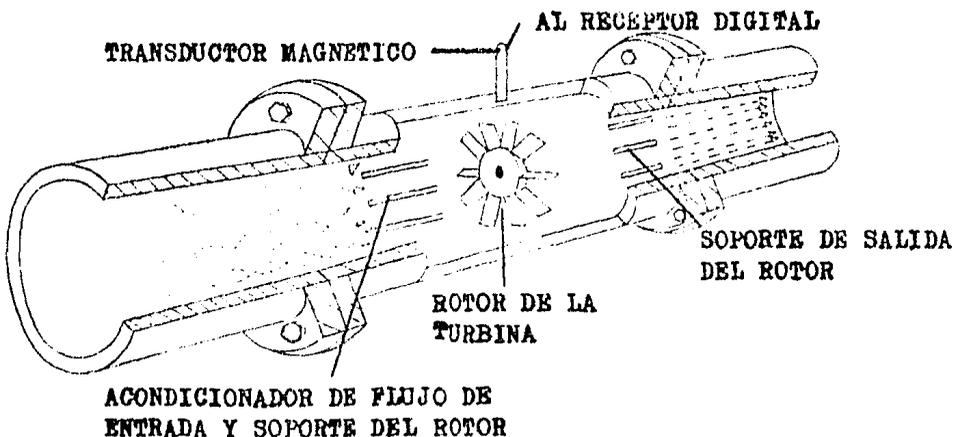


Fig. IV.10 Sección transversal de un medidor de turbina

El fluido a ser medido entra al medidor por el lado izquierdo a través del soporte delantero del rotor.

Los soportes realizan dos funciones: la de proporcionar un sostén para el rotor, y acondicionamiento del fluido previo a la medición hecha por el rotor. El fluido al pasar por el rotor ocasiona que este gire con una velocidad angular que es proporcional a la velocidad lineal del fluido y por lo tanto, al flujo volumétrico.

El detector puede ser magnético de arrastre o magnético de de variación de reluctancia.

El detector magnético de arrastre consta de dos imanes, uno dentro del carrete y otro en la caja superior de engranes.

El detector magnético de variación de reluctancia, consta de un imán permanente sobre el que se enrolla un alambre para formar una bobina. Cuando el rotor pasa cerca del detector, este circuito cambia su reluctancia, generando un pulso eléctrico. La cubierta del medidor debe ser de un material no magnético, generalmente acero inoxidable de la serie 300. El rotor debe ser de un material magnético y los más comunes son el 17-4PH y acero inoxidable serie 400. Cuando el rotor gira, al pasar una aspa las cuales son de material permeable, facilita la trayectoria del campo magnético, el cual induce un voltaje en el embobinado, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad angular del rotor y por consiguiente al flujo.

Este tipo de medidores son de alta presión, por lo que debe calibrarse individualmente, teniendo una precisión de 0.3 % de la escala total.

Los tamaños van desde 1/4" hasta 10" y hay algunos fabricantes que los tienen hasta 30".

Pueden medir gastos desde 0.1 hasta 50,000 gpm y soportan una presión máxima de 3000 psig y una temperatura máxima de 250°C; la pérdida de presión es de 2 a 4 psi.

Tipo impacto. Este medidor consta de un orificio anular y un transmisor de fuerzas. La señal de salida eléctrica es proporcional al cuadrado del flujo. Este tipo de medidor se encuentra para diámetros de tubería de 1/2" a 8", aunque existen tamaños especiales hasta de 48". En la Fig. IV.11 se muestra un medidor de este tipo.

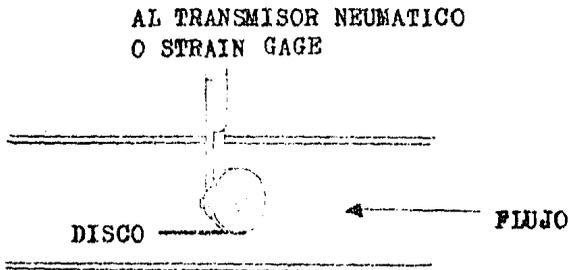


Fig. IV.11 Medidor de impacto

El orificio anular se forma con un disco soportado en el centro de una sección tubular. El flujo circula a través del anillo que se forma entre el disco y el tubo. El fluido choca contra el disco y genera una fuerza que es proporcional a la carga de velocidad (cuadrado del flujo). La fuerza desarrollada en el disco se mide por medio de la barra de fuerzas de un transmisor de balance de fuerzas.

Este medidor se aplica en la medición de líquidos, vapores o gases. Permite el flujo ininterrumpido de condensados y materiales extraños por el fondo de la tubería y al mismo tiempo permite el flujo de gas o vapor por la parte superior. Como este medidor no tiene conexiones de presión diferencial que puedan enfriarse, es útil para fluidos que se congelan a la temperatura ambiente.

La precisión de este medidor es del 1% de toda la escala, los materiales de construcción son: acero al carbón y acero inoxidable. Los discos se fabrican de 0.6 a 0.8 veces el diámetro de la tubería.

Tipo remolino. Este medidor basa su funcionamiento en el efecto natural que se presenta cuando un fluido choca contra un obstáculo abrupto. Estos remolinos son función del gasto; por lo cual, al medir el efecto de los remolinos, se mide el gasto.

Existen básicamente tres técnicas para detectar los remolinos que son: técnicas térmicas, magnético-mecánicas y variación de capacitancia.

Las térmicas usan un termistor, al cual se le hace pasar una corriente eléctrica para que se caliente; cuando un remolino entra en contacto con el termistor, este cambia su temperatura y por lo tanto cambia su resistencia eléctrica, lo que se detecta por medio de un puente de Wheatstone y un amplificador.

Dentro de las magnético-mecánicas, se utiliza un cilindro-ferromagnético el cual se coloca dentro de una cámara del obstáculo. Los puertos a ambos lados del elemento de flujo (obstáculo) se conectan con la cámara y los remolinos pasan alternativamente hacia la cámara ocasionando que el cilindro oscile de arriba a abajo. Este movimiento es detectado por medio de un sensor magnético el cual genera un tren de pulsos eléctricos con la frecuencia de oscilación del cilindro (que es la misma de los remolinos). Dentro de esta técnica, también se puede utilizar un disco oscilante, que funciona de la misma manera que el cilindro, solo que aquí se usa un diafragma metálico (con una punta de material ferromagnético). La oscilación se detecta con el mismo sensor magnético.

En las técnicas de variación de capacitancia, el sensor de

tipo capacitivo, tiene en sus costados las placas de un capacitor. Cuando se genera un remolino, presenta zonas de baja y alta presión. Esta presión ocasiona que las placas del capacitor estén más juntas o más separadas, la variación de capacitancia se detecta por medio de un puente y un amplificador.

La precisión del instrumento es de $\pm 0.75\%$ del flujo instantáneo, por lo cual el error en tanto por ciento de la escala se hace mayor cuanto más bajo es el flujo. En la Fig. IV.12 se presenta el medidor de flujo por torbellino.

Tipo termal. Un sistema de este tipo de medidores, consiste de dos termistores en la corriente de flujo (flujo de gas); uno de los termistores es calentado por una fuente externa a una temperatura promedio de 150°F arriba de la temperatura ambiente, el otro de los termistores no es calentado. El termistor no calentado, sirve para compensar cambios de temperatura en la medida del gas. La energía es removida del termistor externamente calentado como una función de la proporción del flujo de masa. Al remover la energía se tiene un enfriamiento, dando como resultado un cambio de resistencia y voltaje en el termistor. La señal no lineal de voltaje producida es lineal con el flujo de masa. Este dispositivo tiene una exactitud de $\pm 2\%$ de amplitud desde 20 a 100% de la escala total y se aplica para rangos de flujo de 0.12 a 0.6 scfm y de 100 a 1000 scfm.

Otro medidor de este tipo (Fig. IV.13) es aquel en el cual se suministra una cantidad constante de calor a una corriente de gas. La temperatura del gas es medida corriente arriba y corriente abajo de la fuente de calor por dos termómetros de resistencia. El aumento de temperatura de la corriente de gas es una función del flujo de gas, la cantidad de calor añadida y las propiedades térmicas del gas. Los últimos dos valores son -

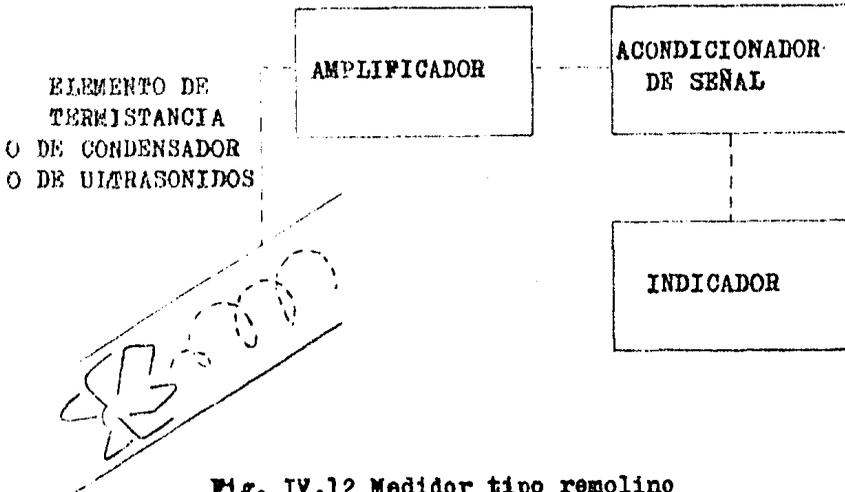


Fig. IV.12 Medidor tipo remolino

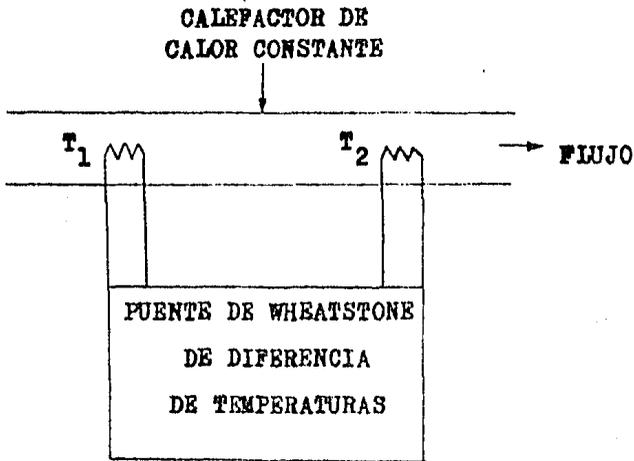


Fig. IV.13 Medidor tipo termal

conocidos. El otro valor, la diferencia en temperaturas, es medida por los dos termómetros de resistencia y es linealmente -- proporcional al flujo de masa.

Este es útil para presiones de 150 psig a temperaturas de 40 a 100° F. La exactitud es de $\pm 2\%$ de la escala total; se aplica para rangos de 0 a 5 scfm y 0 a 5000 scfm.

NIVEL

Existe una gran variedad de instrumentos para mediciones de nivel, que van desde los visuales hasta los más sofisticados métodos radiactivos. Los instrumentos de medición de nivel se pueden clasificar en función del principio de operación utilizado:

- 1.- Medidores de nivel tipo visual
 - Medidores de regleta móvil y fija
 - Vidrios de nivel
- 2.- Medidores de nivel tipo fuerza de flotación
 - Tipo flotador
 - Tipo desplazador
- 3.- Medidores de nivel tipo presión hidrostática
 - Sistemas de burbujeo
 - De caja de diafragma
 - De presión diferencial
- 4.- Medidores de nivel tipo eléctrico
 - Conductivo
 - De capacidad
- 5.- Medidores de nivel tipo radiación de energía
 - Medidor radiactivo

Medidores de regleta móvil y fija. Los medidores de regleta son barras las cuales están calibradas en unidades de longitud: metros, pies, centímetros, pulgadas, etc.

Existen dos tipos de medidores de regleta: móviles y fijas.

Las móviles se usan en servicios que no requieran una medición constante y donde su altura no rebasa de 5 metros. La principal desventaja es que solo se aplica a líquidos no corrosivos y que no se adhieran a estas.

La regleta fija se aplica para servicios en donde se requiere indicación constante en tanques abiertos; esta es colocada en la parte externa.

La indicación se hace por medio de un flotador que se encuentra en el interior del tanque, el cual está colgado de un cable, y que por medio de una polea hace la indicación externa. Esto es, cuando el tanque está vacío, el flotador se encuentra abajo y el indicador arriba, indicando nivel mínimo; y cuando el tanque está lleno, el indicador está abajo indicando nivel máximo.

Con el fin de permitir solamente el movimiento vertical del flotador, se proporcionan guías de alambre que se conectan a anclas arriba y abajo del tanque. Las anclas superiores tienen generalmente un resorte para mantener constante la tensión de los alambres. Es necesario poner atención al especificar este tipo de indicadores para solicitar al proveedor todos los accesorios necesarios para su instalación tales como: tensores, codos, cable guía, soporte de la regleta, etc. Cuando es posible, se solicita que el fabricante del tanque sea quien proporcione el indicador.

Vidrios de nivel. Estos se usan para observar el nivel de los recipientes en la mayoría de las industrias en las cuales se tienen recipientes para almacenamiento u otro fin. Un alto porcentaje de recipientes, columnas, reactores, etc. se encuentran equipados con indicadores de nivel de baja, mediana y alta presión. Normalmente los vidrios de nivel son económicos y aplicables a un gran número de fluidos.

Dentro de los vidrios de nivel existen tres tipos de indicadores los cuales son: tubulares, reflejante y transparente.

Los vidrios tubulares, fueron los primeros que se usaron en las industrias; actualmente son poco usados debido a que fácilmente se pueden romper y presentan una operación y seguridad aleatoria. El indicador consiste de un tubo de vidrio sujetado-

entre dos válvulas las que tienen el empaque para sellar contra el vidrio. La presión de diseño depende de la longitud y diámetro del tubo.

Las únicas protecciones con las que cuenta el vidrio, las cuales no son de mucha seguridad, son las varillas protectoras o cubiertas plásticas que se encuentran paralelas a este. Es por tanto, que estos indicadores deben usarse solamente en aplicaciones de presión cercana a la atmosférica y en líquidos que no son inflamables y tóxicos.

Los vidrios reflejantes dependen del cambio en la refracción de la luz cuando pasa de un líquido a un sólido transparente.

Las estrías prismáticas se moldean en la parte posterior del vidrio. Cuando el indicador está vacío, la luz incidente se refleja en las superficies prismáticas dando una apariencia plateada. Cuando el líquido está en el indicador, la interfase entre el líquido y el vidrio altera la refracción de la luz, ocasionando que el vidrio se oscurezca en la zona cubierta por el líquido.

Los vidrios reflejantes comunes están contruidos de una cámara maquinada de una barra de acero, la cual le sirve de protección. El vidrio es templado con borosilicato con un bajo coeficiente de expansión térmica y resistencia al impacto térmico y mecánico. La cubierta es de acero forjado, los empaques se colocan entre el vidrio y la cámara para que selle la unión. Con esto se logra que no exista contacto entre el vidrio y el metal. Y para unir la cámara con la cubierta se utilizan tornillos en forma de U.

El uso de este tipo de vidrios se limita a líquidos limpios, incoloros y no viscosos, cuidando que estos fluidos no tiendan a adherirse al vidrio, porque si esto ocurre la refrac-

ción se altera dando lecturas erróneas.

Las condiciones de operación que soporta son bastante altas (4000 psig y 750°F aproximadamente) siendo estas mayores que las que soportan los vidrios transparentes de las mismas dimensiones.

Los vidrios transparentes son muy similares a los reflejantes solo que la cámara está abierta de lado a lado y tiene dos vidrios y dos cubiertas.

Estos vidrios se emplean cuando el líquido que se está manejando es viscoso o se encuentra coloreado, cuando existe interfase, o cuando el fluido es corrosivo. Para servicios altamente corrosivos como es el caso de un ácido o sosa cáustica, deberá usarse mica protectora en la superficie interior del vidrio plano.

Este tipo de vidrio permite la indicación directa del fluido, su color, su estado físico o su interfase con otro líquido.

Las condiciones de operación que soporta son menores que las del vidrio reflejante.

Pueden obtenerse un sin número de accesorios con estos medidores, entre los que se cuentan: conexiones arriba y abajo, laterales, roscadas o bridadas. Dispositivos de calentamiento o enfriamiento de la unidad para casos en que no se permite que el fluido de proceso se exponga a temperatura ambiente; extensiones anticongelantes para aplicaciones de baja presión, escalas calibradas para lectura del nivel, iluminadores para usos en áreas pobremente iluminadas y diferentes tipos de válvulas de tres vías, que sirven para conectar al medidor con el tanque o aislarlo del material del proceso a la vez que mantener el indicador abierto para venteo o drenaje.

En la Fig. IV.14 se presentan los diferentes tipos de vidrios de nivel.

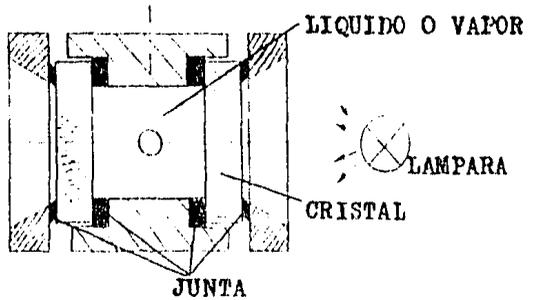
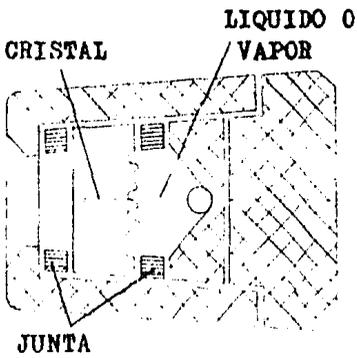
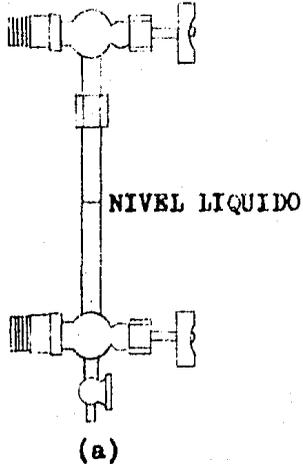


Fig. IV.14 Vidrios de nivel (a) Tubular (b) Reflejante (c) Trans
parente

Medidores de nivel tipo flotador. Este tipo de instrumentos utilizan un cuerpo hueco e impermeable, el cual flota sobre la superficie del líquido variando su posición de acuerdo a los cambios de nivel. Utilizan los movimientos del flotador para actuar un indicador o un transmisor de balance de movimientos por medio de palancas por lo que su rango está limitado por la dimensión del brazo de palanca. Son muy frecuentes en aplicaciones donde se requiera un valor prefijado de nivel para accionar un interruptor.

Existen flotadores internos y externos; estos últimos son empleados en servicios a tanques a presión, puesto que pueden ser movidos sin afectar el proceso. En algunas aplicaciones es común encontrarlos actuando directamente sobre válvulas de control.

Flotador y cinta. En este caso el flotador actúa el mecanismo indicador por medio de una cinta que se enrolla sobre una polea y se conecta a un contrapeso, manteniendo tensa la cinta.

Flotador magnéticamente acoplado. Este indicador se ha instalado en un buen número de tanques de almacenamiento de gas de petróleo licuado entre otros. El movimiento vertical del flotador por medio de engranes y rodamientos, se convierte en un movimiento rotatorio de la barra central. La barra a su vez posiciona un imán permanente bajo el puntero de la carátula del indicador. No hay conexiones o agujeros a través del indicador porque las líneas de fuerza del magneto montado en la barra central pasan a través del fondo magnético del indicador y hacen girar el puntero. Este acoplamiento magnético garantiza una operación a prueba de fugas y tiene aplicación para presiones hasta de 700 kg/cm^2 . La escala de lectura puede ser calibrada para recipientes horizontales, verticales o esféricos y la carátula-

puede ser hasta de 20 cm para una buena visibilidad de lectura.

En instalaciones donde se requiere lectura remota, este tipo de medidor se puede proporcionar con un transmisor.

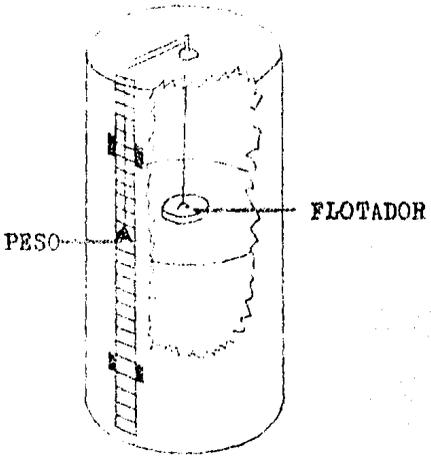
En la Fig. IV.15 se presentan los tipos de indicadores de nivel de flotador.

Medidores de nivel tipo desplazador. De acuerdo con el principio de Arquímedes, cuando un cuerpo es sumergido, total o parcialmente en un fluido, aparece una fuerza ascendente igual al peso del volumen del líquido que desplazó.

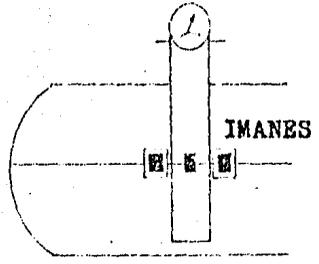
Los medidores de desplazador constan de un tubo metálico cerrado de aproximadamente 2" de diámetro y de una longitud que cubre el rango del nivel por medir. Al variar el nivel, el volumen del líquido desplazado variará y con esto aparece una fuerza sobre el desplazador. La fuerza generada por el desplazador es suministrada a un tubo de torsión, con el fin de equilibrar la fuerza y proporcionar una señal para indicación, la cual puede ser neumática o electrónica. En la Fig. IV.16 se muestra un medidor de nivel de desplazamiento.

Este tipo de dispositivos pueden ser montados interna o externamente en el tanque. Los desplazadores internos se usan en aplicaciones donde el tanque puede drenarse cuando el detector de nivel requiere mantenimiento. En instalaciones donde el tanque no puede ser drenado cuando el desplazador requiere mantenimiento, se usa el diseño de tipo cámara externo.

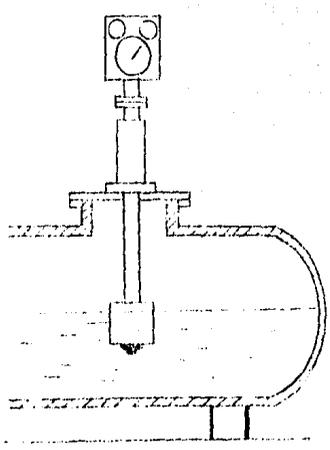
Para aplicaciones de alta presión, se han diseñado tubos de torsión y desplazadores especiales para hacer la unidad adecuada para presiones de operación hasta 175 kg/cm^2 . En instalaciones de alta temperatura, el material del tubo de torsión es el factor primordial, debido a que se afectan las características de elasticidad del tubo. Las bajas temperaturas no afectan



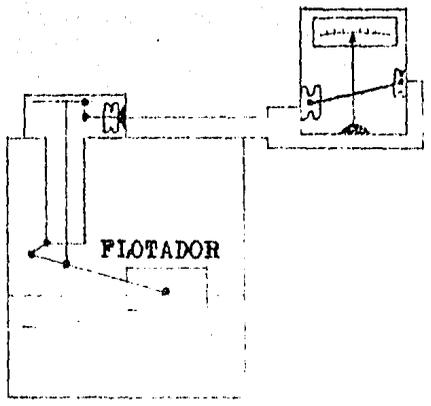
CONEXION DIRECTA



ACOPLAMIENTO MAGNETICO

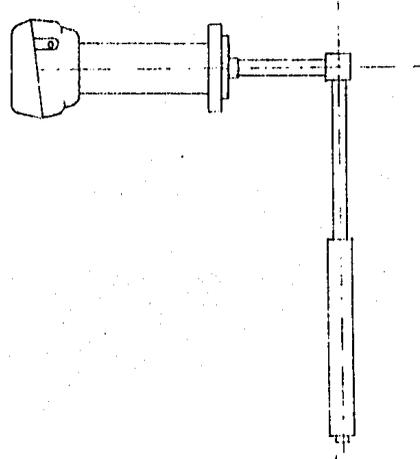
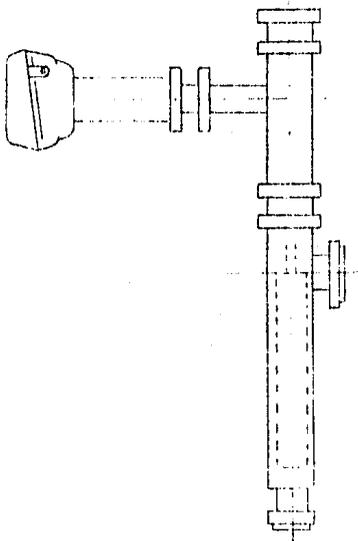
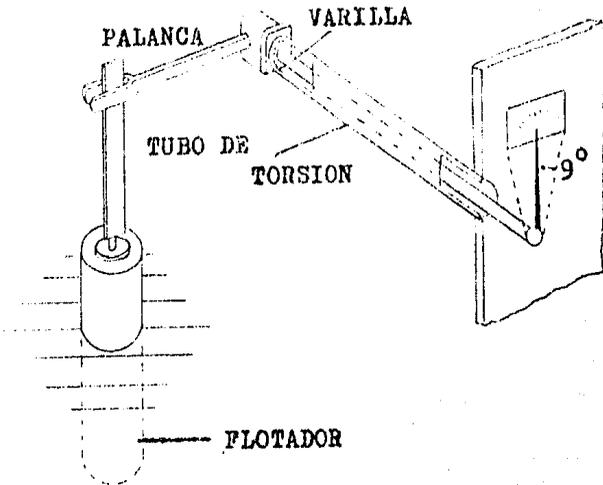


TRANSMISOR



ACOPLAMIENTO HIDRAULICO

Fig. IV.15 Instrumento de flotador



MONTAJE EXTERNO

MONTAJE INTERNO

Fig. IV.16 Medidor de nivel de desplazamiento

las características torsionales del tubo. Los tubos de torsión de inconel son adecuados para temperaturas entre -210°C y 450°C . Todos los demás materiales de uso común (acero, monel, hasteloy, etc.) tienen un uso limitado hasta 230°C excepto bronce, el cual no debe ser expuesto a temperaturas mayores de 150°C . Cuando el proceso se encuentra a una temperatura mayor de 260°C se recomiendan alatas de extensión, y cuando está abajo de 0°C se recomiendan extensiones simples.

Medidor tipo burbujeo. Los sistemas de burbujeo o de purga continua, realizan la medición de nivel por medio de la medición de la presión requerida para que un flujo constante de aire venza la presión hidrostática de líquido, hasta salir de un conducto. Como el flujo necesario es muy pequeño, al salir lo hace a manera de burbujeo.

Para realizar la medición, se introduce un tubo hasta el nivel mínimo de operación, este tubo se conecta a un sistema de aire, por medio de un regulador de flujo constante.

En el nivel cero del sistema no hay ninguna contra presión de manera que el aire fluye libremente. La presión aumenta por cada pulgada de nivel que se incrementa. Como la presión desarrollada depende de la altura del líquido y su densidad, se produce un cambio en el nivel indicado tanto para una variación del nivel como de la densidad. Un incremento en la densidad se indica como un aumento del nivel, y una reducción como una disminución del nivel.

Este sistema no es apropiado para tanques cerrados, debido a que el aire que se pueda introducir aumentaría la presión y la medición sería falsa.

La ventaja de este sistema es que una vez iniciado el flujo, el instrumento de presión no está en contacto con el fluido.

do, por lo que es útil en casos de fluidos corrosivos, turbulentes, con sólidos en suspensión y para medir el nivel en cisternas donde no hay acceso lateral.

Normalmente el tubo es de 1/4" de diámetro de cobre o de acero inoxidable, los rangos que pueden medir son de 0 a 10 pulgadas de agua hasta 0 a 25 pies de agua.

En la Fig. IV.17 se presenta un sistema de este tipo.

Medidor tipo caja de diafragma. Este también se hace útil cuando no se tiene acceso lateral. Consiste de una caja metálica separada en dos secciones por un diafragma de elastómero firmemente sellado. Una sección de la caja está expuesta directamente al líquido en el cual se encuentra sumergida la caja, la otra sección está sellada y conectada por medio de un tubo capilar hasta un instrumento medidor de presión. En la Fig. IV.18 se muestra este tipo de medidor.

La caja está colgada con una cadena hasta el nivel mínimo de medición. La presión hidrostática ejercida sobre el diafragma lo deforma hasta que la presión dentro del sistema sellado se iguala a la presión hidrostática y es transmitida por el capilar hasta el indicador de presión con escala de nivel.

Este sistema se usa para sistemas abiertos; además, para líquidos no corrosivos de densidad constante, cuando el líquido a medir no soporta una purga de aire o cuando no se cuenta con un suministro de aire para la purga.

La temperatura máxima recomendable para su uso es de 250° F en rangos de 0 a 4 pulgadas de agua hasta 0 a 250 pies de agua.

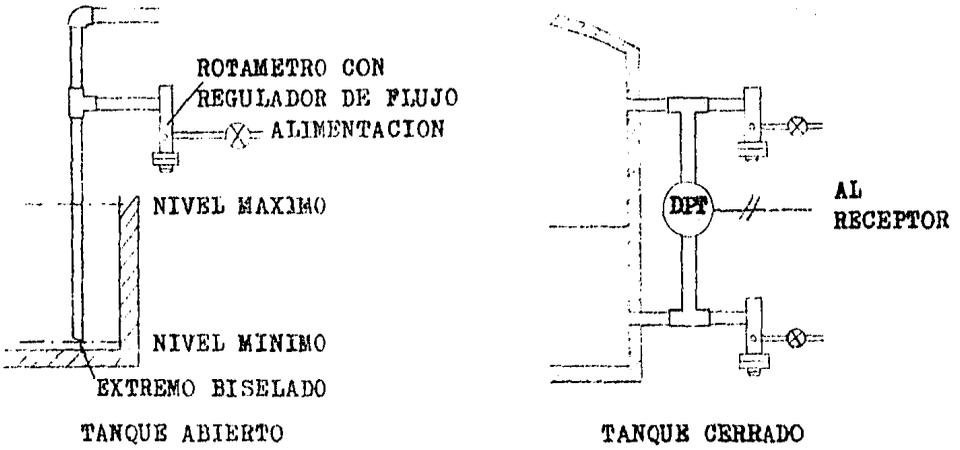


Fig. IV.17 Medidor de tipo burbujeo

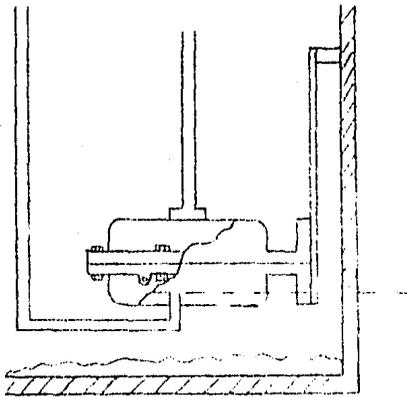


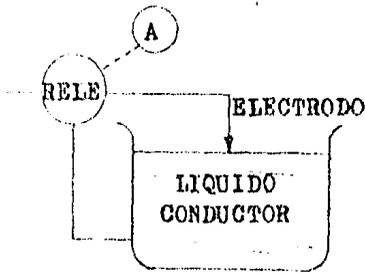
Fig. IV.18 Medidor de diafragma

Conductivo. Este medidor consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito. La impedancia mínima es del orden de 20 M Ω /cm, y la tensión de alimentación es alterna para evitar fenómenos de oxidación en los electrodos por causa del fenómeno de electrólisis. Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito electrónico y circula una corriente segura del orden de los 2mA; el relé electrónico dispone de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea o bien en su lugar se disponen dos electrodos poco separados enclavados eléctricamente en el circuito.

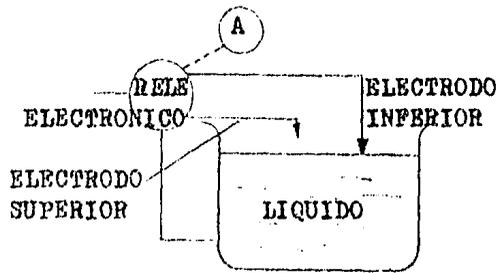
El instrumento se emplea como alarma o control de nivel alto y bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos con buena conductividad y relés electrónicos para líquidos con baja conductividad. Véase Fig. IV.19.

Una variante del aparato se utiliza en el control del nivel de vidrio en fusión: Un sistema electromecánico baja el electrodo hasta que este entra en contacto con la superficie del vidrio fundido que a las temperaturas de fusión es conductor. El circuito está proyectado de tal forma que en el momento del contacto, el electrodo queda parado y su posición marcada en un registrador; instantes después invierte su movimiento hasta romper el contacto eléctrico y se repite nuevamente el ciclo.

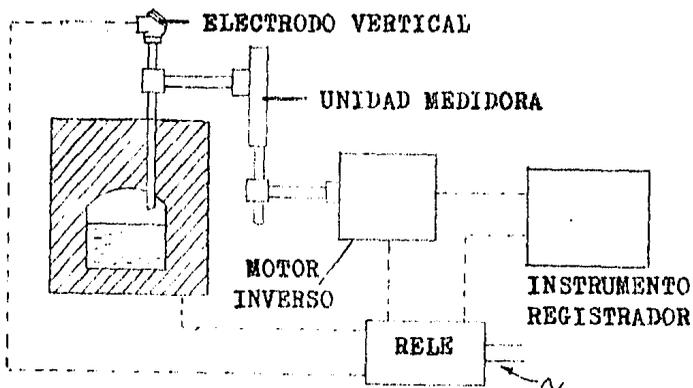
El instrumento es versátil, sin partes móviles, su campo de medida es grande con la limitación física de la longitud de los electrodos. El líquido contenido en el tanque debe tener un mínimo de conductividad y si su naturaleza lo exige, la corriente debe ser baja para evitar la deterioración del producto. Por otra parte conviene que la sensibilidad del aparato sea ajustable para detectar la presencia de espuma en caso contrario.



a) Líquido conductor



b) Líquido poco conductor



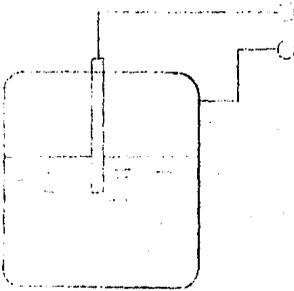
c) Nivel de vidrio en fusión

Fig. IV.19 Medidor de nivel conductivo

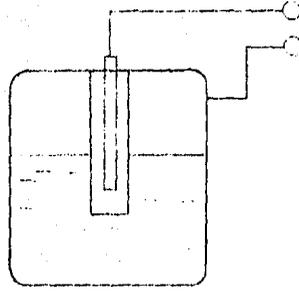
De capacidad. Este tipo mide la capacidad del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. La capacidad del conjunto depende linealmente del nivel del líquido. En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores. En fluidos conductores con una conductividad mínima de 100 micromhos/c.c. el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.

El circuito electrónico (puente de capacidades) alimenta el electrodo a una frecuencia elevada, lo cual disminuye la reactancia capacitiva del conjunto y permite aliviar en parte el inconveniente del posible recubrimiento del electrodo por el producto. El sistema es sencillo y apto para muchas clases de líquidos. Sin embargo, hay que señalar que en los fluidos conductores, los sólidos o líquidos conductores que se encuentran en suspensión o emulsión, y las burbujas de aire o de vapor existentes, aumentan y disminuyen respectivamente la constante dieléctrica del fluido dando lugar a un error máximo de 3% por cada tanto por ciento de desplazamiento volumétrico. Por otro lado, al bajar el nivel, la porción aislante del electrodo puede quedar recubierta de líquido y la capacidad adicional que ello representa da lugar a un error considerable.

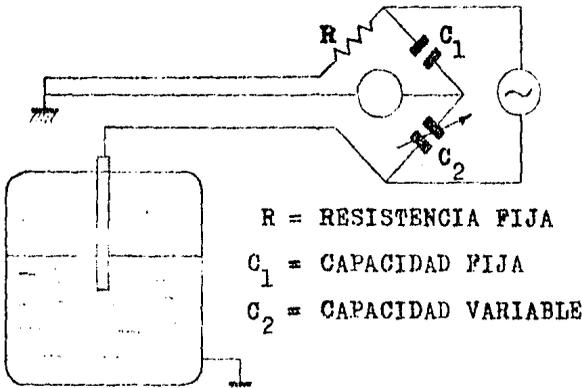
Tienen una precisión de $\pm 1\%$, no tienen partes móviles, son ligeros, son resistentes a la corrosión y son de fácil limpieza. Su campo de medida es prácticamente ilimitado y pueden emplearse en la medida de nivel de interfases. Por otro lado, la temperatura puede afectar las constantes dieléctricas y posibles contaminantes pueden adherirse al electrodo variando su capacidad y dando lecturas falsas en particular en el caso de líquidos conductores. En la Fig. IV.20 se muestra el medidor.



a) Fluido no conductor



b) Fluido conductor



c) Puente de capacidades

Fig. IV.20 Medidor de capacidad

Medidor radiactivo. Consiste en un emisor de rayos gamma --
montado verticalmente en un lado del tanque y con un contador --
Geiger que transforma la radiación gamma recibida en una señal --
eléctrica de corriente continua. Como la transmisión de los ra --
yos es inversamente proporcional a la masa del líquido en el --
tanque, la radiación captada por el receptor es inversamente --
proporcional al nivel del líquido ya que el material absorbe --
parte de la energía emitida. Los rayos emitidos por la fuente --
son similares a los rayos X, pero de longitud de onda más cor --
ta. La fuente radiactiva pierde igualmente su radiactividad en
función exponencial del tiempo. La vida media varía según la --
fuente empleada. En el cobalto 60 es de 5.5 años y en el cesio --
137 es de 33 años y en el radio 226 es de 1620 años.

Las paredes del tanque absorben parte de la radiación y al
detector llega sólo un pequeño porcentaje. Los detectores son, --
en general, tubos Geiger (otros medidores emplean detectores de
cámara iónica) y utilizan amplificadores de c.c. o de c.a. Los
amplificadores de c.c. precisan un reajuste periódico de la de --
riva electrónica del cero desde 1 a 4 semanas, aparte de la com --
pensación de la pérdida de radiación progresiva experimentada --
por la fuente. Los amplificadores de c.a. precisan menos mante --
nimiento que los de c.c.

El sistema se emplea en caso de medida de nivel en tanques
de acceso difícil o peligroso. Es ventajoso cuando existen pre --
siones elevadas en el interior del tanque que impiden el empleo
de otros sistemas de medición. Hay que señalar que el sistema --
es caro y que la instalación no debe ofrecer peligro alguno de
contaminación radiactiva siendo necesario señalar debidamente --
las áreas donde están instalados los instrumentos y realizar --
inspecciones periódicas de seguridad. En la Fig. IV.21 se mues --
tra el tipo de medidor radiactivo.

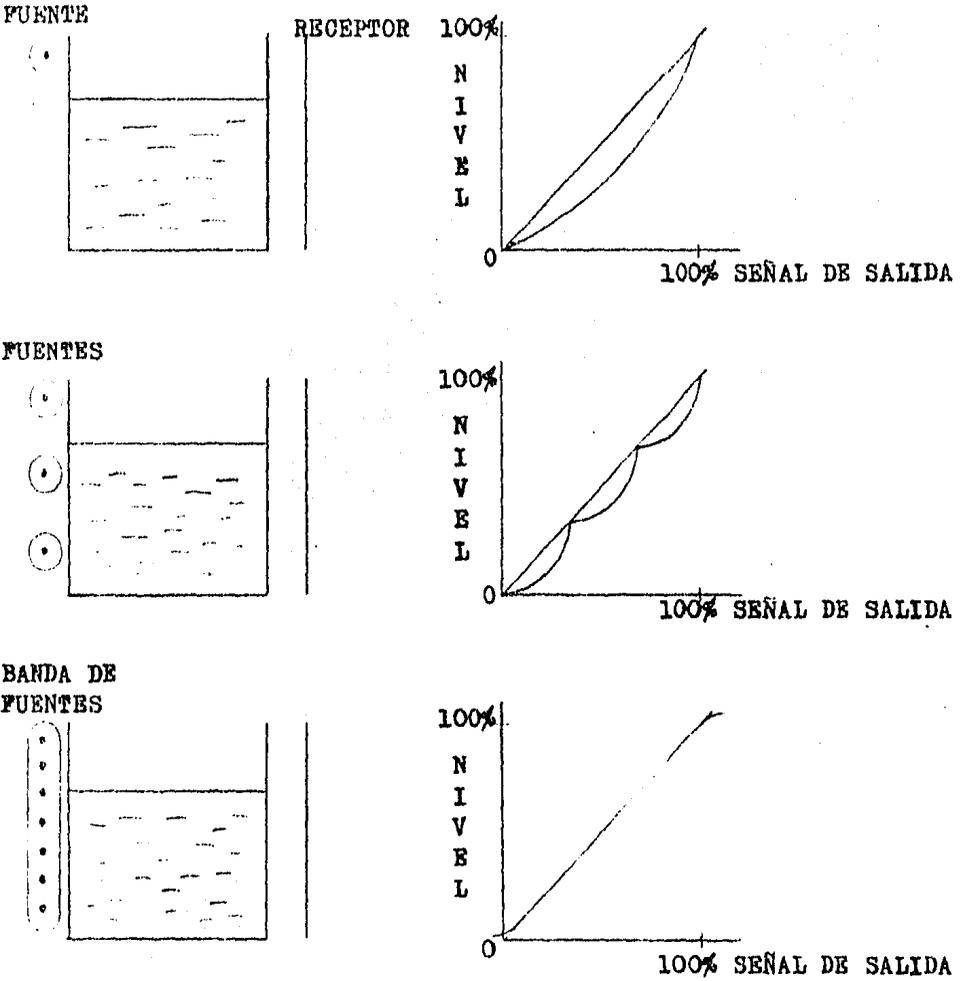


Fig. IV.21 Medidor de nivel radiactivo

PRESION

Los elementos primarios de medición de presión más comunes son:

Tipo tubos de bourdon

Tipo diafragma

Tipo fuelle

Tipo electrónico

Tubos de bourdon. Este tipo de medidores son los que se emlean más comunmente en la industria.

Los sensores de presión tipo tubo de bourdon no son muy adecuados para bajas presiones o vacíos, ya que el gradiente de elasticidad en el tubo bourdon es demasiado bajo para rangos de precisión en rangos de 2.1 kg/cm^2 o menor.

Los materiales de construcción más comunes son: bronce, -- acero inoxidable, níquel-C, cobre-berilio, K-monel y monel.

Existen tres tipos de bourdones: el C, el espiral y el helicoidal.

El tubo bourdon tipo C, que se emplea como indicador directo, generalmente tiene un arco de 250° . La presión de proceso -- se conecta al extremo fijo del tubo, mientras que el extremo opuesto está cerrado. Debido a la diferencia entre los radios interno y externo, el tubo bourdon presenta áreas diferentes a la presión, lo cual causa que el tubo tienda a enderezarse.

El movimiento resultante del extremo móvil no es lineal -- puesto que se obtiene menos movimiento en cada incremento adicional de presión. El movimiento no lineal tiene que convertirse a una indicación lineal; esto se hace mecánicamente por medio del movimiento de un sector y un piñón dentados, ya que el bourdon les transfiere su movimiento por medio del eslabón. El ángulo entre el eslabón de conexión y la cola del sector cambia con el movimiento en una forma no lineal, compensando la no ---

linealidad del bourdon. Tanto el piñon como el sector tienden a desajustarse, para evitar esto se usa un sector de baquelita y una leva helicoidal, y con esto disminuir esfuerzos en los engranes.

Este es un típico transmisor de balance de fuerzas y es usado para sistemas de transmisión neumática y electrónica.

Dependiendo del material de construcción y calibración, se tiene una exactitud de $\pm 0.1\%$ a $\pm 5\%$.

El espiral es usado cuando la libertad del tipo C es insuficiente para operar la mayoría de los transmisores de balance de movimientos. Cuando se aplica la presión, la espiral tiende a desenrollarse y produce un movimiento bastante grande, el cual no requiere amplificación mecánica. Esto aumenta la sensibilidad y exactitud del instrumento, la cual es alrededor de $\pm 0.5\%$ y los rangos de presión más bajos son del orden de 10 psi.

El helicoidal produce un movimiento como el espiral, por lo cual no se necesita amplificación mecánica. Tiene gran capacidad para soportar sobre presiones, por ejemplo en casos extremos puede soportar una sobre presión de casi 10 veces el rango del instrumento sin sufrir daño. Estos elementos son muy útiles para servicios de presión pulsante. El rango de la hélice se afecta o depende del diámetro, el espesor de las paredes, el número de enrollamientos y los materiales de construcción. Los elementos de alta presión pueden tener hasta 20 vueltas mientras que los de baja presión llegan a tener 2 o 3 vueltas. Se tienen rangos de presión que van desde 0 a 30 psi y de 0 a 80000 psi dependiendo del material de construcción; la exactitud es de $\pm 0.5\%$ a $\pm 1\%$ dependiendo en la manufactura. No son muy adecuados para indicación directa y para instrumentos que funcionan por balance de movimientos. En la Fig. IV.22 se muestran los tres tipos de bourdon antes descritos.

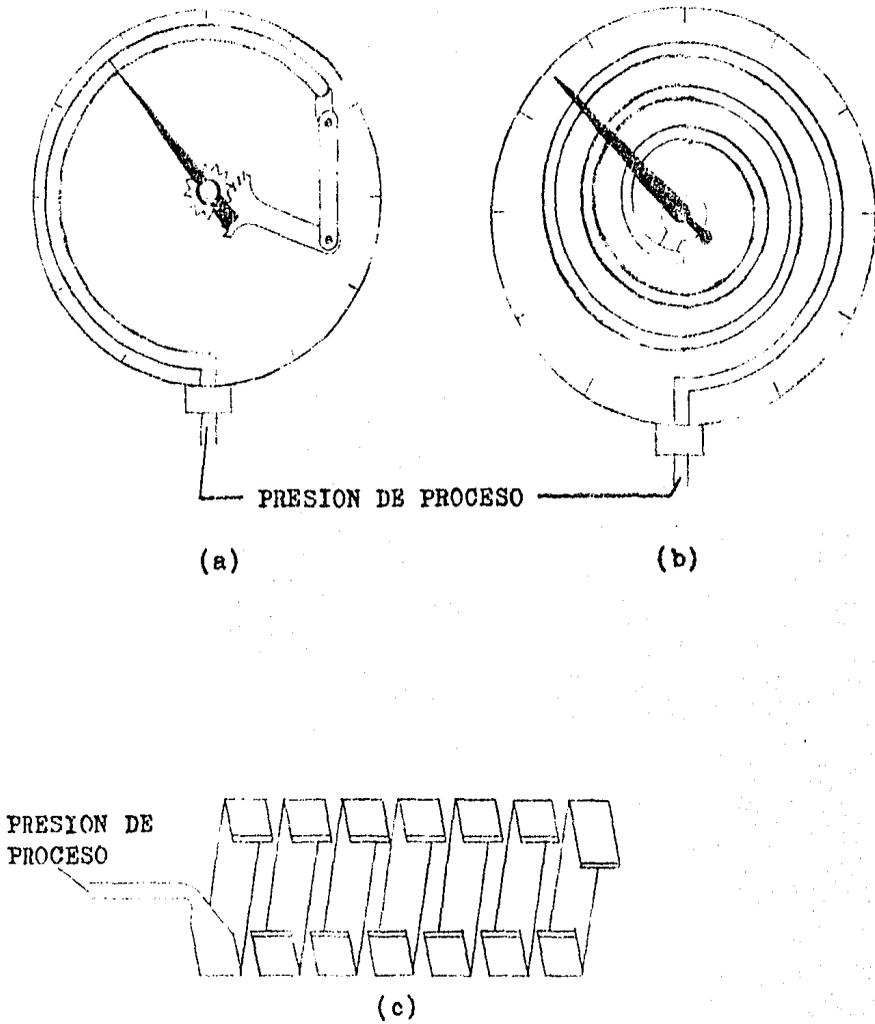


Fig. IV.22 Tipos de tubos bourdon (a) Tipo C, (b) Tipo espiral, (c) Tipo helicoidal

Diafragma. Los medidores de presión basados en la deflexión de un diafragma, el cual es un disco flexible plano o corrugado hecho de una hoja metálica, han sido muy usados en las últimas décadas. Actualmente nuevos materiales de construcción han mejorado su operación; siendo los más comunes el bronce-fósforo, -- acero inoxidable, berilio-cobre, inconel, hastelloy, monel y níquel entre otros.

Los diafragmas se pueden usar directamente o en forma de cápsula, la cual consiste de dos diafragmas soldados en su periferia uno al otro. En la Fig. IV.23 se ilustran los diafragmas.

Las cápsulas evacuadas se usan para la medición de presión absoluta (Fig. IV.24).

Los diafragmas pueden usarse para rangos tan bajos como de 0 a 5 mm Hg o tan amplios como de 0 a 760 mm Hg. La exactitud de medición puede ser mejor que $\pm 1\%$ de la escala total. Los diafragmas comerciales se fabrican de diámetros de 2", 3", 3 1/2" y 5". Los diafragmas pueden usarse para la medición de presión por balance de movimientos o por balance de fuerzas. Los medidores de balance de movimientos se usan principalmente para indicación local.

Dentro de este detector de presión, la presión de proceso dentro de la cápsula se balancea en contra de la acción del resorte del elemento. La superficie de fuera del diafragma está expuesta a la presión atmosférica, que es la presión de referencia del instrumento. Los medidores tipo balance de fuerzas solo se usan para transmisión, debido a que casi no hay movimiento del diafragma. La presión detectada se aplica del lado izquierdo del diafragma en la cápsula, mientras que el espacio en el otro lado del diafragma está totalmente evacuado, proporcionando así una presión absoluta de referencia cero.

Debido a la naturaleza de balance de fuerzas en esta unidad, la barra de fuerzas está constantemente balanceada si la -

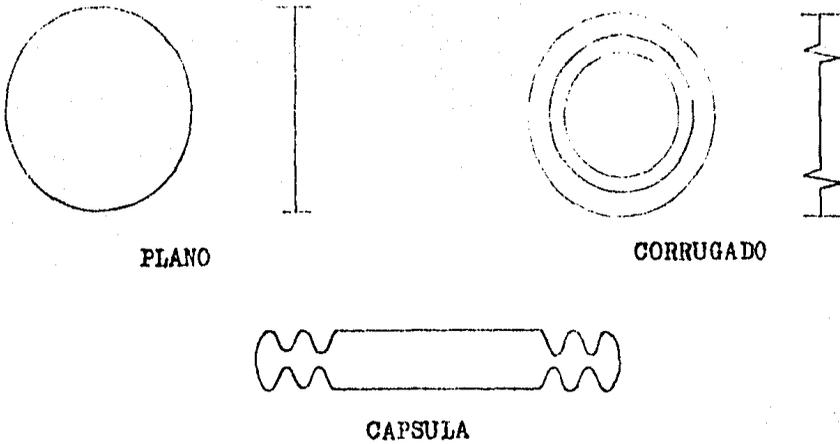


Fig. IV.23 Diafragmas

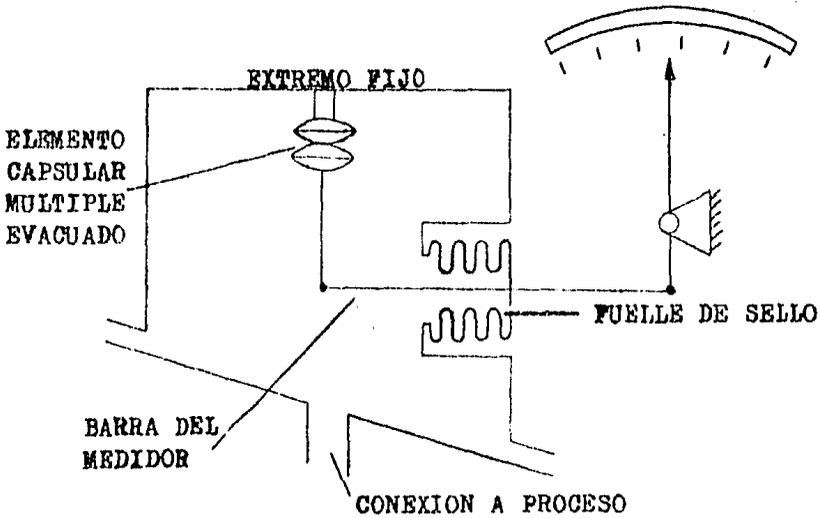


Fig. IV.24 Detector de presión absoluta

presión está dentro del rango de la cápsula y por tanto el diafragma no se mueve. Si la presión sobrepasa el rango, el diafragma se mueve a la derecha donde es soportado por la placa de protección, por lo cual estos instrumentos pueden soportar altas presiones sin sufrir daño.

Fuelle. Actúa en forma similar al efecto de conectar varios elementos tipo diafragma. Los fuelles se desarrollaron para poder tener indicación local. En general, se puede decir que estos elementos pueden detectar presiones ligeramente mayores que los diafragmas, así como proporcionar fuerzas más grandes. Las desventajas de los elementos de fuelle son su endurecimiento con el uso y su mayor sensibilidad a variaciones de temperatura. En la mayoría de los casos, la acción elástica del fuelle solo no es suficiente para una medición precisa y es necesario adicionar un resorte para obtener mayor presión.

Los fuelles pueden ser usados para medir vacío, presión absoluta y para presión atmosférica.

Quando se desea medir presión absoluta con fuelles, normalmente se utilizan dos, uno para medir y otro para compensar; un fuelle se evacúa totalmente y se sella mientras que el elemento sensor se conecta al proceso. La medición con fuelle en este caso es por balance de movimientos (Fig. IV.25).

Un incremento en la presión de proceso ocasiona que el fuelle de medición se extienda, lo cual provoca un aumento en la lectura a través del mecanismo de balance de movimiento. Si la presión de proceso es constante pero la presión barométrica cambia, la fuerza ejercida igualmente en el exterior de ambos fuelles no causará un cambio en la lectura. La medición con fuelle puede ser también por balance de fuerzas (Fig. IV.26).

Los materiales más comunes de los fuelles son latón, acero inoxidable, fósforo-bronce, berilio-cobre, o monel. El rango de

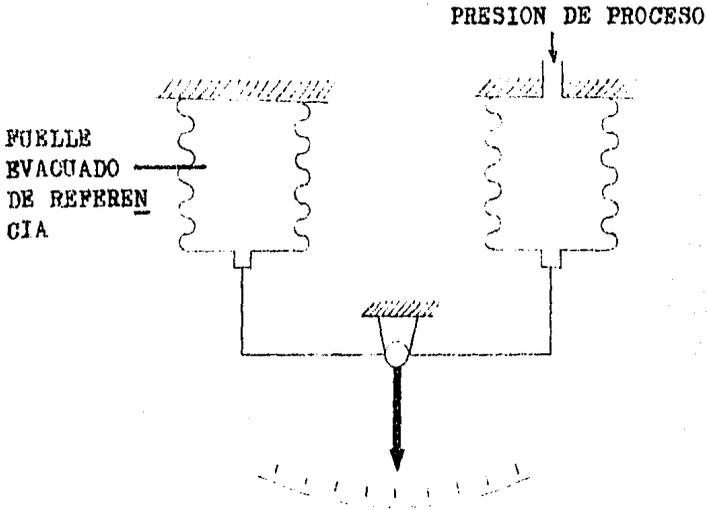


Fig. IV.25 Medidor tipo balance de movimientos usando fuelle

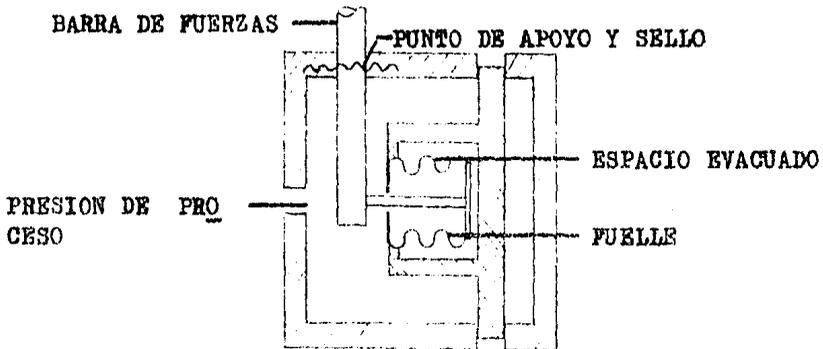


Fig. IV.26 Medidor tipo balance de fuerzas usando fuelle

temperatura aconsejable es de -60 a 200°F , y la exactitud es de $\pm 1\%$.

Tipo electrónico. Los sensores electrónicos son más exactos y rápidos en su respuesta, aunque son más caros que los anteriormente descritos; pero en la actualidad su precio se compensa con su utilidad.

Entre los dispositivos electrónicos para medir presión están los strain gages, los de resistencia y los de capacitancia entre otros.

Los primeros dispositivos usados para detectar esfuerzos -- sobre cuerpos sólidos fueron los extensómetros, los cuales consisten de un alambre metálico de un diámetro de 0.025 mm de cromo-níquel o platino, el cual se adhiere en el cuerpo. Cuando el cuerpo se deforma, dicho alambre cambia su longitud, la cual se detecta como una variación en su resistencia eléctrica.

Los elementos semiconductores, también presentan esta característica de variar su resistencia al variar su longitud. El germanio y el silicio poseen una sensibilidad, la cual es cerca de 100 veces mayor que los extensómetros.

Al usarse este tipo de elementos las variaciones de temperatura en el proceso afectan la lectura, y para compensarlos en temperatura se tienen varios métodos (en rangos de -70 a 66°C -- los errores térmicos son despreciables): Para temperaturas fuera del rango mencionado se usan elementos con coeficientes térmicos negativos y positivos, para que se cancelen los efectos -- de la variación de la temperatura. El método más común es el -- uso de los elementos falsos. Este elemento se monta en la misma superficie que el elemento activo y se exponen a la misma temperatura, solo que el elemento falso no está sujeto a esfuerzos. Si el elemento falso se conecta a un brazo de un puente de Wheatstone y en una rama adyacente el activo, se compensan los

efectos térmicos. En la Fig. IV.27 se muestra un puente con los elementos antes mencionados.

Otro medidor tipo strain gage consta de un diafragma plano al que se le aplica la presión del proceso. Los esfuerzos resultantes en el diafragma se detectan por medio de cuatro elementos unidos al diafragma. Los cambios de resistencia de los elementos son función de la presión del proceso (Fig. IV.28).

Otro tipo de medidor es el que se muestra en la Fig. IV.29 el cual consta de un tubo con un extremo cerrado y otro abierto a la presión del proceso.

Cuatro sensores de esfuerzo están adheridos al tubo en su parte extrema. Dos elementos sujetos a los esfuerzos de la presión se montan longitudinalmente, mientras que los otros dos se montan circunferencialmente. Estos sensores se conectan al puente para obtener la indicación.

Existen también medidores en los cuales se encuentran fuelles como el que se presenta en la Fig. IV.30. Este consiste de dos fuelles opuestos; uno de los cuales se conecta al proceso y el otro a una señal de referencia o bien evacuarse para medir presión diferencial o presión absoluta respectivamente. Los fuelles están unidos a una barra flexionante de sensores de esfuerzo.

En general las principales características del medidor de esfuerzo son: se pueden medir presiones absolutas, manométricas y diferenciales en rangos de 760 mm Hg hasta 14000 kg/cm², con una exactitud de $\pm 0.2\%$ a $\pm 0.5\%$ del rango. La mayoría de los diseños no tienen partes móviles y son adecuados para altas sobrepresiones, además de tener gran resistencia a la vibración y al impacto.

Otro de los dispositivos electrónicos para medir la presión es el de resistencia. En la Fig. IV.31 se muestra un esquema simplificado de un detector de este tipo.



Fig. IV.27 Circuito de puente de Wheatstone para medición de esfuerzos

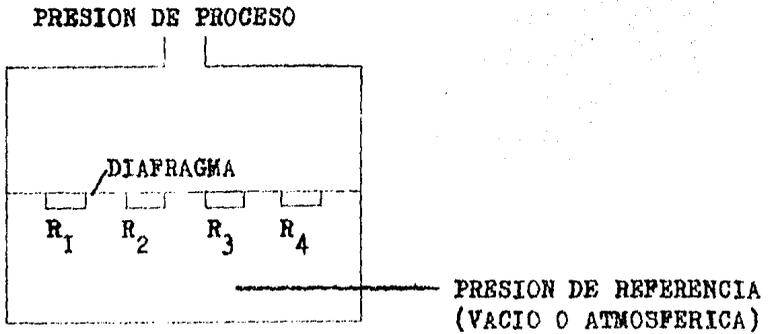


Fig. IV.28 Medidor tipo strain gage usando diafragma

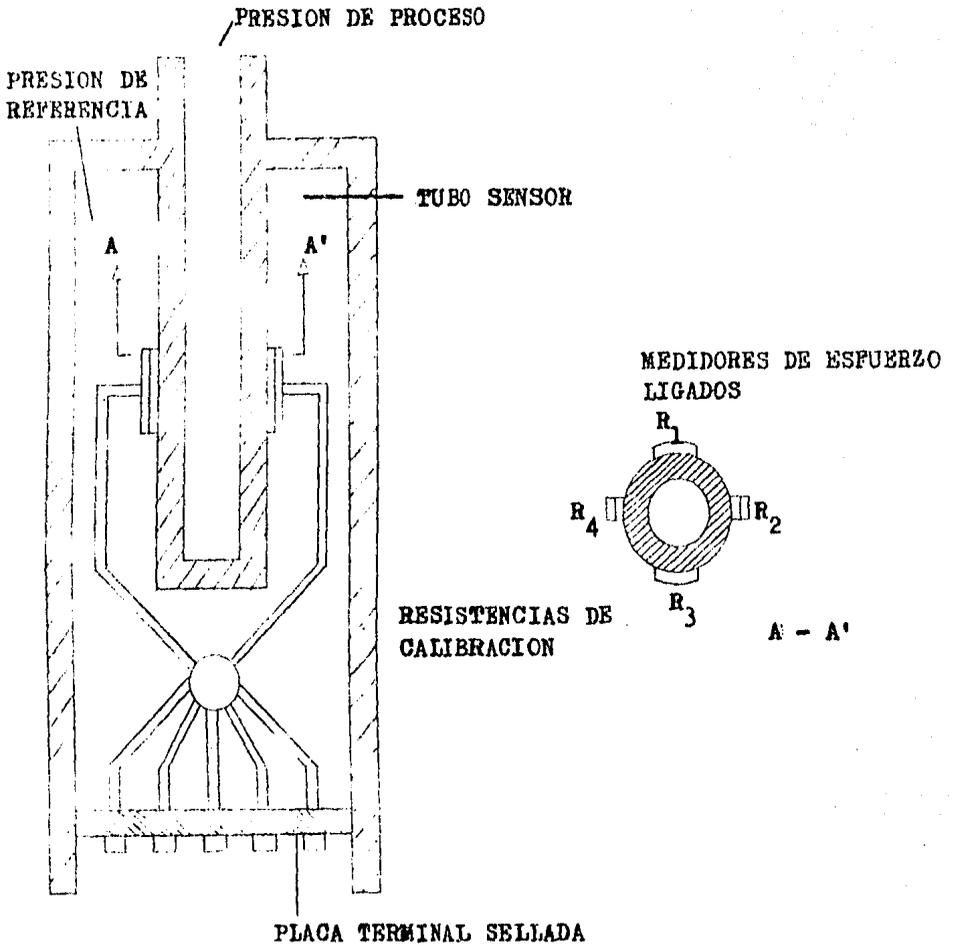


Fig. IV.29 Medidor tipo strain gage usando tubo sensor

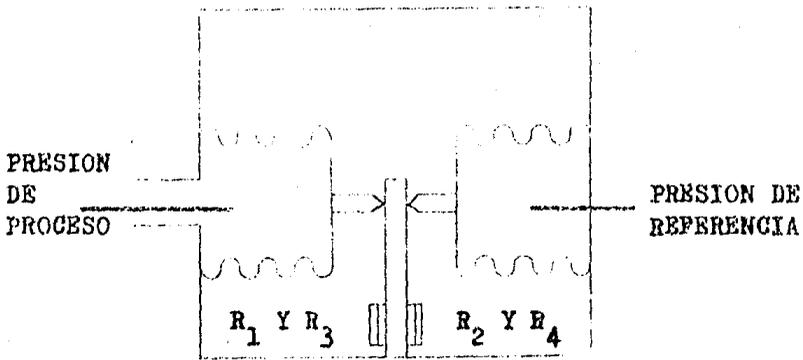


Fig. IV.30 Medidor tipo strain gage usando fuelle

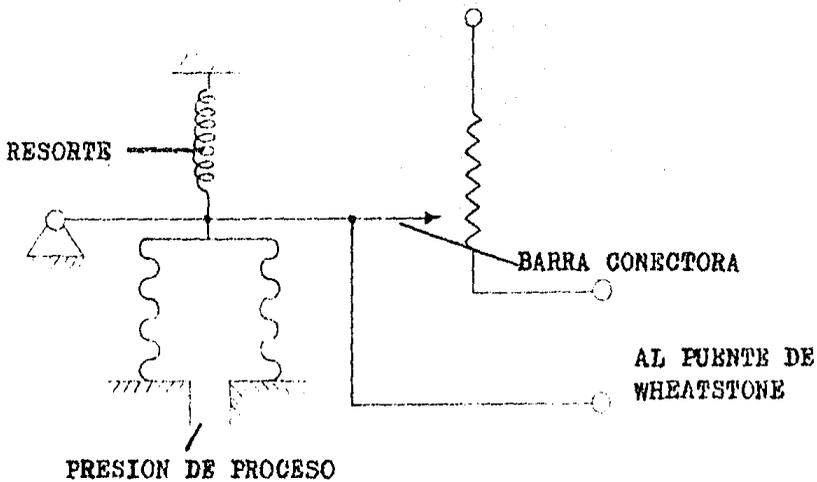


Fig. IV.31 Sensor de presión tipo resistencia variable

Un cambio de presión en el proceso es detectado por un elemento elástico, el cual está conectado a una barra que posiciona un metal noble que hace contacto con un potenciómetro de precisión, convirtiendo la presión de proceso en una señal eléctrica de resistencia en forma similar a los elementos del strain gauge. Los rangos varían de 1 a 5000 psi con una exactitud de $\pm 1\%$ a $\pm 2\%$.

El medidor de presión tipo capacitancia basa su principio de operación en el cambio de capacitancia eléctrica a partir del movimiento de un elemento elástico. El elemento es un diafragma de acero inoxidable o níquel-C expuesto a la presión del proceso en un lado y a la presión de referencia en el otro. En la Fig. IV.32 se muestra un sensor de este tipo.

Dependiendo de la presión de referencia, puede detectar presión absoluta, manométrica o diferencial.

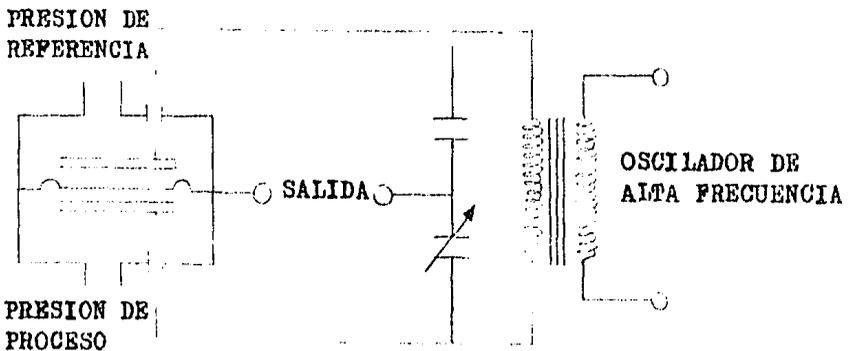


Fig. IV.32 Sensor de presión tipo capacitancia

De esta figura se observa que el sensor cuenta con un oscilador de alta frecuencia y alto voltaje para energetizar al elemento sensor. Al cambiar la presión del proceso se produce una deflexión del diafragma, ocasionando una variación de capacitancia que es detectada por el puente.

Estos sensores tienen una exactitud de $\pm 0.1\%$ a $\pm 0.2\%$ del rango de presiones entre 0.05-5 a 0.5-600 kg/cm².

Cabe señalar que tanto su sensibilidad a la temperatura como su histéresis son bajas, mientras que su velocidad de respuesta es muy rápida. La única dificultad es que son sensibles a las variaciones de la permitividad del fluido de proceso, por lo cual su uso está limitado a fluidos dieléctricos y a servicios de gas seco, no condensable.

Principales partes y conexiones de los manómetros. Los medidores de presión o manómetros son instrumentos que utilizan elementos primarios de medición mecánicos discutidos anteriormente.

Las principales partes de un manómetro son:

Caja. Es la pieza que encierra a todos los componentes y se fabrican comercialmente en diámetros de 1 1/2" hasta 12" en materiales de construcción como son acero, latón, aluminio, hierro, etc.

Bisel. Es el elemento que sujeta al protector de la carátula de vidrio y se fabrican en los mismos tamaños y de los mismos materiales que la caja; existen tres tipos básicos: bisel tipo roscado, bisel a presión con anillo de sujeción y bisel tipo deslizable.

Carátula. Esta es la que determina la medida nominal de un manómetro; las carátulas se fabrican en materiales de latón, acero, y fenol con escala de caracteres negros y fondo blanco o

viceversa.

Movimiento. Es la parte que transmite la deformación del elemento elástico a la aguja y normalmente son fabricados de acero inoxidable 316, bronce fosforado y latón.

Conexiones. El tamaño de las conexiones son usualmente de $1/4"$ o $1/2"$. En la Fig. IV.33 se muestran los componentes físicos que en conjunto forman un manómetro de uso general.

Dentro de los accesorios que se necesitan para obtener un mejor rendimiento y cuidado de los manómetros se tienen:

Disco de ruptura. Es un diafragma que se coloca en la parte posterior del manómetro y su función es liberar el fluido en caso de que el elemento elástico se rompa, esto es para evitar que se presione la caja del manómetro y reviente el vidrio dañando a un posible operador o lector del manómetro.

Capilar de purga. Este es un tubo que se introduce en el bourdon para liberar el aire en los sistemas hidráulicos. Este capilar es muy útil en las industrias del plástico, debido al problema de que el plástico se introduce en el elemento. Este problema se evita conectando una grasera al capilar de purga, con lo que se llena el bourdon, evitando que entre el plástico.

Sifón. Cuando el manómetro se usa para medir presiones de vapor de agua, deberá instalarse entre el manómetro y la línea un tubo en espiral.

Amortiguador de pulsaciones. Un problema que destruye a los manómetros es la aplicación de estos en servicios de presión pulsante, debido a que se tienen problemas de operación (el puntero oscila constantemente). La función del amortiguador de pulsaciones es la de estabilizar la presión a medir.

Sellos químicos y de diafragma. Cuando se tienen problemas de fluidos corrosivos, cambio de fase debido a los cambios de temperatura o cuando el fluido que se desea medir pudiera

obstruir el elemento primario, se emplean este tipo de sellos.

Los sellos de diafragma se usan cuando el sello químico -- puede reaccionar con el fluido de proceso o cuando no puede con seguirse el fluido de sollo.

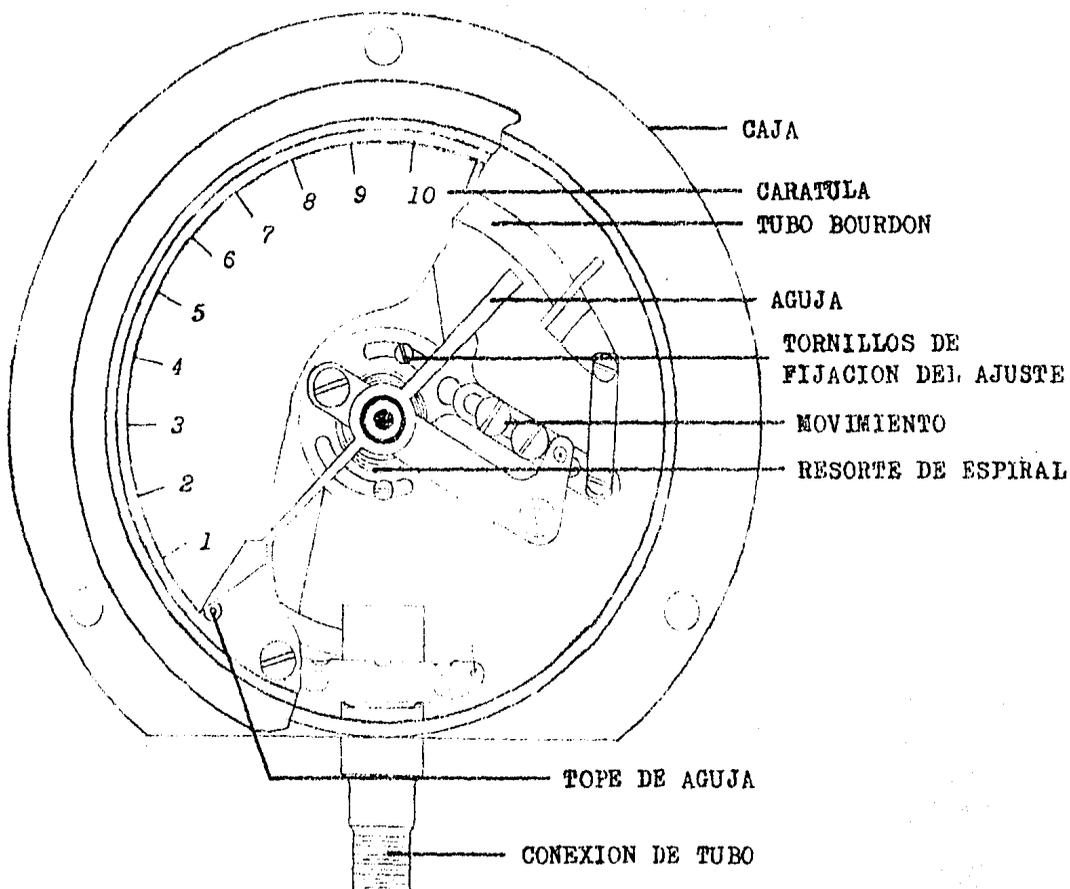


Fig. IV.33 Manómetro de presión de tubo bourdon.

TEMPERATURA

Existen varios dispositivos que se utilizan como elementos primarios de medición de temperatura. A continuación se describen algunos de estos elementos.

Termómetro de vidrio. Consta de un depósito de vidrio que contiene un fluido, por ejemplo: mercurio, pentano, tolueno, o alcohol y que al calentarse se expande y sube por el tubo capilar.

El rango de temperatura que se puede medir es de -35 hasta 450°C . En la Fig. IV.34 se ilustra este tipo de dispositivo.

Tienen la ventaja de ser baratos y de fácil mantenimiento, pero son frágiles y sólo se pueden usar para indicación local.

Termómetros bimetalicos. Estos basan su funcionamiento en los siguientes principios:

-El cambio de volumen que experimentan los metales con la temperatura.

-El coeficiente de dilatación no es el mismo para todos los metales.

Este termómetro está constituido por dos barras de metal de diferente coeficiente de dilatación (uno alto y otro bajo). Al aumentar la temperatura la tira resultante de la unión de las dos barras, tenderá a doblarse hacia el lado del metal con la más baja razón de expansión. La deflexión es proporcional a:

-El cuadrado de la longitud

-El cambio de temperatura

-Inversamente al grueso de la tira.

El movimiento resultante es pequeño y para amplificarlo en un espacio de tamaño razonable, la barra bimetalica puede ser doblada en forma de un espiral o hélice, como se muestra en la Fig. IV.35.

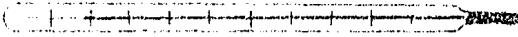


Fig. IV.34 Termómetro de vidrio

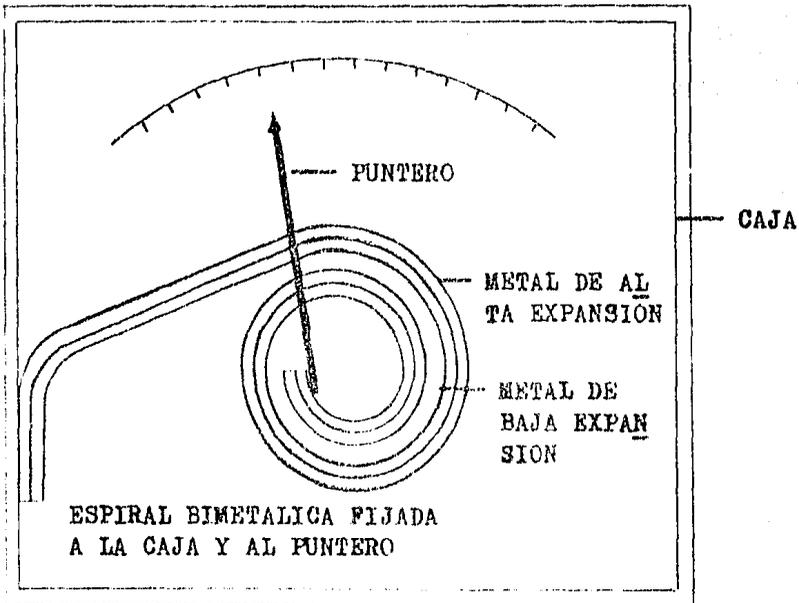


Fig. IV.35 Termómetro bimetalico ambiental

La orilla exterior de la espiral es fijada a la caja y se le conecta un puntero en el centro. A medida que la temperatura aumenta, la espiral se cierra, haciendo deflexionar al puntero en el sentido de las manecillas del reloj.

Una combinación de metales muy usada es el invar (64% Fe - 36% Ni) de baja expansión, y latón o níquel de alta expansión.

La mayoría de los termómetros bimetalícos son de una bobina helicoidal que puede diseñarse para ser adaptada dentro de un tubo protector y así medir la temperatura del fluido dentro de un ducto.

Una hélice simple se mueve axialmente a medida que se enrolla o desenrolla con el calor y el frío. Esto requiere espacio para un movimiento vertical del puntero. La dificultad puede superarse, si se desea, mediante el uso de un elemento múltiple, enrollado coaxialmente de manera que forme espiras dentro de espiras. Esta construcción es más costosa, pero tiene la ventaja de requerir menor longitud de inmersión (Fig. IV.36).

También se fabrican termómetros bimetalícos del tipo cuya carátula puede ser colocada a cualquier ángulo con respecto al eje del tubo. Puede ser aún del tipo de eslabón giratorio como el mostrado en la Fig. IV.37.

Otra característica normalmente incluida es el sellado total. Un gas seco se introduce en la parte de la carátula del arreglo mientras que un fluido de silicio llena el tubo y rodea al rollo para amortiguar la vibración y acelerar la transferencia de calor.

Las carátulas se fabrican de 5 a 12 cm de diámetro y con longitudes de tubo hasta de 60 cm. Los pozos se fabrican de acero al carbón, acero inoxidable u otros materiales para protección contra fluidos corrosivos.

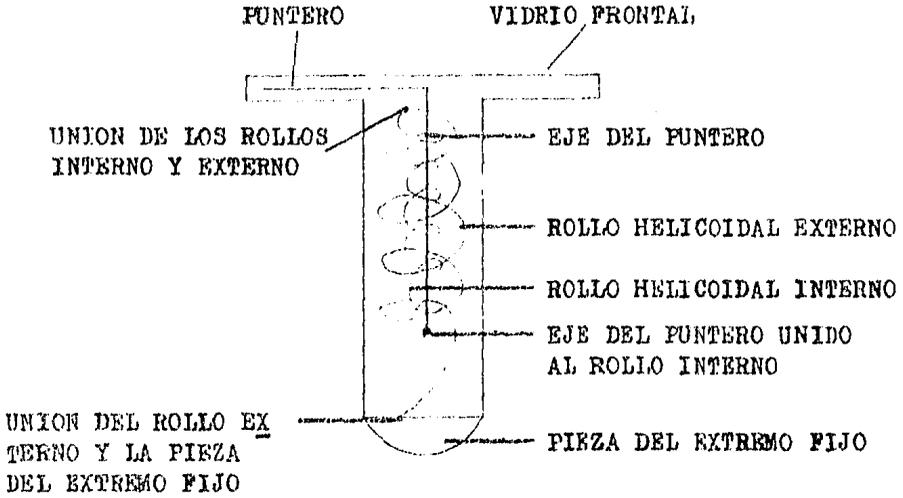


Fig. IV.36 Termómetro bimetalico con doble rollo helicoidal

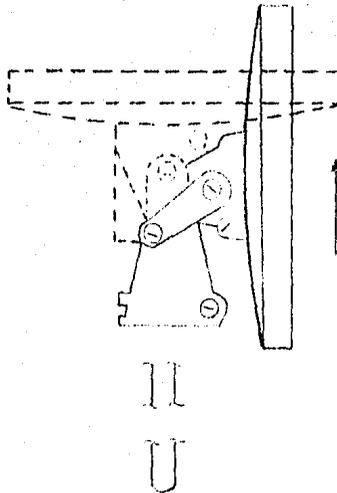


Fig. IV. 37 Termómetro bimetalico con carátula ajustable

Los elementos bimetalicos pueden hacerse lo suficientemente fuertes para actuar una pluma registradora.

El rango de operación de estos dispositivos es de -40 a $+1000^{\circ}\text{F}$ y su exactitud nunca es menor del 1% de la escala total.

Estos dispositivos son más baratos que los sistemas termales y los sensores eléctricos que se verán más adelante. Su desventaja es que cambian su calibración debido a un rudo manejo, por lo cual su exactitud total no es muy buena. Los termómetros bimetalicos están limitados a medición local.

Sistemas termales llenos. Estos dispositivos están constituidos por un bulbo metálico conectado a un tubo capilar de una determinada longitud y a un elemento (fuello, espiral, helicoidal, etc.) al final del capilar. Este elemento es sensible a los cambios de presión o de volumen que se producen en el fluido del cual está lleno el sistema, estos cambios son función de la temperatura del bulbo el cual se introduce en el proceso.

El volumen del líquido depende principalmente de la temperatura del bulbo, de la del capilar y de la del elemento de medición (temperatura ambiente). Por lo tanto, para capilares cortos hasta 5 m, sólo hay que compensar el elemento de medición para evitar errores debidos a variaciones de la temperatura ambiente (compensación de caja). Para capilares más largos hay que compensar también el volumen del tubo capilar (compensación total). En la Fig. IV.38 se ilustran tales compensaciones.

Existen varios tipos de sistemas termales de acuerdo a la sustancia de llenado y al tipo de compensación que tenga. En forma general se tienen: Llenos con líquido orgánico (Clase I), líquido con su vapor en equilibrio (Clase II), de gas (Clase III) y de mercurio (Clase V).

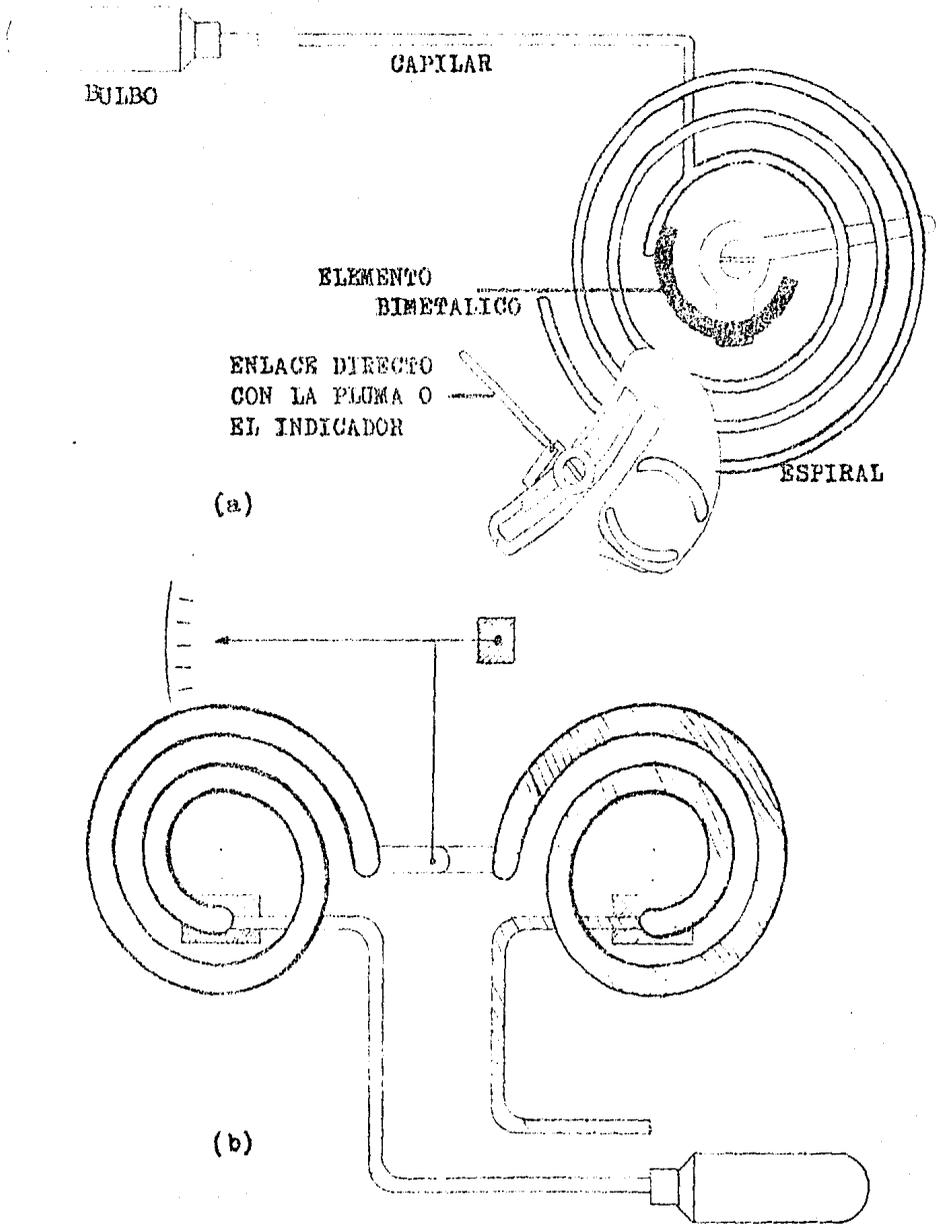


Fig. IV.38 Compensación por (a) caja y (b) total

Clase I. Son los sistemas que están totalmente llenados con un líquido orgánico.

Clase IA. Compensación total. La longitud máxima del capilar es de 60 m. Su velocidad de respuesta es lenta.

Clase IB. Compensación de caja. La longitud máxima del capilar es de 4.5 m. Su velocidad de respuesta también es lenta.

Los límites de intervalo práctico de temperatura son aproximadamente:

Clase IA: -73 a 93°C

Clase IB: -34 a 66°C

Aunque estos rangos dependen del líquido de llenado y normalmente no es mayor de 316°C .

Esta clase es más cara respecto a los otros sistemas.

Clase II. Esta clase tiene un fluido de llenado tanto en forma líquida como en fase vapor.

Dado que los sistemas se constituyen para que la interfase líquido-vapor esté siempre en el bulbo y considerando que la presión dentro del sistema depende de la temperatura en la interfase, las temperaturas diferentes a las del bulbo a que están sujetos el capilar y la espiral, no tendrán influencia sobre la medición y por tanto, estos sistemas no requieren compensación.

Clase IIA. Trabajan con la temperatura del proceso por arriba del capilar y de la caja.

Cuando el bulbo está a un nivel mayor de 6' de la caja, se requiere una corrección por la carga hidrostática en el capilar.

Clase IIB. Trabajan con la temperatura del proceso por debajo del capilar y de la caja.

Clase IIC. Está diseñado para trabajar con la temperatura del proceso por arriba y por abajo de la temperatura del capilar y de la caja. Este tipo se utiliza cuando no hay desnivel -

apreciable entre el bulbo y la caja. Debido al brinco que hay al cruzar la temperatura ambiente este sistema se usa solamente en indicadores.

Clase IID. Este sistema está lleno tanto con líquido no volátil así como también con líquido volátil. El líquido volátil se encuentra en el bulbo y el líquido no volátil se encuentra en el capilar para transmitir la presión del vapor al mecanismo.

Es diseñado para operar con la temperatura del proceso por arriba y por abajo de la temperatura ambiente.

El sistema clase II es el más rápido; es decir, es el que tiene mayor velocidad de respuesta. La longitud máxima del capilar es de 46 m. Tiene un rango de operación aproximado de -257° a 316° C dependiendo del líquido de llenado. Es el más barato respecto a los otros sistemas termales.

Clase III. Este sistema está lleno de gas y se comporta como un gas perfecto confinado en un volumen constante, la presión en el sistema es proporcional a la temperatura. El gas que se utiliza para el llenado es el nitrógeno, y para temperaturas muy bajas se utiliza el helio.

Para este tipo de sistema sólo existe la clase IIIB (compensación de caja) no existiendo compensación completa, ya que se ha encontrado prácticamente que una relación de 9 a 1 del volumen del bulbo al volumen del capilar con el tubo de bourdon disminuyendo notablemente el efecto de los cambios de temperatura ambiente.

Sus límites de intervalo práctico de temperatura son de -240 a 538° C. La velocidad de respuesta es generalmente alta debido a la gran área que presenta el bulbo.

La máxima longitud del capilar es de 61 m. Su costo se encuentra entre los de la clase I y II.

Clase V. El líquido de llenado es el mercurio; y por lo tanto, requiere compensación.

Clase VA. Compensación completa

Clase VB. Compensación de caja

La temperatura mínima de trabajo de este sistema está limitada por el punto de congelación del mercurio que es de -39°C .

La máxima longitud del capilar es de 61 m.

Los límites de temperatura de trabajo son de -39 a 535°C y su velocidad de respuesta es lenta.

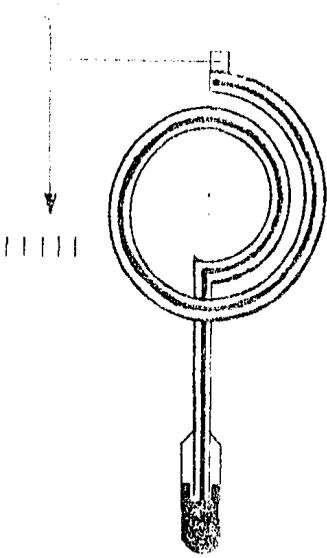
Su costo es alto.

En la Fig. IV.39 se muestran algunos tipos de sistemas termales llenos.

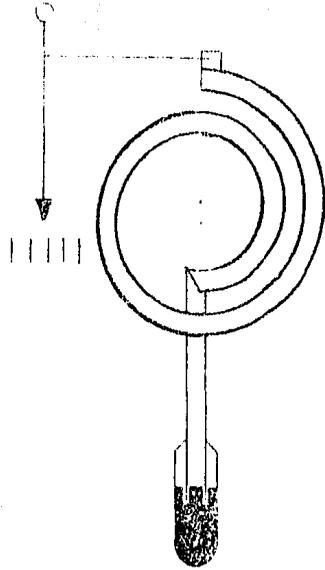
Termopares. Un termopar es un circuito eléctrico formado por 2 alambres de metales diferentes conectados en ambos extremos. Cuando las dos juntas tienen diferente temperatura se genera un potencial. La fuerza electromotriz generada depende de la diferencia de temperatura entre la junta fría (o de referencia) y la junta caliente (o de medición). En la Fig. IV.40 se muestra este circuito.

Los conductores deben generar una fem tan grande como sea posible para un cambio unitario de temperatura y deben poseer ciertas características para lograr esto.

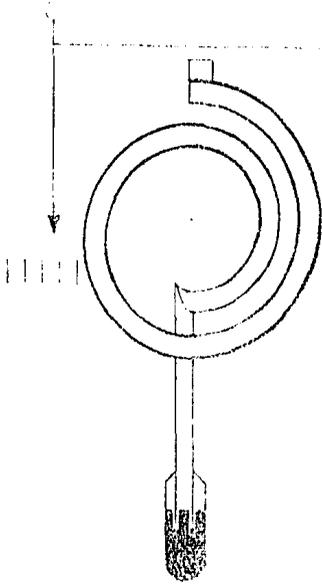
En 1821, Seebeck observó que cuando soldaba un alambre de cobre a uno de hierro y calentaba en el extremo fundido, obtenía una fem. También descubrió que fluía corriente del cobre al hierro en el extremo o terminal calentada. Los descubrimientos posteriores revelaron que el flujo de corriente observado por Seebeck se debía, aparentemente, a dos causas independientes. Cada una de ellas recibió el nombre de los científicos que las descubrieron. Hoy en día, estas dos fuentes de fem se conocen -



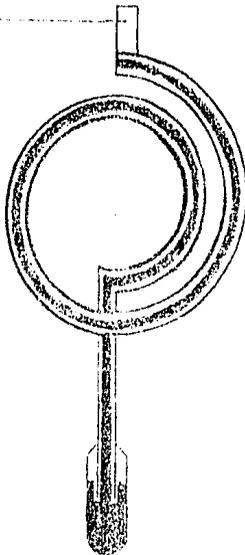
II A



II B



II C



II D

Fig. IV.39 Diferentes clases de sistemas termales llenos



Fig. IV.40 Circuito básico del termopar

como efecto Peltier y efecto Thomson.

Efecto Peltier. La fem de Peltier es la porción de la fem total de un termopar originada por una diferencia de potencial en la unión de dos conductores o alambres diferentes. Esta diferencia de potencial varía en función de la temperatura de la unión, pero no existe ninguna garantía de que lo haga de un modo uniforme.

Efecto Thomson. La porción de la fem total de un termopar, que existe debido a una diferencia de potencial en una sección de conductor que tiene un gradiente de temperatura, es la fem de Thomson. Esto significa que existe un potencial en un alambre de material homogéneo cuando uno de los extremos está a una temperatura mayor que el otro. La teoría que se utiliza para explicar este fenómeno no concuerda exactamente con todos los efectos experimentales observados. Por ejemplo, se puede fabricar un termopar cuyas curvas de fem indiquen que la fem de Thomson se invierte a ciertas temperaturas. Un termopar de bismuto indica este tipo de inversión en el rango de 1652°C .

Materiales de termopares. Los alambres de termopares se es cogen de manera que produzcan una fem grande que varíe lineal-- mente con la temperatura. Desde el punto de vista ideal, el ma-- terial elegido debe tener:

- Las fem de Thomson de ambos alambres aditivas al circuito.
- Las fem de Thomson de variación directa con la temperatura.
- Las fem de Peltier que desarrollen potenciales en la unión ca-- liente y que estén en la misma dirección que las fem de Thomson.
- Fem de Peltier que varíen directamente con la temperatura.
- Una energía termoeléctrica tan grande como sea posible.

Se han desarrollado ecuaciones empíricas en un esfuerzo de satisfacer los resultados observados experimentalmente. Se obtu-- vo una ecuación empírica de esta naturaleza para el termopar de metal noble de platino-platino-rodio, ecuación que se puede ex-- presar como sigue:

$$\sum_0^T e = a + bT + cT^2$$

en donde e = fem del termopar en milivolts

T = temperatura en grados Kelvin

a, b, c = constantes que dependen del tipo de metal o alea-- ción usado.

La ecuación para un termopar de platino-platino-rodio es

$$e = 0.323 + 0.000827T + 0.000001683T^2$$

En aplicaciones industriales, la elección de los materia-- les empleados para fabricar un termopar dependen del rango de -- temperatura que se va a medir, el tipo de atmósfera a la que es-- tará expuesto el material y de la precisión requerida en la me-- dición. A continuación se mencionan las características de los termopares más utilizados.

Termopar Tipo E. Está constituido por el cromel como conductor positivo y el constantano como conductor negativo. Su principal aplicación se encuentra en atmósferas oxidantes y su rango de operación es de -184 a 927°C .

Termopar Tipo J. Tienen como conductor positivo un alambre de hierro y como conductor negativo un alambre de constantano. Se utilizan normalmente para temperaturas que van desde -196 a 760°C dependiendo de su calibre. Son recomendables para usarse en atmósferas reductoras. La oxidación del conductor de hierro se incrementa rápidamente arriba de los 282°C , cuando se utilizan arriba de esa temperatura, se recomiendan calibres gruesos para aumentar su vida útil. Tienen un precio relativamente bajo.

Termopar Tipo K. Constan de un alambre de aleación cromo-niquel (cromel) como conductor positivo y un alambre de aleación níquel-aluminio (alumel) como conductor negativo. Se utilizan para temperaturas que van desde -190 a 1370°C dependiendo del calibre usado. Prestan un servicio óptimo tanto en atmósferas oxidantes como reductoras siempre y cuando se use un tubo de protección apropiado. Sus precios son más elevados que los tipo J.

Termopar Tipo T. Tienen un alambre de cobre puro como conductor positivo y como negativo el constantano. Se utilizan para medir temperaturas desde -190 a 400°C , son de bajo precio y ofrecen alta resistencia a la corrosión en atmósferas húmedas. Pueden ser usados en atmósferas reductoras y oxidantes.

Termopar Tipo R Y S. Estos tienen como conductor negativo un alambre de platino puro y como conductor positivo un alambre

de 87% platino y 13% rodio (Tipo R), o un alambre de 90% platino y 10% rodio (Tipo S). Si se cuenta con una protección adecuada sirven para medición de temperatura hasta 1649°C en atmósferas oxidantes.

Sus precios comparados con los demás termopares son más altos y sus fem pequeñas, por lo que la aplicación de este tipo de termopares está restringida únicamente a altas temperaturas.

Termopar Tipo B. Platino 70%-rodio 30% es el conductor positivo y el platino conductor negativo, debe usarse en atmósferas inertes o ligeras. Su rango de aplicación es de 0 a 1860°C .

La exactitud de los termopares es función de la temperatura y de si el termopar es de construcción normal o especial.

El circuito básico de medición de temperatura por medio de termopar consta de:

- Aislante
- Terminal de conexiones
- Tubo protector
- Alambres de extensión
- Unión de referencia y el instrumento

Aislante. Este elemento sirve para que no se junten los alambres del termopar, o algunos se peguen al termopozo. El aislante tiene las características de tener alta resistencia eléctrica y alta resistencia térmica.

Los tipos más comunes de aisladores son: espina de pescado, redondo de dos canales, ovalado de dos canales y redondo de cuatro canales. Los materiales principales de construcción de los aisladores son: sillimanita, alúmina y alúmina pura.

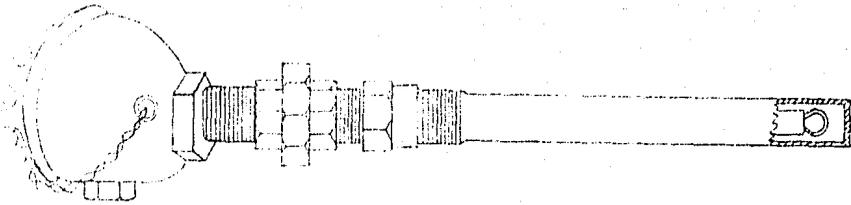
Terminal de conexiones. Es el elemento que se emplea para-

La interconexión del cable de extensión y el termopar. Existen dos tipos: sencillos y dobles. El material de fabricación es de refractario comprimido resistente al calor, los tornillos sobre la cabeza sirven para hacer la conexión.

Tubo protector o termopozo. Es un tubo o una barra perforada que se usa para proteger al termopar; el termopozo debe seleccionarse de acuerdo al fluido manejado por lo que debe considerarse la corrosión.

Alambres de extensión. Este se emplea para unir el termopar con el instrumento de indicación, y está constituido por un par de alambres de material que tiene (hasta cierta temperatura) las mismas características del termopar, con el aislamiento adecuado para cada aplicación.

Instrumento de medición. El instrumento básico para cuantificar la fem producida por el termopar es el milivoltímetro. Este es básicamente un galvanómetro de d'Arsonval. Se tiene un campo magnético producido por el imán y las piezas polares que rodean a una bobina suspendida entre pivotes que descansan en rubíes o zafiros. La aguja indicadora está sujeta a la bobina y la corriente eléctrica generada por el termopar pasa por ella y establece un campo magnético proporcional a la corriente que la atraviesa y hace que gire. La rotación de la bobina mueve la aguja indicadora a lo largo de la escala y tanto la bobina como la aguja, sufren una deflexión contra resortes en espiral. Estos espirales restringen el movimiento de la bobina y la aguja y los devuelven a la posición de cero cuando se suspende la corriente. También transmiten corriente a la bobina. En la Fig. IV.41 se muestra el arreglo terminado de un termopar así como también un circuito de medición.



(a)

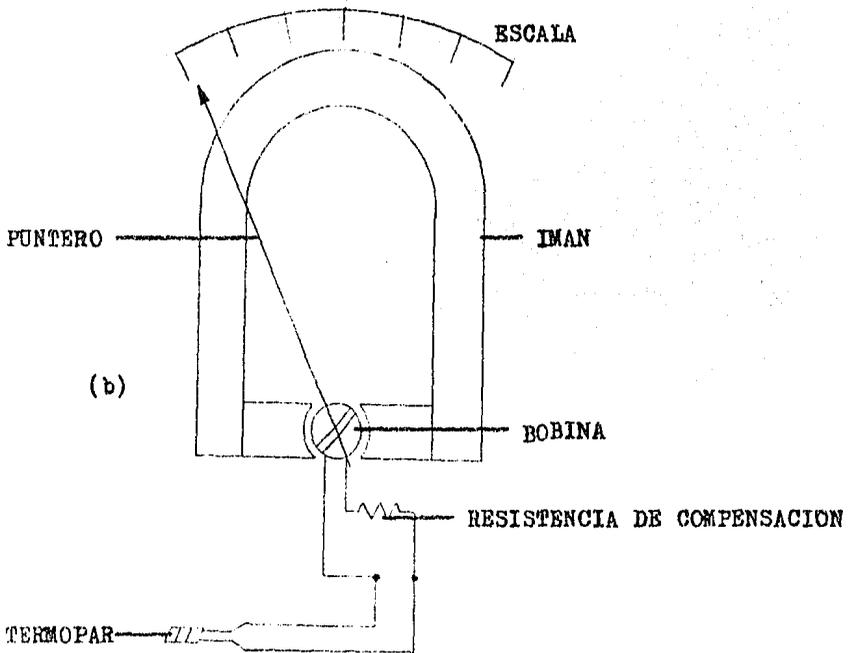


Fig. IV.41 (a) Arreglo terminado de un termopar y (b) circuito de medición

Termómetros de resistencia. La medida de temperatura utilizando bulbos de resistencia depende de las características de la resistencia en función de la temperatura que son propias del elemento de detección.

El elemento consiste usualmente de un hilo enrollado muy fino del material conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

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

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

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

en la que: R_0 = resistencia en ohms a 0°C

R_t = resistencia en ohms a $t^\circ\text{C}$

α = coeficiente de temperatura de la resistencia.

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

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \delta t^3 + \dots)$$

en donde α , β , δ , ..., son coeficientes de temperatura de la resistencia.

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

- Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible.
- Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad).
- Relación lineal resistencia-temperatura.

rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y enrollamiento del conductor en las bobinas del bulbo, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).

-Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Los materiales que se usan normalmente en los bulbos de resistencia son el platino, el níquel y el cobre.

El platino es el material más adecuado desde el punto de vista de precisión y estabilidad pero presenta el inconveniente de su costo. En general el bulbo de resistencia de platino utilizado en la industria tiene una resistencia de 100 ohms a 0°C.

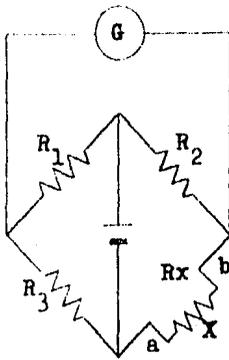
El níquel es más barato que el platino y posee una resistencia más elevada con una mayor variación por grado, sin embargo, tiene como desventaja la falta de linealidad en su relación resistencia-temperatura y las variaciones que experimenta su coeficiente de resistencia según los lotes fabricados.

El cobre tiene una variación de resistencia uniforme, es estable y barato pero tiene el inconveniente de su baja resistividad.

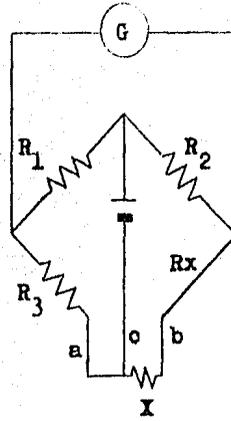
Las bobinas que llevan enrollado el hilo de resistencia están encapsuladas y situadas dentro de un tubo de protección de material adecuado al fluido del proceso (acero, acero inox.-304 y 316, hastelloy, monel, etc.).

La variación de resistencia de los bulbos es medida con un puente de Wheatstone dispuesto en montajes denominados de dos hilos, de tres hilos o de cuatro hilos, según sean los hilos de conexión del bulbo de resistencia al puente. En la Fig. IV.42 se muestran estos montajes.

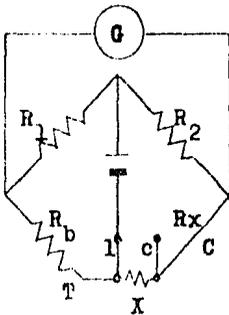
En el montaje de dos hilos el bulbo de resistencia se conecta a uno de los brazos del puente y se varía R_3 hasta que se anula la desviación del galvanómetro.



DOS HILOS



TRES HILOS



CUATRO HILOS

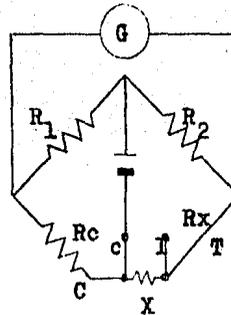


Fig. IV.42 Tipos de circuitos de puente de Wheatstone a termómetros de resistencia

Este montaje es más sencillo, pero presenta el inconveniente de que la resistencia de los hilos a y b de conexión del bulbo al puente varía cuando cambia la temperatura, y esta variación falla sea por lo tanto la indicación; aunque estos hilos sean de baja resistencia (gran diámetro) y ésta sea conocida, las longitudes que puede haber en campo entre la sonda y el panel donde está - el instrumento receptor, añaden una cierta resistencia al brazo del bulbo.

El montaje de dos hilos se emplea, pues, con resistencias moderadas del hilo de conexión y cuando la lectura no necesita ser demasiado exacta.

El montaje de tres hilos es el más utilizado en la práctica. En este circuito el bulbo está conectado mediante tres hilos al puente. De este modo, la medida no es afectada por la longitud de los conductores ni por la temperatura, ya que esta influye a la vez en dos brazos adyacentes del puente, siendo la única condición que la resistencia de los hilos a y b sea exactamente la misma.

El montaje de cuatro hilos se utiliza para obtener mayor precisión en la medida, como es el caso de calibración de patrones de resistencia en laboratorio. Se basa en efectuar dos mediciones de la resistencia del bulbo combinando las conexiones de tal modo que el bulbo pase de un brazo del puente al adyacente. De este modo se compensan las resistencias desiguales de los hilos de conexión y el valor de la resistencia equivale al promedio de los valores determinados en las dos mediciones.

La medición automática de la resistencia y por lo tanto de la temperatura se lleva a cabo mediante instrumentos autoequilibrados que utilizan un circuito de puente de Wheatstone.

Termistores. Son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado y que presentan una curva característica lineal tensión-corriente siempre que la temperatura se mantenga constante.

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

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

en la que:

R_t = resistencia en ohms a la temperatura absoluta T_t

R_o = resistencia en ohms a la temperatura absoluta de referencia T_o

β = constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas.

Hay que señalar que para obtener una buena estabilidad en los termistores es necesario envejecerlos adecuadamente. Los termistores se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos de medida de resistencia. En intervalos amplios de temperatura, los termistores tienen características no lineales. Al tener un alto coeficiente de temperatura poseen una mayor sensibilidad que los bulbos de resistencia y permiten incluso intervalos de medida de 1°C . Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor variando de fracciones de segundo a minutos.

La distancia entre el termistor y el instrumento de medida puede ser considerable siempre que el elemento posea una alta resistencia comparada con la de los cables de unión. La corriente que circula por el termistor a través del circuito de medida debe ser baja para garantizar que la variación de resistencia del elemento sea debida exclusivamente a los cambios de temperatura del proceso. Los termistores (Fig. IV.43) encuentran su principal aplicación en la compensación de temperatura, como

resistencias y como elementos sensibles en vacuómetros.

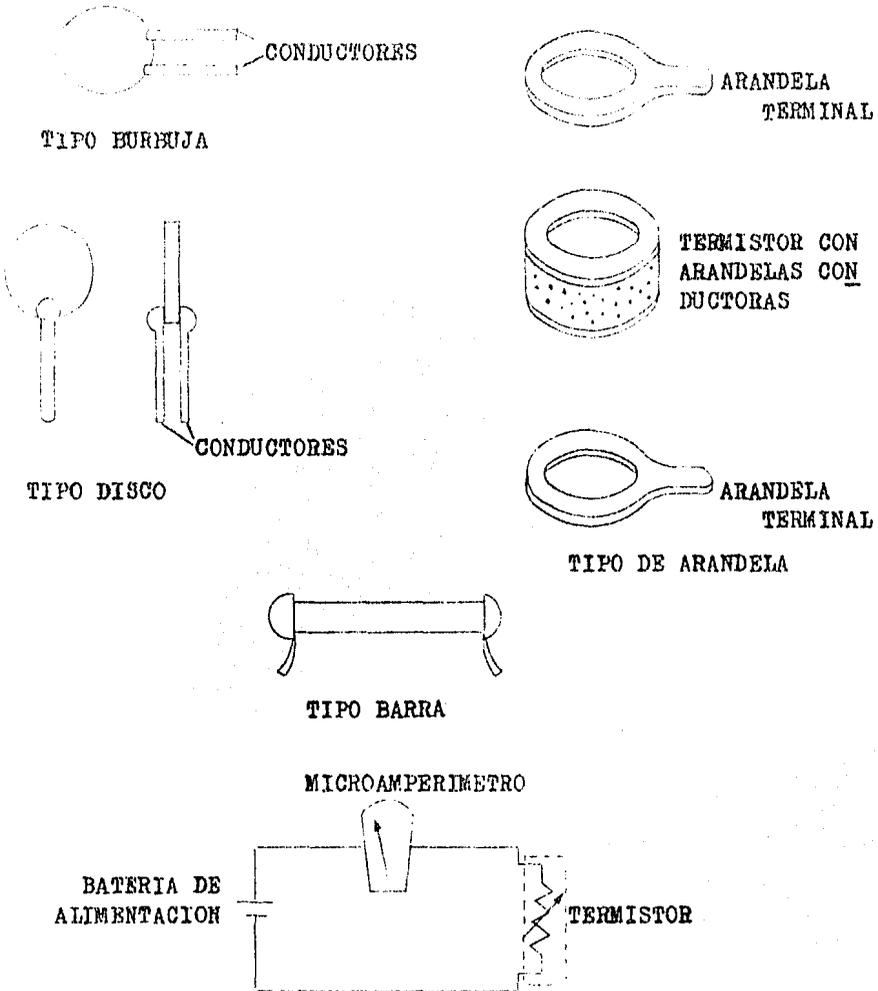


Fig. IV.43 Diferentes tipos de termistores y circuito simple de medición de temperatura

Pirómetros de radiación. Estos se fundan en la ley de Stefan-Boltzmann, que dice que la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, es decir, $W = K T^4$.

Desde el punto de vista de medición de temperaturas industriales, las longitudes de onda térmicas abarcan desde 0.1 micras para las radiaciones ultravioletas, hasta 12 micras para radiaciones infrarrojas.

La radiación visible ocupa un intervalo entre la longitud de onda de 0.45 micras para el color violeta hasta 0.7 micras para el rojo.

Los pirómetros de radiación miden, pues, la temperatura de un cuerpo en función de su radiación. Los instrumentos que miden la temperatura de un cuerpo en función de la radiación luminosa que éste emite, se denominan pirómetros ópticos de radiación parcial o pirómetros ópticos y los que miden la temperatura captando toda o una gran parte de la radiación emitida por el cuerpo, se llaman pirómetros de radiación total.

Pirómetros ópticos. Los pirómetros ópticos manuales se basan en la desaparición del filamento de una lámpara al compararlo visualmente con la imagen del objeto enfocado. Pueden ser de dos tipos: a) de corriente variable en la lámpara y b) de corriente constante en la lámpara con variación del brillo de la imagen de la fuente (Fig. IV.44).

Los pirómetros ópticos automáticos consisten esencialmente en un disco rotativo que modula desfasadas la radiación del objeto y la de una lámpara estándar que inciden en un fototubo multiplicador. Este envía la señal de salida en forma de onda cuadrada de impulsos de corriente continua que convenientemente acondicionada modifica la corriente de alimentación de la lámpara estándar hasta que coinciden en brillo la radiación del

objeto y la de la lámpara. En este momento la intensidad de corriente que pasa por la lámpara es función de la temperatura.

El coeficiente de emisión de energía radiante (medida de la característica relativa del cuerpo para emitir energía radiante) depende mucho del estado de la superficie del cuerpo emisor; para un metal como el cobre pasa de 0.1 a 0.85 si el metal perfectamente pulido se recubre bruscamente con una capa de óxido, y lo mismo sucede con un baño metálico líquido.

El pirómetro dirigido sobre una superficie incandescente no nos dará su temperatura verdadera si la superficie no es perfectamente negra, es decir, que absorba absolutamente todas las radiaciones y no refleje ninguna.

Pirómetros de radiación total. (Fig.IV.45) está formado por una lente de pyrex, sílice o fluoruro de calcio que concentra la radiación del objeto caliente en una termopila formada por varios termopares de Pt-Pt/Rh, de pequeñas dimensiones y montados en serie. La radiación está enfocada incidiendo directamente en las uniones calientes de los termopares. Su reducida masa los hace muy sensibles a pequeñas variaciones de la energía radiante, y, además muy resistentes a vibraciones o choques. La parte de los termopares expuesta a la radiación está ennegrecida, para comportarse como un cuerpo negro, aumentando así sus propiedades de absorción de energía, y proporcionando la fem máxima.

La fem que proporciona la termopila depende de la diferencia de temperaturas entre la unión caliente (radiación procedente del objeto enfocado) y la unión fría. Esta última coincide con la de la caja del pirómetro, es decir, con la temperatura ambiente. La compensación de ésta se lleva a cabo mediante una resistencia de níquel conectada en paralelo con los bornes de conexión del pirómetro y colocada en su interior de

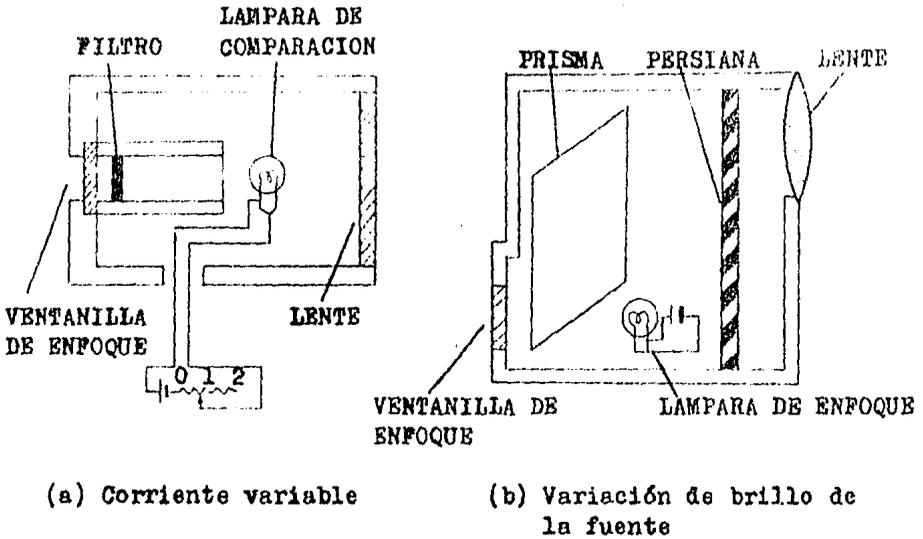


Fig. IV.44 Pirómetros ópticos

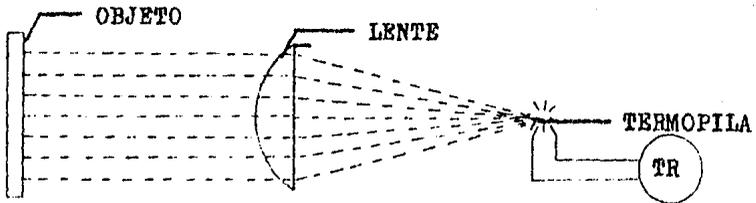


Fig. IV.45 Pirómetro de radiación total

modo que su temperatura es siempre igual a la del cuerpo de éste. Al aumentar la temperatura ambiente aumenta el valor de la resistencia de la bobina de níquel, lo que compensa la pérdida de fem de la termopila que acompaña el calentamiento del cuerpo del instrumento. En los bornes de la termopila va conectado un cable de cobre que llega hasta el instrumento.

La compensación descrita se utiliza para temperaturas ambientes máximas de 120°C . A mayores temperaturas se emplean dispositivos de refrigeración por aire o por agua, que disminuyen la temperatura de la caja en unos 10 a 40°C por debajo de la temperatura ambiente.

En la medición de bajas temperaturas, la compensación se efectúa utilizando además una resistencia termostática adicional que mantiene constante la temperatura de la caja en unos 50°C , valor que es poco más alto que la temperatura ambiente que pueda encontrarse y lo suficientemente bajo para no reducir apreciablemente la diferencia de temperaturas útil.

C A P I T U L O V

ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

Este capítulo cubre las generalidades sobre válvulas de control, descripción de las partes que forman dichos elementos, así como también el cálculo.

Los elementos finales de control desempeñan un papel muy importante dentro de las operaciones de automatización, ya que de ellos depende la correcta distribución y control de fluidos.

Los elementos finales de control proporcionan la energía necesaria para mantener su función de control de fluidos, a partir de un bajo nivel de energía proveniente del controlador.

La válvula de control automático, es el elemento final de control más utilizado; la cual, básicamente está constituida por un cuerpo y un actuador. En la Fig. V.1 puede verse una válvula de control típica.

El fluido pasa a través del cuerpo y es obstaculizado por una apertura variable entre una parte móvil llamada tapón y por otra parte fija llamada asiento.

El tapón está unido al actuador por un vástago, y es el actuador el que produce el movimiento del tapón, dependiendo de la señal de control recibida. El vástago se desliza a través de un bonete que es el soporte del actuador y que se localiza sobre el cuerpo de la válvula.

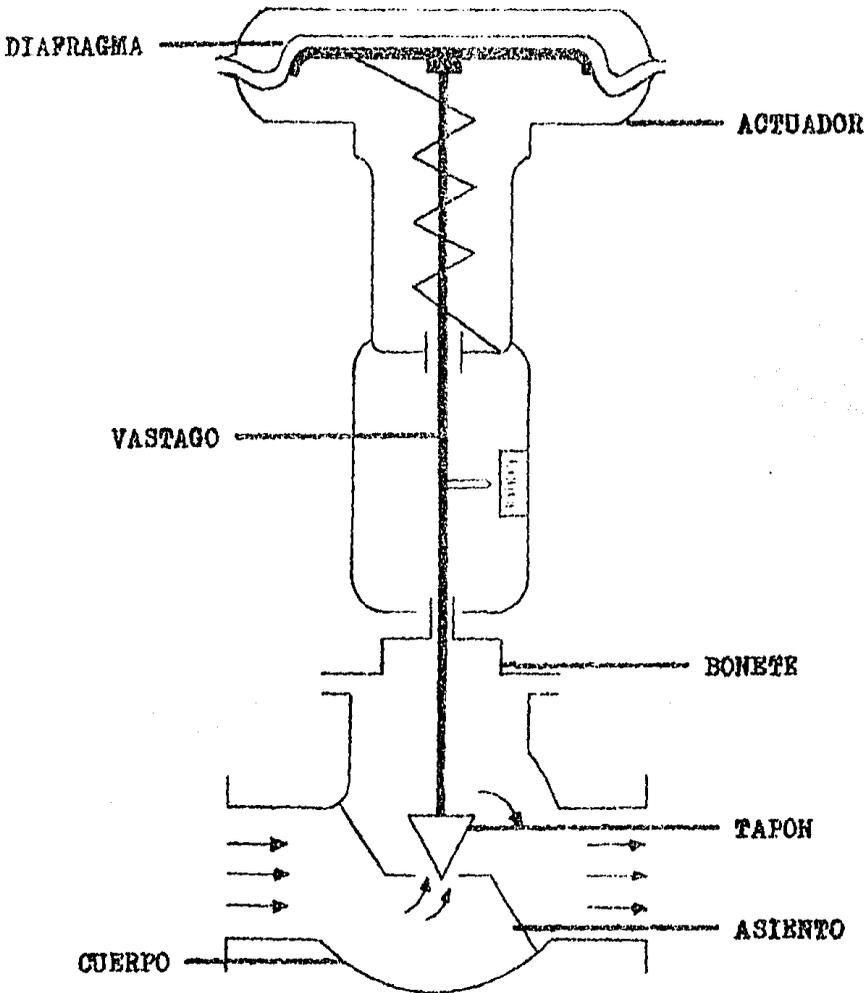


Fig. V.1 Válvula de control típica

Las partes principales de una válvula de control son:

Actuador

Bonete

Empaque

Cuerpo.

Actuador. Un actuador es un mecanismo que convierte una se ñal de control hidráulica, eléctrica o neumática en un movimiento que actúa al elemento final de control en contacto con el pro ceso. Los actuadores pueden mover válvulas de control, compuertas, reguladores de tiro, guías para transporte de sólidos, en fin, cualquier mecanismo que actúa directamente sobre el pro ceso.

Existen varios tipos de actuadores: de diafragma, de pisto n, hidráulico-electrohidráulico, flotador y manual.

Diafragma. El tipo diafragma es una caja con forma de platillo dividida en dos partes a lo largo de una circunferencia por un diámetro del mismo diámetro que el platillo; la caja puede ser de acero o de aluminio y el diafragma generalmente es de neopreno reforzado con fibra de vidrio. De un lado del diafragma actúa el aire y del otro un resorte. Dependiendo de cual sea el lado del diafragma donde actúe el aire, será de acción directa o de acción inversa; en el de acción directa, el aire baja el diafragma comprimiendo el resorte. El tipo de acción adecuada se selecciona teniendo en cuenta la posición de seguridad que convenga que adopte la válvula en caso de falla de presiónde aire. Generalmente recibe una señal de 3-15 lb/plg.²

Entre las principales características que lo hacen ser el más empleado se tiene que es el más económico, proporciona un amplio rango de fuerza para vencer las diferentes presiones de-

desbalance y contiene acción de falla integrada.

Su principal desventaja es que para altas presiones no logra vencer las fuerzas de desbalance, además de que solo se utiliza para carreras máximas de 3".

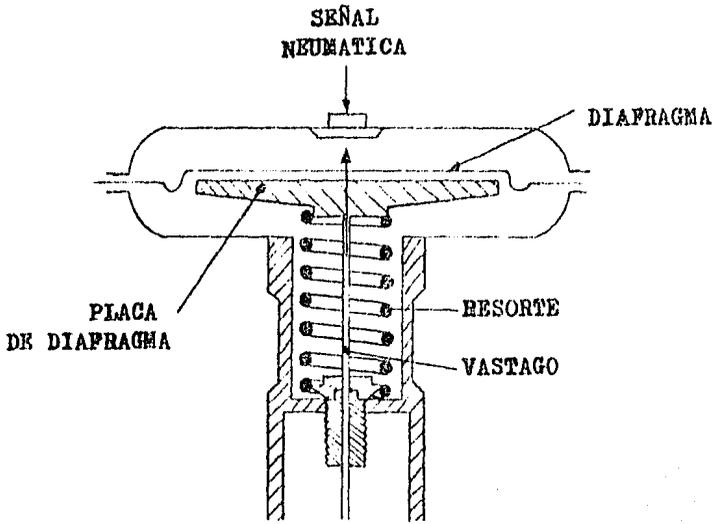
Pistón. Este tipo, después del actuador tipo diafragma, es el más utilizado y en ocasiones más económico. Es un cilindro que incluye un pistón en su interior que lo recorre de extremo a extremo y puede ser operado neumáticamente o hidráulicamente. Entre las principales ventajas se tiene que vence torques grandes, se fabrican para carreras hasta 8", es de cierre rápido y puede tener acción de falla integrada; su principal desventaja es que tiene poca disponibilidad para montaje de accesorios.

Hidráulico-electrohidráulico. Son semejantes a los de pistón, se utilizan para vencer torques demasiado grandes en válvulas de gran tamaño, es costoso y no tiene acción de falla integrada.

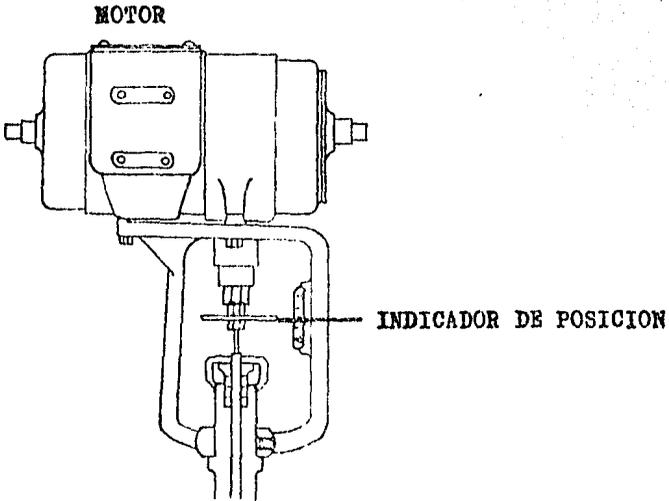
Flotador. Es una palanca que en un extremo tiene un elemento de flotación y el otro extremo está unido al vástago de la válvula, generalmente se utiliza en aplicaciones de control de nivel a bajas presiones. Es muy económico.

Manual. Es un volante que se monta en el vástago de la válvula y que se utiliza en servicios a bajas presiones y en usos estrictamente manuales.

Generalmente los actuadores ya vienen suministrados junto con la válvula de control. En la Fig. V.2 se muestran dos tipos de actuadores.



(a)



(b)

Fig. V.2 Tipos de actuadores (a) Neumático, (b) Eléctrico

Bonete. El bonete normalmente proporciona un medio de montaje del actuador sobre el cuerpo de la válvula además de contener los empaques de sello. Los materiales de que está hecho el bonete son normalmente los mismos que del cuerpo, ya que está sujeto a las mismas condiciones de operación que el cuerpo.

Los bonetes van conectados al cuerpo por medio de una brida perñada, excepto en las válvulas de globo para alta presión en las cuales el bonete va roscado al cuerpo.

Existen dos tipos de bonetes: estándar y de extensión. El estándar se utiliza en condiciones en que la temperatura no daña el empaque; este tipo tiene un orificio lateral por donde en caso de ser necesario se conecta una válvula lubricadora por donde se inyecta aceite.

El de extensión se utiliza para proteger a los empaques en servicios criogénicos o altas temperaturas.

Empaque. Este permite el deslizamiento del vástago durante su operación e impide la fuga del fluido. El empaque se ajusta por medio de bridas.

Entre los principales requisitos que deben tener los empaques se tiene que deben ser inertes, presentar baja fricción, tener un coeficiente de expansión bajo a temperaturas altas, ser lo suficiente elásticos para sellar y ser resistentes a la abrasión.

Los materiales más usados son:

Teflón. Moldeado en forma de V, no requiere lubricación y se usa entre -40°C y 232°C .

Teflón-Asbestos. No requieren lubricación excepto para servicios de oxígeno y se usan entre -73°C y 232°C .

Asbestos grafitados. Se usan para servicios de petróleos - destilados, vapor, aceite y aire hasta 232°C .

Grafoil. Apropriados para servicios de temperaturas criogénicas hasta 649°C . No requieren lubricación pero si un bonete de extensión cuando la temperatura es superior a 427°C .

Cuerpo. Existen varias configuraciones en cuanto al cuerpo de las válvulas de control cuya selección depende de las condiciones de operación y de las características del fluido entre otras cosas. Los tipos más comunes son el de globo, mariposa, bola, diafragma y tipos más especializados.

Globo. Las válvulas tipo globo son las más utilizadas, están constituidas fundamentalmente por el cuerpo que guía al fluido y sostiene el asiento, un tapón de movimiento longitudinal permite el mayor o menor paso del fluido al separarse del asiento. A la pareja formada por el asiento y el tapón se le llama puerto. Existen válvulas de globo de puerto sencillo y de doble puerto.

Las válvulas de puerto sencillo se utilizan cuando se requiere de un cierre hermético pero requieren de actuadores poderosos por presentar un desbalance de fuerzas sobre el tapón.

Las válvulas de doble puerto presentan una capacidad de flujo mayor y tienen la ventaja de presentar fuerzas balanceadas sobre el tapón. Estas válvulas aun estando cerradas, pueden permitir algo de flujo, debido a que los tapones no pueden asentarse perfectamente.

No deberán utilizarse si no se puede tolerar una fuga del 1-2% del flujo máximo. Su principal ventaja es que no requiere de gran fuerza en el actuador para su operación.

Mariposa. Consta de un cuerpo en forma anular del tamaño de la tubería y una restricción en forma de disco, su instala-

ción es entre bridas. Es una válvula de tipo rotatorio y se aplica generalmente cuando se requiere una gran capacidad de flujo, ya que por ser de paso completo tiene una capacidad más alta que casi cualquier otro tipo de válvula del mismo tamaño. Se le encuentran desde 2" hasta 100" de diámetro.

La parte móvil es un disco, cuyo diámetro coincide con el diámetro interno del cuerpo, el disco es girado de 0° a 90° por una flecha conectada al actuador.

El par requerido para mover el disco varía considerablemente, debido a que el disco produce una velocidad más grande en un lado que en el otro y esto da como resultado, un par que -- tiende a cerrar la válvula.

El par requerido para mantener una posición del disco es nulo para 0° y para 90° , pero tiene un máximo para 70° aproximadamente; el par producido por un disco convencional es muy grande por lo que éstas válvulas con un disco así, se limitan a una apertura máxima de 60° . Para evitar esta limitación, se han desarrollado discos con contornos hidrodinámicos, llamados discos de bajo par.

Cuando se requiere de un cierre hermético, estas válvulas pueden ser recubiertas con un material elastómero; por poderse suministrar con este recubrimiento tanto el cuerpo como el disco, son ampliamente usadas en el manejo de fluidos corrosivos, evitando así el uso de otros materiales que incrementan el costo, aunque por otro lado las altas temperaturas afectan las propiedades del elastómero usado.

Para un tamaño y material de construcción dados, la válvula de mariposa es la de más bajo costo.

Tiene las siguientes limitaciones: no hay dispositivo para eliminar ruido y cavitación, hay que desmontarlas de la línea para mantenimiento, no se suministran con conexiones soldables-

o roscadas, la única característica de flujo es aproximadamente igual porcentaje (concepto que se verá más adelante), y como se dijo anteriormente, el control está limitado hasta 60° de apertura.

Bola. Es una válvula de flecha rotatoria cuyo obturador es una esfera giratoria con un corte tal que al girar, produce la modulación del flujo. La esfera puede ser completa o solamente un segmento esférico conectado a una flecha unida a un mecanismo movido por el actuador. La forma del corte de la esfera segmental, varía según la característica de flujo requerida.

Estas válvulas son de mucha aplicación en el control de líquidos viscosos, fluidos con sólidos en suspensión, fibrosos y lodos, aunque pueden usarse con otros líquidos, gases y vapor.

Los materiales elastómeros y los fluorocarbonados, en particular el teflón, se utilizan como materiales de sello dando a este tipo de válvula un cierre hermético excelente.

Los tamaños de estas válvulas son desde 1" hasta 24" comúnmente, pueden ser instaladas en forma bridada, roscada o entrebridas.

Tienen una gran capacidad comparadas con otras del mismo tamaño, son de bajo costo inicial y de mantenimiento, por tener pocos componentes tienen alta recuperación de presión.

Sus desventajas son: su uso está limitado a temperaturas generalmente abajo de 399°C por los materiales de sello, producen ruidos con grandes caídas de presión y deben removerse de la línea para mantenimiento.

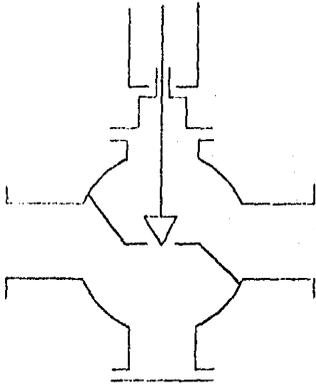
Diafragma. En casos donde el fluido es altamente corrosivo, es común aplicar las válvulas de diafragma en la que solo el cuerpo de la válvula y un diafragma de material elastómero

serva en contacto con el fluido.

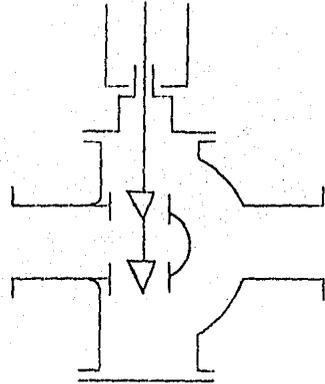
El diafragma cierra el paso del fluido asentando sobre una ceja delimitada en el cuerpo de la válvula. El movimiento del diafragma es conseguido por una pieza opresora conectada al actuador. El cuerpo de la válvula puede ser recubierto fácilmente con un material resistente a la corrosión, siendo esta su principal ventaja.

Como desventajas se pueden considerar: la fuerza necesaria para cerrar la válvula es muy grande por lo que muchas veces se requiere un actuador de pistón, y por esta misma razón este tipo de válvulas se limita a 8" máximo. La característica de control no es muy buena puesto que es aproximadamente de apertura-rápida. En la Fig. V.3 se muestran representativamente los diferentes tipos de válvulas anteriormente descritos.

Existen variaciones de las válvulas vistas anteriormente así como otros tipos de válvulas como las de compuerta, las de pellizco, las de tapón excéntrico, etc., pero no se describen en el presente trabajo por tener relativamente poca aplicación en los procesos industriales.



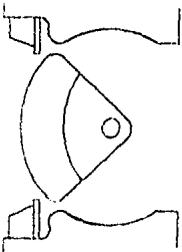
a) PUERTO SENCILLO



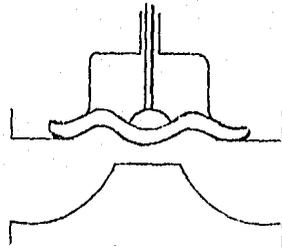
b) DOBLE PUERTO



c) MARIPOSA



d) BOLA



e) DIAFRAGMA

Fig. V.3 Tipos de válvulas

Dimensionamiento de válvulas de control. El dimensionamiento adecuado está basado en el cálculo del factor de capacidad " C_v ", y la consideración de un número de factores secundarios que se describen a continuación:

Caída de presión a través de la válvula. Este es quizás el factor más arbitrario en el dimensionamiento de la válvula.

En aplicación de control y reducción de presión, la caída de presión a través de la válvula puede ser conocida con bastante precisión. Esto también puede ser cierto en instalaciones de control de nivel en donde el líquido pasa de un recipiente a presión constante a otro a una presión constante menor.

Si la válvula se instala en un sistema extenso de tuberías o un sistema que incluya equipo, la caída de presión a través de la válvula debe estimarse en condiciones de flujo máximo, dejando un margen razonable para las pérdidas de presión que se encuentran en serie con la válvula.

La caída de presión a través de la válvula de control se expresa frecuentemente como un porcentaje de la caída de presión total por fricción del sistema. Una buena regla a seguir, es que la válvula absorba cuando menos una tercera parte de la caída de presión total del sistema. Para válvulas instaladas en líneas extremadamente largas o con gran caída de presión, el porcentaje de caída a través de la válvula es más bajo, pero al menos 15% (o hasta 25% en donde sea posible) de la caída total del sistema.

Hay que recordar que la presión diferencial absorbida por la válvula de control en operación será la diferencia entre la cabeza total disponible y la requerida para mantener el flujo a través de la válvula. Está determinada por las características del sistema y no por las suposiciones teóricas del ingeniero instrumentista. En algunos casos, puede ser necesario hacer una

selección arbitraria por la escasez de los datos de proceso. Si la válvula está en la línea de descarga de un bomba, una caída de presión mínima de 10 lb/plg² o del 10% de la presión de descarga será suficiente si la línea de descarga no es extremadamente larga o complicada por grandes caídas de presión a través de cambiadores de calor u otros equipos.

Cantidad de flujo. Para la determinación de las dimensiones de una válvula de control, la cantidad máxima que maneje la válvula debe ser de 15% a 50% arriba del máximo flujo requerido por el proceso. Una aproximación alternativa es tomar el doble del flujo normal esperado. Las combinaciones inadecuadas de flujo y caída de presión deben evitarse.

Gravedad específica. En las ecuaciones de cálculo de Cv, la gravedad específica (densidad relativa) es una función de raíz cuadrada, por lo tanto pequeñas diferencias con el valor real no tendrán gran efecto en la capacidad de la válvula. Si la densidad relativa no es conocida exactamente, una suposición razonable de 0.9 en lugar de 0.8 causaría un error de menos de 5% en la capacidad de la válvula.

Factor de capacidad Cv. El uso del factor de capacidad Cv tiene materialmente simplificado el problema de dimensionamiento de la válvula de control. Este coeficiente es el número de galones por minuto de agua que pueden pasar a través de una restricción de flujo con una caída de presión de 1 psi.

Esto es una capacidad índice. Cualquier problema de gas, vapor o líquido puede ser convertido al equivalente factor de capacidad. En otras palabras, el flujo de cualquier fluido a través de una restricción con una caída de presión conocida, puede ser expresado en términos de galones por minuto de agua a una caída de presión de 1 psi. La restricción puede ser una placa de orificio, una longitud de tubería, una válvula manual, o

más específicamente para propósitos de control, una válvula de control automático. Los valores publicados de Cv para válvulas de control son para una posición de apertura total a menos que se especifique de otra manera. El Cv no implica cualquier restricción específica de flujo pero está basado en la ley fundamental de flujo de fluidos ($v = 2gh$). Muchas fórmulas de dimensionamiento, reglas de cálculo y tablas están basadas en esta ley.

Procedimiento para calcular y determinar la dimensión y capacidad de una válvula de control.

LIQUIDOS

$$Cv = V \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$$

$$V = Cv \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

donde:

V = flujo, gpm

P = caída de presión a flujo máximo, psi

G = gravedad específica (agua = 1)

Cv = factor de capacidad

Cuando la temperatura de flujo es arriba de 200°F, la gravedad específica debe ser a las condiciones de flujo.

Cuando la viscosidad exceda de 100 SSU (segundos Saybolt - Universal) o 20 centistokes, checar la corrección por viscosidad.

GASES

$$Cv = \frac{Q \sqrt{G T_a}}{1,360 \sqrt{(\Delta P) P_2}}$$
$$Q = \frac{1,360 Cv \sqrt{(\Delta P) P_2}}{\sqrt{G T_a}}$$

donde:

Q = cantidad de ft^3/hr a 14.7 psia y 60°F

ΔP = caída de presión a flujo máximo, psi ($P_1 - P_2$)

P_1 = presión de entrada a flujo máximo, psia

P_2 = presión de salida a flujo máximo, psia

G = gravedad específica (aire = 1)

T_a = temperatura absoluta de flujo ($460 + ^\circ\text{F}$)

C_v = factor de capacidad

Cuando P_2 es menor que $1/2P_1$, usar el valor de $P_1/2$ en lugar del radical que involucra los términos de presión.

VAPOR

$$C_v = \frac{WK}{3\sqrt{(\Delta P)P_2}}$$

$$W = \frac{3C_v\sqrt{(\Delta P)P_2}}{K}$$

donde:

W = lb/hr de vapor

ΔP = caída de presión a flujo máximo, psi

P_1 = presión de entrada a flujo máximo, psia

P_2 = presión de salida a flujo máximo, psia

$K = 1 + (0.0007 \times ^\circ\text{F de recalentamiento})$

C_v = factor de capacidad

Cuando P_2 es menor que $1/2P_1$, usar el valor de $P_1/2$ en lugar del radical que involucra los términos de presión.

La fórmula para vapor ha sido desarrollada usando el valor $1/0.00225P_2$ en lugar del volumen específico para eliminar la necesidad de tablas de vapor.

El flujo de fluidos compresibles a través de una restricción, alcanza una velocidad de saturación donde la presión diferencial se incrementa aproximadamente 50% de la presión de -----

entrada. Esta relación de presión crítica varía con la composición del fluido. El valor promedio de esta característica está también dentro de la tolerancia establecida por las fórmulas.

Las fórmulas de dimensionamiento en el caso de líquidos son idealizadas ya que no ha sido considerada la corrección por viscosidad. La corrección por viscosidad es una función compleja involucrando el número de Reynolds el cual es dependiente de la velocidad, dimensión de la válvula, área del puerto y la viscosidad del fluido. La corrección ha sido resuelta por el uso de un factor R en una simple gráfica. Véase Fig V.4.

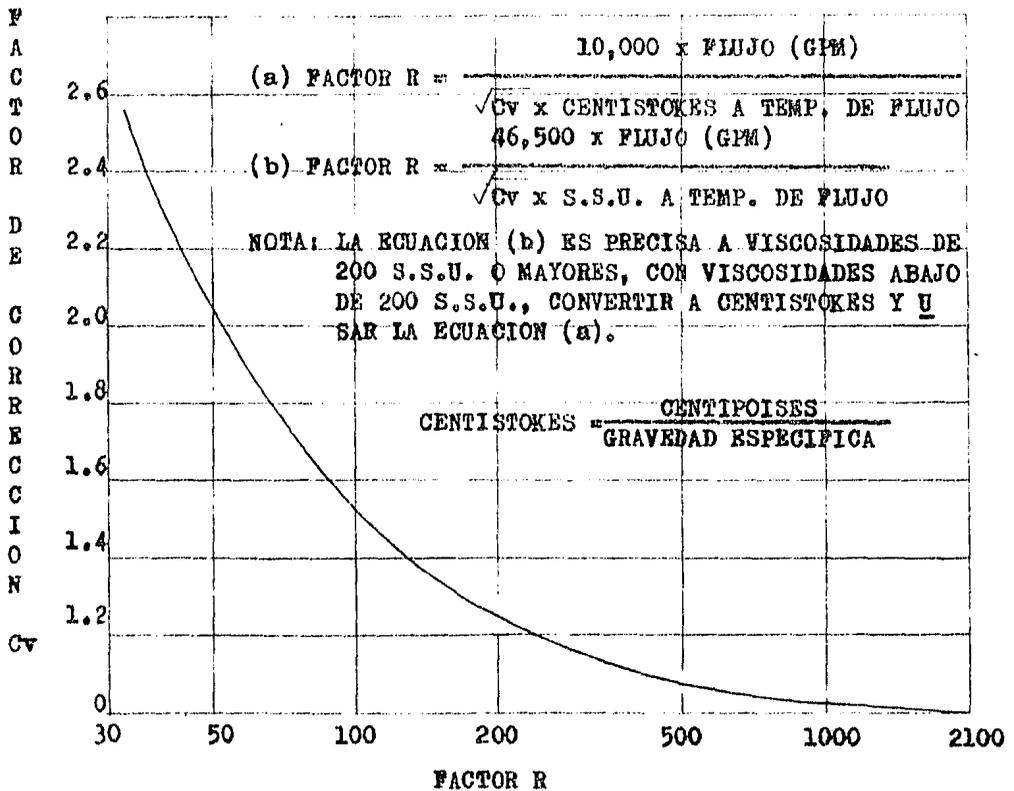


Fig. V.4 Curva de corrección por viscosidad

El factor R es una aproximación del número de Reynold: bajo las condiciones de flujo.

Abajo de 100 SSU o 20 centistokes el efecto de la viscosidad puede ser despreciado. A arriba de estos valores, la corrección se debe establecer y multiplicar por el Cv determinado por la fórmula.

Para determinar la corrección por viscosidad, el siguiente procedimiento puede ser usado:

1. Calcular el Cv por la fórmula asumiendo nulo el efecto por viscosidad.
2. Calcular el factor R de la ecuación (a) o (b) de la Fig. V.4.
3. De la curva de la Fig. V.4, leer el factor de corrección a la intersección del factor R.
4. Multiplicar el Cv calculado por la fórmula, por el factor de corrección.
5. Usar el Cv corregido para seleccionar la dimensión de la válvula de tablas de Cv contra dimensión de la válvula.

Cuando se tiene agua cerca de la temperatura de saturación fluyendo a través de una válvula de control con reducción de presión, consideraciones termodinámicas indican que una mezcla de agua y vapor puede existir a la salida de la válvula.

En muchas instancias, es posible tener una condición de presiones y temperaturas tal que las leyes fundamentales de flujo líquido deben ser despreciadas, y por tanto, los métodos convencionales para dimensionamiento no son aplicables.

El flujo de fluidos compresibles (vapor, gas) a través de una válvula u orificio, alcanza una velocidad máxima cuando la presión diferencial es incrementada aproximadamente 50% de la presión de entrada. Este punto es llamado caída de presión

crítica, y la relación de presión de salida a la presión de entrada es llamada relación de presión crítica. El agua entrando a la válvula de control a un poco abajo de condiciones de saturación tiene un comportamiento similar. Mientras que el gas y vapor tienen relativamente una constante relación de presión crítica de 0.5, datos experimentales indican que el agua arriba de temperaturas aproximadamente 300° F tiene una relación aparente de presión crítica que varía de 0.15 a 0.88.

Esta relación aparente de presión crítica es una función de la diferencia entre la temperatura de saturación del agua a la presión de entrada y la temperatura real del agua a la entrada de la válvula. En la Fig. V.5 son graficados datos experimentales para mostrar esta relación para diferencias de temperatura hasta 200° F, con respecto al factor de caída de presión permisible. La caída de presión permisible es obtenida multiplicando la presión de entrada por el factor permisible de caída de presión.

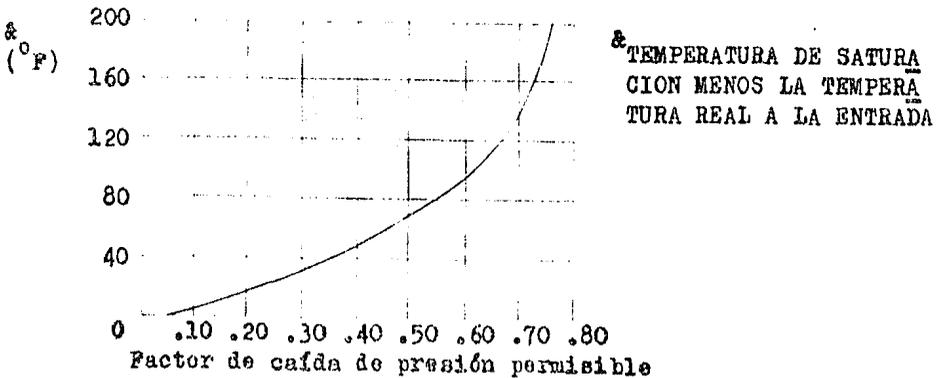


Fig. V.5 Caída de presión (factor) para agua en estado líquido

Para determinar la válvula de control requerida, se usa la fórmula para líquidos; en lugar de la caída presión real, usamos la caída de presión calculada, o la real; la que sea más pequeña.

Los mecanismos de dimensionamiento de válvulas pueden ser materialmente simplificados por el uso de reglas de cálculo o nomogramas.

Las reglas de cálculo para el dimensionamiento de válvulas son diseñadas por la solución de las ecuaciones anteriormente descritas. Varios tipos son obtenidas de los fabricantes de válvulas de control y son diseñadas para dar la respuesta en términos de la dimensión de la válvula, y algunos tipos para dar tanto el Cv como la dimensión de la válvula.

Los nomogramas consisten de una serie de datos de flujo en escala de modo que, por una serie de intersecciones de líneas rectas, pueden ser obtenidos el coeficiente Cv y la dimensión de la válvula.

Características de control. Por característica de una válvula de control, se entiende como la función que relaciona la apertura de la válvula con el porcentaje de flujo que pasa por ella.

Las distintas relaciones entre el porcentaje de flujo y la apertura se logran mediante la forma dada al tapón y al asiento en su maquinación.

Las características usuales en las válvulas son:

Línea

Igual porcentaje

Apertura rápida

Parabólicas

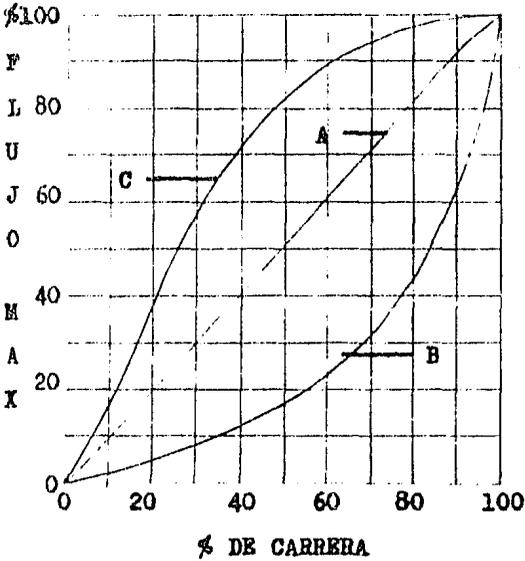
La última característica es poco usual actualmente.

En la Fig. V.6 se muestran las características inherentes de las válvulas de control; en estas curvas se considera que la caída de presión a través de la válvula permanece constante.

Lineal. En esta característica para cada porcentaje de apertura se tiene el mismo porcentaje de flujo, el comportamiento deja de ser lineal si la caída de presión aumenta al disminuir la apertura. Al aumentar la caída de presión el flujo tiende a aumentar.

Igual porcentaje. En esta característica incrementos iguales en la apertura de la válvula producen iguales porcentajes de cambio en el flujo; o sea, el cambio de flujo al cambiar la carrera será siempre proporcional al flujo que había antes de ocurrir el cambio. Con esto, cuando la válvula está relativamente cerrada los cambios en flujo son pequeños, para aperturas mayores los cambios de flujo son grandes. En la Fig. V.6, se puede observar que el cambio de flujo entre el 40% y 60% de apertura es aproximadamente el doble que el cambio de flujo entre el 20% y 40% de apertura, y así en los siguientes incrementos de 20% de apertura el flujo se duplica aproximadamente. Se recomienda usar esta característica en aplicaciones donde se esperen grandes variaciones en la caída de presión.

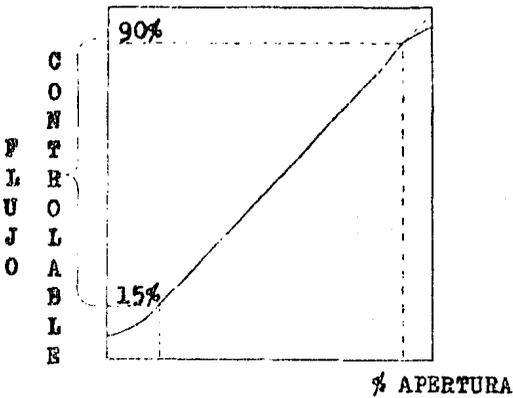
Apertura rápida. En esta característica se permiten grandes flujos desde el principio de la carrera del vástago; como se ve en la Fig. V.6, es posible tener un 70% de flujo con solo 40% de apertura. Esta característica es empleada generalmente en sistemas de control abierto-cerrado (on-off).



- A) LINEAL
- B) IGUAL PORCENTAJE
- C) APERTURA RAPIDA

Fig. V.6 Características de las válvulas de control.

% FLUJO



$$\text{Gama} = \frac{90}{15} = 6$$

Fig. V.7 Ejemplo de relacion gama

Rangeabilidad o Relación Gama. Se acostumbra definir como relación gama de una válvula al cociente entre los extremos máximo y mínimo del rango de flujo controlable. Se entiende como rango de flujo controlable al intervalo de flujo que sigue una característica bien definida. En la la Fig. V.7 se muestra un ejemplo de la relación gama.

Selección de la característica. Cuando se instala una válvula de control en un sistema, la caída de presión a través de ella puede cambiar con el flujo por lo que la característica obtenida puede tener poca semejanza con la característica inherente.

Si la presión a través de la válvula se incrementa a medida que aumente el flujo, una característica inherente se comporta de la siguiente manera:

Apertura rápida tiende a ser lineal.

Lineal tiende a ser igual porcentaje.

Si la presión a través de la válvula disminuye al aumentar el flujo, las características inherentes se comportan de la siguiente manera:

Igual porcentaje tiende a ser lineal.

Lineal tiende a ser apertura rápida.

Para la selección adecuada de la característica es necesario hacer un análisis dinámico completo, para lo cual es necesario disponer de tiempo y de conocimientos, lo que en ocasiones no se dispone. Por esto se han desarrollado algunas reglas empíricas que permiten hacer una selección adecuada de la característica apropiada.

En casos donde se tiene caída de presión constante, una característica lineal suministra un control óptimo; cuando la caída de presión se reduce con la carga, el tapón lineal es aún

la mejor solución; cuando la caída de presión con el flujo máximo es menor del 20% de la caída de presión a flujo mínimo, una característica igual porcentaje es adecuada.

El tapón lineal también proporcionará un buen control en circuitos de nivel de líquido en donde la caída de presión aumenta con la carga. En casos en donde la caída de presión a flujo máximo sea el doble de la caída de presión a flujo mínimo la característica inherente apertura rápida es útil.

Cuando se tiene control de presión, en la mayoría de estas aplicaciones se requiere una característica igual porcentaje.

Cuando se requiere control de flujo y el elemento de medida sea del tipo raíz cuadrada o del tipo lineal y que se encuentre en serie con la válvula de control, una característica lineal es adecuada. Si la válvula de control se encuentra instalada en una derivación (cierra para aumentar el flujo a través del elemento de medida), un tapón lineal deberá ser usado con medición lineal y un tapón igual porcentaje con medición del tipo raíz cuadrada.

Si el rango de flujo es pequeño y existen grandes cambios de caída de presión en la válvula, se debe seleccionar una característica igual porcentaje.

En casos donde no se justifique un análisis dinámico, una característica igual porcentaje es la elección, basándose en el hecho de que esta característica da por resultado un desajuste menor que las otras características.

Materiales de construcción. Los factores que intervienen en la selección de los materiales de construcción son entre otras: corrosión, erosión, presión, temperatura y costo. Si los factores anteriores lo permiten, lo usual es utilizar para el cuerpo acero al carbón ASTM A-216 grado WCB y para los interior

res acero inoxidable ASTM A-315 grado CP8M (acero inoxidable -- 316).

Para manejo de vapor, productos de petróleo, y otros fluidos relativamente no corrosivos a temperaturas entre 800°F y -- 1050°F, aleaciones fundidas por ASTM A217 son usualmente especi-- ficadas para los componentes del cuerpo, para válvulas de con-- trol manejando fluidos a temperaturas entre -50°F y 150°F se re-- comienda un acero con 3.5% de nickel (ASTM A352 grado LC3), pa-- ra temperaturas menores e recomiendan aceros inoxidables.

Cuando la caída de presión a través de la válvula es gran-- da, la erosión puede dañar el interior de la válvula, en estos-- casos el material puede ser de acero inoxidable de la serie 400 o bien, Rockwell-C para servicios de temperaturas hasta 850°F.

También se emplean una gran variedad de materiales resis-- tentes a la corrosión para la manufactura de válvulas; entre -- los más comunes están el Hastelloy A, B, y C, Monel, Nickel y -- grados especiales de aceros inoxidables tales como AISI Tipo -- 369. En algunos casos se pueden recubrir de materiales plásti-- cos como pentón, teflón, kynar o delrin, además de que algunas-- válvulas se pueden construir totalmente de estos plásticos.

Para una mejor selección de materiales es necesario consul-- tar con los fabricantes de válvulas.

Accesorios para válvulas. A continuación se expone una --- guía general para el uso de los diferentes accesorios disponi--- bles en el mercado para válvulas de control.

Posicionador. Este es un dispositivo que recibe la señal - de control y una medición de la posición del vástago de la vál-- vula, las compara y manda al actuador la señal de corrección, -- hasta que esta tenga exactamente la posición requerida por la -

señal de control.

Su función es asegurar que el vástago de la válvula adopte una posición proporcional a la señal de control, evitando así errores por fricción o por no linealidades propias del diafragma. También reduce el tiempo de respuesta en el actuador.

Los posicionadores se aplican en:

- a) Válvulas de control de temperatura.
- b) Válvulas de mariposa, diafragma y ángulo.
- c) Para caídas de presión de 100 lb/plg^2 o más.
- d) Líneas de transmisión neumática de 200 pies o más.
- e) Sistemas de control en cascada o controles múltiples.
- f) Sistemas de rango dividido.
- g) En donde se desee incrementar la velocidad de respuesta de la válvula de control.

Controlador de presión. Este se monta en la válvula y se utiliza cuando se necesita tomar señal de la línea; o sea, servicio de reducción o de alivio. Se pueden suministrar con sello químico para el bourdon.

Interruptor de límite. Se usan para enviar señales eléctricas para operar alarmas sonoras o visuales, relevadores u otros dispositivos cuando se requiere saber la posición de la válvula. Se pueden usar en válvulas de globo o rotatorias y son a prueba de explosión.

Transductor I/P. Se requiere un transductor cuando la señal de entrada es eléctrica con la que se desea operar una válvula con actuador neumático.

Operador manual. Es un volante que se utiliza cuando se ---

desea operar la válvula manualmente en caso de falla de aire; puede ser de montaje superior o lateral siendo este último el más usado.

Candado neumático. Es un dispositivo de seguridad que se utiliza cuando se requiere mantener la posición última de la válvula cuando falla el aire.

Tope de carrera. Es un dispositivo que se usa para que no abra o cierre completamente la válvula cuando por una razón se dimensionó a tal apertura que no pase de ella.

Tanque de volumen. Es un recipiente que se llena de aire a presión y que se utiliza para mantener la posición de falla en los actuadores de pistón.

Válvula solenoide. Es una pequeña válvula operada eléctricamente y montada en el actuador de la válvula de control. Solo se utiliza en servicios de cierre y apertura rápida desde puntos remotos (cuarto de control), por ejemplo en válvulas de admisión de vapor a turbinas, válvulas de corte, etc.

Si se considera que es necesario cualquiera de los accesorios anteriores, es recomendable cuando sea posible, especificarlo en la misma hoja de datos de la válvula de control para que el proveedor los suministre montados.

Selección de válvulas de control. Con lo visto hasta aquí se puede seleccionar la válvula de control apropiada para un servicio determinado. A continuación se mencionarían algunos criterios de consideración para su selección.

El rango de presión que la válvula debe soportar es la primera consideración para seleccionar la configuración de la válvula. El ANSI ha establecido tablas de presión y temperatura para varios materiales y bridas estándar: 150# ANSI, 300# ANSI, - etc. De preferencia se utilizan conexiones bridadas, revisando los rangos ANSI, se encuentra que la selección de la brida es determinada por la temperatura y presión del fluido manejado.

Los materiales, tipo de bridas, así como su clasificación por presión deben de estar de acuerdo a las especificaciones de la tubería en la que se hace la instalación.

La selección de la configuración de la válvula depende también de la máxima caída de presión esperada. Aunque la literatura de los fabricantes da las caídas de presión permisibles, generalmente las válvulas de globo soportan mayores caídas de presión que las válvulas de flecha rotatoria. Las válvulas de globo guiadas en caja, han sido exitosamente usadas para caídas de presión hasta 50,000 psi. Las válvulas de bola están generalmente limitadas a caídas de presión de 300 a 400 psi. Las válvulas de mariposa recubiertas de hule son limitadas para caídas de presión de 150 psi.

Otro factor de consideración es el tipo de fluido manejado. Fluidos fríos o erosivos son muy difíciles de manejar, - la especificación de válvulas diseñadas para estos servicios como la de bola dan el mayor control y vida útil. Cuando el fluido es corrosivo, aleaciones de aceros inoxidable comunmente no están disponibles en forma de fundición para entrega inmediata, por lo tanto se debe considerar el uso de válvulas recubiertas de teflón o hechas de barra para estas aplicaciones.

La temperatura es la consideración final para llegar a la configuración de la válvula. Así las válvulas que llevan sellos de elastómeros no soportarían temperaturas elevadas. La informa

ción de los fabricantes da los límites de temperatura permisibles para cada tipo de válvula.

Otros criterios secundarios, determinan los interiores de la válvula. Es muy importante el grado de cierre que la válvula debe tener; el grado de cierre puede ir desde una fuga considerable en la posición cerrada (como las que se tienen en las válvulas de mariposa con asientos metal a metal) hasta una fuga de menos de una burbuja por minuto, lo que es estándar para válvulas de globo con asientos suaves. Es necesario conocer que fuga puede tolerar la válvula cerrada, no se debe especificar un cierre hermético que no se necesite ya que esto hará que el actuador aumente de tamaño y por consecuencia también de precio.

C A P I T U L O V I

CRITERIOS GENERALES DE CALCULO Y SELECCION DE INSTRUMENTOS

En este capítulo se dan los métodos de cálculo que son necesarios hacer después de haber seleccionado el elemento primario de flujo; para las variables presión, nivel y temperatura - se presentan tabuladas las características propias de cada instrumento para que de acuerdo a las características del proceso se haga la elección apropiada.

FLUJO

Medidores de tipo velocidad variable.

Cálculo de placas de orificio. Estas se calculan de la siguiente forma: Como la señal que genera la placa de orificio es cuadrática y de 0 - 10, debe determinarse el factor de lectura - y en que valor se tiene la lectura máxima y la lectura normal.

$$F.L. = \frac{Q_N}{7.071}$$

en donde:

F.L. = Factor de Lectura

Q_N = Gasto Normal

El valor obtenido se redondea para obtener el gasto del -- medidor.

$$Q_{Med} = F.L. \times 10$$

Las lecturas del gasto máximo y del gasto normal se calculan como:

$$I_N = \frac{Q_N}{Q_{Med}} \times 10$$

$$I_M = \frac{Q_M}{Q_{Med}} \times 10$$

Q_M = gasto máximo

Como criterio general, la lectura normal L_N debe quedar entre 6 y 7, y la lectura máxima L_M entre 8 y 9.

El cálculo para el dimensionamiento de placas de orificio está basado en ecuaciones teórico-prácticas obtenidas de estudios realizados por la Compañía de Instrumentos de Medición y Control Foxboro; las referencias de Tablas y Gráficas que se dan son del libro Principles and Practice of Flow meter Engineering de L. K. Spink, 9th Edition.

Las ecuaciones usadas para el cálculo son las siguientes:

LIQUIDOS

$$S = \frac{G_1 Q_{Med}}{N D_1^2 P_a P_b P_c \sqrt{G_f h_m}}$$

donde:

Q_{Med} = Gasto del medidor (GPM o m^3/hr).

D_1 = Diámetro interno de la tubería (pulgadas).

S = Factor de dimensionamiento para obtener la relación d/D (Beta), o rango de flujo.

P_a = Factor de corrección manométrica, se utiliza únicamente cuando se usa columna de mercurio para la medición de la diferencial de presión y depende de la gravedad específica del fluido sobre la superficie del mercurio o líquido de sello, cuando no se utiliza líquido de sello ni mercurio $P_a = 1$ (Ver Tabla 8 Pág. 157 y Tabla 54 Pág. 473).

P_b = Factor de corrección por expansión térmica del orificio, depende del material de fabricación de la placa y de la temperatura de operación (Ver Tabla 7 Pág. 156).

G_f = Gravedad específica del líquido a la temperatura --
del fluido.

G_1 = Gravedad específica del líquido a las condiciones --
base 60° F.

N = Factor de corrección que depende de las unidades de
flujo (Ver Tabla 4 Pág. 154).

h_m = Diferencial máxima.

F_c = Corrección por el número de Reynolds, para el cálculo
lo inicial se supone $F_c = 1$ y después se calcula u-
tilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{R_d}{F_c} = \frac{17920 D_1 \beta F_m \sqrt{h_w G_f}}{\mu}$$

donde:

h_w = Diferencial a flujo normal = h_{nor} .

μ = Viscosidad del fluido en Cp.

Con el valor de R_d/F_c y utilizando las gráficas de las pá-
ginas 196 y 197 se obtiene el valor de F_c . Hay que hacer notar-
que para $R_d/F_c > 50\ 000$ se toma $F_c = 1$.

GASES

$$K_o \beta^2 = \frac{Q_{Med}}{N D_1^2 F_r Y F_{pb} F_{tb} F_{tf} F_g F_{pv} F_{vw} F_a F_m \sqrt{h_m} F_f}$$

donde:

$K_o \beta^2$ = Coeficiente de descarga incluyendo velocidad de a
proximación.

K_o = Coeficiente de descarga.

β = Relación de diámetros.

N = Factor de corrección que depende de las unidades-
de flujo (Ver Tabla 4 Pág. 154)

Q_{Med} = Flujo del medidor en pies cúbicos por hora a temperatura y presión base.

D_1 = Diámetro interior de la línea en pulgadas.

Fr = Factor de corrección por No. de Reynolds, para el cálculo inicial se supone Fr = 1 y después se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$Fr = 1 + \frac{b}{\sqrt{hw Pf}}$$

b = Descenso del No. de Reynolds del gas; se obtiene utilizando la Tabla 37 Pág. 440 teniendo como parámetros el diámetro interior de la línea y el diámetro del orificio.

hw = Δ h_{nor}.

Pf = Presión estática del fluido; se obtiene utilizando la Tabla 57 Pág. 509-519 utilizando la presión del fluido en psig.

Y = Factor de expansión; para el cálculo inicial se supone Y = 1 y después se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$Y = 1 - \left(\frac{0.41 + 0.35 \beta^4}{K} \right) X$$

X = Diferencial dividida por presión estática corriente arriba y se obtiene utilizando la siguiente fórmula:

$$X = \frac{h_{nor}}{27.7 Pf}$$

K = Coeficiente de descarga para gases; se obtiene utilizando las Tablas de la Pág. 354 teniendo

como parámetro el peso molecular del gas.

Fpb = Factor de corrección por presión base del gas; se obtiene utilizando la Tabla 45 de la Pág. 453 partiendo de la presión base del gas, se puede obtener también utilizando la siguiente fórmula:

$$Fpb = \frac{14.73}{Pb}$$

Pb = Presión base.

Ftb = Factor de corrección por temperatura base del gas; se obtiene utilizando la Tabla 46 Pág. 453 partiendo de la temperatura base del gas, se puede obtener también utilizando la siguiente fórmula:

$$Ftb = \frac{Tb}{520}$$

Tb = Temperatura base en °R.

Ftf = Factor de corrección por temperatura del gas; se obtiene utilizando la Tabla 47 Pág. 454 teniendo como parámetro la temperatura del gas, se puede obtener también utilizando la siguiente fórmula:

$$Ftf = \sqrt{\frac{520}{Tf}}$$

Tf = Temperatura del gas en °R.

Fg = Factor de corrección por gravedad específica; se obtiene utilizando la Tabla 48 Pág. 455 teniendo como parámetro la gravedad específica (G), se puede obtener también utilizando la siguiente fórmula:

$$Fg = \sqrt{1/G}$$

F_{pv} = Factor de supercompresibilidad; se obtiene utilizando la Tabla 50 Pág. 458-464 teniendo como parámetro la gravedad específica y la presión del gas en psig.

F_a = Factor de corrección por expansión térmica del orificio; depende del material de fabricación de la placa y de la temperatura de operación, se obtiene utilizando la Tabla 7 Pág. 156.

F_m = Factor de corrección manométrica; se utiliza únicamente cuando se usa columna de mercurio para la medición de la diferencial de presión y depende de la gravedad específica del gas sobre la superficie del mercurio o líquido de sello, cuando no se utiliza líquido de sello ni mercurio
 $F_m = 1$ (Ver Tabla 8 Pág. 157 y Tabla 54 Pág. 473).

F_{wv} = Factor de corrección por vapor de agua; para gases secos $F_{wv} = 1$ (Ver Pág. 425).

VAPOR DE AGUA

$$K\alpha^2 = \frac{W_m}{N D_1^2 F_a F_m F_r Y \sqrt{h_m \delta f}}$$

donde:

W_m = Flujo del medidor en lb/hr

F_r = Factor de corrección por No. de Reynolds; para el cálculo inicial se supone $F_r = 1$ y después se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$F_r = 1 + \frac{E}{Rd}$$

Rd = No. de Reynolds en el orificio.

E = Descenso del factor del No. de Reynolds; se calcula -
utilizando la Tabla 31 Pág. 395 con el valor de β y -
el diámetro nominal de la línea.

$$Rd = \frac{6.32 W_{nor}}{D_1 \mu}$$

Y = Factor de expansión; se calcula de la misma manera ---
que en el caso de gases, pero en este caso, el coefi-
ciente de descarga K para presiones de 1 a 500 psia -
se calcula por la siguiente fórmula:

$$K = 1.339 - (0.000068 \text{ } ^\circ\text{F})$$

$^\circ\text{F}$ = Temperatura de operación en $^\circ\text{F}$

γ_f = Peso específico a condiciones del fluido; para obte-
ner la γ_f se utiliza la Tabla 26 Pág. 333-345 tenien-
do como parámetros la temperatura de operación en $^\circ\text{F}$ -
y la presión de operación en psia.

El cálculo para otros elementos primarios de medición de -
flujo tales como Tobera y Venturi se realiza de la misma manera
que para placas de orificio, excepto que se utilizan tablas di-
ferentes para la relación β (Tabla 14 Pág. 180).

Cálculo de Tubos Annubar. Se utilizan las siguientes ecua-
ciones:

Líquido, gas o vapor con flujo másico:

$$hw = \left(\frac{1}{K} \left(\frac{Q_{Med}}{358.93 K D_1^2} \right) \right)^2$$

donde:

hw = Presión diferencial en pulgadas de agua a 68°F .

K = Coeficiente de flujo; este coeficiente es función --

del modelo de annubar que se uso y del tamaño, en --
magnitud varía de 0.588 a 0.945.

D_1 = Diámetro interior de la tubería en pulgadas.

Q_{Med} = Gasto en libras por hora o kg/hr.

ρ_f = Densidad del fluido en lb/ft³.

Líquido con gasto volumétrico.

$$hw = (G_f) \left(\frac{Q_{Med}}{5.66 K D_1^2} \right)^2$$

G_f = Gravedad específica del fluido; relación de la densi-
dad del líquido a la densidad del agua a 60°F.

Q_{Med} = Gasto en GPM o m³/hr.

Gas con gasto volumétrico.

$$hw = \left(\frac{Tf G}{Pf} \right) \left(\frac{Q_{Med}}{7711 K D_1^2} \right)^2$$

Q_{Med} = Gasto en pies cúbicos estándar por hora (14.7 psia y
60°F).

Pf = Presión del flujo en psia.

Tf = Temperatura del gas °R.

G = Gravedad específica del gas. Relación del peso mole-
cular del gas al peso molecular del aire.

Cálculo de medidores tipo área variable (rotámetro). Para-
calcular un rotámetro es costumbre convertir el flujo del líqui-
do a GPM de agua equivalente; para gases, se convierte a SCFM -
de aire equivalente.

Las ecuaciones para calcular los flujos equivalentes en -

agua o aire del fluido son las siguientes:

LIQUIDOS

Gasto volumétrico:

$$\frac{(\text{gal/min})(\rho)(2.65)}{\sqrt{(\rho_f - \rho)(\rho)}}$$

Gasto en peso:

$$\frac{(\text{lb/min})(0.318)}{\sqrt{(\rho_f - \rho)(\rho)}}$$

Gasto volumétrico de base o contrato:

$$\frac{(\text{gal/minb})(\rho_b)(2.65)}{\sqrt{(\rho_f - \rho)(\rho)}}$$

GASES

Gasto volumétrico:

$$\frac{(\text{SCFM})(\rho_{\text{gstd}})(2.51) \text{ 530 Pstd}}{\sqrt{\rho_f(\rho_{\text{gopt}})} \quad \text{Tstd 14.7}}$$

Gasto volumétrico de operación:

$$\frac{(\text{OCFM})(\rho_{\text{gstd}})(2.51)}{\sqrt{\rho_f(\rho_{\text{gopt}})}}$$

Gasto en:

$$\frac{(\text{lb/min})(2.51)}{\sqrt{\rho_f(\rho_{\text{gopt}})}}$$

donde:

gal/min = flujo máximo del líquido en las condiciones de medición

gal/minb = flujo máximo de líquido en la condición de base o contrato

lb/min = flujo máximo del fluido en las condiciones de medición

SCFM = flujo máximo del gas, en relación con una condición de base o estándar, en pies cúbicos por minuto

OCFM = flujo máximo de gas, en las condiciones de operación, en pies cúbicos por minuto

ρ_f = densidad del flotador en gramos por centímetro cúbico

ρ = densidad del líquido fluyente, en las condiciones de medición, en gramos por centímetro cúbico

ρ_b = densidad del líquido fluyente, en condiciones de base o contrato, en gramos por centímetro cúbico

ρ_{gstd} = densidad del gas a 14.7 lb/plg² absolutas y 70°F, o 14.4 lb/plg² absolutas y 60°F en libras por centímetro cúbico

ρ_{gopt} = densidad del gas, en las condiciones de medición, en libras por pie cúbico

t_{std} = temperatura en condiciones de base, en grados Fahrenheit y en unidades absolutas (460 + °F)

P_{std} = presión, en la condición de base, en libras por pulgada cuadrada absolutas.

Las fórmulas anteriores permiten determinar rápidamente los flujos equivalentes en agua o en aire del fluido, y de aquí, el tamaño del rotámetro consultando las tablas del fabricante. Estas dan el tamaño, el número del tubo y el del flotador con su forma y peso.

Selección de instrumentos. Para destacar la posición competitiva de una industria, los instrumentos deben seleccionarse con sumo cuidado con el fin de satisfacer cada aplicación específica. Para que un ingeniero instrumentista de procesos o de fabricación, así como sus ayudantes especializados, pueda elegir la mejor aplicación, debe tener un conocimiento profundo tanto del instrumento como el sistema de operación.

La selección adecuada se realiza teniendo en cuenta las características de los instrumentos tales como: rango de operación, precisión, características del proceso, costo, mantenimiento, facilidad de montaje, etc. En las Tablas VI.1-4, se comparan los diferentes tipos de instrumentos para la medición de las variables flujo, nivel, presión y temperatura. Estas tablas pueden ser útiles como guía para la selección del instrumento según las necesidades.

Detector de flujo	Tipo de fluido	Pérdida de presión	Relación de rango de flujo	Error en %	Costo
Orificio concéntrico	Líquido, gas y vapor de agua	50-90%	3:1	0.75	Bajo
Orificio segmental	Suspensiones líquidas	60-100%	3:1	2.5	Bajo
Orificio excéntrico	Líquido y gas combinado	60-100%	3:1	2	Bajo
Tubo venturi	Líquido y gas	10-20%	3:1	1	Muy alto
Tubo dall	Líquido	5-10%	3:1	1	Alto
Tobera de flujo	Líquido, gas y vapor de agua	30-70%	3:1	1.5	Medio
Fotómetro	Todo fluido	1-200" H ₂ O	10:1	2	Medio
Magnético	Suspensiones	Ninguna	30:1	1	Alto
Turbina	Líquidos limpios	0-7 psi	14:1	1.5	Alto
Tubo pitot	Líquidos y gases	Ninguna	3:1	1	Bajo
Desplazamiento positivo	Líquidos	0-15 psi	10:1	0.5-2	Alto
Remolino	Líquido y gas	0-6 psi	30:1 a 100:1	0.25	Alto

TABLA VI.1 Comparación entre los diferentes tipos de medidores de flujo

Instrumento	Campo de medida	Precisión % escala	Pres. máx. kg/cm ²	Temp. máx. fluido °C	Desventajas
Regleta móvil y fija	Limit.	0.5 mm	Atm.	60	Manual, sin olas, tanques abiertos
Vidrios de nivel	"	"	150	200	Sin transmisión
Flotador	0-10 m	±1-2%	400	250	Posible agarro tamiento
Desplazador	0-25 m	±0.5%	100	170	Expuesto a corrosión
Burbujeo	Alt. tanque	±1%	400	200	Mantenimiento, contaminación líquido
Diafragma	0-25 m	±1%	Atm.	60	Tanques abiertos
Presión diferencial	0-3 m	±0.5%	150	200	Posible agarro tamiento
Conductivo	Ilimitado	-	80	200	Líquido conductor
Capacitivo	0-6 m	±1%	80-250	200 400	Recubrimiento electrodo
Radiación	0-2.5 m	±1-3%	-	150	Fuente radiac tiva

TABLA VI.2 Comparación entre los medidores de nivel

<i>Elemento</i>	<i>Campo de medida</i>	<i>Precisión % de toda la escala</i>	<i>Temp. máx. de servicio</i>	<i>Presión está- tica máxima</i>
<i>Tubo Bourdon</i>	0.5-6000 kg/cm ²	0.5-1%	90°C	6000 kg/cm ²
<i>Espiral</i>	0.5-2500 kg/cm ²	0.5-1%	90°C	2500 kg/cm ²
<i>Helicoidal</i>	0.5-5000 kg/cm ²	0.5-1%	90°C	5000 kg/cm ²
<i>Diafragma</i>	50 mm cda-2 kg/cm ²	0.5-1%	90°C	2 kg/cm ²
<i>Puelle</i>	100 mm cda-2 kg/cm ²	0.5-1%	90°C	2 kg/cm ²
<i>Resistivos</i>	0-0.1 a 0-300 kg/cm ²	1%	80°C	-
<i>Capaci- tivos</i>	0.05-5 a 0.05-600 kg/cm ²	1%	150°C	-
<i>Strain gage</i>	0-0.01 a 0-3000 kg/cm ²	1%	120°C	-

**TABLA VI.3 Comparación entre elementos mecánicos y electromecá-
nicos medidores de presión**

Tipo de termómetro	Rango de temperatura ($^{\circ}F$)	Exactitud	Velocidad de respuesta	Rango de presión (lb/plg ²)
Líquido en vidrio	-80 a 950	Mediana a alta	Mediana	25
Líquido en metal	-38 a 1200	Mediana	Lenta	Vacío a 5000
Activado por vapor	-40 a 600	Mediana	Mediana	Atmosférica
Activado por gas	-125 a 1000	Mediana a alta	Rápida	Atmosférica
Bimetálico	-40 a 1000	Baja a mediana	Mediana a Lenta	100
De resistencia	-100 a 1000	Alta	Mediana a Rápida	Vacío a 350
Termistor	-180 a 750	Mediana a alta	Rápida	Vacío a 350
Electrónico	0 a 350	Alta	Rápida	Vacío a 350

(a)

Tipo de termopar	Rango de temperatura $^{\circ}C$	Atmósfera.
Tipo T Cobre-Constantano	-185 a 375	Oxi o Red
Tipo E Cromel-Constantano	-15 a 550	Oxidante
Tipo J Fierro-Constantano	-15 a 750	Reductora
Tipo K Cromel-Alumel	-15 a 1250	Oxidante
Tipo R o S Platino-Rodio	-15 a 1500	Oxidante

(b)

TABLA VI.4 Termómetros y rangos de medición útiles para su selección

C A P I T U L O V I I

HOJAS DE ESPECIFICACION

Este capítulo cubre la información requerida para el llenado de las hojas de datos; las cuales, son de gran importancia ya que en ellas se encuentra toda la información necesaria para especificar y seleccionar adecuadamente los instrumentos de un proyecto o de un proceso.

Antes de especificar un instrumento es necesario seleccionarlo, esto se hace en base a los requerimientos de proceso; -- por ejemplo, existen varios tipos de medidores de presión de -- acuerdo al elemento sensor, pero sólo uno de ellos cubrirá satisfactoriamente las necesidades de rango de presión a manejar.

Después de seleccionado el instrumento, se elaboran las hojas de especificación o de datos, en estas se definen las características de cada uno de los instrumentos. Estas hojas son formatos que se tienen como estándares y que se llenan con los datos requeridos.

Una hoja de especificación se divide en tres partes: la -- primera contiene información tal como: clave del instrumento, -- localización, servicio, montaje; la segunda tiene las características requeridas como: tipo de instrumento, material del --- cuerpo y/o caja, clasificación eléctrica, rango, escala, diámetro y tipo de conexiones, etc.; y la tercera parte contiene las condiciones de operación o datos de proceso: fluido, presión máxima y normal, temperatura máxima y normal, densidad, viscosidad, etc.

Al especificar se evita en lo posible hacer mención o referencia a marcas y modelos de un fabricante en especial para no

limitar a posibles proveedores y seleccionar entre las ofertas que se presenten la más favorable que cumpla con las especificaciones. Sin embargo, para estandarizar y no especificar algún instrumento de fabricación especial es necesario recurrir a catálogos de fabricantes.

En esta actividad se utilizan algunos conceptos fijados en las bases de diseño tales como: unidades de escala, tipo de conexiones, tipo de instrumentación (neumática o eléctrica), etc.

A continuación se presentan algunos criterios generales que se toman en cuenta al seleccionar y elaborar las especificaciones de instrumentos.

Los instrumentos de medición y/o control de todas las variables que afecten directamente la estabilidad o eficiencia del proceso deben ser centralizados en un tablero de control principal, para tener un control más estricto sobre ellas.

De preferencia se especifican medidores y controladores locales para los casos en que la variable controlada no afecte directamente el proceso y en los que no se requiera un reajuste periódico del punto de referencia.

Es recomendable estandarizar todos los instrumentos tomando en cuenta su disponibilidad y la de sus partes.

Cuando se requiera algún accesorio adicional para el buen funcionamiento o para su montaje (sifones, sellos químicos, regulador-filtro, anaqueles para montaje en tablero, yugos de montaje, fuentes de energía, etc.) es recomendable especificarlo en la misma hoja de datos para que sean suministrados como un equipo integral.

En toda selección de un instrumento se debe tomar en cuenta la facilidad de montaje y mantenimiento.

Puntos importantes que deben quedar claros en la hoja de especificación son: suministros eléctricos y neumáticos, rango

de señales, diámetro de puertos de tomas de proceso, de suministro y de señales.

La selección del modo de control de los controladores debe ser en base a las características del proceso como se describió en el capítulo IV.

Quando se considera necesario se deben pedir las partes de repuesto recomendables por el fabricante, esto sucede generalmente en los instrumentos electrónicos.

Es necesario considerar las propiedades corrosivas del fluido que se va manejar y del medio en donde se va a instalar el instrumento para hacer una buena selección de los materiales de la caja, cuerpo e interiores. Como siempre, una buena selección de materiales tiene que balancear el costo y la resistencia a la corrosión.

La elaboración de especificaciones, dentro de la ingeniería de instrumentos es una de las actividades a las que se le asigna y que consumen una gran cantidad de horas de ingeniería. De un estimado, es por esto que al elaborarlas se deben seguir los lineamientos establecidos en las bases de diseño para evitar rechazos del cliente con el consiguiente atraso del proyecto.

Una vez que el cliente ha aprobado las hojas de especificación, se elaboran las requisiciones anexando a estas las hojas de especificación, ya aprobadas las requisiciones se elaboran las solicitudes de cotización.

C A P I T U L O V I I I

APLICACIONES

Este capítulo tiene por objeto presentar la aplicación de los sistemas de control anteriormente tratados a equipos de uso común en la industria química.

Control de reactores. Uno de los equipos más importantes en una planta química es el reactor. De su operación depende en gran parte el rendimiento y calidad de los productos.

Las variables más importantes a controlar en un reactor son la temperatura y la presión, y generalmente como consecuencia de ellas, el flujo del reactor.

La temperatura de reacción se selecciona como variable controlada cuando los parámetros de la reacción son sensibles a los cambios que pueden ocurrir en ella. En otros casos se utiliza en forma combinada con la presión, o se puede controlar indirectamente mediante la variación en los flujos de los reactivos.

Como se sabe, las reacciones pueden ser endotérmicas o exotérmicas. El primer caso requiere por lo general la adición de calor mediante un fluido caliente mientras que en el segundo requiere la utilización de un medio de enfriamiento que remueva el calor generado.

En la Fig. VIII.1 se ilustra un arreglo simple para el control de temperatura en un reactor en el que se desarrolla una reacción endotérmica. El control está constituido por un sensor de temperatura, un transmisor, un controlador indicador de tablero principal y una válvula automática que regula el flujo del medio de calentamiento.

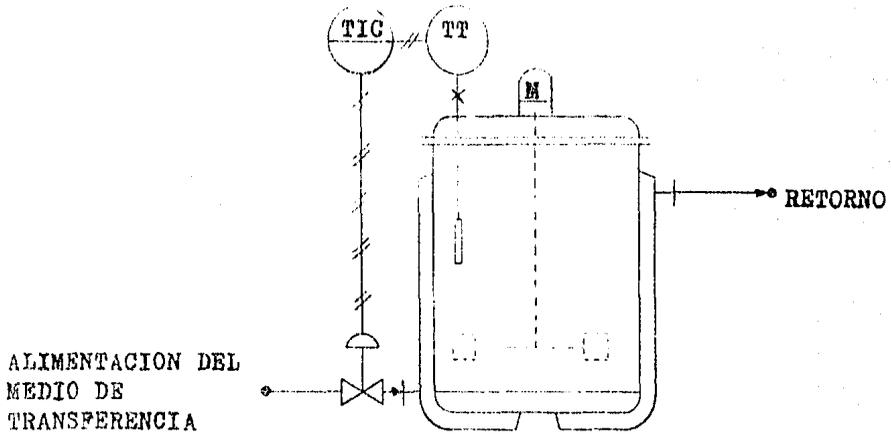


Fig. VIII.1 Control de temperatura de una reacción endotérmica

Este sistema muestra un control directo de la temperatura mediante la manipulación del flujo del medio de calentamiento a través de la chaqueta. Sin embargo, en un buen número de instalaciones, este esquema no es satisfactorio, ya que el estrangulamiento del flujo de aceite puede ser un recurso inadecuado para mantener buenos coeficientes de transferencia. Por otra parte, al variar el flujo el gradiente de temperatura a través de la chaqueta puede ser de tal magnitud que provoque la aparición de puntos calientes y fríos en la pared interna del reactor. Este hecho puede provocar problemas sobre todo si la reacción es sensible a pequeñas diferencias de temperatura.

Para evitar todas las inconveniencias anteriormente mencionadas se puede utilizar un sistema como el que se muestra en la Fig. VIII.2.

Este arreglo contempla la utilización de una bomba en un circuito cerrado de calentamiento, con reposición del medio de transferencia a fin de controlar la temperatura. La bomba permite mantener un flujo alto y constante a través de la chaqueta, evitando así los problemas antes mencionados.

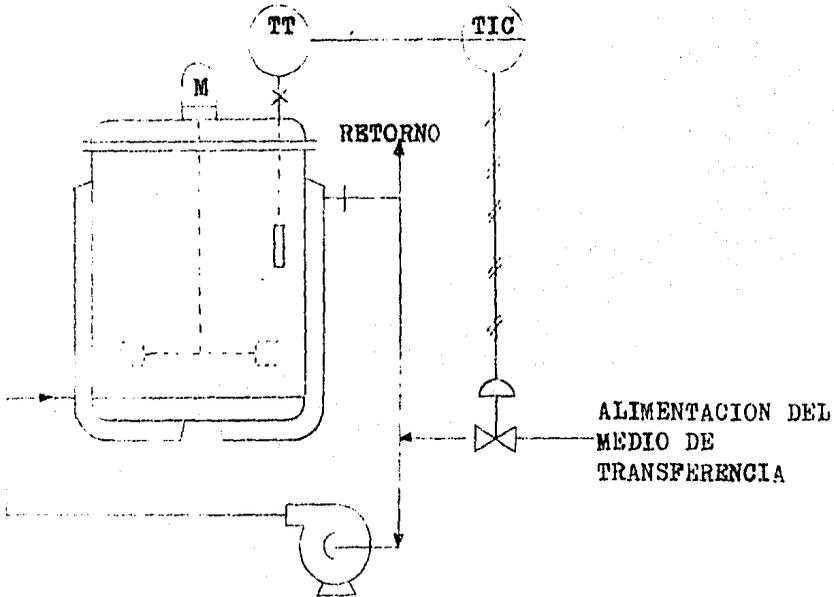


Fig. VIII.2 Otra forma de control de temperatura en una reacción endotérmica

Aún cuando ambos esquemas son básicamente adecuados, adolecen de retrasos en la respuesta del sistema. Se tiene retraso en el ajuste y homogenización de la temperatura propia del reactor, como consecuencia de la capacitancia térmica del mismo (relación carga térmica/variación de temperatura).

Debido a los retrasos mencionados, se puede esperar que el control no actúe adecuadamente, principalmente por la aparición de una inestabilidad del tipo cíclico.

Un medio adecuado para mejorar el esquema anterior, se aprecia en la Fig.VIII.3. En ella se muestra un arreglo de cascada temperatura del reactor-temperatura del medio de transferencia, en el que ésta última es el control esclavo. Mediante este sistema se disminuye el tiempo muerto por estabilización de la temperatura del medio de transferencia, evitándose además

que se puedan provocar problemas en la reacción por variaciones en las condiciones de dicho medio.

En ciertos tipos de reacciones se requiere, en adición al control de temperatura, un control de presión. En la Fig. ----- VIII.4 se muestra el esquema de un reactor en el que una de sus alimentaciones es gas. La densificación de este es función de la presión parcial del mismo, de tal forma que controlando esta, - se regula la admisión de gas. Este es un arreglo típico de aquellos tipos de reacciones que consumen el gas absorbiéndolo en - el líquido.

En la Fig. VIII.5 se muestra un sistema donde la reacción desprende gas. Las alimentaciones se controlan a flujo y el gas formado sale del reactor a control de presión.

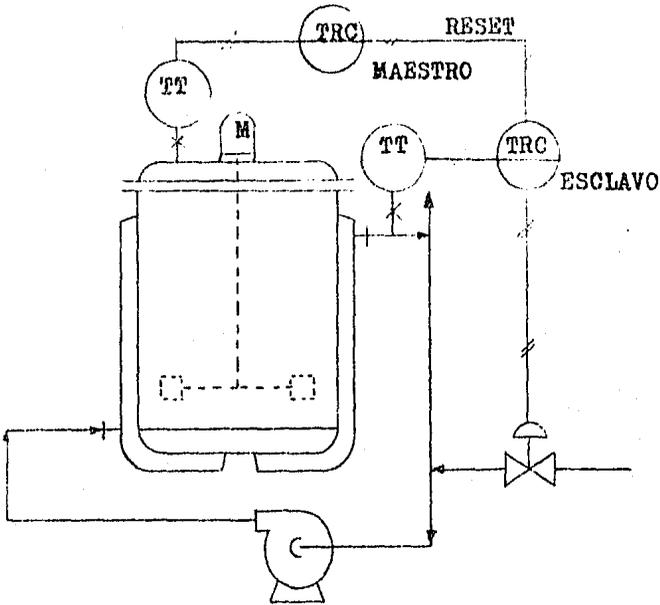


Fig. VIII.3 Control en cascada de la temperatura del reactor y la temperatura del medio de calentamiento en una reacción endotérmica.

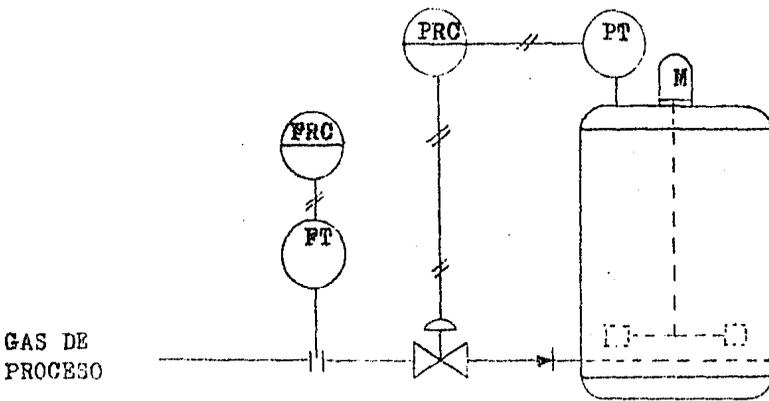


Fig. VIII.4 Control de presión en un reactor por medio de la alimentación gaseosa

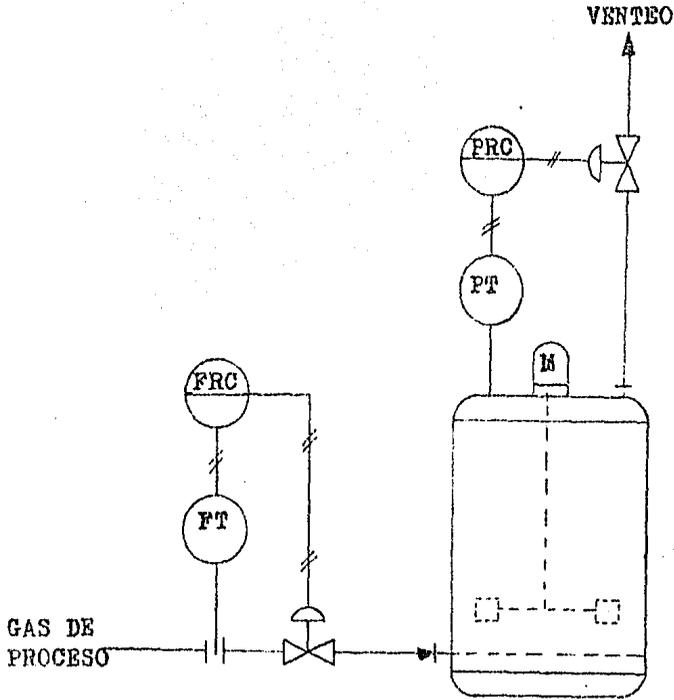


Fig. VIII.5 Control de presión en un reactor por medio de la corriente gaseosa que sale del reactor

Control de calentadores a fuego directo. Estos son equipos en que la energía calorífica se transfiere a la carga o alimentación en forma controlada. Un calentador típico consiste en una estructura metálica recubierta interiormente por refractario y dentro de la cual uno o varios serpentinas se exponen al calor, tanto en forma de radiación como de convección. El calor se obtiene mediante la combustión de hidrocarburos gaseosos o líquidos y en algunos casos de carbón.

Las funciones de un calentador son calentar y/o vaporizar la carga o proporcionar calor de reacción.

Las funciones principales de un sistema de control son:

- Mantener el flujo deseado de transferencia de calor.
- Mantener la combustión bajo control y de manera eficiente.
- Mantener condiciones seguras de operación.

La mayoría de los calentadores queman algún tipo de combustible fósil (tal como gas natural, diesel o carbón) y su selección depende de consideraciones económicas.

Para quemar completamente un combustible, existe una cantidad ideal de oxígeno, y en consecuencia de aire. Bajo condiciones reales, las ineficiencias en la combustión requieren la adición de una cantidad extra de aire para asegurar combustión completa. Esta cantidad adicional a la ideal se denomina "exceso de aire" y se maneja en forma de porcentaje, el cual es la relación de aire de exceso entre la cantidad ideal. Cada combustible tiene un límite mínimo de porcentaje de exceso, siendo la función más importante de un sistema de control de aire, la mantener la relación arriba de dicho mínimo.

Este factor se satisface mediante el logro de un tiro adecuado en el horno, por ejemplo manteniendo una presión adecuada en la chimenea, aún cuando se puede utilizar un analizador de gases de combustión si se desea un control más estricto.

A continuación se hace una descripción de los sistemas de control aplicables a diferentes tipos de calentadores, ya que la selección de determinado sistema depende de la función que debe desarrollar el calentador.

Rehervidores. Los rehervidores a fuego directo proporcionan la carga térmica a una torre de destilación mediante el calentamiento y vaporización parcial de sus fondos. Normalmente, los rehervidores utilizan vapor u otro fluido caliente como fuente de energía calorífica, pero cuando las cargas térmicas o las temperaturas requeridas son altas, la selección más adecuada es un calentador a fuego directo. En la Fig. VIII.6 se muestra un esquema de control para esta aplicación.

Este sistema utiliza una bomba para asegurar la recirculación apropiada de los fondos complementado por un controlador de flujo. El controlador de temperatura regula la adición de combustible, ya sea directamente o en cascada con un controlador de presión. Esto último se utiliza si se esperan fluctuaciones importantes en la presión de suministro de combustible. En adición se tiene un cierto número de controles para preservar la seguridad del equipo. Esto incluye un interruptor de baja presión de combustible, un interruptor por bajo nivel en los fondos, otro por bajo flujo de los mismos y una alarma por alta temperatura en la corriente de retorno, así como el empleo de indicadores de temperatura en diferentes áreas del calentador y de un medidor de presión que permite regular el tiro del mismo. En adición se tiene un botón de paro que se actúa a juicio del operador.

Calentadores y vaporizadores de proceso. El calentador de carga de una torre atmosférica es un ejemplo típico de estos calentadores. El crudo debe calentarse y vaporizarse antes de su

alimentación a la torre.

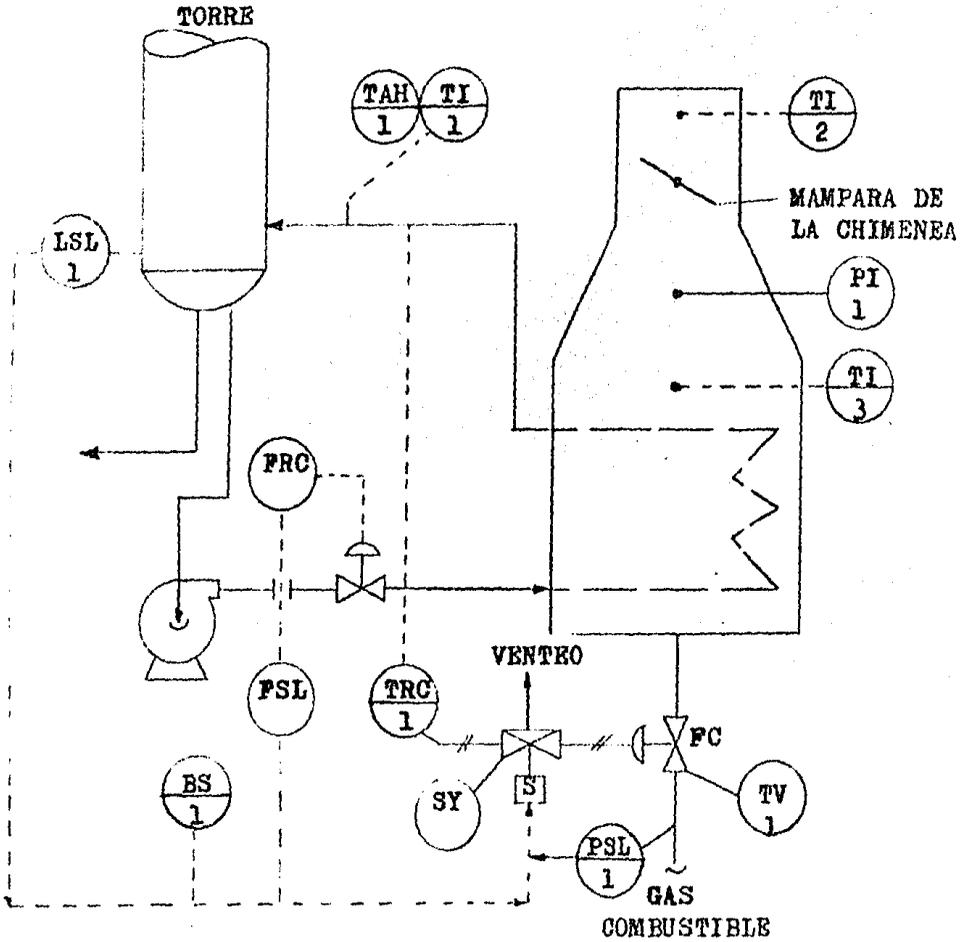


Fig. VIII.6 Control de un rehveridor a fuego directo

Las principales variables a controlar en estos equipos ---
son:

-Flujo de alimentación.

-Distribución adecuada de la carga a los distintos serpentines-
a fin de evitar el sobrecalentamiento de alguno de ellos.

-Carga alimentada a la torre.

En la Fig. VIII.7 se muestra un arreglo para estos tipos -
de equipos.

La primera de las variables mencionadas se controla median-
te el controlador de flujo FRC-2.

La distribución adecuada de carga a cada serpentín se efec-
túa por medio de válvulas accionadas remotamente por un contro-
lador manual HIC-1, 4, para el que se toma como referencia los
flujos medidos en los indicadores FI-1, 4, así como los indica-
dores de temperatura TI-1, 12 que monitorean la temperatura en-
tre diferentes localizaciones de cada serpentín. Un valor ina-
decuado de estas variables se corrige mediante la manipulación
de los HIC. Asimismo, la observación combinada del flujo y de -
las temperaturas de cada serpentín, dará idea del grado de car-
bonización o ensuciamiento que tengan.

Finalmente, el control de la carga térmica de la torre se
efectúa por medio del TRC-1 que se encarga de regular los con-
troles de combustible. Se tiene en adición, un indicador de tem-
peratura TI-13 que servirá como referencia de la buena opera-
ción del TRC-1.

Es importante hacer notar que cuando se tiene una vaporiza-
ción parcial de la carga, el control de temperatura por sí solo
no constituye un ajuste fino requiriéndose si el proceso lo ame-
rita, de controles más sofisticados.

Para el control de combustible, en este caso gas, se utiliza un esquema como el que se muestra en la Fig. VIII.8, el cual es muy similar al que se utilizó en los rehervidores.

Si el combustible fuera diesel, el sistema es parecido con la excepción de que se requiere inyectar vapor para atomizarlo. El control de esta inyección se efectúa mediante un controlador de la presión diferencial entre el diesel y el vapor. De esta manera se asegura, que aún cuando la presión del combustible varíe, la correspondiente del vapor se ajusta para tener siempre una mayor presión que garantiza una buena atomización. Este arreglo se muestra en la Fig. VIII.9.

Los sistemas de seguridad, aún cuando no se muestran por simplificación, son similares a los que se emplean en el caso de los rehervidores.

Sistemas duales de combustible. En estos sistemas se presentan dos casos:

El primero se tiene cuando se quema solo uno de ellos estando el otro como relevo (Fig. VIII.10).

Además de los controles clásicos para cada combustible, gas y diesel, se adiciona un selector manual que dirige la cascada del TRC de proceso hacia el controlador de presión del combustible seleccionado. De esta manera, si el gas es el combustible a quemar, el control se hará a través del TRC en cascada con el PIC del gas. Si el diesel es el utilizado, el control se efectúa mediante la cascada TRC-PIC del diesel.

El otro caso se presenta cuando ambos combustibles se usan simultáneamente. Bajo esta consideración, el combustible preferencial, gas, se controla independientemente mediante su propio PIC mientras que el ajuste de temperatura se efectúa por medio del diesel o combustóleo a través de la cascada TRC-PIC del diesel o combustóleo. Este arreglo se muestra en la Fig. VIII.11.

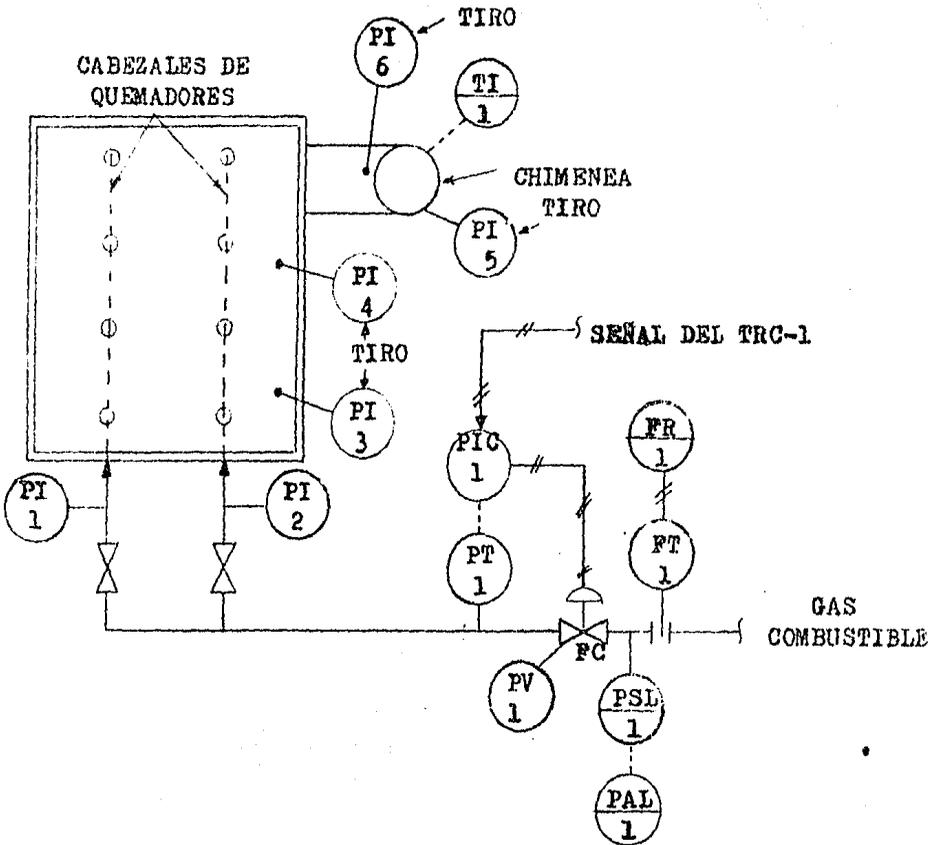


Fig. VIII.8 Control de combustible gas

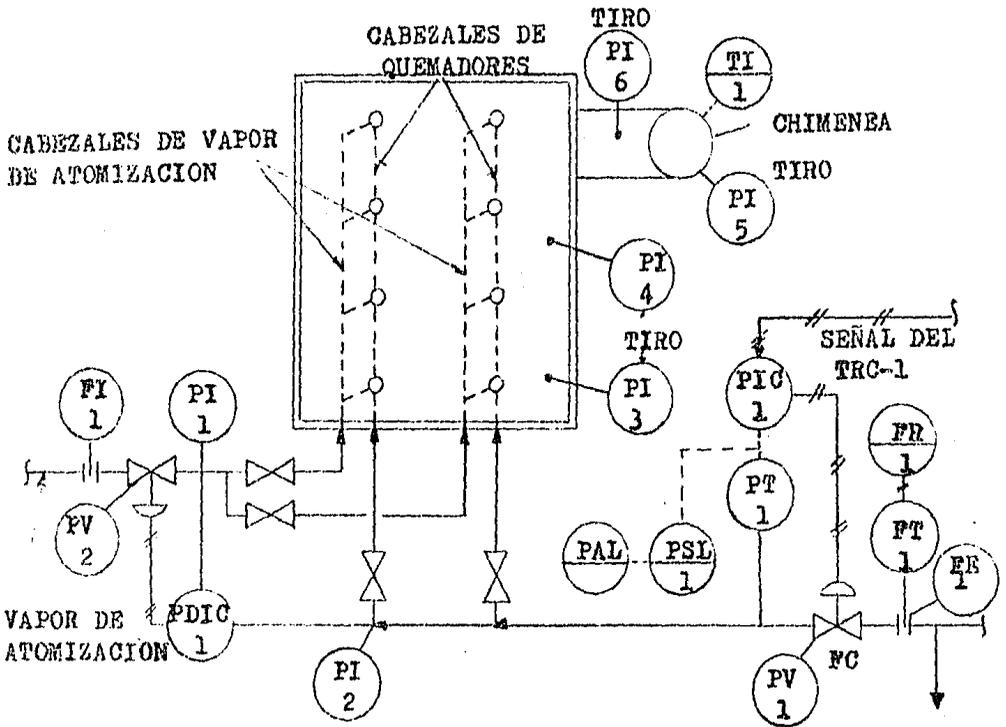


Fig. VIII.9 Control de combustible diesel

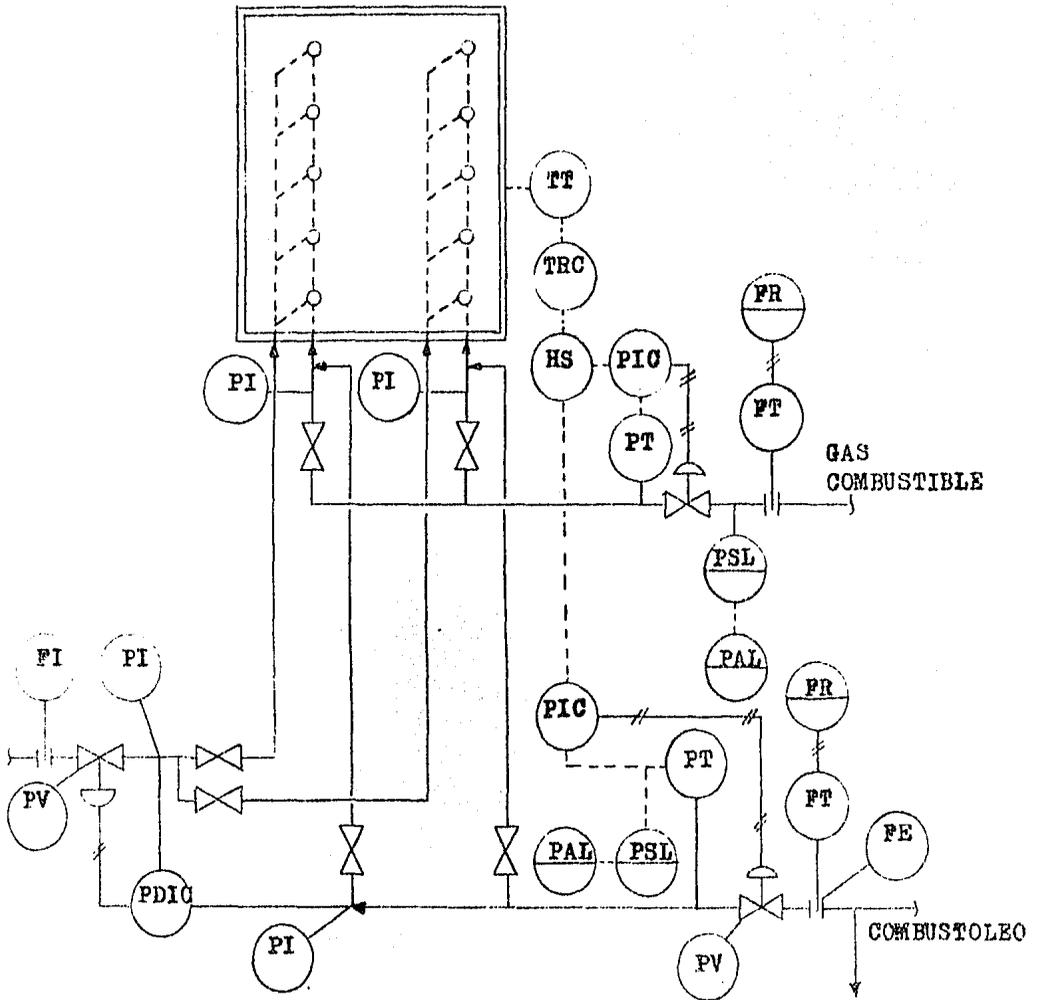


Fig. VIII.10 Control para un sistema dual de combustible estando uno de estos como relevo

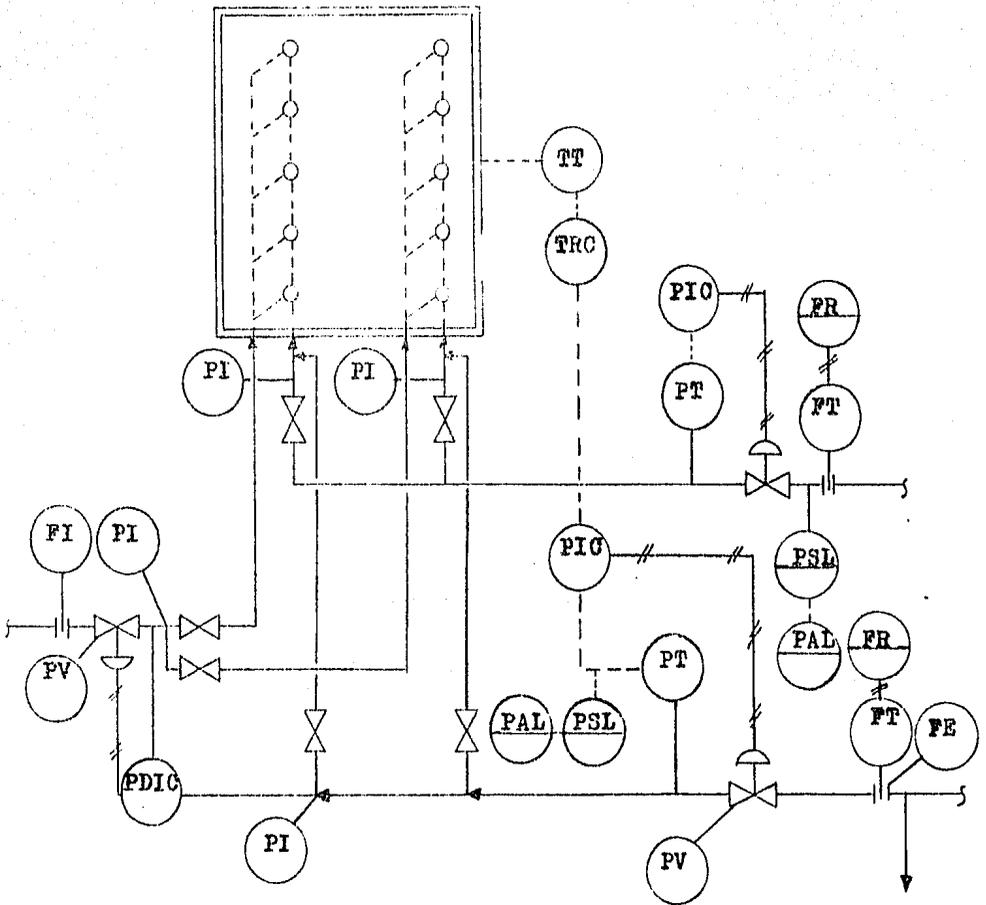


Fig. VIII.11 Control para un sistema dual de combustibles cuando ambos combustibles se usan simultáneamente

Control en torres de destilación. La operación de destilación consiste en separar una mezcla por diferencia de composición entre un líquido y su vapor. Esta operación se realiza en forma continua en las denominadas columnas o torres de destilación (Fig. VIII.12) donde por un lado asciende el vapor del líquido hasta salir por la cabeza de la columna y por el otro va descendiendo el líquido hasta llegar a la base. En estos pasos tiene lugar una mezcla entre las dos fases, de tal modo que pueden efectuarse extracciones a distintos niveles de la columna para obtener productos más o menos pesados.

El vapor saliendo de la columna es enviado a un enfriador o condensador, y recuperado como líquido en un receptor o acumulador. Una parte del líquido acumulado es retornado a la columna como reflujo.

El líquido sobrante es enviado fuera de la columna y es el producto de destilado.

El líquido del fondo saliendo de la columna es calentado en un reactor. Parte de este líquido es vaporizado e inyectado nuevamente a la columna, y el líquido sobrante es el producto de fondo.

Las variables importantes que regulan el funcionamiento de la columna son la presión de la cabeza de la columna, el flujo de alimentación, calor adicionado, flujo de destilado, flujo de los productos del fondo y el calor removido.

La justificación para un control adecuado en las columnas de destilación involucra normalmente los siguientes factores:

- Disminuir el consumo de los servicios
- Lograr estabilidad en la columna
- Maximizar la capacidad de rendimiento en la columna
- Obtener el máximo de utilidad

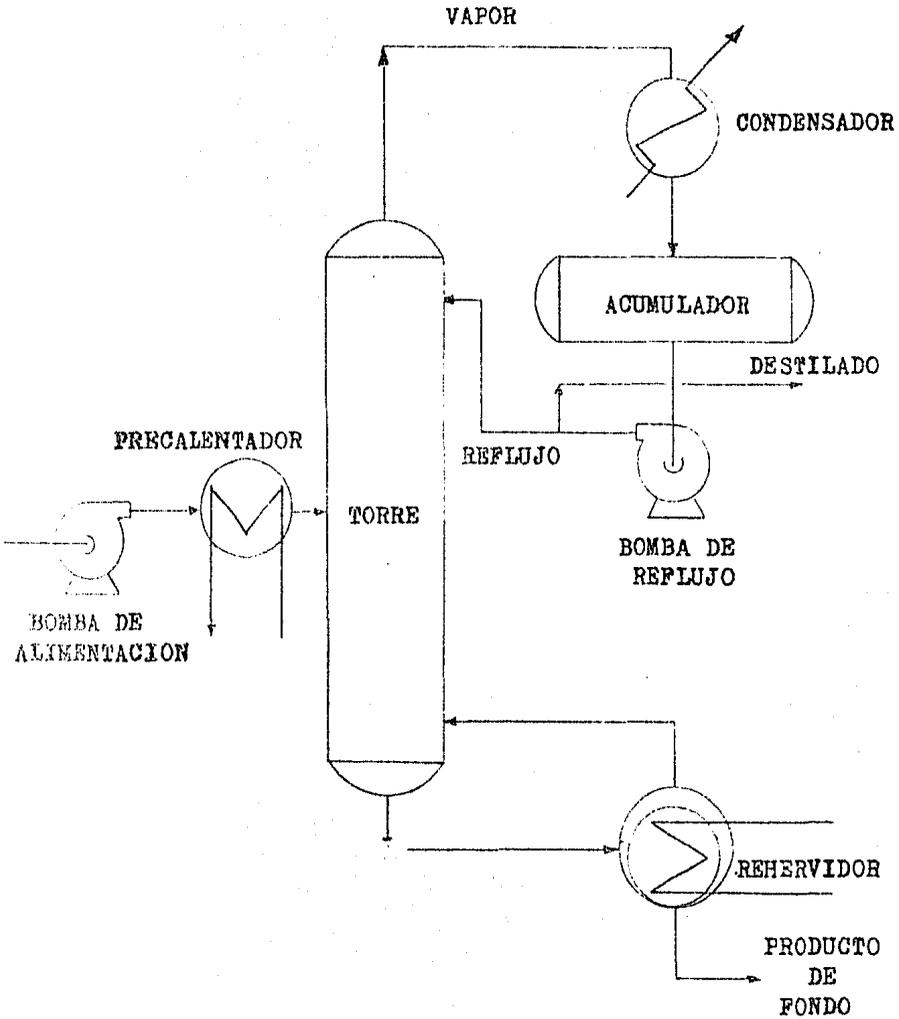


Fig. VIII.12 Torre de destilación

Se han establecido dos grandes filosofías para el control-avanzado de las columnas de destilación:

- Control del balance de energía o control indirecto del balance de material.
- Control del balance directo de material.

En el primer caso, una corriente de energía es ajustada para mantener controlada la calidad del producto. Este caso ha sido el sistema de control tradicional.

A continuación se presentan dos ejemplos en donde la temperatura es la variable a controlar para mantener la separación deseada. Si la temperatura es constante en el punto seleccionado de la torre de destilación, se mantiene la separación a pesar de las variaciones en el flujo y en la composición de la alimentación.

En la Fig. VIII.13 el control se logra de la siguiente manera:

- El controlador de temperatura ajusta el reflujo de la torre.
- La válvula de control de destilado es manipulada por el controlador de nivel del acumulador de la torre.
- El flujo de vapor al hervidor se mantiene constante por medio de un control de flujo
- La válvula de control de los productos del fondo es manipulada por el control de nivel de la columna
- El flujo de alimentación a la torre se mantiene constante por medio de un controlador de flujo.

La presión de la columna se mantiene constante por cualquiera de los métodos existentes. La selección del método específico depende de que se tenga o no presencia de incondensables en el destilado, del tipo de condensador utilizado y de su localización.

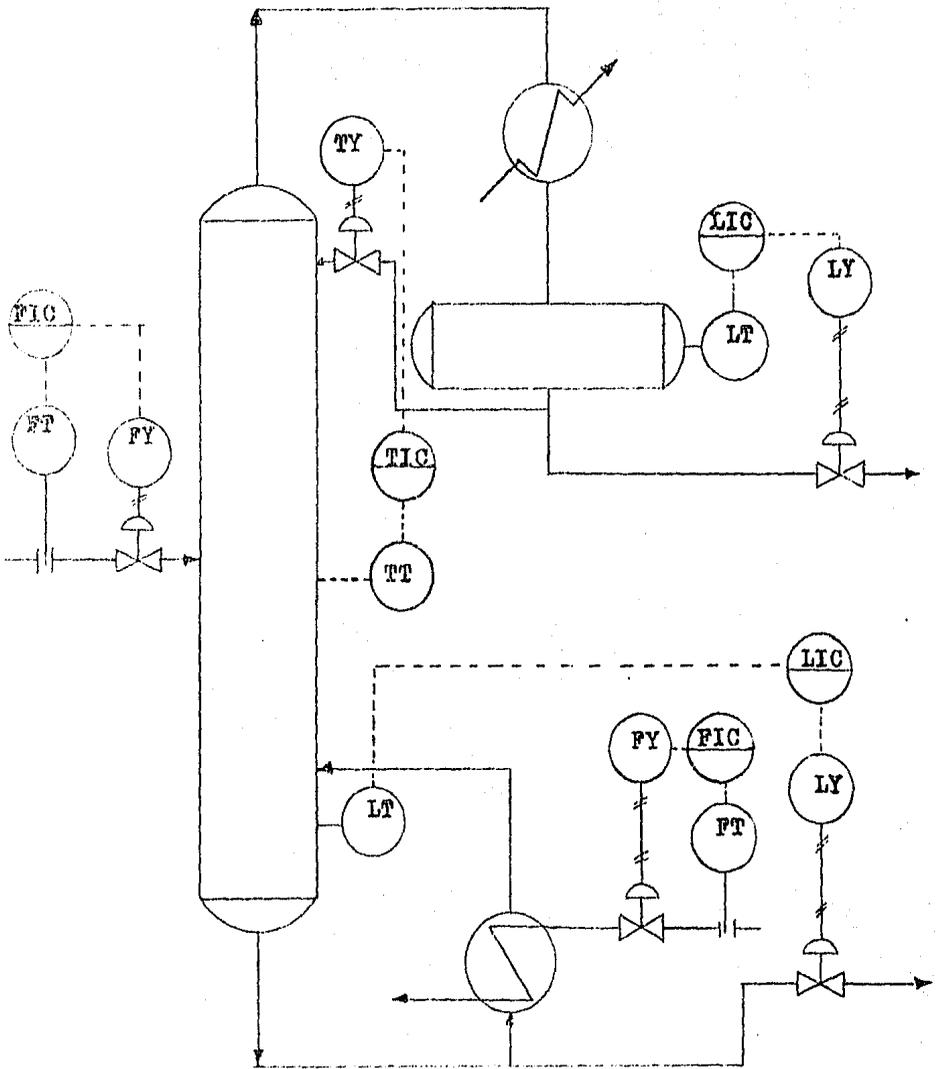


Fig. VIII.13 Control en una columna de destilación

Asimismo, dado que estos métodos son comunes para ambos esquemas (control de energía o de balance de materiales), al final del capítulo se describirá el control de presión. Por ahora se supone un arreglo como el que se muestra en la Fig. VIII.14.

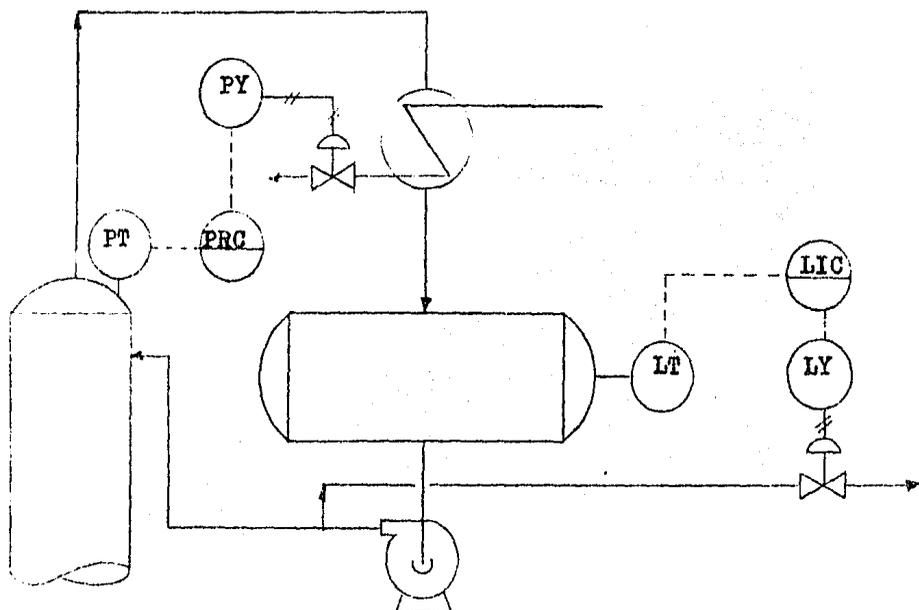


Fig. VIII.14 Control de presión en una columna de destilación

En otra forma de control (Fig. VIII.15):

- El controlador de temperatura y el flujo de vapor al hervidor se encuentran en cascada. El punto de ajuste del controlador de flujo es fijado en forma remota por la salida del controlador de temperatura.
- La válvula de control del destilado es manipulada por el control de nivel del condensador de la torre.
- El reflujo se mantiene por medio de un controlador de flujo.
- La válvula de control de los productos del fondo es manipulada por el control de nivel de la columna.
- La presión en la columna se mantiene constante.

--El flujo de alimentación a la torre se mantiene constante por medio de un control de flujo.

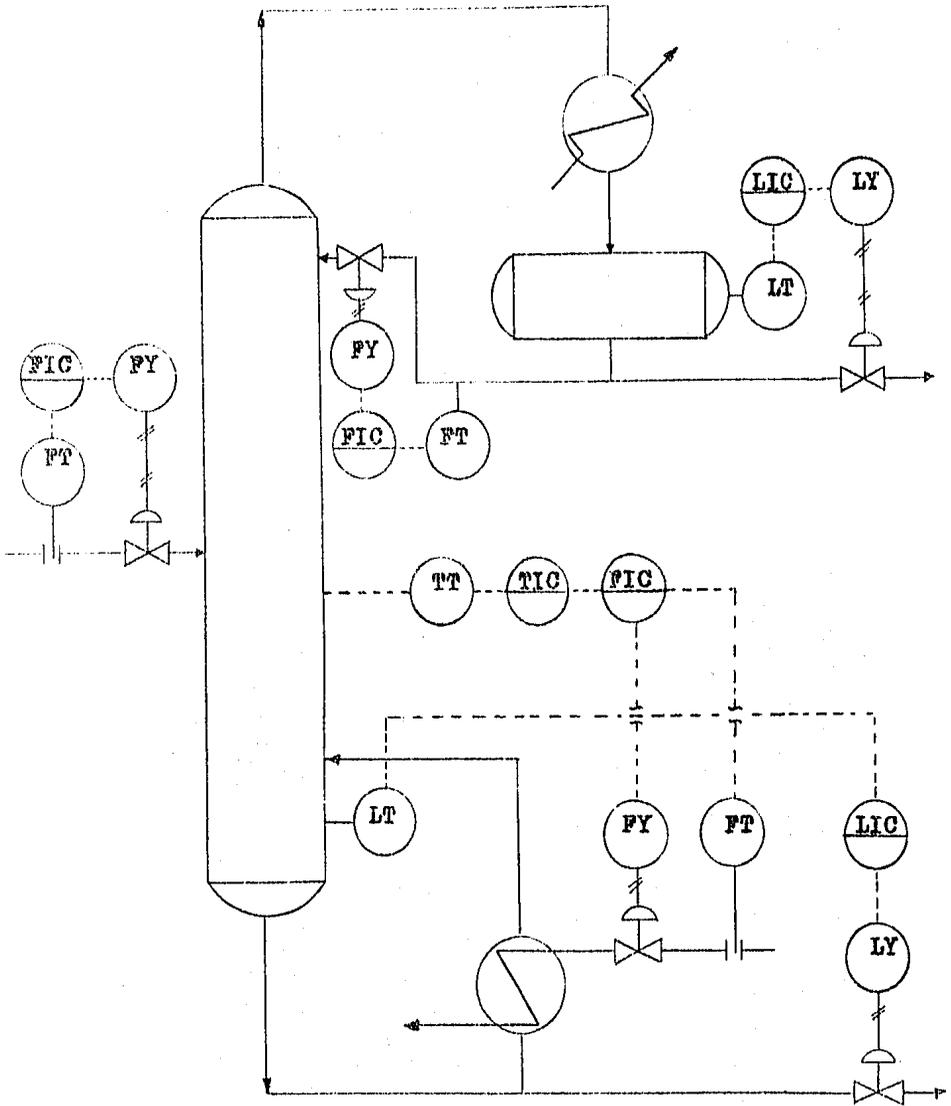


Fig. VIII.15 Formas de control en cascada en una columna de destilación

Control del balance directo de material. En este caso, se manipula el flujo de cualquier corriente de producto saliendo de la torre, para mantener controlada la calidad del producto; estas corrientes pueden ser: el destilado, el producto del fondo o alguna salida lateral.

En la Fig. VIII.16 se da un ejemplo de la aplicación del concepto de control directo del balance de material en el cual:

- El controlador de temperatura en la torre, manipula el flujo de destilado para mantener la composición deseada.
- El flujo de vapor al hervidor se mantiene constante por medio de un controlador de flujo.
- La válvula de control de los productos del fondo es manipulada por el control de nivel de la columna.
- El flujo de alimentación de la torre se mantiene constante por medio de un controlador de flujo.
- El reflujo se controla por medio del control de nivel del acumulador.
- La presión se mantiene constante.

Otro ejemplo típico es el mostrado en la Fig. VIII.17.

La observación del comportamiento de las columnas de destilación han llevado a conclusiones muy importantes que han determinado el uso del control directo del balance de material, como la filosofía de control más apropiada para lograr una estabilidad mejor de operación, manteniendo además, la separación deseada.

Para lograr una efectiva estabilización, se hace necesario combinar la filosofía de control adecuada con técnicas de control avanzadas; por ejemplo, control prealimentado. Sólo de esta manera, la columna estará en posibilidades de recibir estrategias de optimización que permitan obtener una mayor utilidad.

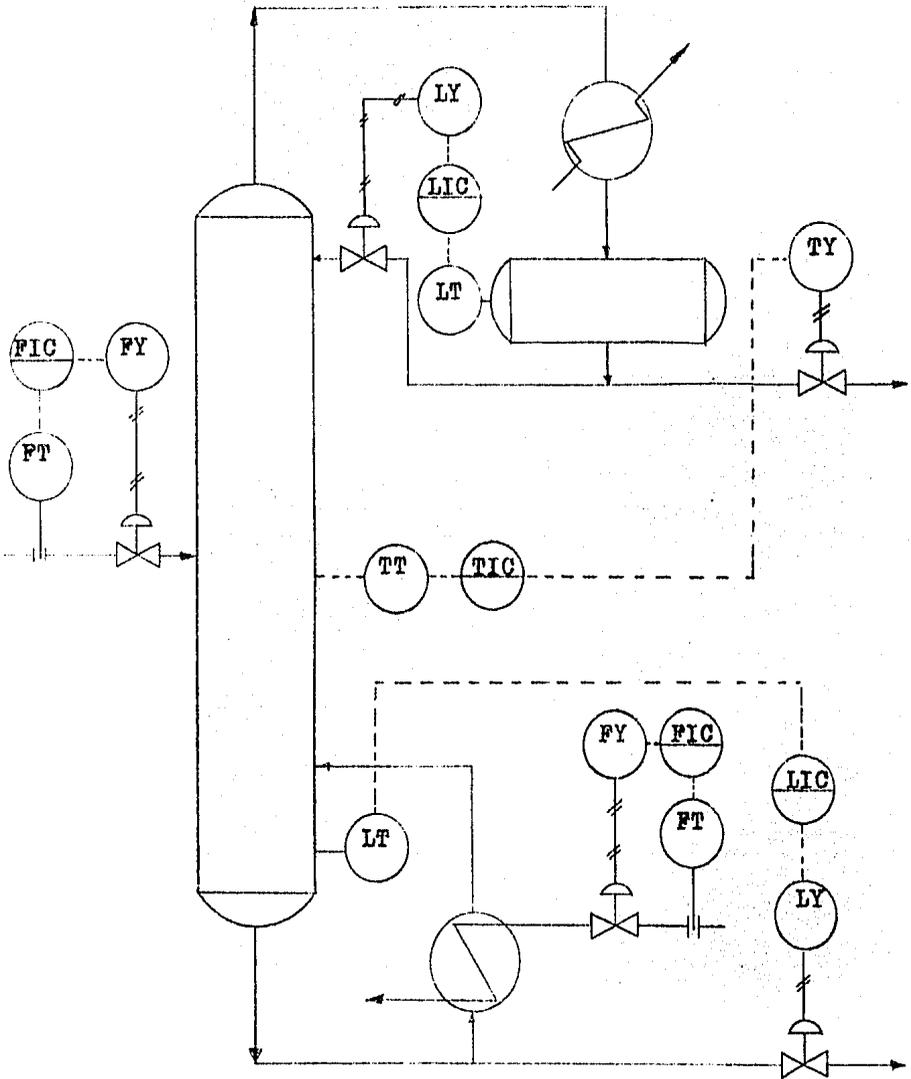


Fig. VIII.16 Control directo del balance de material en una torrs de destilación

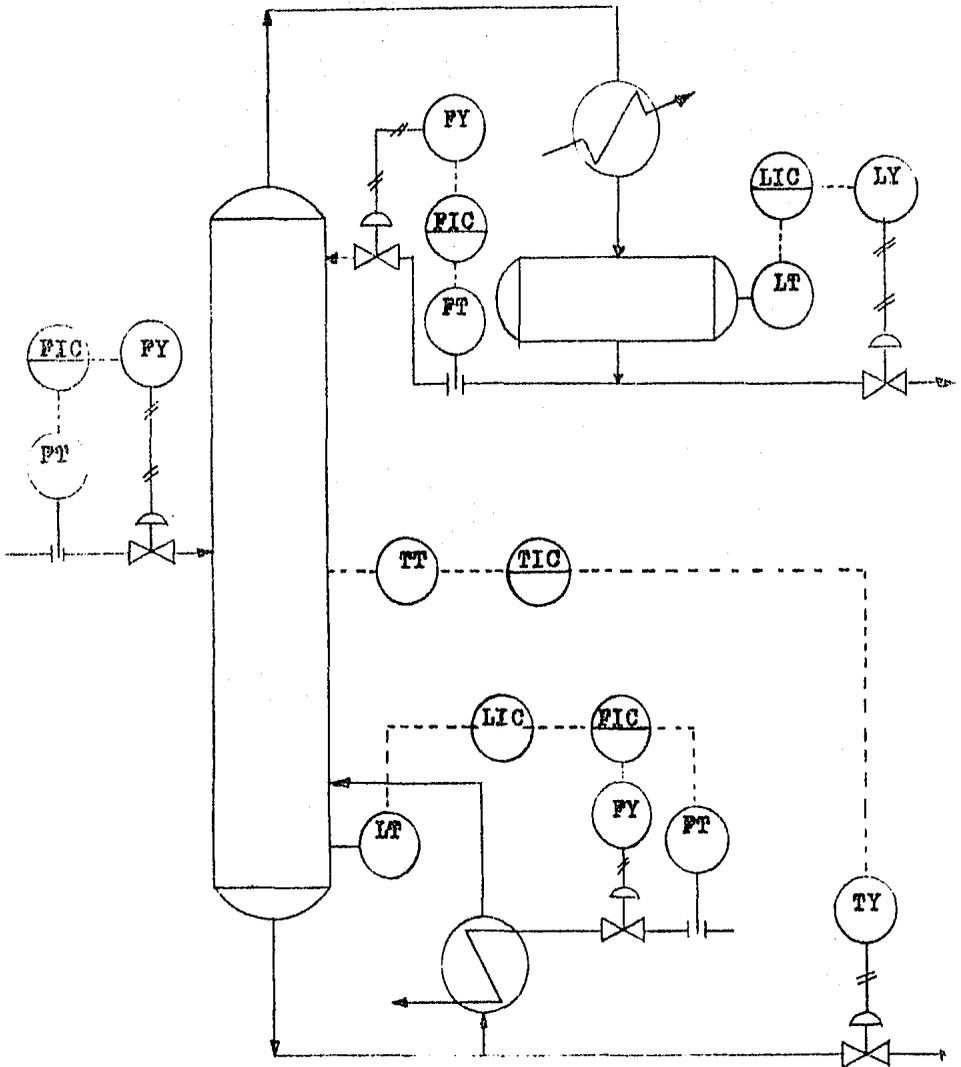


Fig. VIII.17 Control en cascada del balance directo de materia en una columna de destilación

Control de presión. El sistema de control de presión a seleccionar depende de la cantidad de incondensables que entren a la columna. Lo anterior origina tres casos de acuerdo a lo siguiente:

- Destilado líquido con presencia de incondensables
- Destilado vapor con presencia de incondensables
- Destilado líquido prácticamente sin incondensables

En el primer caso, el método más simple es el desfogar una cantidad fija de gases y vapores; cuando esto no es posible, una corriente de purga puede modularse sobre todo si la cantidad de inertes está sujeta a variaciones. Para este propósito puede utilizarse el esquema que se ilustra en la Fig. VIII.18, donde se muestra un sistema de control. La válvula sobre la línea de condensado abre al acumularse los inertes para permitir una mayor superficie de condensación, al mismo tiempo que abre la válvula de venteo.

En el segundo caso, el producto de domos es removido del sistema como destilado vapor por lo que puede utilizarse un control de presión para regular dicha salida, tal como se muestra en la Fig. VIII.19. Adicionalmente, se utiliza un controlador de nivel del tanque de reflujo que manipula el flujo del medio de enfriamiento. De esta manera se condensa sólo la cantidad necesaria de destilado para proveer el reflujo a la torre.

En el último de los casos, la presión se controla ajustando la velocidad de condensación en el condensador. El método para efectuar el control dependerá de la construcción mecánica del equipo de condensación.

Uno de los métodos consiste en colocar una válvula en el agua de enfriamiento (Fig. VIII.20). Cuando el condensador se encuentra instalado a un nivel inferior al tanque de reflujo, la válvula de control de presión se coloca en un by-pass que comunica la línea de vapores calientes con el acumulador, tal ---

como se muestra en la Fig. VIII.21.

Cuando la válvula abre, se iguala la presión entre la línea de vapores y el acumulador. Esto causa que los vapores fluyan preferentemente a través del by-pass, ya que el flujo a través del condensador presenta una mayor caída de presión, debido a que se encuentra por debajo del acumulador. Todo lo anterior trae como consecuencia que el condensador tienda a inundarse, disminuyendo la superficie de transferencia así como la velocidad de condensación. Con ello se logra que la presión de la torre se eleve.

Para asegurar un mejor control, ya que por lo general el condensador tiene un cierto sobrediseño, se puede añadir una válvula que estrangule la salida de condensado. Ambas válvulas, ésta y la de vapores calientes, actúan en rango dividido o gama partida (Fig. VIII.22).

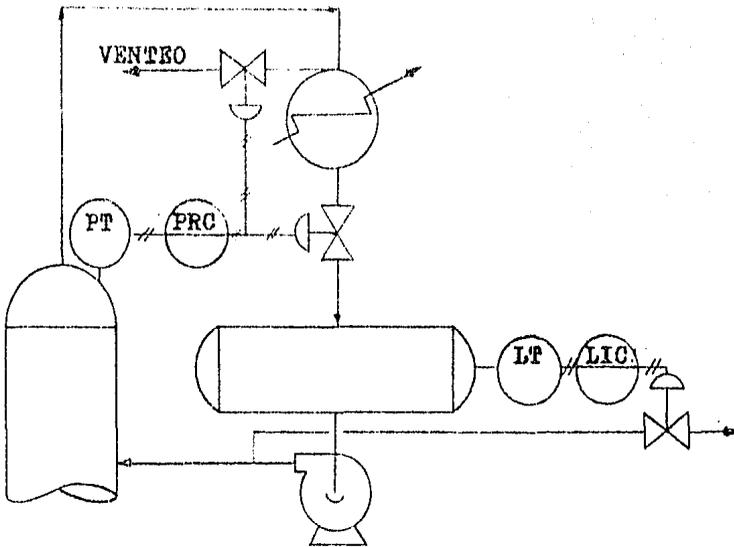


Fig. VIII.18 Control de presión cuando se tiene destilado líquido con presencia de incondensables

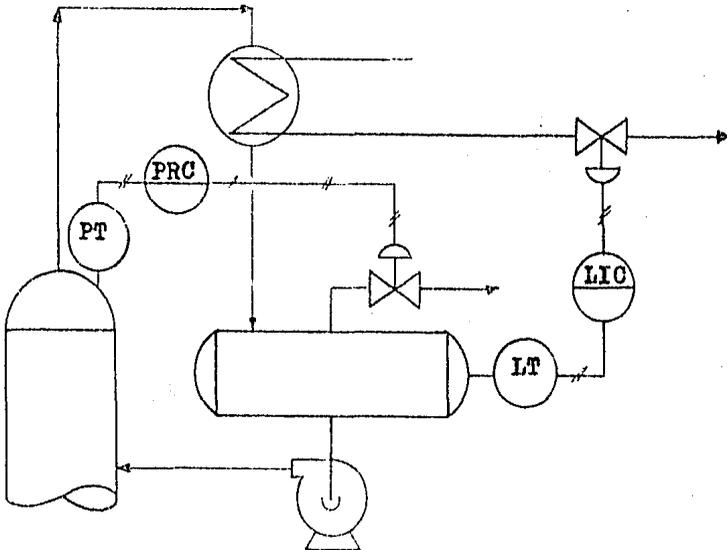


Fig. VIII.19 Control de presión cuando se tiene destilado vapor con presencia de incondensables

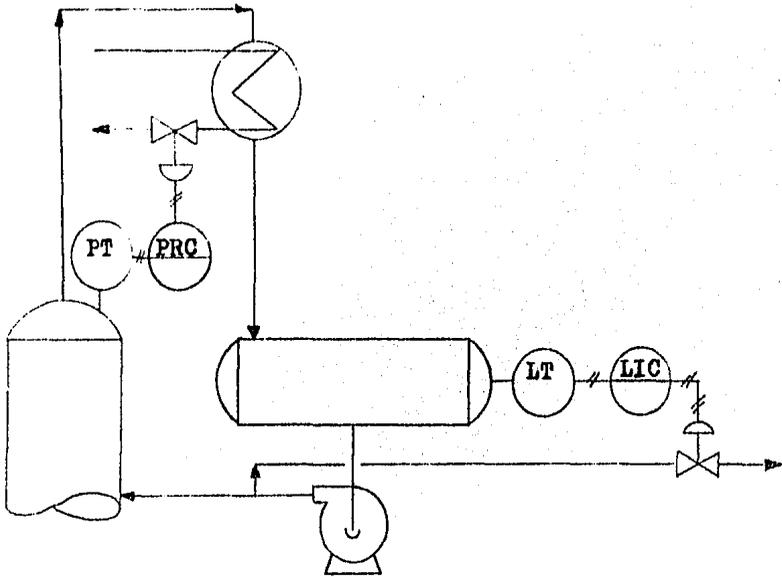


Fig. VIII.20 Control de presión cuando se tiene destilado líquido prácticamente sin incondensables

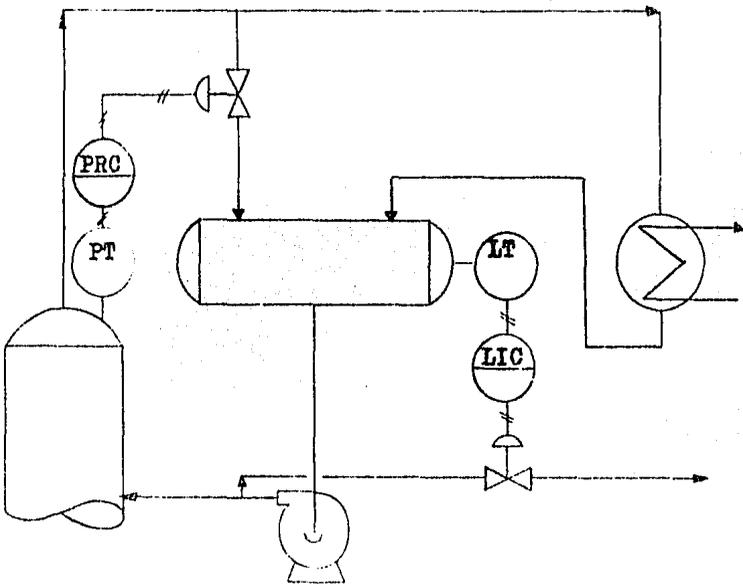


Fig. VIII.21 Control de presión cuando se tiene destilado líquido sin incondensables estando el condensador en un nivel inferior al tanque de reflujo

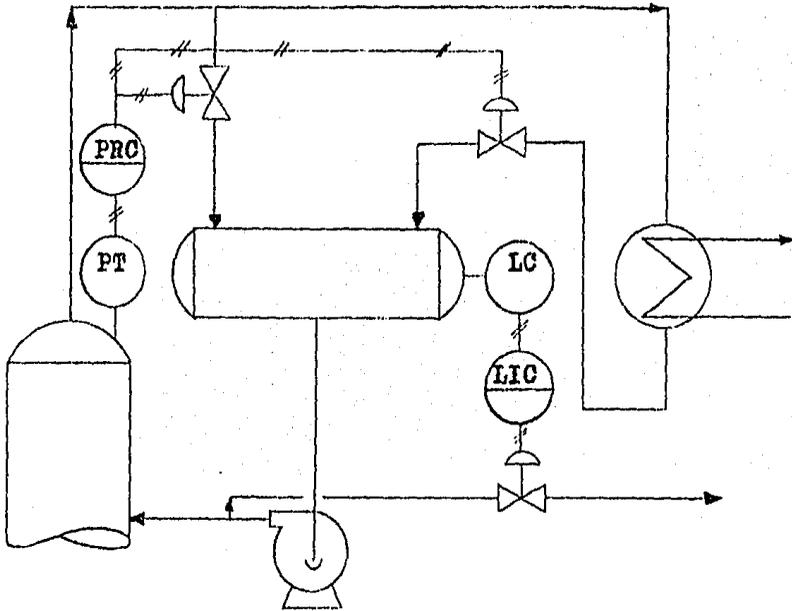


Fig. VIII.22 Control de presión en rango dividido cuando se tiene destilado líquido sin incondensables

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Process Instruments and Controls Handbook
Douglas M. Considine
McGraw-Hill Book Company
Copyright 1974, 1957 Second Edition

- 2.- Handbook of Instrumentation and Controls
Kallen Howard P.
McGraw-Hill Book Company
New York, 1961

- 3.- Instrumentación Industrial
Antonio Creus Sole
Publicaciones Marcombo, 2a. Edición
Barcelona, España 1979

- 4.- Instrumentation in Industry
Harold E. Soisson
John Wiley & Sons. Inc.
USA, 1975

- 5.- Instrument Engineers' Handbook Vol. II
Béla G. Lipták
First Edition, Chilton Book Company
Philadelphia, 1970

6.- Principles and Practice of Flow Meter Engineering

Spink L. K.

Ninth Edition, The Foxboro Company

USA, 1967

7.- Ingeniería de Control Automático (Tomo I y II)

José Nacif Narchi

Primera Edición, Compañía Editorial La Ilustración, S.A.

México, 1970

8.- Instrumentation Symbols and Identification

Standard ISA, S5.1

Instrument Society of America

Published 1968