



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

**“PRINCIPALES DISPOSITIVOS PARA LA MEDICION
Y CONTROL DE PRESION, TEMPERATURA, FLUJO
Y NIVEL DE PLANTAS INDUSTRIALES”.**

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a n

**DELIA BARBOSA GUERRERO
RICARDO GORDILLO ZEVEDUA**

MEXICO, D. F.

1 9 8 2



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

CAPITULO 1.- TEORIA DE MEDICION

1.1	VARIABLES DE MEDICIÓN	1
1.1.1	Clasificación por variables	1
1.1.2	Clasificación por señales de medición	2
1.2	Señales de medición por las variables	3
1.3	Unidades y escalas fundamentales	5
1.4	Identificación básica de instrumentos de medición	7
1.5	Simbología básica en instrumentación	8
1.6	Terminología básica	10
	BIBLIOGRAFIA	19

CAPITULO 11.- ELEMENTOS DE MEDICION DE FLUIDO.-

2.1	Tipos de presión	21
2.2	Sensores de presión	25
2.2.1	Bourdon Tipo C	24
2.2.2	Bourdon helicoidal y espiral	31
2.2.3	Fuelle	33
2.2.4	Diáfragma y cápsulas	36
2.2.5	Manómetros de columna líquida	39
2.2.6	Transductores de presión	43
2.3	Características de los sensores de presión positiva	56
2.4	Ventajas y limitaciones de los sensores de presión	57

BIBLIOGRAFIA

60

CAPITULO III.- ELEMENTOS DE MEDICION DE TEMPERATURA

3.1	Termómetros industriales	61
3.1.1	Termómetros industriales de vidrio	61
3.1.2	Termómetros bimetalicos	67
3.2	Fundas para termómetros industriales	68
3.3	Sistemas termales llenos	69
3.3.1	Sistema termal Clase I	71
3.3.2	Sistema termal Clase II	74
3.3.3	Sistema termal Clase III	78
3.3.4	Sistema termal Clase V	81
3.3.5	Bulbos selección e instalación	81
3.3.6	Tabla comparativa de sistemas termales llenos	84
3.4	Termopares	85
3.4.1	Tipos de termopares	89
3.4.2	Dispositivos para medición de FEM producida por termopares	90
3.4.3	Elementos de un termopar	95
3.5	Pirómetros por radiación	101
3.6	Pirómetros ópticos	106
3.7	Termistores	109
3.8	Termómetros de resistencia	114
3.9	Características de los dispositivos para medición de temperatura	121

3.10	Ventajas y limitaciones de los diferentes sensores de temperatura	122
------	---	-----

	BIBLIOGRAFIA	125
--	--------------	-----

CAPITULO IV.- MEDICION DE FLUJO

4.1	Clasificación de los medidores inferenciales	126
4.2	Medidores de presión diferencial	127
4.2.1	Principio	127
4.2.2	Ecuación teórica para flujos líquidos (incompresibles)	128
4.2.3	Ecuación teórica para flujos compresibles	131
4.2.4	Placa de orificio	134
4.2.5	Tobera	135
4.2.6	Venturi	143
4.2.7	Mecanismos secundarios	146
	Tabla de referencia, mecanismos secundarios 4.1	149
4.3	Rotámetro	151
4.3.1	Ecuación de comportamiento del rotámetro	155
4.4	Medidores de flujo magnético	158
4.5	Medidores de flujo tipo turbina	161
4.6	Medidor tipo disco	165
4.7	Medidores directos	167
4.7.1	Medidor de ruedas ovaladas	170
4.7.2	Medidor de disco oscilante	170
4.7.3	Medidores rotativos	171
4.7.4	Medidor de pistón oscilante	173
4.7.5	Medidor de lóbulos	173

Tabla de referencia 4.2	175
Tabla de referencia 4.3, presión diferencial	176
Tabla de referencia 4.4, rotámetro	178
Tabla de referencia 4.5, turbina	179
Tabla de referencia 4.6, medidor magnético	180
Tabla de referencia 4.7, tipo disco	181
Tabla de referencia 4.8, desplazamiento positivo	182
Tabla de referencia 4.9, medidor de flujo másico	183
BIBLIOGRAFIA	184

CAPITULO V.- MEDICION DE NIVEL.-

5.1	Usos de los medidores de nivel	185
5.2	Observaciones generales	186
5.3	Clasificación de los medidores de nivel	187
5.4	Medidores visuales	188
5.5	Medidor de nivel tipo flotador	189
5.5,1	Medidor de flotador y cable	190
5.5,2	Control de nivel	191
5.6	Medidor de nivel tipo desplazador	192
5.6,1	Controlador de nivel proporcional	193

5.7	Medidores que utilizan la presión hidrostática como principio de operación	196
5.7.1	Manómetros	196
5.7.2	Medidores de diafragma	198
5.7.3	Celda de presión diferencial	199
5.7.4	Medidor de nivel tipo burbujeo	201

5.8	Medición de nivel por capacitancia	205
-----	------------------------------------	-----

	BIBLIOGRAFIA	208
--	--------------	-----

CAPITULO VI.- MODOS DE CONTROL.-

6.1	Características del proceso	209
6.2	Control proporcional	214
6.3	Control integral	218
6.4	Control proporcional + integral	220
6.5	Control derivativo (Rate)	222
6.6	Control proporcional + integral + derivativo	224
6.7	Gua para selección de controladores	227

	BIBLIOGRAFIA	229
--	--------------	-----

CAPITULO VII.- VALVULAS DE CONTROL.-

7.1	Generalidades	230
7.2	Principales tipos de válvulas	232
7.3	Cuerpo de la válvula	236

7.4	Partes internas de la válvula	237
7.5	Caracterización	239
7.5.1	Características de caudal efectivo	244
7.5.2	Rangeabilidad	247
7.6	Actuadores	248
7.6.1	Actuadores neumáticos	248
7.6.2	Actuadores eléctricos	255
7.6.3	Actuadores hidráulicos	257
7.7	Posicionadores	257
7.8	Dimensionamiento	261
7.9	Cavitación y Flasheo	262
	BIBLIOGRAFIA	268

C A P I T U L O I

CAPITULO I

TEORIA DE MEDICION

- 1.1 Variables de Medición
 - 1.1.1 Clasificación por variables
 - 1.1.2 Clasificación por señales de medición
- 1.2 Señales de medición para las variables
- 1.3 Unidades y escalas fundamentales
- 1.4 Identificación básica de instrumentos de medición
- 1.5 Simbología básica en instrumentación
- 1.6 Terminología básica.

CAPITULO 1

TEORIA DE MEDICION

La medición tiene una gran importancia en cualquier proceso de producción ya que nos da a conocer el valor que tiene en un momento dado una variable. Esto nos servirá para tomar decisiones relacionadas con el buen desarrollo de un proceso; esto implica que si la variable se sale del rango deseado, es necesario efectuar acciones de control que logren restaurar las condiciones normales de operación. La medición puede estar sujeta a errores que deben minimizarse según sea la aplicación, puesto que dependiendo de la calidad de la medición, el sistema que controlará la variable lo podrá hacer con mayor o menor exactitud.

1.1 VARIABLE DE MEDICION. -

Las variables de medición pueden clasificarse en dos formas básicas. La primera, está de acuerdo con el caracter de la variable misma. La segunda, se basa en los tipos de señal de medición.

1.1.1 Clasificación por Variables. -

En general se pueden mencionar las siguientes:

- a) Térmicas
- b) De Radiación
- c) De Fuerza
- d) De Velocidad
- e) De Cantidad
- f) De Tiempo
- g) De Variables Geométricas
- h) De Propiedades Físicas
- i) De Composición Química

j) Eléctricas.

Para nuestros propósitos, haremos hincapié en las siguientes variables:

- a) Térmicas: De la que detallaremos la TEMPERATURA
- b) Fuerza: De la que detallaremos la PRESION
- c) Velocidad: De la cual hablaremos del FLUJO de gases y líquidos a través de una sección
- d) Geométricas: Hablando específicamente de NIVEL.

1.1.2 Clasificación por Señales de Medición.-

- a) Movimiento: En el cual las manifestaciones del valor de la variable medida se basa en alguna forma de movimiento, ya sea; movimiento mecánico, desplazamiento de líquido o un movimiento de una luz o haz de electrones.
- b) Fuerza: Tipo de señal utilizada en la conversión, transmisión y utilización de las mediciones ya sea en forma de fuerza mecánica total o de presión.
- c) Eléctricas: Se dispone de transductores para transformar prácticamente todas las variables a señales de medición eléctricas. Muchas de las variables, particularmente las variables de radiación, las de composición química y por supuesto, las variables eléctricas, producen por medio de algún dispositivo una señal de medición eléctrica.
- d) Señales de Medición de Tiempo Moduladas: Para la transmisión de mediciones, particularmente a grandes distancias, se utiliza cierto número de señales de tiempo modulado del tipo "abierto cerrado". En este tipo entran las señales con duración de un pulso; generalmente operan con la duración de un ciclo constante que varía entre 1 y 15 segundos en el cual la relación abierto-cerrado en cada ci-

clo representa el valor de la variable. Estas señales también se utilizan para integración sin importar la distancia de transmisión.

A este tipo de señales también pertenecen las señales de Frecuencia que se utilizan para transmisión de mediciones y las señales de modulación de pulsos clave que se utilizan cuando la señal de medición es simplemente la cuenta del número de pulsos dentro de cierto intervalo de tiempo. Generalmente no se utiliza para transmisión.

1.2 SEÑALES DE MEDICION PARA LAS VARIABLES.

Las señales de medición están tan íntimamente relacionados con los sistemas de medición, que prácticamente son inseparables. Al considerar las señales y los sistemas de medición, tres son los factores de mayor importancia.

- 1) Los tipos y las características de los transductores de que se dispone para transformar las variables a las señales de medición.
- 2) Las características de transmisión de las señales de medición.
- 3) Los dispositivos de salida sensibles a las señales de medición para producir las indicaciones, los registros, las entradas de control, etc.

La siguiente tabla incluye a modo de lista las variables y las señales de medición. En la tabla, la X indica que se dispone en el comercio de transductores específicos para la conversión de la variable a la señal, - la 0 indica que la variable ya se encuentra en la forma de la señal de medición. En esta tabla solamente se incluyen conversiones directas.

VARIABLE	SEÑAL DE MEDICION									
	Movimiento Mecánico	Desplazamiento Líquido	Movimiento Luz o Haz Eléctrico	Fuerza Total	Presión	Voltaje o Corriente	Relación V/I	Duración de Pulso	Frecuencia	Pulso Clave
1 Temperatura	X	X		X	X	X	X		X	
2 Radiación Nuclear						X	X			X
3 Radiación Electromagnética	X					X	X			
4 Fuerza Total	X	X	X	O	X	X	X			
5 Momento	X	X	X	X		X	X			
6 Presión ó Vacío	X	X	X	X	O	X	X			
7 Flujo	X			X	X	X	X		X	
8 Velocidad	X			X	X	X	X		X	
9 Peso	X			X	X		X			
10 Tiempo Transcurrido	X					X	X			X
11 Nivel	X	X		X	X		X		X	
12 Corriente Eléctrica	X		X	X		O	X	X	X	X
13 Resistencia Eléctrica						X	X	X	X	
14 Voltaje						O	X	X	X	X
15 Composición Química	Estas variables incluyen un grupo tan variado y amplio que no existe una base útil para su medición.									

1.3 UNIDADES Y ESCALAS FUNDAMENTALES.

En esta sección se tratarán las unidades y escalas que posteriormente serán utilizadas para la medición de las diferentes variables. Es importante hacer notar que todas las unidades que serán utilizadas están estandarizadas. Esto es, existe un patrón que tiene dos características principales; es accesible e invariable.

- a) Presión. La presión se define como una fuerza por unidad de área, esto es: $P = F/A$.

Las unidades de fuerza más comunes son: Para el sistema gravitacional métrico: Gramo y Kilogramo.

Para el sistema gravitacional inglés: Libra y Onza. Las unidades de área son normalmente: cm^2 ó in^2 dependiendo del sistema en el que se trabaje. Así nuestras unidades de presión quedarán expresadas como: Kg/cm^2 , $\text{lb}/\text{in}^2 = \text{PSI}$, etc.

Frecuentemente la presión se expresa en términos de la altura de un líquido o sea en unidades de carga líquida. Generalmente se utilizan el mercurio o el agua, aunque es posible obtener en el mercado líquidos con gravedades específicas entre 0.5 y 3.0. De este modo nuestras unidades de presión quedarán expresadas como: mm de Hg, in de H_2O , etc. Es importante hacer notar que para mediciones rigurosas, debido al cambio de densidad de los fluidos con la temperatura, es necesario establecer un estándar de temperatura que será la que corresponda a la máxima densidad del líquido. Para el agua tendremos 3.9°C y para el mercurio 0°C .

Las unidades de presión para los diferentes sistemas pueden relacionarse mediante la siguiente tabla:

	Kg/cm ²	lb/in ²	Atmosfera	cm H ₂ O	mm Hg
Kg/cm ²	1.00000	14.2233	0.96757	1000.0	735.6
lb/in ²	0.07031	1.00000	0.06802	70.306	51.72
Atmosfera	1.03351	14.7000	1.00000	1033.5	760.0
cm H ₂ O	0.00100	0.01422	0.9678X10 ⁻³	1.0000	0.7355
mm Hg	0.00136	0.01933	0.001315	1.3596	1.0000

- b) Temperatura: Las escalas de temperatura que con mayor frecuencia se utilizan en instrumentación son la Celsius y la Fahrenheit. Dichas escalas se obtienen mediante la selección de puntos fijos y dividiendo los intervalos de temperatura en un número conveniente de grados.

Las escalas de temperatura quedan relacionadas de la siguiente forma:

$$t_F = 9/5 t_C + 32.$$

$$t_C = 5/9 (t_F - 32.)$$

- c) Flujo: El flujo se define, para fines de mediciones industriales, como una cierta cantidad de materia por unidad de tiempo. Esta materia podrá estar expresada como un volumen o como una masa, esto es:

$$F = V/T \text{ ó } F = M/T$$

Donde el volumen podrá tener unidades de: m³, litros, galones ft³, etc. La masa generalmente estará dada en Kg_m ó lb_m, la unidad de tiempo se escogerá de la forma que mas convenga a nuestros propósitos, esto es, podrá ser: seg, min, hora, etc. Quedando así las unidades de flujo como: lts/min, ft³/seg, etc.

- d) Nivel. - El nivel estará, en la mayoría de los casos, expresado en unidades de longitud. Es común que algunos indicadores de nivel esten graduados en unidades de masa, esto se logra multiplicando el nivel por la densidad del contenido y por el área transversal del recipiente que lo contiene.

1.4 IDENTIFICACION BASICA DE INSTRUMENTOS DE MEDICION.

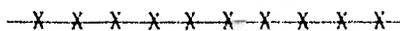
Las reglas básicas para identificar un instrumento de medición según la ISA son:

- 1.- Todas las letras para identificar un instrumento deben ser mayúsculas con las excepciones del uso opcional de "d", "r" y "p" - cuando éstas se usen en combinaciones. Por ejemplo: pll.
- 2.- El número máximo de letras de identificación es tres con excepción de letras combinadas. Por ejemplo CO₂ que se toma como una.
- 3.- La primera letra en una identificación debe tener solamente una definición ó significado y éste es, la definición de la variable de proceso. Por ejemplo: P (presión), T (temperatura), f (flujo), l (nivel), W (peso), etc.
- 4.- La segunda y tercera letras también deben tener un solo significado y sirven para identificar el tipo de unidad con el que estamos haciendo la medición. Por ejemplo: P1 (indicador de presión), TR (registrador de temperatura), FIC (indicador controlador de flujo), LRC (registrador - controlador de nivel), etc.
- 5.- Después vendrá la identificación del usuario que será libre.

Por ejemplo: dPT-007 (que podría significar; transmisor de presión diferencial número siete), FR-A09 (que podría tratarse del registrador de flujo número 9, instalado en el área A), etc.

1.5 SIMBOLOGIA BASICA EN INSTRUMENTACION.-

La simbología que describiremos a continuación esta basada en las normas de la ISA. Es importante conocerla para poder identificar los instrumentos, sus líneas y su localización en un plano. Los símbolos principales son:



Tubo capilar lleno de líquido para instrumento de temperatura ó con sello químico.



Tubería de conexión entre instrumentos. (Línea hidráulica o eléctrica).



Línea de aire para instrumentos.



Cable de conexión entre instrumentos, Eléctrico.



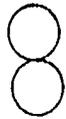
Símbolo básico de un instrumento de una sola función y un solo servicio montado en tablero.



Símbolo básico de un instrumento de una sola función y un solo servicio montado en campo.



Símbolo básico de un instrumento con más de una función montado en tablero. Por ejemplo, un registrador con dos plumas que indique P y F.



Símbolo básico de un instrumento con más de una función montado en campo.



Símbolo básico de un transmisor montado en campo.



Símbolo básico de un transmisor montado en tablero.



Válvula actuada por un motor de diafragma.



Válvula actuada eléctricamente.



Válvula actuada con pistón (hidráulico o neumático).



Cuerpo de válvula de tres vías.



Válvula de relevo ó de seguridad.



Válvula manual.



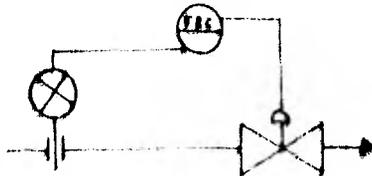
Válvula auto-operada.



Elemento de flujo, sin instrumento.



Controlador neumático enviando señal a válvula neumática.



Anillo esquemático de un control de flujo.

1.6 TERMINOLOGIA BASICA.-

En esta sección trataremos de explicar brevemente el significado de los términos que con mayor frecuencia se utilizan en instrumentación, para que de esta forma podamos comprender, en algunos casos, las características de un instrumento o de algún sistema de medición.

Acción de Control.- La naturaleza del cambio de la salida afectada por la entrada de un controlador, ó un sistema de control.

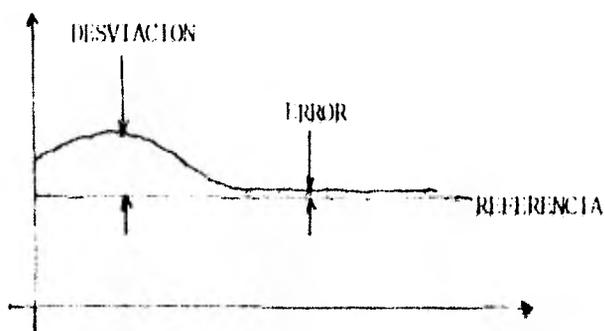
Acción de Control en Cascada.- Es la acción de control en la cual la salida de un controlador es el SETPOINT de otro controlador.

Amortiguamiento.- Es la progresiva reducción o supresión de la oscilación de un sistema.

Banda Muerta.- Es el RANGO continuo en el cual una entrada puede variar sin indicar respuesta.

Nota: La banda muerta es usualmente expresada en % de amplitud.

Desviación y Offset.- La desviación es la diferencia que existe entre la variable controlada y el SETPOINT en cualquier momento, Offset es la diferencia que existe entre el valor de la variable controlada y el SETPOINT cuando se ha llegado al PUNTO ESTABLE de control. (desviación estable).



Error.- Es la diferencia algebraica entre la indicación y el verdadero valor de la señal medida. Un error positivo denota que el valor indicado del instrumento es mayor que el valor real. Esto es, el error es igual a: La indicación menos el valor real. Un error negativo denotará lo contrario.

Error de Cero.- Es el error de un dispositivo operando bajo condiciones específicas de servicio, cuando la entrada está en el mínimo valor del rango.

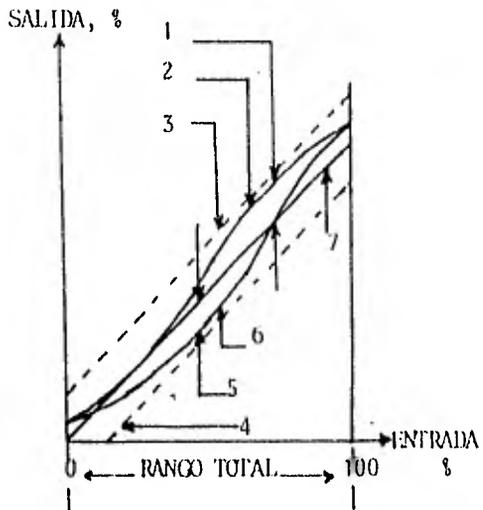
Error de Amplitud (SPAN). Es la diferencia entre el SPAN real y el SPAN especificado.

Exactitud.- Es un número o cantidad que define el límite de error bajo ciertas condiciones de operación. La exactitud incluye los errores de HISTERESIS Y REPETIBILIDAD.

Nota: Las unidades al ser usadas se expresan explícitamente.

Generalmente va precedido de un signo + ó - aún cuando no esté escrito. Las formas típicas de expresarlos son:

- 1) Exactitud Expresada en términos de la variable medida. Por ejemplo $\pm 1^\circ \text{ F}$.
- 2) La exactitud expresada en % del SPAN. Por ejemplo $\pm 1\%$ del SPAN.
- 3) Exactitud expresada en porciento de la lectura actual de salida. Por ejemplo: La exactitud es $\pm 1\%$ de la actual lectura de salida.



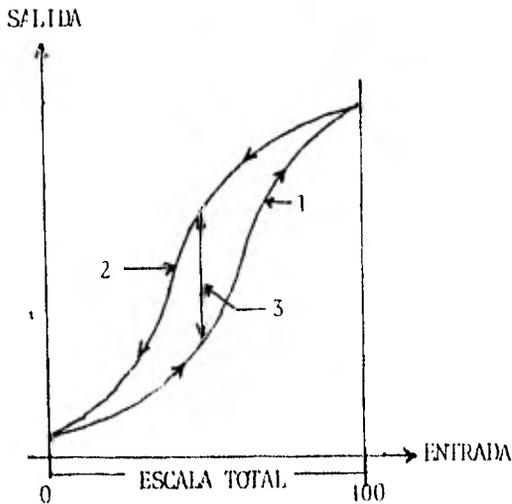
- 1.- Máxima desviación positiva.
- 2.- Característica actual descendente.
- 3.- Límite de error positivo.
- 4.- Límite de error negativo.
- 5.- Máxima desviación negativa.
- 6.- Característica actual ascendente.
- 7.- Característica funcional específica.

Ganancia Estática.- Es el valor de la ganancia aproximada como un límite cuando la frecuencia se aproxima a cero.

Ganancia Dinámica.- Es la razón de magnitud de la amplitud del estado estable de la señal de salida de un elemento o sistema a la amplitud de la señal de entrada de ese elemento o sistema, para una señal de entrada senoidal.

Nota: Puede ser expresado como una razón, o en decibeles como 20 veces el logaritmo de la razón para una frecuencia especificada.

Histéresis.- Es la máxima diferencia punto a punto para la misma entrada entre los valores de salida de la escala ascendente y la escala descendente durante el recorrido completo del rango en cualquier dirección.



- 1.- Características de escala ascendente.
- 2.- Características de escala descendente.
- 3.- Histéresis máxima (Máx. diferencia).

Impedancia.- Es la relación de la transformada de voltaje a la transformada de corriente.

Interferencia.- Es cualquier voltaje o corriente falsos surgidos de un origen externo y actuando en los circuitos del dispositivo.

Interferencia Modo Normal.- Es la forma de interferencia que aparece entre las terminales del circuito de medición.

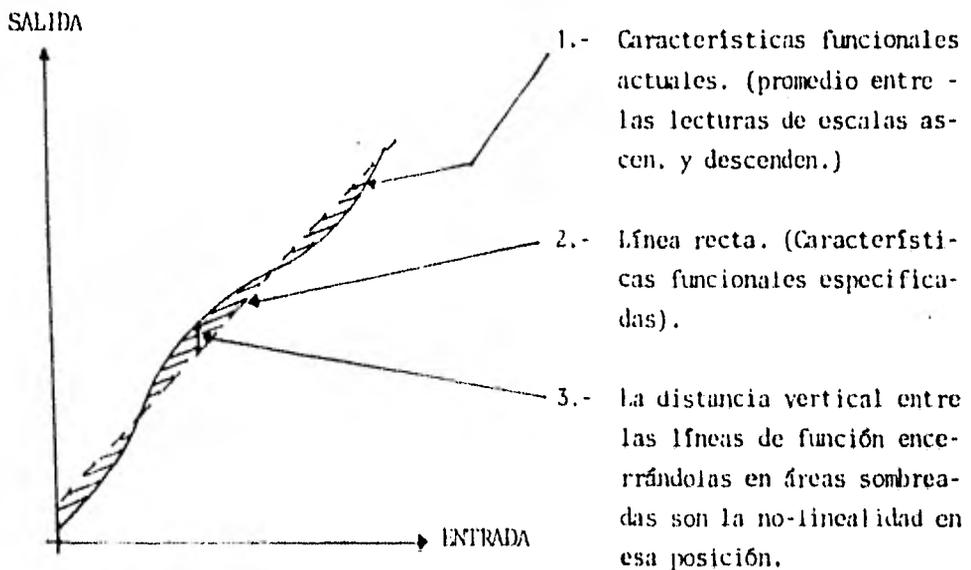
Nota: La interferencia de modo normal recibe también los siguientes nombres: Modo Diferencial ó Interferencia Transversal.

Interferencia Modo Común.- Es la forma de interferencia que aparece entre las terminales del circuito de medición y tierra.

Nota: A este tipo de interferencia se le denomina también: Interferencia Longitudinal.

Linealidad.- Es la conformidad con la cual una curva se aproxima a una línea recta.

Nota: Es usualmente medida como no-linealidad y expresada como linealidad, esto es, la máxima desviación entre la curva promedio y la línea recta. La curva promedio se determina haciendo varias mediciones a través del rango completo en ambas direcciones. El valor de la linealidad se refiere a la salida si otra cosa no se establece.

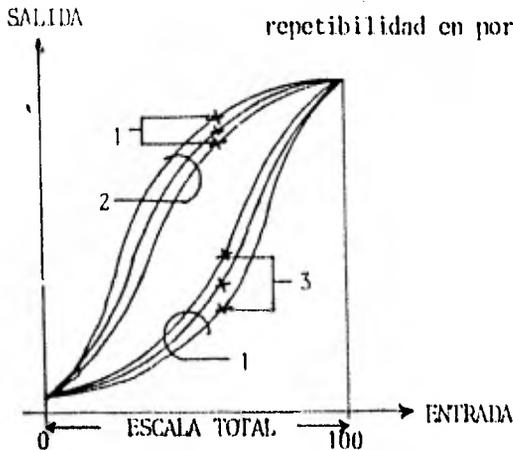


Precisión. - Es la habilidad para reproducir ciertas lecturas con una exactitud dada.

Nota: la exactitud se puede mejorar por medio de la calibración pero no más allá de la precisión del instrumento.

Repetibilidad. - Expresa la fidelidad de concordancia de la salida, entre un número de mediciones consecutivas, para una misma señal de medición, bajo las mismas condiciones de operación y tomadas en la misma dirección de recorrido del rango, es decir, la repetibilidad no se afecta por la histéresis.

Nota: Es normalmente medida como no-repetibilidad y expresada como repetibilidad en porcentaje del SPAN.



1.- Máxima no-repetibilidad.

2.- Características de escala descendente.

3.- Características de escala ascendente.

Rango.- Es la región entre los límites dentro de los cuales una cantidad es medida, recibida o transmitida, expresada por establecimiento del valor más bajo y el más alto del rango. Si no se establece otra cosa el valor del rango de entrada es sobreentendido.

Se dice que el rango tiene "cero elevado" cuando el valor del cero de la variable medida es mayor que el menor valor del rango.

Se dice que el rango tiene "supresión de cero", cuando el valor del cero de la variable medida es menor que el menor valor del rango. En este caso el cero no aparece en la escala.

SPAN (amplitud). Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del rango.

Para aclarar los conceptos anteriores mostraremos la siguiente tabla.

RANGOS TÍPICOS

NOMBRE	RANGO	RANCO	RANGO SUPERIOR	SPAN	RANGOS TÍPICOS	
Ninguno	0 - 100	0	+100	100	0	+100
Sup. de 0	20 - 100	20	+100	80	20	+100
0 Elevado	-25 - 100	-25	+100	125	-25	+100
0 Elevado	-100 - 0	-100	0	100	-100	0
0 Elevado	-100 - -20	-100	-20	80	-100	-20

Reproducibilidad.- Es la fidelidad de concordancia de la salida, para el mismo valor de entrada para mediciones repetidas, hechas estas bajo las mismas condiciones de operación en un periodo de tiempo. Esta mediciones serán en cualquier dirección del rango.

Nota 1: Usualmente se mide como no-reproducibilidad y expresada como reproducibilidad en porciento del SPAN para un periodo específico de tiempo. Normalmente esto implica - un largo periodo de tiempo, pero bajo ciertas condiciones, el periodo puede acortarse e ignorar el DRIFT.

Nota 2: La reproducibilidad incluye histéresis, drift y repetibilidad.

Drift.- Es un cambio en la relación entrada-salida sobre un periodo de tiempo.

Resolución.- Es el grado al cual valores iguales de una cantidad pueden ser discriminados por el dispositivo.

Set-Point.- Es el valor prefijado donde se desea que se mantenga la variable medida, (punto de control).

Ruido.- Es un componente indeseable de una señal o variable la cual obscurece el contenido de la información.

Nota: Puede expresarse en unidades de salida o en unidades de por ciento de SPAN de salida.

Sobre-Rango.- De un sistema o elemento, es cualquier exceso de valor de la señal de entrada sobre su valor de rango superior ó bajo su valor de rango inferior.

Señal.- Es cualquier información, acerca de una variable, que puede ser transmitida.

Señal de Relación de Ruido.- Es la relación de la amplitud de la señal, a la amplitud del ruido.

Tiempo Muerto.- Es el intervalo de tiempo entre la iniciación de un cambio ó estímulo en la entrada y el inicio de la respuesta resultante.

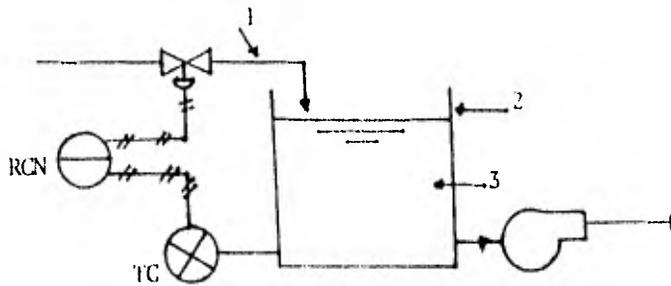
Sensibilidad.- Es la razón de un cambio en la magnitud de la salida al cambio de entrada que la causa, después de haber alcanzado el estado estable.

Nota 1: Se expresa como una razón con las unidades de medición de las dos cantidades establecidas. (La razón es constante para el rango de un dispositivo lineal, para un dispositivo no lineal el nivel de entrada aplicable deberá ser establecido).

Nota 2: La sensibilidad frecuentemente ha sido utilizada para denotar la banda muerta. Como sea, esto está mal hecho ya que no está de acuerdo con la defición aceptada.

Variable Controlada.- Es aquella energía o condición que se desea medir y controlar. En un sistema de malla cerrada, es la variable cuyo valor es medido y origina una señal de retroalimentación. Una variable indirectamente controlada es aquella que no origina una señal de retroalimentación pero que es referido a, e influenciado por, el valor directo de la variable controlada.

Variable Manipulada.- Es aquella que se va a manejar para llevar a nuestra variables controlada al punto de control.



- 1.- Variable Manipulada (Flujo).
- 2.- Tanque Abierto.
- 3.- Variable Controlada (Nivel).

Zona Muerta.- Zona en la que no existe valor de salida.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO 1

- 1.- J. P. Holman: "EXPERIMENTAL METHODS FOR ENGINEERS", 2A., Ed., McGraw Hill Book, Co.
- 2.- D. M. Considine & S. D. Ross: "HANDBOOK OF APPLIED INSTRUMENTATION" McGraw-Hill Book.
- 3.- R. H. Babcock: "INSTRUMENTACION Y CONTROL EN TRATAMIENTO DE AGUAS", Limusa, México 1974.
- 4.- Foxboro: "TECHNICAL INFORMATION", Boletín T11-1a Septiembre 1970.
- 5.- Acco Bristol: "SPECIFICATION SUMMARY", Sheet W-1842.

C A P I T U L O I I

CAPITULO 11

ELEMENTOS DE MEDICION DE PRESION

- 2.1 Tipos de presión
- 2.2 Sensores de presión
 - 2.2.1 Bourdon tipo C
 - 2.2.2 Bourdon helicoidal y espiral
 - 2.2.3 Fuelles
 - 2.2.4 Diafragma y cápsulas
 - 2.2.5 Manómetros de columna líquida
 - 2.2.6 Transductores de presión
- 2.3 Características de los sensores de presión positiva
- 2.4 Ventajas y limitaciones de los sensores de presión

CAPITULO 11

ELEMENTOS DE MEDICION DE PRESION

Con excepción de la temperatura, la presión es probablemente la variable más importante en un proceso que debe ser medido y controlado. Su importancia puede comprenderse fácilmente si se hace notar que, en algunos procesos, un cambio de temperatura de $1/2^{\circ}\text{C}$ puede ocasionar un cambio de presión de 65 a 90 cm de H_2O .

2.1 TIPOS DE PRESION,-

Dependiendo del punto que se tome de referencia para medir la presión tendremos los siguientes términos:

- a) Presión atmosférica
- b) Presión absoluta
- c) Presión manométrica
- d) Presión negativa ó vacío
- e) Presión diferencial.

a) Presión Atmosférica,-

Es la presión debido al peso de la mezcla de gases que componen el aire. El peso "estandar (nivel del mar) que la atmósfera terrestre ejerce es de una presión de 1.033 Kg./cm^2 ó bien, la atmósfera terrestre ejerce una presión igual a la ejercida por una columna de mercurio de 760 mm. En la Ciudad de México la presión atmosférica es de 585 mm de Hg., ya que dicha presión disminuye con la altura.

b) Presión Absoluta.-

Es la presión medida con referencia al vacío perfecto, ó a la presión absoluta equivalente a cero, dicha presión se obtiene, cuando no existe choque entre moléculas, esto es, la velocidad molecular es muy pequeña ó la proporción de moléculas en estado gaseoso es muy pequeño.

c) Presión Manométrica.-

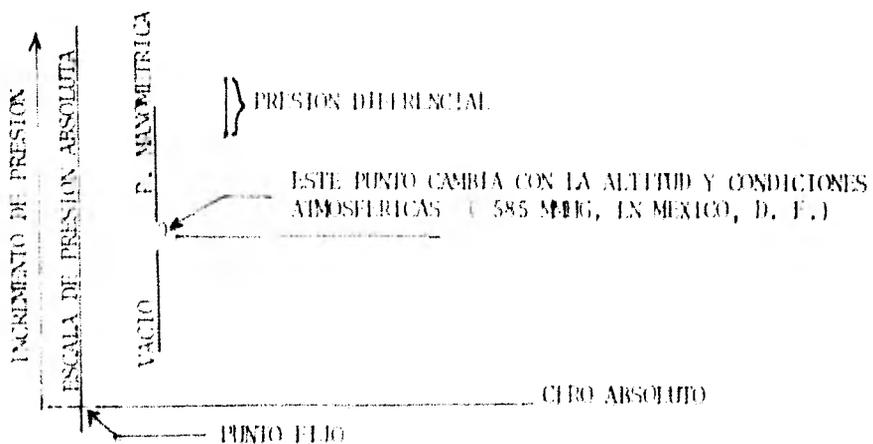
Representa la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica local.

d) Presión Negativa.-

Representa la cantidad en que la presión atmosférica excede a la presión absoluta. Los valores correspondientes al vacío aumentan al acercarse al cero absoluto, y por lo general se expresan en mm de mercurio ó de agua.

e) Presión Diferencial.-

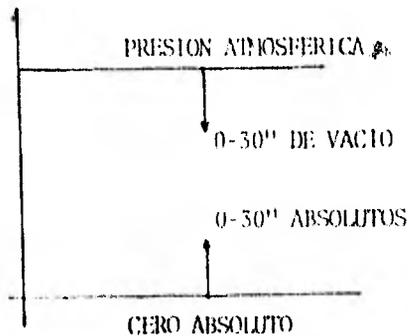
Representa la diferencia entre dos presiones medidas. Para este caso no existe diferencia entre presión absoluta y manométrica, ya que la presión atmosférica es practicamente igual en ambas presiones.



De la gráfica anterior podemos observar que:

$$\begin{aligned} \text{Si: } P. \text{ abs.} &= P. \text{ atm. local} \\ P. \text{ abs.} &= P. \text{ atm.} + P. \text{ man.} \\ \text{Si: } P. \text{ abs.} &= P. \text{ atm. local} \\ P. \text{ abs.} &= P. \text{ atm.} - \text{Vacio.} \end{aligned}$$

Es importante notar que la referencia del vacío es la presión atmosférica, por lo que no es lo mismo tener un rango de presión de 0-30 mm Hg., de vacío que de 0-30 mm Hg., absolutos.



2.2.- SENSORES DE PRESION. -

En la sección anterior de este capítulo se definieron los diferentes tipos de presión. Cuando se trabaja con estas presiones de una forma práctica en la industria necesitamos ser capaces de medirlas.

De hecho el elemento sensitivo a la presión más comúnmente usado es el Bourdon tipo C. Algunos otros dispositivos importantes son:

- 1) Bourdon helicoidal
- 2) Bourdon espiral
- 3) Fuelles
- 4) Diafragmas
- 5) Manómetros
- 6) Transductores eléctricos.

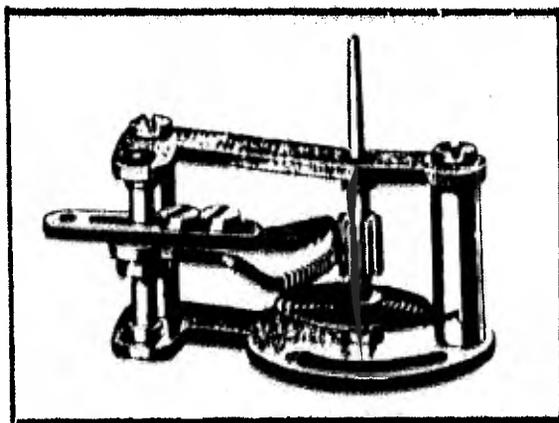
¿Cuál dispositivo se debe usar en un momento dado?, se determinará generalmente por el rango de presión que se desea medir y la utilización que se le dará en el proceso.

2.2.1 Bourdon Tipo C. -

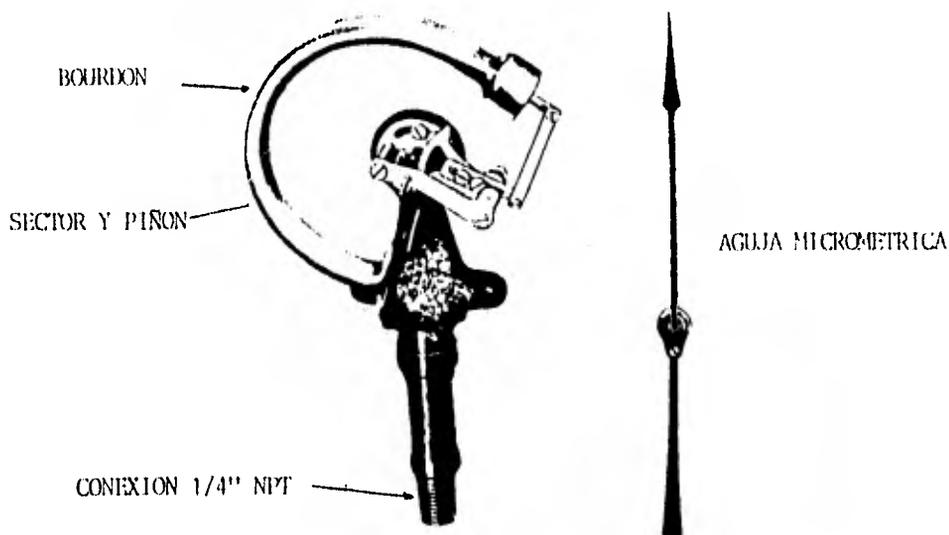
Como mencionamos con anterioridad, el Bourdon tipo C, es el dispositivo más utilizado en la industria para la medición de presión.

Funcionamiento.- Este dispositivo, consiste de un tubo de sección ovalada. Está rolado para formar un arco de círculo de aproximadamente 250°, esta sujeto por un extremo a un sector que engrana con un piñón sobre el eje del puntero indicador y por el otro extremo esta soldado al árbol de conexión por medio del cual se admite el fluido. Un aumento de presión de fluido centro del tubo Bourdon tiende a desdoblarse, moviéndose en esta forma el extremo libre, el cual transmite el desplazamiento al sector para hacer girar al piñón y al puntero.

El movimiento del extremo libre del tubo está calculado para cada incremento de presión y por lo tanto el movimiento del puntero indicará sobre la carátula la presión real que existe dentro del tubo. El desplazamiento máximo del Bourdon es de aproximadamente 8 mm.



SECTOR Y PIÑÓN DE UN MANÓMETRO DE BOURDON.



MATERIALES MAS UTILIZADOS EN LA FABRICACION DEL BOURDON TIPO C

Rango y Aplicaciones Recomendables.-

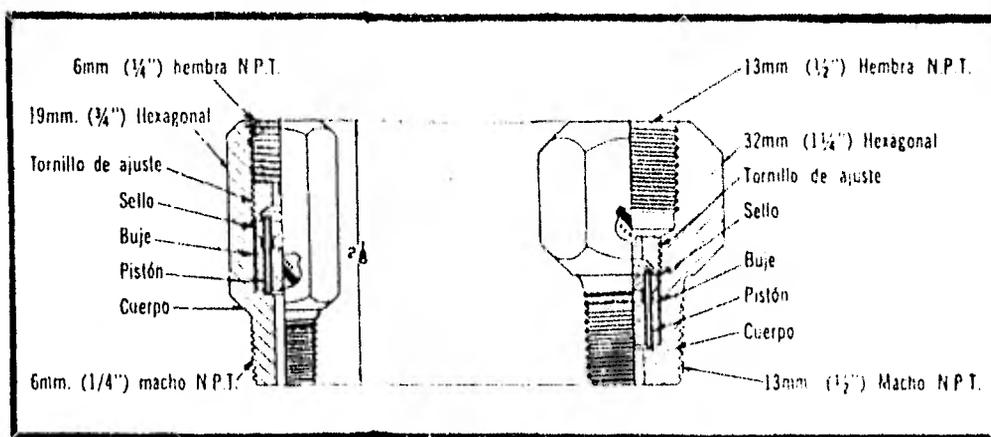
- a) Bronce fosforado estirado:
 Rango: 1 Kg/cm^2 (ó vacío) mínimo
 70 Kg/cm^2 máximo
 Aplicaciones: Aire, acetona, bencina, salmuera, ácido bórico
 butano, alcohol metílico, vapor de agua, agua,
 nitrógeno y otros gases que no corroan el bronce.
- b) Acero S.A.E., 4130 estirado.
 Rango: mismo que (a)
 Aplicaciones: Anonfaco, acetileno, cloro seco, gasolina, vapor
 y otros materiales no corrosivos al acero, al car
 bón.
- c) Acero S.A.E., 4650 perforado.
 Rango: 1400 Kg/cm^2 máximo
 70 Kg/cm^2 mínimo .
 Aplicaciones: Mismas que (b).

- d) **Monel K estirado.**
 Rango: 1 Kg/cm² (ó vacío mínimo)
 70 Kg/cm² máximo.
- e) **Monel K perforado.**
 Rango: 70 Kg/cm² mínimo
 1400 kg/cm² máximo
 Aplicaciones para (d) y (e): Salmueras, agua de mar, cloro seco, cloruro de amonio, tetracloruro de carbono, etc.
- f) **Acero Inoxidable 3/6 estirado**
 Rango: 0 - 70 Kg/cm²
- g) **Acero Inoxidable 3/6 perforado**
 Rango: 70 - 1400 Kg/cm²
 Aplicaciones para (f) y (g): Compuestos sulfurosos, agua oxigenada, hidrógeno, ácido carbónico, agua carbonatada y muy adecuados para prensas hidráulicas.
- h) **Acero Inoxidable 347 estirado.**
 Rango 1 - 70 Kg/cm²
- i) **Acero Inoxidable 347 perforado.**
 Rango: 70 - 1400 Kg/cm²
 Aplicaciones para (h) e (i): Acido nítrico fumante y aplicaciones en energía atómica.
- j) **Cobre Berilio.**
 Rango: 70 - 1400 Kg/cm²
 Aplicaciones: Oxígeno y otros servicios donde el Bourdon de bronce es adecuado pero las presiones exceden de 70 - Kg/cm².

Mantenimiento de Manómetros con Bourdon Tipo C. -

- 1) La temperatura en la caja del Bourdon no deberá exceder de 60°C ya que temperaturas más altas ocasionan inexactitud.

- 2) Al instalarse la llave deberá aplicarse en el vástago cuadrado de la conexión del manómetro, para atornillar éste en su lugar.
- 3) Cuando el manómetro de Bourdon es instalado en pared o tablero, deberá conectarse libre de esfuerzos con la tubería, es recomendable usar en el último tramo de la tubería tubo flexible.
- 4) Deberá protegerse de frecuentes pulsaciones, utilizando válvulas de aguja ó amortiguadores de pulsaciones.

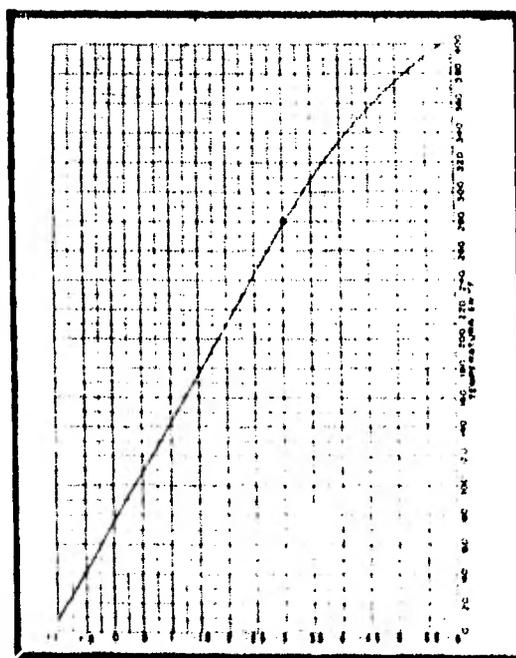


AMORTIGUADORES DE PULSACIONES

- 5) Cuando se utilice para medir presión de vapor de agua deberá instalarse entre el manómetro de Bourdon y la línea, un sifón lleno de agua, para evitar altas temperaturas en el Bourdon.
- 6) Instale los manómetros, de ser posible, lejos de humedad o vapores corrosivos, de no ser posible, utilice cajas de fenol.
- 7) Aplique la presión lentamente. No abra las válvulas rápidamente. (un esfuerzo severo, puede ocasionar la ruptura del Bourdon).

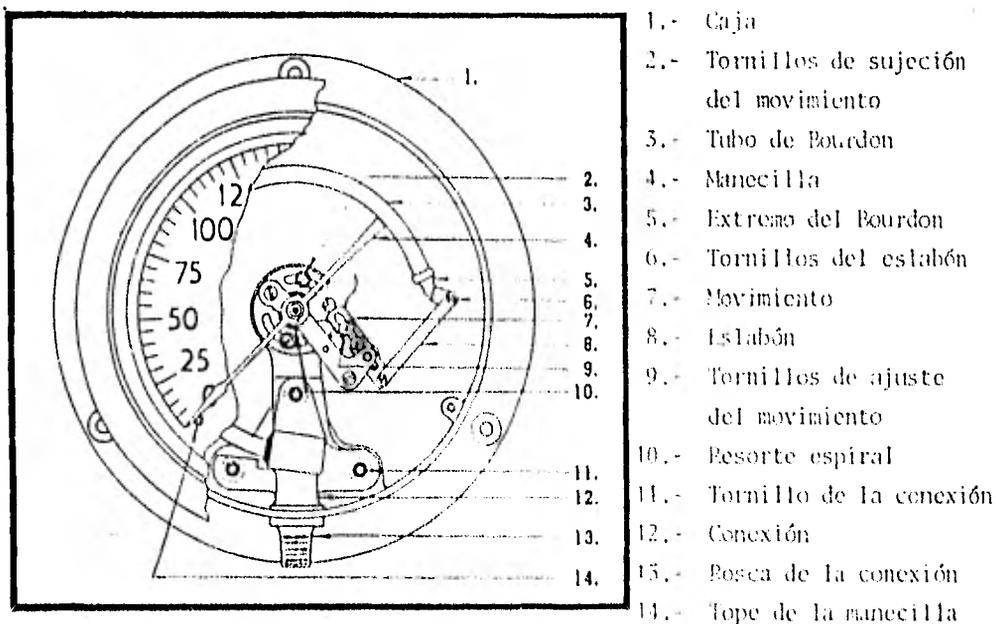
- 8) Elimine la sobrepresión. Asegúrese de que el rango del manómetro sea superior, por lo menos, al doble de la presión promedio de trabajo.
- 9) Reemplace los cristales rotos y mantenga el mecanismo libre de polvo. Nunca aceite el mecanismo ni las articulaciones.
- 10) Para una mayor exactitud en la medición tenga en cuenta el cambio de calibración del tubo de Bourdon originado por cambios de temperatura.

Para este fin utilice la siguiente gráfica:



Ejemplo: Un manómetro trabajando a 500 psi (35.15 kg/cm^2) y a 280°F de temperatura tendría una corrección del 3% y se leería 3% o 15 psi (1.05 kg/cm^2) adelante. Si el manómetro trabajara a 889 psi (62.5 kg/cm^2) y a 40°F (4.4°C) tendría una corrección de 0.5% y se leería 0.5% o 4.44 psi (0.31 kg/cm^2) atrás.

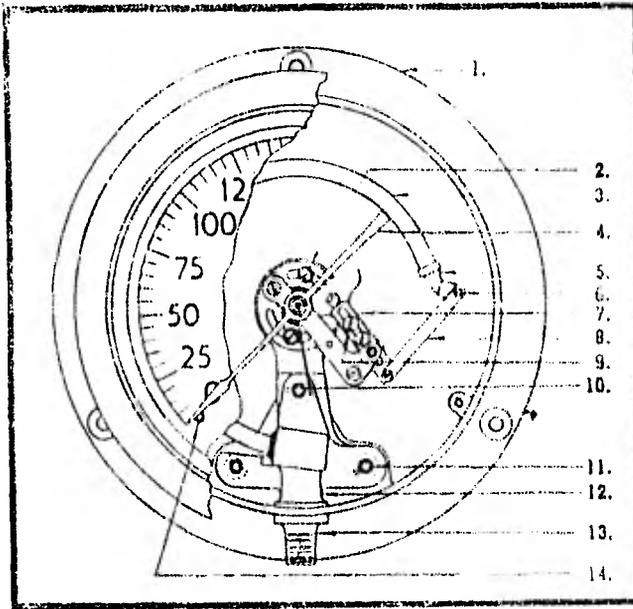
PRINCIPALES PARTES DE UN MANOMETRO DE BOURDON



Calibración de un Manómetro de Bourdon.

- 1) Corrija la calibración reajustando la manecilla micrométrica al lugar deseado.
- 2) La corrección para la lentitud, será limpiar todas las chumaceras o los dientes de los engranes. El resorte de espiral deberá ajustarse a modo de disminuir el juego; una tensión excesiva provocará fricción y arrastre.
- 3) La corredera del movimiento al acercarse o alejarse cambia la relación en el movimiento. Un tubo de Bourdon puede cambiar ligeramente de manera que su reacción a una presión interna dada podrá ser ligeramente mayor o menor; por lo tanto la corredera de movimiento deberá moverse para compensar o coincidir con el movimiento del Bourdon. Una vez ajustado deberán girarse los tornillos de sujeción.

PRINCIPALES PARTES DE UN MANÓMETRO DE BOURDON



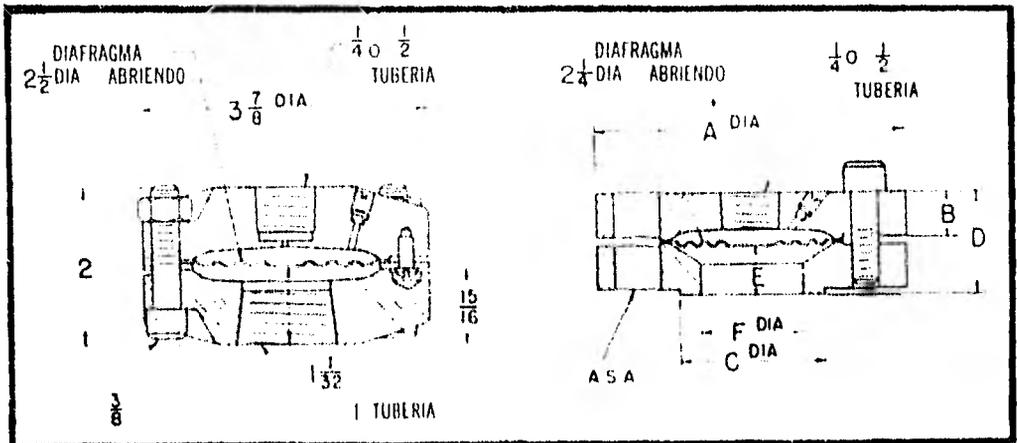
- 1.- Caja
- 2.- Tornillos de sujeción del movimiento
- 3.- Tubo de Bourdon
- 4.- Manecilla
- 5.- Extremo del Bourdon
- 6.- Tornillos del eslabón
- 7.- Movimiento
- 8.- Eslabón
- 9.- Tornillos de ajuste del movimiento
- 10.- Resorte espiral
- 11.- Tornillo de la conexión
- 12.- Conexión
- 13.- Base de la conexión
- 14.- Torno de la manecilla

Calibración de un Manómetro de Bourdon.

- 1) Corrija la calibración reajustando la manecilla micrométrica al lugar deseado.
- 2) La corrección para la lentitud, será limpiar todas las chumaceras o los dientes de los engranes. El resorte de espiral deberá ajustarse a modo de disminuir el juego; una tensión excesiva provocará fricción y arrastre.
- 3) La corredera del movimiento al acercarse o alejarse cambia la relación en el movimiento. Un tubo de Bourdon puede cambiar ligeramente de manera que su conexión a una presión interna dada podrá ser ligeramente mayor o menor; por lo tanto la corredera de movimiento deberá moverse para compensar o coincidir con el movimiento del Bourdon. Una vez ajustado deberán apretarse los tornillos de sujeción.

Protectores de Diafragma.-

Se utilizan con instrumentos de presión del tipo de tubo de Bourdon y se aplican en procesos donde el fluido pueda obstruir el Bourdon; donde el material del tubo de Bourdon no sea el más apropiado para resistir los efectos corrosivos del fluido; o donde el fluido que se encuentra en el tubo de Bourdon esté expuesto a congelarse debido a cambios de temperatura. Se encuentran en el mercado para presiones desde 760 mm de Hg., de vacío hasta -175 Kg/cm^2 y para temperaturas hasta de 203°C con una precisión garantizada de $\pm 1\%$.



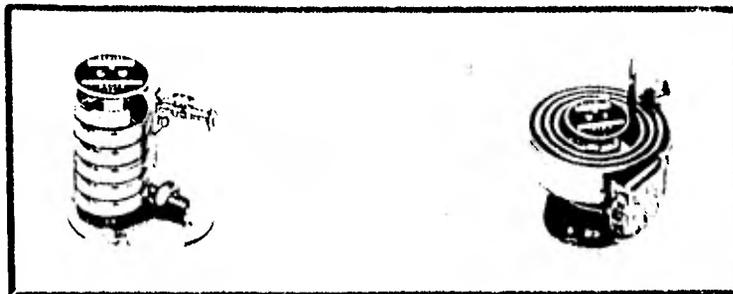
PROTECTORES DE DIAFRAGMA

Los materiales del diafragma más utilizados son: Cobre-Berilio SSF 304, SSF 316, Teflón, Hastelloy B, Hastelloy C, Monel, Níquel, Acero, Kel-F.

2.2.2 Bourdon Helicoidal y Espiral.-

Este tipo de bourdonnes son utilizados cuando el pequeño movimiento del Bourdon tipo C es necesario multiplicarlo para poder obtener un movimiento mayor en el puntero sin necesidad de piñón y sector, lo cual aumenta la precisión, ya que éste tipo de Bourdonnes proporcionan salidas de hasta 45° .

Para obtener esta auto-multiplicación de movimiento, el tubo Bourdon se construye de tal forma que forme varios círculos completos, como un tubo helicoidal o como un espiral.



ESPIRAL.

HELICOIDAL.

Usos. -

Estos dispositivos generalmente se usan en: Indicadores, registradores, transmisores y controladores. No es frecuente utilizarlos para medición local.

Los Bourdones Espirales, pueden utilizarse para medir presiones absolutas; esto se logra añadiendo otra espiral que este al vacío y que se oponga al movimiento de la espiral de medición.

Materiales de Construcción y Rangos. -

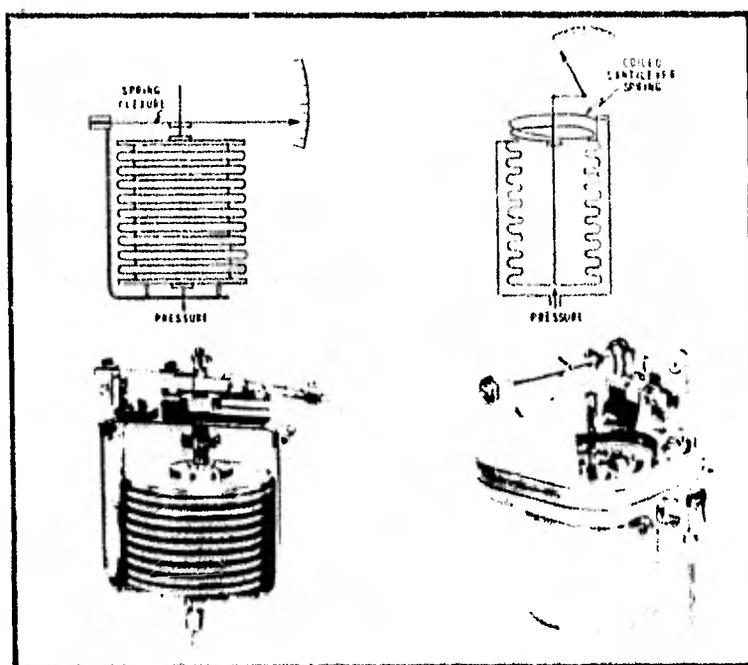
Para Bourdones Helicoidales:

Material Bronce fosforado	Rangos de 0 - 14,1	Kg/cm^2
	a 0 - 28,1	Kg/cm^2
Material Cobre - Berilio	Rangos de 0 - 14,1	Kg/cm^2
	a 0 - 422	Kg/cm^2
Material Ni - Span C alloy	Rangos de 0 - 14,1	Kg/cm^2
	a 0 - 422	Kg/cm^2

tremo. Un resorte se opone a la expansión del fuelle, la expansión se detendrá cuando la fuerza del resorte sea igual a la presión por el área efectiva, en el extremo del fuelle.

Un segundo arreglo y quizás el más común es instalar el fuelle y el resorte dentro de un recipiente. En dicho mecanismo la presión medida, es la admitida entre el lado exterior del fuelle y el interior del recipiente. La presión tenderá a comprimir el fuelle y a extender el resorte.

Prescindiendo del arreglo del fuelle, la salida del fuelle deberá ser tomada necesariamente del lado final cerrado del fuelle.

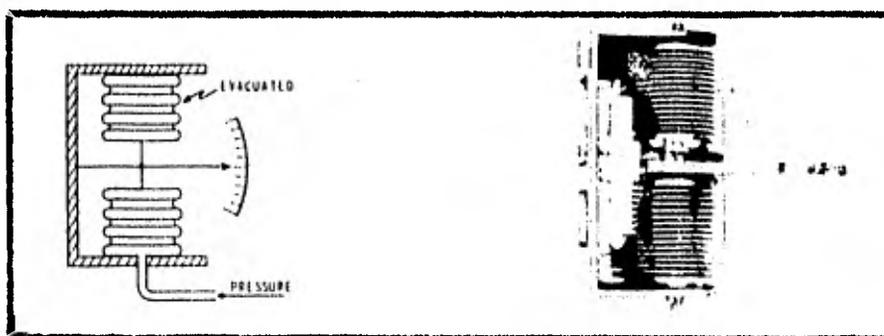


Usos, -

Estos elementos son utilizados generalmente en: Indicadores, registradores, transmisores, receptores y controladores.

Los fuelles pueden utilizarse para medir vacío y presiones absolu-

tas. La presión absoluta se mide colocando otro fuelle, que se encuentra al vacío, encontrado con el de medición, de esta manera la medición estará dada en términos de la diferencia de presiones en función del vacío; esto es, en términos de presión absoluta.



Materiales de Construcción y Rangos.-

Material Bronce	Rangos de 0 - 2540 mm H ₂ O a 0 - 1.75 Kg/cm ²
Material SST 316	Rangos de 0 - 0.31 Kg/cm ² a 0 - 2.03 Kg/cm ²

Para medición de presión absoluta con fuelles.-

Material Bronce	Rangos de 0 - 100 mm Hg a 0 - 2.46 Kg/cm ² Abs.
Material SST 316	Rangos de 0 - 125 mm Hg a 0 - 2.46 Kg/cm ²

2.2.4 Diafragmas.-

Los diafragmas son discos flexibles, usualmente con corrugaciones concéntricas, fabricados en láminas de metal de especificaciones muy exactas. Aunque los diafragmas pueden ser usados independientemente como sensores de presión, son los componentes básicos de las cápsulas.

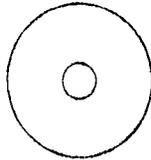
Los diafragmas se encuentran sujetos entre dos bridas, la presión es aplicada al diafragma y causa un arco en la salida del diafragma. La cantidad que el diafragma está libre para moverse es solamente unas pocas milésimas de pulgada. Este movimiento extremadamente limitado como tal, no puede usarse para operar directamente cualquier mecanismo. Como una consecuencia, es necesario incorporar equipo adicional.

Con mucha frecuencia, los diafragmas, tienen superficies corrugadas para incrementar el área de superficie y la capacidad de flexión de estos. La deflexión del diafragma depende del tipo de material, de su espesor, del diámetro del disco, de la forma del corrugado, del módulo de elasticidad del metal y de la presión. La sensibilidad, estará determinada por la profundidad, la cantidad de corrugado y el ángulo de formación de la cara del diafragma. La máxima sensibilidad para deflexiones pequeñas se obtiene con un diafragma liso y plano.

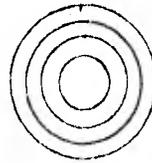
Usos,-

Se utilizan para medición de presión manométrica y de presión diferencial, esto se logra aplicando presiones en ambos lados del diafragma, la fuerza neta en el diafragma es la diferencia entre las dos presiones por el área efectiva del diafragma. Como ya se mencionó generalmente es necesario incorporar equipo adicional, como algún tipo de transductor.

SUPERFICIE LISA



SUPERFICIE CORRUGADA



Las cápsulas están formadas por dos diafragmas, unidos en su periferia por soldadura y relevados de esfuerzos. Las cápsulas pueden ser de dos tipos: una convexa y otra anidado

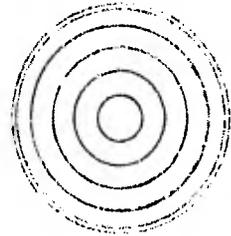
TIPO CONVEXO

El movimiento es perpendicular a la superficie



TIPO ANIDADO

El movimiento es perpendicular a la superficie



Usos.-

Los elementos capsulares pueden tener sus terminales conectadas y utilizarse en: indicadores, registradores y controladores de presión. Pueden usarse para medir vacío y presiones absolutas.

Rangos y Materiales.

Cápsulas de menos de 25.4 mm a 152 mm son utilizadas para rangos de 0 - 203 mm de H₂O y de 0 - 0.35 kg/cm² con sobre-rangos de 0.45 - 1.70 kg/cm².

Los materiales más utilizados son:

Inconel X-750: Resistente a la corrosión y opera en rangos de temperatura de -252°C a 650°C.

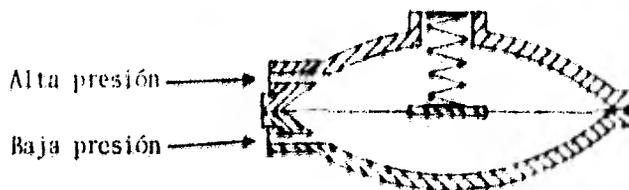
- Ni-Span C alloy: No se afecta significativamente por cambios de temperatura entre -55°C y 148°C , pero no debe utilizarse en lugares donde las condiciones de humedad cambien constantemente de seco a húmedo.
- Bronce Fosforado: Es de bajo costo, resistente a medios húmedos útil en rangos de temperaturas de -45°C a 121°C y puede ser recubierto para uso en atmósferas sulfurosas.
- SST 316: Usado ampliamente en atmósferas corrosivas y en rangos de temperatura de -273°C a 371°C , útil especialmente en criogénica.

Diafragmas Suaves .-

Son utilizados para mediciones exactas de presiones muy bajas y vacíos entre 0 y 25.4 mm de H_2O y entre 0 y 2 m de H_2O . Este dispositivo utiliza un resorte de rango y un diafragma de hule, normalmente Buna N, moldeado y de gran área efectiva el cual se encuentra entre dos cajas de aluminio anodizado, el cual reduce los efectos de cambios de temperatura ambiente.

Pueden usarse también para presiones diferenciales y presiones estáticas hasta de 1 Kg/cm^2 .

Diafragma suave, fabricado de elastómero moldeado, para medición de presiones bajas.



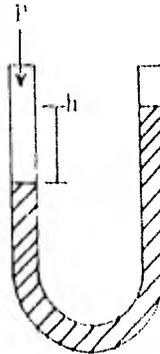
2.2.5 Manómetros de Columna Líquida.-

Este manómetro se puede describir como un dispositivo que da indicaciones a partir de un balance de fluido, similar en operación a las balanzas mecánicas de laboratorio.

Una presión desconocida se aplica a la columna de líquido ocasionando que el fluido suba por uno de los extremos, aumentando la altura de la columna de líquido, y al mismo tiempo aumentando su peso, cuando el peso de la columna iguala a la fuerza ejercida por la presión aplicada el manómetro es balanceado y la columna estabilizada. La altura de la columna por su peso específico es igual a la presión en el fondo de la columna. Esta presión es igual a la presión bajo medición.

$$P = \gamma h$$

γ = peso específico del líquido.

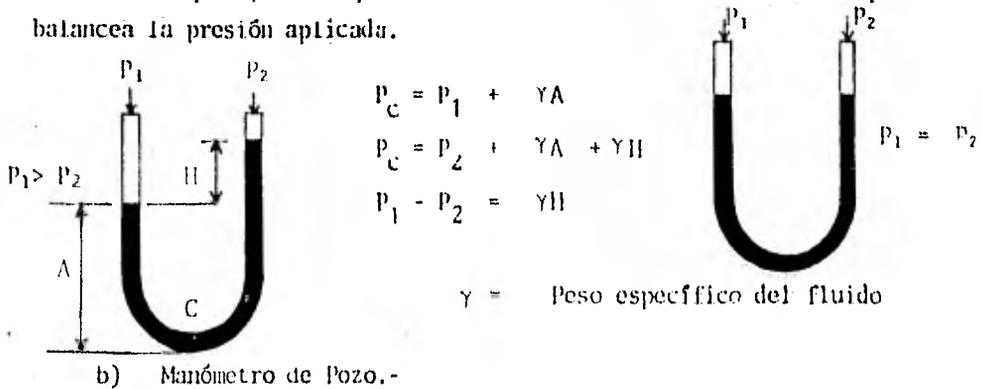


Existen varias clases de manómetros de columna, entre los más importantes están:

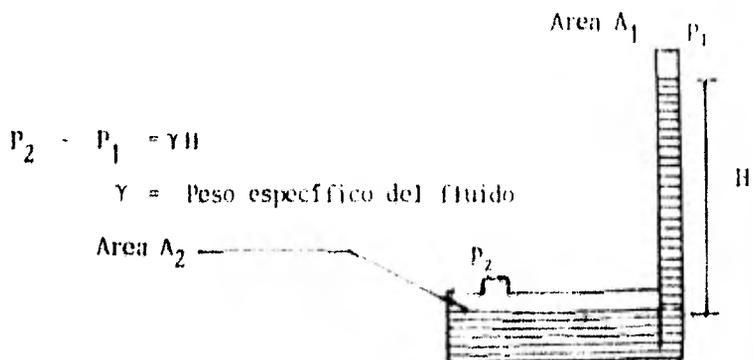
- a) Tubo U
 - b) Manómetro de pozo o de cubeta
 - c) Manómetro inclinado
 - d) Manómetro mecánico.
- a) Tubo U.

Es el más simple de los manómetros de columna, está fabricado generalmente de vidrio, aunque pueden hacerse de material flexible.

La presión a medirse en uno de los lados de la columna eleva el nivel del líquido, hasta que la diferencia en nivel entre las dos piernas balancea la presión aplicada.

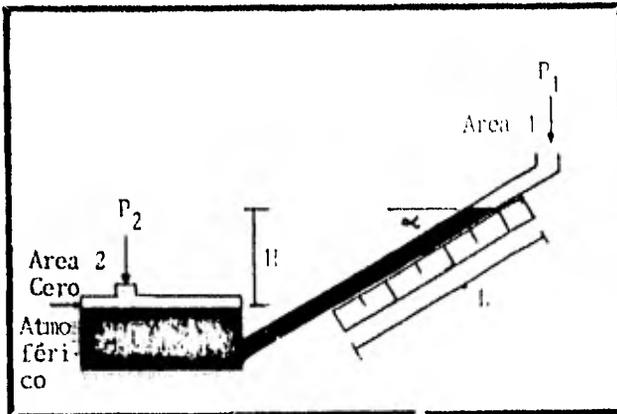


En una versión del tubo en U, ligeramente modificado, la presión se aplica al pozo forzando el líquido a subir hasta que balancea la presión aplicada. El pozo es grande comparado con el tubo. El líquido elevado en el tubo es una pequeña porción del líquido en el pozo. Como es una pequeña porción del líquido total, el nivel del pozo permanece substancialmente constante, de tal forma que la columna que balancea la presión desconocida es substancialmente igual a la altura del líquido en el cristal. La ventaja del manómetro de pozo sobre el tubo U es que una observación simple es suficiente para determinar la presión. Mientras que en el tubo U es necesario determinar la diferencia de niveles.



c) Manómetro Inclinado.-

Se utiliza para medición de presiones pequeñas, ya que estando inclinado uno de los lados del manómetro, las variaciones de nivel relativamente pequeñas producirán movimientos notables del líquido, en la escala, sin aumentar considerablemente la altura.



$$H = l \cdot \text{sen} \alpha$$

$$P_2 - P_1 = \frac{\gamma (1 + A_1/A_2)}{l \cdot \text{sen} \alpha} \times$$

pero como $A_2 \gg A_1$

$$P_2 - P_1 = \gamma l \cdot \text{sen} \alpha$$

d) Manómetro Mecánico.-

Esta cuarta clase de manómetros está arreglada de tal forma, que la salida es registrada mecánicamente, más que por la observación de la altura de un líquido como fué cierto en las tres anteriores variedades.

La salida se obtiene poniendo un flotador en una de las superficies del líquido, el flotador sube y baja con este nivel. El nivel a su vez es cambiado según cambia la presión aplicada. Acoplada al flotador existe una palanca que gira una flecha a través de una gufa sellada. Entonces el cambio de nivel, el cual es determinado por la presión que se está midiendo, causa que la flecha gire posicionando entonces las palancas de indicación.

e) Manómetro de Campana.-

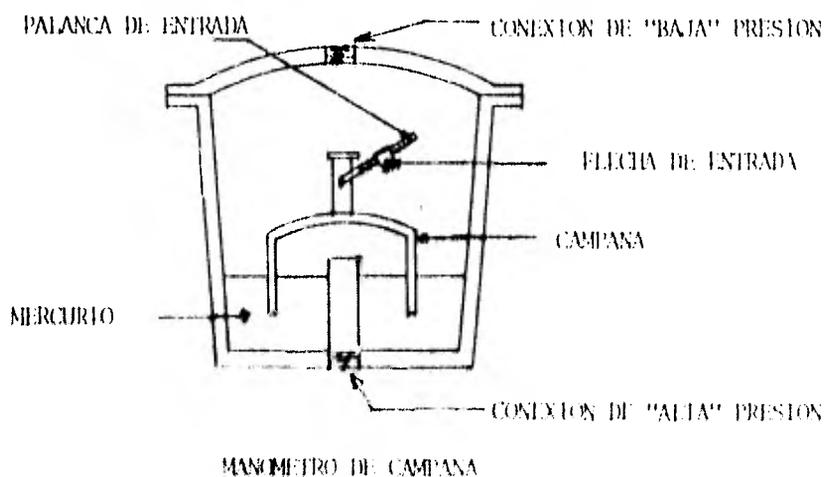
Constituye otra variedad de manómetro mecánico, emplea una unidad en forma de campana invertida que flota, con su abertura hacia abajo, en un

estanque generalmente de mercurio, la abertura de la campana se sumerge en el mercurio formando dos compartimientos. Uno está en el interior de la campana y conecta hacia el exterior del medidor a través de un niple de suficiente longitud para que su abertura esté arriba del estanque de mercurio. El otro compartimiento es el espacio exterior de la campana e interior del cuerpo del medidor. El mercurio aísla estos dos compartimientos.

Si este manómetro se utiliza para medir presión diferencial, usualmente la toma de baja presión se localiza en el compartimiento exterior de la campana, y la de alta en el interior de la campana.

La palanca que mueve el indicador está acoplada a la parte superior de la campana. La flecha de entrada corre a través de una guña sellada, la flecha gira mientras la presión dentro de la campana tiende a levantarla.

Si la campana se utiliza para medir presión diferencial, la diferencia de nivel dentro de la campana y el nivel fuera de ella, balancea la diferencia de las dos presiones que componen la diferencial.



Es importante hacer notar que todos los manómetros tienen dos lados, si cada una de las dos presiones que componen la presión diferencial es conectada a cada uno de los lados de un manómetro, entonces la diferencia en presión fuerza al líquido del manómetro hasta que la altura del líquido del manómetro balancea la diferencia de las dos presiones.

Es de esta forma que un manómetro se utiliza para medir presión diferencial. Los manómetros mecánicos son casi siempre utilizados con este fin.

2.2.6 Transductores de Presión.

Un gran número de dispositivos operan bajo el principio de transformar una presión en una señal eléctrica o electrónica, para ser utilizada para medición o control, a tales dispositivos se les llama Transductores de Presión.

Los transductores de presión más utilizados, son los de tipo:

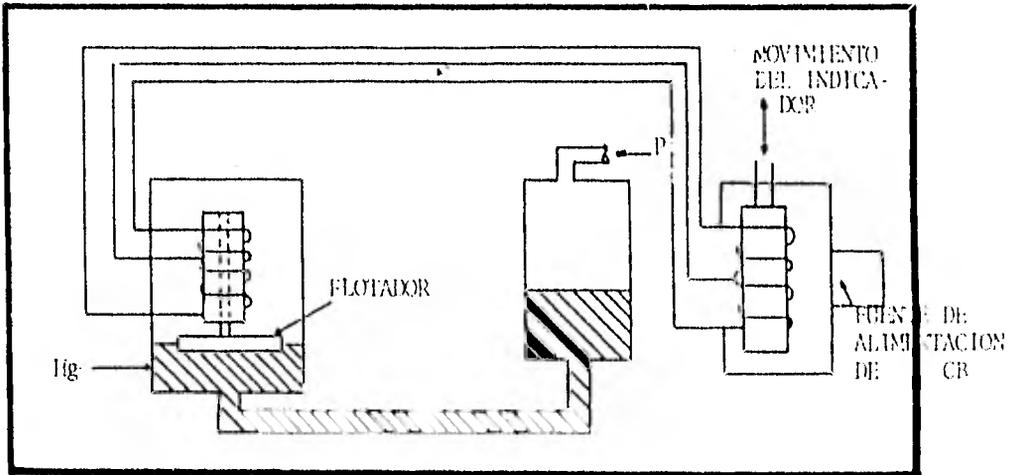
- a) Inductivo
- b) Capacitivo
- c) Piezoeléctrico
- d) Extensómetro (celdas de deformación)

a) Transductores Inductivos.

Son unidades magnéticas que se encuentran acopladas y se utilizan para medir presiones tanto diferenciales como manométricas.

Consiste de un diafragma ó cualquier otro tipo de impulsor magnéticamente acoplado a un sistema balanceado de captación eléctrica, que emite una salida de rango completo en mV, por volt, en circuito de puente en C. A. No existe acoplamiento mecánico entre el propulsor y los receptores de señal que se encuentran en el cuerpo rígido del transductor.

La acción del transductor se puede ejemplificar con el funcionamiento del medidor de manómetro inductivo que a continuación se describe.



MEDIDOR ELECTROMECHANICO DE PRESION POR INDUCTANCIA

Este medidor no es más que un manómetro de mercurio de tipo campana. En la campana lleva acoplada una varilla de hierro que puede desplazarse en forma ascendente o descendente dentro de una bobina dividida, diseñada para emitir una señal eléctrica proporcional al movimiento del flotador producido por los cambios de presión. La señal generada por la bobina interna se transmite a una bobina externa de la que se toma la señal ya sea mecánica o eléctricamente.

Este dispositivo puede alcanzar precisiones de 0.1% a escala completa para presiones de hasta 70 Kg/cm^2 .

Un tipo más comercial de transductor inductivo es el LMI ó transformador diferencial de variación lineal que consiste de tres bobinas en disposición lineal, con un núcleo magnético que se puede mover libremente dentro de ellas. A la bobina central se le aplica un voltaje alterno, de manera que el voltaje inducido de salida de las bobinas extremas depende del

acoplamiento magnético. Las bobinas externas ó secundarias se conectan en serie y opuestas, de manera que los dos voltajes inducidos tienen una fase contraria. Por eso, la salida neta del transformador es la diferencia de estos dos voltajes. Para una posición central del núcleo magnético, el voltaje de salida es cero y este es el punto nulo ó de equilibrio. Si se mueve el núcleo a partir del punto de equilibrio, el voltaje inducido en la bobina hacia la que se mueve el núcleo aumenta y el voltaje de la bobina opuesta disminuye. Esto produce una diferencia de voltaje en el transformador. Mediante un diseño adecuado puede hacerse que este voltaje varíe linealmente con el cambio de la posición del núcleo.

La sensibilidad de un LVDT se indica generalmente en términos de la salida de voltaje (milivolts) por milésimas de pulgada de desplazamiento de núcleo por volts de entrada, que se escribe casi siempre como mV salida/0.001 pulgada/volts de entrada. Puesto que la sensibilidad de voltaje varía en función de la frecuencia, ésta se debe indicar cuando se especifique la sensibilidad.

La sensibilidad y la salida de un LVDT se puede aumentar elevando el voltaje primario por encima del valor nominal, según la frecuencia y la temperatura ambiente. El voltaje de entrada se debe limitar de acuerdo a la temperatura máxima del devanado interno que pueda tolerarse dentro de las especificaciones de aislamiento para un tipo particular de LVDT.

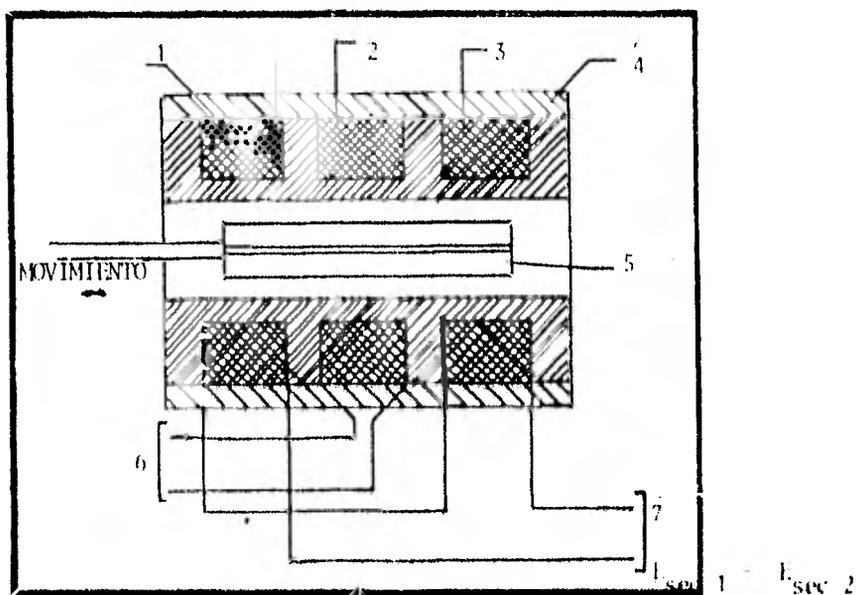
El voltaje o la potencia de salida se puede incrementar, por encima de los valores nominales publicados para un LVDT particular, conectando un capacitor a la salida, deberá verificarse el sistema experimentalmente para evitar la posibilidad de ocasionar efectos adversos en su funcionamiento, sobre todo en la linealidad de la respuesta y la sensibilidad a la variación de frecuencia.

La linealidad de cualquier LVDT varía hasta cierto grado con la frecuencia. Usualmente se identifica cada tipo de LVDT con una cifra corres

pendiente al rango nominal de desplazamiento lineal, medido en torno a la posición nula del núcleo.

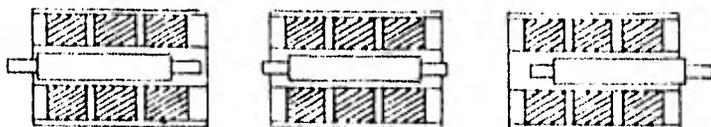
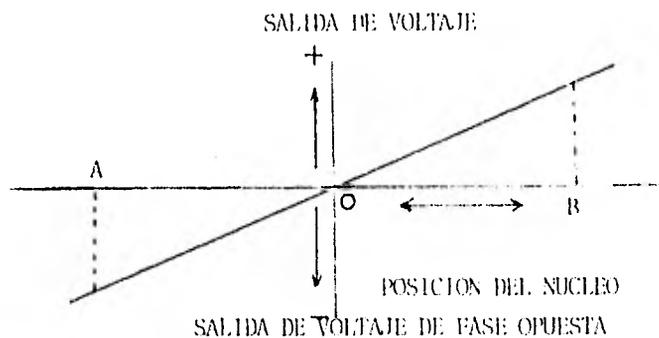
El grado de linealidad dentro de un rango lineal se define como la desviación máxima de la curva de salida en relación con la recta mejor ajustada que pasa por el origen y que se expresa como un porcentaje de la salida al rango nominal. Hay muchos LVDT estándar que tienen una linealidad de $\pm 0.5\%$ o menos aún.

Es importante hacer notar que debe evitarse que un LVDT opere en presencia de campos magnéticos dispersos de magnitud considerable, ya que se corre el peligro de añadir una componente indeseable al voltaje de la salida.



- 1.- Bobina 1 secundario
- 2.- Bobina del primario
- 3.- Bobina 2, secundario
- 4.- Forma aisladora

- 5.- Núcleo
- 6.- A la fuente de voltaje en CA (etc)
- 7.- Diferencia de salida de voltaje,

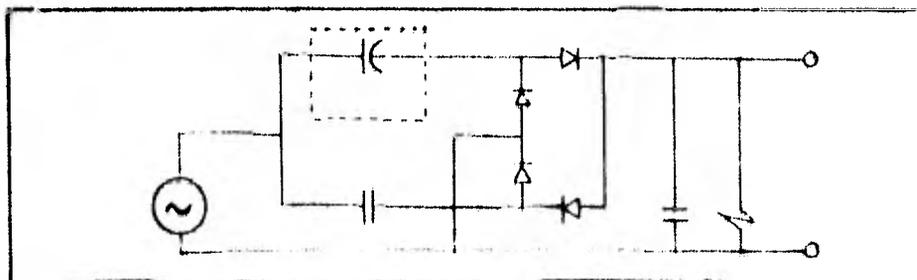


GRAFICA LINEA Y LA FASE DEL LVDT EN FUNCION DE LA POSICION DEL NUCLEO

b) Transductores Capacitivos.-

Este tipo de transductor está basado en el principio de que al desplazarse una placa de un capacitor, varía su capacitancia. El transductor - consiste en un diafragma que experimenta deflexiones y que sirve como placa móvil, dicha placa se encuentra separada de la placa fija mediante un material dieléctrico compresible. Los componentes se montan en un recipiente a presión, apropiado para cada aplicación en particular.

Un circuito típico de este tipo de dispositivos es el que se describe:



Como se muestra en el circuito, un oscilador de alta frecuencia, alto voltaje energiza el elemento sensor.

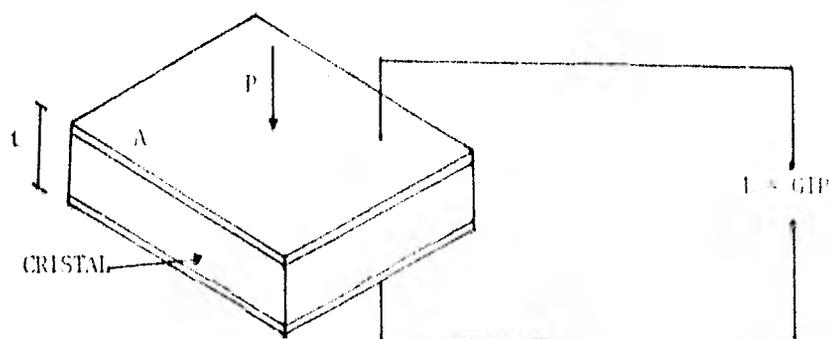
Sobre la escala total del rango de presión la capacitancia del elemento es convertida a una señal de corriente directa de 0 - 1 mA., por medio de un circuito de puente de diodos.

Un voltaje en C. D., de salida es obtenido midiendo la caída de voltaje a través de una resistencia de carga de precisión, en el circuito de salida del sensor. La corriente de salida de 0 - 1 mA., es alimentado a un amplificador de corriente.

La linealidad del dispositivo permite que el voltaje de salida sea directamente proporcional al voltaje de entrada en todo el rango de la unidad, entonces la salida puede ser leída directamente en unidades de presión ó en unidades de voltaje. Este tipo de sensor puede utilizarse para medir presiones absolutas y diferenciales.

c) Transductores Piezoeléctricos.-

Están compuestos de materiales cristalinos que producen una señal eléctrica cuando se deforman físicamente, por acción de una presión. Por el contrario cuando tienen una carga eléctrica se deforman físicamente. Los materiales más utilizados para este fin son: el cuarzo, el titanio de bario y la sal de Rochelle.



EFFICIO PIEZOELECTRICO

Se coloca un cristal Piezoeléctrico entre dos placas que hacen la función de electrodos, al aplicar una fuerza a las placas se produce un esfuerzo, y, por ende, una deformación. En ciertos cristales, esta deformación producirá una diferencia de potencial en su superficie; a este efecto se le denomina efecto piezoeléctrico.

Los cristales piezoeléctricos son generalmente utilizados para mediciones dinámicas y normalmente como fonocaptadores.

d) Extensómetros Metálicos.-

Quando se aplica una carga en cualquier objeto material éste se expande, se contrae o sufre un esfuerzo cortante. Si una rejilla de alambre o papel metálico con resistividad eléctrica específica se une con firmeza al objeto, teóricamente se alargará o comprimirá, exactamente como lo hace la superficie a la que está sujeto. El extensómetro se basa en el principio de que, cuando un conductor se somete a un esfuerzo de tensión o compresión, presenta un cambio en la resistencia. La magnitud del cambio, relacionada con la resistencia original, es proporcional a la magnitud del esfuerzo aplicado. Este esfuerzo se define como:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Cambio de longitud}}{\text{Longitud original}}$$

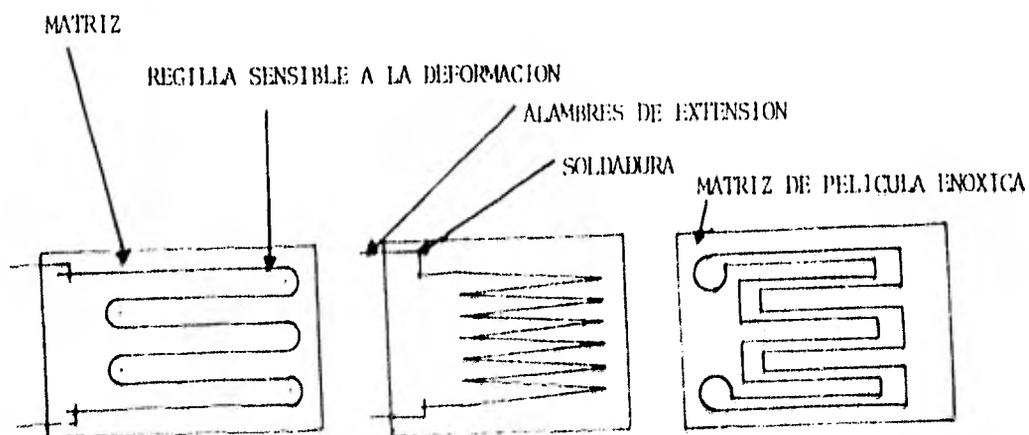
Los extensómetros determinan la unidad de deformación E, en micropulgadas por pulgada. En la aplicación de estos extensómetros se utiliza una constante de proporcionalidad denominada factor de celda y que, por lo común se designa como G, E o K. Esta constante tiene valores de 2 a 4 para las aleaciones de extensómetro que más se usan. El factor de celda se basa en el cambio de resistencia que ocurre en la resistencia total en relación con el cambio de longitud del conductor con respecto a su longitud unitaria. Esto es:

$$GF = \frac{R/R}{L/L}$$

Para lograr mediciones más o menos precisas con extensómetros metálicos, se deben tomar en cuenta varios factores como la composición química de la aleación metálica, el tratamiento térmico del metal, los efectos de la temperatura, el tamaño y la configuración del medidor, el adhesivo empleado en la unión, el ciclo de curación del adhesivo, el tipo de soporte del medidor y el cambio de cero del medidor con respecto a cualquier compensación de temperatura.

El elemento activo del extensómetro metálico consiste esencialmente en una rejilla conductora que descansa sobre alguna clase de material de soporte. El conductor puede ser alambre delgado o se puede moldear ó grabar en hojas metálicas por acción química.

En el caso de un conductor de alambre, la rejilla puede ser plana, estar formada por un trenzado de alambre alrededor de alfileres o arrollada en forma de una bobina alrededor del ensamblaje. Para hacer el medidor de papel metálico se debe fotografiar una imagen reducida de la forma de la rejilla deseada en una forma metálica químicamente tratada y, luego, tratarlo con ácido para eliminar el exceso de metal o cortar con una matriz de alta precisión.



TRES FORMAS DE EXTENSOMETROS METALICOS

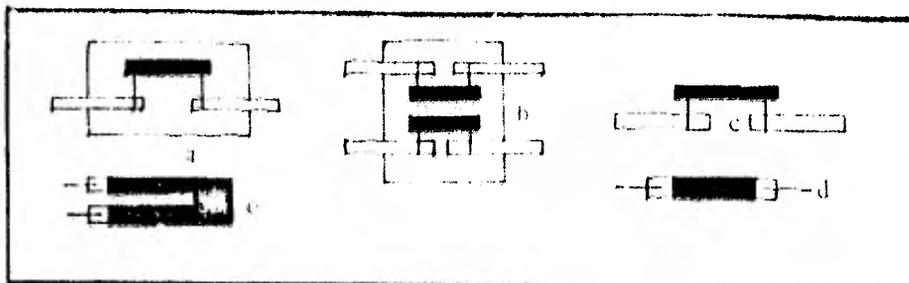
d) Extensómetros de Semiconductor.

Los extensómetros de semiconductor operan con base en el principio de la piezorresistencia. Esto se define como el cambio en la resistividad eléctrica de acuerdo con la deformación aplicada. Mientras que todos los materiales presentan éste efecto hasta cierto grado, hay algunos conductores en los que aquel es mucho mayor y se observan grandes cambios con el esfuerzo aplicado. Los cambios de resistencia se producen en todas las condiciones de deformación estática y dinámica.

Los extensómetros de semiconductor pueden tener factores de celda que van de 45 a 200.

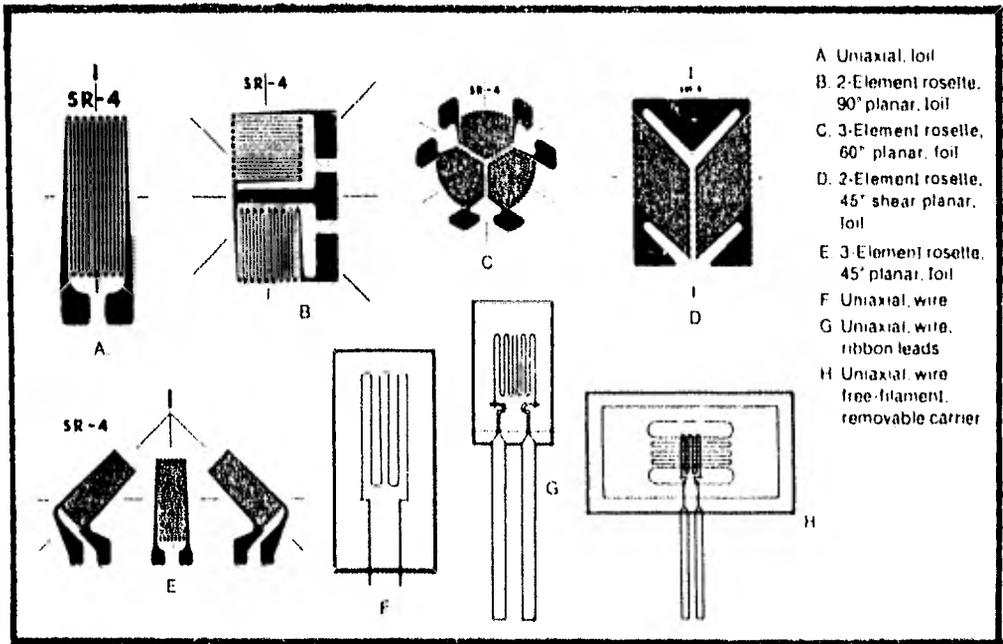
Los medidores de semiconductores se forman a partir del material semiconductor que se contamina con los portadores adecuados para producir las características deseadas. En la construcción de los medidores se utilizan cristales tanto del tipo P como del tipo N.

Los extensómetros de semiconductor pueden construirse como se ilustra a continuación: En a) se presenta un diagrama de un medidor de un solo elemento, reforzado y dentro de su cápsula; en b) se muestra un medidor reforzado de dos elementos dentro de su cápsula; en c) se muestra un medidor reforzado descubierto; en d) un medidor descubierto con electrodeposición y un cable soldado y, en e), un medidor en U. Todos ellos son muy pequeños en comparación con la mayoría de los medidores de alambre y papel metálico. Las longitudes reales de un extensómetro de semiconductor son del orden de milésimas de pulgada.

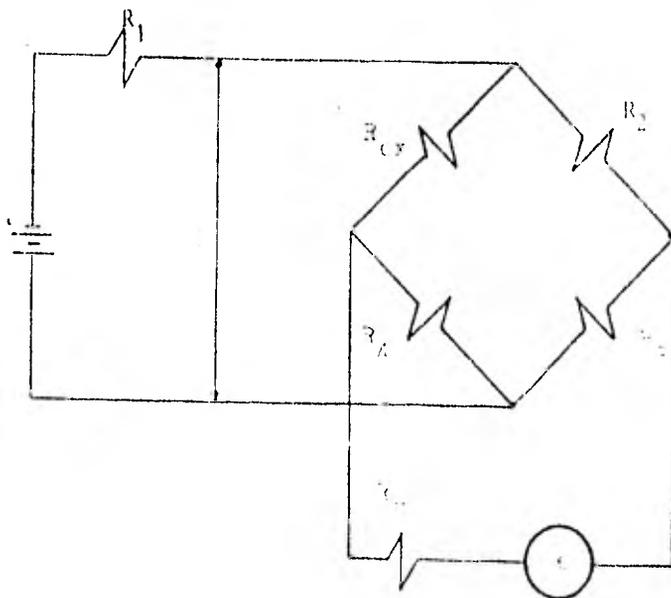


Los extensómetros pueden ser axiales, lo que significa que miden la deformación en una serie dirección; biaxiales, para medir deformaciones en dos direcciones; o triaxiales, para medir deformaciones en tres direcciones. Los medidores se pueden montar en ángulo recto (90°) o bien, a 60° - 45° entre sí.

En la siguiente figura se presentan algunos sistemas que ya se venden así. Se pueden obtener tamaños y formas especiales aunque existen muchas disponibles como instrumentos estándar.



La medición de una deformación con un extensómetro de resistencia requiere una determinación muy precisa de un cambio de resistencia extremadamente pequeño. El circuito eléctrico que se usa más a menudo para esta clase de aplicaciones es el puente de Wheatstone como el mostrado a continuación.



PUENTE DE WHEATSTONE

Al utilizar una tensión de alimentación constante, el voltaje de salida es cero para un puente balanceado. Esto es: $E_s = 0$. Y el voltaje que aparece entre las terminales del detector estará dado por:

$$E_s = E \frac{R_{ex}}{R_{ex} + R_1} - \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

Suponiendo que en este circuito el extensómetro está representado por la resistencia R_{ex} y que el dispositivo de registro tiene una alta impedancia de entrada, de manera que el circuito opera como un puente de deflexión sensible al voltaje. Suponiendo que el puente está en equilibrio cuando no hay deformación y que una deformación D en el extensómetro produce un cambio R_{ex} en su resistencia. R_{ex} se utilizará para representar la resistencia del extensómetro en las condiciones de cero deformación. Así obtendremos el cambio en el voltaje debido a la deformación como:

$$\frac{E_s}{E} = \frac{R_{ex} + R_{ex}}{R_{ex} + R_{ex} + R_4} = \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

Puesto que se puede implicar la relación de cambio de resistencia con la deformación aplicada, el voltaje de salida también se puede relacionar con dicha deformación. La relación entre el voltaje y la deformación puede mantenerse lineal mediante la elección adecuada de los límites de operación. El voltaje de salida es del orden de unos cuantos milivolts, lo cual hace necesario emplear detectores y amplificadores de alta sensibilidad para obtener niveles de señal apropiados para el registro. Con un sistema bien diseñado, la relación señal a ruido se puede controlar de manera que se obtengan señales buenas y seguras.

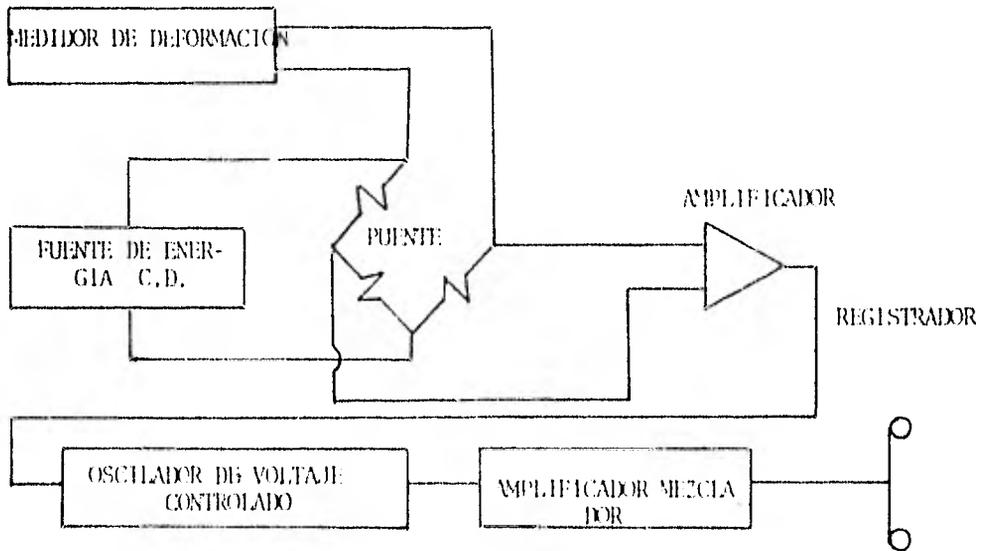
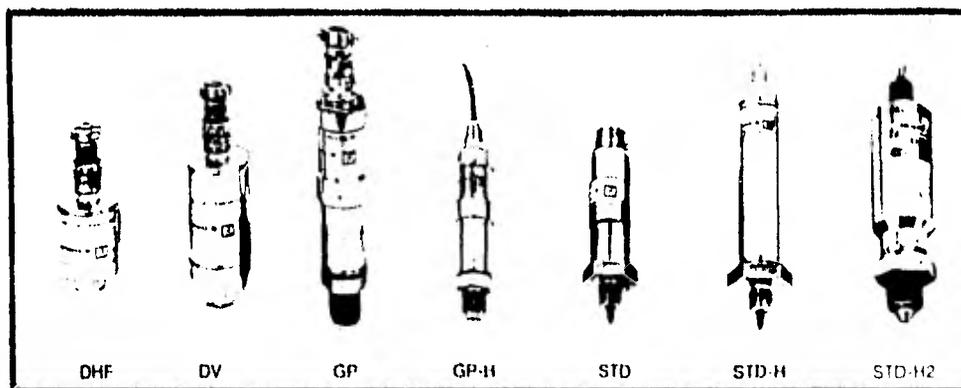


DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CIRCUITO DE EXTENSÓMETRO, CON EXCITACION DE C. D.

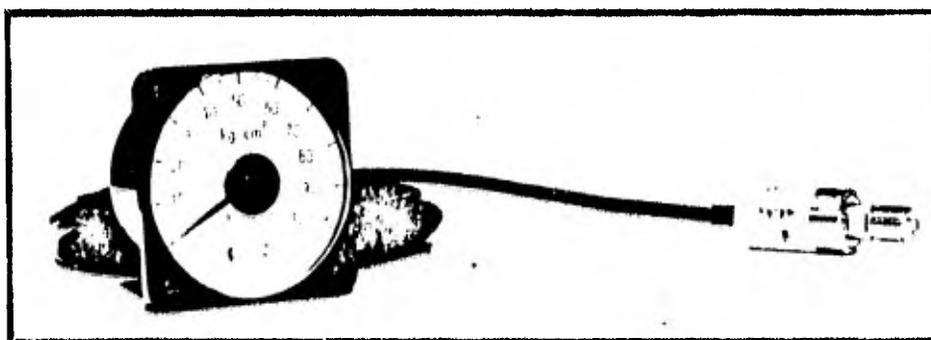
Aunque en la figura anterior solo se presenta un medidor activo, se puede utilizar hasta cuatro, o bien se pueden emplear extensómetros no deformados llamados celdas de compensación. Su objeto es obtener una compensación para la temperatura y otros efectos.

Extensómetros en Transductores de Presión.-

Los transductores de presión que utilizan algún tipo de extensómetro en su circuito de medición, generalmente llevan como sensor, en contacto con el fluido, un diafragma. El transductor convierte la presión del fluido, experimentado por el diafragma, en una deformación que será medida por medio de un puente de Wheatstone.



DIFFERENTES TIPOS DE EXTENSOMETROS PARA PRESION



EXTENSOMETRO CONECTADO A UN INDICADOR DE PRESION

2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE PRESTION POSITIVA. -

TIPO	RANGO BAJO	MAXIMO ALTO	SPAN MINIMO		SENSIBILIDAD EXACTITUD	
ELEMENTOS ELASTICOS						
Bourdon C	15 PSI	10000 PSI	10	PSI	0.01% SPAN	0.05% SPAN
Helicoidal (metálico)	100 PSI	10000 PSI	100	PSI	0.01% SPAN	0.05% SPAN
Espiral	15 PSI	25000 PSI	15	PSI	0.01% SPAN	0.05% SPAN
Fuelles (con re- sorte	0 PSI	500 PSI	5	PSI	0.25% SPAN	0.50% SPAN
Fuelles opuestos	0 PSI	200 PSI	15	PSI	0.10% SPAN	0.25% SPAN
Diafragma (metálico)	0 PSI	140 PSI	3"	W.C.	0.25% SPAN	1-1.5% SPAN
Diafragma	0 in.	80" water	1"	W.C.	0.25% SPAN	1.0 % SPAN
MANOMETROS Y CAMPANAS						
Man. de Hg	0 mm.	800 mm. Hg	1 mm. Hg		0.1 mm Hg	±0.1 mm H
Inclinado	0,5"	50" W.C.	1" W.C.		0.01" W.C.	±0.01" W.C.
Campana in- vertida y barra de ba- lance	-30 in	+ 2" W.C.	0,1" W.C.		±,0005" W.	±,002" W.C.
TRANSDUCTORES						
Capacitivos	0 PSI	5000 PSI	0,1	PSI	± .02% FS	±,15% FS
Extensómetros	5 PSI	60 PSI	30	mv.	± .1% FS	±,25 FS
L.V.D.T.	5 PSI	1000 PSI	10	PSI	± .1% FS	± 1% FS

2.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS SENSORIOS DE PRESION.-

Elementos de Bourdon Metálico.-

Ventajas: Bajo costo
Construcción simple
Años de aplicación y experiencia
Rangos existentes para presiones muy elevadas
Buena exactitud contra costo excepto a rangos bajos
Diseños especiales para máxima seguridad a altas presiones
Facilmente adaptables a transductores para obtener salida eléctrica.

Desventajas: Muy bajo gradiente de muelleo abajo de 50 psi
Normalmente requieren engranaje para amplificación
Histéreses de 0.25% a 0.50% sobre la máxima presión
Debido a su constitución, el dispositivo es susceptible de golpes y vibración.

Elementos de Diafragma.-

Ventajas: Puede acoplarse directamente al proceso
Costo moderado
Se consiguen para presiones absolutas y diferencial
Algunos materiales de construcción soportan la corrosión.
Relativamente pequeños
Buena linealidad
Resiste altas sobrepresiones

Desventajas: No resisten altas presiones
Difíciles de reparar
Debe protegerse de golpes y vibraciones
Requiere de transductores adicionales para obtener salidas eléctricas.

Elementos de Fuelle.-

Ventajas: Transmite altas fuerzas
 Costo moderado
 Se consiguen para presiones absolutas y diferencial
 Buenos en presiones bajas y medias.

Desventajas: Requiere de resortes para sus mediciones.
 Necesita compensación para cambios de temperatura
 Algunos metales endurecen con el trabajo
 No soportan altas presiones.

Manómetros de Columna.-

Ventajas: Buena exactitud y sensibilidad
 Costo moderado
 Usados principalmente para presiones bajas y diferenciales bajas.

Desventajas: Generalmente grandes y voluminosos
 No son independientes de la posición
 Mediciones medias deben ser compatibles con fluidos especiales o mercurio
 Afectados por temperatura ambiente.

Transductores con Sensor Capacitivo.-

Ventajas: Buena exactitud y linealidad
 Fácilmente adaptable a lectores digitales
 Costo moderado.

Desventajas: Para mediciones exactas requieren compensadores de temperatura
 Resistencia a la corrosión solo con acero inoxidable o con Ni-Span C,

Transductores con Extensómetro.-

- Ventajas:
- Buena exactitud
 - Alta señal de salida
 - Pequeños y compactos
 - Soportan golpes y vibraciones
 - No tienen partes en movimiento
 - Mantenimiento simple
 - Resistencia a sobre cargas
 - Rangos amplios para mediciones de presión.
- Desventajas:
- Requieren suministro de voltaje constante
 - Requieren lectores de salida eléctricos
 - La resistencia a la corrosión está limitada al acero inoxidable y unas cuantas aleaciones
 - Temperatura limitada a 315°C.
 - Costos altos y moderados.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO 11

- 1.- J. P. Holman: "EXPERIMENTAL METHODS FOR ENGINEERS", 2a., Ed., Mc-Graw-Hill Book, Co.
- 2.- Ashcroft: "DATOS DE INGENIERIA", Catálogo general.
- 3.- Ashcroft: "GAUGES" Catálogo 1020.
- 4.- Foxboro: "TECHNICAL INFORMATION" Bolletín C-4-110.
- 5.- Fispo: "PRESSURE MEASURING ELEMENTS" Bolletín 11-A-10.
- 6.- Rosemont: "CAPACITIVE PRESSURE SENSORS" Bolletín 1632.
- 7.- H. E., Coisson: "INSTRUMENTATION IN INDUSTRY", John Wiley & Sons, Inc. 1975.
- 8.- BILI ELECTRONICS: "PRESSURE STRAIN", Bolletín 001 1980.
- 9.- H. E. Coissor: "ELECTRONIC MEASURING INSTRUMENTS", McGrawHill, 1961.
- 10.- Kyowa: "ELECTRIC PRESSURE GAUGE", Bolletín IMP/B.
- 11.- IMP: "CURSO DE INSTRUMENTOS", Subdirección de capacitación IMP.
- 12.- D. M., Considine: "PROCESS INSTRUMENTATION", Chemical Engineering, January, 1968.
- 13.- DYNAC: "MACHINERY CONDITION SURVEILLANCE", s/n.

C A P I T U L O I I I

CAPITULO III

ELEMENTOS DE MEDICION DE TEMPERATURA

Elementos de Medición de Temperatura.-

- 3.1 Termómetros industriales
 - 3.1.1 Termómetros industriales de vidrio
 - 3.1.2 Termómetros bimetalícos
- 3.2 Fundas para termómetros industriales
- 3.3 Sistemas termales llenos
 - 3.3.1 Sistema termal clase I
 - 3.3.2 Sistema termal clase II
 - 3.3.3 Sistema termal clase III
 - 3.3.4 Sistema termal clase V
 - 3.3.5 Bulbos. Selección e instalación
 - 3.3.6 Tabla comparativa de sistemas termales llenos
- 3.4 Termopares
 - 3.4.1 Tipos de termopares
 - 3.4.2 Dispositivos para medición de FEM producida por termopares
 - a) Milivólmetro
 - b) Potenciómetro eléctrico
 - 3.4.3 Elementos de un termopar
 - a) Cable de extensión
 - b) Tubos protectores
 - c) Aisladores cerámicos
- 3.5 Pirómetros por radiación
- 3.6 Pirómetros ópticos
- 3.7 Termistores
- 3.8 Termómetros de resistencia
- 3.9 Características de los dispositivos para medición de temperatura
- 3.10 Ventajas y limitaciones de los diferentes sensores de temperatura.

CAPITULO III

ELEMENTOS DE MEDICION DE TEMPERATURA

Quizá la más importante de las variables a medir y controlar en algún proceso sea la temperatura.

Existen una gran variedad de dispositivos para éste fin y para seleccionar el más adecuado deberán tomarse en consideración algunos factores como son:

- 1) Rango
- 2) Exactitud
- 3) Velocidad de respuestas

3.1 TERMOMETROS INDUSTRIALES.-

Los termómetros industriales que se utilizan con mayor frecuencia para indicar la temperatura de algún proceso en la industria son de dos tipos: 1) De vidrio y 2) Bimetálicos

Cada uno de ellos tendrá ciertas características que lo hará más apropiado en algún proceso específico.

3.3.1 Termómetros Industriales de Vidrio.-

Es uno de los instrumentos más simples para la medición de temperatura, funciona en base en el principio de la expansión volumétrica de un líquido.

La parte inferior del termómetro consta de un bulbo que contiene la mayor parte del líquido, el cual al calentarse se expande, obligándose a subir por el tubo capilar, en el cual se encuentra marcada una escala apropiada, de esta manera tendremos una indicación de la temperatura.

Los líquidos más utilizados son: el alcohol y el mercurio. El alcohol tiene la ventaja de poseer mayor coeficiente de expansión que el mer-

curio, pero por tener un punto de ebullición bajo, su uso se limita a mediciones de baja temperatura. Por otro lado el mercurio no se utiliza a temperaturas menores de -32°C . que es su punto de fusión.

En algunos casos debido a que el coeficiente de expansión del líquido varía con la temperatura, el tubo de vidrio se puede llenar con un gas inerte, de tal manera que al elevarse la columna se ejerza más presión.

Es importante hacer notar que la expansión registrada por el termómetro es la diferencia entre la expansión del líquido y la del vidrio. Esta diferencia no depende únicamente de la transferencia de calor del medio al bulbo, sino que, está también en función de la conducción del tubo de vidrio al bulbo, por lo tanto mientras más conducción haya a través del tubo, respecto a la transferencia de calor del medio por medir se tendrá mayor error. Para tomar en cuenta dichos efectos de conducción, los termómetros se calibran a cierta profundidad de inmersión. Los termómetros de mercurio de alta calidad tienen marcada la escala sobre el vidrio y cuentan con una marca que señala la profundidad de inmersión.

Como se mencionó anteriormente, este tipo de termómetros nunca se usan para control.

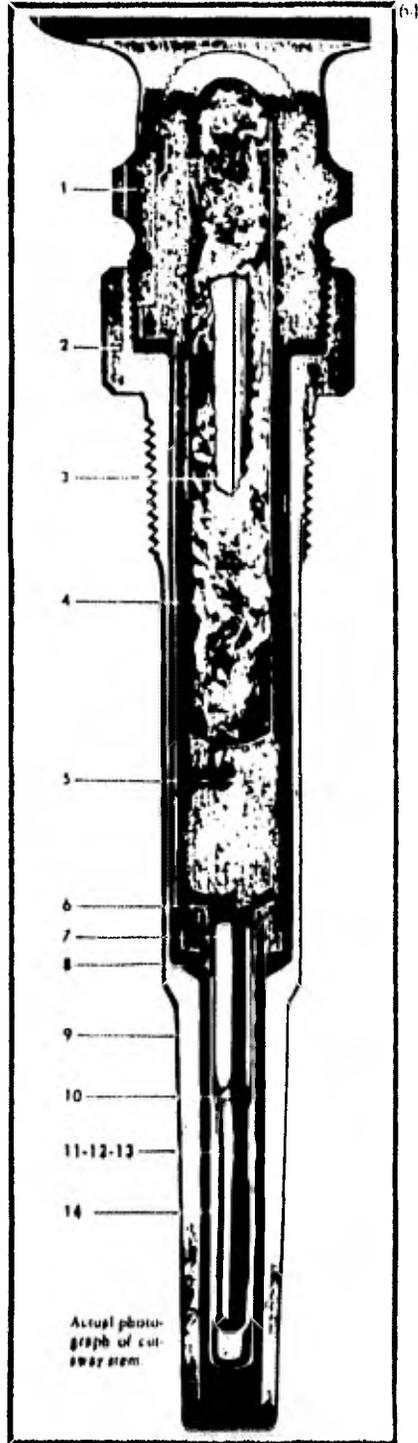
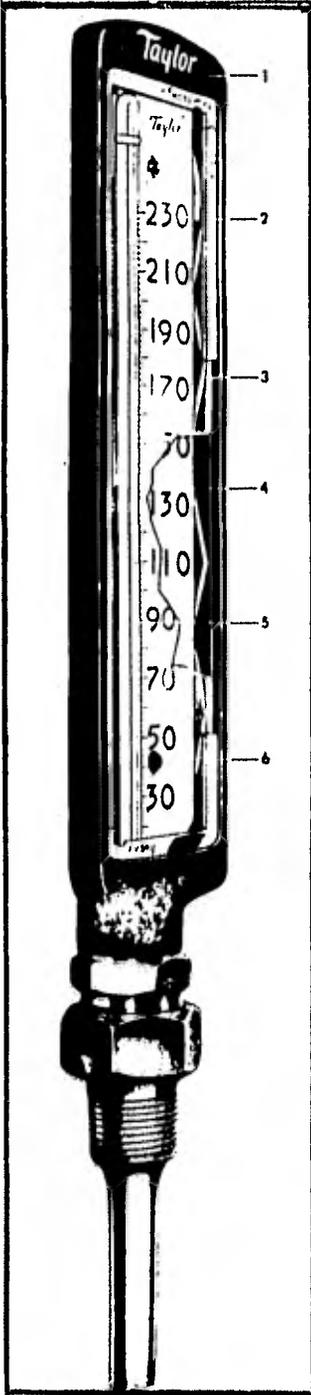
Principales Partes y Características de un Termómetro Industrial.-

- 1) Caja: A prueba de humos y construída de una sola pieza de aluminio,
- 2) Bisel: Recubierto de cromo para resistir a la corrosión, construído de dos piezas interconectadas que detienen un vidrio protector transparente contra un resorte de tensión ondulado.

- 3) Resortes: Están asegurados a la caja para proporcionar una construcción rígida, que proteja al mecanismo de vibraciones, humos y gases.
- 4) Tubo Capilar: El cristal está tratado para evitar cambios de volumen en el bulbo y en la columna después de que el instrumento ha sido instalado.
- 5) Escala: Es individualmente graduada en cada columna.
- 6) Graduación: La legibilidad es buena debido a que los números contrastan con el fondo y se notan con claridad.

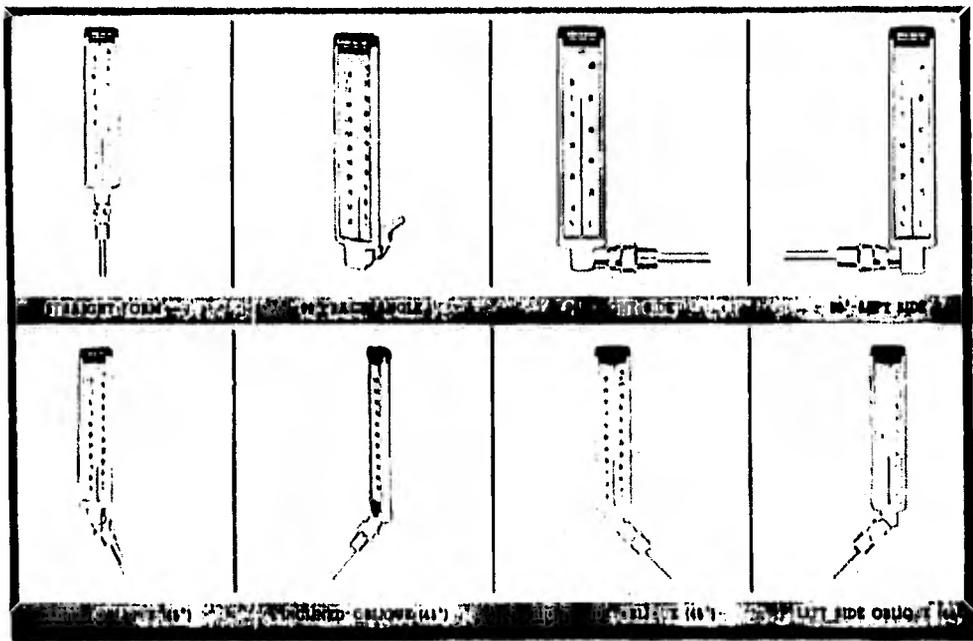
Partes y Características del Vástago de un Termómetro Industrial.-

- 1) Rosca Giratoria: Gira libremente sobre el vástago del termómetro para permitir una instalación rápida en una funda separada o en una conexión, sin hacer girar el termómetro.
- 2) Funda: Puede instalarse permanentemente en el aparato para protegerlo de la corrosión, erosión o contaminación.
- 3) Capilar: El diámetro de pequeño calibre del capilar reduce al mínimo el volumen del líquido dentro del tubo y contribuye a eliminar los errores debidos a la inmersión variable.
- 4) Asbesto: Proteje al vástago de rupturas y aísla la columna de la caja, para disminuir la conducción de calor externo al bulbo.
- 5) Empaque: Se coloca forzado alrededor del tubo y sirve para evitar errores causados por el deslizamiento del tubo.



- 6) Sello: Proporciona un tapón positivo para evitar que el mercurio escape de la cámara del bulbo en caso de que se rompa.
- 7) Tubo Capilar: Las rupturas del tubo se minimizan recociendo perfectamente el vidrio para eliminar todos los esfuerzos.
- 8) Cámara de Expansión: Da el espacio suficiente para la expansión normal del mercurio.
- 9) El vástago tiene forma ahusada para ajustarse con precisión dentro de la cubierta independiente, que también tiene forma ahusada, para asegurar la máxima conducción del calor.
- 10) La unión entre el bulbo y el tubo capilar, asegura el libre movimiento de la columna de líquido.
- 11-13) Para una mayor precisión, se envejecen los bulbos, para evitar cambios en el volumen después de su instalación. Cuentan con paredes uniformes y delgadas construidas de vidrio especial para evitar rajaduras debidas a los cambios de temperatura.
El diseño empleado permite la máxima velocidad de respuesta a las variaciones de temperatura.
- 14) El medio conductor permite una transferencia rápida de calor desde la funda hasta el bulbo del termómetro. Esta cámara no tiene humedad alguna, lo que evita que se desarrolle una presión.

Los termómetros industriales pueden tener diferentes ángulos en el vástago, ya sean posteriores o laterales, los ángulos más comunes son 45° y 90°. También es común encontrar termómetros del tipo "multiángulo" que pueden ajustarse a cualquier posición.



DIFERENTES POSICIONES DEL VASTAGO EN TERMOMETROS INDUSTRIALES

Longitudes de termómetros Industriales de Vidrio.-

Para la escala se encuentran de: 7", 9" y 12".

Para los vástagos de: 3.5", 6", 8", 12", 18", 24", 30" y 36". Los materiales más utilizados son: Bronce, acero al carbón y acero inoxidable 316.

La selección del tamaño del vástago dependerá del lugar en donde se instale, de tal forma que se logre que el bulbo se encuentre sumergido adecuadamente en el medio que se desea medir para evitar error de inmersión, al mis

mo tiempo que deberá quedar a la altura del punto de flujo máximo para asegurar una transferencia de calor más rápida y con esto, una respuesta más rápida. Es importante recordar que un termómetro de este tipo solo indica la temperatura del fluido en contacto con su bulbo.

3.1.2 Termómetros Bimetálicos.-

El elemento sensor de un termómetro bimetálico, está compuesto de dos tiras de metal, pegadas, que tienen diferentes coeficientes de expansión térmico. Si, el elemento bimetálico se expone a una temperatura mayor que a la que fué unido, se doblará en una dirección y en caso de - que se exponga a una menor, se doblará en dirección contraria.

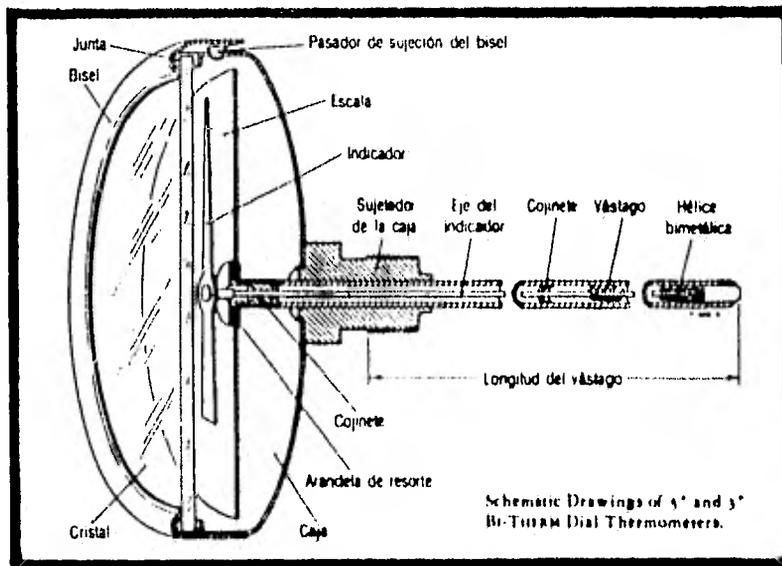
Los materiales más utilizados para la fabricación del elemento bimetálico son: Invar (níquel y hierro), como metal de expansión bajo y latón (níquel y cromo) como metal de expansión alta, aunque también son utilizados el Inconel 702 y SST.

Los termómetros bimetálicos industriales se construyen casi siempre con el bimetálico arrollado en forma de bobina helicoidal, con el metal de mayor coeficiente de expansión en el lado externo. Al aplicar calor en el vástago del termómetro, la bobina se arrolla y este movimiento hace que el eje y el indicador giren. Con el diseño apropiado de la bobina arrollada en forma helicoidal se puede obtener un movimiento angular adecuado con una elongación muy pequeña de la helice.

Los termómetros bimetálicos no se recomiendan en servicio continuo en temperaturas superiores a 430°C ó mayores a 542°C en servicio intermitente.

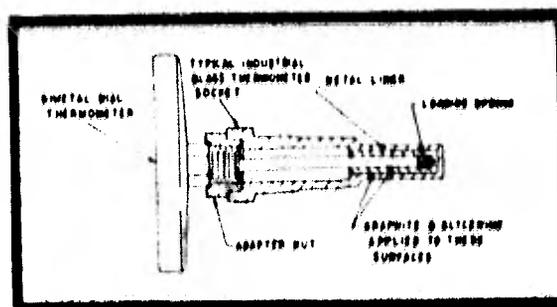
Las longitudes comerciales de los vástagos son de 2.5" a 36", fabricados generalmente en acero inoxidable.

Los diámetros comerciales de las carátulas son de: 3" y 5".



3.2 FUNDAS PARA TERMOMETROS INDUSTRIALES.

Generalmente, cuando el vástago de un termómetro se introduce en algún fluido corrosivo o se instala en lugares donde el fluido a medir es tóxico o venenoso, es común utilizar fundas como la mostrada a continuación:



Para una mejor unión y transferencia entre el metal de ajuste y el cuerpo de la funda debe ponerse glicerina grafitada,

Los efectos que ocasiona en la medición de temperatura la utilización de fundas en los vástagos son:

- 1) Disminuye la velocidad de respuesta del termómetro de 3 a 10 veces.
- 2) Aumenta las pérdidas por conducción, pero se pueden minimizar con aislamiento adecuado.
- 3) El acero inoxidable 316 es el material con menor conducción.

3.3 SISTEMAS TERMALES LLENOS.-

Es una de las formas para indicación y control que es utilizado con mayor frecuencia en la industria.

Consiste de un circuito cerrado, formado por un líquido, gas o vapor que puede expandirse y el cual se encuentra contenido dentro de un sistema totalmente sellado. Según el fluido con el que se ha llenado el bulbo, - al haber un cambio de temperatura, habrá un cambio en el volumen y/o la presión del fluido.

Este cambio, en volumen y/o presión es transmitido a través de un tubo capilar hacia el receptor (que generalmente es una espiral o hélice) el cual es sensible a estos cambios.

Clasificación de la Sama para los Sistemas Termale Llenos.-

La clasificación de la SAMA (Scientific Apparatus Makers Association) se basa fundamentalmente en:

- 1) El efecto que opera el elemento receptor, esto es, por efecto volumétrico o por presión.
- 2) Por el material de expansión.

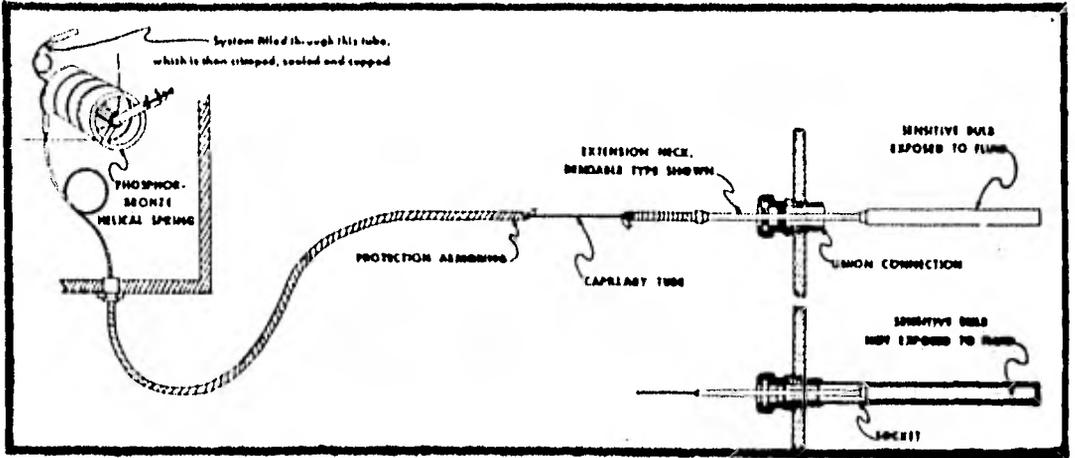


DIAGRAMA QUE MUESTRA LAS PARTES ESENCIALES DE UN SISTEMA THERMAL LLENO



ILUSTRACION DE UN HELICOIDAL ESTANDAR F & P, DE 5 VUELTAS Y SIN COMPENSADOR.

EL METODO DE ALTO MECANICO DEL HELICOIDAL A MAXIMA ESCALA ES OBSERVADO CLARAMENTE.

LA PLACA "X" SE PUEDE MOVER LIBREMENTE EN SENTIDO CONTRARIO A LAS MANECILLAS DEL RELOJ HASTA QUE TOCA EL DISCO AJUSTABLE "Y".

De este modo tendremos:

CLASE	PRINCIPIO	MATERIAL DE EXPANSION
I	Volumétrico	Líquido
II	Presión	Vapor de líquido
III	Presión	Gas
IV	Volumétrico	Mercurio

3.3.1 Sistemas Termales Clase I.-

Principio de Operación.-

En éste caso, el medio de llenado es un líquido; generalmente un tipo de Kerosina, que al variar la temperatura se expandirá provocando que el elemento sensible (generalmente algún tipo de Bourdon) dé un cambio en la indicación.

Características.-

- 1) Su movimiento es lineal debido a que la expansión volumétrica es también lineal.
- 2) El tamaño del bulbo depende del Span en relación inversa.
- 3) No es afectado por cambios de la presión barométrica.
- 4) No necesita corrección por elevación, por ser éste un sistema completamente lleno.
- 5) Es un sistema muy potente (torque).
- 6) Requiere compensación por cambios de temperatura ambiente.

Aplicaciones.-

- 1) Cuando se requiere medir temperaturas que crucen la temperatura ambiente.
- 2) Cuando se requiera medir temperaturas que varíen grandemente.
- 3) Cuando se prefiera una gráfica uniforme.

Subdivisiones.-

Dependiendo del sistema de compensación se tendrá:

- A) Sistema termal clas- 1-A
- B) Sistema termal clase 1-B

Sistema Termal Clase 1-A.-

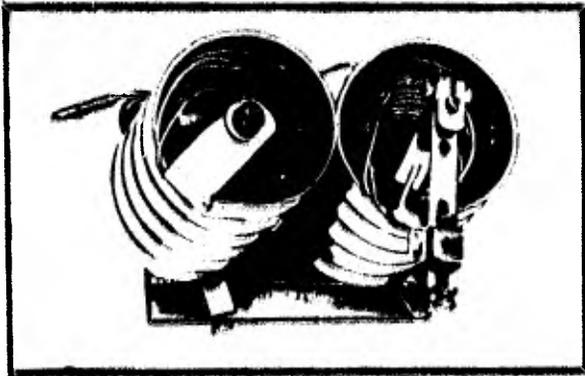
Este es un sistema totalmente compensado, esto es; compensado en la caja y a lo largo de capilar. Este sistema consiste del sistema bulbo-capilar-helicoidal (ó espiral) ya descrito más otro helicoidal (ó espiral) con su capilar pero sin bulbo. Ambos sistemas son exactamente iguales y llenados con el mismo líquido. El helicoidal de medición flota sobre una base, cuya posición es gobernada por el helicoidal de compensación. Los dos tubos con sus helicoidales tienen el mismo volumen de tal modo que las variaciones de temperatura ambiente en la caja del instrumento y a lo largo del capilar producirán iguales movimientos de ambos helicoidales. Tales movimientos se nulifican uno al otro así que solo el movimiento producido por la variación de temperatura del bulbo actuará el registrador. Esto es:

Movimiento de medición = expansión del bulbo + expansión en el capilar + expansión del helicoidal.

Movimiento de compensación + expansión en el capilar + expansión en el helicoidal.

Restando estas ecuaciones (como sucede mecánicamente) nos queda:
 Movimiento de salida = Expansión del bulbo.

Este sistema está limitado a 100 ft de capilar.



SISTEMA TOTALMENTE COMPENSADO, CON HELICOIDAL Y CAPILAR POR DUPLICADO.

Sistema Termal Clase I-B.-

Este es un sistema compensado unicamente en la caja. La compensación consiste en un helicoidal (6 espiral) bimetalico que responde a los cambios de temperatura en la caja. El movimiento de éste elemento se opone al de medición de tal manera que el movimiento resultante sea el provocado por la expansión en el bulbo. Para que la indicación de este sistema sea exacta, la temperatura del capilar deberá ser la misma que la de la caja, por eso este sistema está limitado a 20 ft., de longitud de capilar, ya que en distancias mayores la probabilidad de que exista una diferencia apreciable de temperaturas es mayor.

Cuando se tiene un sistema compensado unicamente en la caja se tiene un error, que puede ser expresado en porciento de la escala por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Error} = \text{longitud del capilar} \times \frac{(\text{temp. de la caja} - \text{tem. capilar})}{\text{constante de diseño.}}$$

Con la longitud en ft., y las temperaturas en Fahrenheit la constante para un sistema estandar F & P es 400.

Con la longitud en metros y las temperaturas en Centígrados la constante es 68.



ELEMENTO COMPENSADO EN LA CAJA,
HELICOIDAL CON CINCO VUELTAS -
MOSTRANDO LA ESPIRAL BIMETALICA

Selección para Sistemas Clase I.

La selección entre un sistema clase IA ó un I-B depende básicamente de dos factores:

- 1.- Longitud del capilar, Mayor o menor de 6.1 metros.
- 2.- Temperatura ambiente, igual ó diferente entre caja y capilar.

Rangos.-

Clase I - A - 184.4° C.	a	315.5°C.
Clase I - B - 128.8° C.	a	315.5°C.
Span mínimo.		5° C.
Span máximo.		315.5°C.

Temperatura Ambiente Límite.-

	CLASE I - A	CLASE I - B
Caja	-34.4 a 65.5°C.	-34.4 a 65.5°C.
Capilar	-73.3 a 93.3°C.	-34.4 a 65.5°C.

3.3.2 Sistemas Termales Clase II.-

Principio de Operación.-

Se utiliza un líquido volátil como medio de llenado y existe una condición de equilibrio a cualquier temperatura en particular, esto significa que están presentes el estado líquido y el de vapor, y que la presión del vapor es exactamente la adecuada para evitar un cambio posterior de líquido a vapor. Conforme aumenta la temperatura la mayor parte del líquido se transforma en vapor y ejerce más presión en el tubo Bourdon provocándole una deformación. Por el contrario cuando la temperatura desciende, el vapor pasa al estado líquido y la presión disminuye.

Características.-

- 1) Es el sistema más simple y el más económico.
- 2) Su velocidad de respuesta es la mayor.
- 3) No es afectado por cambios de temperatura ambiente.
- 4) Su gráfica no es lineal, debido a las curvas de vaporización.
- 5) No es independiente de la posición del bulbo, con respecto a la caja y al elemento.

LLENADOS ESTÁNDAR

PUNTO DE VAPORIZACIÓN

Cloruro de metilo	- 23.82 °C.
Butano	- 0.55 °C.
Eter etílico	34.44 °C.
Propano	- 42.22 °C.
Tolueno	111.11 °C.
Acetona	56.11 °C.
Agua	100.00 °C.

Subdivisiones.-

Dependiendo de la temperatura del bulbo con relación al resto del sistema tenemos:

- A) Sistema termal clase II-A
- B) Sistema termal clase II-B
- C) Sistema termal clase II-C

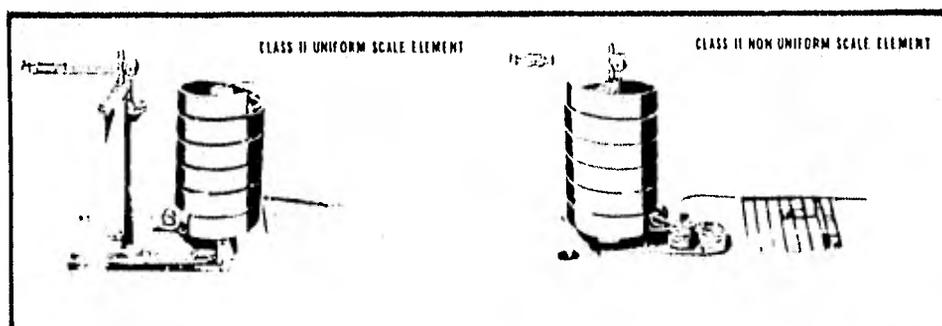
Dependiendo de si el sistema ha sido doblemente llenado, con líquido volátil y no volátil.

- D) Sistema termal clase II-D

Sistema Termal Clase II -A.-

Es un sistema con temperatura de bulbo superior a la del resto del sistema, esto es, trabaja por encima de la temperatura ambiente del capilar y la caja,

Este sistema de operación tiene líquido en el capilar y en el elemento, con vapor y líquido en el bulbo. Será necesario hacer correcciones por efectos de carga hidrostática en la transmisión, cuando el bulbo se localice a un nivel superior de 1.8 metros del elemento. La máxima longitud del capilar es de 45 metros. La clase II - A no está diseñado para trabajar a temperaturas menores a la ambiente.



Sistema Termal Clase II - B.-

Sistema con temperatura de bulbo inferior a la temperatura ambiente en el elemento y la caja.

En operación un clase II-B, tendrá vapor en el elemento y el capilar, con el bulbo con vapor y poco líquido. En este sistema, tanto el elemento como el capilar deberán tener mayor temperatura que el bulbo. No requiere corrección por desnivel entre el bulbo y la caja, la máxima longitud del capilar son 45 metros.

Sistema Termal Clase II - C.-

Este sistema trabaja por encima y por debajo de la temperatura am-

biente, puede trabajar como el II-A (líquido en la transmisión) ó como el II-B (vapor en la transmisión. El bulbo deberá colocarse al mismo nivel que la caja ya que si existe diferencia de altura, mentirá cuando trabajé como II-A y si se corrige el desnivel, mentirá cuando trabajé como II-B, (este sistema trabaja alternativamente, sobre y bajo la temperatura ambiente). El bulbo es el mayor de los de la clase II ya que puede presentarse el caso de que el bulbo quede lleno totalmente de líquido y además vapor.

Debido al brinco que se presenta al cruzar la temperatura ambiente, este sistema se utiliza únicamente en indicadores y nunca en controladores.

La longitud máxima del capilar es de 45 metros.

Sistema Termal Clase II - D.-

Este sistema esta llenado tanto con líquido no volátil (agua) como con líquido volátil. El líquido no volátil sirve como medio de transmisión ya que al aumentar la presión en el líquido volátil comprimirá al otro.

Únicamente se puede montar verticalmente (cuando más a 15° de la vertical) ya que si se voltea el líquido volátil se irá al elemento (menor S. G.) y cicleará cada vez que cruce la temperatura ambiente.

Este sistema es poco usual ya que es más conveniente utilizar un sistema lleno de líquido.

Selección para Sistemas Clase II.-

La selección entre alguna de estas clase, como es fácil comprender, dependerá básicamente de la temperatura a medir.

Los límites de temperatura para esta clase es de -258 °C. a 315 °C.

5.3.3 Sistemas Termales Clase III.-

Principio de Operación.-

Consiste de un elemento de medición de presión conectado por un tubo capilar a un bulbo sensible a la temperatura el sistema ha sido evacuado y después llenado bajo presión con un gas inerte, usualmente nitrógeno, y ya que la presión de un gas confinado es proporcional a su temperatura absoluta el elemento de medición se puede calibrar en términos de temperatura.

Este es la clase más débil. La relación bulbo-transmisión es 40/1., para que los cambios de temperatura ambiente en el capilar sean insignificantes en comparación con los cambios en el bulbo. Los bulbos pueden construirse en forma de bobinas.

Características.-

- 1) Este sistema permite Spans mayores, 538°C.
- 2) Al igual que el sistema clase I, mide el promedio de temperatura a lo largo del bulbo.
- 3) Requiere, debido a ser el sistema menos potente, un elemento helicoidal modificado; con pocas vueltas y gran diámetro.
- 4) Puede ser aplicado en grandes rangos de temperatura, sus actuales límites son: - 267.8 °C, a 537.7°C., con un sobre rango de protección de 650°C.
- 5) El sistema es muy simple en su construcción y por lo tanto relativamente económico.

Sin embargo, este sistema tiene dos características poco deseables que deben ser consideradas.

- 6) Es el sistema menos potente.
- 7) El volumen del bulbo es grande en comparación con el volumen combinado del capilar y el elemento de medición.

Aplicaciones de los Sistemas Clase III.-

Se utilizan generalmente donde los rangos de temperatura a medir excedan los límites de los sistemas de presión de vapor ó llenos de líquido, por ejemplo por debajo de -184°C . y sobre 315°C .

Los sistemas de presión de gas utilizan como gases de llenado generalmente:

Nitrógeno	de -128°C .	a 537°C .
Inconel-Argon	de 537°C .	a 760°C .
Helio	de -268°C .	a -129°C .

Estos gases son utilizados también por motivos de seguridad ya que en casos de fuga no provocan daño por ser inertes.

La inmersión de un bulbo clase III es fija.

Subdivisiones.-

Al igual que la clase I, tenemos dos subdivisiones dependiendo de la compensación por cambios en temperatura ambiente.

Sistema Termal Clase III - A.-

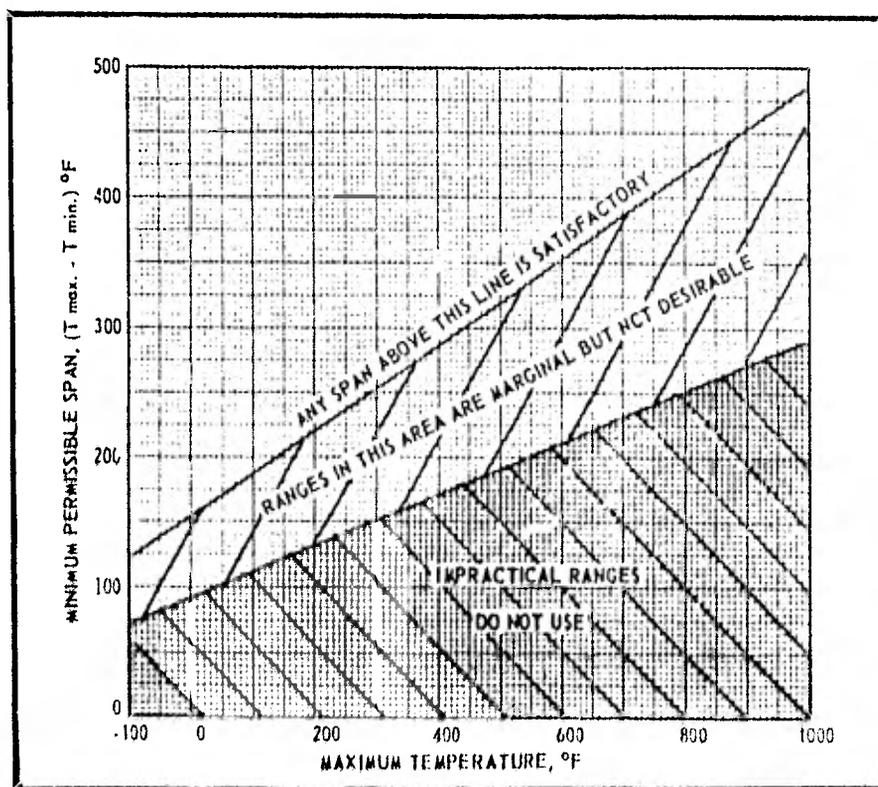
Si capilar y caja están a distinta temperatura, es necesario com-

pensar por cambios de temperatura ambiente a lo largo del capilar y en el elemento. El capilar de compensación es exactamente igual al de medición, los elementos tienen el mismo sentido de enbobinado, pero uno está anclado en el fondo y otro en la parte superior, de modo que sus efectos se anulen.

Sistema Termal Clase III-B.-

Si el capilar y la caja están constantemente a la misma temperatura, no es necesario compensación en el capilar, por lo que basta con colocar un bimetalico en sentido opuesto al helicoidal, para lograr la compensación necesaria.

La longitud del capilar está limitado a 33 metros.



GRAFICA PARA DETERMINAR EL SPAN MÍNIMO PARA EL TIPO DE TUBO DE TUBO DE GAS.

3.3.4 Sistemas Termales Clase Jy.-

Su principio de operación es similar al clase I, pero el medio de llenado es mercurio.

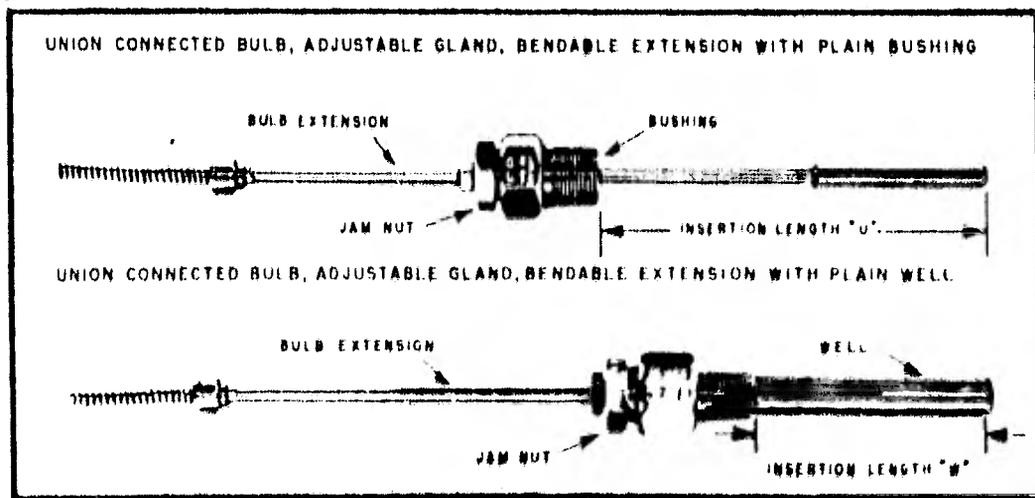
Este sistema es poco utilizado ya que:

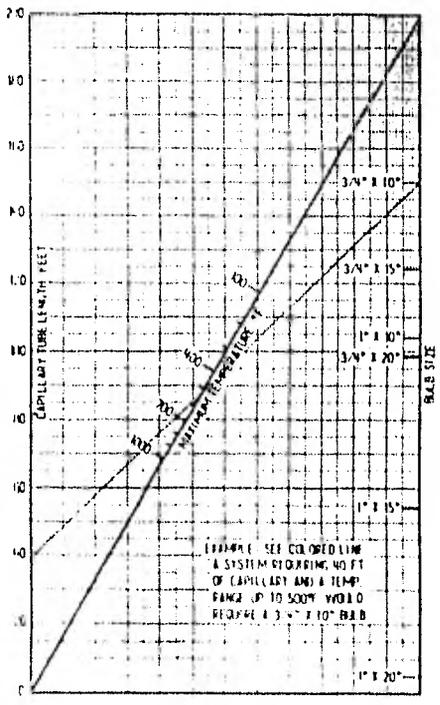
- a) El mercurio es caro.
- b) Es tóxico a los humanos.
- c) Contamina los productos en caso de fuga.
- d) Requiere grandes presiones de llenado.

3.3.5 Bulbos. Selección e Instalación.-

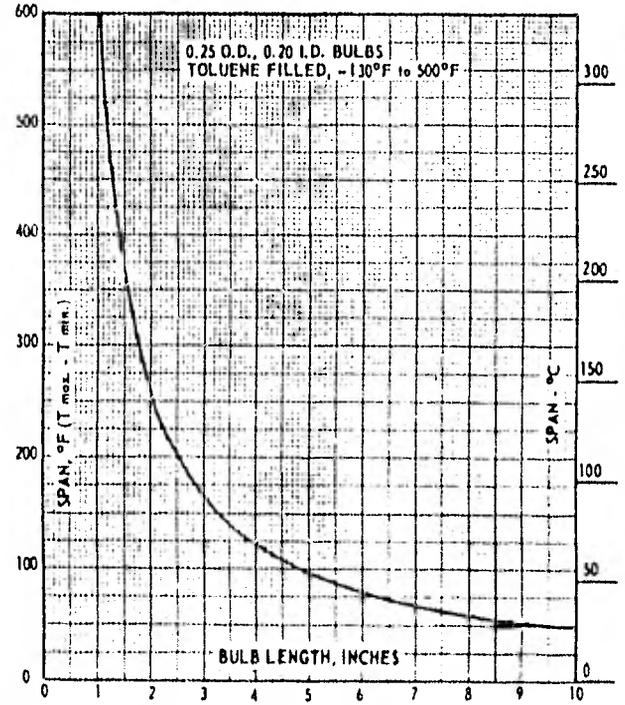
La selección del tamaño y lugar de instalación de un bulbo sensitivo de temperatura es vital para una buena medición.* Esto nos permitirá respuestas más rápidas y el costo será menor que al utilizar fundas. Siempre se debe localizar el bulbo en el sitio donde la temperatura sea representativa del proceso y donde la velocidad sea adecuada para una buena transferencia de calor. Deberá evitarse los errores por inmersión del bulbo, sumergiendo mayor o menor parte de él. Utilice bulbos capilares o bulbos promedio en servicio de gas o vapor cuando la velocidad sea baja. Los efectos de radiación siempre deberán ser considerados.

1*) Siempre que sea posible el bulbo deberá ser instalado desnudo.

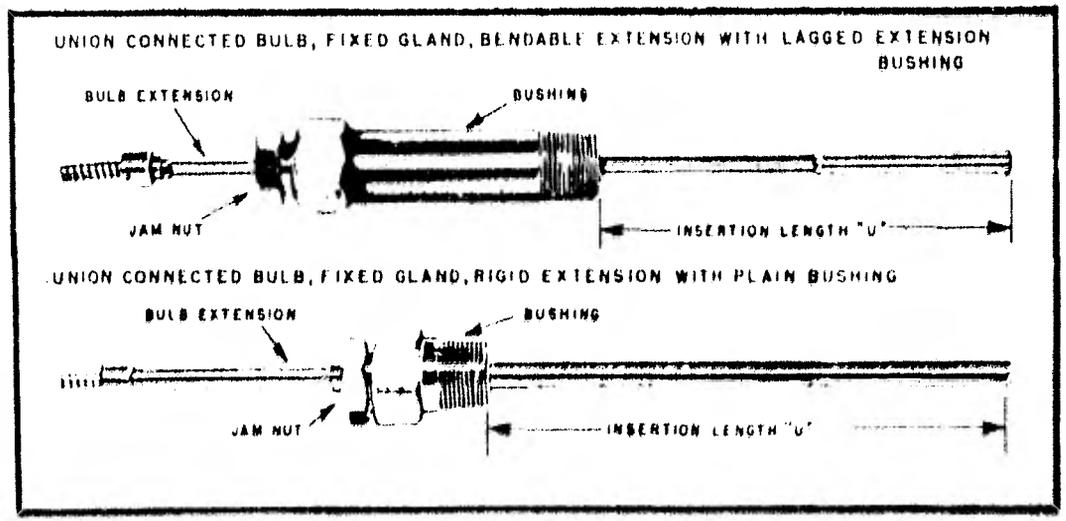


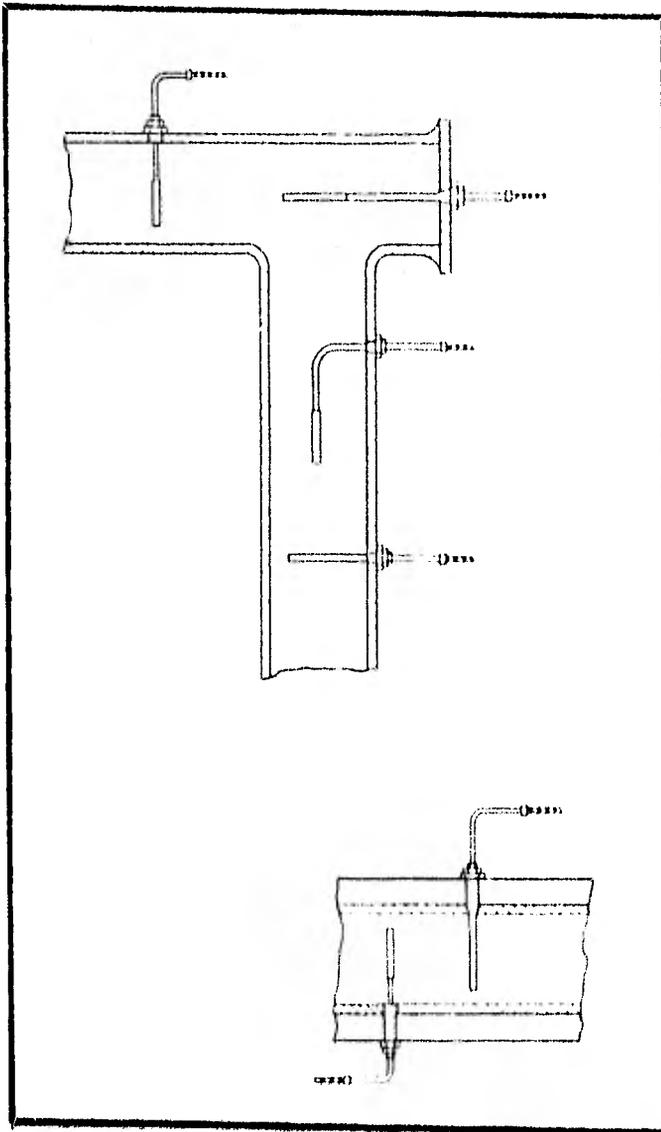


GRAFICA PARA LA SELECCION DEL TAMAÑO DEL BULBO CLASE III



GRAFICA PARA LA DETERMINACION DE LA LONGITUD DEL BULBO CLASE III





DISTINTAS FORMAS DE COLOCAR UN BULBO EN UNA TUBERIA

3.3.6 Tabla Comparativa de Sistemas Termos Llenos.-

SISTEMA	I		II	III		V	
LLENADO	LIQUIDO		LIQUIDO VOLATIL Y SU VAPOR	GAS INERTE		MERCURIO	
RANGO	-180 a 300 °C.		-45 a 315 °C.	- 210 a 540 °C.		-35 a 540 °C.	
SPAN	ANGOSTO A AMPLIO		ANGOSTO	AMPLIO		ANGOSTO A AMPLIO	
ESCALA	UNIFORME		CONGESTIONADA ABAJO ABIERTA ARRIBA	UNIFORME		UNIFORME	
BULBO IN.	1/4 X VARIABLE		5/8 X 6	3/4 X 10		1/2 X VARIABLE	
EXACTITUD	BUENA	MEJOR	BUENA EN RANGO ALTO	BUENA		BUENA SI ES SUFICIENTE RAPIDO	
COMPENSACION	CAJA	TOTAL	NINGUNA	CAJA	TOTAL	CAJA	TOTAL
CAPILAR FT	30	100 ó +	menor a 200	30	100 ó +	30	100 ó +
AJUSTE POR ELE VACION	NO		SI	NO		NO	
ERROR BAROME- TRICO	NINGUNO		MINIMO	MINIMO		NINGUNO	
POTENCIA	LA MAYOR		BUENA	MUY DEBIL		EXCELENTE	
VELOCIDAD	RAPIDA		LA MAS RAPIDA	LA MAS LENTA		RAPIDA	
COSTO	CARO		EL MAS BARATO	MEDIO		MUY CARO	

NOTA: LOS DATOS PRESENTADOS EN ESTA TABLA SE REFIEREN A SISTEMAS PRODUCTOS COMERCIALMENTE.

3.4 TERMOPARES.

La medición de temperaturas que oscilan entre -185 y más de 600°C se logran normalmente mediante termopares.

El termopar consiste de dos conductores metálicos diferentes, unidos en un extremo denominado unión caliente o detectora y que se encuentran conectados a algún instrumento de FEM, o sea, un milivólmetro potenciométrico en el extremo frío de los conductores. La FEM medida se compara normalmente con una de referencia, por ejemplo, el punto de fusión del hielo.

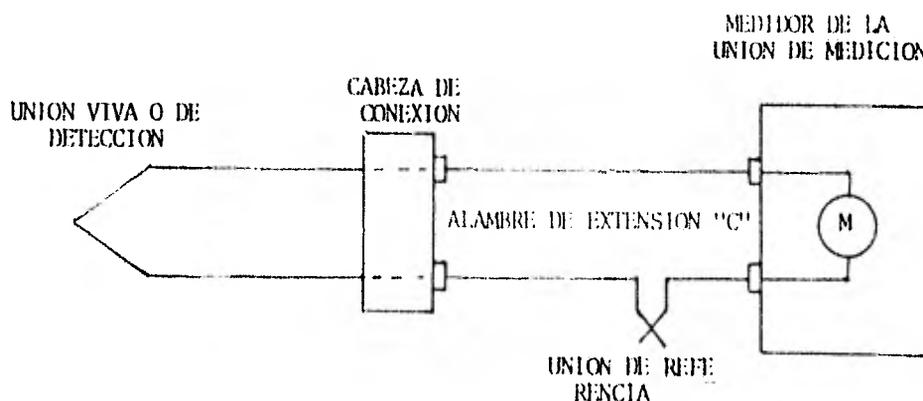


DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE TERMPAR TIPICO.

El circuito básico mostrado, contiene todos los elementos esenciales para llevar a cabo una medición de temperatura. El termopar T presenta los conductores diferentes A y B unidos en la unión caliente hasta la unión de medición, que incluye a la unión de referencia y al medidor M . El medidor M mide la diferencia de FEM entre la unión caliente y la de referencia, $T - T_r$. Esto muestra que los termopares son, en realidad, detectores que miden temperaturas diferenciales, o sea, miden la diferencia de temperatura entre la unión caliente y la de referencia.

Principios Fundamentales.-

Como se mencionó anteriormente, al unirse dos metales diferentes y calentarse esta unión, se produce una FEM que será función de la temperatura de la junta. Este fenómeno se conoce como efecto Seebeck - (debido a su descubridor Thomas J. Seebeck). Más tarde se descubrió que dicho efecto se debía a dos causas independientes, aparentemente. Cada una de ellas recibió el nombre de su descubridor. Hoy se conoce como efecto Peltier (debido a Jean C. Peltier 1785-1845) y efecto Thomson (debido a William Thomson más tarde lord Kelvin).

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 en forma uniforme.

Efecto Thomson.-

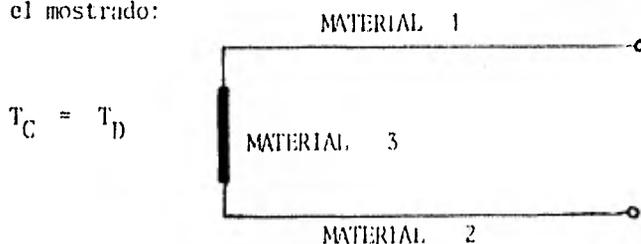
La porción de la FEM total de un termopar, que existe debido a una diferencia de potencial en una sección de conductor que tiene un gradiante de temperatura, es la FEM de Thomson. Esto significa que existe un potencial en un alambre de material homogéneo cuando uno de los extremos está a una temperatura mayor que el otro.



$$T_1 \neq T_2$$

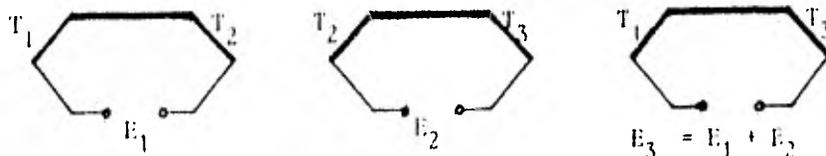
Leyes de Circuitos Termoeléctricos.-

- 1) Si se coloca un tercer metal en un circuito termoeléctrico como el mostrado:



la FEM neta del circuito no se verá alterada, siempre y cuando, las nuevas conexiones se mantengan a la misma temperatura, a es ta ley se le conoce como Ley de los Metales Intermedios.

- 2) Considerando los siguientes arreglos:



Los circuitos de termopares están construidos con los mismos ma teriales, pero operan entre dos límites de temperatura diferentes. El circuito A, genera una FEM de E_1 , entre las temperaturas de T_1 y T_2 ; el circuito B, genera una FEM de E_2 , entre T_2 y T_3 . La ley de temperaturas intermedias establece que el mismo circuito generará una FEM de: $E_3 = E_1 + E_2$, cuando opere entre las temperaturas T_1 y T_3 como se aprecia en la figura C.

Selección de Alambres para Termopar.-

La selección se hará con respecto a los siguientes requisitos. Desde el punto de vista ideal el material debe tener:

- 1) Las FEM de Thomson de ambos alambres aditivas en el circuito.
- 2) Las FEM de Thomson de variación directa con la temperatura.
- 3) Las FEM de Peltier que desarrollen potenciales en la unión caliente y que estén en la misma dirección de las FEM de Thomson.
- 4) Las FEM de Peltier que varíen directamente con la temperatura.
- 5) Desarrollo de una FEM relativamente alta. La FEM más grande producida por un termopar de tipo comercial es de 50 mV.
- 6) Debe tener resistencia a la corrosión, oxidación, reducción y cristalización.
- 7) Costo.

Para ayudar a esta selección se presentan las siguientes tablas:

Tolerancia de Exactitud de los Alambres para Termopar.-

TIPO	RANGO DE LA TEMPERATURA	LIMITE DE ERROR
T	- 185 a - 60	+/- 2%
	- 60 a 90	+/- 0.75 °C
	90 a 375	+/- 0.75 %
J	- 15 a 430	+/- 2 °C
	430 a 750	+/- 0.5 %
E	- 15 a 300	+/- 1.5 °C
	300 a 550	+/- 0.5 %
K	- 15 a 275	+/- 2°C
	275 a 1250	+/- 0.75 %
R o S	- 15 a 650	+/- 1.5°C
	650 a 1500	+/- 0.25 %

Límites de Temperatura para Alambres de Termopar.-

TIPO DE TERMOPAR	T. MIN.	TEMPERATURAS MAXIMAS					*
		8	14	20	24	30	
COBRE-CONSTANTANO	- 185	-	-	260	205	205	
FIERRO-CONSTANTANO (J)	- 17	760	590	480	370	370	
CRÓMEL-CONSTANTANO (E)	- 185	870	650	535	425	425	
CRÓMEL-ALUMEL (K)	- 17	1260	1100	980	870	870	
Pt-Pt/RODIO (13 y 10%)	- 17	-	-	-	1480	-	
Pt 30% RODIO-PT 6% RH	- 17	-	-	-	1760	-	
40% Ir 60% RH-IRIDIO	- 17	-	-	-	1980	-	
TUNGSTENO-RENIO	- 17	-	-	-	2200	-	
TUNGSTENO-Tg 26% Renio	- 17	-	-	-	2310	-	

* Se refiere a los calibres de los alambres.

3.4.1 Tipos de Termopares.-

Basándose en la experiencia obtenida a lo largo de muchos años de aplicaciones del alambre para satisfacer la mayoría de las necesidades. Tenemos:

Tipo T (Cobre - Constantano).

Ofrece alta resistencia a la corrosión en atmósferas húmedas. - Puede ser usado en atmósferas reductoras y oxidantes y son excelentes para mediciones de temperaturas más o menos bajas, especialmente a temperaturas bajo cero.

Tipo E (Cromel - Constantano).

Primordialmente para atmósferas oxidantes. No sufre corrosión a temperaturas bajo cero.

Tipo K (Cromel - Alunel).

Gran aplicación en atmósferas oxidantes, las atmósferas reductoras tienden a cambiar las características termoeléctricas reduciendo su exactitud. Muy satisfactorios hasta temperaturas de 1150°C.

Tipo J (Fierro - Constantano).

Recomendado cuando existe deficiencia de oxígeno libre. Debido a que en un conductor de fierro la oxidación aumenta rápidamente por encima de los 540°C, se requiere usar calibres gruesos a altas temperaturas.

Tipos R y S (Platino - Platino/Rodio).

Es recomendado para usarse en atmósferas oxidantes en las que existe un exceso de oxígeno libre. Se contamina con facilidad cuando se usa en cualquier otra atmósfera. Los termopares se usan rara vez con alambres no recubiertos excepto por la unión de detección.

40 % Iridio - 60% Rodio - Iridio.

Se recomienda para atmósferas oxidantes ó inertes y en el vacío.

Tungsteno - Tungsteno 26% Renio.

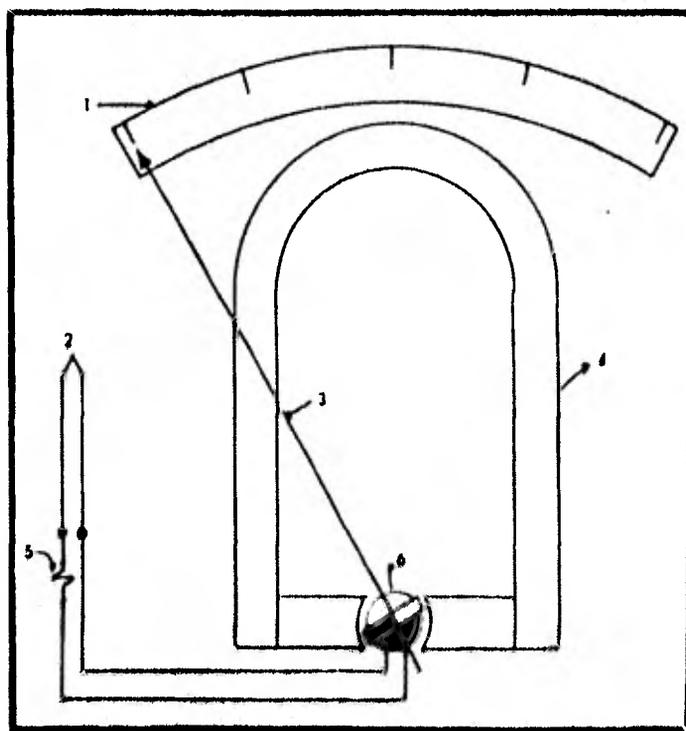
Se recomienda en atmósferas reductoras e inertes y también en el vacío. No deben usarse en presencia de oxígeno libre.

3.4.2 Dispositivos para Medición de FEM Producida por Termopares.

Los instrumentos utilizados para medir el milivoltaje generado por los termopares son los siguientes:

- 1) Milivólmetro, que es básicamente un galvanómetro d'Arsonval. Se tiene un campo magnético producido por un 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. Estas 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. Por lo general, se añade una espiral bimetalica a dichos resortes para proporcionar la compensación de la unión de referencia.



- 1.- ESCALA
- 2.- TERMOPAR
- 3.- INDICADOR
- 4.- IMAN
- 5.- RESISTENCIA COMPENSADORA
- 6.- BOBINA

PIROMETRO DE MILLIVOLTS

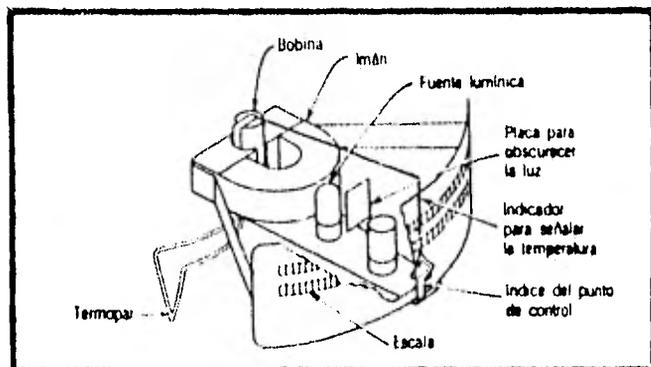
Como se indicó antes, el termopar tiene dos uniones, una de medición ó caliente y otra fría. Dado que el instrumento mide el voltaje - generado por la diferencia de temperatura entre la unión de medición y la de referencia es importante mantener la unión de referencia a una temperatura constante o que el instrumento de medición tenga una compensación automática y precisa para los cambios de temperatura en dicha unión.

El movimiento de medidor del pirómetro con milivoltímetro tiene una resistencia fija y, para obtener lecturas exactas, es esencial que el termopar y los alambres conectores tengan una resistencia compatible con la del medidor. Es de suma importancia que todas las conexiones sean limpias y sólidas, ya que una conexión deficiente o sucia puede crear una unión fría falsa y originar un gran error en la indicación.

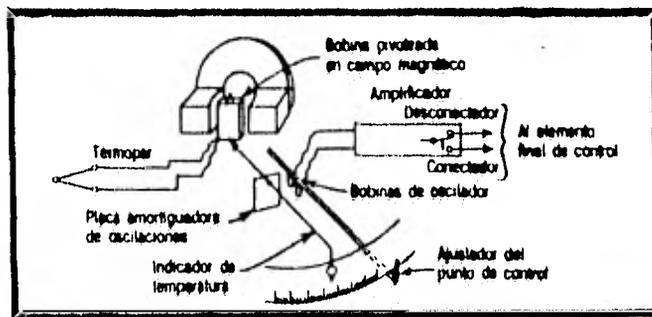
En general, un sistema para medición y control de termopar con milivoltímetro es más económico en lo que respecta a costo inicial (instrumentos, termopares e instalación) si sus características de precisión, respuesta y control son adecuadas para satisfacer la aplicación de que se trate. Estas unidades son predominantemente mecanismos activados por galvanómetros de encendido y apagado con puntos de ajuste alto y bajo. El indicador lleva algún tipo de aleta u otro mecanismo activador que controla la conmutación cambiando la frecuencia de un oscilador, interrumpiendo un haz de luz o cualquier otro sistema.

Existen algunas variaciones del pirómetro de milivoltímetro con aleta para aplicaciones industriales. El tipo simple de encendido y apagado tiene un solo ajuste y una sola aleta. En este caso, la aleta cambia la frecuencia del oscilador, y la unidad del amplificador apaga el sistema de energía que genera el calor hasta que la temperatura desciende por debajo del punto de ajuste. Esto hace que la aleta se mueva fuera de la posición de apagado y restaure el dispositivo de control a su posición original.

la anchura de la aleta determina la banda de temperatura en que no existe ninguna acción de control.



SISTEMA TÍPICO DE CONTROL DE PIROMETRO CON MILIVOLTÍMETRO



SISTEMA TÍPICO DE PIROMETRO CON MILIVOLTÍMETRO DE DOBLE CONTROL

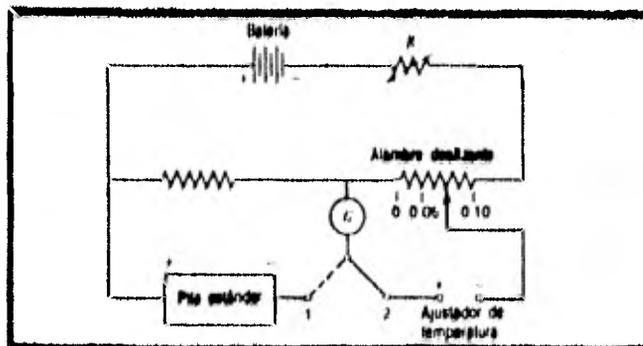
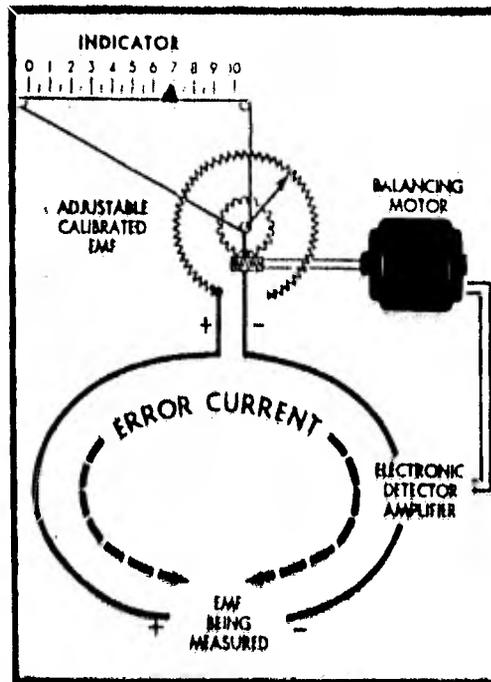


DIAGRAMA DE UN SISTEMA POTENCIÓMETRO SIMPLE

2) Potenciómetro Eléctrico.-

Este dispositivo funciona bajo el principio de señal de error. En el que la diferencia de FEM generada por el termopar y la FEM de una fuente regulada se puede considerar la señal de error.

El sistema de medición de FEM de tipo potenciómetro más utilizado comercialmente recibe el nombre de "Balance Nulo", en el cual se obtiene un balance de tensiones a través de un amplificador electrónico.



REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL METODO DE "BALANCE NULO"

Las partes esenciales de este sistema son:

- A) El circuito de medición de balance nulo.
- B) Amplificador detector de balance.
- C) El motor de balance y el sistema de transmisión de su movimiento,

- D) El sistema de conversión del movimiento rotatorio que comprende el grupo de elementos para indicar del instrumento.

Su funcionamiento es el siguiente:

El circuito dispone de una FEM calibrada, o dicho de otro modo, conocida que va a oponerse en polaridad y en valor a la FEM que desea medirse. Si estas dos FEM no son iguales, se obtiene lo que llamamos una corriente de error o corriente de desbalance que fluye como se muestra en el dibujo, y es detectada en magnitud y sentido por el circuito del amplificador. Una vez amplificada la señal de "error" es aplicada al motor de balance reversible que operando a través de un sistema de transmisión, ajusta la FEM, conocida o calibrada. Como el sistema es sensible a la dirección de la corriente de error al motor, el motor siempre se mueve o gira en la dirección adecuada para que al oponerse las dos FEM, se reduzca la corriente de error y llegue a ser prácticamente nula.

Las FEM (calibrada y medida) difieren entre sí en una cantidad despreciable que varía de acuerdo con la aplicación y precisión del instrumento.

3.4.3 Elementos de un Termopar.-

Los tres principales elementos que intervienen en un termopar son:

- A) Cable de extensión.
- B) Tubos protectores (fundas)
- C) Aisladores.

A) Cable de Extensión,-

Está constituido por un par de conductores, de un material que tienen (hasta determinada temperatura) las mismas características termo-

eléctricas de los alambres del termopar. Su objeto es extender el termopar hasta la junta de referencia del instrumento. Los termopares no se pueden conectar a conductores comunes debido a que cada conexión actuaría como un termopar adicional con características disímiles.

El cable de extensión se encuentra aislado con un material adecuado para cada aplicación.

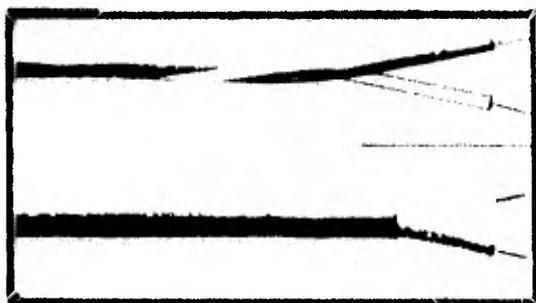
Características Básicas de los Aislamientos en Cables de Extensión Compensados para Termopar. -

AISLAMIENTO	LIMITE T°C	RESISTENCIA ELECTRICA	RESISTENCIA HUMEDAD	NOTA
POLIVINILO/POLIV.	100	Excelente	Excelente	1
POLIVINILO FLEXIB.	100	Excelente	Excelente	2
SILICON -HULE/POLI	200	Excelente	Excelente	3
FIBRA DE VIDRIO / FIBRA DE VIDRIO	250	Buena	Media	4
ASBESTO/ASBESTO	250	Buena	Media	5
ASBESTO/POLIVINIL FLEXIBLE	120	Excelente	Excelente	6
BLINDAJE DE MALLA DE ACERO ASBESTO/ SILICON HULE	250	Excelente	Excelente	7
B, MALLA DE SST/ FIBRA DE VIDRIO	250	Buena	Media	8

NOTAS:

- 1) Para uso en conduit subterráneo, o donde esté expuesto a productos químicos. Resistencia a la abrasión Excelente.
- 2) Para uso en extensiones móviles donde se requiera flexibilidad. Resistencia a la abrasión excelente.

- 3) Para uso rudo y ataque químico. Resistencia a la abrasión excepcional.
- 4) Para uso en altas temperaturas, no debe usarse en intemperie. Resistencia a la abrasión Media.
- 5) Para uso en altas temperaturas y ambientes secos. Resistencia a la abrasión Buena.
- 6) Para uso en temperaturas moderadas en exteriores e interiores. Resistencia a la abrasión Buena.
- 7) Para uso rudo y piezas en movimiento. Resistencia a la abrasión Excepcional.
- 8) Para uso muy rudo para piezas en movimiento, tubería de vapor, etc. Resistencia a la abrasión Excepcional.



TEFLON-ASBESTO/ASBESTO

POLIVINIL/POLIVINIL

Es posible encontrar también cable multiconductor, de 6 a 25 pares de conductores. Se pueden obtener para los tipos J, T y K. Generalmente el alambre es calibre 20.



Código de Colores para Cables de Extensión.-

Los cables de extensión utilizan el mismo símbolo que el alambre para termopar para el que fueron creados, pero seguidos de una X.

TIPO	CODIGO DE COLOR			LIMITE DE ERROR
	+	-	FORRO	
JX	Blanco	Rojo	Negro	+/- 1.25 %
TX	Azul	Rojo	Azul	+/- 0.75 %
KX	Amarillo	Rojo	Amarillo	+/- 2.5 %
SX	Negro	Rojo	Verde	+/- 6.0 %
RX	Negro	Rojo	Verde	+/- 6.0 %

B) Tubos Protectores.-

Quando la aplicación del termopar requiere la medición de temperaturas en atmósferas corrosivas ó perjudiciales para los metales que forman el termopar, en la unión expuesta se acostumbra usar una funda de termopar. Los materiales más empleados son:

MATERIAL	MAX. TEMP. ° C.	OBSERVACIONES
<u>Metálico</u>		
Acero al C.	540	Satisfactorio en cualquier atmósfera excepto si es corrosiva.
SST 304	980	Buena resistencia a la corrosión y oxidación, Nota 1).
Calorstent	1100	Excelente resistencia a la oxidación y la corrosión, Nota 2).
Oxistent	1000	Para atmósferas sulfurosas, baños de sal y metales fundidos, Excelente resistencia a la oxidación y corrosión, a altas temperaturas, Nota 3).

MATERIAL	MAX. TEM.	OBSERVACIONES
<u>Metálico</u>		
Inconel	1150	Buena resistencia a la corrosión a alta temperatura. No usarse en atmósferas sulfurosas. Nota 4).
Nickel	1100	Para usarse en baños de sal.
<u>Cerámicos</u>		
Silma	1150	Buena resistencia mecánica y a choque térmico. Nota 5).
Alox	1900	Buena resistencia mecánica y a choque térmico. Nota 6).
Sic	1650	Para uso continuo en aluminio fundido. Protector secundario para resistencia a choque térmico y mecánico. Nota 7).

Notas referentes a la composición:

- 1) 18% Cromita - 8% Nickel
- 2) 22 - 24% Cromium, 12 - 15% Nickel
- 3) 26% Cromium - Resto fierro
- 4) 77% Nickel - 15% Cromium
- 5) 80% Al_2O_3
- 6) 99.7% Al_2O_3
- 7) Carburo de silicio



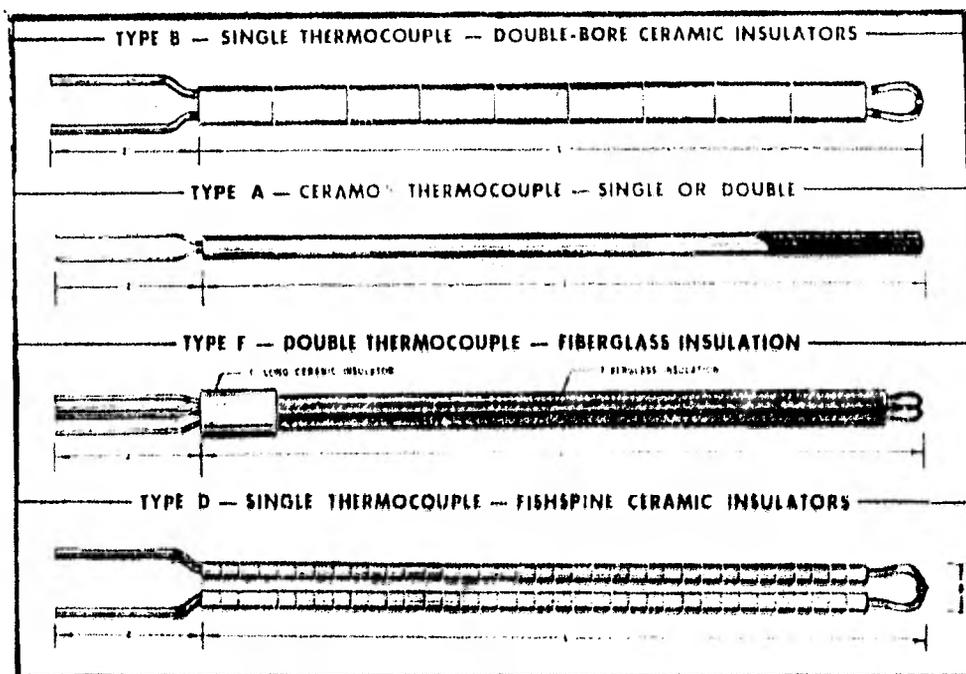
DIFFERENTES TIPOS DE CONEXIONES DE TUNDAS CERAMICAS

C) Aisladores Cerámicos.-

Se utilizan para proteger a los alambres del termopar y para evitar el contacto de estos alambres con la funda. Existen cuatro tipos fundamentales:

- a) Espina de pescado
- b) Cilíndricos de un canal
- c) Ovalados de dos canales
- d) Barras aisladoras redondas para elementos de Platino.

Es importante hacer notar que también existen aisladores de otros materiales como fibra de vidrio, nylon extruido, etc.



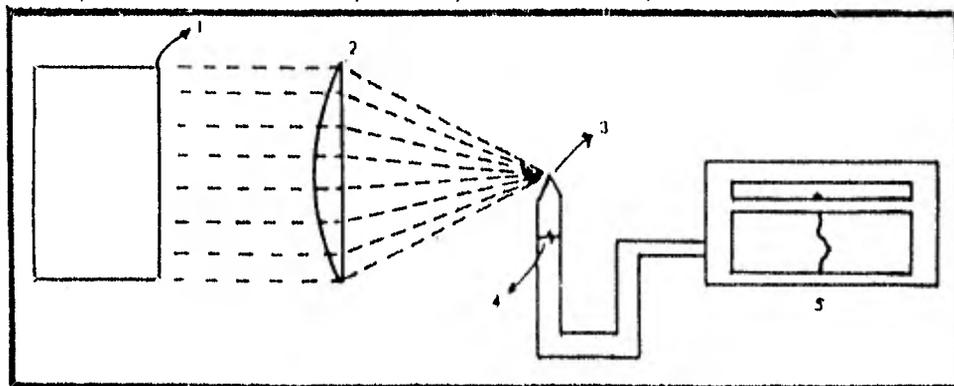
DIFERENTES TIPOS DE AISLADORES

5.5.1 Pirómetros por Radiación.-

La pirometría por radiación, consiste en medir la temperatura de un objeto, por medio de la determinación de la cantidad y características de la energía radiante que emite.

Este tipo de pirometría está basada en la ley física de que todos los objetos calientes radian energía calorífica (incluyendo infrarroja) en forma proporcional a la 4a. potencia de la temperatura absoluta del objeto. Una forma práctica de utilizar ésta ley es utilizar un elemento sensor primario que convierte energía calorífica en electricidad.

La mayoría de éstos instrumentos están formados por: un lente, una termopila (ó un termistor) y un compensador de temperatura.



1.- OBJETO CALIENTE
4.- COMPENSADOR

2.- LENTE
5.- INSTRUMENTO

3.- TERMOPILA

SISTEMA TÍPICO DE MEDICIÓN CON PIRÓMETRO DE RADIACIÓN.

El lente afoca la energía calorífica del objeto caliente en la termopila (unión de pequeños termopares conectados en serie para multiplicar la FEM).

El elemento sensor absorbe la mayor parte de la energía radiada. Esto incrementará su temperatura lo que ocasionará que se genere una señal

que será traducida en unidades de temperatura mediante algún dispositivo, (potenciómetro, puente, etc.) Tales instrumentos pueden ser usados para control de procesos industriales.

Así la cantidad de energía radiada, absorbida por el sensor, depende de la temperatura alrededor del detector, así como de la temperatura del objeto a ser medido, de ahí que el detector debe ser compensado - para cambios en temperatura ambiente. Esta compensación se puede lograr con una bobina de nickel en paralelo con el sensor. Esta derivación actúa como una carga variable, así al aumentar la temperatura ambiente, la resistencia de la derivación aumentará, presentando una pequeña carga al elemento, y así la señal se verá corregida por cambios en la temperatura ambiente.

Usos.-

El uso de un pirómetro de radiación es particularmente recomendable para aplicaciones en donde:

- 1) Altas temperaturas sean medidas y sea impráctico usar un termopar.
- 2) Cuando se desee medir la temperatura promedio de un área dada.
- 3) Cuando el objeto a medir esté en movimiento ó girando.
- 4) Cuando la vibración, golpes o atmósferas altamente corrosivas eviten el uso de un termopar.
- 5) Cuando el contacto físico entre el detector y el cuerpo a medir sea peligroso.

Partes Principales de un Pirómetro de Radiación.-

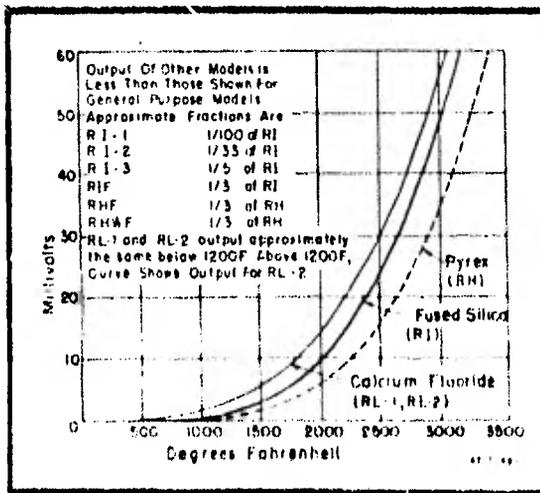
- 1) Bobina de compensación por cambios de temperatura ambiente. Se puede obtener compensación hasta por 120° C, pudiendo utilizarse agua de enfriamiento para disminuir la temperatura del detector.

2) Lente.-

Se utilizan tres clases de material, y su utilización dependerá del rango y de la aplicación y así tenemos:

- a) Pyrex 0.3 a 2.7 microns
- b) Silica fundida 0.3 a 3.8 microns
- c) Fluoruro de calcio 0.3 a 10.0 microns

Generalmente el Pyrex es utilizado para rangos altos ya que es el más económico de los tres y porque en algunas ocasiones es necesario filtrar longitudes de onda altas procedentes de otros cuerpos. La sílica fundida se utiliza en rangos intermedios y el fluoruro de calcio para rangos bajos.



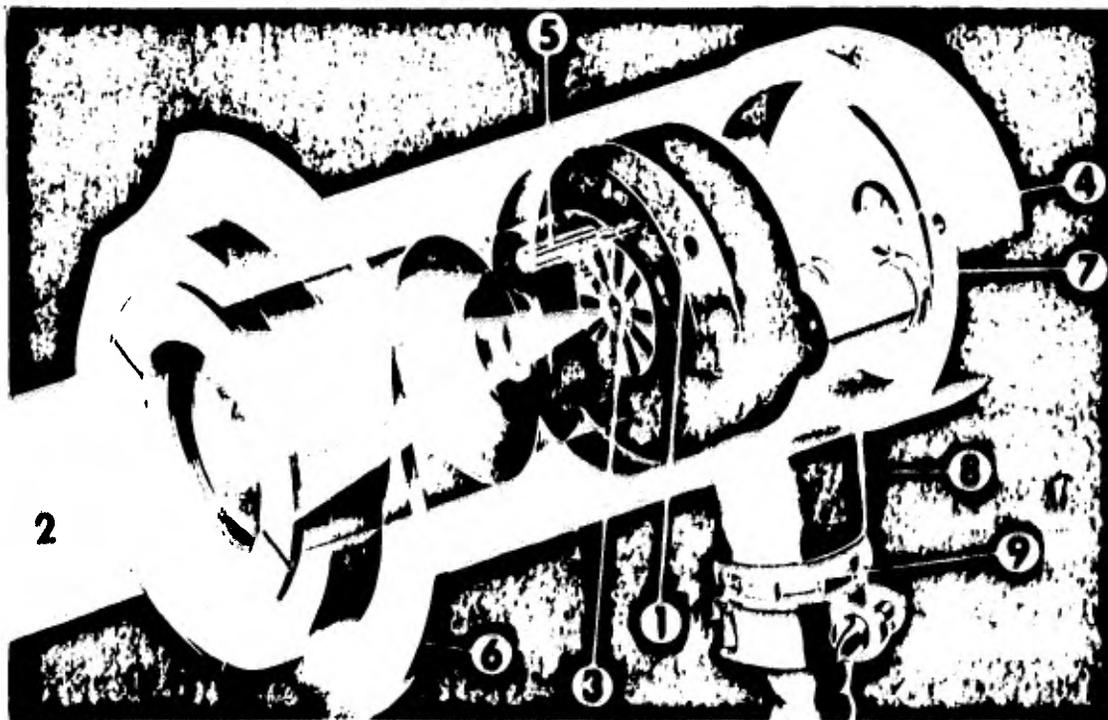
GRAFICA TEMPERATURA-EMF EN LA QUE SE HAN SOBREPUESTO LOS TRES MATERIALES PARA LENTES QUE UTILIZA EL DETECTOR "RADIAMATIC".

3) Termopila.-

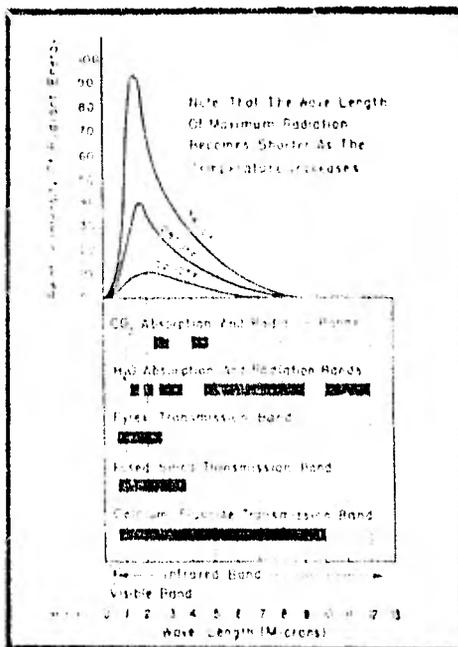
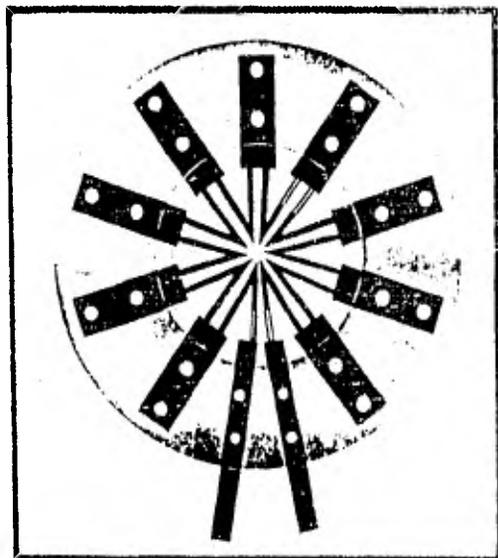
Formada por la unión radial de pequeños termopares conectados en serie para multiplicar la EM. La energía radiada es enfocada directamente sobre la junta caliente del termopar. Debido a la pequeña masa de los termopares, estos son:

- a) altamente sensitivos a los cambios en la energía radiada.
- b) Inmunes a vibraciones y golpes. La porción de los termopares expuestos a la fuente de radiación se encuentran enegrecidos para aumentar sus propiedades de absorbencia de energía y por lo tanto proporcionar mayor FEM.

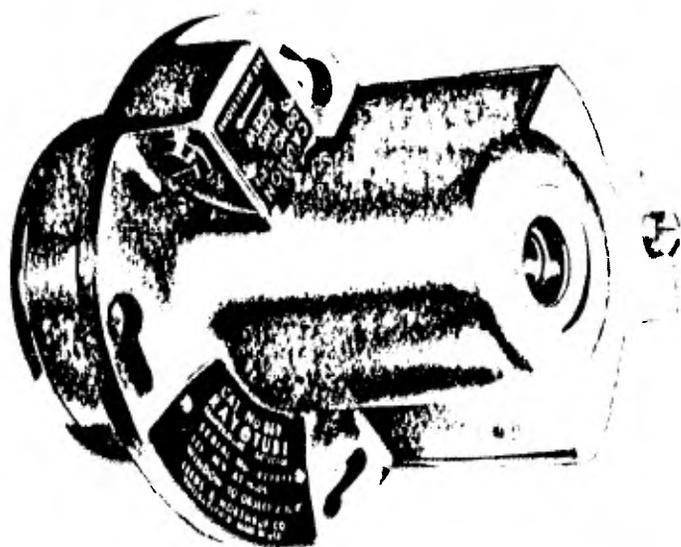
- 4) Mirilla.
- 5) Calibración.
- 6) Anillos de montaje.
- 7) Terminales.
- 8) Conexiones para Conduit.
- 9) Empaques.



VISTA INTERIOR DE UN PIROMETRO RADAMATIC DE HONEYWELL.



VISTA AUMENTADA DE UNA TERMOPILA MDS
TRANDO SUS UNIONES CALIENTE.



PIROMETRO DE RADIACION "RAYOTURN" DE LEEDS & NORTHROP.

3.5.2 Pirómetro Óptico.-

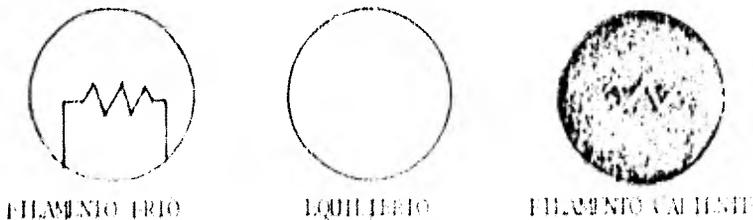
El pirómetro óptico es el dispositivo oficial reconocido internacionalmente para medir temperaturas superiores a 1060 °C.

La pirografía óptica usa un instrumento con el que se mide la brillantez desconocida de un objeto, comparándola con la brillantez conocida de una fuente fija. El instrumento también se puede calibrar con precisión comparándolo con una fuente conocida.

La intensidad de la luz en el espectro visible emitida por un objeto caliente varía rápidamente con su temperatura.

Esto se puede demostrar mejor mediante el hecho de que el efecto visual de la radiación roja a 1371.1°C varía doce veces más rápido que la temperatura. Puesto que un pequeño cambio en la temperatura produce un cambio mucho más rápido en la brillantez, se dispone de un medio natural para determinar temperaturas con buena precisión, y exactitud.

En todos los pirómetros ópticos se utiliza un filtro rojo que va entre el ojo y el objeto observado. La luz monocromática escogida tiene una longitud de onda (roja) de máxima sensibilidad para el ojo, con el fin de minimizar el factor de diferencias individuales sobre el juicio sobre los colores o sensación de éstos.



APARIENCIA DEL FILAMENTO DE LA LAMPARA EN EL OCULAR DE UN PIRÓMETRO ÓPTICO.

Clases de Pirómetros Ópticos.-

Existen algunos pirómetros que comparan ópticamente la luz del objeto caliente con la de una lámpara en el instrumento.

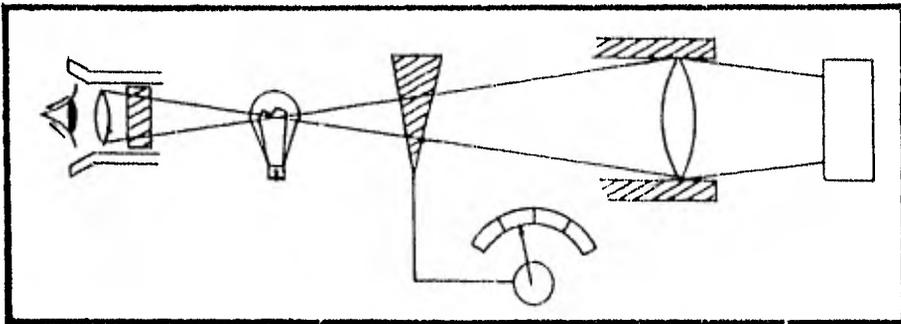


DIAGRAMA DE UN PIROMETRO OPTICO, EN EL QUE LA BRILLANTEZ DE LA IMAGEN DE FUENTES SE HACE VARIAR MEDIANTE UNA CUNA OPTICA.

La luz de la lámpara de comparación se mantiene constante con una corriente eléctrica constante a través del filamento. La comparación con el cuerpo caliente se lleva a cabo haciendo girar una cuña de absorción óptica graduada para cambiar la brillantez aparente del cuerpo caliente hasta que desaparece la marca de prueba luminosa que se localiza en el campo de visión.

El otro tipo de pirómetro óptico, consiste en hacer variar la intensidad de la luz de una lámpara de comparación calibrada para equiparla con la intensidad de la luz emitida por el objeto caliente.

En ambos tipos, la luz emitida por el objeto caliente y la lámpara de compensación deben tener la misma magnitud de longitud de onda para obtener mediciones exactas.

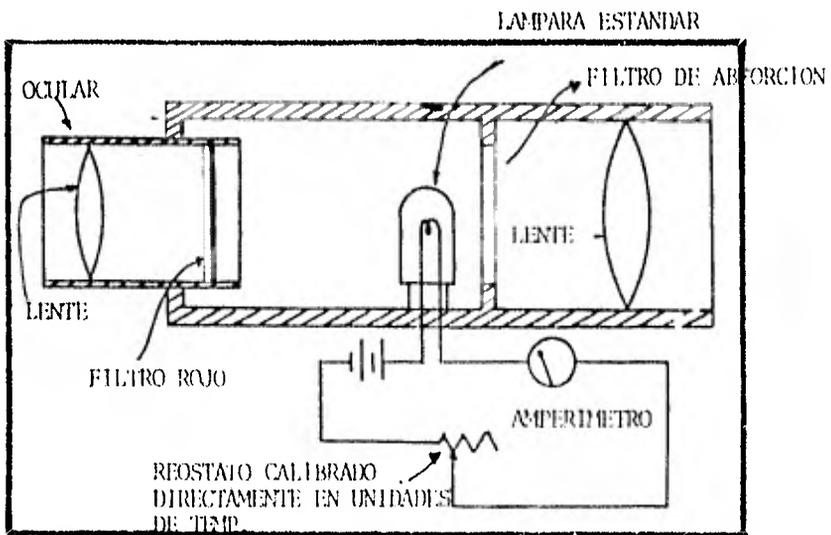
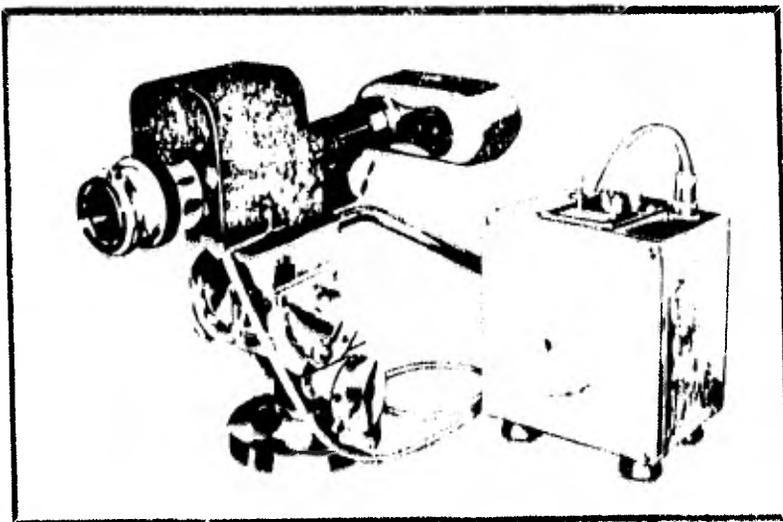


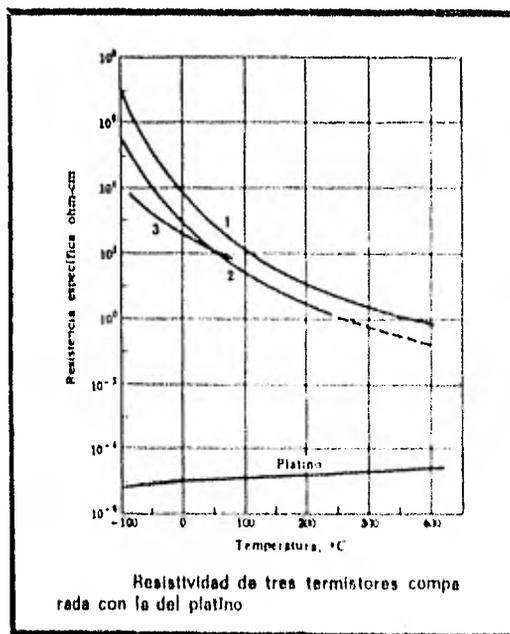
DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN PIROMETRO OPTICO.



PIROMETRO OPTICO LEEDS & NORTHROP.

3.6 TERMISTORES.

Un termistor es un dispositivo semiconductor que posee un coeficiente negativo de resistencia por temperatura, en comparación con el coeficiente positivo que muestra la mayoría de los metales.



La variación de la resistencia con la temperatura sigue un comportamiento exponencial, esto es:

$$R = R_0 e^{(B)(1/T - 1/T_0)}$$

En donde: R_0 = Resistencia en ohms a la temperatura T_0 , en grados °K,

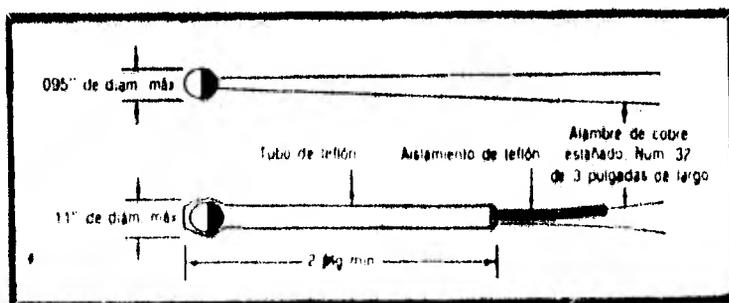
R = Resistencia en ohms a la temperatura T , en grados °K,

B = Constante. Comprendida entre 3500 y 4600 K. Depende del material y de la temperatura.

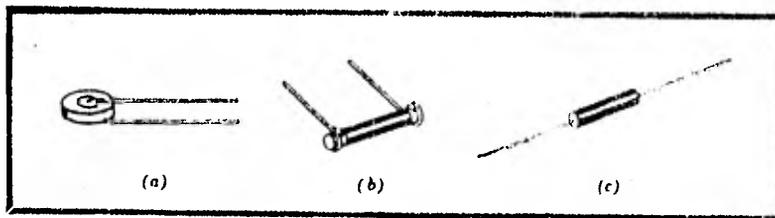
Los grandes coeficientes negativos de temperatura y las características no lineales de resistencia de los termistores hacen que estos dispositivos efectúen muchas funciones de control de tipo singular. Con algunas clases de termistores se puede duplicar la resistencia con un pequeño cambio de temperatura.

El tiempo de respuesta puede variar desde una fracción de segundo, hasta minutos, dependiendo del tamaño de la masa detectora, de la capacidad térmica del termistor, y varía en forma inversa con el factor de disipación. El factor de disipación de potencia varía inversamente con el grado de aislamiento térmico del elemento del termistor y puede tener un rango de valores de 10^{-5} a W por grado Celsius de aumento de temperatura.

El límite superior de temperatura de operación depende de los cambios físicos en el material o la soldadura utilizada para hacer las conexiones y casi siempre es de 400°C ó menos. El límite inferior de temperatura de operación casi siempre está determinado por la resistencia que llega a un valor tan grande, que no se puede medir por métodos estándar.



TERMISTORES REALES Y SU CONFIGURACION EN CORTE TRANSVERSAL.



FORMAS TÍPICAS DE TERMISTORES.

- a) Disco con unión soldada a tope.
- b) De varilla con terminal arrollada y soldada.
- c) De varilla con platino aplicado al fuego en el alambre.
- d) Termistor aumentado dos veces.

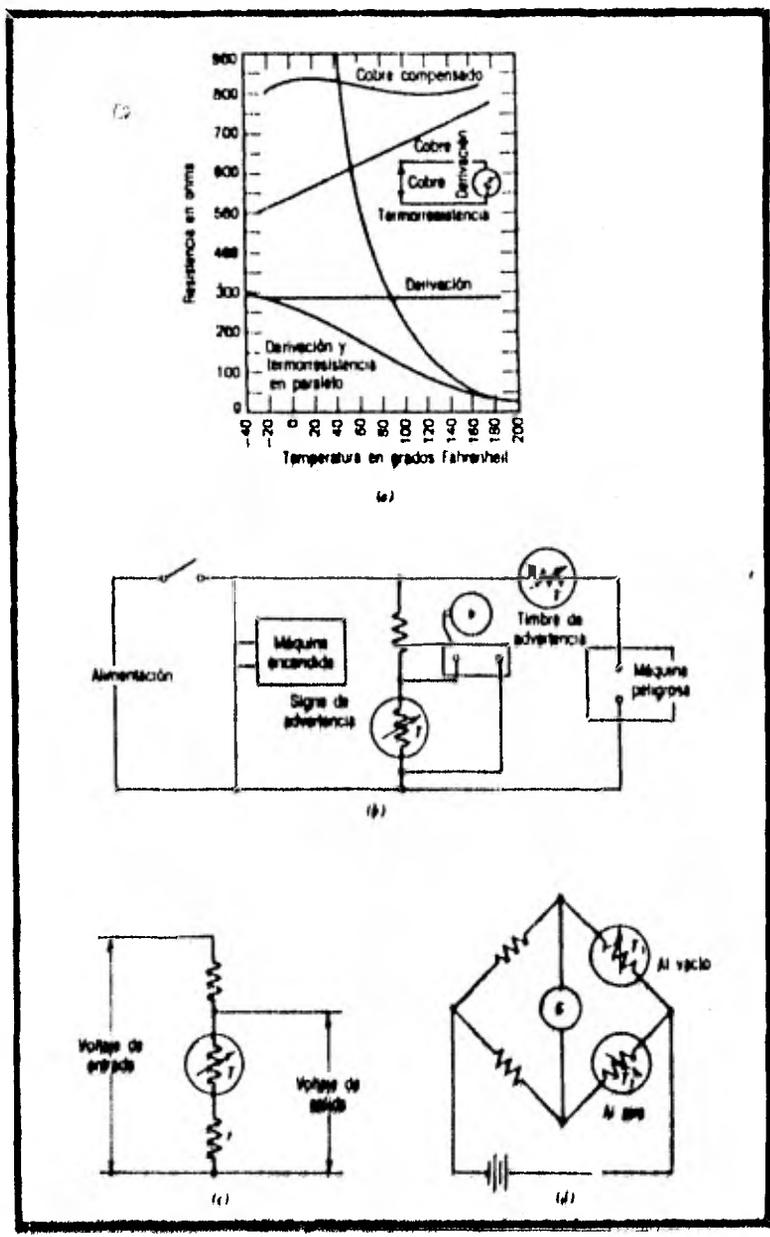
Se debe tener en cuenta el hecho de mantener una corriente de medición tan baja como sea posible, con el objeto de evitar el calentamiento de la unidad detectora y para lograr que cualquier cambio de resistencia solo dependa de la variación de temperatura del área circundante.

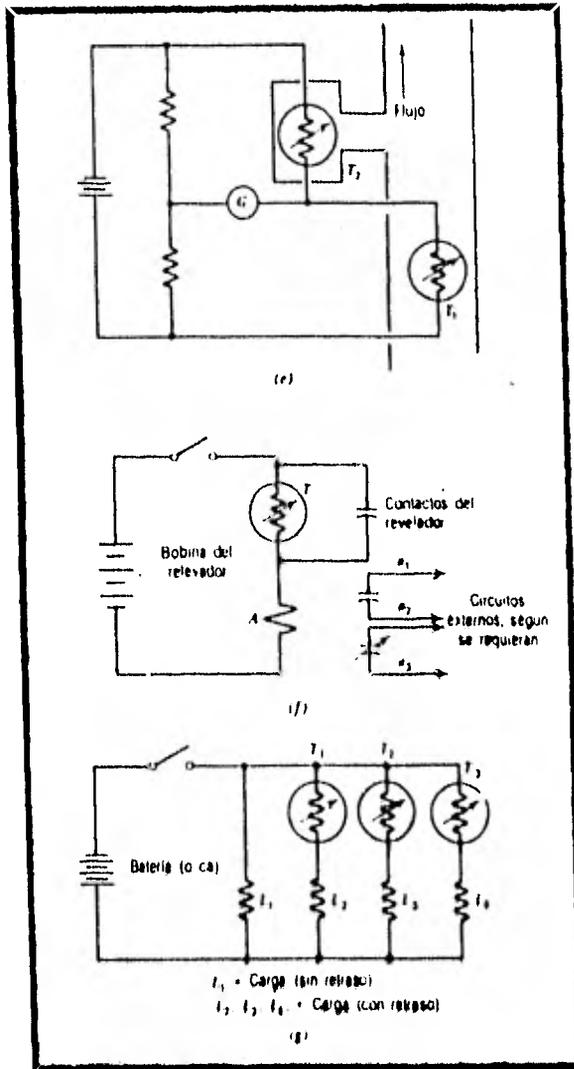
Los termistores se pueden ubicar en lugares muy alejados de sus circuitos de medición si se escogen unidades con valores de resistencia lo suficientemente elevados, de manera que los valores de resistencia del conductor sean mínimos. Esta característica, su facilidad de obtención en pequeños tamaños y su simplicidad mecánica les dan a los termistores ventajas en relación a otros dispositivos.

Los termistores se pueden utilizar para compensar cambios en resistencia en circuitos eléctricos (una de sus principales aplicaciones) como conmutador en circuitos de seguridad y alarma, para estabilizar el voltaje de salida de circuitos con una amplia variación en el voltaje de entrada, como elemento sensible de un medidor para vacío, compensación por cambios de temperatura en medidores de flujo, (al igual que en

otras variables como pH, conductividad, etc.), como dispositivos de retardo de tiempo y como dispositivos de conmutación en secuencias.

Aplicaciones Típicas de los Termistores.-





- a) Compensación de temperatura
- b) Circuito de protección y alarma
- c) Regulación de voltaje
- d) Medidor para yacfo
- e) Medidor de flujo
- f) Retardo
- g) Conmutación de secuencia.

3.7 TERMOMETROS DE RESISTENCIA.

Los termómetros industriales de resistencia son en principio bobinas de alambre arrolladas dentro o alrededor de soportes de material aislante capaz de soportar la temperatura para la que se diseñó el termómetro.

Por lo común, las bobinas se hacen de alambre delgado arrollado sobre el soporte de tal manera que se ejerza un esfuerzo físico mínimo cuando el alambre se expanda o contraiga con los cambios de temperatura. Los alambres están acomodados sobre el soporte de modo que existe una buena conductividad térmica y un alto índice de transferencia de calor.

El termómetro de resistencia es básicamente un instrumento para medir resistencias eléctricas y se ha calibrado para indicar lecturas de temperaturas directamente en lugar de unidades de resistencia. Generalmente están fabricados de platino, cobre o nickel.

Quando un material cambia de resistencia en función de una variación en la temperatura, el cambio se denomina "coeficiente de temperatura de la resistencia" del material. Este coeficiente se expresa en ohms por grado de temperatura, a una temperatura dada, y es positivo para la mayoría de los metales.

Con el fin de obtener la más alta sensibilidad de medición posible, es muy conveniente tener el mayor cambio de resistencia por grado para un valor de resistencia específico, pero también es necesario que el material posea una buena estabilidad a lo largo del tiempo (años) y en una amplia gama de temperaturas, sin cambiar sus características eléctricas.

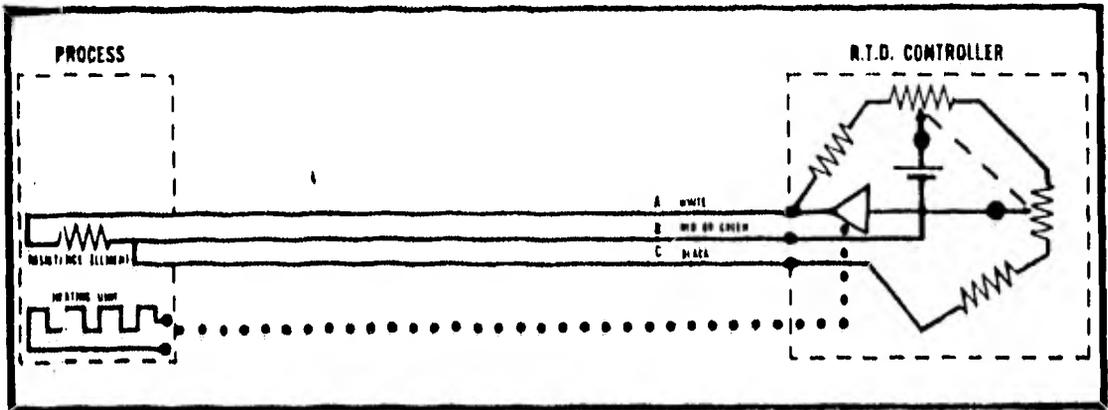
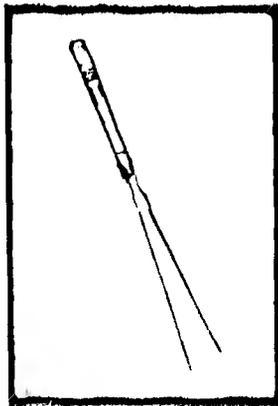


DIAGRAMA SIMPLIFICADO MOSTRANDO EL CIRCUITO DEL PUENTE DE MEDICION DEL CONTROLADOR "THERMO / ELECTRIC" Y EL "R.T.D." EN UN LOOP DE CONTROL DE TEMPERATURA TÍPICO.

R.T.D. = RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR.



R.T.D. MINIATURA CON RANGO -564°F a $+932^{\circ}\text{F}$.

Los metales que se emplean en la fabricación de termómetros de resistencia tienen un alto grado de linealidad sobre el rango de temperatura de la resistencia para la que se diseñó cada uno en particular. La mayor parte de los metales puros tienen un cambio de resistencia en función de la temperatura, prácticamente lineal por lo menos durante una porción de su curva resistencia-temperatura.

El coeficiente de resistencia por temperatura se define por:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 T_2 - R_1 T_1}$$

donde R_1 y R_2 , son las resistencias del material a las temperaturas T_1 y T_2 respectivamente.

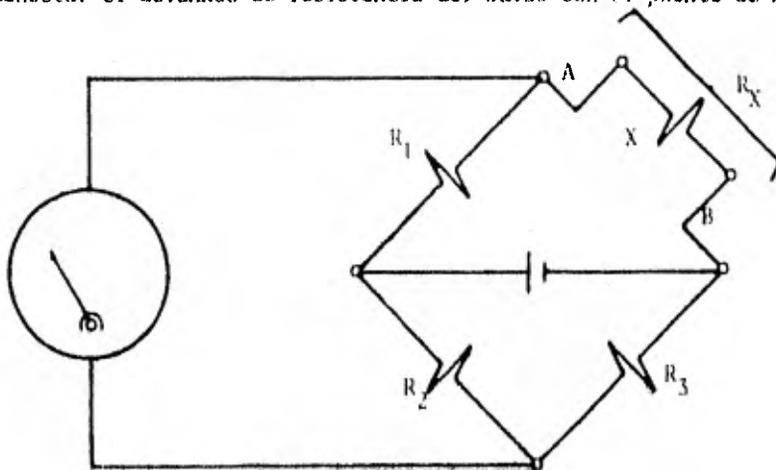
Algunos coeficientes de resistencia por temperatura a temperatura ambiente, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Nickel	0.0067
Hierro (aleaciones)	0.002 a 0.006
Tungsteno	0.0048
Aluminio	0.0045
Cobre	0.0043
Plomo	0.0042
Plata	0.0041
Oro	0.0040
Platino	0.00391
Mercurio	0.00099
Manganina	+/-0.00002
Carbón	-0.0007
Electrolitos	- 0.02 a -0.09
Termistores	- 0.068 a + 0.14

La medición de la resistencia se puede llevar a cabo mediante un circuito puente. En las mediciones estáticas, bastará con equilibrar el puente, mientras que en las mediciones de transitorios, habrá que medir por deflexión. Una de las fuentes de error principales en estos termómetros es el efecto que produce la resistencia de los alambres que conecta el elemento sensor con el puente. Para evitar lo anterior se han ideado algunos arreglos que describiremos a continuación.

Método de dos Alambres.-

Se utilizan dos alambres de resistencia relativamente baja, A y B, para conectar el devanado de resistencia del bulbo con el puente de medición.



Por lo general, los alambres son de cobre y se utiliza el puente de Wheatstone,

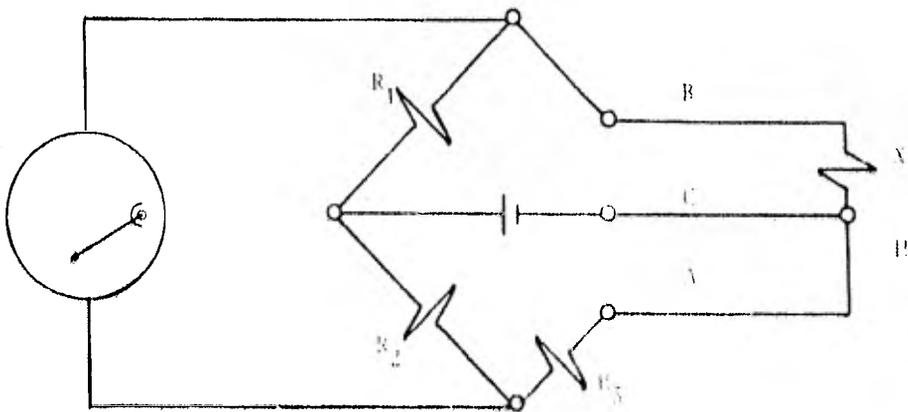
Como se puede ver, en la figura, la resistencia R_x comprende la resistencia del bulbo más la resistencia de los alambres A y B. Por lo que esta combinación dará por resultado un error en la lectura de temperatura, a no ser de que se cuente con algún tipo de compensación.

Se hace notar que, aunque se puede conocer la resistencia de los alambres, estos al igual que el bulbo, están sujetos a variaciones con la temperatura.

Método de tres Alambres.-

Este es el método más práctico para evitar el error causado por los alambres de conexión.

En éste método, los dos alambres A y C se conectan directamente a un extremo del devanado de resistencia del bulbo en un punto común, H. El tercer cable, B, se conecta al otro extremo del devanado. Si se mantienen iguales las longitudes de los alambres A y B, la resistencia de A se suma al brazo del puente R_3 , en tanto que la resistencia del alambre B, se suma al brazo de la resistencia de medición y de esta forma se conserva un equilibrio en el circuito de puente.

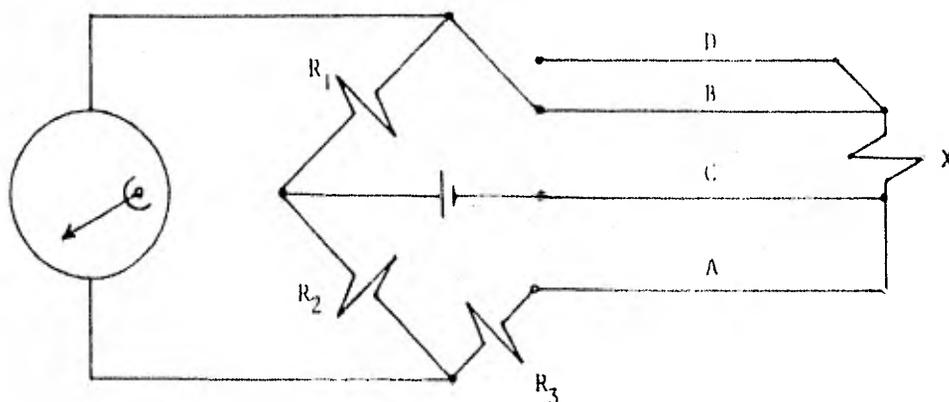


La precisión final de este método dependerá de que los alambres A y B tengan la misma resistencia y ya que la resistencia del alambre no interviene en el equilibrio del puente de éste circuito; se pueden utilizar alambres de resistencia y longitud relativamente grandes.

Método de cuatro Alambres.-

Este método se utiliza cuando se requiere de mediciones con un alto grado de precisión.

Este método es similar al de tres alambres, excepto porque se agrega un hilo adicional, el cual podría servir para comprobar que las resistencias de los alambres son iguales.

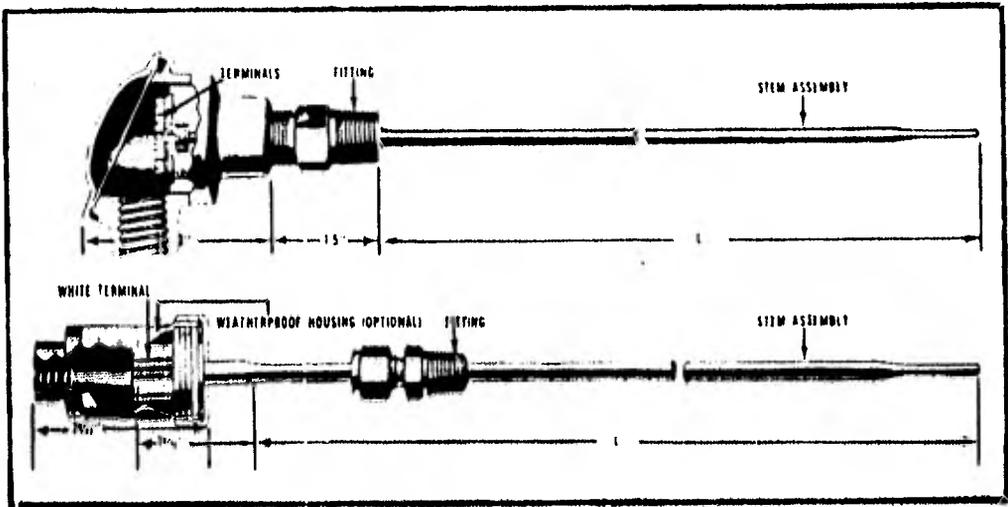


De esta manera, si se efectúa una lectura en la posición mostrada y a continuación se hacen otras en las que se intercambian sucesivamente los hilos de la izquierda y la derecha, se tendrá que el promedio de las lecturas proporcionará un valor en el que se ha minimizado el error por efecto de resistencia de los alambres.

En general, las resistencias de los alambres no deben sobrepasar de 2,5 ohms por cable y la distancia y el tamaño del alambre se debe ajustar de tal manera, que no se sobrepase ésta resistencia.

Los termómetros de resistencia tienen un alto grado de exactitud. Las unidades de precisión para laboratorio se pueden calibrar para medir temperaturas con un margen de ± 0.01 °C y las unidades industriales se pueden calibrar para detectar temperaturas a ± 0.5 °F hasta 122 °C y a ± 1.0 °F de 122 a 542 °C.

Los termómetros de resistencia están diseñados para dar respuestas rápidas, al igual que precisas, con el objeto de dar un control exacto de procesos en los que se deben mantener rangos reducidos ó pequeñas diferencias de temperatura. Cada tipo de termómetro es intercambiable en un proceso sin compensación o recalibración, ya que cada tipo se calibra a una curva estándar resistencia-temperatura. Así que si una unidad se daña, puede sustituirse con facilidad.



3.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS DISPOSITIVOS PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

DISPOSITIVO	RANGO DE TEMPERATURA APÉI CABLE °C	EXACTITUD APROXIMADA + / - ° C	RESPUESTA TRANSI TORIA
Termómetros Industriales			
a) Alcohol	- 68 a 65	0.55	Pobre
b) Mercurio	- 37 a 316	0.27	Variable
c) Mercurio-gas	- 37 a 538	0.27	Variable
Sistemas Termales			
a) Clase I y III	- 100 a 538	1.11	Pobre
b) Clase II	- 7 a 204	1.11	Pobre
Bimetálico	- 73 a 538	0.27	Pobre
Termómetro de Resistencia			
a) Bulbo de Pt	- 198 a 538	0.003	Buena
b) Bulbo de Ni	- 40 a 204	0.003	Buena
c) Bulbo de Cu	- 201 a 121	0.003	Buena
Termistor	- 73 a 400	0.01	Muy buena
Termopares			
a) Cu-Constan.	- 184 a 350	0.27	Buena, pero depen
b) Fe-Constan.	- 184 a 650	0.27	de del tamaño del
c) Cromel-Alumel	0 a 1 260	0.27	cable.
d) Cromel-Consta	0 a 870	0.27	" "
e) Pt-Pt/10% Rh	0 a 1 182	0.27	" "
f) Pt-Pt/13% Rh	0 a 1 482	0.27	" "
g) Pt-Pt/15% Ir-Pt	0 a 1 371	0.27	" "
h) Iridio/Rh - Ir	773 a 1 982	0.27	" "
Pirómetro de Radiación			
a) Rango alto	926 a 3 871	10.0	Pobre
b) Rango medio	538 a 1 871	6.0	Pobre
c) Rango medio-bajo	260 a 650	3.0	Pobre
d) Rango bajo	38 a 371	0.55	Buena
Pirómetro Óptico	Más de 650	11.11	Pobre

3.9

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA.Termómetros Bimetálicos e Industriales.-

Ventajas: Bajo costo
 Rangos amplios de temperatura
 Fácil de instalar
 Buena relación Exactitud-Costo

Desventajas: Solo sirven como indicadores
 Limitados a montaje local
 Necesita correcciones por profundidad de vástago
 Razonable exactitud y sensibilidad

Sistemas Termales Llenos.-

Ventajas: Construcción firme
 Principios de operación simples
 Costo inicial relativamente bajo
 Sistema auto-operado
 No requiere fuerza auxiliar para operar
 Gran variedad de gráficas calibradas
 Amplia gama de selección de bulbos resistentes a la corrosión, así como fundas.

Desventajas: El costo de reemplazo de un sistema termal lleno es muy elevado comparado con la mayoría de los sensores eléctricos, como los termopares.
 Requiere señal extra de transmisión si el dispositivo se encuentra muy distante del punto de medición.
 No se obtienen para temperaturas superiores a 760°C.
 Una falla en el bulbo o en el capilar del sistema ocasiona el reemplazo total del dispositivo,
 la exactitud y la sensibilidad es menor que la obtenida por los sensores eléctricos.

Termopares.-

- Ventajas:** Relativamente barato.
 Amplia variedad de diseños comerciales obtenibles
 Su salida eléctrica lo hace fácil de conectar a una gran variedad de indicadores, registradores y controladores.
 Los termopares son "sensores separables"
 Buena velocidad de respuesta.
- Desventajas:** La relación voltaje temperatura no es totalmente lineal.
 Sujeto al envejecimiento y posicionamiento de la unión caliente.
 No es obtenible para medición de temperatura de objetos en movimiento.
 Baja exactitud comparados con la de los termómetros de resistencia.
 Deben elegirse correctamente los materiales para que - resistan los efectos de la corrosión de las atmósferas.

Pirómetros de Radiación.-

- Ventajas:** Voltaje de salida alto.
 Puede usarse en temperaturas ambiente cambiantes y altas.
 No necesita contacto con el objeto a medir.
 No esta sujeto a contaminantes del medio.
- Desventajas:** Medición afectada por emisividad del objeto a medir.
 Sujeto a errores provocados por humos o neblinas.
 La salida no es lineal.

Pirómetros Ópticos.-

- Ventajas:** Usado para medición de altas temperaturas.
 No requiere contacto con el objeto a medir.
 Alta precisión.
 Modelos de baterías portátiles en existencia.

Desventajas: Relativamente caros, especialmente en modelos de alta precisión automáticos.

Los modelos manuales, sujetos a errores humanos.

Para alta precisión, la emisividad del objeto debe ser conocida.

Termistores.-

Ventajas: Alta sensibilidad.

Se consiguen en tamaños pequeños.

Respuesta termal rápida.

Relativo bajo costo.

Fácilmente adaptable a gran cantidad de dispositivos eléctricos.

Desventajas: El intercambio entre elementos puede ocasionar problemas.

Generalmente tienen menor estabilidad que otros sensores.

Rango de aplicación limitado.

Termómetros de Resistencia.-

Ventajas: Comparativamente gran poder de entrada para circuitos de puente.

Reproducibilidad alta.

Mantiene estabilidad y exactitud durante mucho tiempo. Si se le protege adecuadamente.

Excepcional exactitud comparado con los termopares. Si se le protege adecuadamente.

Desventajas: Son caros en comparación con los termopares.

El tamaño del bulbo es mayor que el de los termopares.

Limitado a temperaturas inferiores a 760°C.

Velocidad de respuesta relativamente baja.

Menos durables que los termopares cuando existen efectos mecánicos, como vibraciones.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO III

- 1.- J. P. Holman: "EXPERIMENTAL METHODS FOR ENGINEERS", 2a. ed., Mc. Graw-Hill Book. Co.
- 2.- D. M. Considine: "PROCESS INSTRUMENTATION". Chemical Engineering., January 1968.
- 3.- American: "INDUSTRIAL GLASS DIAL AND RECORDING",., Catalog 100.
- 4.- Weston: "BIMETAL THERMOMETERS" Technical Information 09-108-B.
- 5.- American: "3" AND 5" BI-METAL DIAL THERMOMETERS", Catalog 149.
- 6.- Fischer & Porter Co. "TEMPERATURE INSTRUMENTS",., Catalog 86.
- 7.- Fischer & Porter Co, "TEMPERATURE INSTRUMENTS",., Catalog 12 a - 10.
- 8.- Foxboro: "FILLED SYSTEM THERMOMETERS" Bolletín MI-2-110, "TECHNICAL INFORMATION" TI 11-10 a, TI 11-11a, TI 11-12a, TI 11-13a, TI 11-13b, TI 11-13c,
- 9.- EIM. "PRODUCTOS PARA PIROMETRIA MEDICION Y CONTROL" Catálogo.
- 10.- Thermo Electric: "TEMPERATURE MEASURING SYSTEMS & COMPONENTS", Section 160, Section 250, Section 332, Section 360,
- 11.- Leeds & Northrup: "INTERNATIONAL GENERAL CATALOG", 1975.
- 12.- Honeywell: "RADIATION PYROMETRY", Bolletín PIB-6.
- 13.- H. E., Soisson: "INSTRUMENTACION INDUSTRIAL", Editorial Limusa, México, 1980.

C A P I T U L O I V

CAPITULO IV

ELEMENTOS DE MEDICION DE FLUJO

Medición de Flujo.-

- 4.1 Clasificación de los medidores inferenciales
- 4.2 Medidores de presión diferencial
 - 4.2.1 Principio
 - 4.2.2 Ecuación teórica para flujos líquidos (incompresibles)
 - 4.2.3 Ecuación teórica para flujos compresibles
 - 4.2.4 Placa de orificio
 - 4.2.5 Tobera
 - 4.2.6 Venturi
 - 4.2.7 Mecanismos secundarios
 - Tabla de referencia, mecanismos secundarios 4.1
- 4.3 Rotámetro
 - 4.3.1 Ecuación de comportamiento del rotámetro
- 4.4 Medidores de flujo magnético
- 4.5 Medidores de flujo tipo turbina
- 4.6 Medidor tipo disco
- 4.7 Medidores directos
 - 4.7.1 Medidor de ruedas ovaladas
 - 4.7.2 Medidor de disco oscilante
 - 4.7.3 Medidores rotativos
 - 4.7.4 Medidor de pistón oscilante
 - 4.7.5 Medidor de lóbulos
 - Tabla de referencia 4.2
 - Tabla de referencia, presión diferencial 4.3
 - Tabla de referencia, rotámetro 4.4

Tabla de referencia, turbina 4.5

Tabla de referencia, medidor magnético 4.6

Tabla de referencia, tipo disco 4.7

Tabla de referencia, desplazamiento positivo 4.8

Tabla de referencia, medidor de flujo másico 4.9

CAPITULO IV

MEDICION DE FLUJO

Se llama flujo o gasto a la cantidad de masa o de volúmen de un fluido que atraviesa una sección por unidad de tiempo. Llamándose al flujo en unidades de masa por unidad de tiempo (MT^{-1}) gasto másico y el flujo en unidades de volumen por unidades de tiempo ($L.T^{-1}$) gasto volumétrico, estando los dos relacionados por la densidad del fluido de la siguiente manera:

$$M = \rho Q$$

M ----- gasto másico

ρ ----- densidad del fluido

Q ----- gasto volumétrico

La forma en que se mide un flujo puede ser directo o inferencial. Es directo cuando se mide al gasto volumétrico separando el flujo en volúmenes discretos y llevando el conteo de éstos por unidad de tiempo. Se llama inferencial a la forma indirecta de conocer el gasto mediante la medición de otra variable más fáciles de medir y que por medio de leyes podemos relacionar el flujo medido, tales como medir la presión diferencial a través de un orificio en una sección de la tubería que maneja el flujo, la velocidad del sonido, la fuerza magnética, la velocidad de impulso, etc.

4.1 CLASIFICACION DE LOS MEDIDORES INFERENCIALES.

PRESION DIFERENCIAL.

{ PLACA DE ORIFICIO
VENTURI
TOBERA
PITOT

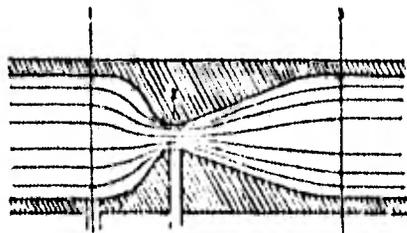
AREA VARIABLE	{ ROTAMETRO
VELOCIDAD	{ TURBINA VORFICE
VOLTAJE INDUCIDO	{ ELECTROMAGNETICO

4.2 MEDIDORES DE PRESION DIFERENCIAL.-

4.2.1 Principio.-

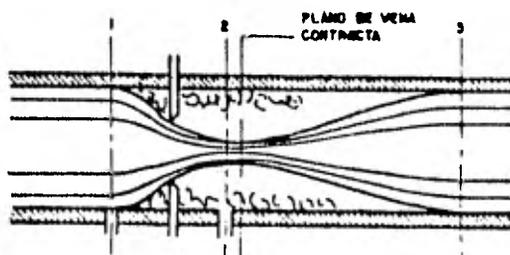
Los medidores de presión diferencial son dispositivos que se conectan al tubo que conduce el fluido. Su principio de funcionamiento es utilizar una constricción (disminución del área transversal del tubo) para desarrollar una presión diferencial. Se demostrará más adelante que con el balance de energía y el de masa se puede deducir la velocidad, el flujo volumétrico o el flujo másico de un fluido.

El decremento en la presión estática entre las secciones 1 y 2 es acompañado por un decremento en la densidad del fluido. Para muchos líquidos este decremento es despreciable (líquidos incompresibles), no así para gases en que este factor debe ser tomado en cuenta.



Hay medidores en que la constricción es gradual ver figura anterior, donde el área mínima del fluido coincide con el diámetro del tubo mínimo, esto pase en la garganta del venturi. La constricciones súbitas (tipo orificio) el fluido al pasar por el orificio continúa disminuyendo su área transversal por una corta distancia antes de empezar a expandirse otra vez. El punto donde el flujo ocupa al área mínima se llama "vena contrac-

ta". El lugar y el área de la vena contracta depende de la geometría de la restricción y de las características del flujo.



Un punto que debe ser enfatizado es que la presión diferencial desarrollada por una constricción particularmente de un orificio no es únicamente dependiente de la constricción sino que también depende de la localización de las tomas de presión aguas abajo del medidor. Si la conexión es localizada entre la placa de orificio y la vena contracta (caso más usual), el área efectiva del flujo es menor que el área del orificio, de ahí que la velocidad del fluido sea mayor en esta sección que a través del orificio, consecuentemente la presión diferencial es también mayor. Las tomas de presión aguas arriba y en el punto de vena contracta producirá la máxima diferencial de presión. Cuando la conexión aguas abajo está antes del punto tres, el decremento de la presión estática es una medida del cambio de la energía cinética resultado de las pérdidas de presión acumulados a través del volumen de control. La presión diferencial es relacionada con la velocidad del fluido por coeficientes de descarga empírica, discutidos en la siguiente sección.

4.2.2 Ecuación Teórica para Flujos Líquidos (Incompresibles).

Por definición para un líquido incompresible su peso específico es constante: $v_1 = v_2$ ó $\gamma_1 = \gamma_2$

Quedando la ecuación de continuidad:

V_1 = velocidad en sección 1

V_2 = velocidad en sección 2

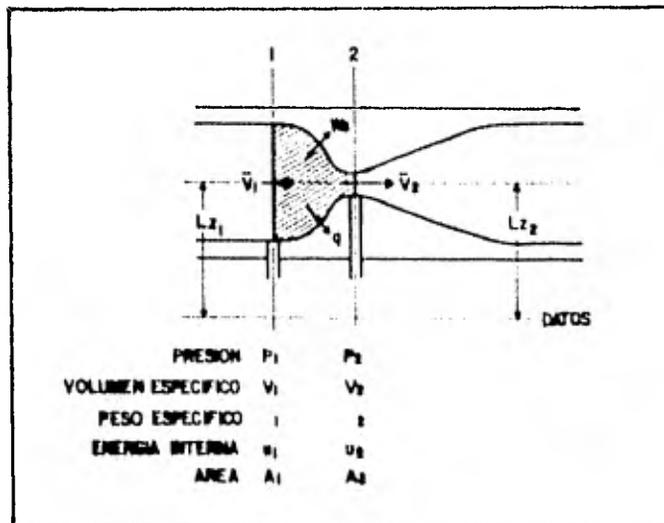


FIGURA 4.5

Asumiremos que el tubo donde se hace la medición es: a) horizontal
 b) la energía interna es la misma en las secciones 1 y 2 (no hay cambio de temperatura, c) el flujo es adiabático (no hay transferencia de calor a través de las fronteras del volumen de control) y d) no hay trabajo transmitido a través de las fronteras del volumen de control, quedando el balance de energía;

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad \dots \quad 4.2$$

Sustituyendo V_1 de la ecuación 4.1 en 4.2

$$\frac{1}{2g} V_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] = \frac{1}{\gamma} (P_1 - P_2) \quad \dots \quad 4.3$$

$$\gamma V_2^2 = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]} \left[2g (P_1 - P_2) \right] \quad \dots \quad 4.4$$

Esta ecuación es básica para un medidor de flujo líquido tipo diferencial. Sacando raíz a la ecuación 4.4 obtenemos:

$$\sqrt{\gamma} V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g(P_1 - P_2)} \quad \dots 4.5$$

Las expresiones de flujo volumétrico y másico son:

$$Q_{\text{teórico}} = A_2 V_2 \quad \dots 4.6 A$$

Sustituyendo la ecuación 4.5 en 4.6 A tenemos:

$$Q_{\text{teórico}} = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}} \quad \dots 4.7$$

Gasto volumétrico actual

$$Q_{\text{teórico}} = \frac{C A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}} \quad \dots 4.8$$

Donde C es coeficiente de descarga. La velocidad de aprovechamiento y la constante C se sustituyen por el coeficiente A.

$$K = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

$$Q_{\text{actual}} = K A_2 \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}} \quad \dots 4.9$$

El gasto másico por lo tanto será:

$$M = \rho Q \quad \dots 4.10A$$

$$M_{\text{actual}} = K A_2 \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \quad \dots 4.10B$$

4.2.3 Ecuación Teórica para Flujos de Gas Compresibles.-

Cuando un gas pasa a través de una constricción en un tubo, la velocidad se incrementa y la presión se decremента. Este decremента en la presión de gas es acompañado por cambios significativos en la densidad.

El cambio de la densidad del gas entre las tomas de presión obliga a medir la presión estática, la temperatura en una toma y la presión diferencial entre las tomas. Para esto se asume que el flujo es isentrópico (no hay calor ganado o perdido y no hay fricción entre las secciones 1 y 2. Esto permite el uso de la siguiente ecuación:

$$P_1 v_1^k = P_2 v_2^k = P v^k = \text{constante} \quad \dots 4.11$$

Conociendo la razón de la presión estática absoluta en las tomas, la densidad en una toma y el exponente isentrópico k del gas se puede conocer el volumen específico o densidad en la otra toma. La densidad en la primera toma es calculado utilizando la ecuación de un gas ideal.

$$Pv = RT \quad \text{o} \quad P = \rho RT \quad \dots 4.12$$

El balance de energía por unidad de masa es:

$$\frac{V_1^2}{2g} + L_1 + \frac{P_1}{\gamma} + U_1 + \frac{V_1^2}{2g} + L_2 + \frac{P_2}{\gamma} + U_2 + q + W_s \dots 4.13$$

Quedando reducida esta ecuación a:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = H_1 - H_2 \quad \dots 4.14$$

Donde H es la entalpía definida como:

$$H = \frac{P}{\gamma} + U \quad \dots 4.15$$

Esta modificación indica que el proceso es adiabático $q = 0$, no hay trabajo $W_s = 0$ y no hay diferencia de altura entre las tomas ($L_1 = L_2$).

Para gases ideales el cambio de entalpia está dado por:

$$H_1 - H_2 = \int v dp \quad \dots \quad 4.16$$

Usando la ecuación 4.11 y despejando el volumen específico:

$$v = v_1 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{-1/k} \quad \dots \quad 4.11A$$

Quedando la ecuación 4.16

$$H_1 - H_2 = \int v_1 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{-1/k} dp \quad \dots \quad 4.16A$$

Integrando tenemos:

$$H_1 - H_2 = \frac{v_1}{p_1^{-1/k}} \left[\frac{\frac{k-1}{p^{1/k}}}{\frac{k-1}{k}} \right] \Bigg|_{p_2}^{p_1} \quad \dots \quad 4.16B$$

Finalmente tenemos:

$$H_1 - H_2 = \frac{kv_1 p_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad \dots \quad 4.16D$$

En este caso necesitamos que la entalpia este dado en metros, por lo tanto dividiremos 4.17 entre la constante gravitacional g .

$$H_1 - H_2 = \frac{kv_1 p_1}{g(k-1)} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad \dots \quad 4.16E$$

Para encontrar el gasto másico que atraviesa la sección utilizaremos la ecuación de continuidad para fluidos compresibles:

$$M = \frac{A_1 V_1}{V_1} = \frac{A_2 V_2}{V_2} \quad \dots \quad 4.17$$

Despejando V_1 de esta ecuación y sustituyendo en 4.14 tenemos:

$$V_2^2 - \left[\frac{A_2 v_1}{A_1 v_2} V_2^2 \right] = 2g (H_1 - H_2) \quad \dots 4.18A$$

Sustituyendo $(H_1 - H_2)$ en la ecuación 4.16E:

$$V_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2 v_1}{A_1 v_2} \right)^2 \right] = \frac{2P_1 v_1 k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad \dots 4.18B$$

Despejando V_2 :

$$V_2 = \left[\frac{\frac{2 P_1 v_1 k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{1 - \left(\frac{A_2 v_1}{A_1 v_2} \right)^2} \right]^{1/2} \quad \dots 4.18C$$

Para encontrar el gasto másico sustituimos 4.18C en 4.17:

$$M = \frac{A_2}{v_2} \sqrt{\frac{2 P_1 v_1 \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{1 - \left(\frac{A_2 v_1}{A_1 v_2} \right)^2}} \quad \dots 4.19A$$

Tomando en cuenta que para flujos adiabáticos $\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/k}$ sustituimos en 4.19 A

$$M = \frac{A_2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/k}}{v_1} \sqrt{\frac{2 P_1 v_1 \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k}}} \quad \dots 4.19B$$

Multiplicando y dividiendo por $\left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right)$ y por $\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}$ queda 4.19 B

$$M = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \sqrt{\frac{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{\left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right) \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k} \right]}} \sqrt{2P(P_1 - P_2)} \quad \dots 4.19C$$

Definiendo el factor de expansión Y como:

$$Y = \sqrt{\frac{\left[1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2\right] \left(\frac{k}{k-1}\right) \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}{\left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right) \left[1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}\right]}} \quad \dots 4.20$$

$$M_{\text{teórico}} = \frac{\lambda_2 Y_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2}} \sqrt{2g (p_1 - p_2)} \quad \dots 4.21$$

El valor de Y es calculado y tabulado con la ecuación teórica para Venturis y Toberas. Para orificios el factor de expansión es determinado experimentalmente.

$$Y = \frac{KY}{k} = \frac{\text{de pruebas de gas}}{\text{de pruebas de agua}}$$

4.2.4 Placa de Orificio.-

PRINCIPIO.- Se inserta una placa con un orificio calibrado, perpendicular al curso del flujo, provocando que la variación súbita del área en la tubería, obligue al fluido a perder presión. La cuantificación de la caída de presión en la placa se relaciona indirectamente con la lectura del gasto;

USOS.- Cualquier fluido que no tenga sólidos en suspensión.

LIMITACIONES.- Tiene una caída de presión alta. Requiere de un transductor para la lectura del gasto.

LOCALIZACION.- Se recomienda se coloque en la sección donde exista la ^{Así} corrida de tubería más recto; conexiones, válvulas y demás accesorios cercanos al orificio provocan cambios de corriente y cambios en la presión que afectan la medición.

Tomas de Lecturas.-

Para la localización de las tomas de presión, se puede decir que hay tres formas: 1) En las bridas de conexión,

- 2) Medición del flujo en el punto de vena contracta (punto de máxima constricción del flujo, aguas abajo del orificio) y
- 3) Conexión en el tubo.

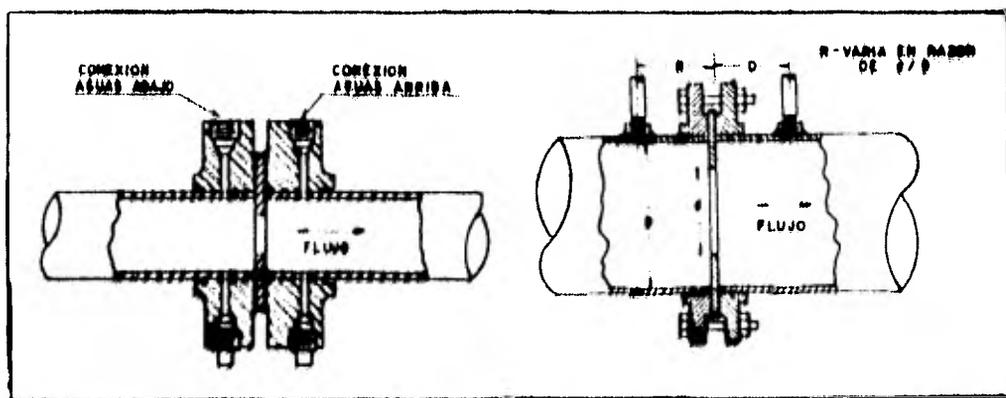


FIGURA 4.4 CONEXION EN BRIDAS

FIGURA 4.5 CONEXION EN VENA CONTRACTA

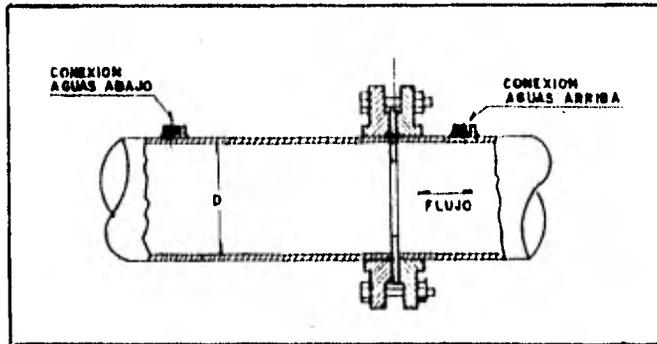


FIGURA 4.6 CONEXION EN TUBO

Ejemplo 4.1.-

Un orificio de orilla biselada de 2 plg. de diámetro es instalado en un tubo de 4 plg. cédula 40 teniendo un manómetro de mercurio conectado entre las tomas, localizadas 1 diámetro de distancia aguas arriba y 0.5 diámetro de longitud aguas abajo.

Encontrar: El rango de flujo a 60°F con agua y con una lectura de 4,4 plg. en mercurio.

Solución:

$$1,1) \quad Q = 236 d_i^2 c \sqrt{\Delta p} \quad (\text{GASTO} = \text{galones/m})$$

236 - factor de conversión para obtener el gasto en gpm

d_i - diámetro interno del orificio

c - coeficiente del flujo para orificio

Δp - presión diferencial entre las tomas lb/plg²

ρ - densidad del fluido en lb/ft³

$$1,2) \quad Re = \frac{50,60 \rho}{d \mu} \quad (\text{Reynolds-número adimensional})$$

μ - viscosidad absoluta dinámica (centipoise)

- 2) Para determinar la caída de presión diferencial a través de las tomas.

$$\Delta P = \frac{\Delta H_{\text{m}} \rho_{\text{m}}}{12 \times 144}$$

ΔH_{m} - longitud en plg. de mercurio

ρ_{m} - densidad del mercurio

- 3) Densidad del mercurio bajo agua $\rho_w (S_m - S_w)$

ρ_w - densidad del agua 62.371 lb/ft³

S_m - gravedad específica del mercurio 13.57

S_w - gravedad específica de agua 1.00

- 4) ρ del Hg bajo agua = 62.371 (13.57 - 1.00) = 784 lb/ft³

- 5) $\Delta P = \frac{H_{\text{m}} \times 784}{12 \times 144} = 0.454 \text{ lbn}$

- 6) $d_2 = 4.026$ $d_2 = d_i \text{ 4 plg. ced. 40}$

- 7) $\frac{d_1}{d_2} = \frac{2.00}{4.026} = 0.497$

- 8) Utilizando la gráfica (IV.1) Se da un valor arbitrario. $C = 0.625$

- 9) $Q = 236 \times (2.0)^2 \times 0.625 \sqrt{\frac{0.454 \text{ lbn}}{62.34}} = 50.4 \sqrt{\Delta H_{\text{m}}}$

- 10) $Q = 50.4 \sqrt{\Delta H_{\text{m}}} = 50.4 \sqrt{4.4} = 106 \text{ gpm}$

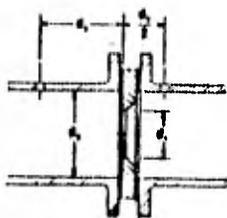
- 11) $\mu = 1.1$, centipoise viscosidad del agua a 60°F

- 12) $Re = \frac{50.6 \times 106 \times 62.371}{1.1} = 75 \text{ o } 7.55 \times 10^4$

De ahí que la constante de calibración sea $C = 0.625$

Regresando a las gráficas (IV.1 y IV.2) observamos que para un $Re = 7.55 \times 10^4$, $C = 0.625$: de ahí que el gasto a través del tubo es de 106 gpm. Cuando el factor C en la gráfica es incorrecto para el número de Reynolds encontrado de acuerdo al flujo calculado debe ser ajustado - hasta que esté aproximadamente igual al encontrado repitiendo los pasos 9, 10 y 12.

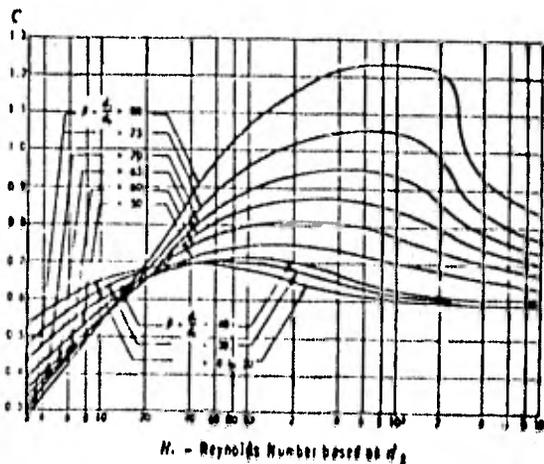
Coefficiente de flujo C para orificios de orilla biselada.



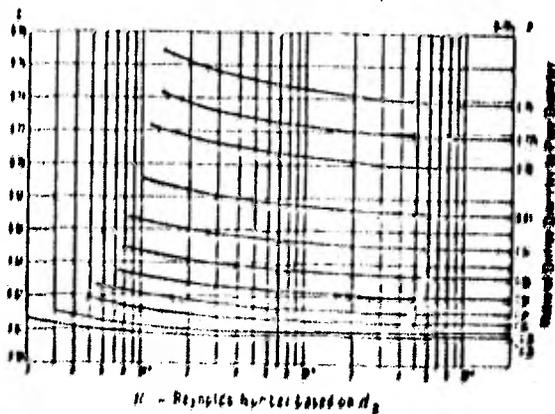
Top

$$C = \frac{C_p}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

$$K_{fluid} \approx \frac{1 - \beta^4}{C^2 \beta^4}$$



N - Reynolds Number based on d_2



N - Reynolds Number based on d_2

Ejemplo 4.2.-

Una presión diferencial de 3 psig es medido en un medidor de gasto tipo orificio. Siendo el orificio de orilla biselada de 0.75 plg de diámetro para una tubería de 1 plg cédula 40, en la cual hay amoníaco seco (NH_3) fluyendo a 40 psig y 50°F .

Encontrar el flujo en libras/seg. y en ft/min en condiciones estandar.

Solución:

1. $R = 90.8$
 2. $S_g = 0.587$
 3. $K^g = 1.29$
 4. $P_1 = P + 14.7 = 54.7$
- } Para NH_3

Para encontrar Y se utiliza la gráfica IV.3 con los datos:

5. $\frac{\Delta P}{P_1} = \frac{3}{54.7} = 0.0549$
6. $d_2 = 1.049$ 1" cédula 40
7. $\beta = \frac{0.75}{1.049} = 0.716$
8. Utilizando la tabla IV.3 encontramos que $Y=0.98$
9. El valor de C lo encontramos suponiendo un flujo turbulento con un $Re = 3 \times 10^5$ y utilizando la tabla IV.2 $C = 0.71$
10. Temperatura de entrada $T = 460 + 50 = 510^\circ \text{R}$
11. Densidad a la entrada $= \frac{144P}{RT} = \frac{144 \times 54.7}{90.8 \times 510} = 0.17 \text{ lb/ft}^3$
12. Sustituyendo en la fórmula IV.13
 $W = 0.525 Y d_1^2 C \sqrt{\Delta P} \sqrt{P_1}$

$$= 0.525 \times 0.98 \times 0.75^2 \times 0.71 \sqrt{3 \times 0.17}$$

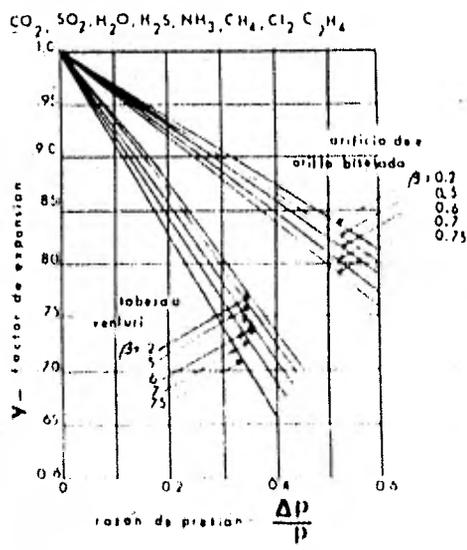
$$W = 0.145 \text{ lb/seg} = 520 \text{ lb/hr}$$

13. Gasto en pies cúbicos:

$$Q = \frac{W}{S_g \times 4.58} \text{ Y}^1 = \frac{520}{4.58 \times 0.587} = 195 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

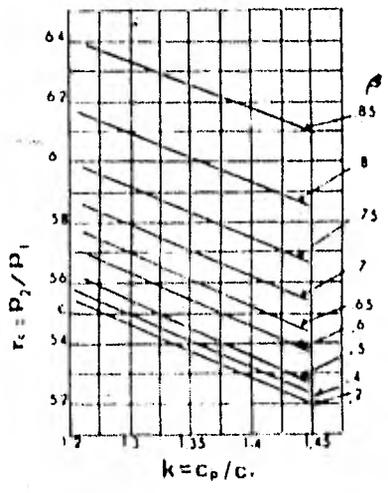
Factor de expansión Y

para flujo compresible en tuberías y orificios
 $k = 1.3$ aprox.

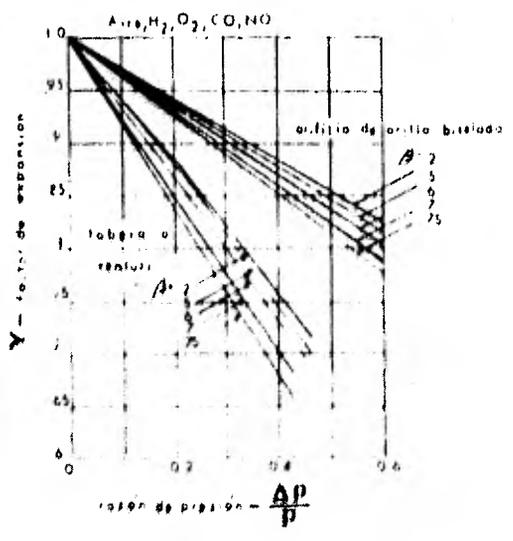


Razón de presión crítica

para flujo compresible en
 tubería y venturi



$k = 1.4$ aprox.



4.2.2 Tobera.-

Principio de Operación.- Se localizan tomas de presión antes y después del medidor, cuantificándose la caída de presión se relaciona con el gasto que atraviesa la tobera.

Usos y Ventajas.- la tobera por su contorno tiene a barrer los sólidos a través de su garganta. Para fluidos no homogéneos la tobera es preferible a la placa de orificio, pero no debe usarse si hay grandes porcentajes de sólidos en suspensión. En estos casos debe estar instalada en tuberías verticales con el flujo hacia abajo.

Las toberas son ampliamente usadas para mediciones de flujo a altas velocidades. La tobera es más robusta y resistente a la erosión que una placa de orificio. También, para un diámetro dado y una presión diferencial la tobera deja pasar un 65% más de flujo. Así, para grandes flujos, la tobera puede ser usada con una razón más aceptable del diámetro del tubo y el diámetro de la garganta sin desarrollar una excesiva presión diferencial.

Limitaciones.- Las toberas no deben usarse en líquidos que contengan grandes porcentajes de sólidos adheribles. En estos casos el medidor magnético es más satisfactorio si el líquido es suficientemente conductivo. Para líquidos no conductivos, el tubo Venturi sin anillo piezométrico y con tubería de purga es satisfactorio.

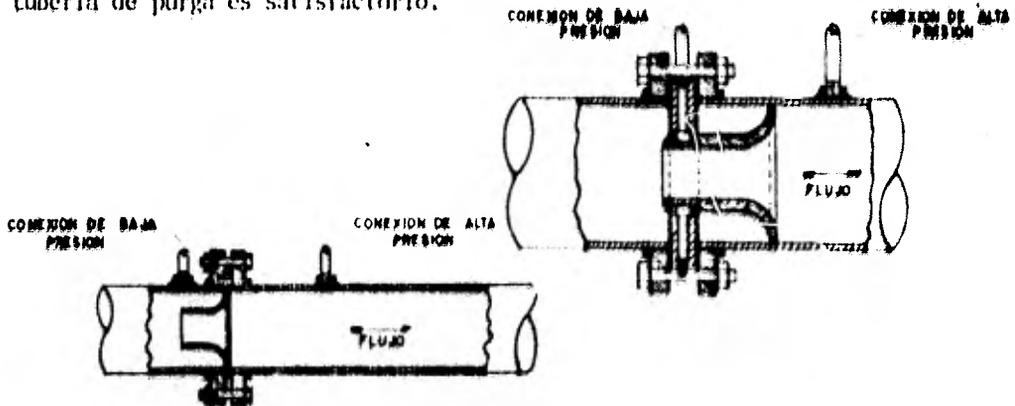
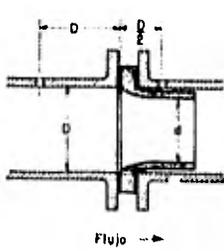


FIGURA 4.7

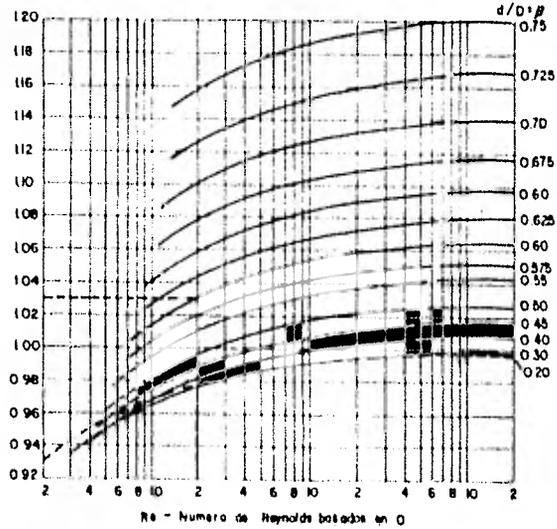
TIPO DE CONEXIONES

FIGURA 4.8

COEFICIENTE DE FLUJO C PARA TOBERAS



$$C = \frac{Cd}{\sqrt{1-\beta^4}}$$



COEFICIENTE DE FLUJO C PARA TOBERAS

4.2.3 Tubo Venturi.

Principio.- Se basa en el mismo principio que la placa de orificio, teniendo las tomas de presión en la entrada y en la garganta del tubo venturi a la salida de la garganta el tubo se vuelve a ensanchar para tratar de restablecer las condiciones anteriores de presión, por esta razón no tiene pérdidas de presión considerables.

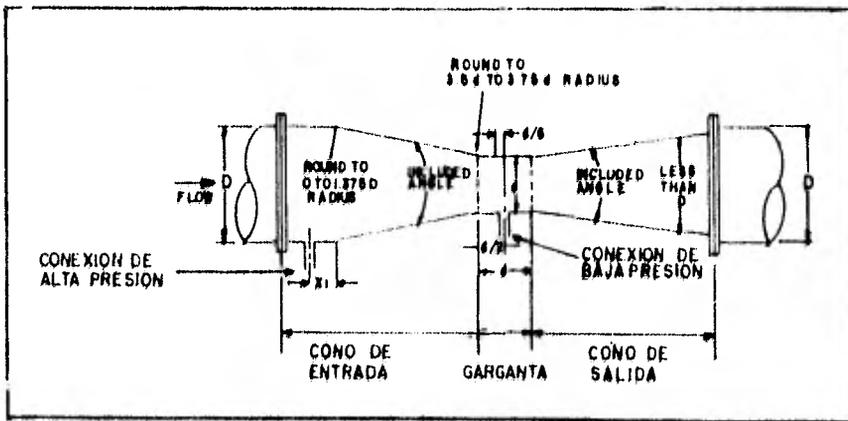


FIGURA 4.9

Usos.- Se puede utilizar para flujos compresibles e incompresibles, donde se requiera muy baja caída de presión como 5' H₂O. Acepta una cierta cantidad de sólidos en suspensión sin afectar la medición. Tiene una vida --- útil mayor que las placas de orificio.

Limitación.- El tubo Venturi es caro y de difícil instalación.

Fórmula utilizada para medición del flujo en medidores Venturi:

IV.3.1 Flujo incompresibles

$$Q = C_v A_2 \sqrt{\frac{2g/\Delta h (\gamma_0/\gamma_1 - 1)}{1 - (D_2/D_1)^4}} \quad \dots \quad 4.21$$

Q - gasto en (L T)

C_v - coeficiente de velocidad

A - área de la garganta

g - constante de gravedad

h - diferencia manométrica

γ₀ - gravedad específica del líquido en el manómetro

γ₁ - gravedad específica del fluido a través de la tubería

D₂ - área de la garganta

D₁ - área del cono de entrada

Como resumen de los medidores que utilizan el principio de Bernoulli presentamos a continuación la siguiente gráfica en la que se aprecia la caída de presión con diferentes medidores.

Ejemplo 4.3.-

Una presión diferencial de 2.5 psi es medida en las tomas de presión localizadas 1 diámetro aguas arriba y 0.5 diámetro aguas abajo de la entrada de la garganta de la tobera, de 2 plg de diámetro interior y ensamblada en un tubo de 3 plg cédula 80 que lleva agua a 60 °F. Calcule el gasto volumétrico.

Solución:

1.- $D = 2.9$ plg diámetro interior de un tubo de 3 plg cédula 80

2.- $\beta^3 = 2,000/2,900 = 0.69$

3.- $C = 1.13$ valor supuesto (flujo turbulento $Re = 1.5 \times 10^4$)

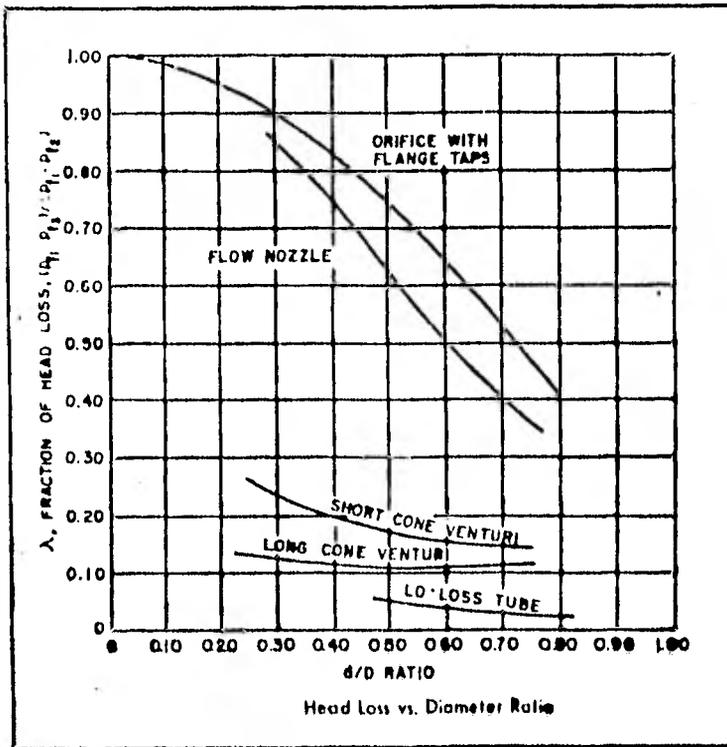
4.- $\rho = 62.37$ lb/ft³

5.- $\mu = 1.1$ centipoise

6.- $P = \gamma h$

7.- $h = \frac{2.5 \times 144}{62.371} = 5.8$ ft

8.- $Q = 19.65 D^2 C \sqrt{\beta^3 h} \text{ gpm} = 19.65(2.9)^2(1.13) \sqrt{5.8} = 449.729$ gpm



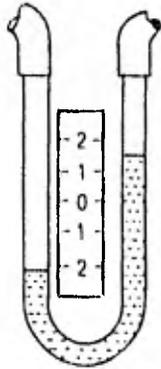
4.2.4 Mecanismos Secundarios.-

Los medidores de flujo consisten de un medidor primario y un mecanismo secundario. El mecanismo primario en nuestro caso convierte el flujo en una presión diferencial, el mecanismo secundario responde a esta presión diferencial desarrollando una indicación, controlando o produciendo una señal de transmisión eléctrica o neumática.

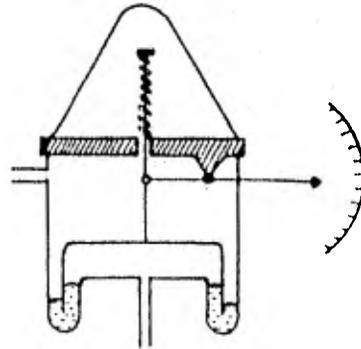
Los mecanismos secundarios que miden la presión diferencial pueden ser divididos en húmedos y secos:

a) Medidores húmedos, son los aparatos donde el fluido que ejerce la presión diferencial está en contacto con mercurio u otro líquido. En los manómetros líquidos la presión diferencial produce una diferencia entre las dos columnas del manómetro, esta diferencia en el nivel del líquido es arreglada para ejercer una fuerza que producirá un movimiento. El líquido sella

dor en estos instrumentos sirve como sello para separar la presión alta de la baja.

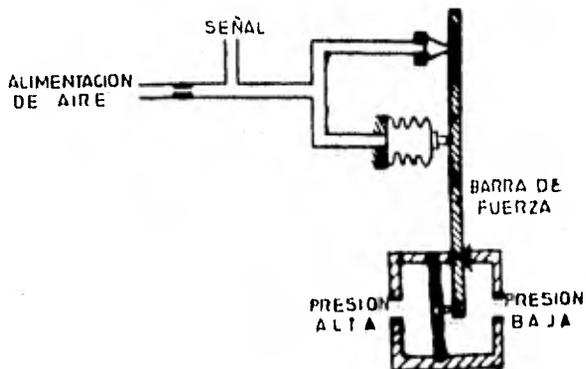


TUBO MANOMETRICO SIMPLE



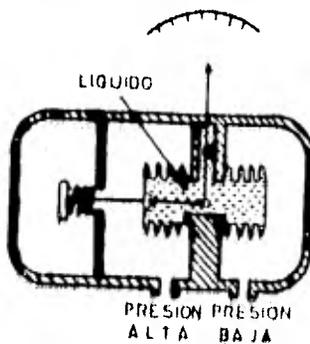
MEDIDOR DE CAMPANA

b) Los instrumentos secos se dividen en dos grupos: 1) tipo movimiento y el de fuerza balanceada. El tipo movimiento es usado para indicación directa, registro e integración y consiste en un sistema de fuelles a través de los cuales la presión diferencial es aplicada sobre el área del fuelle para desarrollar una fuerza. Esta fuerza deflexiona un resorte siendo este movimiento la salida. Los aparatos de fuerza balanceada son usados como transmisores con la unidad montada adyacente al medidor primario y uno o más medidores conectados eléctricamente o neumáticamente al transpisor. En estas unidades la presión diferencial actúa sobre un diafragma o muelle para desarrollar una fuerza y una corriente eléctrica o neumática desarrolla una segunda fuerza. Las dos fuerzas se oponen una contra otra. Un detector sensible al movimiento sensa cualquier desbalance en la fuerza y a través de un amplificador ajusta la corriente o presión para restablecer el balance, la corriente o presión es luego directamente proporcional a la presión diferencial.



CELDA DE PRESION DIFERENCIAL.

MEDIDOR DE FUELLAS



FABLA DE REFERENCIA

ELEMENTO	RANGO DE PRESTION	RANGO DE VACIO	SOBRE RANGO	EXPANSION DEL RANGO DE ESCALA	RANGO COMPUESTO
DIAFRAGMA					
3 plg-Cu-Ni-Mn	0-8 a 0-40 plg de agua	disponible	2 psi	disponible	disponible
2 plg-Cu-Ni-Mn	0-20 plg de agua a 0-10 psi	0-20 a 0-140 plg de agua	25 psi	disponible	disponible
Fuelle					
Latón	0-100 plg de agua a 0.125	0-10 a 0-30 plg de mercurio	50 psi	disponible	no disponible
316 SS	0-4.5 a 0-29 psi	no aplicable	60 psi	disponible	no disponible
Espiral					
Bronce	0-10 a 0-200 psi	0-20 a 0-30 plg de mercurio	28 psi 360 psi	disponible	disponible
Berilio-Cu	0-10 a 0-200 psi	0 a 20 a 0-30 plg de mercurio	50 psi 100 psi	disponible	disponible
Ni-Spm C	0-10 a 0-200 psi	0-20 a 0-30 plg de mercurio	22 psi 100 psi	disponible	disponible
316 SS	0-12 a 0-200 psi	0-25 a 0-30 plg de mercurio	52 psi 520 psi	disponible	disponible
Helicoidal					
Bronce	0-201 a 0-400 psi	no aplicable	260 psi 500 psi	disponible	disponible

ELEMENTO	RANGO DE PRESION	RANGO DE VACIO	SOBRE RANGO	EXPANSION DEL RANGO DE ESC.	RANGO COMPUESTO
Berilio-Cu	0-201 a 0-6000 psi	no aplicable	316 psi 8000 psi	disponible	disponible
Ni-Span	0-201 a 0-6000 psi	no aplicable	336 psi 7200 psi	disponible	disponible
316 SS	0-201 a 0-6000 psi	no aplicable	425 psi 8000 psi	disponible	disponible
Helicoidal para trabajo pesado					
316 SS	0-75 a 0-30000 psi	no aplicable	400 psi 30000 psi	disponible	no aplicable
Fuelles para presión abs.					
Bronce	0-100 mm Hg 0-35 psia	no aplicable	50 psia	disponible	no disponible
316 SS	0-125 mm Hg a 0-35 psia	no aplicable	35 psia	disponible	no aplicable
Doble espiral presión abs.					
Cobre-Berilio	0-40 a 0-100 psia	no aplicable	0-65 psia a 0-215 psia	disponible	no disponible
Ni-Span C Alloy	0-40 a 0-100 psia	no aplicable	0-65 psia a 0-210 psia	disponible	no aplicable
316 SS	0-40 a 0-100 psia	no aplicable	0-45 psia a 0-155 psia	disponible	no aplicable

4.3 ROTAMETRO. -

Descripción del Rotámetro.-

En su forma más elemental, el medidor de flujo de área variable o rotámetro consiste de dos partes esenciales:

1.- Un tubo de vidrio de borosilicato con guías internas de una cierta conicidad para ser montado verticalmente en el arreglo de la tubería. El extremo con el diámetro mayor siempre estará localizado en la parte superior del arreglo.

2.- Un flotador, el cual es libre de moverse dentro del tubo en el plano vertical.

Principio de Operación.-

El fluido pasa a través del tubo de la parte inferior a la superior del conjunto. Cuando no existe flujo el flotador reposa en la parte inferior del tubo guiado y su diámetro máximo es de tal forma seleccionado que el flotador bloquea totalmente la entrada inferior del tubo. Cuando el líquido comienza a pasar y alcanza al flotador, el efecto de flotación "aligera" al flotador, sin embargo como el flotador tiene una densidad más grande que el fluido el efecto de flotación no es suficiente para levantar el flotador. Como consecuencia de este fenómeno, se crea una resistencia hidráulica al paso del fluido ocasionando que la caída de presión se incrementa.

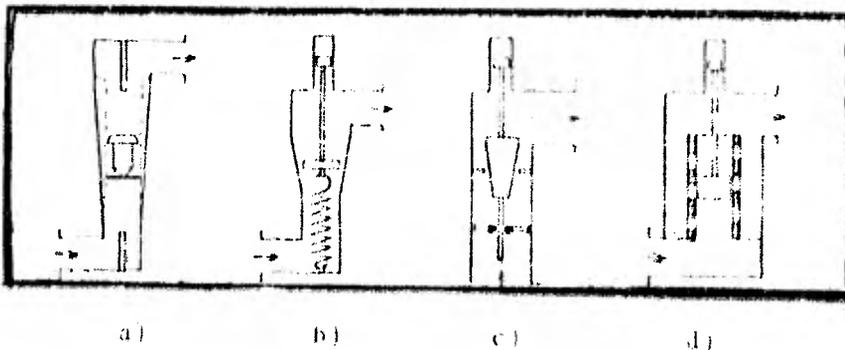
Quando la presión diferencial hacia arriba que ejerce el fluido más el efecto de flotación del mismo exceden el peso del flotador, entonces el flotador se levanta y "flota", dentro de la corriente del fluido.

Con el movimiento hacia arriba del flotador dentro del tubo guiado y cónico, el área anular entre las paredes internas del tubo y la perife

ria del flotador se incrementan. Al aumentar esta área anular, la presión diferencial a través del flotador disminuye por lo que el mismo alcanza un equilibrio dinámico debido a la integración de la presión diferencial a través del flotador más el efecto de flotación que balancean el paso del flotador.

Cualquier otra condición de desequilibrio provocado por un incremento en el flujo del fluido causa que el flotador suba o baje hasta encontrar su respectiva condición de equilibrio antes mencionado, indicando un nivel más alto o un nivel más bajo dentro del tubo del flotador. Esto significa que cualquier posición que tenga el flotador corresponde solamente a un valor particular de la razón del flujo. Si se provee al tubo en su parte exterior de una escala calibrada, la lectura del flujo podrá hacerse determinando por observación directa de la posición del flotador dentro del tubo de medición. En muchas ocasiones los tubos de medición son hechos o fabricados con metales, cuando la aplicación del vidrio no es satisfactoria para el uso al que se va a destinar.

Cuando el tubo es de metal, la posición del flotador deberá ser detectada magnéticamente o eléctricamente. El uso de sensores magnéticos para determinar la posición del flotador hace posible la operación de otras funciones además de la indicación del flujo; rotámetros como estos pueden ser usados para transmisiones neumáticas, eléctricas, señales de pulsos, para registrar, totalizar o para controlar también.



TIPOS DE ROTÁMETROS

Tipos de Rotámetros.-

- a) Rotámetro de tubo cónico con flotador libre, el flujo obliga al flotador a mantenerse en equilibrio.
- b) Tipo resorte es usado para remplazar la fuerza gravitacional don de se requiera insensibilidad a la altitud.
- c) Orificio con cono sellado es una variación que se usa cuando el tubo es de metal.
- d) Tipo pistón, donde el pistón se aleja dentro de un cilindro cuyas paredes tiene una serie de hoyos o ranuras.

Ventajas.-

- 1) Escala lineal
- 2) Rango de flujo 10:1
- 3) Celda de presión constante y extremadamente baja si se mantiene dentro de su rango.
- 4) Especialmente útil para tuberías de 3" a 12" y el rango de flujo varía de 1 gpm a 4 000 gpm.
- 5) Tiende a no ensuciarse por la velocidad del flujo.
- 6) Se puede leer el flujo directamente sin requerir de accesorios.
- 7) Puede medir flujos altamente viscosos.
- 8) Puede equiparse con un controlador de flujo o puede transmitir la señal a un tablero.

Limitaciones.-

- 1) La densidad y la viscosidad deben permanecer constantes para que la lectura sea confiable.
- 2) No maneja sólidos en suspensión.
- 3) Se requiere que la tubería en la que se coloque sea en un tramo vertical.

PARTES DE UN ROTAMETRO

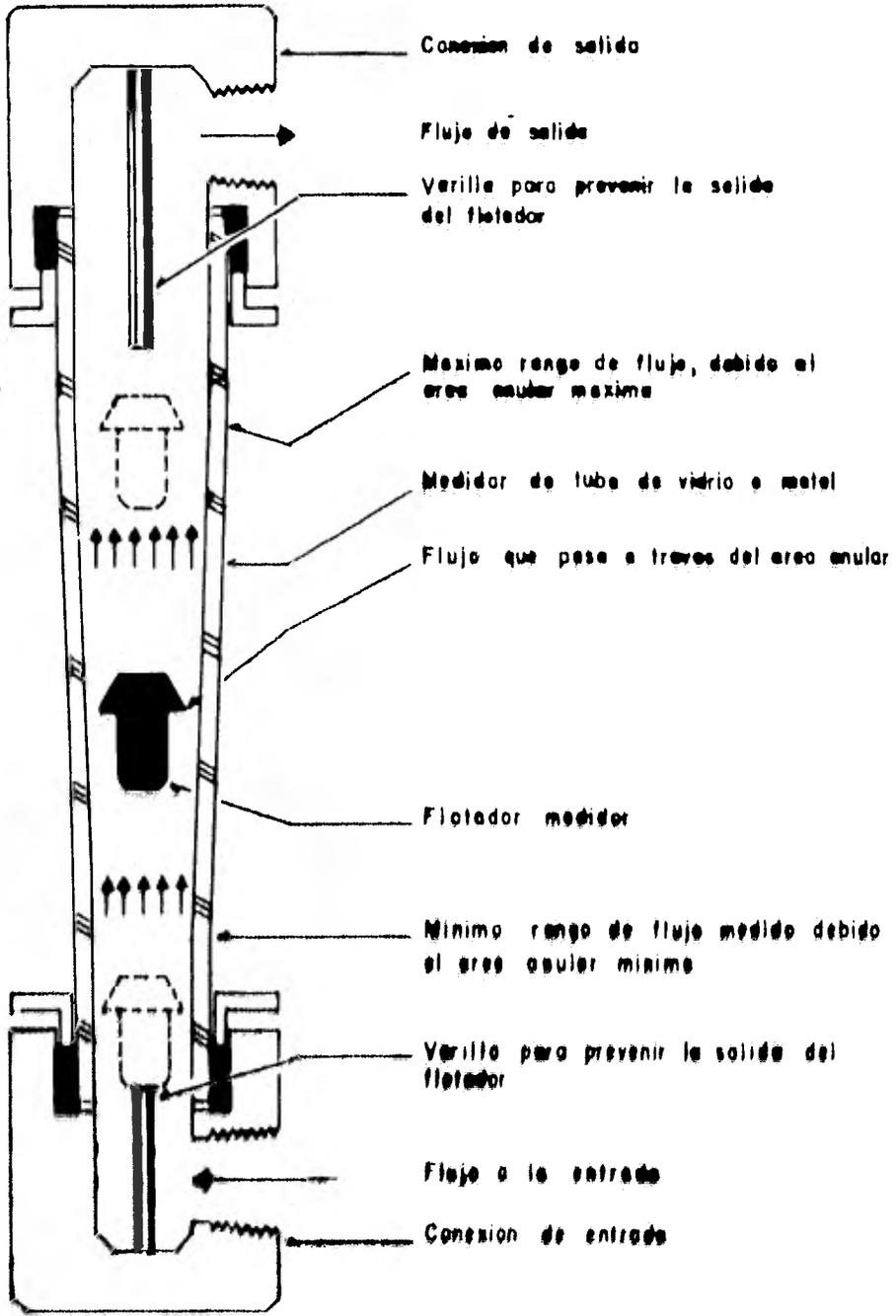


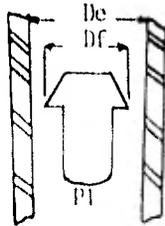
FIG. 411

ECUACION DE COMPORTAMIENTO DEL ROTAMETRO

Se considera que el rotámetro está flotando en equilibrio dinámico, es decir las fuerzas actuantes son igual a cero. Tomándose a las fuerzas hacia arriba positivas y negativas hacia abajo.

- a) Fuerza del fluido que actúa sobre el área total del flotador:

$$P_1 \left(\frac{\pi D_f^2}{4} \right) - P_2 \left(\frac{\pi D_f^2}{4} \right)$$



- D_f - diámetro del flotador
 D_t - diámetro del tubo
 W_f - peso del flotador
 P_1 - presión antes del flotador
 P_2 - presión después del flotador
 V_f - volumen del flotador
 γ_f - peso específico del flotador
 γ - peso específico del fluido

- ρ_f - densidad del flotador
 ρ - densidad del fluido
 Q - flujo volumétrico
 W - flujo másico
 h - caída de presión a través del orificio
 c - coeficiente de descarga
 k - coeficiente del rotámetro
 g - aceleración de la gravedad

b) Peso del flotador: $W = -V_f \gamma_f$ 4,23

c) Fuerza de flotación = $+V_f \gamma$ 4,24

- d) Ecuación de equilibrio

$$P_1 \left(\frac{\pi D_f^2}{4} \right) - P_2 \left(\frac{\pi D_f^2}{4} \right) - V_f \gamma_f + \gamma V_f = 0 \quad \dots \quad 4,25$$

$$\frac{\pi D_f^2}{4} (P_1 - P_2) - V_f (\gamma_f - \gamma) = 0 \quad \dots 4.26$$

e) Ecuación de flujo: $Q = cA_o \sqrt{2gh}$ 4.27

Siendo h la caída de presión en el orificio

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad \dots 4.28$$

Por lo tanto: $Q = cA_o \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}}$ 4.29

Siendo $A_o = \frac{\pi}{4} (D_t^2 - D_f^2)$ 4.30

Despejando $P_1 - P_2$ de la ecuación 4.26

$$P_1 - P_2 = \frac{4V_f (\gamma_f - \gamma)}{\pi D_f^2} \quad \dots 4.31$$

Sustituyendo 4.30 y 4.31 en 4.29

$$Q = \frac{c\pi}{4} (D_t^2 - D_f^2) \sqrt{\frac{2g \cdot 4V_f (\gamma_f - \gamma)}{\gamma D_f^2}} \quad \dots 4.32$$

$$Q = c \sqrt{\frac{\pi g}{2}} \left(\frac{D_t^2 - D_f^2}{D_f} \right) \frac{V_f (\gamma_f - \gamma)}{\gamma} \quad \dots 4.33$$

Sustituyendo Q por W/ρ

$$\frac{W}{\rho} = c \frac{\pi g}{2} \left(\frac{D_t^2 - D_f^2}{D_f} \right) \sqrt{\frac{V_f (\gamma_f - \gamma)}{\gamma}} \quad \dots 4.34$$

Sustituyendo $V_f = W/\gamma_f$

$$W = c \sqrt{\frac{\pi g}{2}} \frac{W}{\gamma_f} (\gamma_f - \gamma) \left(\frac{D_t^2 - D_f^2}{D_f} \right) \dots 4.35$$

la expresión (A) depende solo de constantes

$$c = f(\text{Re})$$

Re - número de Reynolds

$$\frac{Dt^2 - Df^2}{Df}$$

donde Df es constante y Dt es función de la posición del flotador

Pudiendo quedar:

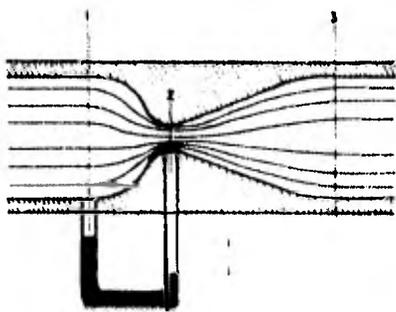
$$\left(\frac{Dt^2 - Df^2}{Df} \right) \frac{Df}{Df} = \left(\frac{Dt^2}{Df^2} - 1 \right) Df \quad \dots 4.36$$

$$K = Df \sqrt{\frac{\bar{h}}{2Qf} Wf (Qf - Q)}$$

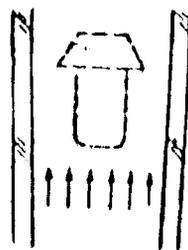
quedando expresado 4.35

$$W = cK \left(\frac{Dt^2}{Df^2} - 1 \right) \quad \dots 4.37$$

De la ecuación anterior observamos que la única variable es Dt de donde concluimos que $Q \propto At$ a diferencia del medidor tipo orificio donde $Q \propto h$.



PRESION DIFERENCIAL VARIABLE (h)
MEDIDOR DE ORIFICIO $Q \propto \sqrt{h}$



ROTAMETRO $Q \propto A$

4.4 MEDIDOR DE FLUJO MAGNÉTICO.-

Descripción. Este tipo de medidor consiste esencialmente de un transmisor de flujo conectado eléctricamente a un receptor que normalmente es un potenciómetro de corriente alterna que puede proporcionar indicación, registro, integración o control de flujo.

El transmisor de flujo consiste en un tubo no magnético a través del cual fluye el líquido, un electroimán que induce un campo magnético a través del tubo y dos electrodos metálicos que están al ras con la superficie interior del tubo y en contacto con la superficie que fluye.

La salida del transmisor es directamente proporcional a la velocidad promedio del líquido que fluye y por lo tanto, proporcional al volumen del flujo que fluye; la respuesta es lineal en cuanto a la velocidad del flujo.

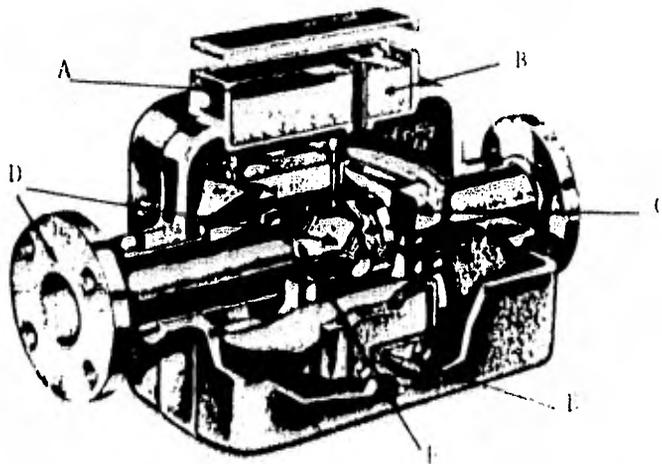


FIGURA 4.12

- A) Block terminal eléctrico
- B) Componentes de calibración
- C) Electroimán
- D) Línea de flujo
- E) Línea de corriente
- F) Electrodo de medición.

Teoría de operación. Su funcionamiento se basa en la ley de Faraday que dice. "Cuando un campo magnético es cortado por un conductor, se produce un voltaje cuya dirección es perpendicular a la dirección del conductor y a la dirección del campo magnético."

Aplicando esta ley a nuestro caso: Un fluido conductor que fluye a través de un tubo no magnético sujeto a un campo magnético, induce un voltaje en el fluido que es proporcional a la velocidad del flujo y a la intensidad del campo.

$$E = BDv \quad \dots \quad 4.38$$

E - voltaje generado

B - campo magnético

D - distancia de un electrodo a otro o sea el diámetro

v - velocidad del fluido

Para conocer el flujo que atraviesa una sección, usamos la ecuación:

$$Q = Av \quad \dots \quad 4.39$$

Q - gasto volumétrico

A - área de la sección

v - velocidad del fluido

Despejando de la ecuación 4.36 la velocidad

$$v = \frac{E}{BD} \quad \dots \quad 4.40$$

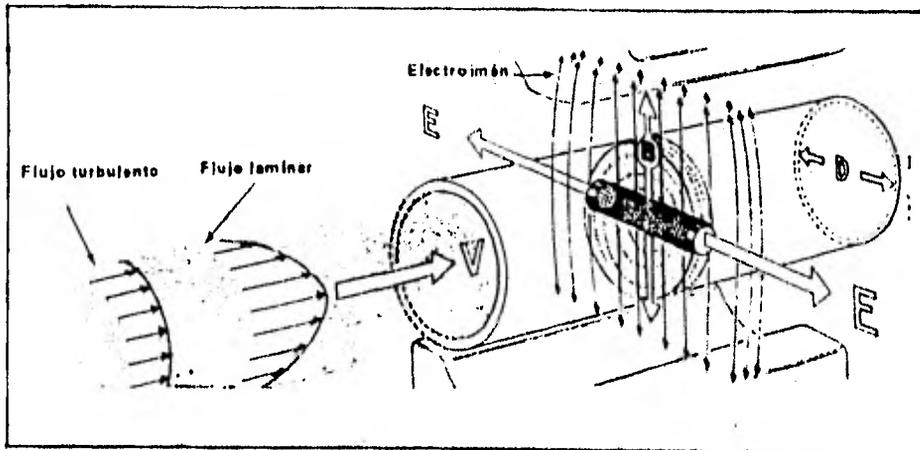
Sustituyendo 4.40 en 4.39, el flujo Q puede ser expresado

$$Q = \frac{AE}{BD} \quad \dots \quad 4.41$$

Si mantenemos el campo magnético constante, solo el voltaje será la variable que se estará midiendo.

$$Q = KE$$

..... 4.42



Usos y ventajas.- No es afectado por turbulencias, viscosidad y configuración del fluido (laminar o turbulento), tampoco es afectado por accesorios que haya antes del medidor. No tiene caídas de presión apreciables. Puede ser manufacturado para materiales resistentes a la corrosión y a la abrasión. Admite líquidos contaminados con sólidos en suspensión. Detecta rápidamente los cambios de gasto. Para zonas con emanaciones peligrosas se puede pedir a prueba de explosión.

Limitaciones.- La conductancia específica del fluido debe ser cercana o arriba de 200 micromhos, de acuerdo al fabricante del convertidor. Requiere de energía eléctrica para su funcionamiento. La medición del gasto para gases se hace a la presión y temperatura que se encuentre y por tanto requiere de medidores que den estas lecturas para hacer la conversión en unidades estandar (14.7 psi y 530° F).

4.5 MEDIDOR DE FLUJO TIPO TURBINA,-

Descripción.- El medidor de flujo tipo turbina es un medidor de flujo volumétrico, que mide el gasto linealmente por medio de una turbina localizada directamente en el flujo. Obtiene el flujo volumétrico basándose en dos principios:

- 1.- El valor del flujo volumétrico está relacionado con la velocidad del flujo en la sección:

$$Q = VA \quad \dots \quad 4.43$$

Q - gasto volumétrico
V - velocidad del fluido
A - área del medidor

- 2.- La velocidad del flujo está relacionada con la velocidad de la turbina.

$$V = wr \quad \dots \quad 4.44$$

V - velocidad ideal del fluido (sin pérdidas)
w - velocidad angular de los álabes
r - radio de la sección de los álabes de la turbina

De ahí que contando el número de revoluciones de los álabes por minutos se puede conocer el flujo volumétrico.

$$Q = w r A \quad \dots \quad 4.45$$

Cuando el flujo aumenta desde cero a través del medidor cierta cantidad del fluido pasa por el rodete sin que se registre, hasta que llega a un punto en que imparte suficiente fuerza para superar las fuerzas de fricción de las chumaceras. Estas fuerzas retardantes crean una diferencia entre la velocidad teórica y la real del rocete; diferencia que se compensa con la cte. de calibración R.

$$Q = \rho \omega r A \quad \dots \quad 4.46$$

Factores que afectan la medición. Regresando a la ecuación 4.46 la medición del flujo es correcto si el área de la sección transversal es constante. El área del rotor puede cambiar cuando cualquiera de las condiciones siguientes estén presentes:

- 1.- Erosión por contaminantes abrasivos (arena)
- 2.- Corrosión por contaminantes (ácidos)
- 3.- Depósitos (mezclas)
- 4.- Cavitación - por trabajar a bajas presiones cercanas al punto de evaporación del fluido.
- 5.- Obstrucciones - por basura que venga en el flujo.

Del segundo principio: la velocidad axial del fluido es proporcional a la velocidad del rotor. En realidad siempre hay fuerzas retardantes al rotor que varían la velocidad real a la velocidad en el rotor. Las fuerzas que actúan en el rotor están expresadas:

$$T_r = T_m + T_v + T_{mg} + T_{ri}$$

T_r - Torque en el rotor

T_m - Torque por la fricción mecánica

T_v - Torque por la viscosidad

T_{mg} - Torque magnético - Por la atracción entre contactos

T_{ri} - Torque por la inercia del rotor.

Generación de Señal,-

Básicamente los diferentes fabricantes de medidores tipo turbina tienen el mismo diseño y solo difieren en la forma de sensar el número de revoluciones del rotor:

- 1) Sistema de inductancia
- 2) Sistema fotoeléctrico y capacitivo
- 3) Sistema tipo contacto
- 4) Sistema de reluctancia variable

Los sistemas de reluctancia e inductancia generan señales senoidales de baja amplitud. Mientras que los sistemas de tipo contacto, fotoeléctrico y capacitivo dan trenes de pulso con ondas cuadradas de amplitud constante.

1) Sistema de inductancia.

En este sistema un magneto permanente cilíndrico es embutido en el rotor. Este magneto puede tener de 2 a 12 polos alternados, alrededor de su circunferencia. La bobina captadora está montada en la parte exterior del medidor y detecta alternativamente los polos norte y sur del magneto. La señal generada es idéntica a la que da un motor. Un factor que limita el uso de este tipo de sistema es la baja frecuencia de salida, limitada al número de polos.

2) Sistema Fotoeléctrico y Capacitivo.

El sistema fotoeléctrico opera interrumpiendo un rayo de luz entre una fuente emisora de luz y el receptor. La interrupción se hace cuando pasan los álabes u otros elementos del rotor.

El sistema capacitivo opera midiendo el cambio en la capacitancia del sensor al pasar el álabes del rotor o de otro elemento del rotor.

Ambos sistemas están limitados por su alto costo, por la fuente de suministro y por problemas en la instalación.

3) Sistema de interruptor magnético.

El sistema opera con magnetos que al pasar por el interruptor lo

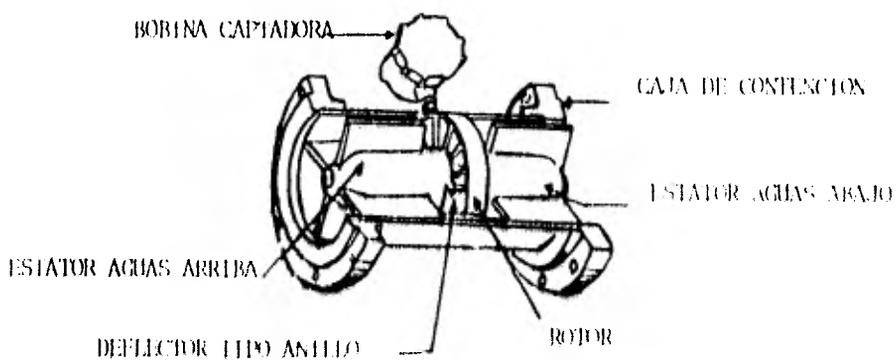
cierran y abren alternativamente y que al conectarse a un voltaje de corriente directa, la salida es una onda cuadrada con una amplitud constante y un período variable.

4) Sistema de Reluctancia variable.-

En este caso la señal es generada por el cambio del flujo magnético que pasa por la bobina. El voltaje de salida es proporcional al número de vueltas del alambre en el enbobinado y al cambio de flujo magnético en la bobina de contacto dando un voltaje que pico a pico es proporcional a la velocidad del rotor.

Partes de un medidor tipo turbina.-

- 1) Caja de contención. Es una sección de tubo bridado.
- 2) Deflector tipo anillo. Sirve para prevenir que el flujo choque contra el rotor y hace que el flujo pase sin demasiadas turbulencias.
- 3) Bobina captadora de señales. Recibe y manda la señal del sensor



- 4) Rotor. Se encuentra suspendido en el flujo. Normalmente sobre el rotor está el sensor que sirve para detectar el número de revoluciones.

- 5) Estatores aguas arriba y aguas abajo del rotor soportan y centran el eje. Los estatores también contienen al rotor así como los pasajes que sirven para balancear al rotor dinámicamente, evitando también en el flujo turbulencias. Algunos diseños no utilizan estatores sino una serie de tubos cuya finalidad es la misma.

Usos y Ventajas.-

1.- Se puede utilizar para líquidos y gases indistintamente; en el caso de los gases las unidades de medición serán a la presión y temperatura a que se encuentre el flujo.

- 2.- La medición es lineal.
- 3.- Se puede compensar la viscosidad.
- 4.- Buena exactitud y repetibilidad.
- 5.- Rango de flujo de 6 a 7 200 gpm en tubería de 1 a 10 plg.

En medidores con viscosidad compensada se pueden medir de 600 a 15 000 barriles por día.

- 6.- Fácil instalación.
- 7.- Puede operar en temperaturas de 100 a 750°F.

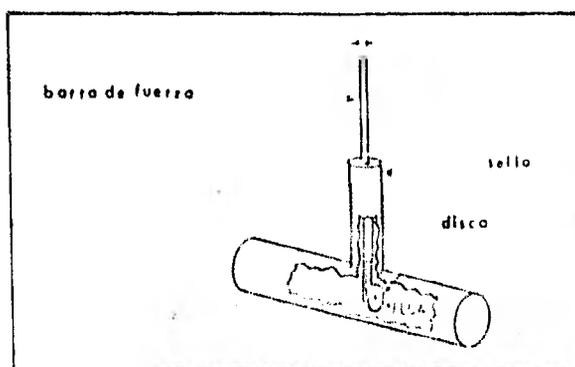
Limitaciones.-

- 1.- Alto costo.
- 2.- Limitado por el tipo de materiales viscosos que puede manejar.
- 3.- No hay arriba de 16 plg.
- 4.- Requiere de filtros.

4.6 MEDIDOR TIPO DISCO.-

Descripción. En estos medidores la fuerza del fluido es aplicada a un disco suspendido en el flujo como se muestra en la figura. El dis-

co puede ser de 5/10 a 8/10 del diámetro del tubo, dependiendo del fluido medido y de su velocidad. Suficientes datos han sido desarrollados permitiendo que el valor del coeficiente pueda establecerse de las dimensiones del disco. La calibración con el flujo con el que trabaje se hace cuando se requiere máxima exactitud.



MEDIDOR TIPO DISCO

FIG. 4.16

La presión diferencial desarrollada por el flujo a través del orificio anular produce una fuerza en el disco proporcional a la raíz cuadrada del flujo. Esta fuerza es medida por un mecanismo de balanceo de fuerza diferencial y puede ser mecánico o eléctrico.

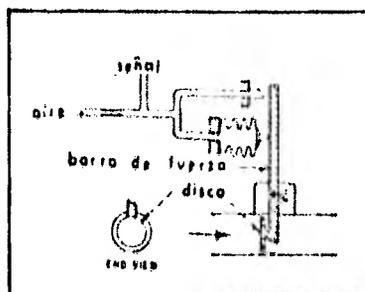


FIG. 4.17

Usos y Ventajas.-

- 1) Es particularmente útil en la medición de fluidos corrosivos o sucios.
- 2) No requiere de conexiones para las tomas de presión esto elimina la necesidad de sellos o sistemas de purga.
- 3) Se producen medidores que pueden manejar fluidos hasta de 700°F.
- 4) Su repetibilidad es excelente.
- 5) Mide el flujo en unidades másicas.

Limitaciones.-

- 1.- Los datos de los coeficientes son menos completos que para los orificios.

4.7 MEDIDORES DIRECTOS.-

Se las denomina bajo este nombre a todos los medidores que cumplen con lo siguiente.

- 1.- El fluido en el medidor "desplaza" al incremento de volumen del fluido que estaba en él.
- 2.- La medición volumétrica es directa o positiva, con esto queremos dar a entender que por cada revolución que el mecanismo medidor dé, se tiene un volumen definido de fluido.

Factores que afectan la exactitud de la lectura:

- 1.- Presión diferencial a través de sus paredes.-

Las paredes estacionarias de la cámara de medición deben ser suficientemente rígidas para tener un mínimo de deflexión en el rango de pre-

sión de operación. La deflexión de las paredes de la cámara de medición que continuamente se mueven son función de la caída de presión en el medidor debido a cambios bruscos en el rango del flujo, viscosidad, densidad o en la energía requerida (P) para vencer a la fricción (viscosa o mecánica) pueden significativamente cambiar la deflexión relativa de las paredes en movimiento.

2.- Cambios en la temperatura.-

Los cambios en la temperatura del fluido a medir, así como grandes cambios en la temperatura del medio ambiente pueden influir en la temperatura de las paredes del medidor, cambiando las dimensiones iniciales del elemento de medición, en proporción al coeficiente técnico de expansión del material que está construido (C de E). Coeficiente lineal y cúbico de expansión técnica de los materiales más usados:

Material	C de E (% por °F)	
	Lineal	Cúbico
Hierro fundido	0,00065	0,002
Acero al carbón	0,00065	0,0019
Acero inoxidable	0,00096	0,0029
Bronce	0,0010	0,0030
Aluminio	0,0012	0,0036

Ejemplo: A 20°F encontrar el cambio en volumen del hierro fundido y del aluminio.

- a) Hierro fundido $v = 0,002 \times 20 = 0,04\%$ del volumen
- b) Aluminio $v = 0,0036 \times 20 = 0,07\%$ del volumen

3.- Erosión y Depósitos.

La erosión puede ser provocada por la abrasión mecánica o por la

corrosión química. Los depósitos pueden resultar de sustancias disueltas en el fluido de medición tales como arena, herrumbre, etc., resultando de sedimentos o de la corrosión química creando incrustaciones y erosionando las superficies de las cámaras de medición. (lóbulos, engranes, álabes, etc.).

Usos.-

Los medidores de desplazamiento positivo en general dan mayor exactitud que los medidores de tipo velocidad (medidores tipo turbina, placa de orificio, etc.) para fluidos que tengan más de 4 centipoise, por su relativa insensibilidad para altas viscosidades.

Formas de operación.-

La energía necesaria para la operación de estos medidores la toman de la presión en la línea. De ahí que con excepción de la energía adicional que se requiere para la operación del equipo auxiliar tales como transmisiones y registros no requiere más.

Clasificación.-

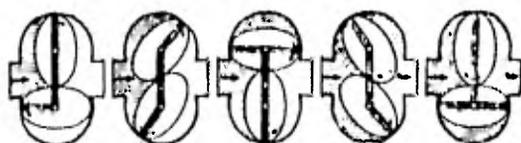
La clasificación de los medidores directos se hace de acuerdo a la forma que tienen las cámaras que dividen el flujo en incrementos de volumen.

Medidores Directos

- | | |
|---|--------------------------------|
| { | 1. Medidor de ruedas ovaladas |
| { | 2. Medidor de disco oscilante |
| { | 3. Medidor de pistón oscilante |
| { | 4. Medidores de lóbulo |
| { | 5. Medidor tipo rotativo, |

4.7.1 Medidor de Ruedas Ovaladas.

Descripción.- Cada revolución de las ruedas ovaladas transporta desde la entrada hasta la salida del medidor un volumen que corresponda a la capacidad de la cámara de medición. El caudal medido por consiguiente corresponde al número de revoluciones por la capacidad de la cámara de medición.

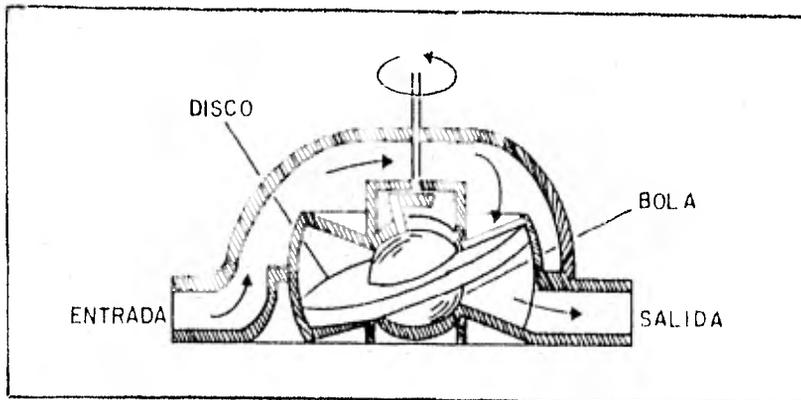


SISTEMA DE MEDICION CON RUEDA OVALADA

Un tren de engranes de reducción transmite las revoluciones al mecanismo indicador y totalizador donde se marca el caudal medido. Casi todos los tipos de ruedas ovaladas pueden ser combinados con transmisores de contacto o generadores de corriente para el mando de indicadores, registradores o reguladores.

4.7.2 Medidor de Disco Oscilante.

Operación.- El agua entra al medidor por el lado izquierdo y golpea al disco, el cual está excéntricamente montado. Al pasar el fluido por el medidor, el disco oscila en un eje vertical ladeándose de arriba hacia abajo, dando una indicación directa del volumen del líquido que ha pasado. La posición del disco divide a la cámara en dos compartimentos, los cuales son sucesivamente llenados y vaciados, teniendo cada compartimento un volumen definido. Los movimientos del disco son transmitidos a un tren de engranes y de ahí al registro.



MEDIDOR DE DISCO OSCILANTE

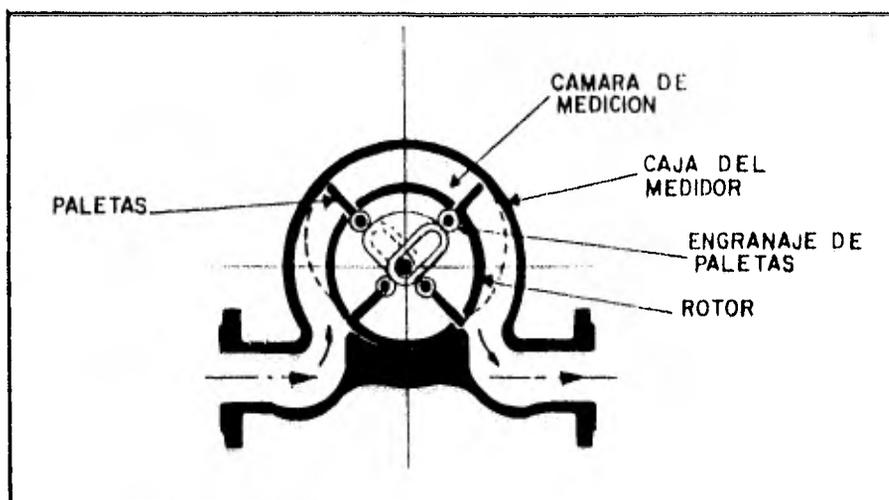
Usos.- Es muy utilizado para la medición de agua doméstica e industrial y en la totalización de flujos industriales. Puede emplearse en la dosificación automática en que el interruptor está accionado por el medidor; puede utilizarse en líquidos con viscosidad alta y manejar fluidos corrosivos. El medidor puede estar acoplado a una válvula solenoide, un motor de bomba u otro equipo con el fin de controlar al flujo.

4.7.3 Medidores Rotativos.-

Descripción.- Este tipo de dispositivo toma una cantidad o porción de flujo entre dos aletas conectadas al rotor y al girar éste, transmite el movimiento a un contador con un sistema de engranes, sumando las porciones, se obtiene la cantidad total que se llevó a través del medidor. Cada revolución del rotor corresponde a una serie continua de 4 cámaras de medición, ver figura.

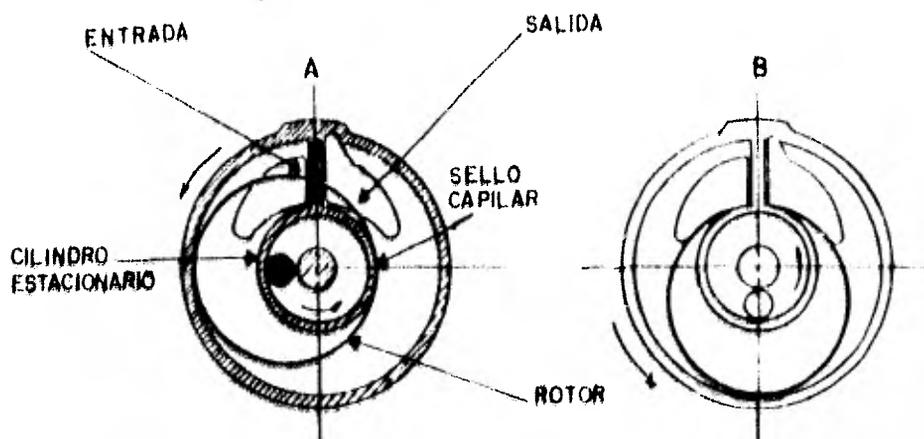
El medidor consta de una caja, la cual tiene un rotor que gira sobre cojinetes de bolas, moviendo cuatro aletas espaciadas a intervalos iguales. Arriba de la caja va un adaptador que contiene un sistema de engranes que comunica a un calibrador; arriba de él va conectado un contador, cuya lectura indica el volumen del líquido que pasa a través del medidor. Lleva

también un filtro, que va alojado dentro del recipiente. Este dispositivo se instala con el objeto de evitar el peso de impurezas contenidas en el fluido que pasa a través de el y que puedan llegar hasta el rotor y lo obstruyan.

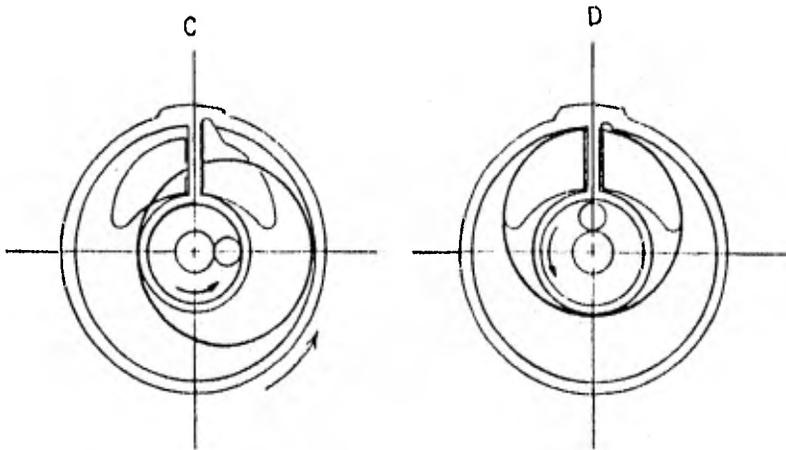


MEDIDOR DE PALETAS DESLIZABLES

SECUENCIA EN MOVIMIENTO



MEDIDOR DE PISTON OSCILATORIO



MEDIDOR DE PISTÓN OSCILATORIO

PARTES DEL MEDIDOR

- A) Entrada del Fluido
- B) Salida del Fluido
- C) Cilindro Estacionario
- D) Rotor

4.7.4 Medidor de Pistón Oscilante.

Operación.- El pistón es impulsado por la presión del fluido, moviéndose alternativamente hacia adelante y hacia atrás. Registrándose el número de carreras se conoce el volumen del fluido que pasa. Ver figura.

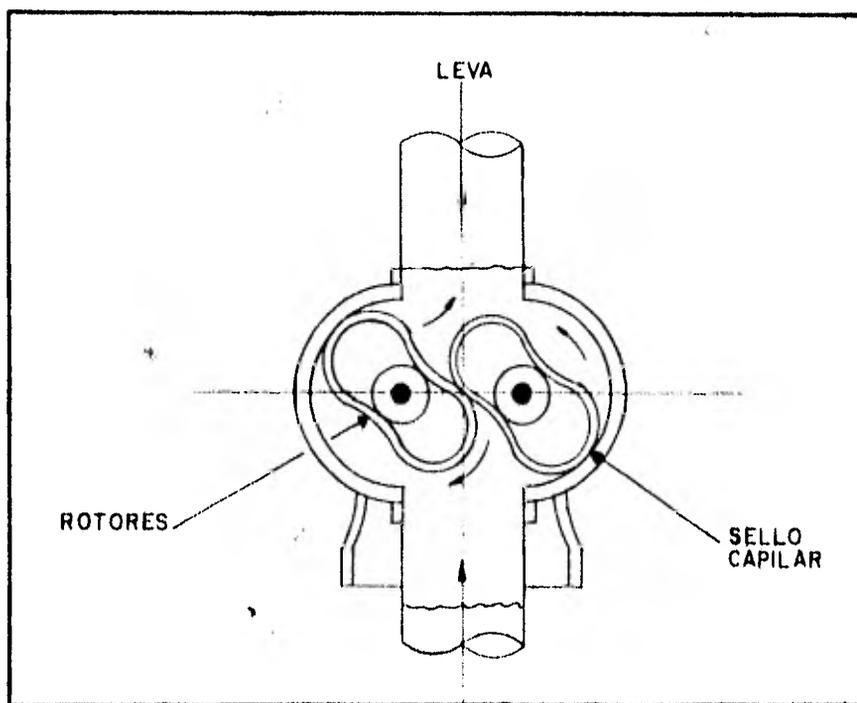
Usos.- Opera dentro de un amplio intervalo de viscosidades, se le emplea para líquidos, puede medir hasta 1 500 gpm.

4.7.5 Medidor de Lóbulos.

Descripción.- Dos lóbulos dentro de una cámara giran sin estar

en contacto entre sí o con la cámara. Al girar desplazan una cantidad constante de flujo, dando con el número de revoluciones del rotor una indicación del gasto total que atraviesa por el medidor.

Usos.- El medidor de lóbulos puede ser usado tanto para gases como para líquidos en tuberías de 1/2" a 8" y en un rango de temperaturas de -65 a 450°F.



MEDIDOR DE LOBULOS

LIQUIDOS LIMPIOS LIQUIDOS SUCIOS VAPOR O GAS LIQUIDOS VISCSOS LIQUIDOS COARRROSIVOS LIXOS ABRAIVOS LIXOS FIBROSOS SERVICIO CON ALTA TEMPERATURA SERVICIO CRIOGENICO FLUJO A BAJA VELOCIDAD TUBOS PARCIALMENTE LLENOS FLUJOS EN TORNAS FLUJOS EN CANALES ABIERTOS

PRESION DIFERENCIAL	ORIFICIO	A	C	A	B	B	C	D	A	A	D	D	C	D
	VENTURI	A	B	A	C	C	C	C	C	B	C	D	C	D
	TOBERAS Y TUBOS	A	C	A	C	C	C	C	C	B	C	D	C	D
	TUBO PILOT	A	C	A	C	B	D	D	C	B	C	D	D	D
	CODOS	A		A	C	B	D	D	C	D	D	D	C	D
	MAGNETICO	A	A	D	B	A	A	A	C	D	B	C	B	D
	MASA	A	C	A	B	B	D	D	C	C	C	D	C	D
OSCILATORIO	EYECTOR TIPO VORTICE	A	C	A	C	B	D	D	C	C	D	D	D	D
	FLUIDICO	A	C	D	C	B	D	D	C	C	D	D	D	D
	VORTICE DE PRECISION	D	D	A	D	D	D	D	C	D	D	D	D	D
	DESPLAZAMIENTO POSITIVO	A	D	A	A	C	D	D	C	B	C	D	D	D
	DISCO	A	B	B	B	B	C	D	C	C	D	D	C	D
	TURBINA	A	C	A	C	C	D	D	C	B	C	D	D	D
ULTRASONICO	TIEMPO MOMENTANEO	A	C	D	C	C	D	D	D	C	C	D	D	D
	COMUESTO	D	A	D	C	C	C	C	D	D	C	D	C	D
AREA	VARIABLE	A	B	A	B	B	D	D	B	D	C	D	C	D
	VERTICEDOR Y MEDIDOR	A	B	D	D	C	C	C	D	D	B	A	D	A

A-Disefiado para este servicio B- Normalmente aplicable para este servicio C- Aplicable para este servicio bajo ciertas condiciones

D- No aplicable para este servicio

PRESTION DIFERENCIAL

	ORIFICIO	VENTURI	TOBERAS Y TUBOS DE FLUJO
SERVICIO	Líquidos y gases incluyendo vapor	Líquidos y gases incluyendo vapor	Líquidos y gases incluyendo vapor
PRESTION DE DISEÑO	Determinada por el transmisor	Determinada por el transmisor	Determinada por el transmisor
TEMPERATURA DE DISEÑO	- 20 a + 250° F	Determinada por el transmisor	Determinada por el transmisor
RANGO DE FLUJO	de 0.11 cc/min o equivalente de gas hasta-determinado por el tubo	de 5 gpm líquidos; 20 SCFM gases; determinada por el tubo	De 5 gpm líquidos; de 20 SCFM gases
ESCALA	raíz cuadrada	raíz cuadrada	raíz cuadrada
SEÑAL	electrónica analógica o neumática	electrónica analógica o neumática	electrónica analógica o neumática
EXACTITUD	+ 1% de flujo máximo descalibrado e incluye transmisor	+ 1% escala llena; descalibrado e incluye transmisor	+ 1% escala llena incluyendo transmisor; calibración recomendada
RANGIABILIDAD	4:1 para un transmisor dando el punto de ajuste (span)	4:1 para un transmisor dando el punto de ajuste	4:1 para un transmisor, dando el punto de ajuste (span).

	ORIFICIO	VENTURI	TOBERAS Y TUBOS DE FLUJO
CONEXIONES TERMINALES	Montado entre Bridas	Bridada	Bridado o montado entre bridas
TAMAÑO	Determinado por el tamaño del tubo	3" a 72"	3" a 48"
VENTAJAS	Fácil de instalar, usa un transmisor independientemente del tamaño del tubo; bajo costo, amplia variedad de materiales disponibles; fácil de cambiar su capacidad.	Cafda de presión baja, bueno para todos y líquidos sucios; usa un transmisor independiente del tamaño del tubo.	Económico; cafda de presión baja; usa un transmisor independiente del tamaño del tubo; la tobera es usada comúnmente para vapor.
LIMITACIONES	Usar orificios excéntricos o placas segmentadas para flujos sucios o lodos; orificios cuadrantes biselados para líquidos viscosos; se requiere de tubería recta aguas arriba del medidor; tiene cafda de presión más alta que todos los demás medidores diferenciales.	El más caro de los medidores diferenciales; generalmente limitado a aire y agua; grande y pesado especialmente en tamaños grandes.	El tubo de flujo carece de la misma cantidad de datos que el orificio; su aplicación en flujos viscosos está limitada. Se recomienda se calibre.

AREA VARIABLE ROTAMETRO

SERVICIO	Líquidos y gases incluyendo vapor
PRESION DE DISEÑO	Hasta 350 psig (vidrio); hasta 720 psig (metal)
TEMPERATURA DE DISEÑO	Hasta 400° F (vidrio); hasta 1000°F (metal)
RANGO DE FLUJO	Líquidos 0.01 cc/min hasta 4000 GPM; gases 0.3 cc/min hasta 1 300 SCFM
ESCALA	Lineal o logaritmica
SEÑAL	Visual; electrónica o analógica neumática
EXACTITUD	± 0.5% de grado hasta 10% en escala total dependiendo del tipo, tamaño y calibración
RANGABILIDAD	5:1 a 12:1
CONEXIONES TERMINALES	Roscada o bridada
TAMANOS	Hasta 3"; también es usada como un medidor de by pass, en tuberías mayores
VENTAJAS	Barato; se autolimpia, variaciones en la viscosidad son críticas; lectura directa; no requiere de energía; puede ser un indicador directo de flujo másico; mínimos requerimientos de tubería.
LIMITACIONES	Requiere de accesorios para transmisión de datos, debe estar montado verticalmente; uso de gas requiere de mínima contrapresión.

TURBINA

SERVICIO	Líquidos limpios y gases incluyendo vapor
PRESTION DE DISEÑO	Hasta 3 000 psig
TEMPERATURA DE DISEÑO	-450 °F a 500°F
RANGO DE FLUJO	0.001 hasta 40 000 GPM en líquidos; hasta 10 000 000 scfh en gases
ESCALA	Lineal cuando el número Reynolds es 10 000 o mayor
SEÑAL	Frecuencia o eléctrica analógica
EXACTITUD	+0.25% en líquidos; + 1% en gases; calibración en fábrica debe simular las condiciones de operación de viscosidad y lubricidad para líquidos.
RANGEABILIDAD	10:1 a 50:1
CONEXIONES TERMINALES	Bridada o roscada
TAMAÑOS	Hasta 24"; también es usado como un medidor by-pass
VENTAJAS	Uno de los medidores más exactos; buen rango de operación; fácil de instalar y mantener; diseños disponibles para flujos muy lentos; peso ligero y su tamaño es reducido.
LIMITACIONES	Sensibles a incrementos en la viscosidad; evita su uso donde el estado del líquido puede cambiar; se requiere de tubería recta aguas arriba así como de filtro.

MAGNETICO

SERVICIO	Líquidos conductivos eléctricamente o lodos
PRESTON DE DISEÑO	hasta 1 500 psig
TEMPERATURA DE DISEÑO	hasta 360°F
RANGO DE FLUJO	0.01 hasta 500 000 GPM
ESCALA	Lineal
SEÑAL	Electrónica análoga; digital
EXACTITUD	± 0.5% de grado hasta ± 2% a escala total; calibrado en fábrica
RANGIABILIDAD	10:1
CONEXIONES TERMINALES	Bridada
TAMAÑOS	0.1" a 120"; también usada como medidor de by-pass
VENTAJAS	No es afectado por cambios en la densidad y viscosidad del fluido, no tiene caída de presión; bidireccional; no tiene obstrucción al flujo; fácil de recalibrar.
LIMITACIONES	Costo alto; siempre requiere de energía eléctrica; para líquidos y lodos únicamente; se requiere que el fluido tenga una conductividad eléctrica de 5 micro Siemen o mayor; en tamaños grandes son pesados y grandes.

TIPO DISCO (TARGET)

SERVICIO	Líquidos y gases incluyendo vapor
PRESION DE DISEÑO	Hasta 10 000 psig para líquidos y gases
TEMPERATURA DE DISEÑO	Hasta 750 F para líquidos y gases
RANGO DE FLUJO	Desde 0.07 gpm para líquidos; desde 0.3 SCFM para gases
ESCALA	Raíz cuadrada o lineal
SEÑAL	Neumática o analógica eléctrica
EXACTITUD	1/2% a 5% a escala total; calibrado en fábrica
RANGEABILIDAD	3:1
CONEXIONES TERMINALES	Bridadas o roscadas
TAMAÑO	Hasta 8 pulg.
VENTAJAS	No tiene partes que se muevan; relativamente barato; bueno para fluidos calientes adheribles y con sedimentos.
LIMITACIONES	Necesita 20 diámetros aguas arriba y 10 diámetros aguas abajo de tubería recta para mantener la exactitud; la lectura es un tanto por ciento de la escala; rango limitado.

DESPLAZAMIENTO POSITIVO

SERVICIO	Líquidos limpios y gases
PRESTION DE DISEÑO	Hasta 1 400 psig para líquidos y gases
TEMPERATURA DE DISEÑO	Hasta 600 F en líquidos; hasta 250 F en gases
RANGO DE FLUJO	De 0.1 a 9 000 gpm para líquidos; de 0.5 a 100 000 SCFH en gases
ESCALA	Lineal
SEÑAL	Pulsos o eléctrica analógica
EXACTITUD	1/2 en líquidos; 1% en gases; calibrado en fábrica
CONEXIONES TERMINALES	Bridadas y roscadas
RANGEABILIDAD	10:1
TAMAÑOS	Hasta 12 pulg.
VENTAJAS	Ideal para líquidos viscosos; bueno para transferencias seguras de fluido; útil como totalizador de la medición; existen versiones de estos medidores que no requieren de energía eléctrica; se requiere de muy poca tubería recta aguas arriba.
LIMITACIONES	Sujeto a daños mecánicos; requiere de pruebas periódicas; sensibles a la suciedad, llegando a requerir de filtros aguas arriba; en tamaños grandes son extremadamente pesados y grandes, requiriendo especial cuidado en su instalación.

MASICO

	EFECTO CORIOLIS	TERMICO
SERVICIO	Líquidos y todos	Gases y líquidos
PRESTION DE DISEÑO	Hasta 275 psig	500 psig y más altas
TEMPERATURA DE DISEÑO	Hasta 250 F	Arriba de 150 F
ESCALA	Lineal	Exponencial
EXACTITUD	1% de grado	1% a escala llena
RANGIABILIDAD	10:1	10:1
CONEXIONES TERMINALES	Roscadas o bridadas	Roscadas o bridadas
TAMANOS	1/8 pulg a 1 pulg	1/8 pulg a 10 pulg
VENTAJAS	Lectura directa de masa; puede usarse en aplicaciones muy difíciles	Lectura directa de masa; muy poca caída de presión; útil para medir gases con poca velocidad.
LIMITACIONES	Caro y complejo	Afectado por revestimientos; algunos diseños son frágiles.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO IV

- 1.- Douglas M. Considine., "PROCESS INSTRUMENTS AND HANDBOOK".
- 2.- Douglas M. Considine., "ENCYCLOPEDIA OF INSTRUMENTATION AND CONTROL".
- 3.- Douglas M. Considine., "HANDBOOK OF APPLIED INSTRUMENTATION".
- 4.- Perry and Chilton, "CHEMICAL ENGINEERS HANDBOOK".
- 5.- Shecter, "MECANICA DE LOS FLUIDOS".
- 6.- Honeywell, "FLOW METER ENGINEERING HANDBOOK".
- 7.- Spink, "FLOW METER HANDBOOK".
- 8.- Dowden, "FLUID FLOW MEASUREMENT".
- 9.- José Narcif, "INGENIERIA DE CONTROL AUTOMATICO".
- 10.- Hollman, "EXPERIMENTAL METHODS FOR ENGINEERS".

C A P I T U L O V

CAPITULO V

MEDICION DE NIVEL

- 5.1 Uso de los medidores de nivel
- 5.2 Observaciones generales
- 5.3 Clasificación de los medidores de nivel
- 5.4 Medidores visuales
- 5.5 Medidor de nivel tipo flotador
 - 5.5.1 Medidor de flotador y cable
 - 5.5.2 Control de nivel
- 5.6 Medidor de nivel tipo desplazador
 - 5.6.1 Controlador de nivel proporcional
- 5.7 Medidores que utilizan la presión hidrostática como principio de operación
 - 5.7.1 Manómetros
 - 5.7.2 Medidores de diafragma
 - 5.7.3 Celda de presión diferencial
 - 5.7.4 Medidor de nivel tipo burbujeo
- 5.8 Medición de nivel por capacitancia.

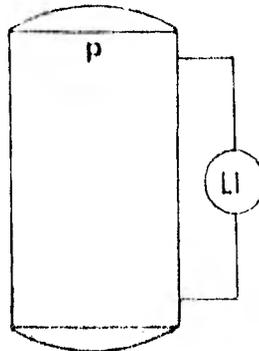
CAPITULO V

MEDICION DE NIVEL

La medida del nivel de líquidos es una de las variables que se encuentra con más frecuencia en las plantas de proceso. El nivel particular del líquido en cada recipiente puede ser de importancia primordial para la operación del proceso debiéndose mantener a una altura predeterminada sin tomar en cuenta las condiciones de carga del proceso.

5.1 USO DE LOS MEDIDORES DE NIVEL

5.1.1 Cuantifica el volumen del líquido contenido en el recipiente.



$$V = LA \quad \dots\dots 5.1$$

$$V = LA,$$

V = Volumen de líquido

A = Área del tanque

L = Columna de líquido

INDICADOR DE NIVEL

5.1.2 Controla el flujo de salida para un proceso continuo en el que el recipiente actúa como amortiguador para absorber las irregularidades del proceso, ejemplo en bombas manteniendo su columna estática estable.

5.1.3 En tanques a presión atmosférica

$$p = \frac{V}{V_0}$$
$$p = \frac{V}{V_0}$$

..... 5.2
..... 5.3

$$Q = cA \sqrt{2gh} \quad \dots \quad 5.4$$

A - área del tubo en la sección

c - constante de aforo

g - constante de gravedad 9.8 m/ seg

h - altura del líquido

P - presión atmosférica

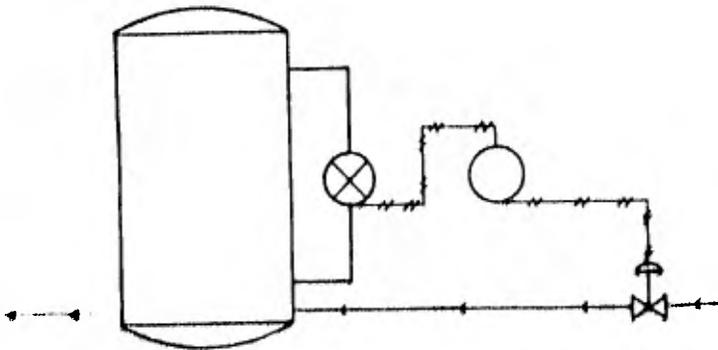
- b) En tanques presurizados, el flujo se mide sumando la presión en la ecuación 5.2.

$$h + \frac{P}{\gamma} = \frac{v^2}{2g} \quad \dots \quad 5.5$$

$$v = \sqrt{2g (h + P/\gamma)} \quad \dots \quad 5.6$$

$$Q = cA \sqrt{2g (h + P/\gamma)} \quad \dots \quad 5.7$$

P - presión diferente a la atmosférica



CONTROL DE FLUJO DE SALIDA.

5.2 OBSERVACIONES GENERALES.

- a) Los medidores de nivel deben escogerse de acuerdo al rango de medi-

ción, naturaleza del fluido que se va a medir, condiciones de operación, exactitud, señal de salida requerida, mantenimiento y costo.

- b) Las conexiones para el instrumento de nivel deben ser tomadas directamente al tanque y no a las líneas de flujo del proceso.
- c) Cuando dos o más instrumentos requieran de entradas en el tanque, deben mantenerse en un mínimo éstas, usando conexiones T o una tubería común.

5.3 CLASIFICACION DE LOS MEDIDORES DE NIVEL.-

5.3.1 De acuerdo al principio que utilizan para indicar el nivel.

Principio de Operación	{	Visual Flotación Presión hidrostática Radioactivo Sónico Capacitivo
------------------------	---	--

5.3.2 Clasificación de los medidores según el uso.-

Medición de nivel en Tanques abiertos	{	Visual Presión Hidrostática	{	Burbujeo Caja de diafragma Manómetro
		Flotador	{	Flotador y cable Desplazador
Medición de nivel en tanques cerrados	{	Presión diferencial Flotador de desplazamiento Radioactivo Sónico Capacitivo		

5.4 MEDIDORES VISUALES.-

Los medidores visuales se usan cuando se requiere una indicación local directa del tanque y cuando el líquido esté apreciablemente limpio. Estos indicadores pueden ser, un tubo de vidrio o tener un lado de vidrio por el que se vea el nivel. El medidor puede estar calibrado en cm o en plg, no se recomienda que tenga un rango mayor de 30 plg, pero si se requiere se pueden usar medidores de vidrio traslapados.

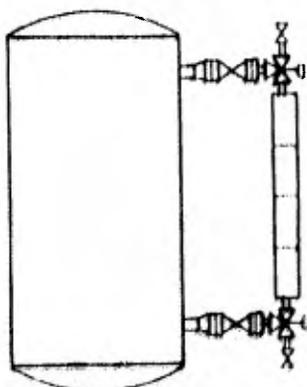
Para su instalación se requiere de dos salidas en el tanque en el nivel inferior y en el nivel superior, para que transmitan la altura o presión hidrostática del líquido.

Usos.

- 1) Indicación local del nivel.
- 2) Tanques abiertos a la atmósfera o presurizados siempre y cuando no rebasen de 15 lb/plg^2 .

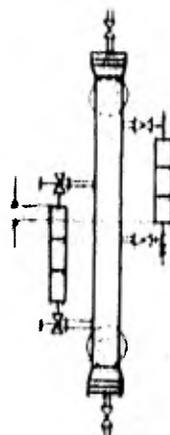
Restricciones.-

- 1) El uso de estos medidores está restringido a líquidos que se encuentren abajo de 200°F y 15 lb/plg^2 .
- 2) El líquido a medir no debe ser tóxico ni peligroso.



MEDIDOR DE VIDRIO DE UNA SECCION

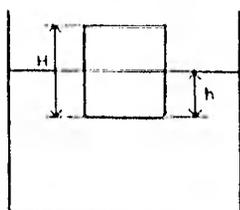
TRASLAPI.



MEDIDOR DE VIDRIO CON SECCIONES TRASLAPADAS

5.5 MEDIDOR DE NIVEL TIPO FLOTADOR.-

La medición directa del nivel en tanques abiertos se lleva a cabo frecuentemente por el método de flotador y cable. Estos indicadores son instrumentos que se auto-operan por el movimiento del flotador sobre la superficie del líquido (principio de Arquímedes).



1) Peso del flotador

$$P = V \gamma_1 \quad \dots \quad 5.8$$

P - peso del flotador

V - volumen del flotador

γ_1 - peso específico del flotador

$$P = Ah \gamma_1 \quad \dots \quad 5.9$$

A - área del flotador

h - longitud del flotador

2) Peso del líquido desplazado (empuje)

$$P = Ah \gamma_2 \quad \dots \quad 5.10$$

P - empuje

A - área del flotador

h - altura del flotador sumergido

γ_2 - peso específico del líquido

3) Empuje = peso del flotador

$$\gamma_1 Ah = Ah \gamma_2 \quad \dots \quad 5.11$$

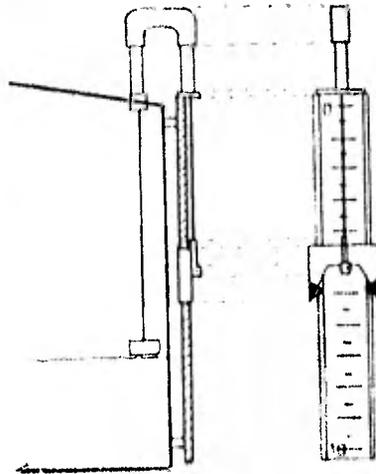
$$h = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \quad \dots \quad 5.12$$

4) Siendo $\gamma_1 < \gamma_2$

5.5.1 Medidor de Flotador y Cable.-

Descripción.-

El mecanismo de medición consiste de dos poleas; una con el flotador y otra con el contrapeso. A la flecha de transmisión va conectada una leva con su seguidor y es el que se encarga de transmitir el movimiento del flotador en unidades de longitud; existen diseños en los que el contrapeso es el que transmite el movimiento del flotador en la reglilla, ver figura siguiente:



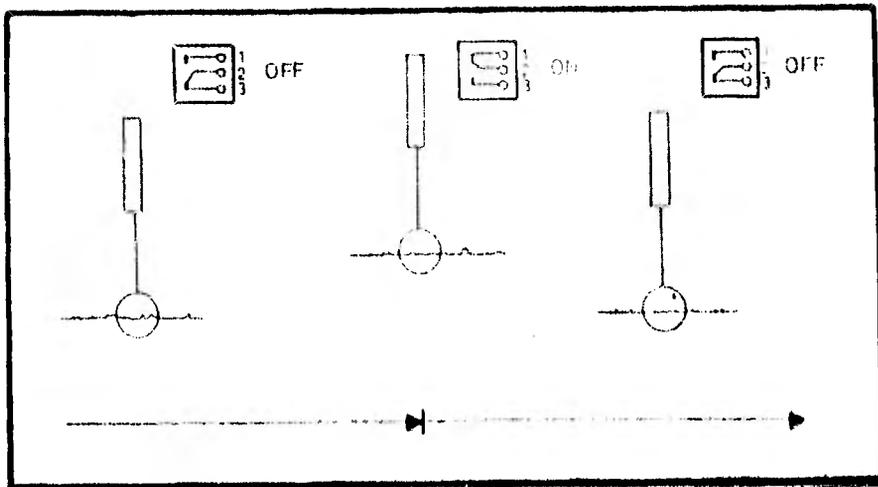
INDICADOR DE NIVEL TIPO FLOTADOR

Usos.-

El medidor de flotador y cable es el aparato más común para la indicación indirecta del nivel en tanques; es usado en tanques de almacena

miento grandes abiertos a la atmósfera (rango de operación de 0 a 90 ft) y para medir nivel de interfase entre dos líquidos no miscibles.

Debe ser localizado alejado de las líneas de succión y de llenado para minimizar los efectos de corriente y de turbulencias. Está limitado a líquidos limpios ya que si el líquido contiene sólidos en suspensión pueden adherirse al flotador y falsear la lectura. Se puede instalar en pozos de amortiguamiento con sistema de purga, para desalojar sedimentos y lodos. Un pozo de amortiguamiento es un recipiente de diámetro pequeño conectado al tanque y donde se encuentra localizado el flotador; el pozo elimina lecturas inexactas debidas a turbulencias y a movimientos laterales del flotador.



CONTROL DE NIVEL TIPO ON-OFF.

5.5.2 Control de Nivel.

Los controladores de nivel tipo flotación pueden ser instalados en tanques abiertos a la atmósfera o presurizados, generalmente se usan para controlar válvulas, bombas y como sistema de seguridad de corte.

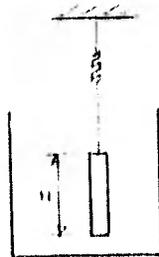
Pueden operar eléctrica u neumáticamente lo que les permite actuar válvulas y ser localizados en zonas peligrosas. En la fig. anterior se muestra un controlador de nivel operado electricamente. Un magneto permanente es fijado a un interruptor de pivote de mercurio. Tan pronto como el flotador sube por el nivel del líquido alcanza el magneto. El magneto cierra de golpe contra la barrera no-magnética del tubo. Cuando el nivel baja el flotador cae, quedando fuera del campo magnético y entonces el pivote regresa a su posición.

Estos aparatos dan un tipo de control ON-OFF en los que la distancia que recorre el tubo da las activaciones de nivel bajo y de nivel alto.

5.6 MEDIDOR DE NIVEL TIPO DESPLAZADOR.

Principio de Operación.

La operación del medidor se basa en el principio de Arquímedes que establece: Un cuerpo (desplazador) inmerso en un líquido es empujado hacia arriba por una fuerza igual al peso del líquido desplazado. Conforme el nivel del líquido suba o baje la fuerza de empuje variará. Esta fuerza de empuje es medida por un resorte que sujeta al desplazador.

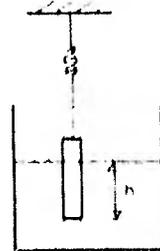


DESPLAZADOR SIN LÍQUIDO.

Fuerza en el resorte

$$F = A l \gamma_1$$

$$F = m g$$



DESPLAZADOR SUMERGIDO.

Fuerza en el resorte

$$F = A l \gamma_1 - h A \gamma_2$$

$$h = \frac{A l \gamma_1 - F}{A \gamma_2}$$

mg - peso del desplazador	$h = \frac{mg - F}{A \gamma_2}$
A - área del flotador	
h - altura del flotador	h - altura del desplazador sumergido
γ_1 - peso específico del flotador	
F - fuerza aplicada al resorte	γ_2 - peso específico del líquido

5.6.1 Controlador de Nivel Proporcional.-

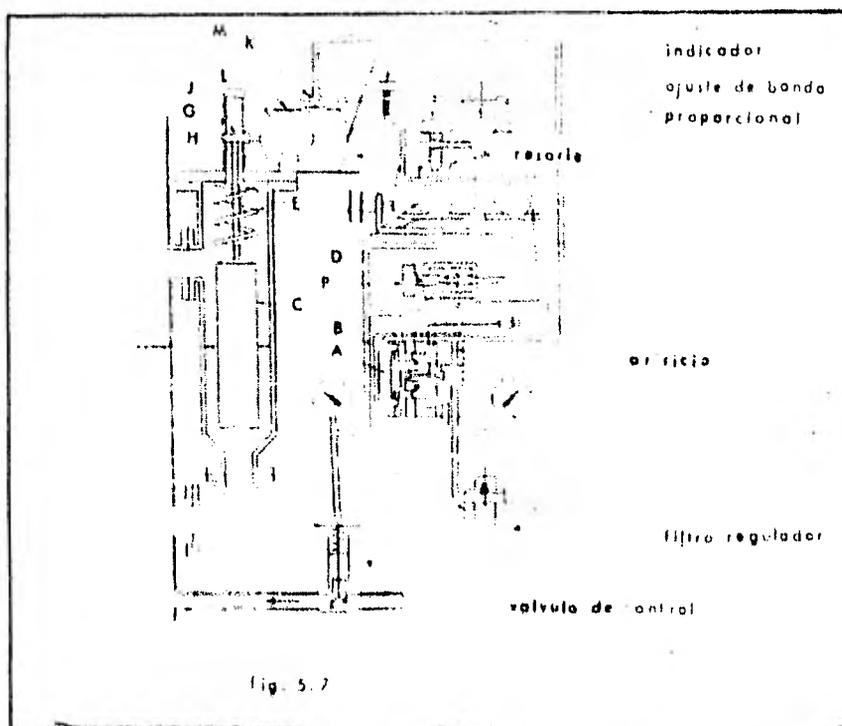
Se muestra en la figura un controlador proporcional. Cuando el nivel sube en el recipiente la fuerza de flotación aumenta, descargando el resorte (E) y provocando que el desplazador (C) suba. El magneto (H) hace rotar a la leva (L) y acerca al seguidor (M) a la tobera piloto (K), aumentando de esta forma la presión en la cámara (A) del relevador (B). El desbalance en la presión abre la válvula (S), incrementándose la presión en la válvula de control y restringiendo de esta forma el flujo que entra al tanque. Simultáneamente los fuelles de retroalimentación (D) aenseran el incremento en la presión y tratarán de buscar un punto de equilibrio actuando contra el resorte de banda proporcional (N), aumentando la presión en la cámara (A) para que el seguidor (M) se aleje de la tobera (K).

El nivel del líquido es ahora estabilizado en algún punto más alto dentro de la banda proporcional, igualándose el flujo de salida con el de entrada. Para un nivel descendente, se presenta un ciclo inverso y el nivel se estabilizará en un punto más bajo dentro de la banda proporcional.

Restablecimiento. Siempre que ocurra un cambio de carga en un proceso con control proporcional puro, el nivel se desviará del punto de referencia (offset). Si se adiciona un control integral, se elimina cualquier desviación sostenida del punto deseado de control.

Refiriéndose a la ilustración esquemática, los fuelles de restablecimiento (R) reciben lentamente la señal de presión de salida incrementada a -

través de la válvula (P), forzando eventualmente los fuelles de retroalimentación (D), y a través de la palanca (F) reponen a la tobera (K) a su posición original.



CONTROL DE NIVEL PROPORCIONAL

Usos.-

- 1.- Se pueden instalar en tanques abiertos a la atmósfera o presurizados.
- 2.- Además de indicar nivel pueden controlarlo, mandando señales neumáticas o eléctricas para este fin.

- 3.- Puede registrar nivel de interfase en líquidos.
- 4.- Es muy confiable y de gran exactitud.

Limitación.-

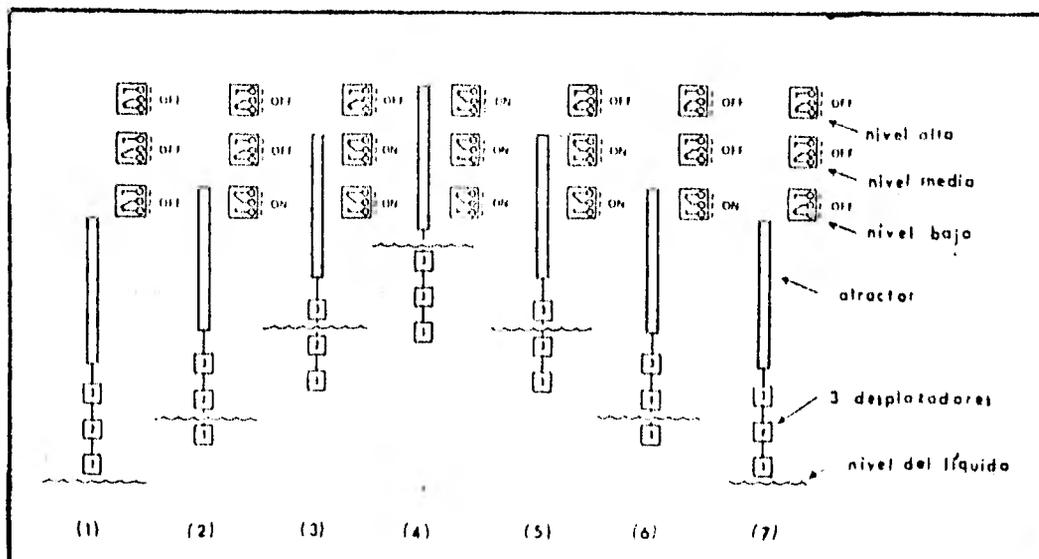
- 1.- No registra lectura si el nivel del líquido no alcanza a mojar la superficie del desplazador.

Ejemplo de un control de nivel tipo ON-OFF. Con secuencia de operación de dos bombas conectadas al tanque. Ver la figura siguiente:

- 1.- El nivel del líquido no alcanza a tocar a los desplazadores.
- 2.- Al subir el nivel, la barra de atracción cierra al contacto número 1, que opera el circuito de paro de bomba número 1.
- 3.- Al seguir subiendo el nivel la barra cierra el contacto número 2, parándose la bomba número 2.
- 4.- Si el nivel por alguna causa sigue aumentando ya sea porque fallen los contactos 1 o 2, o porque se cierre la salida del tanque, la barra hará contacto con el interruptor número 3, operándose una señal audible y visual en el tablero maestro.
- 5.- Al descender el nivel ocurre el proceso inverso, es decir, la alarma deja de operar.
- 6.- En este punto el circuito se abre y la bomba número 2 arranca.
- 7.- Al llegar a este punto se abre el contacto 1 y se arranca la bomba número 1.

Usos.-

- 1.- Se pueden colocar los desplazadores a diferente distancia (banda de operación) haciendo muy versátil su uso.
- 2.- El número de interruptores es variable y depende del número de desplazadores que se tengan, normalmente se tienen de 1 a 4.



CONTROL DE NIVEL TIPO ON-OFF.

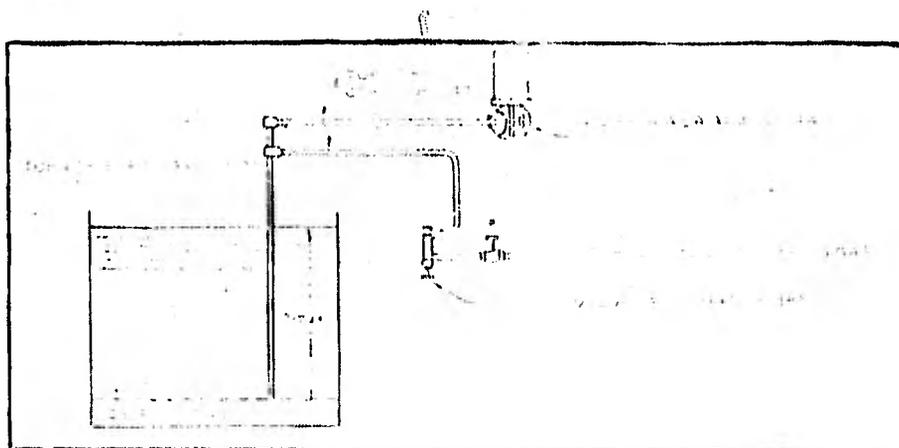
5.7 MEDIDORES QUE UTILIZAN LA PRESION HIDROSTATICA COMO PRINCIPIO DE OPERACION.

5.7.1 Manómetros.

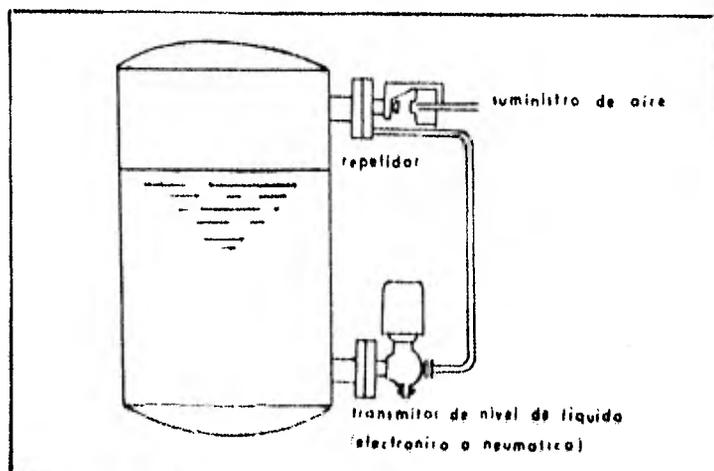
Se utilizan en tanques abiertos a la atmósfera. La lectura de la columna del líquido contenido en el tanque es proporcional a la presión hidrostática medida arriba del punto de conexión. La altura del líquido puede ser determinada de la lectura de presión y con el peso específico del líquido, aplicando la ecuación:

$$P = \rho \cdot h \cdot g \quad \dots \dots \dots 5.18$$

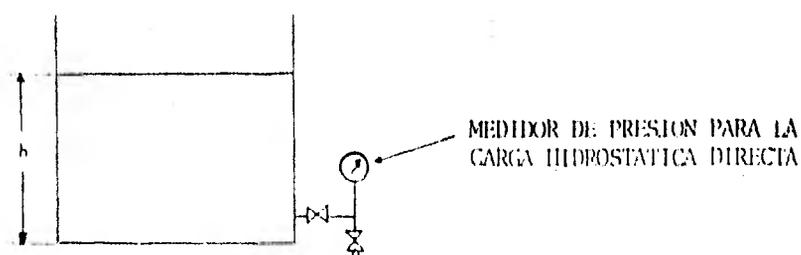
$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad \dots \dots \dots 5.19$$



- 2.- Instalación para medición en un tanque cerrado, con vapor en la parte superior. El repetidor se utiliza para transmitir la señal de presión del vapor a la celda de presión diferencial de abajo. Esto evita que los vapores se condensen en la columna y varíen la señal de presión del vapor.



- 3.- Instalación para medición de un tanque abierto. Ver figura siguiente:



INDICADOR DIRECTO DE NIVEL.

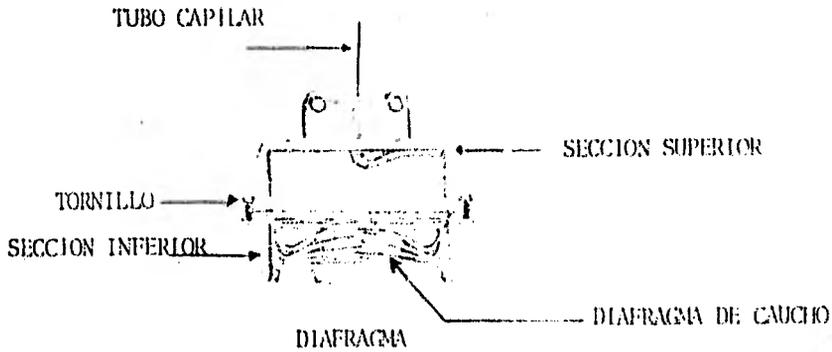
Limitaciones. -

- 1.- No es útil si el fluido a medir tiene variaciones de densidad grandes.
- 2.- Se debe de colocar a una cierta altura del piso del tanque para prevenir sedimentos que obstruyan la entrada del tubo de conexión.

5.7.2 Medidores de Diafragma. -

Los medidores de caja de diafragma se usan para medir nivel en tanques abiertos a la atmósfera, consisten esencialmente de una caja recubierta con un diafragma flexible el cual está protegido por medio de un anillo metálico.

La caja está dividida en dos secciones, con el diafragma insertado entre las dos y sellados a prueba de aire. Un tubo capilar se utiliza para conectar la parte de arriba de la caja del diafragma con el instrumento. La caja está colocada a una altura determinada del tanque, la cual servirá como nivel de referencia. La presión de la columna del líquido actúa sobre el diafragma comprimiendo el aire contenido en el sistema equivalente a la altura del líquido. Las variaciones de nivel producen cambios de presión proporcionales en el sistema de aire. Estos cambios de presión actúan en el resorte del cual está conectado a una pluma de registro y que está calibrado para dar la lectura de la columna en m. o ft.



Usos. -

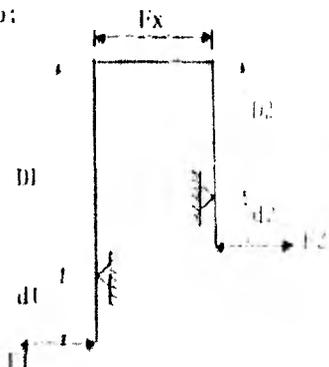
- 1.- En tanques abiertos a la atmósfera, con líquidos a una temperatura entre 150°F y 250°F.
- 2.- No requiere suministro de aire.

Limitación. -

- 1.- El diafragma es fácilmente deteriorable.

5.7.3 Celda de Presión Diferencial. -

La celda de presión diferencial es un dispositivo de balance de fuerzas que detecta diferenciales de presión y los transmite como señal neumática a un receptor calibrado en términos de medición. Este dispositivo es tá basado en las siguientes expresiones que permiten diseñar y calibrar el instrumento:



$$F_1 d_1 = F_x D_1 \dots\dots 5.20$$

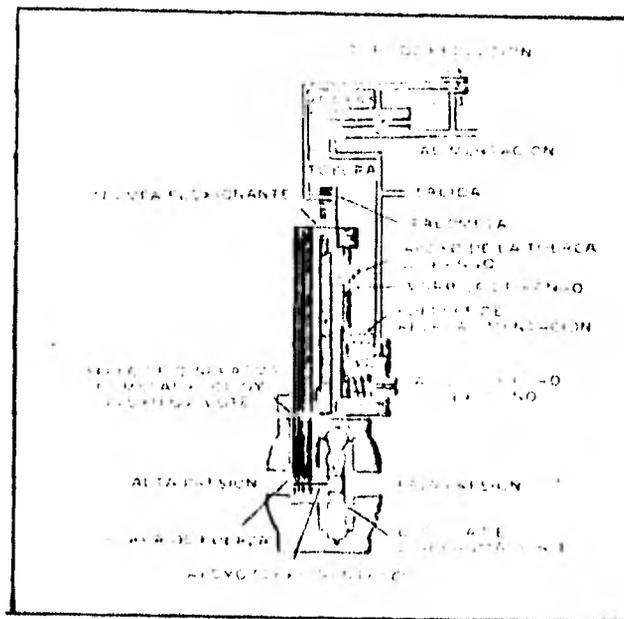
$$F_x = \frac{F_1 d_1}{D_1} \dots\dots 5.21$$

$$F_2 d_2 = F_x D_2 \dots\dots 5.22$$

$$F_x = \frac{F_2 d_2}{D_2} \dots\dots 5.23$$

$$\frac{F_1 d_1}{D_1} = \frac{F_2 d_2}{D_2} \dots\dots 5.24$$

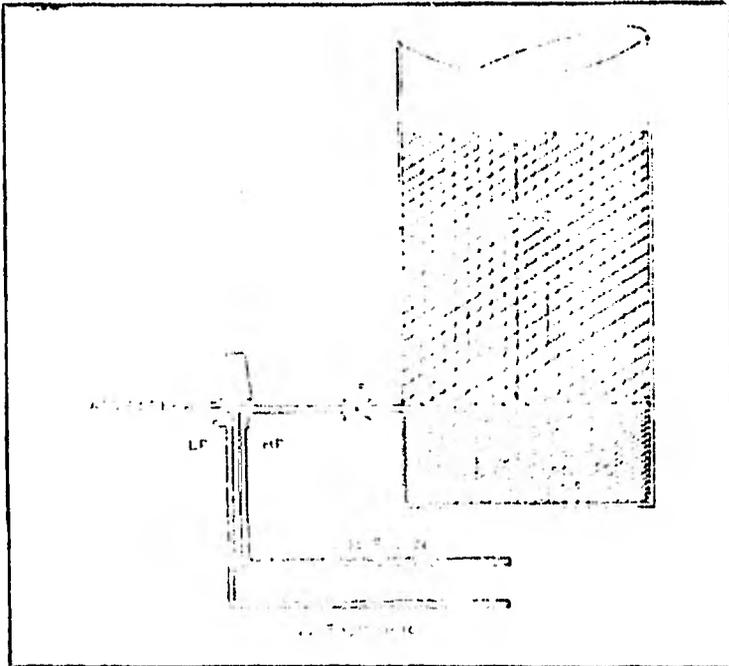
Los componentes básicos son: el cuerpo, el sistema transmisor de balance de fuerzas y el bloque de aire. Como se muestra en la figura, las presiones se aplican entre los lados de alta y baja presión de la cápsula de diafragma, resultando una Fuerza F en el extremo inferior de la barra. El momento resultante en el otro extremo de la barra, hace que la palometa se aleje o se acerque a la tobera, y variando la presión de salida en el relevador piloto. El suministro de aire en el fuelle sirve para balancear la fuerza resultante F_2 para que la ganancia del dispositivo disminuya y permita operar en un rango determinado.



CELDA DE PRESIÓN DIFERENCIAL.

Diferentes aplicaciones de una celda de presión.

- 1.- Instalación para medición en un tanque abierto, con sólidos en suspensión. Ver figura siguiente:



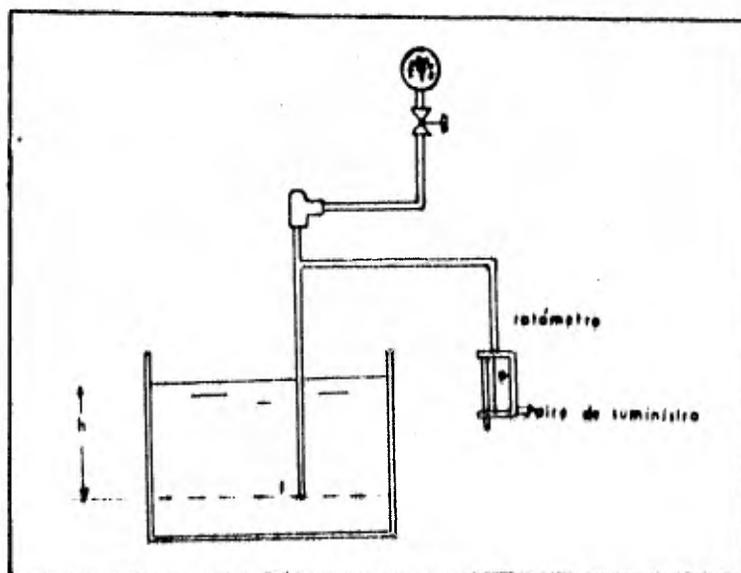
Usos, -

- 1.- Se puede colocar la celda de presión al nivel que se quiera, ajustando internamente el mecanismo.
- 2.- Se puede usar en fluidos con vapores condensables.
- 3.- Se puede utilizar en tanques abiertos a la atmósfera, así como presurizados.
- 4.- En líquidos corrosivos o con sólidos en suspensión se puede utilizar un sistema de burbujeo con la celda de presión.

5.7.4 Medidor de Nivel Tipo Burbujeo, -

Los medidores de nivel tipo burbujeo o de purga continua se utilizan cuando el líquido es corrosivo o tiene sólidos en suspensión o cuando se requieren lecturas remotas.

Este sistema es confiable y económico. La figura siguiente ilustra una instalación típica para medición de nivel. Se inserta un tubo abierto dentro del tanque hasta una cierta altura (punto de referencia) - arriba de cualquier sedimento que pueda tener. Se suministra aire u otro fluido comprimido a través de la válvula, de tal manera que el fluido escape por el tubo. La presión del aire en el tubo irá en aumento hasta lograr vencer a la columna, es decir, hasta que escape el aire fuera del tubo, en ese momento la presión en el tubo ya no aumentará y corresponderá exactamente a la altura del líquido en el tanque. Cuando el nivel del líquido cambie, la presión de aire en el tubo de burbujeo cambiará también proporcionalmente. En tanques presurizados o al vacío este sistema se puede usar -- con celdas de presión diferencial.



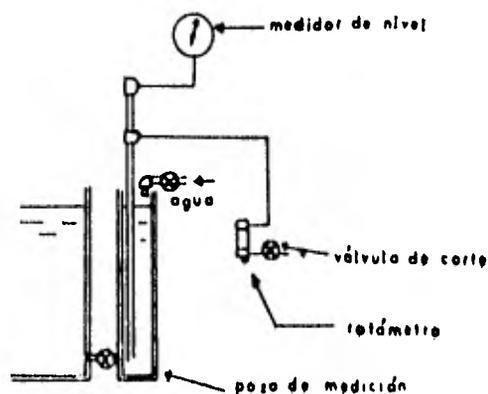
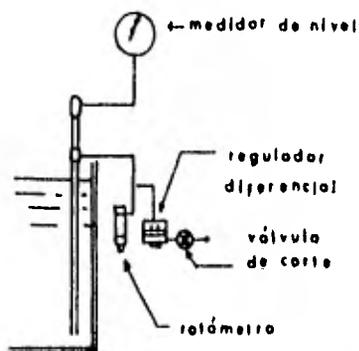
Usos, -

- 1.- Líquidos corrosivos y/o con sólidos en suspensión.
- 2.- Tanques abiertos a la atmósfera, presurizados o al vacío.

- 3.- El indicador de nivel puede estar colocado hasta a 1 000 ft. del tanque.

Limitaciones.-

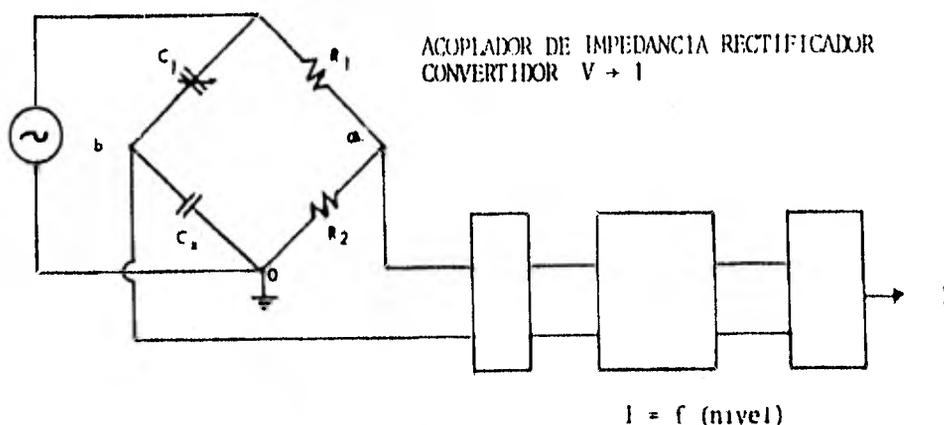
- 1.- Fugas de aire en la instalación falsifican la lectura.



Regulador Diferencial: Se utiliza cuando el nivel del tanque varía sobre límites amplios, para mantener una caída constante de presión a través del rotámetro, y por lo tanto una razón constante de purga,

Esta instalación se recomienda en aplicaciones especiales que involucran lodos o suspensiones de pulpa de alta consistencia, o cuando el líquido en el tanque es altamente turbulento. Un pequeño flujo continuo de agua mantiene una carga de líquido limpio en el pozo de medición y también fluye dentro del tanque, purgando la conexión entre el tanque y el pozo de medición.

el punto de operación (ejem, $V_{ab} = 0$ en la figura siguiente). Los cambios de nivel producen cambios de capacitancia descritos líneas arriba, produciendo cambios de impedancia en la rama del capacitor, que llevan a un desbalance de voltaje en los puntos a y b del puente Wheatstone.



El voltaje V_{ab} es función lineal del nivel del líquido en el tanque. Este voltaje, que es de alterna, se rectifica en una de las etapas del sistema de medición para tener la señal en C. D., y luego es convertida a señal de corriente en un rango de 4 a 20 ma normalmente. El acoplador de impedancias se agrega porque la salida del sensor primario presenta valores relativamente altos de impedancia. La fuente de alimentación de AC debe tener buena regulación. Para tanques no simétricos (ejem, tanques horizontales) - requiere de linealización, de otra forma la señal transmitida sería una función no lineal del contorno del tanque. La linealización se logra con una camisa alrededor de la barra.

En la selección correcta de la barra sensora debe ser considerada la temperatura y la presión a la que va a estar sujeta, así como la constante dieléctrica del medio. La barra puede ser instalada en dos posiciones:

5.8 MEDICION DE NIVEL POR CAPACITANCIA.-

Un método eléctrico para medir nivel en tanques cerrados es la capacitancia. Básicamente, un sistema para medición de nivel por capacitancia, consiste de: un elemento primario de medición y un instrumento secundario que transforma la variación de capacitancia en una señal eléctrica - proporcional al nivel del líquido en el tanque.

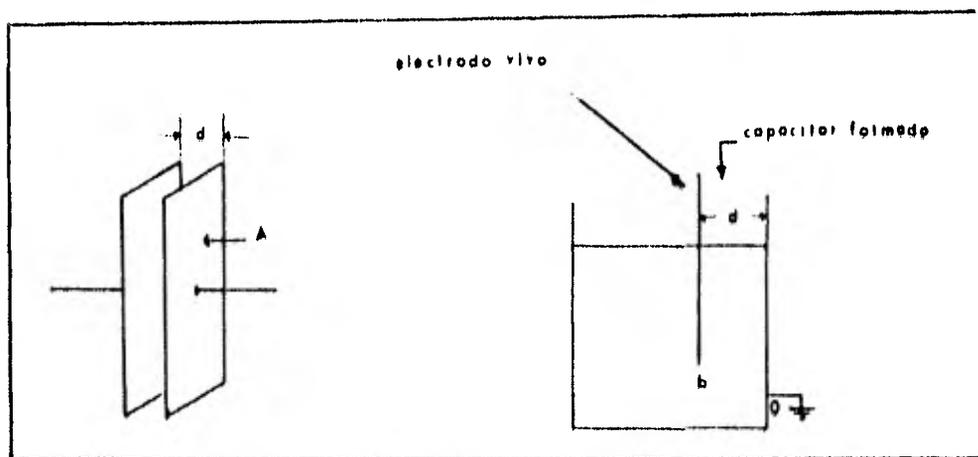
La capacitancia se forma con una barra de metal que se puede considerar como el electrodo vivo y la pared del tanque que sirve como electrodo de tierra. Siendo el líquido el dieléctrico que al variar de nivel, cambia el valor del área de trabajo del capacitor así formado, y por lo tanto, - la capacitancia del mismo.

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

ϵ - constante dieléctrica del líquido

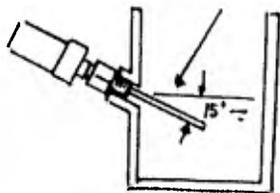
A - área efectiva de la capacitancia

d - distancia del electrodo a la pared del tanque

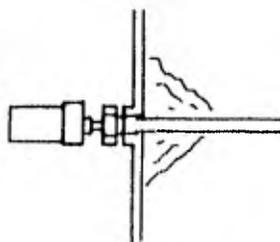


El capacitor así formado se encuentra típicamente en una rama de un puente de Wheatstone operando con corriente alterna y balanceando en

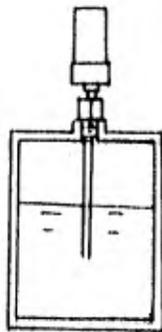
horizontal o vertical. El montaje horizontal es usado para producir un punto de alarma unicamente. El montaje vertical de la barra se usa cuando se requieren varios puntos de interrupción o señales proporcionales.



INSTALACION PARA LIQUIDOS



INSTALACION HORIZONTAL PARA SOLIDOS



INSTALACION PARA OBTENER UNA SEÑAL PROPORCIONAL DE NIVEL

Usos, -

Puede utilizarse para medir el nivel de materiales sólidos o líquidos, ya sea conductores o no conductores.

Limitaciones, -

Los sólidos no deben ser de tamaño tan grandes o tan abrasivos que estropeen el aislamiento de la sonda.

El material a medir no debe tener excesiva tendencia a formar adherencias. La constante dieléctrica relativa del material no debe ser demasiado pequeña. Si se realiza una medida continua de nivel en materia les no conductores, la constante dieléctrica no debe de variar.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO V

- 1.- Douglas M. Considine, "PROCESS INSTRUMENTATION AND HANDBOOK".
- 2.- Douglas M. Considine, "ENCYCLOPEDIA OF INSTRUMENTATION AND CONTROL".
- 3.- Douglas M. Considine, "HANDBOOK OF APPLIED INSTRUMENTATION".
- 4.- Perry and Chilton, "CHEMICAL ENGINEERS HANDBOOK".
- 5.- José Narcif, "INGENIERIA DE CONTROL AUTOMATICO".
- 6.- Hollman, "EXPERIMENTAL METHODS FOR ENGINEERS".

C A P I T U L O V I

CAPITULO IV

MODOS DE CONTROL

- 6.1 Características del proceso
- 6.2 Control proporcional
- 6.3 Control integral
- 6.4 Control proporcional + integral
- 6.5 Control derivativo (rate)
- 6.6 Control proporcional + integral + derivativo
- 6.7 Guía para selección de controladores.

CAPITULO VI

MODOS DE CONTROL

En los inicios de la era industrial, el control de los procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y en la experiencia acumulada. Más tarde, el mercado exigió mayor calidad en los productos fabricados lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso, de las que derivaron estudios analíticos que a su vez permitieron realizar el control de la mayor parte de las variables de interés en los procesos.

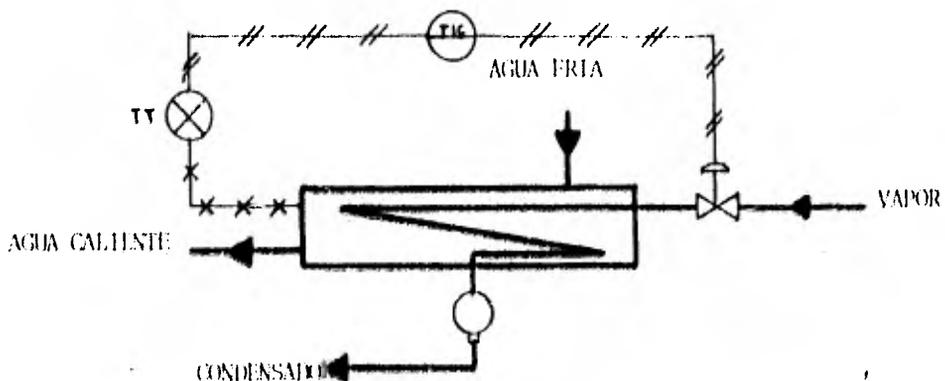
En éste capítulo daremos una introducción a los modos de control de procesos más utilizados en la industria.

6.1 CARACTERISTICAS DEL PROCESO. -

Un lazo de control típico está formado por el proceso, el transmisor, el controlador y la válvula de control.

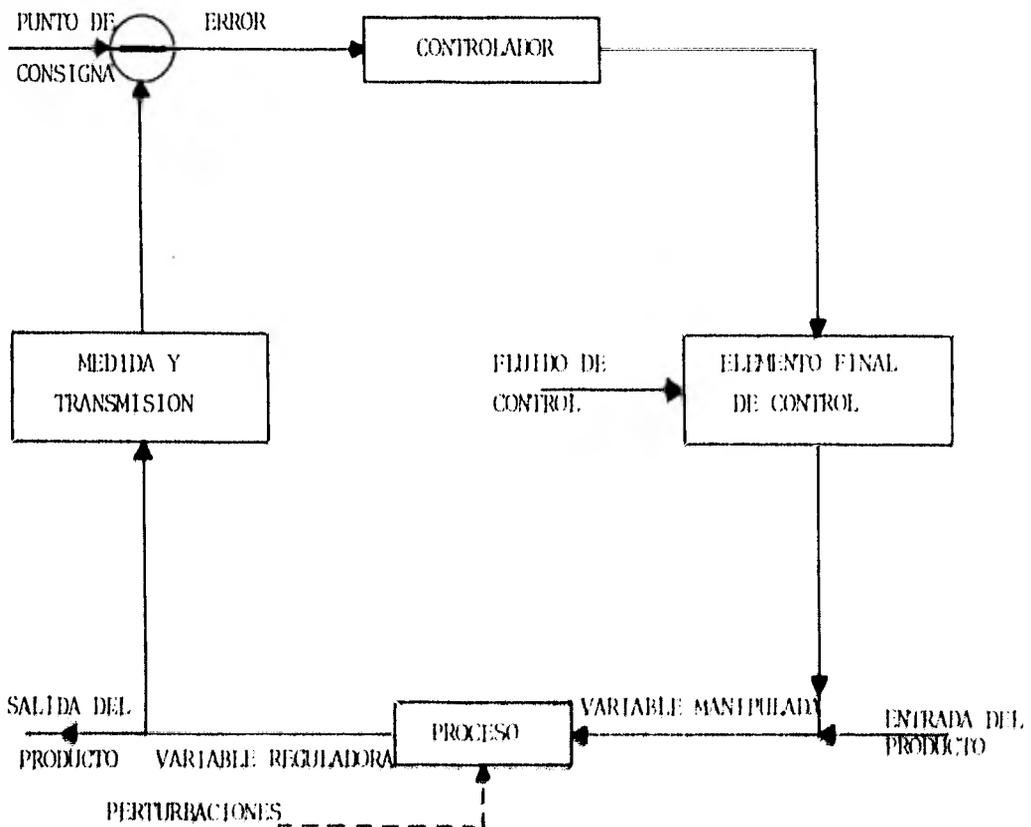
- A) El proceso consiste en un sistema que ha sido desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado.

Una aplicación típica la constituye un intercambiador de calor.



- B) El controlador permite al proceso cumplir su objetivo de transformación del material y realiza dos funciones esenciales:
- Compara la variable medida con la de referencia (punto de control) para determinar el error.
 - Estabiliza el funcionamiento dinámico del lazo de control mediante circuitos especiales para reducir o eliminar el error.

En la figura siguiente puede verse el diagrama de bloques de un lazo de control.



Los sistemas de control de las plantas para procesos industriales, aún los más modernos, pueden reducirse en su forma más elemental al esquema anterior, en el cual, un valor o cantidad (la Variable Controlada), está siendo continuamente medido y comparado con otro valor (valor deseado de la variable), y si no son iguales o no están dentro de los límites prefijados (existe un error), se produce una corrección (en la Variable Manipulada), por medio del controlador, para llevar a la variable controlada a los límites preestablecidos.

Las modernas plantas de proceso industrial están casi siempre distribuidas sobre una amplia área geográfica pero requieren de un control centralizado y un centro de información (cuarto de control), para que puedan ser operadas efectiva e inteligentemente y se puedan tomar acciones correctivas por el operador, cuando se presenten condiciones de emergencia o ajuste.

C) Los requisitos a cumplir: La distribución del proceso en una área geográfica y el control centralizado demandan que la información de procesos típicos sea medida por transmisores colocados en el campo y recibida en los receptores colocados en el cuarto de control.

Un transmisor generalmente transforma una variable del proceso a una señal apropiada de salida, la que es transmitida al receptor. El receptor acepta la señal representando la variable del proceso, utilizándola para realizar un determinado número de funciones de indicación y/o registro y/o control. El receptor puede también realizar operaciones algebraicas -- con la señal principal.

Desde el punto de vista del control automático los procesos presentan dos características principales que deben considerarse al automatizarlos:

- a) Los cambios en la variable controlada debido a alteraciones en las condiciones del proceso y llamados generalmente "Cambios de Carga"

en el cual la carga del proceso es la cantidad total del fluido que se desea controlar.

En general, los cambios de carga del proceso son debidos a las siguientes causas:

- 1.- Mayor o menor demanda del fluido de trabajo por la siguiente etapa del proceso total.
- 2.- Variación en la calidad del fluido de control.
- 3.- Cambios en las condiciones ambientales.
- 4.- Calor generado o absorbido por la reacción química del proceso.

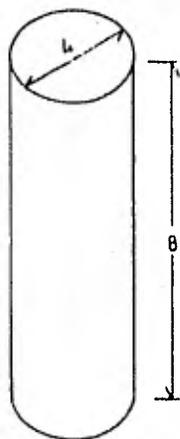
- b) El tiempo necesario para que la variable del proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga, esto es a sus características dinámicas, como son: Capacitancia, Resistencia y - Tiempo Muerto.

Capacitancia.-

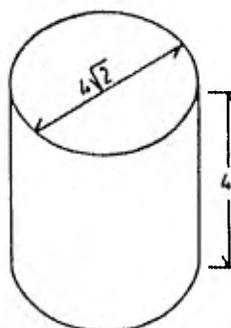
Es la medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía o de materia con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia.

No debe confundirse con la capacidad del proceso que representa simplemente las características propias de almacenar energía o material.

Por ejemplo, los dos depósitos siguientes tienen la misma capacidad de 100 m^3 , pero tienen distinta capacitancia por unidad de altura: $12,5 \text{ m}^3/\text{m}$, nivel el más alto y $25 \text{ m}^3/\text{m}$ nivel el más bajo.



$$\begin{aligned} \text{CAPACIDAD} &= 100 \text{ m}^3 \\ \text{CAPACITANCIA} &= 100/8 \\ &= 12.5 \text{ m}^3/\text{m} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{CAPACIDAD} &= 100 \text{ m}^3 \\ \text{CAPACITANCIA} &= 100/4 \\ &= 25 \text{ m}^3/3 \end{aligned}$$

Resistencia. -

Es la oposición total o parcial de la transferencia de energía o de material entre las capacitancias. En la figura del serpentín de vapor las capacitancias son el serpentín de vapor y el tanque y su resistencia - se manifiesta por la oposición de las paredes de los tubos a la transmisión de calor.

Tiempo Muerto. -

Refiriéndonos nuevamente a la figura del intercambiador de calor, si disminuye la temperatura del agua de entrada, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría pueda circular a través del tanque y alcance la sonda termométrica,

De acuerdo a las características dinámicas del proceso a controlar se establecen los "MODOS DE CONTROL", los que pueden ser definidos como la -

forma matemática en que el controlador manejará el error, para producir la corrección a través del elemento final de control, de forma que la variable controlada quede dentro de los límites preestablecidos.

Los modos de control más utilizados son: El proporcional, el integral y el derivativo.

6.2 CONTROL PROPORCIONAL.-

Un modo de control proporcional puro es aquel en que la salida del controlador es proporcional a la entrada (desviación, o error), o sea:

$$S = G \cdot e \text{ por lo que} \\ S = G \cdot P \dots\dots\dots (1)$$

donde: S = salida, e = error, G = constante de proporcionalidad (ganancia) P = punto de operación.

El error está dado por:

$$e = P - E \dots\dots\dots (2)$$

donde: E = valor de la variable controlada, P = punto de operación.

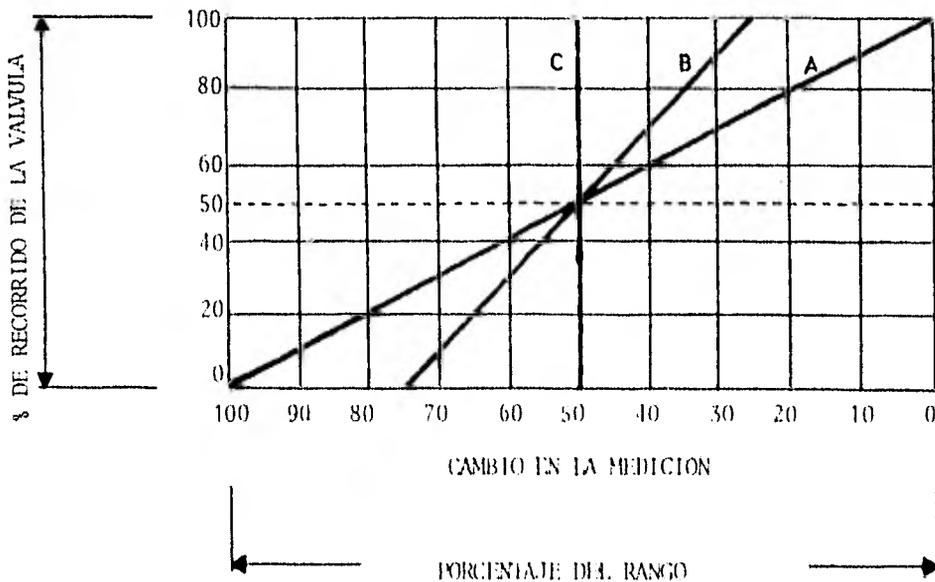
El rango de operación en el que ejerce la acción de éste controlador es la denominada "Banda Proporcional", que es un porcentaje del rango total de la escala del dispositivo medidor.

La Banda Proporcional se puede expresar matemáticamente en función de la ganancia como:

$$B. P. = 100 / G \dots\dots\dots (3)$$

o sea que el porcentaje de escala completa a través del cual debe variar la variable controlada, para producir una variación completa de la señal de salida. Observando la ecuación (3) se tiene que a mayor ganancia la banda --

proporcional es más estrecha y viceversa. La figura siguiente muestra gráficamente la relación entre el cambio de medición y la carrera de la válvula:

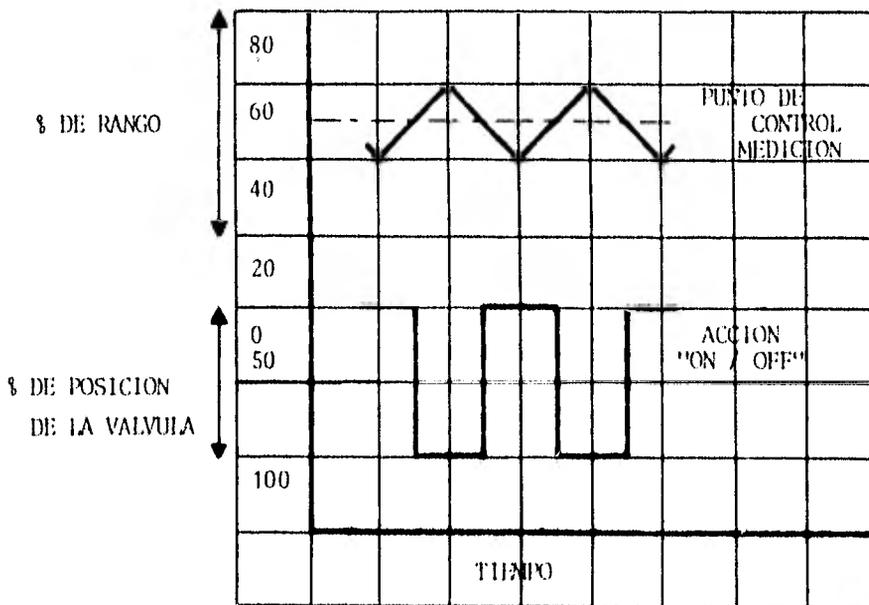


La recta A muestra que la medición debe cambiar sobre el 100 % de la escala para que la válvula cambie de posición de completamente abierta a completamente cerrada. Debido a que la indicación debe cambiar 100 % del rango de la escala para lograr el 100 % de la carrera de la válvula, la acción proporcional o B. P. se define como 100%.

La recta B muestra que la posición de la indicación debe cambiar entre 25 % y 75 % del rango de la escala para obtener 100 % de la carrera de la válvula, entonces la recta B representa una banda proporcional de 50%.

La recta C representa una Banda Proporcional de cero o control On - Off.

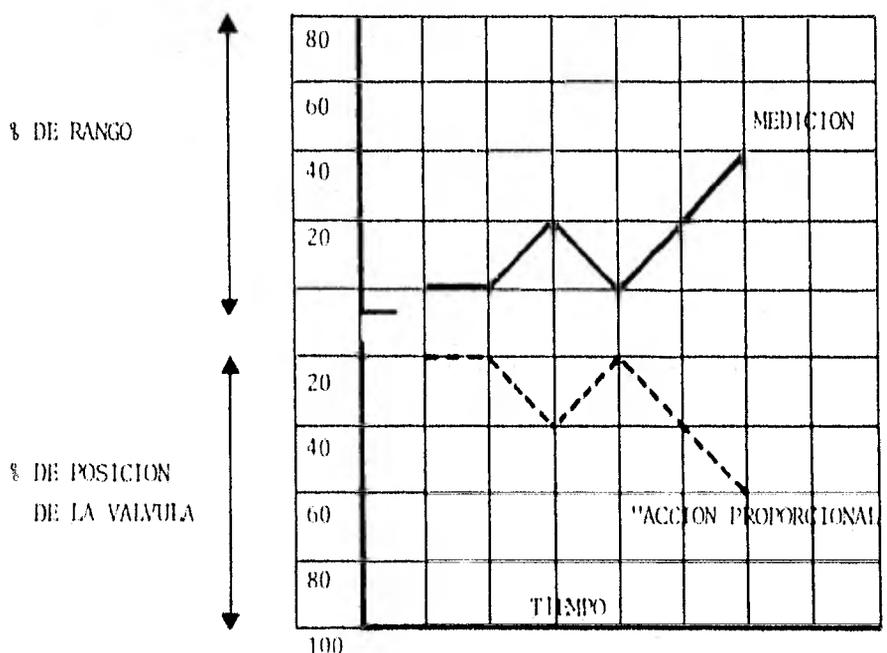
En la siguiente figura se muestra la acción de la válvula producida por un mecanismo de control de dos posiciones cuando la medición cambia como se indica.



Para todas las posiciones de la medición sobre el punto de control, la válvula tiene una posición, y para todas las posiciones bajo el punto de control, la válvula tiene otra posición.

En la figura siguiente se observa la relación entre el movimiento de la válvula y el cambio de medición o movimiento de la pluma con acción proporcional. Se puede apreciar que en cualquier momento, la cantidad de movimiento de la válvula es directamente proporcional a la cantidad de movimiento de la medición, la posición de la válvula es siempre una re

lación fija a la medición, y el valor máximo en la corrección de la válvula ocurre en el punto en que la desviación de la medición es máximo, - siempre que la medición no se mueva hacia fuera de la banda proporcional del controlador.



Es importante comprender que con la acción proporcional cada posición de la válvula está relacionada con una posición definida de la medición. Un controlador puede ser ajustado de manera que la válvula sea posicionada para traer la medición al índice de control, pero la medición se mantendrá en éste punto solo que no haya cambiado ni en la carga ni en otras condiciones. Si hay un cambio en la carga o en otras condiciones como caída de presión a través de la válvula, entonces la válvula debe tomar otra posición, a fin de dejar pasar el flujo original. De éste modo, la medición debe moverse a una nueva posición, la cual necesariamente estará lejos del punto de control antes de que el equilibrio sea

nuevamente alcanzado. Esta desviación del punto de control con carga o cambios de condiciones se define como "desviación permanente" en la terminología A.S.M.E. (off-set).

Donde las condiciones de operación y la banda proporcional del controlador son tales que la máxima desviación permanente éste dentro de las variaciones permisibles del medio controlado, un controlador proporcional es satisfactorio.

Cuando esta condición no es satisfecha, es necesario agregar una segunda función al controlador que restablece el equilibrio en el punto de ajuste de control, sin importar (haciendo caso omiso) cual sea la posición de la válvula, requerida para restablecer este equilibrio. Esta función es conocida como reajuste automático (control integral).

6.3 CONTROL INTEGRAL.

El control integral o de reajuste automático tiene la característica de que el error es proporcional a la variación de la salida con respecto al tiempo por lo que:

$$\begin{aligned} ds/dt &\propto e && \text{y por lo tanto} \\ ds/dt &= Fe && \text{integrando tenemos} \\ S &= F \int edt + C_1 && \dots\dots (4) \end{aligned}$$

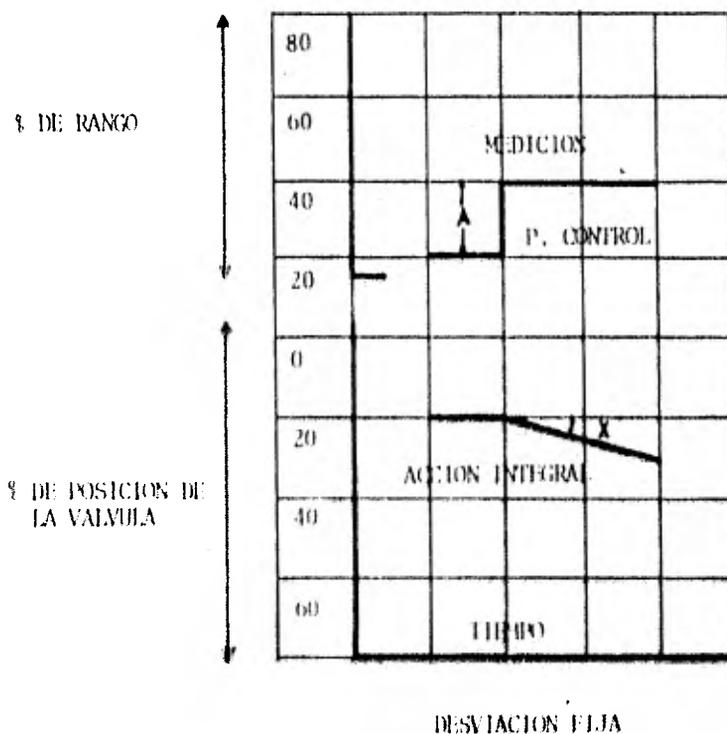
En esta ecuación F es la constante de la acción flotante y C_1 es la constante de integración.

En un controlador integral típico la acción de integración es afectada por dos factores:

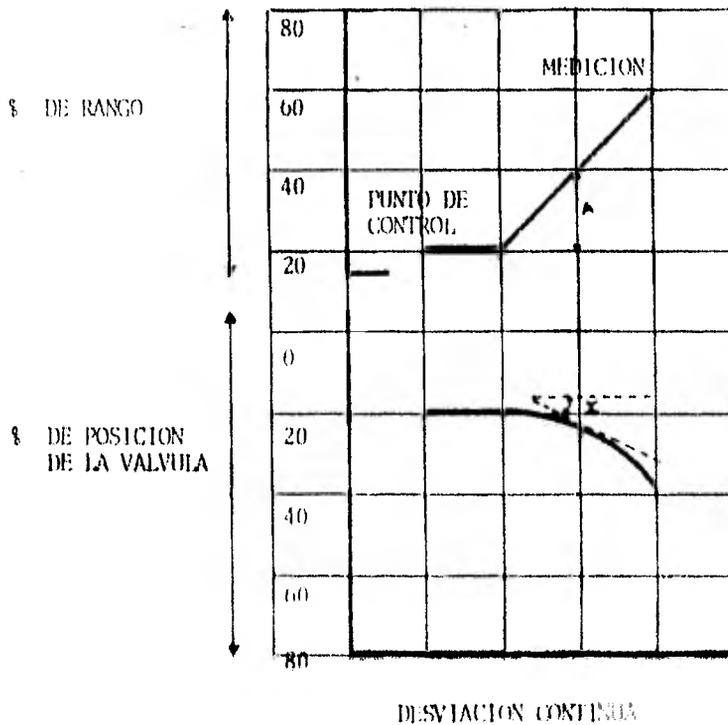
- a) La desviación de la variable controlada.
- b) La duración de esta desviación.

Mientras mayor sea la desviación y más tiempo dure, mayor será la acción de este controlador.

En la siguiente figura se observa que la posición del indicador cambia bruscamente una cantidad equivalente a (A) y mantenida en el nuevo valor por un periodo de tiempo. Este cambio de medición o desviación de la indicación, es referida como una desviación fija y esto produce una rapidez de cambio constante de la presión de aire en la válvula como se indica por el ángulo X. Si la desviación fija continuara como se muestra por un periodo de tiempo suficiente largo, la sola acción de reajuste aumentaría la presión en la válvula a una proporción constante hasta que la presión máxima a la válvula fuera alcanzada.



En la siguiente figura se observa el cambio de presión de aire en la válvula para la sola acción de reajuste en una desviación continua del indicador y muestra una acción de ajuste constantemente aumentado. Sin embargo cuando la desviación ha alcanzado un punto equivalente a (A) la acción indicada por el ángulo X es exactamente igual a la mostrada en la figura anterior para una desviación fija.

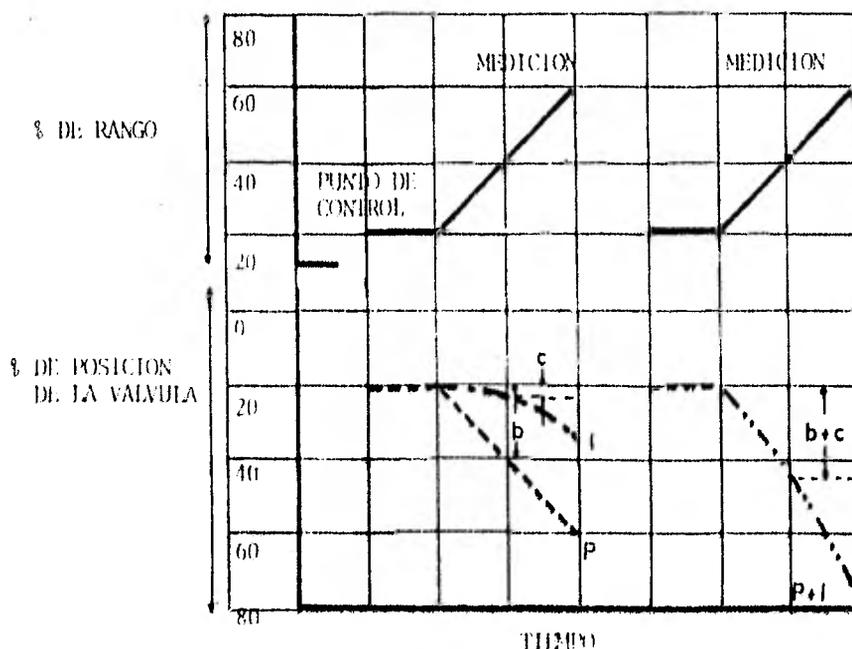


6.4 CONTROL PROPORCIONAL + INTEGRAL.

La acción integral produce, como se mencionó, un cambio en la posición de la válvula con una cantidad proporcional a la integral de la desviación, y por lo tanto la cantidad de movimiento de la válvula como resultado de la acción de reajuste es adicional a la cantidad de movimiento de

válvula producida por acción proporcional pura. Las dos acciones son simultáneas. El movimiento de la válvula producido por la acción proporcional aumentará o disminuirá al mismo tiempo que la magnitud de la desviación de la medición aumente o disminuya mientras que el movimiento de la válvula causado por la acción de reajuste aumentará o disminuirá como la magnitud y duración de la desviación de la medición aumente o disminuya.

La siguiente figura muestra los efectos separados de acción proporcional con B. P., de 100 % y de reajuste, se muestran para una continua desviación de la indicación del 40% del rango de la escala de medición, la acción proporcional ha aumentado la presión por el valor (b) y la acción del reajuste ha aumentado la presión por el valor (c). Debido a que estas acciones son simultáneas y acumulativas, el efecto de ambas acciones se muestra al final.



6.5 CONTROL DERIVATIVO.-

La acción proporcional más integral fue usada por muchos años con éxito, pero los requisitos de control se hicieron más rápidos y se descubrió que había necesidad de una influencia estabilizadora superior al mecanismo de control. El mecanismo ideal, habría sido algo que produjera una acción anticipada, pero la anticipación es solo una función de la mente humana, un aparato realmente previsor era realmente imposible. Sin embargo, una función de control fué desarrollada la cual aplica una corrección proporcional a la rapidez de cambio de la medición y que de ninguna manera es afectada por la magnitud ni por la desviación de la medición. La acción derivada (al igual que la integral), nunca se usa sola, sino siempre en combinación con proporcional o proporcional más integral.

Como se dijo anteriormente este modo de control se caracteriza porque la salida del controlador es proporcional a la derivada del error; o lo que es lo mismo:

$$S \propto de/dt \quad \text{y:}$$

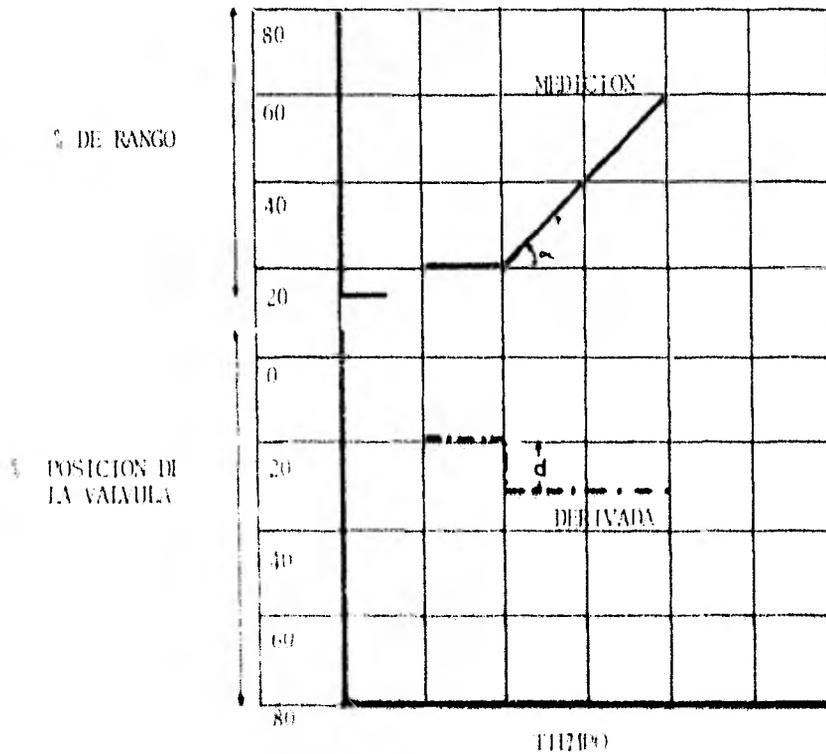
$$S = K \ de/dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

En esta ecuación K es la constante de proporcionalidad de la acción de derivada. La salida es dependiente de la variación del error con respecto al tiempo.

Mientras más rápido sea el cambio en la variable controlada, mayor será la acción aplicada por el controlador. Este controlador corrige el retraso en tiempo del sistema, o sea, adelanta en tiempo dicha respuesta.

Sus efectos pueden verse en la siguiente figura en la cual se muestra el efecto de la acción derivada en la válvula.

La desviación de la medición es exactamente igual que en las figuras anteriores, o sea a una rapidez de cambio constante, definida por el ángulo (α). La corrección de la válvula se aplica en el instante en que se produce la desviación desde el valor de la escala de 20% y la cantidad del cambio de la posición de la válvula se mantiene en el valor (d), siempre y cuando la rapidez de cambio de la medición sea constante.



6.6 CONTROL PROPORCIONAL + INTEGRAL + DERIVATIVO.-

La función de un controlador automático es que cuando un disturbio se presenta, deberá poder reducir la cantidad y duración de la desviación al mínimo para restablecer el punto de operación del proceso en el tiempo más corto posible. En las siguientes figuras puede observarse que con la sola acción proporcional cuando la indicación se desvió de 20 a 40% del rango de la escala, la posición de la válvula fué cambiada por una cantidad igual a la dimensión (b). Con la adición del integral, la presión en la válvula aumentó por un valor igual a la dimensión (c), y con la acción derivada una presión adicional igual a la dimensión (d) fué aplicada a la válvula. Al final puede verse que cuando la medición se desvió de 20 a 40 % del rango de la escala, el efecto acumulativo de todas las acciones produjo un cambio de presión en la válvula equivalente a: $b + c + d$.

El efecto de la acción derivada, entonces, es aplicar un cambio en la presión de la válvula en el instante en que la medición empieza a desviarse y en una cantidad proporcional a la cantidad de la desviación. Este efecto, es el de aplicar una acción correctiva más rápidamente que la que aplicaría una acción proporcional normal, resultando que la desviación de la medición será reducida, o puesto de otro modo, la cantidad y duración de la desviación del proceso será reducida.

Este último punto se ilustra en la figuras "A" y "B". En la figura "A" se muestran dos curvas de recuperación de un proceso actual siguiendo una perturbación. La curva superior muestra la recuperación, producida por la acción proporcional y de reajuste solamente. La curva inferior muestra la recuperación producida con la adición de la acción derivada.

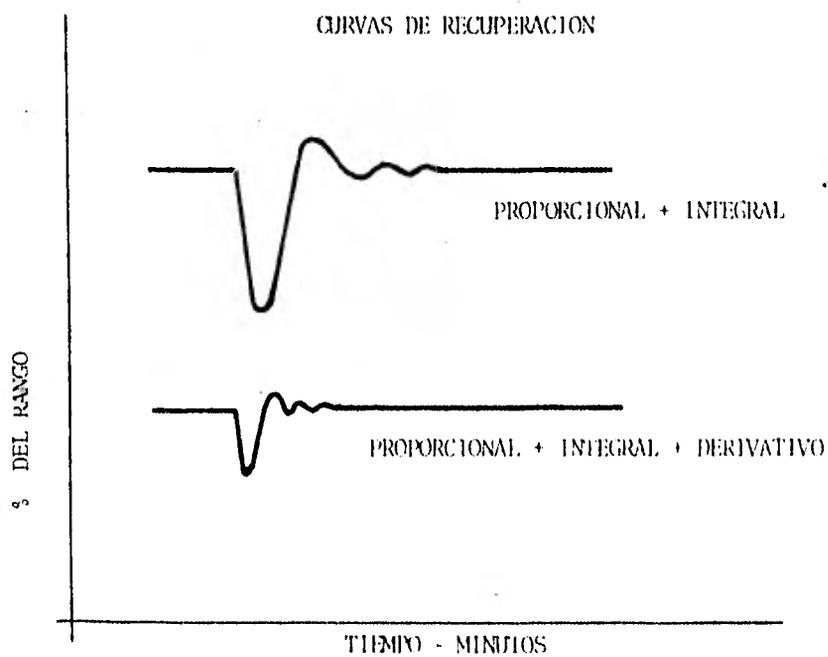


FIGURA "A"

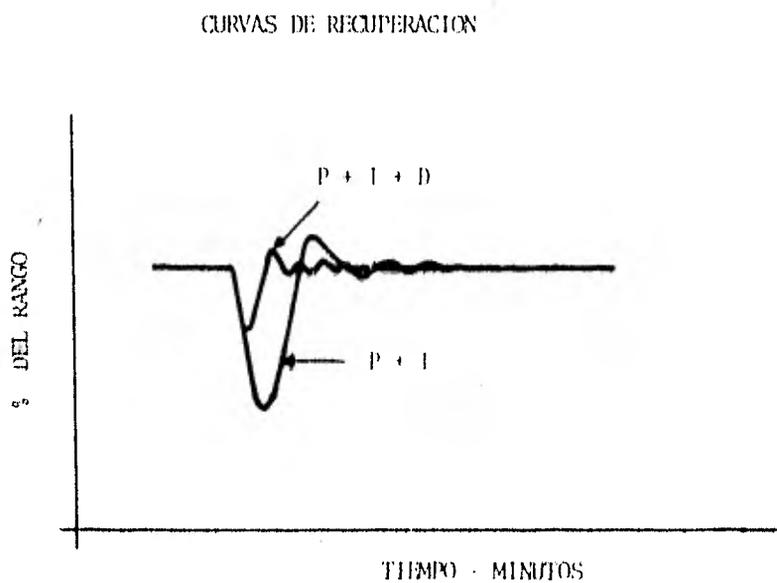


FIGURA "B"

6.7 GUIA PARA SELECCION DE CONTROLADOR. -

Con esta guía no se pretende dar solución a todos los procesos, ya que sería necesario un estudio más minucioso, sin embargo, nos da una idea muy aproximada de la selección de controladores.

Proceso con Retraso de Capacitancia.-

Se encuentra donde existe un apreciable almacenamiento del medio controlado.

Ejemplos.- Control de nivel en tanques de retención de proceso. Calentamiento intermitente.

Control.- Abierto cerrado con abertura diferencial. Proporcional.

Proceso con Retraso de Transmisión.-

Se encuentra donde es necesario forzar la acción correctiva a través de un elemento resistivo antes de que afecte el proceso.

Ejemplos.- Control de temperatura que utiliza un cambiador de calor, especialmente cuando se usa pozo termométrico.

Control.- Proporcional + derivativo ó si la banda tiene que ampliarse mucho, Proporcional + Integral + Derivativo.

Proceso con Respuesta Instantánea.-

Se encuentra donde la variable manipulada es la misma que la variable controlada: o si son dinámicamente iguales.

Ejemplos.- Control de flujo y control de presión de líquidos en tuberías u otros vasos completamente llenos con el líquido.

Control.- Proporcional más reajuste.

Proceso con Retraso de Velocidad - Distancia.-

Se encuentra donde el dispositivo de medición está aguas abajo del punto de la acción correctiva. Igual la distancia de separación y la velocidad del flujo,

Ejemplos.- Cualquier control de proceso que requiere tiempo de reacción antes de la medición. Cualquier circuito de control de variable analítica donde el sistema de muestreo produce tiempo muerto.

Control.- Proporcional + Integral lento (no usar derivativo). Eliminar el tiempo muerto si es posible.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO VI

- 1.- I.S.A., "TEORIA Y APLICACIONES DEL CONTROL AUTOMATICO", Breve Curso, 1980.
- 2.- Foxboro: "PROCESS CONTROL INSTRUMENTATION", Pub. 105A 15 M.
- 3.- M.B. Hall: "PRINCIPLES OF AUTOMATIC CONTROL", Foxboro.
- 4.- L.M. Soule: "AUTOMATIC CONTROL", Chemical Engineering, 1970.
- 5.- Fispo: "PRINCIPIOS BASICOS DE TEORIA DE CONTROL".

C A P I T U L O V I I

CAPITULO VII

VALVULAS DE CONTROL

- 7.1 Generalidades
- 7.2 Principales tipos de válvulas
- 7.3 Cuerpo de la válvula
- 7.4 Partes internas de la válvula
- 7.5 Caracterización
 - 7.5.1 Características de caudal efectivo
 - 7.5.2 Rangeabilidad
- 7.6 Actuadores
 - 7.6.1 Actuadores neumáticos
 - 7.6.2 Actuadores eléctricos
 - 7.6.3 Actuadores Hidráulicos
- 7.7 Posicionadores
- 7.8 Dimensionamiento
- 7.9 Cavitación y Flasheo

CAPITULO VII

VALVULAS DE CONTROL.

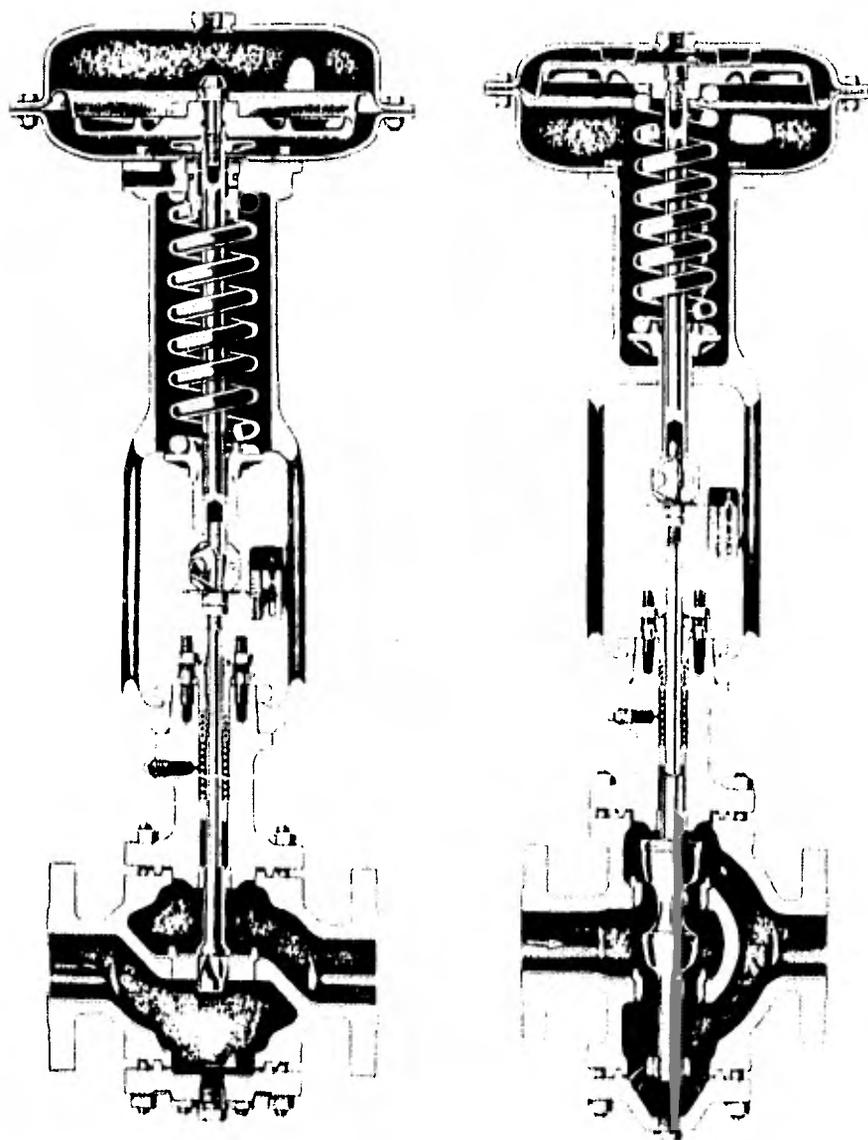
En el control automático de los procesos industriales, la válvula de control juega un papel muy importante en el loop de regulación. Efectúa la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable.

El uso de una válvula de control implica que el proceso tiene un sistema de control automático. El control puede ser de nivel, flujo, temperatura, presión o de otro tipo. Normalmente el loop de control incluirá sus elementos típicos en la retroalimentación que consistirán de sensor, transmisor, controlador, válvula de control y el proceso en sí mismo.

La selección de la válvula de control requiere un entendimiento de todos estos factores, especialmente el proceso. Una válvula seleccionada como óptima para un control de nivel puede no ser la mejor para un sistema de control de flujo. Así la mejor válvula para un control de flujo puede no ser óptima para un sistema que utilice un elemento primario diferente o un flujo bajo.

Una válvula de control consiste de dos partes principales que son: Cuerpo y Actuador.

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de bridas o rosca para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso



VALVULAS DE CONTROL.

del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Esta unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y es accionada por el actuador.

7.2 PRINCIPALES TIPOS DE VALVULAS.-

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del actuador. Los tipos principales de válvulas de control en que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje son:

- 1.- Válvula de Globo.
- 2.- Válvula de Compuerta.
- 3.- Válvula Saunders
- 4.- Válvula de Cuerpo partido.

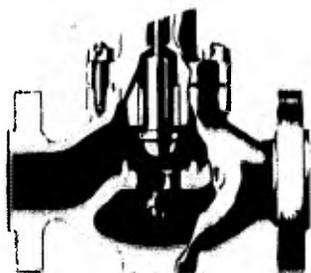
Los principales tipos de válvulas de control en que el obturador tiene un movimiento circular son:

- 5.- Válvula de Mariposa.
- 6.- Válvula de Bola.
- 7.- Válvula de Obturador excéntrico rotativo.

Cada uno de éstos tipos tiene una aplicación específica.

1.- Válvula de Globo.-

Puede ser de simple asiento ó de doble asiento, las de simple asiento requieren un actuador más grande para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso, Son utilizadas cuando se requiere poca fuga y existen bajas presiones. Las de doble asiento se utilizan en altas presiones, pero la fuga en posición de cierre es mayor,



VALVULA DE GLOBO.

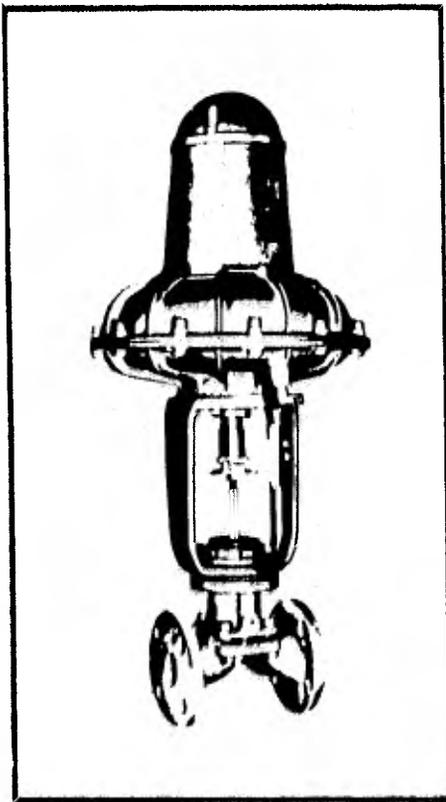
2.- Válvula de Compuerta.-

Son utilizadas como válvulas de corte más que de regulación ya que la regulación solo se obtiene cerca de la posición de cerrado y esto ocasiona un desgaste prematuro del asiento.

3.- Válvula Saunders.-

En esta válvula el obturador es una membrana flexible que a través de un vástago unido a un actuador, es forzado contra un resalte del cuerpo, cerrandose así el paso del fluido.

Se caracteriza porque el cuerpo puede revestirse fácilmente de hule u otro tipo de recubrimiento especial para trabajar con fluidos altamente corrosivos o con sólidos en suspensión. Sin embargo, tiene la desventaja de necesitar mucha fuerza en el actuador para cerrar.



VALVULA SAUNDERS

4. Válvula de Cuerpo Partido.-

Es una modificación de la válvula de Globo de simple asiento. Teniendo el cuerpo partido en dos partes entre las cuales está presionado el asiento. Esta configuración permite un rápido cambio en el asiento y ayuda a tener un flujo suave, sin espacios muertos en el cuerpo. Se emplea principalmente en fluidos viscosos.

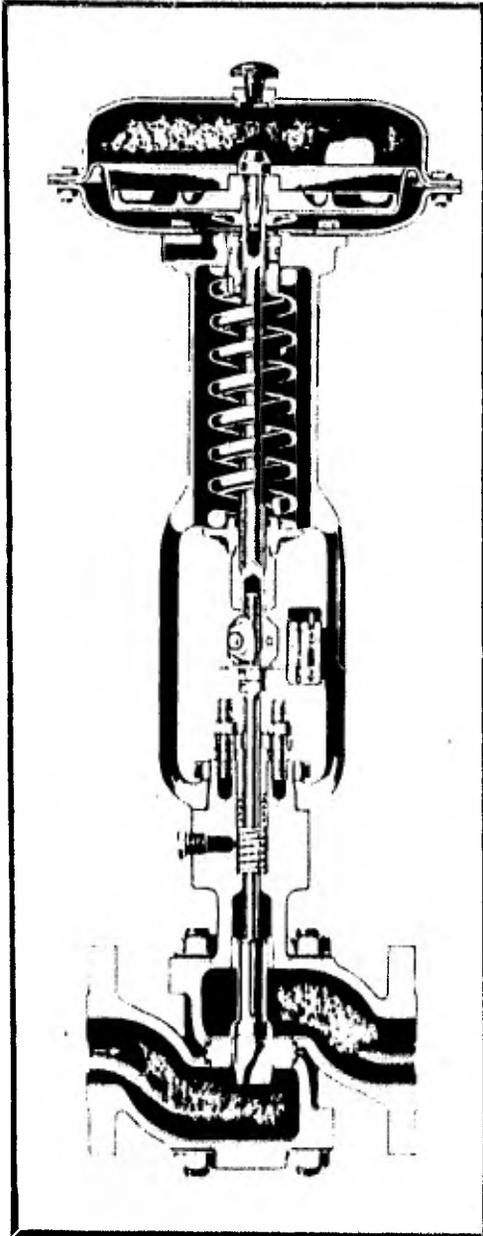
5.- Válvula de Mariposa.-

El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de hule. Un operador exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta, (en control On-Off se consideran 90° y en control continuo 60° a partir de la posición de cierre, ya que la última parte del giro es muy inestable) siempre que la presión diferencial permanezca constante. En la selección de las válvulas es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y de cierre; se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada. Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluido a baja presión.

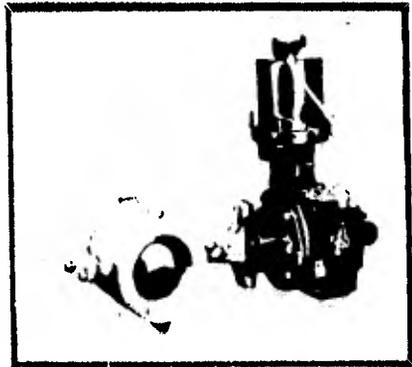
6.- Válvula de Bola.-

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que contiene un obturador en forma de esfera. La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V) que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un actuador exterior.

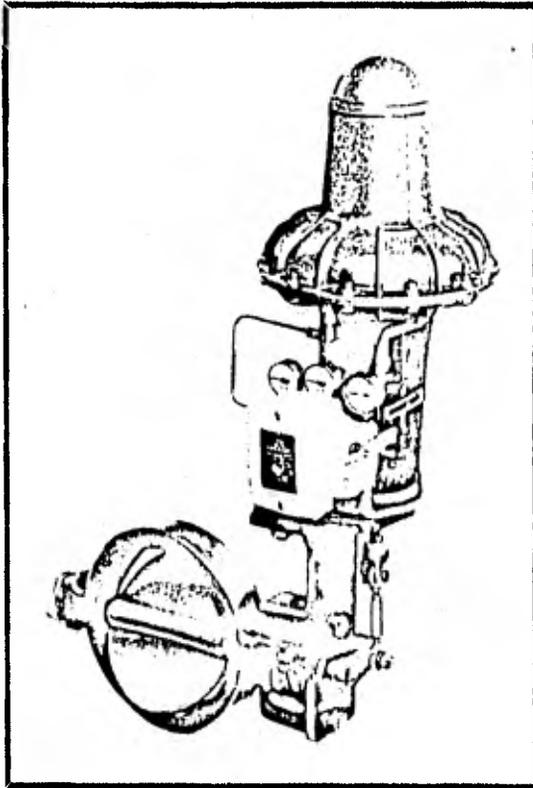
Se utiliza generalmente en fluidos con sólidos en suspensión.



VALVULA DE CUERPO PARTIDO



VALVULA DE BOLA



VALVULA DE MARIPOSA

En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente en tamaño a 75% del tamaño de la tubería. Una válvula típica de bola es la "válvula macho" que es utilizada generalmente en el control manual todo-nada de líquidos o gases.

7.3 CUERPO DE LA VALVULA, -

El cuerpo de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o a la corrosión producidas por el fluido.

Así como la válvula de control sirve primordialmente como un recipiente de contención para el fluido, sirve también como cámara para el mecanismo del obturador y como soporte mecánico del actuador y sus accesorios.

Contiene partes en movimiento que pueden desgastarse, corroerse, etc. Entonces es importante que el cuerpo pueda ser removido del sistema de tuberías, o que su interior sea fácilmente accesible para mantenimiento.

Normalmente el cuerpo es bridado, pero cabe señalar que:

- 1.- Las conexiones roscadas se utilizan hasta 2";
- 2.- Las bridas pueden ser planas, con resalte, machihembradas o machihembradas con junta de anillo;
- 3.- Las conexiones soldadas pueden ser con encaje o con soldadura a tope. Las primeras se emplean para tamaños de válvulas hasta 2" y las segundas desde 2 1/2" a tamaños mayores.

Los materiales de construcción son importantes en las válvulas de control y sus elementos. Aquellas partes en contacto con el fluido deben, por supuesto, ser resistentes al ataque corrosivo del fluido.

Los cuerpos de válvula suelen ser de hierro, acero inoxidable, y muchas aleaciones como monel, hastelloy C ó B, etc. Plásticos y revestimientos internos son también comúnmente utilizados. Es conveniente recurrir a los manuales del fabricante para la mejor elección.

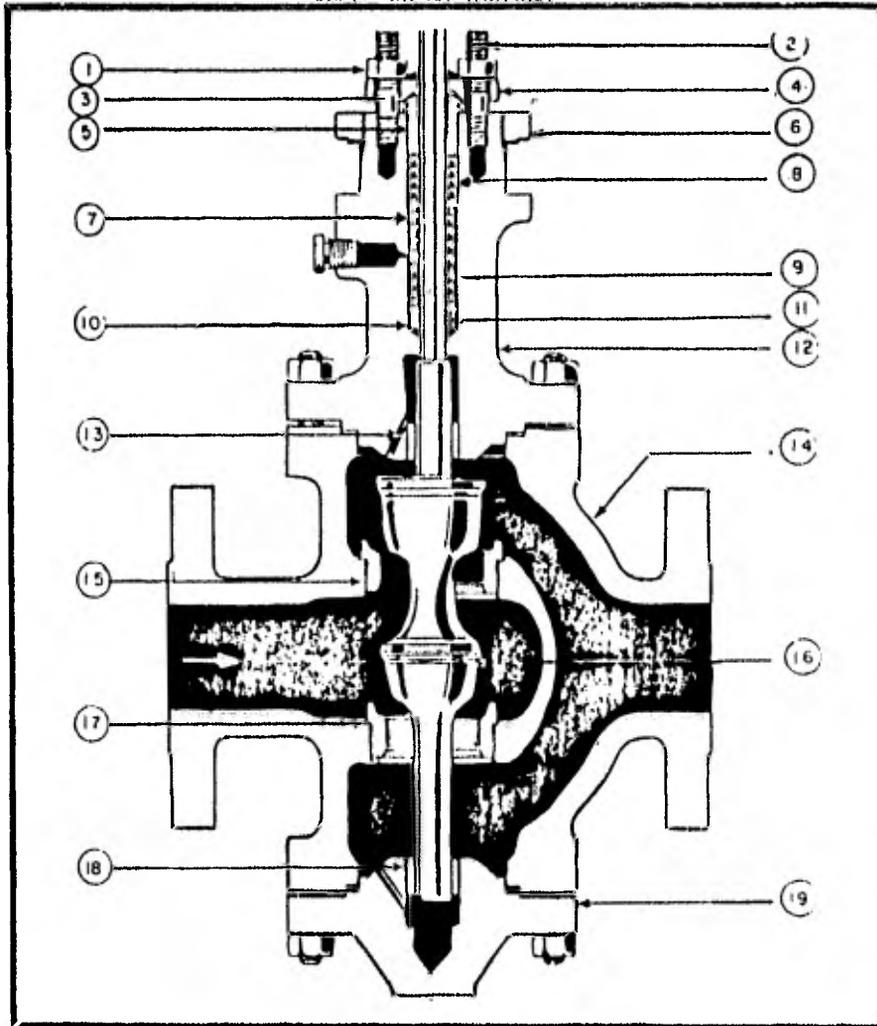
La corrosión no es el único factor que se debe tomar en cuenta. La cavitación dentro del cuerpo de la válvula puede ocasionar serios daños a sus componentes.

7.4 PARTES INTERNAS DE LA VALVULA.

Como partes internas se consideran generalmente las piezas internas metálicas desmontables que están en contacto directo con el fluido.

Estas piezas son el éstago, el empaque, el collarín de lubricación en la empaquetadura (si se emplea), los anillos de guía del vástago, el obturador y el asiento a los asientos.

CUERPO DE LA VALVULA



VALVULA DE DOBLE ASIENTO

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1.- TUERCA ESTOPERO | 10.- ANILLO DEL ESTOPERO |
| 2.- TORNILLO ESTOPERO | 11.- ANILLO DE TEFLON |
| 3.- ANILLO DE FILTRO | 12.- BONETE |
| 4.- PRENSA ESTOPAS | 13.- GUIA |
| 5.- GUIA ESTOPERO | 14.- CUERPO |
| 6.- CONECTOR DEL YUGO | 15.- ASIENTO SUPERIOR |
| 7.- RESORTE DEL EMPAQUE | 16.- TAPON |
| 8.- EMPAQUETADURA | 17.- ASIENTO INFERIOR |
| 9.- VASTAGO DE LA VALVULA | 18.- GUIA |
| 19.- BRIDA INFERIOR | |

Hay que señalar que las partes principales son el obturador y los asientos ya que su función incluye:

- a) Proporcionar una restricción variable dentro del cuerpo de la válvula para provocar cambios en el flujo.
- b) Caracterizar el flujo con respecto a la posición de la válvula.
- c) Proporcionar algún grado de corte cuando la válvula está en la posición de totalmente cerrada.

Para realizar estas funciones se han construido más variaciones de diseño en los internos que cuerpos de válvulas.

La restricción variable es obtenida en dos formas principales las cuales son comparables a la clasificación según el movimiento del obturador, en dirección de su eje o rotatorio. En ambos casos existe una interrelación entre el movimiento y el flujo, este es llamado "Característica de Flujo".

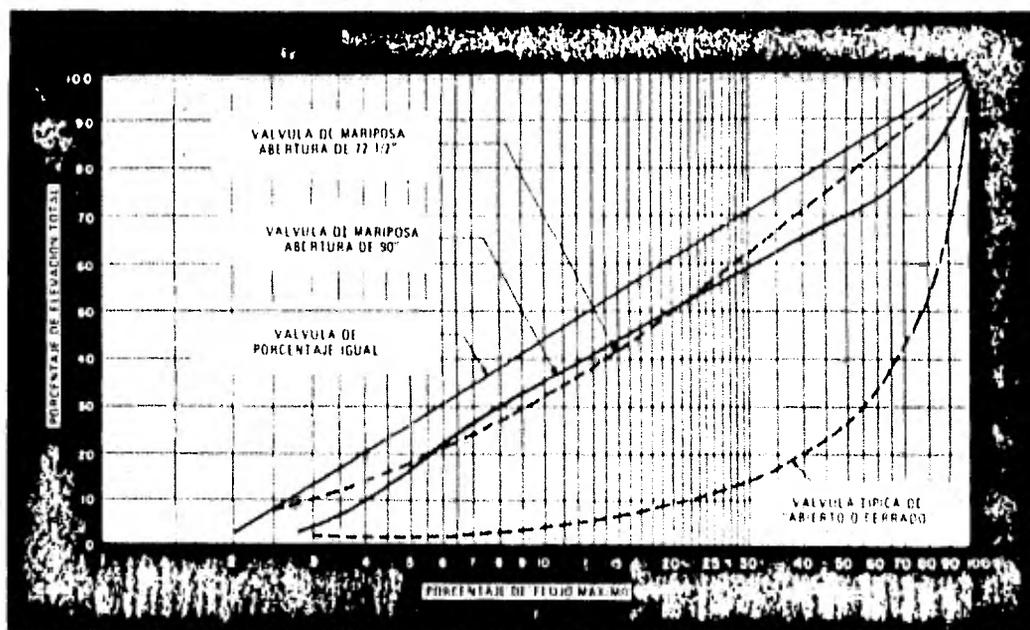
El obturador y los asientos se fabrican normalmente en acero inoxidable porque éste material es muy resistente a los ataques químicos y mecánicos del fluido. Aunque se fabrican también un gran número de aleaciones.

7.5 CARACTERIZACION. -

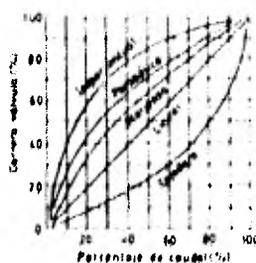
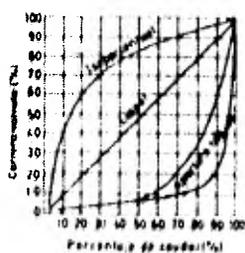
Como se mencionó anteriormente, el obturador determina la característica de flujo de la válvula; es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso de fluido.

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina "Característica de Flujo Inherente" y se representa usualmente considerando como abscisa el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante y como ordenada la carrera del obturador de la válvula.

Las curvas características más significativas son la de apertura rápida, la lineal y la isoporcentual, siendo las más importantes estas dos últimas. Otras curvas son las parabólicas y las correspondientes a las válvulas de mariposa y Saunders.

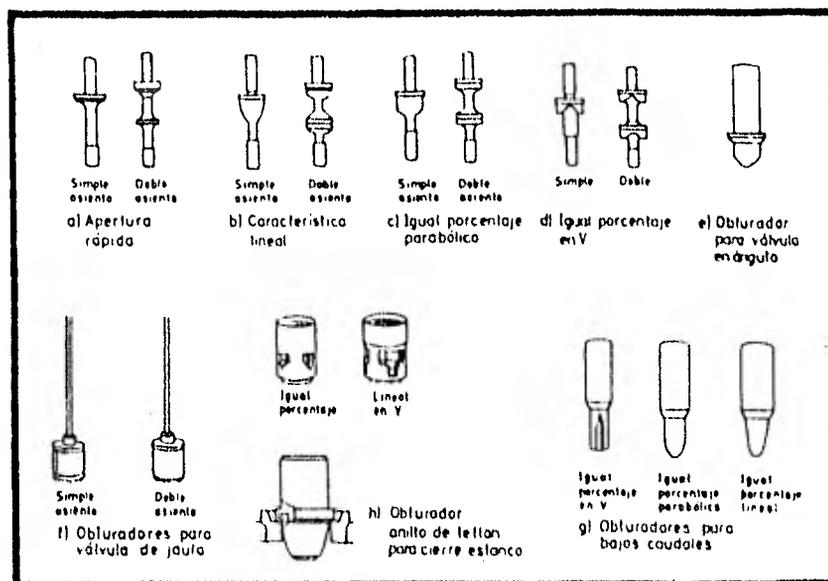


CURVAS CARACTERISTICAS DE 4 TIPOS DE VALVULAS



TIPOS DE CARACTERISTICAS INHERENTES DE LA VALVULA

Las curvas características se obtienen mecanizando el obturador para que al variar la carrera el orificio de paso variable existente entre el contorno del obturador y el asiento configure la característica de la válvula. En las siguientes figuras pueden verse varios tipos de obturadores cuya forma y mecanización determina esta característica.



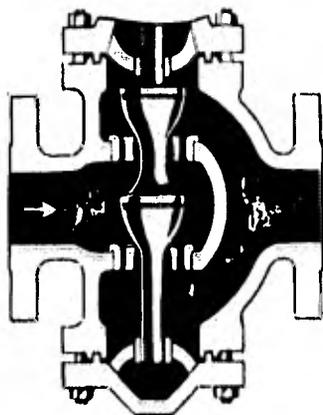
TIPOS DE OBTURADORES

El obturador con "característica de apertura rápida" tiene la forma de un disco plano. En la gráfica anterior se observa que el caudal aumenta mucho al principio de la carrera llegando rápidamente al máximo.



OBTURADOR DE APERTURA RÁPIDA

En el obturador con "característica lineal" (figs. b, f, g), el caudal es directamente proporcional a la carrera. Gráficamente se re presenta por la línea recta de la gráfica de características.



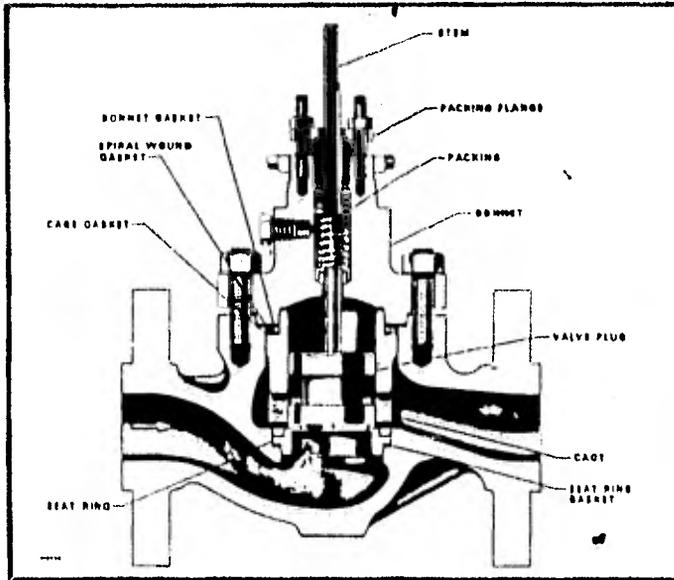
OBTURADOR LINEAL DOBLE PUERTO

En el obturador con "característica isoporcentual" (figs. c, d, f, g), cada incremento de carrera del obturador produce un cambio en el caudal que es proporcional al caudal que fluía antes de la variación.

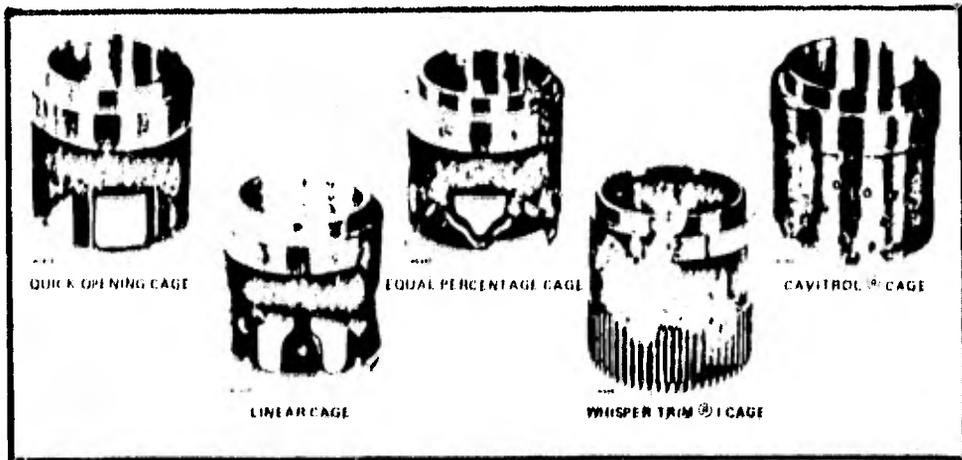
La curva isoporcentual se caracteriza porque al principio de la carrera de la válvula, la variación del caudal es pequeña, y al final, pe queños incrementos en la carrera se traducen en grandes variaciones de caudal.



OBTURADOR ISOPORCENTUAL DE DOBLE PUERTO



VISTA INTERIOR DEL CUERPO DE UNA VALVULA CON JALIA CARACTERIZADORA DE FLUIDO (DISEÑO LS DE FISHER GOVERNORS)



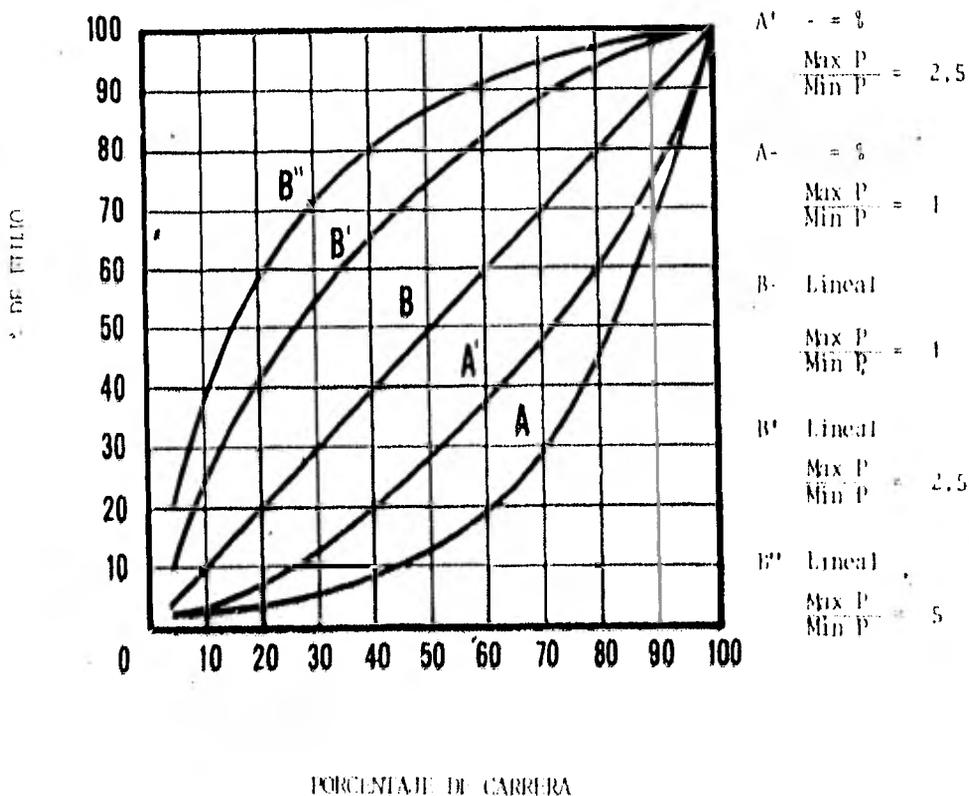
DIFFERENTES TIPOS DE JALIAS PARA CARACTERIZACION DE FLUIDO

7.5.1 Características de Caudal Efectivas.

Hay que señalar que en la mayor parte de las válvulas que trabajan en condiciones reales, la presión diferencial cambia cuando varía la apertura de la válvula con el caudal, por lo cual la curva real que relaciona la carrera de la válvula con el caudal se aparta de la característica de caudal inherente. Esta nueva curva recibe el nombre de "característica de caudal efectiva".

Con la variación de presión diferencial señalada depende de las combinaciones entre la resistencia de la tubería, y las características de las bombas y tanques de proceso, es evidente que una misma válvula instalada en procesos diferentes presentará inevitablemente curvas características efectivas distintas.

EFFECTOS DE LA PRESION DIFERENCIAL



La gráfica anterior de la curva de Flujo-Recorrido muestra como el diseño o característica inherente es afectado por las variaciones en la presión diferencial. Esto ocurre cuando el proceso cambia de altos flujos, donde la presión diferencial es distribuida a través del sistema, a bajos flujos, donde la mayoría de la presión diferencial es concentrada en la válvula de control.

Estas variaciones en presión diferencial concentrada es uno de los más importantes aspectos al seleccionar la característica para un proceso dado.

Desde un punto de vista ideal, la característica efectiva de la válvula debe ser tal que el loop de control tenga la misma estabilidad para todas las variaciones de carga del proceso. Un loop de control es estable si la ganancia del loop es menor que 1.

En el siguiente proceso (figura a), la ganancia total del loop de control equivale al producto de las ganancias del proceso, del transmisor, del controlador y de la válvula de control. Es decir, a:

$$G = \frac{\Delta v}{\Delta q} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta s}$$

en donde: q = variación de caudal del fluido de control
 v = incremento de la variable del proceso
 t = incremento de la señal de salida de transmisor
 s = incremento de la señal de salida del controlador a la válvula de control.

Para facilitar el estudio dinámico, el transmisor y la válvula de control se consideran incluidos dentro del proceso con lo cual la expresión anterior pasa a:

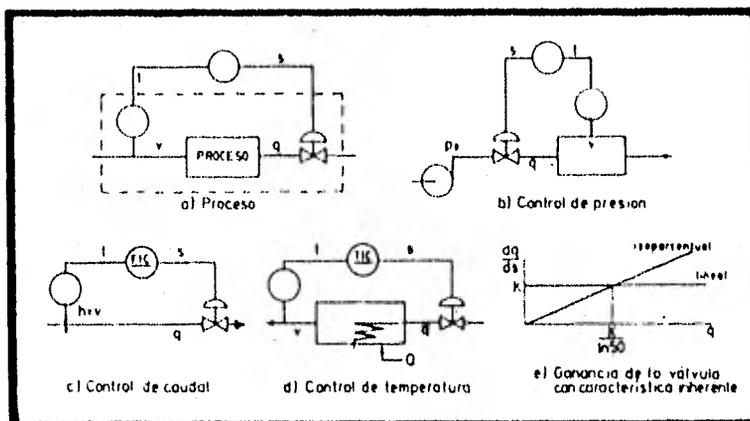
$$G = \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \frac{\Delta t}{\Delta s}$$

Es evidente que la válvula de control puede modificar la ganancia del loop. La ganancia de la válvula de control viene expresada como la relación entre el incremento del caudal de salida y el incremento en la señal de entrada. Como en la práctica la variación en la señal de entrada es casi lineal con la carrera, puede admitirse que la ganancia equivale a:

$$\frac{dq_c}{dl}$$

siendo q_c el caudal efectivo de paso por la válvula y l la carrera.

GANANCIAS DE LOS ELEMENTOS DEL LAZO

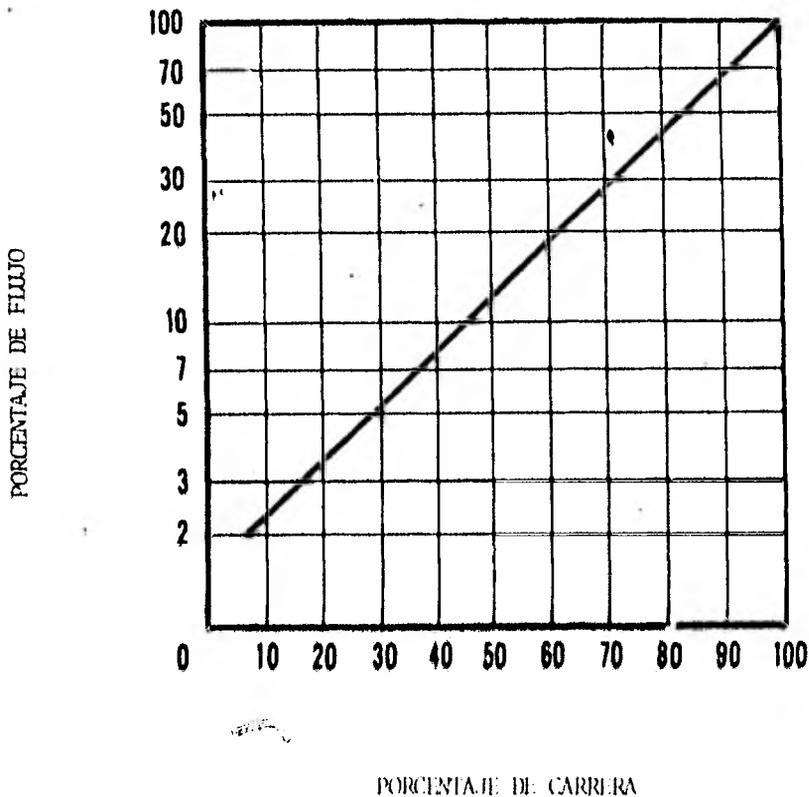


Como indicación mencionaremos que la elección de una válvula de control se centra en la válvula lineal o la isoporcentual. Aunque es necesario realizar estudios más específicos para hacer una selección adecuada. En general, podemos afirmar que la válvula más empleada es la isoporcentual, en particular cuando el comportamiento dinámico del proceso no es bien conocido o bien se sospecha que la válvula está mal calculada por no ser fiable los datos del proceso que han servido de base al cálculo, o bien existen cambios de carga importantes.

7.5.2 Rangeabilidad.-

El término "rangeability" se define como "la relación del máximo flujo controlable al mínimo flujo controlable".

Así, si una válvula con una curva característica como la mostrada a continuación tendrá una rangeabilidad de $100/2$ ó $50/1$.



La rangeabilidad debe ser basada en un flujo controlable. Es impráctico desde el punto de vista de fabricación, caracterizar el flujo con poca apertura. Además de que en el cierre es imposible caracterizar cualquier fuga que pueda ocurrir.

Para determinar la rangeabilidad necesaria requerida en una válvula de control para una condición determinada de flujo, solo se toma la relación de máximo C_v requerido al mínimo C_v requerido. Si esta relación es menor que la rangeabilidad requerida en la válvula, se tendrá la válvula de control adecuada.

Por otra parte cabe añadir que la válvula de igual porcentaje tiene una rangeabilidad superior a la lineal (50:1 la primera contra - 15:1 la segunda).

7.6 ACTUADORES. -

Los actuadores pueden ser neumáticos, eléctricos o hidráulicos si bien se emplean generalmente los primeros por ser más simples, de actuación rápida y tener una gran capacidad de esfuerzo. Puede afirmarse que el 90% de las válvulas utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente.

7.6.1 Actuadores Neumáticos. -

El actuador neumático consiste en un diafragma con resorte que trabaja generalmente entre 3 y 15 psi, es decir, que las posiciones extremas de la válvula corresponden a 3 y 15 #.

Según la acción del actuador podrá ser de acción directa cuando aplicando aire, el vástago se mueve hacia abajo, e inversa cuando al aplicar aire el vástago se mueve hacia arriba.

Cuando la válvula se cierra al aplicar aire sobre el diafragma o se abre cuando se quita el aire debido a la acción de resorte, se dice que la válvula sin aire abre o aire para cerrar (acción directa).

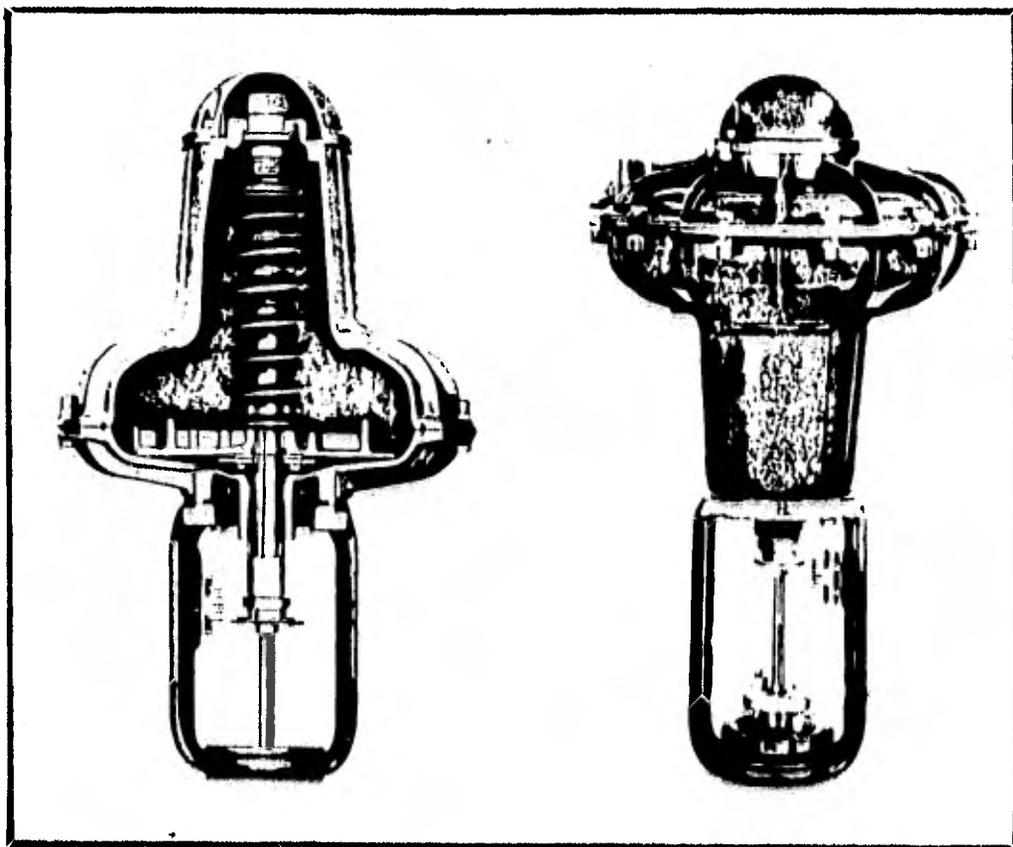
Al abrir la válvula cuando se aplica aire sobre el diafragma y se cierra por la acción del resorte cuando se quita el aire, se dice que la válvula sin aire cierra o aire para abrir (acción inversa).

Consideraciones análogas se aplican a las válvulas con servomotor eléctrico:

acción directa: con el servomotor desexcitado la válvula esta abierta;

acción inversa: con el servomotor desexcitado la válvula esta cerrada.

Al seleccionar la válvula es importante considerar estos factores desde el punto de vista de seguridad.



ACTUADORES NEUMATICOS.

Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta que se llega a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión de aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte.

Idealmente, con una señal de 3 psi la válvula debe de estar en la posición 0 de su carrera y para una señal de 15 # en la posición de -100. Así mismo, debe existir una proporcionalidad entre las señales intermedias y sus correspondientes posiciones. En la práctica las válvulas de control se desvían de este comportamiento debido a las siguientes causas:

- 1.- Rozamiento en el estopero.
- 2.- Histéresis y falta de linealidad del resorte que son poco importantes desde el punto de vista del estudio práctico.
- 3.- Area efectivas del obturador que varía con la carrera del vástago de la válvula.
- 4.- Esfuerzo en el obturador de la válvula creado por la presión diferencial del fluido.
- 5.- Fuerza adicional del servomotor necesaria para conseguir un cierre efectivo entre el obturador y el asiento (fuerza de asentamiento).

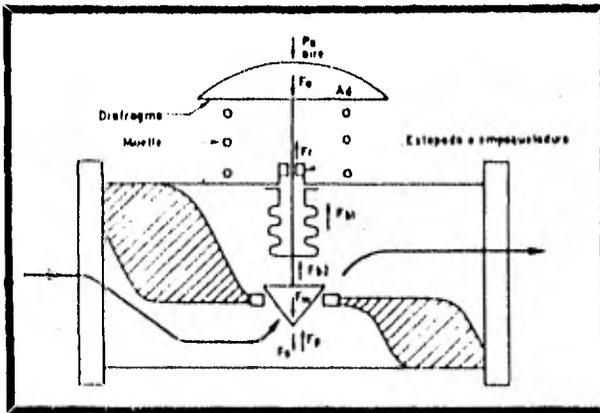
En la válvula existe un equilibrio entre estas diversas fuerzas que viene dado por la siguiente fórmula:

$$F_a \geq F_r + F_s + F_w + F_{b1} \pm F_{b2} + F_p$$

en donde:

- F_a = Fuerza resultante obtenida por el actuador
 F_r = Fuerza de rozamiento
 F_s = Fuerza de asentamiento

- F_w = Peso del obturador
 F_{b1} = Fuerza elástica del fuelle de estanqueidad
 F_{b2} = Fuerza de disequilibrio del fuelle de estanqueidad
 F_p = Fuerza estática y dinámica sobre el obturador.



FUERZAS QUE ACTUAN EN LA VALVULA DE CONTROL.

La fuerza resultante F_a en una válvula de acción directa (aire cierra) es:

$$\begin{aligned}
 F_a &= A_d \times P_a - F_{sr} \\
 &= A_d (P_a - F_2) \\
 \text{con } F_{sr} &= A_d F_2
 \end{aligned}$$

en la que:

A_d = área efectiva del diafragma

P_a = presión de aire sobre el diafragma

F_{sr} = fuerza debida a la compresión final del resorte a carrera total

F_2 = compresión final del resorte a carrera total.

En una válvula de acción inversa (aire abre) es:

$$F_a = A_d F_1$$

en la que F_1 = compresión inicial del resorte a carrera cero.

Los fabricantes de válvulas normalizan los tamaños de los servomotores de acuerdo con el tamaño de los cuerpos de las válvulas donde van montados. En ocasiones ocurre que la fuerza que proporciona un actuador estándar no es suficiente y es necesario utilizar un actuador sobredimensionado que para el mismo campo de compresión permita una mayor fuerza gracias a su mayor área efectiva en el diafragma y a la mayor carrera del vástago - del obturador.

Hay que señalar que los resortes que se oponen al diafragma poseen las características siguientes:

Margen de compresión. Por ejemplo, 3 a 15 psi.

Carrera

Gradiente. Que es la fuerza necesaria para comprimir el muelle 1",

Flexión total. Son las pulgadas de longitud con que el resorte puede comprimirse hasta que las espiras se toquen y sea imposible una compresión ulterior.

Para asegurar que las espiras no se toquen entre sí se acostumbra a utilizar solamente entre el 80 y 85% de la flexión total como máximo.

La "fuerza de rozamiento F_r " en el estopero se produce entre el vástago de la válvula y la empaquetadura (teflón, asbesto, asbesto grafitado, etc.), de su longitud, de la compresión a que está sometida, de la temperatura, de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico, del estado de la superficie del vástago, etc.

Es prácticamente imposible calcular exactamente estas influencias en una válvula de control. Una regla práctica da los siguientes valores:

TIPO DE EMPAQUETADURA	TAMAÑO VALVULA	ROZAMIENTO
Apriete con resorte	1/2 a 1 1/4"	5 kg
	1 1/2 a 2 1/2"	10 kg
	3 a 12"	15 kg
Ajuste manual	1/2 a 1 1/4"	10 kg
	1 1/2 a 2 1/2"	20 kg
	3 a 12"	30 kg

La "fuerza de asentamiento" permite cerrar la válvula y conseguir que la fuga de fluido sea mínima: su valor depende del grado de mecanización del asiento y del obturador.

Para su cálculo se emplea la fórmula: $F_S = 0.5 F_T D_S$

F_S = fuerza de asentamiento

D_S = diámetro interior del asiento, en cm.

El "peso del obturador F_w " solo se considera cuando la válvula es tá en posición vertical.

La "fuerza elástica F_{b1} del fuelle de estanqueidad" obliga a una fuerza adicional en el actuador para comprimir o tensionar los fuelles.

La "fuerza de desequilibrio F_{b2} del fuelle de estanqueidad" es:

$$F_{b2} = A_f P$$

en la que:

A_f = área efectiva del fuelle

P = Presión del fluido existente en la válvula

Las "fuerzas estáticas y dinámicas F_p " en las válvulas de control son debidas en la mayor parte a la presión del fluido sobre el obturador. En la práctica, las fuerzas dinámicas no se conocen perfectamente debido a la falta de datos de ensayo suficientes. Entre las mismas nos encontramos el empuje lateral del fluido y el fenómeno de succión del obturador cuando éste se aproxima al asiento debido al aumento de velocidad que se produce. La influencia de las fuerzas dinámicas es casi despreciable frente a las demás fuerzas estáticas en particular con el obturador en la posición de cierre. Estas fuerzas varían según el tipo de válvula:

En una válvula de simple asiento en la posición de cierre, la presión de salida P_2 es generalmente igual a cero.

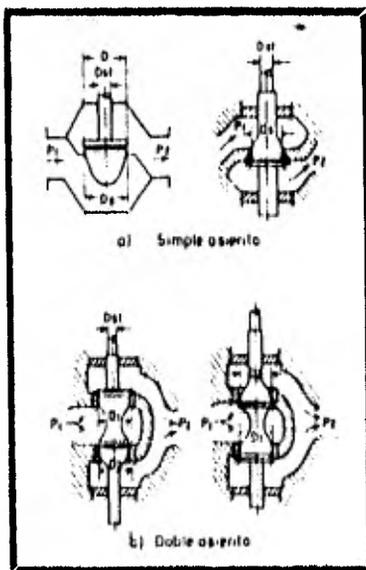
Examinando las siguientes figuras podemos observar que:

$$F_p = A_s P_1 - (A_s - A_{st}) P_2$$

como:

$$P_2 = 0$$

$$F_p = A_s P_1$$



FUERZAS ESTÁTICAS SOBRE EL OBTURADOR

y para una válvula de acción inversa sería:

$$F_p = (\Lambda_s - \Lambda_{st}) P_1 - \Lambda_s P_2$$

$$= \Lambda_s (P_1 - P_2) - \Lambda_{st} P_1$$

si $P_2 = 0$

$$F_p = (\Lambda_s - \Lambda_{st}) P_1$$

En donde:

$$\Lambda_s = \text{área del asiento en cm}^2 = D_s^2 / 4$$

$$\Lambda_{st} = \text{área transversal del vástago en cm}^2$$

$$= D_{st}^2 / 4$$

$$P_1 = \text{presión de entrada en Kg/cm}^2$$

$$P_2 = \text{Presión de salida en Kg/cm}^2$$

En una válvula con obturador equilibrado (fig- b)

$$F_p = \Lambda_s P_1 - (\Lambda_p - \Lambda_{st}) P_1 \quad \text{cuandp } P_2 = 0$$

En donde:

$$\Lambda_p = \text{área superior del obturador}$$

En una válvula de doble asiento equilibrada (fig c) las áreas de los dos asientos son distintas para permitir que un obturador pase por el área libre del asiento del otro y así poder montar y desmontar la válvula.

$$F_p = (\Lambda_{s1} - \Lambda_{s2}) P_1 \quad \text{con } P_2 = 0$$

Donde:

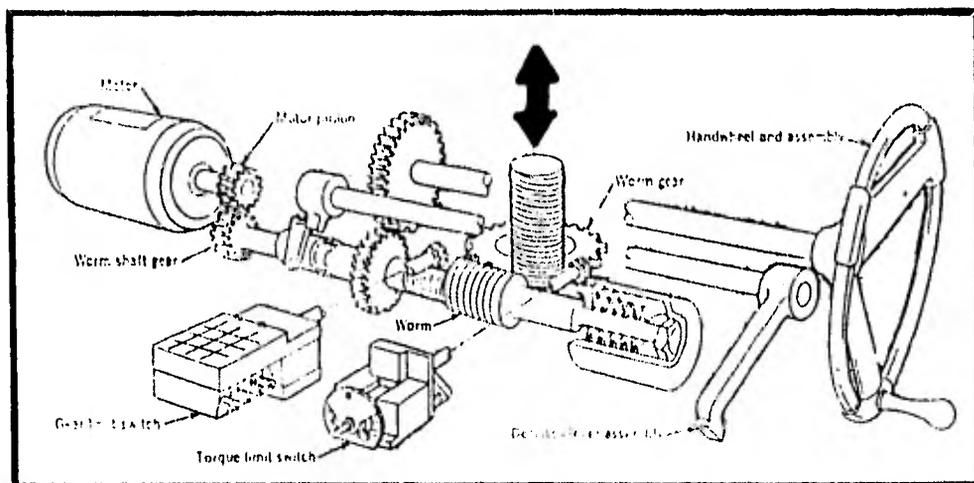
$$\Lambda_{s1} = \text{área del asiento superior, en cm}^2$$

$$\Lambda_{s2} = \text{área del asiento inferior, en cm}^2$$

7.6.2 Actuadores Eléctricos. -

El actuador eléctrico es un motor eléctrico acoplado al vástago

de la válvula a través de un tren de engranajes. El motor se caracteriza fundamentalmente por su par y por el tiempo requerido para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada o viceversa.



ESQUEMA DE UN ACTUADOR ELECTRICO

Existen básicamente tres tipos de circuitos eléctricos de control capaces de actuar sobre el motor:

- 1.- On - Off.
- 2.- Flotante
- 3.- Proporcional.

El circuito On - Off consiste en un motor eléctrico unidireccional acoplado al vástago de la válvula con una leva que fija el principio y el fin de la carrera, de este modo el motor gira en uno u otro sentido hasta el final de su carrera.

El circuito "flotante" consiste de un motor eléctrico bidireccional con interruptores de fin de carrera, acoplado al vástago de la válvula. El interruptor del controlador "flota" entre los dos contactos de accionamiento y es de disparo lento. El motor gira en un sentido o en otro según

que el controlador cierre el contacto correspondiente y se para si el contacto móvil no toca ninguno de los fijos o bien cuando llega al final de su carrera.

El circuito "proporcional" está formado por un motor bidireccional, un relevador de equilibrio y un potenciómetro de equilibrio, que serán lo que nos dan la posición de equilibrio entre la variable del proceso y la posición de la válvula. El motor eléctrico es perfectamente adecuado para servicio intermitente. Sin embargo, cuando las características de control exigen una modulación continua de la posición de la motoválvula, el conjunto motor-rele de equilibrio está sometido a un trabajo demasiado duro, y su vida útil de servicio queda considerablemente acortada.

En estas condiciones, el sistema más idóneo es el circuito de estado sólido a base de tiristores, a pesar de presentar los inconvenientes de su mayor costo y de la necesidad de disponer de dispositivos de protección adecuados contra las tensiones transitorias y los encendidos casuales.

7.6.3 Actuadores Hidráulicos. -

Los mecanismos hidráulicos son simples dispositivos con un mínimo de partes mecánicas. Aire o líquido a presión actúan un pistón duplex que se encuentra conectado al vástago de la válvula. La longitud requerida y la fuerza de asentamiento se pueden obtener variando el tamaño del cilindro. Algunas unidades cuentan con bombas manuales para operación manual cuando es necesario hacer un "By.pass" en el sistema central.

Una gran ventaja de los sistemas hidráulicos es que son mucho más rápidos al abrir o cerrar comparados con los eléctricos.

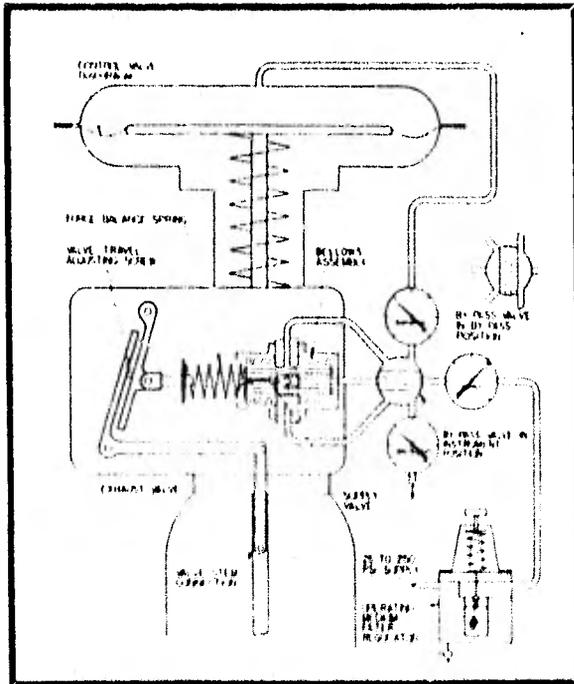
7.7 POSICIONADORES. -

Las fuerzas de desequilibrio que actúan en la válvula de control influyen en la posición del vástago de la válvula y hacen que el control sea

errático e incluso inestable, Estas fuerzas que ya mencionamos en la sección de actuadores son esencialmente las siguientes:

- 1.- Fuerza de rozamiento del vástago al deslizarse a través de la empaquetadura, variable según que el vástago esté en movimiento o parado y según el estado de la superficie.
- 2.- Fuerza estática del fluido sobre el obturador que depende de la presión diferencial existente, o sea, del grado de abertura de la válvula y de las presiones anterior y posterior a la misma.

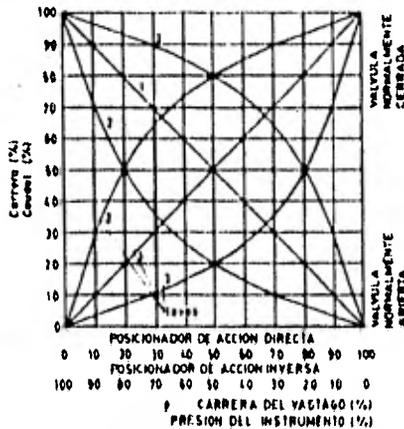
Estas fuerzas pueden compensarse empleando el posicionador. Esencialmente es un controlador proporcional de posición con punto de operación procedente del controlador, variable entre 3 y 15 psi.



POSICIONADOR FISHER.

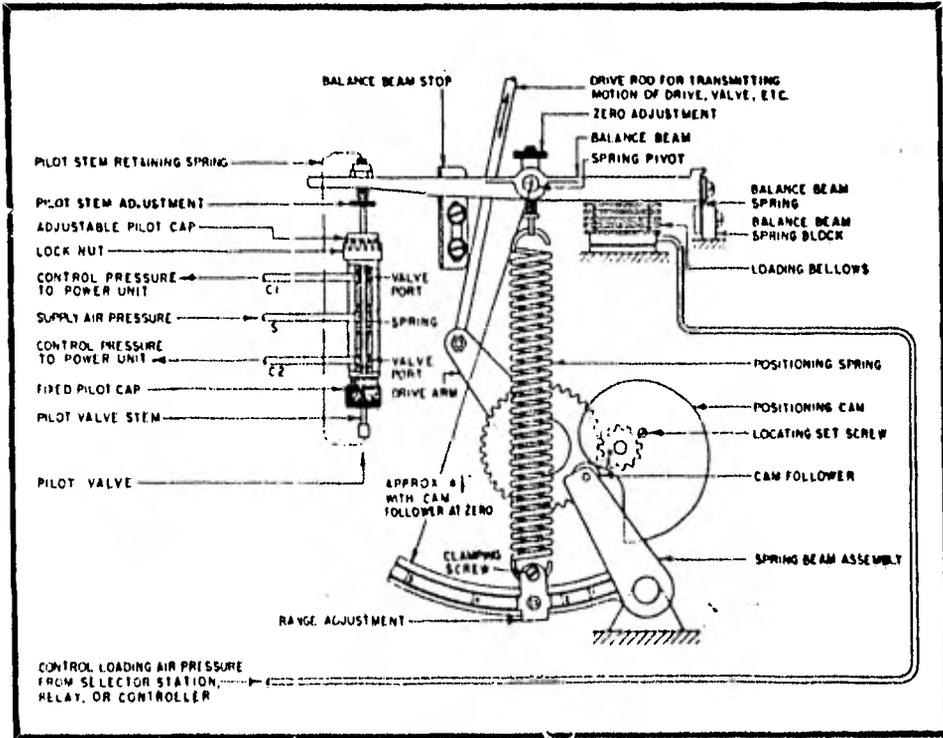
El posicionador compara la señal de entrada con la posición del vástago y si éste no es correcto (existe una señal de error) envía aire al actuador o bien lo elimina en el grado necesario para que la posición del vástago corresponda exactamente o bien sea proporcional a la señal neumática recibida; en este último caso el posicionador actúa además como un amplificador, por ejemplo señal de entrada 3-9 psi, señal de salida 3-15 psi, es decir, la válvula efectuará toda su carrera para la señal 3-9 psi del controlador.

Otra de las funciones del posicionador es la de cambiar por completo la curva característica inherente de la válvula si es necesario. Para tal efecto puede utilizar tres tipos distintos de levas.



TIPOS DE LEVAS.

La leva 1 no cambia la señal; la leva 2 cambia una característica lineal de la válvula a apertura rápida o bien transforma una característica de igual porcentaje a otra lineal; la leva 3 aproxima una característica lineal a una de igual porcentaje o bien un obturador de apertura rápida a uno lineal.



POSITIONADOR BAYLEY.

7.8 DIMENSIONAMIENTO.-

La necesidad universal de normalizar el cálculo de las dimensiones de las válvulas, no solo en tamaño sino también en cuanto a capacidad de paso del fluido ha llevado a los fabricantes y a los usuarios ha adoptar un coeficiente que refleja y representa la capacidad de las válvulas de control.

Podemos decir entonces que las válvulas de control se dimensionan básicamente por dos razones:

1.- Económica.- Si una válvula es muy pequeña, no pasará el flujo requerido. La válvula tendrá que ser descargada y remplazada por una mayor, correctamente dimensionada. Similarmente, si la válvula es muy grande obviamente pasará el fluido requerido, pero será mucho más cara que la válvula correcta.

2.- Control.- Una válvula dimensionada de menor tamaño del debido nunca podrá entregar el flujo completo, entonces el rango de flujo controlable será muy angosto. Una válvula sobredimensionada regulará cerca de la posición de cerrada, y el rango completo de control no será utilizado. Cuando el obturador controla muy cerca del asiento, ocurren altas velocidades en el fluido controlado lo que ocasionará daños de erosión.

El método más aceptado de dimensionar una válvula es el cálculo del coeficiente C_v , el cual se define como: "la cantidad de U. S., galones por minuto de agua a 60°F que pueden pasar a través de una válvula totalmente abierta ocasionándole una caída de presión del psi".

Para calcular el coeficiente de capacidad C_v existen fórmulas en las cuales se toma en cuenta el fluido que se maneja su viscosidad, temperatura y presiones de entrada y salida, a continuación mostramos las tres fórmulas básicas para el cálculo del C_v .

Es importante hacer notar que para la correcta selección es necesario recurrir a los manuales del fabricante, ya que dicho fabricante ha efectuado en laboratorio el cálculo de C_v para cada uno de sus modelos:

- 1.- Líquidos: $C_v = Q \sqrt{G/\Delta P}$
- 2.- Gases: $C_v = Q/1360 \sqrt{T_f G/\Delta P(P_2)}$
- 3.- Vapor: $C_v = W/63.3 \sqrt{v/\Delta P}$

donde: Q ó W = flujo: líquidos (gpm), gases (scfh), vapores (lb/h)

G = gravedad específica

T_f = temperatura del flujo en grados Rankine ($F + 460$)

ΔP = caída de presión en psi. ($P_1 - P_2$)

P_1 = presión aguas arriba, a la entrada de la válvula en psia.

P_2 = presión aguas abajo, a la descarga de la válvula en psia.

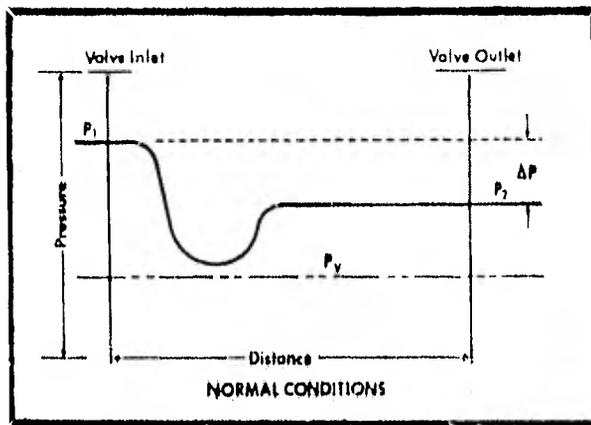
v = volumen específico a la descarga en pies cúbicos sobre libra.

Existe una importante limitación impuesta al valor de ΔP usada en el dimensionamiento de vapores y gases. Esta es que ΔP nunca deberá exceder de la mitad de la presión absoluta de entrada P_1 , aunque la válvula absorba hasta el 100% de la presión de entrada. Si la caída de presión es mayor que $1/2 P_1$, use $1/2 P_1$ para ΔP y para la presión de descarga, P_2 . - Bajo estas condiciones hay que ajustar el volumen específico de la descarga a la presión $1/2 P_1$.

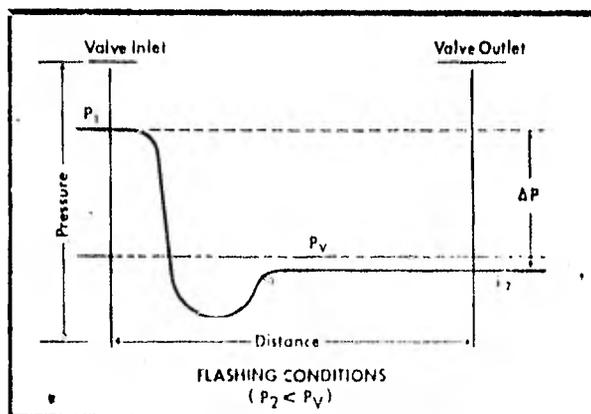
7.9 CAVITACION Y FLASHHO.

Bajo condiciones normales, el fluido que pasa a través de una -

válvula sufrirá una caída de presión a través del orificio de la válvula, a su menor presión, se le llama vena contracta. Más allá de la descarga de la válvula, la presión del fluido se recobrará parcialmente, y la presión en la línea se habrá incrementado de nuevo. La siguiente figura ilustra esta caída de presión y su recuperación cuando el fluido es un líquido permanece como líquido al pasar a través de la válvula. P_1 es la presión de entrada y P_2 la de salida.



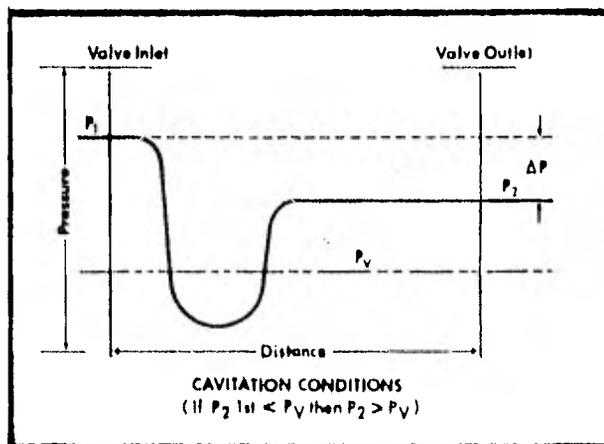
Cuando un líquido pasa por una válvula y la presión estática en la vena contracta es menor que la presión de vaporización del fluido, y a la salida de la válvula la presión es aún menor a la de vaporización, se dice que existe condición de "flasheo". En otras palabras, el fluido entra a la válvula como un líquido y sale como vapor. Dicha condición la podemos observar en la siguiente figura,



la figura siguiente ilustra una tercera condición llamada "Cavitación", la cual ocurre en una válvula cuando la caída de presión a través del orificio es primero menor que la presión de vaporización del líquido y luego se recupera a un valor superior al de vaporización. Esta recuperación de presión provoca una implosión o colapso de las burbujas de vapor formadas en la vena contracta.

La cavitación y el flasheo deben ser considerados para asegurar el tamaño apropiado de la válvula y para permitir la selección de la válvula que resista dichos efectos. Si la presencia de la cavitación y el flasheo es ignorada cuando se dimensiona una válvula, válvulas de menor tamaño pueden ser seleccionadas y como consecuencia puede ocurrir un rápido deterioro de la misma.

777-7113 514201-1 1.001/10/10000



Un rápido cálculo se muestra a continuación para predecir cuando cavitación o flasheo puede existir:

$$P \text{ (permisible)} = F_L^2 (P_1 - P_v)$$

donde: F_L = coeficiente de recuperación de la válvula, es una constante basada en la geometría de la válvula y nos indica que tan baja es la caída de presión estática en la válvula antes de recobrar la presión de salida. Este coeficiente es dado por el fabricante.

P_1 = presión de entrada al cuerpo (psia)

P_v = presión de vaporización del fluido a la temperatura de entrada. In psia.

Si el P actual de la válvula es mayor que el P (permisible) obtenido de la fórmula anterior, entonces cavitación ó flasheo ocurrirá a través de la válvula. Cuando esto ocurra, la fórmula para calcular el coeficiente C_v para líquidos será:

$$C_v = Q / \Delta P(\text{permisible})$$

GUÍA DE SELECCIÓN DE VALVULAS

FLUIDO	NATURALEZA DEL FLUIDO	FUNCIÓN DE LA VALVULA	TIPO DE DISCO	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
L	NEUTRAL (AGUA, ACEITES, ETC.)	ON/OFF	Compuerta Bola Macho Diafragma Mariposa Compuerta tipo macho	Ninguna Ninguna Ninguna Para aceites no usar hule natural (caucho) Ninguna
		REGULACION	Globo Mariposa Compuerta tipo macho Diafragma Aguja	Ninguna Ninguna Ninguna Para aceites no usar hule natural (caucho) Ninguna (flujos pequeños solamente)
Q U I	CORROSIVO (ALCALINO ACIDO, ETC.)	ON/OFF	Compuerta Compuerta tipo macho Bola Macho Diafragma Mariposa	Anticorrosivo* (sellos de fuelle) Anticorrosivo* Anticorrosivo* (revestido) Anticorrosivo* (revestido y lubricado) Anticorrosivo* (revestido) Anticorrosivo* (revestido)
		REGULACION	Globo Diafragma Mariposa Compuerta tipo macho	Anticorrosivo* (diafragma o asientos de fuelle) Anticorrosivo* (revestido) Anticorrosivo* (revestido) Anticorrosivo*
D O S	HIGIENICO (BEBIDAS, COMIDA Y MEDICINAS)	ON/OFF	Mariposa Diafragma	Disco especial + asientos blancos + revestimiento sanitario, diafragma blanco +
		REGULACION	Mariposa Diafragma Estrechamiento Contracción	Disco especial + asiento blanco + revestimiento sanitario, diafragma blanco Tubo flexible blanco + Tubo flexible blanco +
S	LÓDOS	ON/OFF	Bola Mariposa Diafragma Macho Contracción Estrechamiento	revestimiento resistente a la abrasión Disco resistente a la abrasión, asientos elásticos Revestimiento resistente a la abrasión Lubricado Ninguna Asiento central
		REGULACION	Mariposa Diafragma Estrechamiento Contracción Compuerta	Disco especial resistente a la abrasión Revestido* Ninguno Ninguno Asiento único

FLUIDO	NATURALEZA DEL FLUIDO	FUNCION DE	TIPO DE DISCO	CARACTERISTICAS ESPECIALES
O	SUSPENSIONES FIBROSAS	ON/OFF Y REGULACION	Compuerta	Asiento único, disco con bridas filosas
			Diafragma	Ninguno
G	NEUTRAL (LÍQUIDO, VAPOR, ETC.)	ON/OFF	Bola	Ninguno
			Macho	Ninguno
	REGULACION	Diafragma	Ninguno (no es útil para servicio con vapores)	
		Globo	Ninguno	
		Aguja	Ninguno (flujos pequeños solamente)	
		Mariposa	Ninguno	
CORROSIVO (VAPORES ACIDOS)	ON/OFF	Diafragma	Ninguno (no es útil para vapores)	
		Compuerta	Asientos únicos	
A	CORROSIVO (VAPORES ACIDOS)	ON/OFF	Mariposa	Anticorrosivo *
			Bola	Anticorrosivo *
S	VACIO	ON/OFF	Diafragma	Anticorrosivo *
			Macho	Anticorrosivo *
S	POLVOS ABRASIVOS	ON/OFF Y REGULACION	Mariposa	Anticorrosivo * (flujos pequeños)
			Globo	Anticorrosivo *
S	POLVOS LUBRICANTES (GRAFITO, TALCO)	ON/OFF Y REGULACION	Aguja	Anticorrosivo *
			Diafragma	Anticorrosivo *
S	VACIO	ON/OFF	Compuerta	Asientos de fuelles
			Globo	Diafragma o asientos de fuelle
S	POLVOS ABRASIVOS	ON/OFF Y REGULACION	Bola	Ninguno
			Mariposa	Asientos elásticos
S	POLVOS ABRASIVOS	ON/OFF Y REGULACION	Contracción	Ninguna
			Estrechamiento	Asiento central
S	POLVOS LUBRICANTES (GRAFITO, TALCO)	ON/OFF Y REGULACION	Contracción	Ninguna
			Compuerta	Asiento único
S	POLVOS LUBRICANTES (GRAFITO, TALCO)	ON/OFF Y REGULACION	Estrechamiento	Asiento central
				Ninguno

* Una referencia general buena para encontrar los materiales apropiados se encuentra en el Manual de ingenieros químicos (Chemical Engineers Handbook).

El disco deberá ser liso sin tornillos y rebabas, hecho de materiales sanitarios como acero inoxidable, o totalmente recubierto de plástico blanco o de hule. El blanco indica que el material no debe contener compuestos que sean tóxicos o que puedan dañar el producto.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO VII

- 1.- Antonio Creus: "INSTRUMENTACION INDUSTRIAL", 2a. edición, Publicaciones Marcombo, S. A., 1981.
- 2.- Fisher Governor: "DIAPHRAGM MOTOR VALVES", Bulletin E-657 A.
- 3.- Masonican: "HANDBOOK FOR CONTROL VALVE SIZING", 6a. edition.
- 4.- Foxboro: "PROCESS CONTROL INSTRUMENTATION".
- 5.- Fertimex: "PLANTAS DE UREA", Serie técnica No. 8. 1981.
- 6.- R. H., Babcock: "INSTRUMENTACION Y CONTROL EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS POTABLES", Editorial Limusa, 1974.
- 7.- Fisher Controls: "CONTROL VALVE HANDBOOK", 2a. edición, 1977.
- 8.- I.M.P.: "CURSO DE INSTRUMENTOS DE CONTROL NEUMÁTICO", Subdirección de capacitación IMP.
- 9.- Foxboro: "VALVE ENGINEERING HANDBOOK".
- 10.- Bailey: "CHARACTERIZABLE PNEUMATIC POSITIONER", Specification P88-7.
- 11.- Kieley & Mueller: "CHOOSING A K&M AUTOMATIC CONTROL VALVE", Bulletin VS-2A.
- 12.- Fisher Controls "CATALOG 10".