

FUNDAMENTOS DE
INSTRUMENTACION Y CONTROL

GUIA DE ESTUDIO

UNIDAD 3

CARLOS ALBERTO REY SOTO
ING. ELECTRICISTA M.Sc.

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DEL TACHIRA
DPTO. DE CIENCIAS FISICAS
1.990

INDICE

3.1 CONSIDERACIONES GENERALES	1
Componentes fundamentales	1
Tipos de señales de transmisión	1
Concepto de transductor	2
3.2 MEDICION DE TEMPERATURA	3
Escala de medición	3
Detectores térmicos de resistencia	4
Método de los mínimos cuadrados	5
Circuitos transmisores para DTR	6
Termistores	9
Termocuplas	10
Leyes de termocuplas	11
Circuitos transmisores para termocuplas	14
Detectores térmicos de expansión	15
3.3 TRANSDUCTORES DE PRESION	19
Conceptos generales	19
Medición de presión manométrica	20
Transductores de presión manométrica	21
Detectores vacío	21
Dispositivos trasmisores	22
3.4 TRANSDUCTORES DE FLUJO	24
Medición de flujo de sólidos	24
Medición de flujo de líquidos	24
3.5 TRANSDUCTORES DE NIVEL	27
3.6 CARACTERISTICAS DE SISTEMAS DE LOS MEDICION	29
Velocidad de respuesta	29
Precisión	29
3.7 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL	31
Componentes de la etapa final de control	31
Actuadores eléctricos	32
Actuadores neumáticos	32
Válvulas de control	33
Características de las válvulas de control	35

UNIDAD 3

TRANSDUCTORES Y

ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

COMPONENTES FUNDAMENTALES:

Tomando en cuenta la terminología y nomenclatura utilizada por ISA, para analizar el SISTEMA DE MEDICION debemos distinguir dos componentes fundamentales:



DETECTOR: Dispositivo que está en contacto con la variable controlada, entregando una *señal arbitraria*, según su principio de funcionamiento.

TRANSMISOR: Transmite el valor detectado de la variable del proceso, entregando una *señal acondicionada* para que sea entendida por el INDICADOR, REGISTRADOR, CONTROLADOR o combinación de estos.

TIPOS DE SEÑALES DE TRANSMISION:

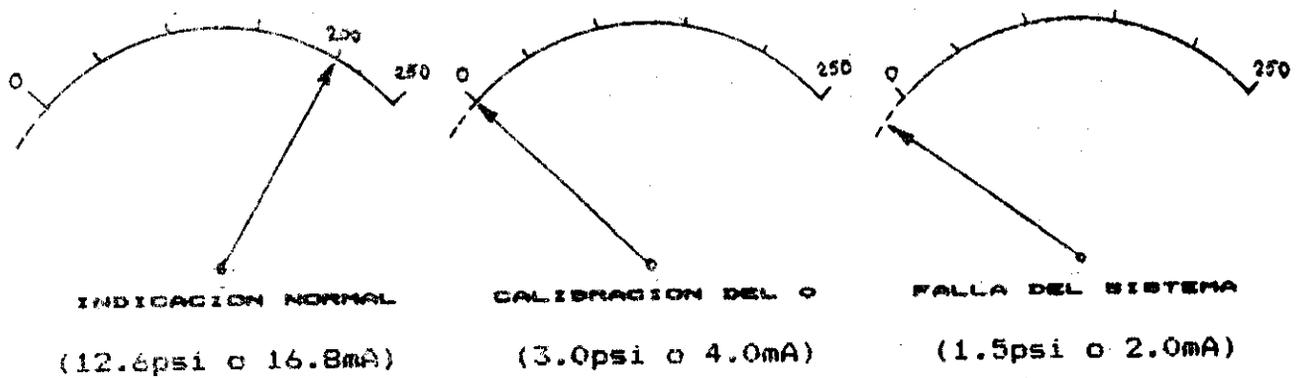
Se utilizan señales neumáticas o electrónicas, dentro de los siguientes rangos, correspondientes al 100% de la Vc:

Neumáticas..... 3 a 15 psi para controladores y medidores
0.2 a 1.0 kg/cm² con un alcance menor al 5%
(1 psi \approx 0.07 kg/cm²)

Electrónicas.... 4 a 20 mA para controladores
10 a 50 mA " " " "
1 a 5 VCD para medidores

Se puede observar que los valores máximo y mínimo de los rangos anteriores guardan la relación 1 a 5; asimismo el nivel mínimo de cada señal no es cero, con el fin de:

- Eliminar posibles errores residuales
- Facilitar la calibración de equipos
- Detectar fallas en el sistema de medición



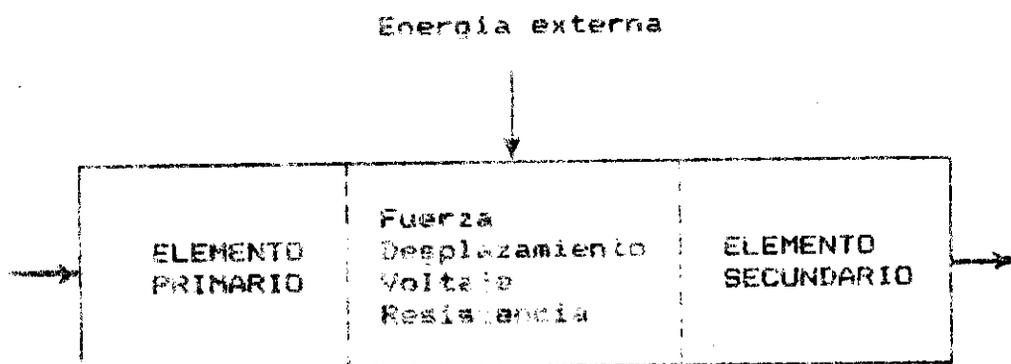
CONCEPTO DE TRANSDUCTOR:

La terminología utilizada por muchos autores en el campo de la INSTRUMENTACION INDUSTRIAL, puede diferir ligeramente de la propuesta por ISA. En efecto, se usa con mucha frecuencia el término TRANSDUCTOR, tomado de la definición de las normas ASA, para identificar elementos que intervienen en el sistema de medición:

Un transductor recibe información en forma de una señal física y la transmite en forma de otra cantidad física.

De acuerdo con esto, cualquier componente del sistema de control podría ser un transductor; sin embargo se puede limitar a aquellos dispositivos utilizados para medir alguna cantidad física tal como TEMPERATURA, PRESION, NIVEL, FLUJO, VELOCIDAD, etc.

Según esta terminología, podríamos distinguir dos partes fundamentales en un transductor:

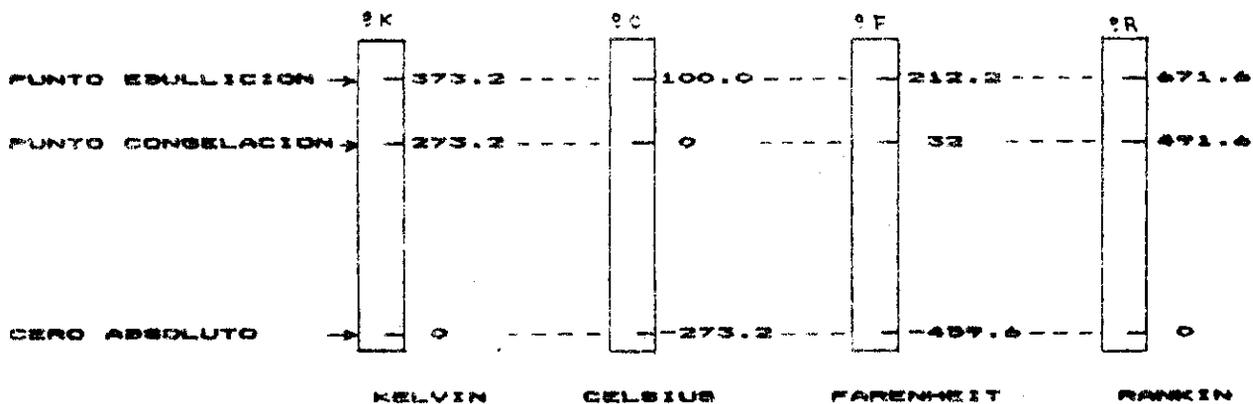


Resumiendo podemos considerar que una función del transductor en el sistema de control es la de entregar una señal que sea una medida de la variable controlada.

3.2 MEDICION DE TEMPERATURA

ESCALAS DE MEDICION:

La temperatura de un cuerpo puede considerarse como una medida relativa de su estado de calor o frio. En términos más específicos, representa la energía térmica media por molécula del material. Las diferentes escalas de medición se definen, estableciendo un conjunto de puntos de calibración, asociados generalmente con el equilibrio térmico que existe entre los estados sólido, líquido y gaseoso de ciertas materias. Tomando como referencia el agua, obtenemos las siguientes escalas típicas:



Esencialmente las escalas de medición se diferencian en la posición del cero y en el tamaño de la unidad de medida (energía térmica media por molécula). Las relaciones prácticas son:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(^{\circ}\text{K}) - 273.2$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459.6$$

$$T(^{\circ}\text{K}) = 5/9 * T(^{\circ}\text{R})$$

En el proceso de medición de temperatura, se presenta una transferencia de calor o energía térmica entre el objeto y el termómetro, hasta que los dos alcancen la condición de equilibrio térmico.

Un termómetro indica así la temperatura de equilibrio y no la temperatura inicial del objeto. Para garantizar un 100% de precisión en la lectura, el termómetro y el objeto deberían estar a la misma temperatura antes de efectuar la medición.

Ejemplo 3.1: Dada una temperatura de de 144.5°C, expresarla en unidades Kelvin, Rankin y Farenheit.

$$T(^{\circ}\text{K}) = 144.5 + 273.2 = 417.7$$

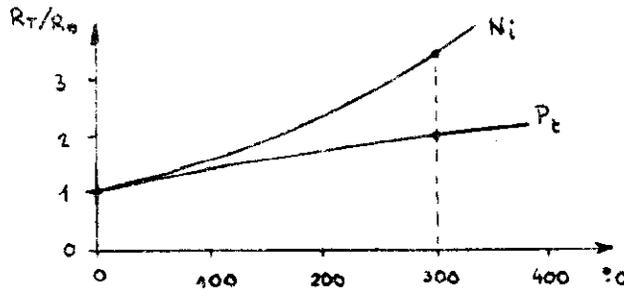
$$T(^{\circ}\text{R}) = 9/5 * 417.7 = 751.9$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 751.9 - 459.6 = 292.3$$

DETECTORES TERMICOS DE RESISTENCIA (DTR)

Se basan en la propiedad que tienen la mayoría de los metales, de cambiar su resistencia eléctrica con la temperatura. Los metales más utilizados son:

- Platino (Pt).....Alta precisión y respuesta lineal
- Niquel (Ni).....Costo moderado y alta sensibilidad



Para 300°C:

- Pt..... $R_T/R_0 \approx 2.0$
- Ni..... $R_T/R_0 \approx 3.5$

Intervalo de aplicación:

- Pt -200 a 950 °C (± 0.01)
- Ni -150 a 300 °C (± 0.50)

Para efecto de cálculos analíticos se establecen modelos lineales o cuadráticos, dependiendo del grado de precisión exigido:

- Aproximación lineal..... $R_T = R_0 * (1 + a*T)$
- Aproximación cuadrática.... $R_T = R_0 * (1 + a*T + b*T^2)$

donde R_T representa la resistencia a una temperatura T y R_0 su valor a una referencia de 0°C. Los valores de referencia utilizados comercialmente son:

- Pt..... 50, 100, 200, 400 y 500 ohms
- Ni..... 100 ohms

De este modo, un DTR tipo Pt-100 indica que utiliza resistencia de platino con 100 ohms a una temperatura de 0°C o 32°F.

Ejemplo 3.2: Calcular a y b para el modelo cuadrático de un DTR tipo Pt-100, utilizando los siguientes datos suministrados por el fabricante:

T(°C)	R_T (ohms)	Para calcular las constantes a y b , tomamos un par de valores arbitrarios de la tabla:
0	100	
25	109.7	
50	119.4	$T = 50 \dots 119.4 = 100*(1+a*50+b*50^2)$
75	129.0	
100	138.5	$T = 100 \dots 138.5 = 100*(1+a*100+b*100^2)$

Resolviendo las dos ecuaciones, obtenemos:

$$a = 3.91 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad b = -6.0 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

Se puede verificar la validez del modelo obtenido:

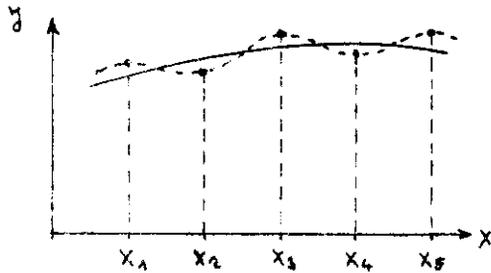
$$T = 25 \dots R = 100*(1+3.91 \times 10^{-3} * 25 - 6 \times 10^{-7} * 25^2) = 109.74 \Omega$$

$$T = 75 \dots R = 100*(1+3.91 \times 10^{-3} * 75 - 6 \times 10^{-7} * 75^2) = 128.99 \Omega$$

Cuando se parte de datos experimentales, el método anterior puede dar resultados no confiables, dependiendo de la tendencia que tengan los puntos seleccionados.

METODO DE LOS MINIMOS CUADRADOS:

Se utiliza para aproximar un polinomio de grado m a un conjunto de n datos experimentales. Es importante establecer la diferencia con un polinomio de interpolación o de fijación, tal como lo muestra la siguiente gráfica:



Dado un conjunto de n datos experimentales:

$$x_1, y_1$$

obtener el polinomio:

$$P_m(x) = k_0 + k_1x + k_2x^2 + \dots + k_mx^m$$

para el cual existen las siguientes diferencias o residuos, con respecto a los n puntos experimentales:

$$\begin{aligned} d_1 &= P_m(x_1) - y_1 \dots\dots\dots \text{residuo para } x_1 \\ d_2 &= P_m(x_2) - y_2 \dots\dots\dots \text{residuo para } x_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ d_n &= P_m(x_n) - y_n \dots\dots\dots \text{residuo para } x_n \end{aligned}$$

de modo que se cumpla el siguiente criterio de aproximación:

$$s = \sum d_i^2 \quad \text{sea mínimo}$$

Desarrollando el modelo para un polomio de grado 2 (aproximación cuadrática), obtenemos:

$$P_m(x) = k_0 + k_1x + k_2x^2$$

cuyo residuo para el n -ésimo punto experimental sería:

$$d_n = k_0 + k_1x_n + k_2x_n^2 - y_n$$

Derivando parcialmente con respecto a los coeficientes k_0, k_1 y k_2 para aplicar el criterio de aproximación, simplificando y ordenando términos, obtenemos:

$$\begin{aligned} \sum y_i &= k_0 \cdot n + k_1 \cdot \sum x_i + k_2 \cdot \sum x_i^2 \\ \sum y_i \cdot x_i &= k_0 \cdot \sum x_i + k_1 \cdot \sum x_i^2 + k_2 \cdot \sum x_i^3 \\ \sum y_i \cdot x_i^2 &= k_0 \cdot \sum x_i^2 + k_1 \cdot \sum x_i^3 + k_2 \cdot \sum x_i^4 \end{aligned}$$

que puede escribirse como una ecuación matricial:

$$[A] \cdot [K] = [B]$$

donde:

$$[A] = \begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i \cdot x_i \\ \sum y_i \cdot x_i^2 \end{bmatrix}$$

Ejemplo 3.3: Aplicando el método de los mínimos cuadrados, obtener los valores de R_0 y a para el modelo de aproximación lineal de una sonda Pt-100, con la cual se obtuvieron los siguientes datos experimentales:

i	x_i	y_i	x_i^2	$y_i \cdot x_i$
1	20	107,8	400	2.156
2	40	115,4	1.600	4.616
3	60	123,2	3.600	7.392
4	80	131,2	6.400	10.496
5	100	138,8	10.000	13.880
6	120	146,8	14.400	17.616
	420	763,2	36.400	56.156

Las matrices del sistema son:

$$[A] = \begin{bmatrix} 6 & 420 \\ 420 & 36.400 \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} 763,2 \\ 56.156,0 \end{bmatrix}$$

que resolviendo para $[K]$ se obtiene:

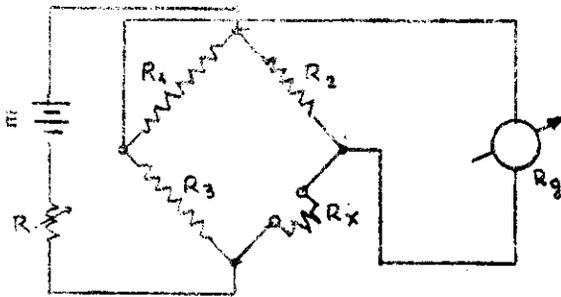
$$[K] = \begin{bmatrix} 100,13 \\ 0,398 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} k_0 &= R_0 \\ k_1 &= R_0 \cdot a \end{aligned}$$

luego:

$$R_0 = 100,13 \text{ ohms} \quad a = 3,98 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

CIRCUITOS TRANSMISORES PARA DTR:

Para completar la medición de temperatura debe utilizarse un CIRCUITO TRANSMISOR que entregue una señal acondicionada, p.ej., entre 4 y 20 mA. Se utiliza generalmente el puente de Wheastone, con diferentes configuraciones, para compensar los errores por disipación térmica y por cables de conexión.



PUENTE DE MEDICION

Para condición de balance:

$$I_g = 0$$

lo cual implica que los voltajes en los puntos c y d son iguales:

$$I_1 * R_1 = I_2 * R_2$$

$$I_1 * R_x = I_2 * R_3$$

Por lo tanto:

$$R_x = R_3 * (R_1 / R_2)$$

que se reconoce como la condición de balance del puente. Generalmente $R_1 = R_2$ con lo cual el valor de R_3 necesario para balancear el puente será:

$$R_3 = R_x$$

Ejemplo 3.4: Un DTR tiene los siguientes valores característicos:

$$a = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad R_0 = 450 \text{ ohms}$$

El puente utiliza $R_1 = R_2 = 500 \text{ ohms}$ y $E = 10\text{V}$. Calcular el valor de la temperatura medida por el DTR, si se requiere un valor de 675 ohms en R_3 para balancear el puente.

Para la condición de balance $R_3 = R_x = 675.0$, por lo tanto:

$$675 = 450 * (1 + 0.005 * T)$$

luego:

$$T = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Si se considera la disipación térmica del DTR, el valor necesario de R_3 para balancear el puente, puede cambiar, de acuerdo con la temperatura de medición. La potencia disipada en el DTR hace que se incremente su temperatura, modificando la temperatura de equilibrio de la medición.

$$P_d = K_d * \Delta T = I_x^2 * R_x$$

donde K_d es el factor de disipación térmica en $\text{W}/^\circ\text{C}$ correspondiente al material del DTR e I_x la corriente que circula por este durante la medición. De la expresión anterior puede calcularse el incremento de temperatura ΔT que sufrirá el DTR.

Ejemplo 3.5: Repetir el ejemplo anterior, considerando la disipación térmica del DTR, asumiendo que $K_d = 30 \text{ mW}/^\circ\text{C}$.

Para el balance del puente, la corriente a través del DTR es:

$$I_x = 10 / (500 + 675) = 8,51 \text{ mA}$$

con lo cual:

$$P_e = (8,51 \times 10^{-3})^2 \times 675 = 48,9 \text{ mW}$$

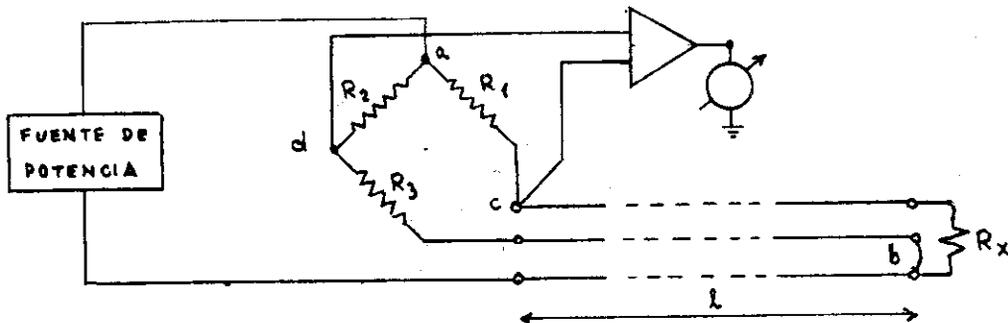
luego:

$$T = 48,9 / 30 = 1,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

y la temperatura real de la medición será de $101,63 \text{ } ^\circ\text{C}$. La resistencia necesaria para balancear el puente debe ser:

$$R_3 = R_x = 450 \times (1 + .005 \times 101,63) = 678,67 \text{ ohms}$$

Cuando la resistencia de los cables de conexión es apreciable, se utilizan el método de los tres hilos con el cual se compensa el error por este concepto.



Para conexión de dos hilos:

$$R_3 = R_x + 2 \times R_c \times l$$

Siendo R_c la resistencia de cada cable de conexión en ohms/m. Si se utiliza conexión de tres hilos, la condición de balance es:

$$R_1 \times (R_3 + R_c \times l) = R_2 \times (R_x + R_c \times l)$$

Considerando $R_1 = R_2$, se obtiene $R_x = R_3$ con lo cual se compensa el error de los cables conexión.

Ejemplo 3.6: Repetir el ejemplo 3.4, asumiendo que la distancia entre el transmisor y el detector es de 50m y se utilizan cables cuya resistencia es de 0.4 ohms/m.

Para una distancia de 50m obtenemos:

$$675 = 450 \times (1 + .005 \times T) + 2 \times 0,4 \times 50$$

con lo cual:

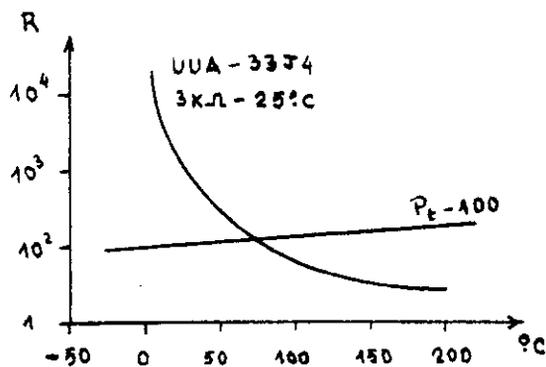
$$T = 82,2 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (error de 17,8\%)}$$

TERMISTORES

Son semiconductores que se comportan como *resistencias térmicas*, con coeficiente de temperatura para resistencia negativo y de valor extremadamente alto. Esto implica alta sensibilidad ante cambios de temperatura. La ecuación característica es:

$$R_T = R_0 \exp\left[b \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

donde b es una constante que depende de los materiales de fabricación; T y T_0 son temperaturas absolutas (Grados K o R).



Rata normal de decrecimiento:

6 a 10% por °C

Características operativas:

Aire..... 1 mW/°C..... 10sg

Aceite..... 8 mW/°C..... 1sg

Rango..... -100°C a 400°C

Por su alta sensibilidad y característica negativa de resistencia los termistores se utilizan como dispositivos auxiliares para compensar los errores por cambio de temperatura ambiente y por disipación térmica.

El coeficiente de temperatura para resistencia se expresa como:

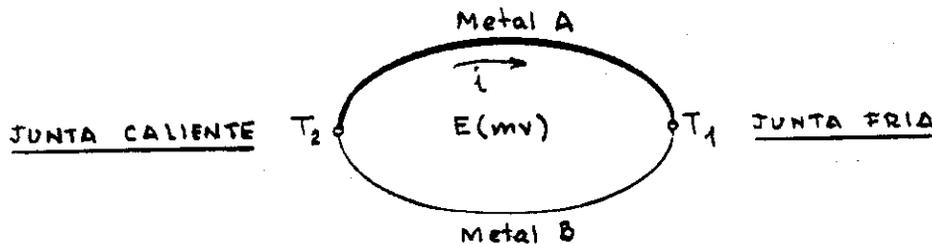
$$a = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR_0}{dT} \quad \text{ohms/ohm/°C o \% / °C}$$

Por su alta sensibilidad a los cambios de temperatura, ofrece muy buena precisión y resolución como detector, en procesos cuyo rango de variación es pequeño. Un termistor típico de 2.0 K-ohms, 3.9%/°C (25°C) presenta un cambio de 78 ohm/°C contra 0.4 ohm/°C de una Pt-100.

Los termistores pueden utilizarse como unidades con *calentamiento propio*. En este caso, una corriente eléctrica al circular a través del termistor, modifica y controla su temperatura y por lo tanto su resistencia. Este modo de operación es útil en el caso de reguladores de voltaje, analizadores de gases, medidores de flujo, controles de nivel y volumen, pero no en la medición de temperatura.

TERMOCUPLAS:

Se basan en el efecto SEEBECK descubierto en 1.821, que demuestra la existencia de una f.e.m. y de una corriente circulante, cuando se unen, en un circuito cerrado, dos metales diferentes, con sus puntos de unión a diferente temperatura.



La magnitud E de la f.e.m. es una función de la de diferencia de temperatura y del tipo de materiales que se combinan en la unión:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} (K_A - K_B) \cdot dT \quad (\text{mV})$$

siendo K_A y K_B constantes térmicas de cada material en $\text{mV}/^\circ\text{C}$. En la práctica, se encuentra que estas constantes son independientes de la temperatura. Por lo tanto:

$$E = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{mV})$$

donde $\alpha = K_A - K_B$ en $\text{mV}/^\circ\text{C}$. El modelo anterior es aproximado y para efectos de precisión, debería considerarse la variación de α con respecto a la temperatura, o utilizar curvas características y tablas suministradas por los fabricantes.

Un efecto interesante y de utilidad en algunos casos, se obtiene al analizar el comportamiento inverso de una termocupla. Cuando se hace circular una corriente eléctrica a través de la unión de dos metales, la diferencia entre sus propiedades electrotérmicas, hace que una de las uniones se caliente y la otra se enfríe, comportándose prácticamente como un refrigerador. Este fenómeno se reconoce como el efecto Peltier y tiene aplicación práctica para el enfriamiento de componentes electrónicos.

Comercialmente las termocuplas se identifican con una letra característica, de acuerdo con los metales que se combinan en su fabricación.

Las curvas características y las tablas de E v/s T se presentan para un valor específico de referencia de la unión o junta fría, generalmente a 0°C o 32°F , identificado como la temperatura de referencia.

Tabla 3.1 - Tipos comerciales de termocuplas

TIPO	POSITIVO	NEGATIVO	(mV/°C)	APLICACION
T	Cobre	Constantán	0.050	-150 a 400°C
J	Hierro	Constantán	0.056	-150 a 760°C
K	Chromel	Alumel	0.042	-150 a 1.260°C
E	Chormel	Constantán	0.074	0 a 980°C
R	Pt-Rd-1	Platino	0.012	0 a 1.540°C
S	Pt-Rd-2	Platino	0.010	0 a 1.600°C

Constantán..... 40%Niquel + 60%Cobre
 Chromel..... 90%Niquel + 10%Cromo
 Alumel..... 94%Niquel + 2%Aluminio + 4%Otros
 Pt-Rd-1..... 90%Platino + 10%Rodio
 Pt-Rd-2..... 87%Platino + 13%Rodio

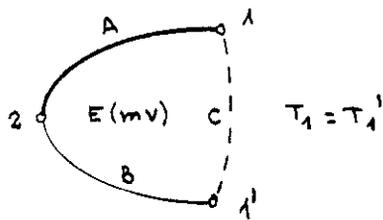
Tabla 3.2 - Valores típicos de E (mV) para T₀ a 0°C

T (°C)	T	J	K	E
50	2.04	2.59	2.02	3.05
100	4.28	5.27	4.10	6.32
150	6.70	8.01	6.14	9.79
200	9.29	10.78	8.14	13.42
250	12.01	15.55	10.15	17.18
300	14.86	16.33	12.21	21.03
350	17.82	19.09	14.29	24.96
400	20.87	21.85	16.40	28.94
450		24.61	18.51	32.96
500		27.39	20.64	37.00
550		30.21	22.77	41.05
600		33.10	24.90	45.09
650		36.07	27.02	49.11
700		39.13	29.13	53.11
750		42.28	31.21	57.08
800			33.28	61.02
850			35.31	64.92
900			37.33	68.78
950			39.31	
1.000			41.27	

LEYES DE LAS TERMOCUPLAS

Existen dos leyes fundamentales que permiten interpretar el comportamiento de las termocuplas como transductores de temperatura:

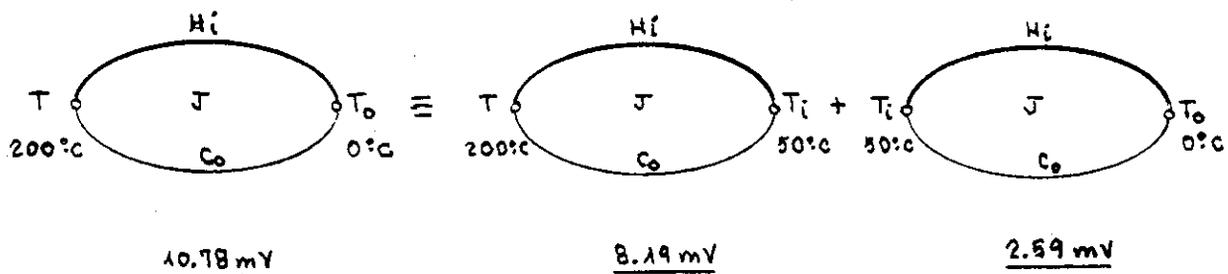
1. Ley de los metales intermedios: La E no cambia si se insertan metales diferentes, siempre que las nuevas uniones se mantengan a la misma temperatura.



Esta ley permite interpretar el comportamiento de una TC cuando se utiliza un voltímetro para registrar el valor de la f.e.m.

2. Ley de las temperaturas intermedias: El valor de E para una temperatura T puede obtenerse como la suma del valor relativo de E respecto de una temperatura intermedia T_1 , más el valor absoluto de E de dicha temperatura:

$$E(T, T_0) = E(T, T_1) + E(T_1, T_0)$$



Esta ley facilita la medición de temperatura, cuando la junta de referencia está a una temperatura diferente a 0°C o 32°F. Básicamente consiste en aplicar a la lectura obtenida [mV(leídos)], una compensación por efecto de la temperatura de referencia [mV(refer)] para obtener el valor equivalente a la tabla del fabricante [mV(tabla)]:

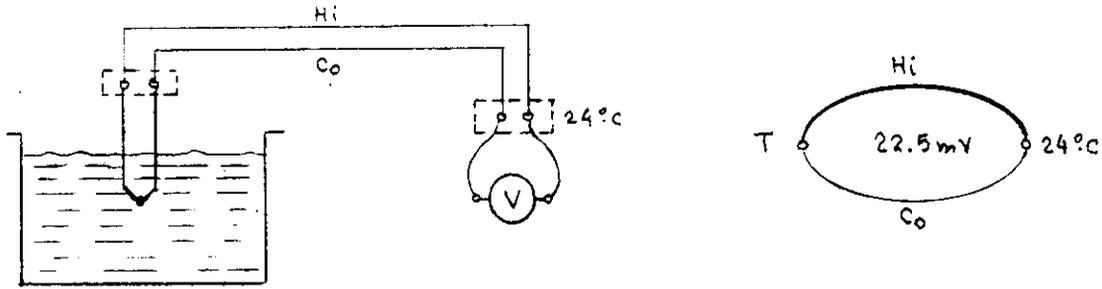
$$E(\text{tabla}) = E(\text{leídos}) + E(\text{refer})$$

siendo E(refer) los mV correspondientes a la temperatura de la junta de referencia durante la medición y E(tabla) los mV que deben utilizarse para obtener de la tabla la temperatura T de la junta caliente.

Ejemplo 3.7 Una termocupla tipo J se utiliza para medir la temperatura de un proceso, obteniéndose una lectura de 22.5mV. Si la temperatura ambiente es de 24°C. Obtener: (a) La temperatura del proceso, a partir de tablas, (b) La temperatura del proceso utilizando el modelo de aproximación lineal.

En la siguiente figura la JUNTA CALIENTE es la parte de la TC que está en contacto con el proceso. Al utilizar cables de extensión del mismo material de la TC (Hi-Co), en los terminales de conexión del voltímetro se originan dos nuevas uniones (Hi-Cu, Co-Cu). Sin embargo como están a la misma temperatura, por la ley de los metales intermedios, no se afecta el valor de la f.e.m.; por lo

tanto, puede considerarse como JUNTA FRÍA a los terminales de conexión del voltímetro.



(a) Aplicando la ley de las temperaturas intermedias:

$$E(T,0) = E(T,24) + E(24,0) = 22.5 + E(24,0)$$

El valor de E para una temperatura de 24°C se puede obtener de la tabla 3.2, por interpolación, como 1.24mV. De este modo:

$$E(T,0) = 22.5 + 1.24 = 23.74\text{mV}$$

A partir de la tabla 3.2, interpolando entre 400°C y 450°C:

$$T = 434.24^\circ\text{C}$$

(b) Para aplicar el modelo lineal, de la tabla 3.1 podemos obtener el coeficiente :

$$E = (T - 24) = 0.056*(T - 24) = 22.5\text{mV}$$

Despejando T, obtenemos:

$$T = 425.8^\circ\text{C}$$

que representa una diferencia de 1.9%, que en algunos casos puede ser aceptable para efectos prácticos.

El modelo lineal propuesto anteriormente permite analizar el comportamiento de algunas conexiones especiales, cuando se combinan diferentes termocuplas. En cualquier tipo de aplicación es posible identificar un número determinado de JUNTAS o UNIONES y para cada una asociar un valor específico de f.e.m.

Aplicando la ley de Kirchhoff de voltajes, la suma algebraica de estas f.e.m. respecto de una trayectoria cerrada debe ser igual a la f.e.m. resultante de todas las uniones:

$$E = \sum E_i$$

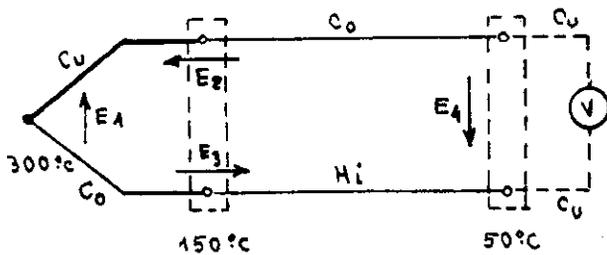
La magnitud de cada f.e.m. dependerá de los metales que se combinan y de la temperatura de cada unión. El signo puede ser determinado a partir de la siguiente serie termoeléctrica:

CROMEL - HIERRO - COBRE - ALUMEL - CONSTANTAN

(+) <-----> (-)

que se obtiene por análisis de los valores relativos de f.e.m. de las diferentes combinaciones presentadas en la tabla 3.2, para una misma temperatura.

Ejemplo 3.8 Obtener la lectura del voltímetro para los valores de temperatura indicados en la siguiente figura:



Considerando que todos los metales utilizados para conectar el voltímetro están a la misma temperatura:

$$E = -E_3 + E_1 - E_2 + E_4$$

$$= -J150 + T300 - T150 + X50$$

Los valores de E1, E2, E3, E4 se obtienen de la tabla 3.2:

$$E = -8.01 + 14.86 - 6.70 + 2.59 = 2.74 \text{ mV}$$

Puede observarse que al obtener el valor de E para cada tipo de unión, no es necesario considerar una temperatura de referencia, ya que al final los valores de mV correspondientes a ésta se eliminan entre sí.

Ejemplo 3.9 Si se construye una termocupla tipo X de Cobre-Alumel cuál será el valor de E si la junta caliente está a 200°C y la junta fría a 50°C ?

Utilizando la serie termoeléctrica, podemos obtener:

$$X(200) = K(200) - E(200) + T(200)$$

$$= 8.14 - 13.42 + 9.29 = 4.01 \text{ mV}$$

$$X(50) = K(50) - E(50) + T(50)$$

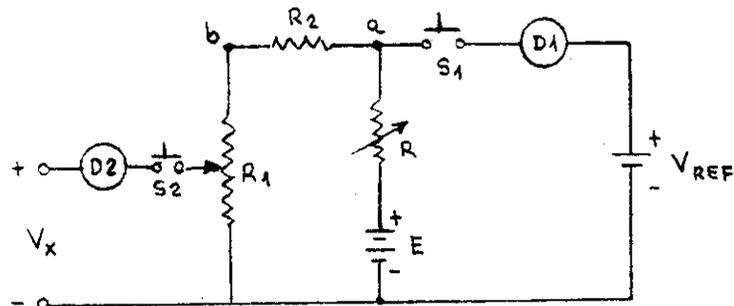
$$= 2.02 - 3.05 + 2.04 = 1.01 \text{ mV}$$

$$X(200, 50) = 4.01 - 1.01 = 3.0 \text{ mV}$$

CIRCUITOS TRANSMISORES PARA TERMOCUPLAS:

Uno de los aspectos más delicados en el uso práctico de las termocuplas se relaciona con la medición de la E, ya que deben utilizarse técnicas especiales para evitar las señales de ruido, muy frecuentes en las plantas industriales. Para reducir el nivel de ruido se utilizan cables de extensión trenzados y cubiertos con una pantalla metálica que debe ser conectada a tierra. Generalmente la junta caliente también es conectada a tierra a través del pozo térmico que sirve como protección a la termocupla.

Para la medición de la f.e.m. se pueden utilizar instrumentos digitales o analógicos de lectura directa o circuitos potenciométricos de lectura indirecta, acompañados de amplificadores para aumentar la magnitud de la señal detectada. Por muchos años el potenciómetro fué el equipo preferido por su precisión y alta impedancia de entrada y continúa aplicándose más como circuito transmisor que como elemento de medición.



Básicamente se trata de un divisor de voltaje, que mide un voltaje desconocido, por comparación con otro de referencia. La calibración del potenciómetro consiste en cerrar S1 y ajustar simultáneamente R hasta que la lectura de D1 sea cero. Ajustando la posición de R1 se puede conseguir que para un voltaje desconocido, la lectura de D2 sea cero. Para esta condición:

$$V_x = \alpha * R1 * V_{REF} / (R1 + R2)$$

donde α es un fracción conocida de R1, generalmente en divisiones hasta de 1.000 unidades.

Ejemplo 3.10 El circuito potenciométrico anterior tiene R1 = 1K con 1.000 divisiones, R2 = 2.5 K Ω y un voltaje de referencia de 1.00329V. Calcular el voltaje Vx si el balance se logra con 225 divisiones.

$$V_x = (225/1000) * 1.0 * 1.00329 / (1.0 + 2.5) = 0.0645 \text{ V}$$

DETECTORES TERMICOS DE EXPANSION:

Consideraremos dentro de este grupo a un conjunto de detectores térmicos que funcionan por la expansión de un material:

- Expansión de metales (DTM)
- Expansión de gases (DTG)
- Expansión de vapor (DTV)
- Expansión de líquidos (DTL)

Un DTM se basa en el principio de dilatación de los metales por efecto de la temperatura:

$$L = L_0 * (1 + \gamma * \Delta T)$$

donde:

- L_0 - longitud a una temperatura de referencia T_0
- $T = T - T_0$
- γ - Coeficiente lineal de expansión térmica:

Aluminio.....	25.0×10^{-6}	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Cobre.....	16.6×10^{-6}	"
Acero.....	6.7×10^{-6}	"

Se construyen mediante laminación de dos metales con diferentes coeficientes de dilatación.



La forma de construcción cambia de acuerdo con la función que deben cumplir:

- Láminas rectas..... Para accionar contactos eléctricos
- En espiral..... Para compensar temperatura ambiente en termómetros de bulbo.
- Forma helicoidal..... Para termómetros de lectura directa

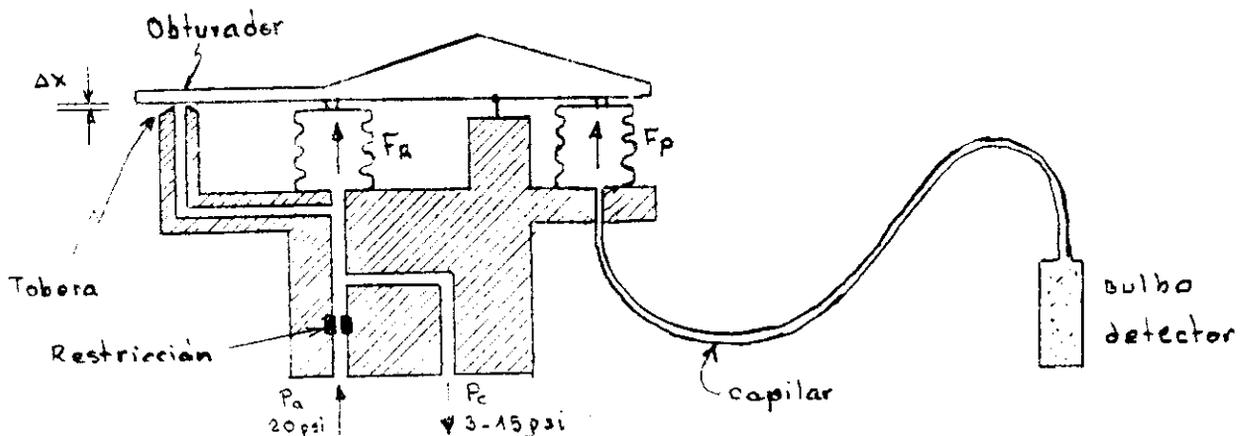
Los DTG se basan en la ley fundamental de los gases:

$$P \times V = R \times T$$

donde T se expresa en unidades absolutas. Si el gas contenido en un recipiente de volumen constante es sometido a cambios de temperatura, la nueva temperatura de trabajo viene dada por:

$$T = T_0 \times (P/P_0)$$

siendo T_0 y P_0 valores de referencia. Se utilizan generalmente en combinación con TRANSDUCTORES NEUMATICOS, para ejercer funciones de control en procesos industriales.



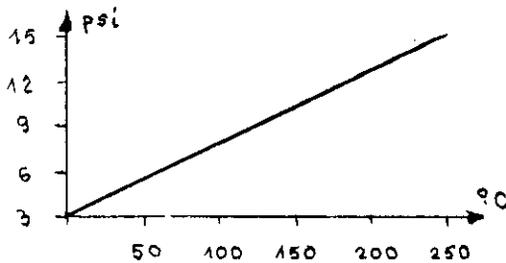
donde:

F_p : Fuerza ejercida por el fuelle primario, en función de la temperatura (presión) de trabajo del gas.

F_R : Fuerza de balance o de realimentación originada por la presión P_a de alimentación del aire.

P_c : Presión de control acondicionada entre 3 y 15 psi.

La presión sobre el fuelle de realimentación está determinada por la separación Δx entre la tobera y el obturador (Ver 3.3 Transductores de presión).



Para los puntos de calibración

Δx - mínimo..... 15 psi

Δx - máximo..... 3 psi

Al aumentar T , F_p aumenta, Δx disminuye, P_c aumenta, haciendo que F_R aumente hasta lograr un valor de Δx que mantenga la posición de equilibrio.

Utilizando el mismo principio se construyen los llamados TERMOMETROS DE BULBO Y CAPILAR, que utilizan gases tales como Helio y Nitrógeno y son utilidad práctica en los sistemas neumáticos.

Ejemplo 3.11 Un cierto gas tiene una presión de 120psi a una temperatura de 20°C. Asumiendo volumen constante, cuál será la presión a 100°C ?

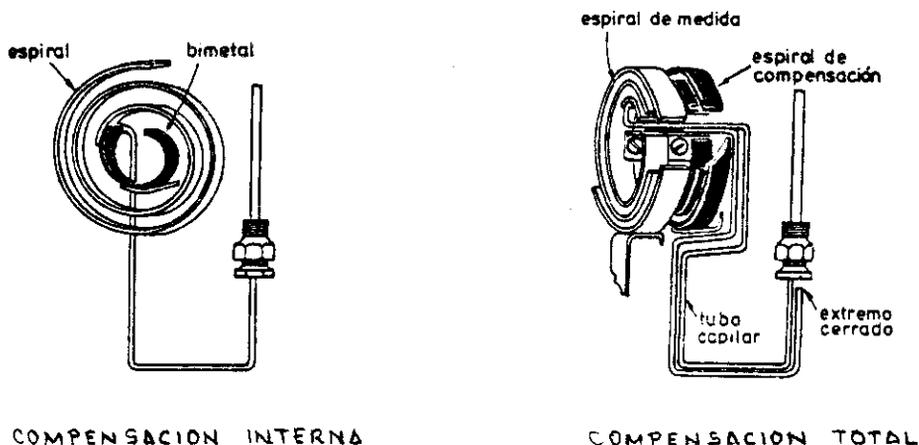
$$T_0 = 20 + 273.2 = 293.2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$P_0 = 120 \text{ psi}$$

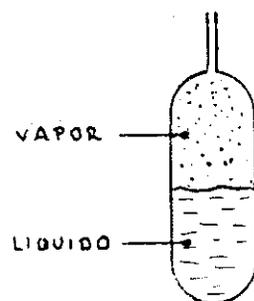
$$T = 100 + 273.2 = 373.2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$P = 120 \times (373.2/293.2) = 152.7 \text{ psi}$$

En algunas aplicaciones, los DTG utilizan como elemento transductor el TUBO BURDON (Ver 3.3), que convierte un cambio de presión en un desplazamiento, para producir indicación o registro directo de los cambios de temperatura.



Los DTV convierten una información de temperatura en un cambio de presión como los DTG, pero funcionan por un proceso diferente. Si un recipiente cerrado se llena parcialmente con un líquido, en la parte superior se formará vapor del mismo líquido, a una presión que depende de la temperatura. Un aumento en T aumenta la formación de vapor y por lo tanto la presión. Una reducción en T origina condensación del vapor y por lo tanto se disminuye la presión. La relación Temperatura v/s Presión no es una ecuación simple como en los DTG; se utilizan curvas características para cada tipo de material.

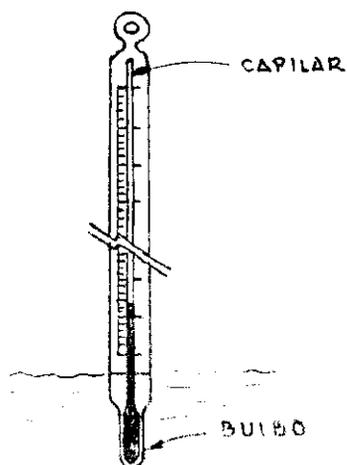


Los líquidos más utilizados para la construcción de los detectores térmicos de vapor son: METHYL-CLORO, FREON, ALCOHOL y ETER.

Los DTL se basan en un principio similar al de los metales, en los que se presenta un aumento en el volumen con el incremento de la temperatura:

$$V = V_0 * (1 + \beta \cdot \Delta T)$$

donde β es el coeficiente de expansión térmica del líquido. No se utilizan como detectores en el control de procesos, limitándose su aplicación a los TERMOMETROS DE VIDRIO. Los líquidos generalmente utilizados son MERCURIO (-35°C a 280°C, $\beta = 0.00018/^\circ\text{C}$) y ALCOHOL COLOREADO (-110°C a 50°C, $\beta = 0.00143/^\circ\text{C}$).



En un termómetro de vidrio deben identificarse dos partes fundamentales: El BULBO que es el depósito que contiene el líquido y el CAPILAR que es un tubo muy fino a través del cual se expande o contrae el volumen del líquido, al cambiar la temperatura del bulbo. El instrumento se calibra en base a los cambios de volumen en el bulbo; los cambios en la temperatura del capilar son causa de error en la medición. Este aspecto es importante en especial cuando se trata de termómetros de inmersión.

Es defecto más resaltante en los termómetros de mercurio se conoce como la DEPRECIACION DEL CERO; si se calienta un termómetro y se enfría bruscamente, puede suceder que la indicación del cero esté un poco por debajo de su valor inicial, requiriendo varias horas para su recuperación.

En general, los detectores térmicos de expansión tienen la desventaja de ser muy lentos en comparación con el tiempo de respuesta de los detectores eléctricos. Sin embargo son más sencillos y económicos, prefiriéndose como instrumentos de medición.

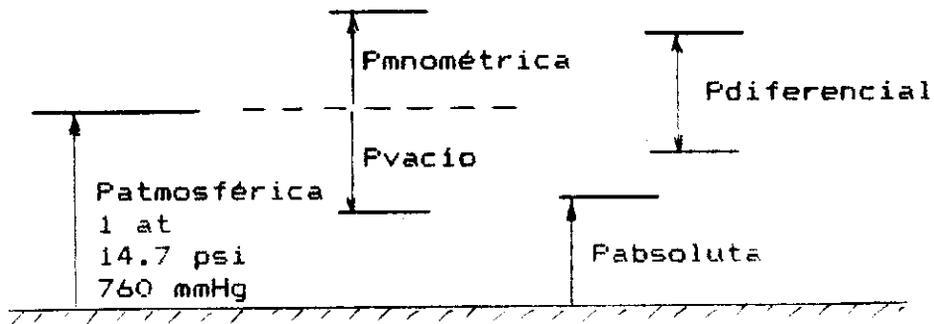
3.3 TRANSDUCTORES DE PRESION

EL control y medición de la presión de fluidos (gases y líquidos) es muy frecuente en los procesos industriales. Las diferentes aplicaciones, condiciones, rangos y tipos de fluidos para los cuales la presión debe ser controlada, ha originado una gran variedad en el diseño de este tipo de transductores.

CONCEPTOS GENERALES:

La presión se define como la fuerza por unidad de área ejercida por un fluido sobre el recipiente en el que se encuentra. Cuando el fluido es un gas, se ejerce uniformemente en todas las paredes del recipiente. Si se trata de un líquido, es máxima en el fondo y mínima en la parte superior del recipiente. Si el fluido está en movimiento debe considerarse su *presión dinámica*. Si está en reposo, se identifica como *presión estática*.

Una medición de presión puede referirse a valores absolutos o valores relativos. Los términos más utilizados en las aplicaciones prácticas son:



Las unidades de presión más comunes son:

Sistema internacional....N/m² o Pascal (Pa)

Sistema práctico.....Lb/pulg² o psi

Kg/cm²

Atmósfera o at = 1.033 Kg/cm²

Bar = 1.02 Kg/cm²

mm de Hg o cm de agua

La *presión atmosférica* es la referencia para expresar las mediciones prácticas de presión. Cuando se mide una presión por encima de ésta, se reconoce como *presión manométrica*; si la medición está por debajo, se refiere como *presión de vacío*.

En la mayoría de las aplicaciones prácticas, la medición de presión relativa y en particular la PRESION MANOMETRICA es la que ofrece mayor interés, cuando se desea considerar el efecto de la presión en el comportamiento de fluidos en un control de

procesos. El instrumento más popular para la medición de esta presión es el MANOMETRO y su lectura es de la forma:

$$P_{man} = P_{abs} - P_0$$

donde: P_0 - Presión atmosférica
 P_{man} - presión manométrica o relativa
 P_{abs} - presión absoluta

Cuando se trata de líquidos, el término CABEZA DE PRESION se utiliza para describir la presión dentro de un tanque o en un tubo. Se refiere a la presión estática producida por el peso de líquido que se encuentra por encima del punto de medición:

$$P_e = w * h$$

donde: P_e - presión estática
 w - peso específico (γ *g)
 h - cabeza de presión

Ejemplo 3.12 Calcular la presión en el fondo de un tanque de agua si el nivel es de 2.0m.

Utilizando unidades internacionales:

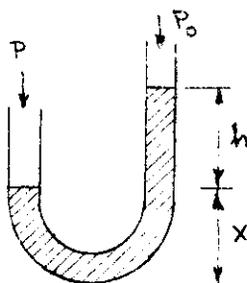
$$P_e = 1.000 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/sg}^2 * 2.0 \text{ m} = 19.620 \text{ Pa}$$

En unidades prácticas:

$$\begin{aligned} P_e &= 1.000 \text{ kg/m}^3 * 2.0 \text{ m} = 2.000 \text{ kg/m}^2 = 0.2 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 0.2 / 1.033 = 0.194 \text{ at} \\ &= 0.194 * 14.7 = 2.85 \text{ psi} \\ &= 19.620 * 10^{-5} = 0.196 \text{ Bar} \end{aligned}$$

MEDICION DE PRESION MANOMETRICA:

Uno de los dispositivos más populares para la medición de presión diferencial y manométrica es el manómetro en U, que se basa en comparar la presión estática que se ejerce sobre las dos columnas abiertas de un líquido, en un tubo en forma de U.



Columna izquierda.... $P + w * x$

Columna derecha..... $P_0 + w * (h + x)$

Igualando las presiones para el punto de equilibrio:

$$P - P_0 = w * h$$

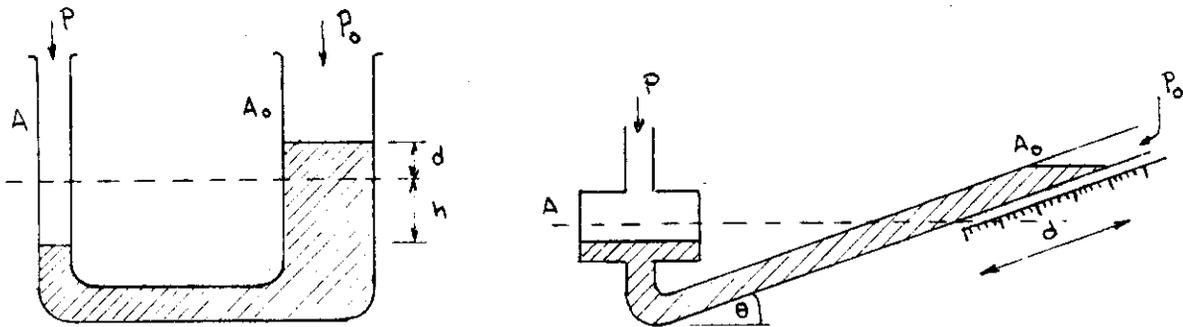
Los líquidos más utilizados son agua y aceite para rangos bajos, y mercurio para altas presiones. Para aumentar el rango de lectura, se aplican tubos con diseños especiales. Uno de estos consiste en utilizar secciones transversales diferentes para cada columna; tomando como referencia en nivel de cero, obtenemos:

$$P - P_0 = w \cdot (d + h)$$

Igualando los volúmenes desplazados en cada columna, obtenemos:

$$P - P_0 = w \cdot d \cdot (1 + A_0/A)$$

Seleccionando una relación adecuada entre A_0 y A , se puede aumentar el rango de medición de presión.

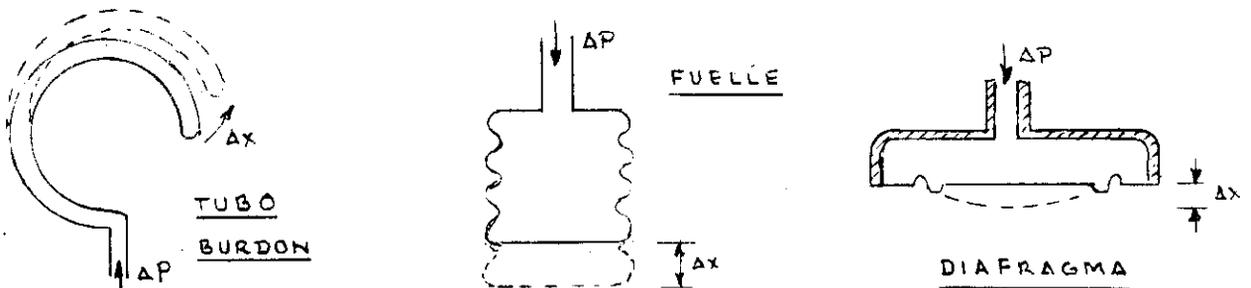


Otro diseño utiliza una columna inclinada, para aumentar la sensibilidad de su escala. En este caso se obtiene:

$$P - P_0 = w \cdot d \cdot (A_0/A + \text{sen}\theta)$$

TRANSDUCTORES DE PRESION MANOMETRICA:

Utilizan un elemento primario (detector) que convierte un cambio de presión en un desplazamiento; los más comunes son el TUBO BURDON, el FUELLE y el DIAFRAGMA:



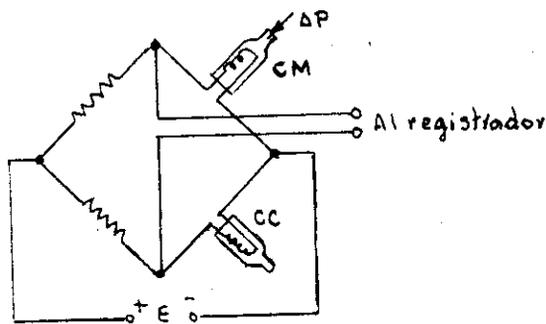
DETECTORES DE VACIO:

Para la medición de presiones inferiores a 1 at, se utilizan en general métodos electrónicos. Los más comunes son:

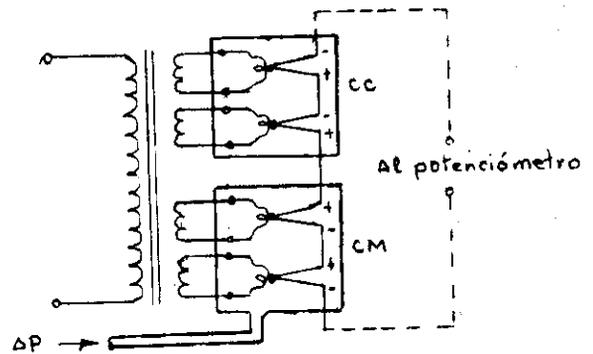
- Medidor de Pirani
- Medidor con termocuplas
- Medidor por ionización

Los dos primeros se aplican para mediciones hasta 10^{-3} at y se basan en determinar la rata de conducción y radiación de calor de un filamento dentro de un gas a baja presión. La pérdida de calor es proporcional al número de moléculas por unidad de volumen y para una corriente constante, la temperatura será una función de la presión del gas.

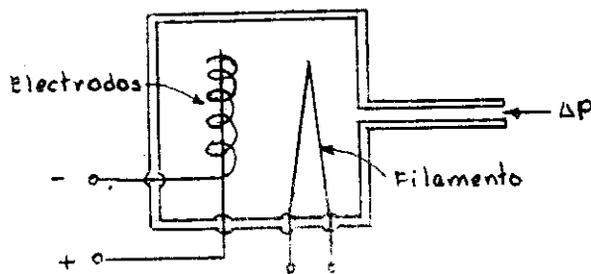
En el medidor PIRANI la temperatura del filamento se mide por los cambios de su resistencia, utilizando el mismo principio de los DTR. En el segundo caso, una termocupla en contacto directo con el filamento mide los cambios de temperatura.



MEDIDOR PIRANI



MEDIDOR CON TERMOCUPLAS



MEDIDOR DE EMISION ELECTRONICA

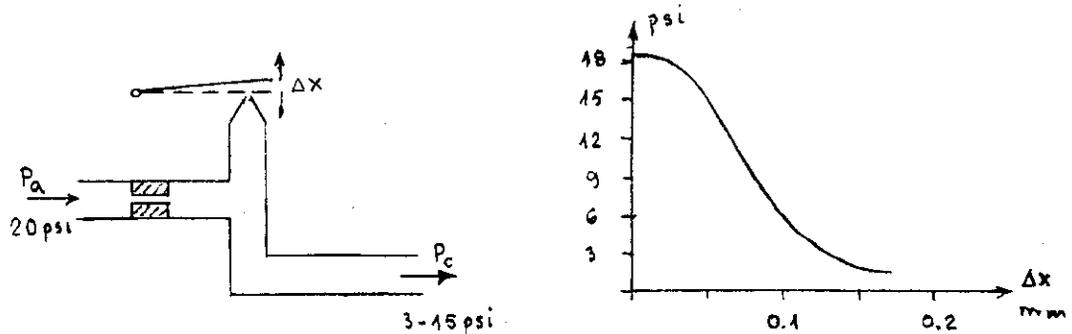
El tercer método se aplica para mediciones hasta 10^{-13} at. En este caso se mide el flujo de electrones que son liberados por un filamento, dentro de un gas a muy baja presión. El número de electrones por unidad de volumen depende de la presión del gas y por lo tanto, la corriente entre los dos electrodos será una medida de la presión.

DISPOSITIVOS TRANSMISORES:

Existe una gran variedad de dispositivos transmisores, que convierten el desplazamiento Δx en una señal eléctrica o neumática de control.

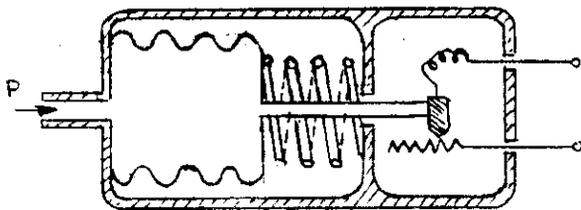
En los transmisores neumáticos, el elemento fundamental lo constituye el sistema TOBERA-OBTURADOR aplicado anteriormente en un sistema de medición de temperatura. Una presión de aire regulada y normalizada generalmente en 20 psi, se alimenta a través de un

tubo neumático, que tiene una salida reducida (0.25 a 0.50mm) en forma de tobera. La función del obturador es ajustar la cantidad de aire que puede escapar por la tobera, regulando de esta manera la presión de control, generalmente entre 3 psi para máxima separación y 15 psi para mínima separación.

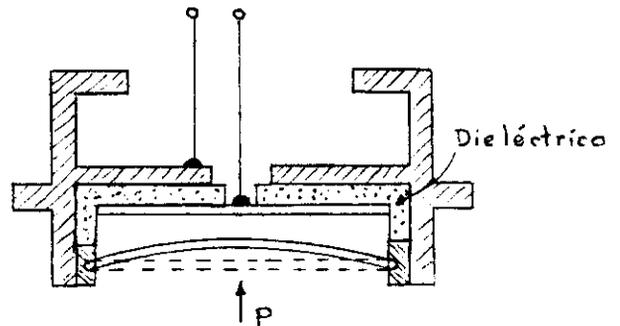


El sistema tobera-obturador se diseña para trabajar en la zona central de la gráfica, donde se logra la más alta sensibilidad.

Los transmisores eléctricos utilizan el desplazamiento Δx para modificar un valor de resistencia, inductancia o capacitancia conectados a un circuito convertidor, que entrega una corriente normalizada entre 4 a 20 mA.



TRANSDUCTOR LINEAL DE RESISTENCIA



TRANSDUCTOR DE CAPACITANCIA

Ejemplo 3.13 Asumir que para el modelo anterior el área efectiva del fuelle es 12.5 cm^2 , la constante del resorte 2 kg/cm y la del fuelle 0.5 kg/cm . Calcular la máxima presión en psi que puede ser medida, si el desplazamiento máximo del fuelle es de 4 cm .

$$K_{\text{equivalente}} = 2 + 0.5 = 2.5 \text{ kg/cm}$$

La fuerza necesaria para desplazar 4 cm :

$$F_R = 2.5 \times 4 = 10 \text{ kg}$$

Luego, la máxima presión será:

$$P = 10 / 12.5 = 0.8 \text{ kg/cm}^2 = 11.4 \text{ psi}$$

3.4 TRANSDUCTORES DE FLUJO

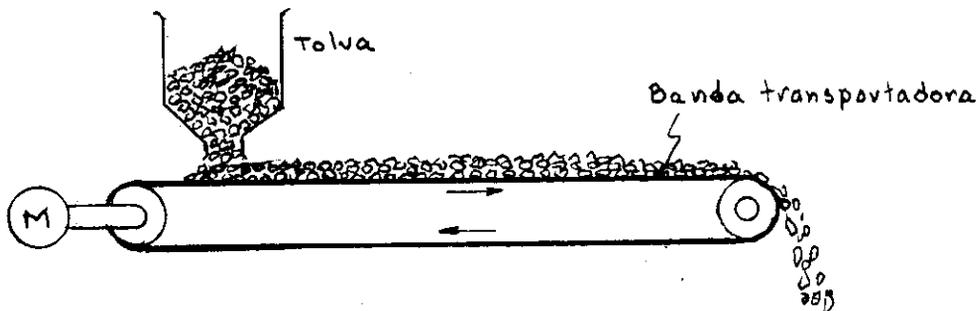
La medición y control de flujo puede decirse que constituye la parte esencial en los procesos industriales. La medición de flujo determina la cantidad de materiales distribuidos en el proceso de producción.

MEDICION DE FLUJO DE SOLIDOS:

Se aplica generalmente cuando se transporta material en pequeñas partículas a través de cintas transportadoras o cualquier otro dispositivo. En este caso el flujo se mide en términos de la masa o peso por unidad de tiempo que está siendo desplazada:

$$Q = W_L * V$$

donde: Q - Flujo de material
 W_L - Peso de material por unidad de longitud
 V - Velocidad de la banda transportadora



Ejemplo 3.14 Un sistema de transporte de carbón utiliza una cinta con una velocidad de 30m/min y una longitud efectiva de 15m. El peso medio total que puede ser almacenado en la cinta se estima en 30kg. Calcular el flujo de material desplazado por hora.

Aplicando la expresión anterior:

$$Q = (30/15) * 30 = 60 \text{ kg/min}$$

que equivale a 3.6 Ton/hora de material.

MEDICION DE FLUJO DE LIQUIDOS:

Las condiciones bajo las cuales se presenta el flujo y la gran variedad de materiales utilizados en la industria, hace imposible que puedan ser considerados todos los posibles métodos de medición de fluidos. Por otra parte, la Mecánica de los Fluidos da una idea de la gran variedad de problemas que pueden originarse cuando se estudia su comportamiento. Por lo tanto nos limitaremos a presentar las ideas básicas sobre medición de fluidos.

Las unidades que describen la medición de flujo pueden ser de diferente tipo, dependiendo de las especificaciones del proceso:

1. CAUDAL: Expresa el cambio en volumen por por unidad de tiempo: Lts/min, m³/h, gal/hora.

2. VELOCIDAD: Mide el desplazamiento del fluido por unidad de tiempo: m/min, pulg/sg. Se relaciona con el caudal:

$$V = Q/A$$

donde: Q - caudal o rata de volumen
A - sección transversal del ducto.

3. RATA DE MASA: Expresa la masa o peso por unidad de tiempo: kg/min, Ton/h, lb/min. Se relaciona con el caudal a través de:

$$M = \rho * Q$$

donde: ρ - densidad de masa o peso
Q - caudal o rata de volumen

Ejemplo 3.15 Calcular el caudal en lts/min y la rata de masa en kg/min de agua que es bombeada a través de una tubería de 2", con una velocidad de 0.8m/sg.

La rata de flujo o caudal sería:

$$Q = 3.1416 * (2 * 0.0254)^2 * 0.8 / 40 = 0.00162 \text{ m}^3/\text{sg} = 97.2 \text{ lt}/\text{min}$$

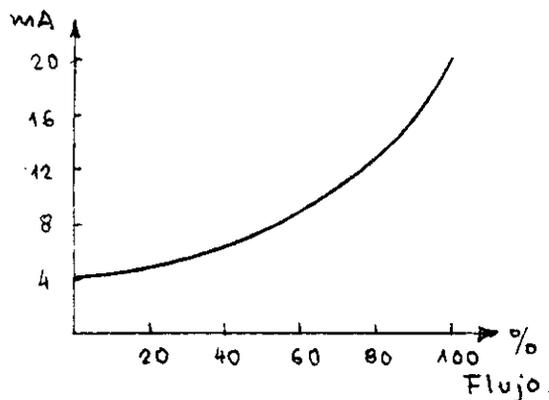
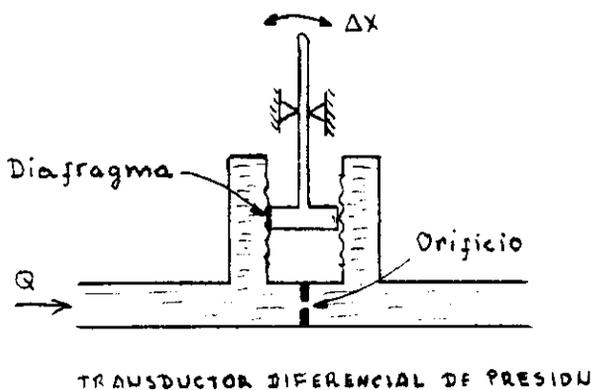
$$M = 1.000 * 0.00162 = 1.62 \text{ kg}/\text{sg} = 97.2 \text{ kg}/\text{min}$$

El flujo a través de una tubería es una función directa de la diferencia de presión entre los puntos de entrada y salida y se expresa en términos de la cabeza de presión (H) considerada anteriormente. Otros factores como viscosidad, tamaño y clase de tubería, y tipo de flujo (laminar o turbulento), influyen en su magnitud.

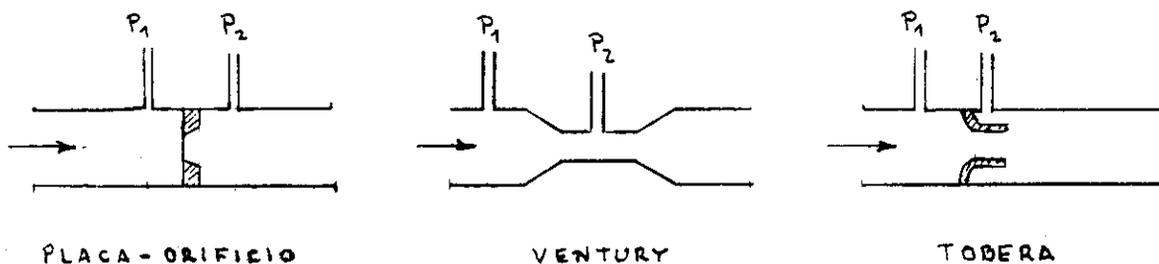
Los MEDIDORES DIFERENCIALES DE PRESION se basan en el principio de que una restricción produce una caída de presión (H) proporcional al cuadrado del flujo. De este modo, el flujo resulta:

$$Q = K\sqrt{H}$$

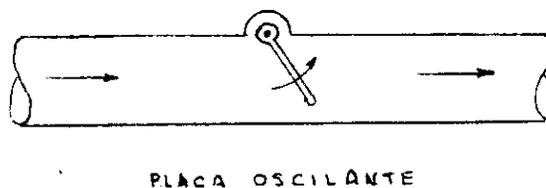
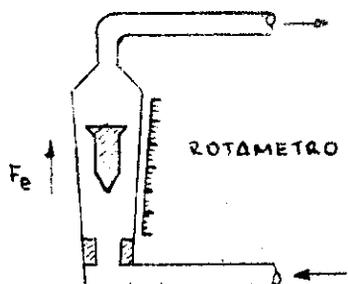
Para medir H se utiliza un transmisor diferencial de presión (TDP) que compara el valor de la presión aguas arriba y aguas abajo, mediante dos diafragmas. La diferencia de presión se traduce en un desplazamiento, que puede ser aplicado a un transductor neumático o electrónico para obtener señales acondicionadas de 3psi a 15psi o de 4mA a 20mA.



El valor de K toma en cuenta factores tales como tipo de restricción, tamaño de tubería, velocidad y tipo de flujo, temperatura y otros. La siguiente figura muestra los tres tipos más comunes de restricciones utilizadas en los TDP: Placa-orificio, Ventury y Tobera.

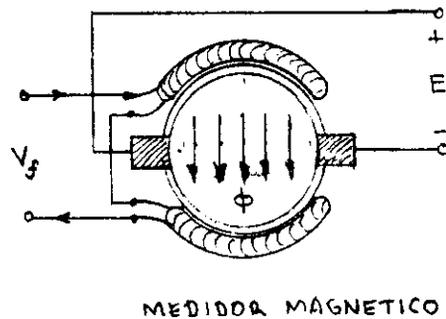
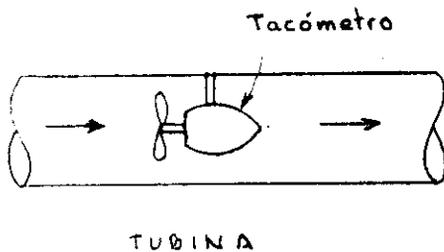


Otro tipo de transductor funciona por el efecto de una obstrucción colocada dentro del flujo a medir. El ROTAMETRO, utiliza un cuerpo flotante, cuya posición dentro de una columna cónica vertical es proporcional al caudal. La fuerza de levantamiento es producida por la diferencia de presión que existe sobre el flotante. El MEDIDOR DE PLACA OSCILANTE utiliza una placa sumergida que puede moverse de acuerdo con la velocidad del flujo. El ángulo de posición de la placa es una medida del flujo.



Otro modelo utiliza una TURBINA, que es impulsada por el flujo de agua. Un tacómetro acoplado a su eje puede suministrar una señal eléctrica que es función de la velocidad de rotación de la turbina y por lo tanto una medida del caudal.

El medidor MAGNETICO DE FLUJO funciona por el principio de que un

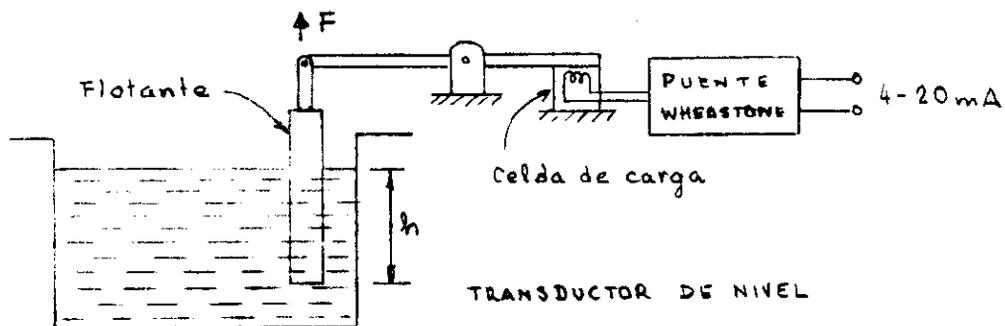


voltaje puede ser inducido, cuando un conductor se mueve dentro de un campo magnético. Un par de bobinas crean un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo del líquido, que debe ser conductor de electricidad. Dos electrodos son utilizados para detectar la f.e.m. inducida, que es proporcional a la velocidad y por lo tanto una medida flujo del líquido.

3.5 TRANSDUCTORES DE NIVEL

La medición de nivel de líquido almacenado en un recipiente, es otra de las variables comunes dentro de un control de procesos. La medición puede ser *directa*, por detección de la superficie del líquido, o *indirecta*, por detección de otra variable relacionada con el nivel.

El método directo incluye el uso de visores y flotantes con indicación externa del nivel; para el suministro de señales de control se prefieren los métodos indirectos, muchos de los cuales se basan en la relación que existe entre la presión estática y el nivel del líquido.



El TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO, mide la fuerza de empuje que es ejercida sobre un flotante parcialmente sumergido en el líquido. La fuerza sobre la palanca es dada por:

$$F = M \cdot g - \rho \cdot g \cdot A \cdot h$$

donde: M - masa del flotante
 ρ - densidad del líquido
 A - sección transversal del flotante
 h - longitud sumergida del flotante

Una celda de carga (strain-gage) junto con un puente de Wheastone se utilizan para convertir la fuerza F en una señal eléctrica.

Ejemplo 3.16 El transductor anterior usa un flotante de 2.0kg, 20 cm² se sección y 2.0m de longitud. Calcular el valor máximo y mínimo de F, asumiendo que el líquido es kerosén.

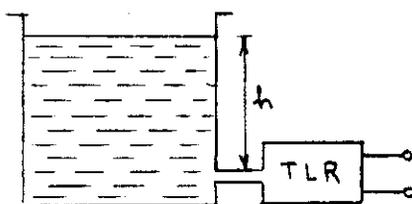
De las tablas de Física, la densidad media del kerosén es de 800 kg/m³. La fuerza sobre la palanca será:

$$F = 2 - 800 \cdot (20/10^4) \cdot h$$

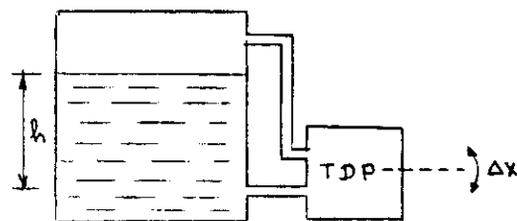
$$= 2 - 1.6 \cdot h$$

Sustituyendo h, el valor máximo de F es 2.0kg y el mínimo -1.2kg.

El TRANSDUCTOR DE PRESION ESTATICA utiliza la presión estática en un punto, para medir el nivel de un tanque descubierto. El transductor lineal de resistencia (TLR) estudiado anteriormente se utiliza junto con un puente de Wheastone para obtener una señal eléctrica entre 4mA y 20mA.



TANQUE ABIERTO



TANQUE CERRADO

Cuando el tanque es cerrado, la altura de líquido por encima del punto de medición es proporcional a la diferencia entre la presión estática y la presión en la superficie del líquido. En este caso se utiliza un TDP para medir esta diferencia de presión, que resulta proporcional al nivel del líquido.

Ejemplo 3.17 El TLR del Ejemplo 3.13 se instala a 50cm del fondo de un tanque de agua, para medir su nivel. Calcular el rango de nivel que puede ser medido.

Para una presión estática máxima de 0.8kg/cm², la altura es:

$$h = P/w = 0.8 \cdot 10^4 / 1.000 = 8 \text{ m}$$

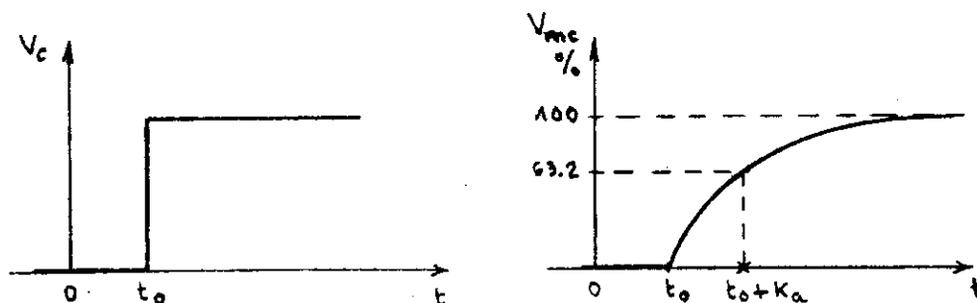
luego el rango de medición será entre 0.5m a 8m.

3.6 CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS DE MEDICION

En los sistemas de medición se pueden identificar dos parámetros fundamentales: PRECISION y VELOCIDAD DE RESPUESTA; la precisión en su lectura depende generalmente de la velocidad de respuesta del instrumento de medición.

VELOCIDAD DE RESPUESTA:

La mayoría de los sistemas de medición utilizados en el control de procesos, presentan una característica de respuesta similar a la que se muestra a continuación, ante un cambio instantáneo de la variable controlada:



La velocidad de respuesta se mide en términos del COEFICIENTE DE ATRASO (K_a), que se refiere como el tiempo necesario para alcanzar un 63.2% del cambio neto en la variable medida. Si la característica de respuesta corresponde a un sistema de primer orden, K_a es igual a la constante de tiempo.

La magnitud de K_a está determinada por:

- Tipo de variable controlada
- Tipo de señal de transmisión
- Componentes del medidor
- Tiempos de atraso

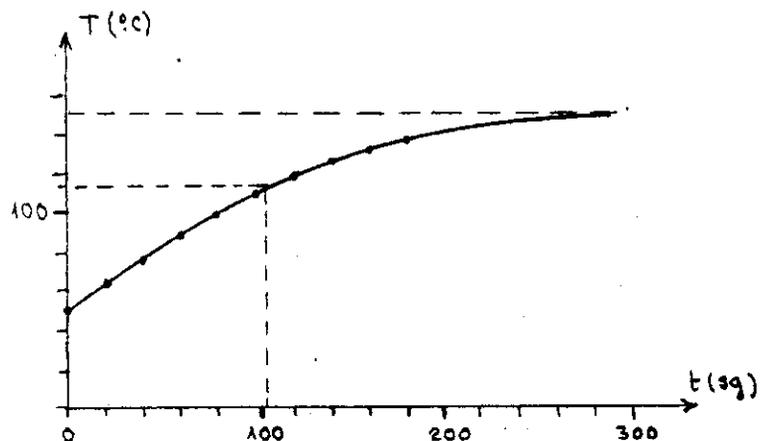
PRECISION:

Es una medida de los límites del error que se origina durante el funcionamiento del sistema de medición, en condiciones normales de uso. Generalmente se expresa en términos del ERROR ESTÁTICO, como un porcentaje del ALCANCE (Span) del rango de medición.

Ejemplo 3.16 Los siguientes datos fueron obtenidos con un termómetro para medir la temperatura de un líquido. Antes de iniciar la medición el termómetro registra una temperatura de 50°C y la lectura final es de 150°C . Obtener el coeficiente de atraso.

Rango de variación..... $150 - 50 = 100^\circ\text{C}$
Punto de referencia..... $0.632 \times 100 + 50 = 113.2^\circ\text{C}$
Coeficiente de atraso... $K_a = 10 \text{sg}$ (de la gráfica)

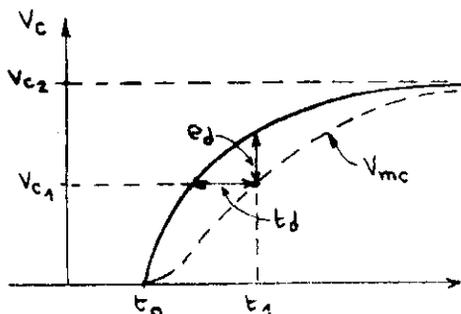
t (sg)	T (°C)
0	50
20	64
40	79
60	92
80	104
100	112
120	120
140	125
160	130
180	133
500	150



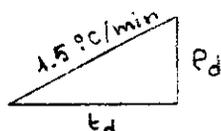
Ejemplo 3.19 El rango de medición de un manómetro es de 50 a 500 psi, con una precisión de $\pm 0.5\%$. Calcular la lectura real, si la indicación del instrumento es de 200psi.

Alcance de medición..... $500 - 50 = 450\text{psi}$
 Error..... $0.005 \times 450 = 2.25\text{psi}$
 Lectura real..... $450 \pm 2.25\text{ psi}$

Cuando la variable a medir se encuentra en movimiento, la velocidad de respuesta del sistema de medición da origen a un error adicional, identificado como el ERROR DINAMICO. La velocidad de respuesta produce un atraso entre el valor medido y el valor real, que se identifica como ATRASO DINAMICO. Puede observarse que este error no es constante y se reduce a cero cuando la variable deja de cambiar.



Ejemplo 3.20 Un DTR se utiliza para medir la temperatura de un líquido, la cual aumenta a una rata constante de $1.5^\circ\text{C}/\text{min}$, desde 25 hasta 15°C . Si el atraso dinámico se estima en 2.0min, calcular el error dinámico en %.



Error dinámico... $1.5 \times 2 = 3^\circ\text{C}$

$Ed(\%) = 3 \times 100 / (150 - 25) = 2.4\%$

Otros parámetros que evalúan la calidad del sistema de medición y su deficiencia son:

ZONA MUERTA: Rango de valores de la variable medida que no originan respuesta en el sistema de medición. Se expresa como un % del alcance del rango de medición.

SENSIBILIDAD: Relación entre un cambio en la lectura, respecto al cambio en la variable medida. Se expresa como un % del alcance.

HISTERESIS: Diferencia máxima que se observa en los valores indicados, cuando la variable medida se hace cambiar en todo su rango, en los dos sentidos. Se expresa como un % del alcance.

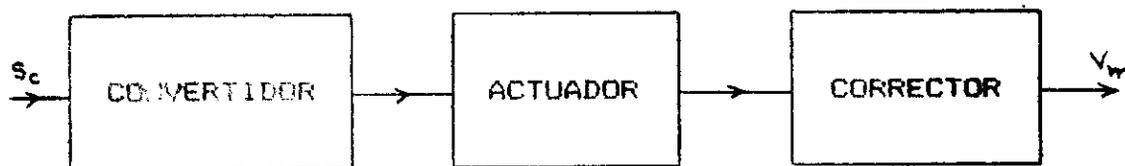
3.7 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

Las señales de medición y control utilizadas para efectuar los ajustes y correcciones necesarias sobre la variable del proceso, son generalmente de bajo nivel de energía. Sin embargo, en la etapa final de control, pueden manipularse grandes volúmenes de energía, tal como en el caso de la regulación de miles de m³ de líquidos en la industria petrolera o de cientos de toneladas de fuerza en las plantas procesadoras de metales.

La selección de los componentes de la etapa final de control es extremadamente delicada, por su influencia directa sobre el proceso, y solo puede conseguirse después de un estudio detallado de los diferentes mecanismos involucrados en el proceso.

COMPONENTES DE LA ETAPA FINAL DE CONTROL:

Las operaciones finales de control implican una serie de pasos, para convertir la señal de control en una acción que consiga modificar la variable del proceso. Las operaciones específicas varían considerablemente de acuerdo con el diseño del sistema; sin embargo, para un caso típico de control de procesos, podemos generalizar el problema, considerando tres etapas fundamentales:



El **CONVERTIDOR** se encarga de modificar la señal de control para garantizar el propósito final de la acción de control; en esta etapa se requiere generalmente del uso de transductores para lograr el tipo adecuado de señal, exigida por los componentes del actuador.

El **ACTUADOR** es un componente asociado directamente con el tipo de elemento final de control; su función es la de transformar la

señal de control convertida, en un acción física sobre el elemento de control. El uso de amplificadores eléctricos o neumáticos permite lograr el nivel adecuado de la señal de accionamiento.

El CORRECTOR es el componente encargado de originar los cambios sobre la variable manipulada del proceso, para lograr los ajustes en la variable controlada. Es un elemento que está en contacto directo con el proceso y forma parte integral de este.

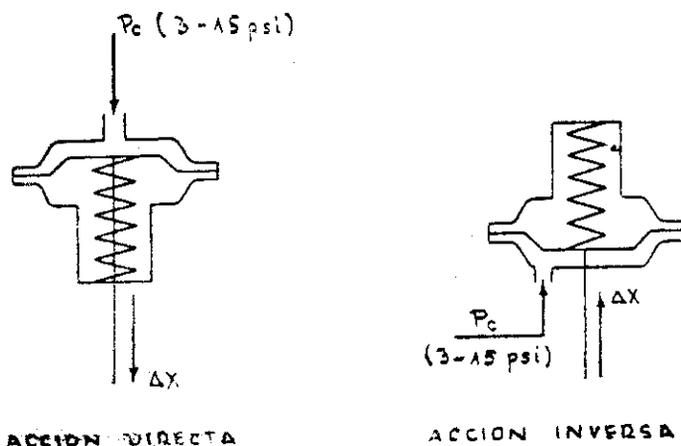
Estas tres etapas de control, pueden conseguirse en uno o varios componentes, de acuerdo con el diseño específico del control de procesos.

ACTUADORES ELECTRICOS:

Estos elementos transforman una señal eléctrica en un movimiento; un SOLENOIDE produce un desplazamiento lineal, mientras que un SERVOMOTOR origina un movimiento giratorio. Generalmente se utilizan para el accionamiento de válvulas de control de flujo. Las FUENTES CONTROLADAS DE POTENCIA, son un caso típico de actuadores eléctricos, cuando se utilizan en los controles de temperatura, junto con resistencias de calefacción.

ACTUADORES NEUMATICOS:

Traducen una señal neumática en una fuerza o un torque, de magnitud suficiente para manipular el elemento de control. Un caso típico son los actuadores de válvulas neumáticas de control, que utilizan el diafragma como elemento transductor:



En estos actuadores neumáticos puede conseguirse ACCION DIRECTA o ACCION INVERSA de acuerdo con el movimiento del vástago de la válvula, cuando aumenta la señal de aire de control.

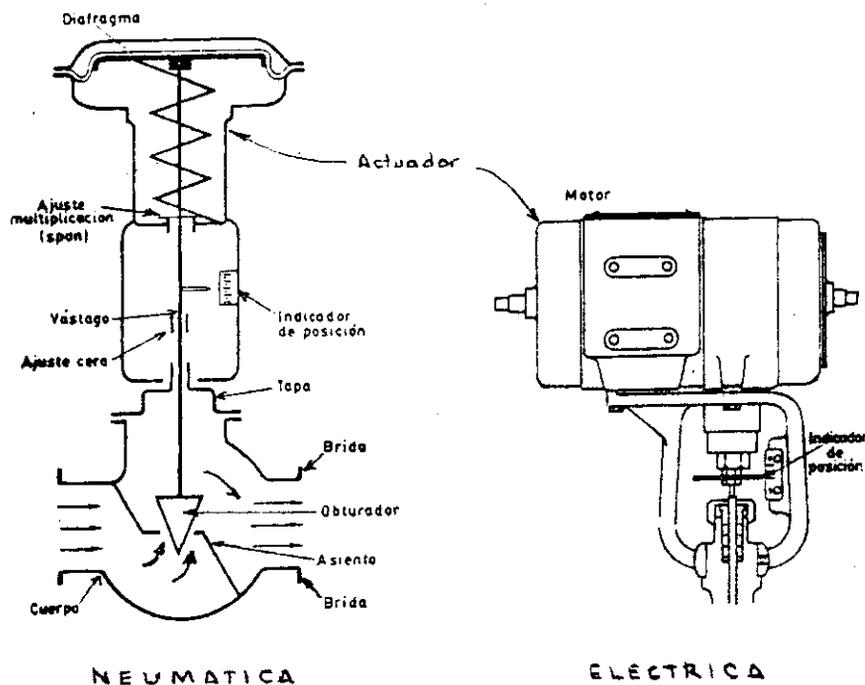
Ejemplo 3.24 Calcular el desplazamiento máximo en cm de un actuador neumático que utiliza un diafragma de 50cm^2 , con un resorte cuya constante es de $3,6\text{kg/cm}$. La señal de aire de control cambia entre 3 a 15psi.

Fuerza sobre el diafragma..... $12 \times 50 \times 1,033 / 14,7 = 42,2 \text{kg}$

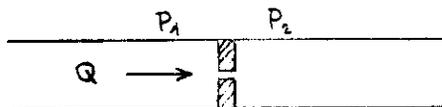
Desplazamiento máximo..... $42,2 / 3,6 = 11,7 \text{cm}$

VALVULAS DE CONTROL:

Es uno de los elementos correctores utilizados con mucha frecuencia para el control de diferentes tipos de variables, dentro de un control de procesos. El tipo de actuador identifica su denominación comercial: VALVULAS SOLENOIDE, VALVULAS NEUMATICAS o VALVULAS MOTORIZADAS.



Su principio de funcionamiento se basa en la relación que existe entre el flujo (Q) y la caída de presión (P) en un fluido; la válvula modifica el flujo, cambiando la presión en el punto de entrada de la válvula, al introducir una restricción en el sistema:



$$\Delta P \sim Q^2$$

$$Q = K \sqrt{\Delta P}$$

La constante K depende del tamaño de la válvula y del tipo de fluido que se desea regular. Para establecer la relación anterior y facilitar la selección de la válvula, se utiliza el COEFICIENTE DE VALVULA, C_v o K_v de acuerdo el sistema práctico de unidades que se aplique:

C_v - Caudal de agua en galones-USA/min, a través de una válvula totalmente abierta, con una pérdida de presión de 1psi.

K_v - Caudal de agua en m^3/h , a través de una válvula totalmente abierta, con una pérdida de presión de $1kg/cm^2$.

$$C_v = 1,17 * K_v$$

$$K_v = 0,86 * C_v$$

TABLA 10.1 - VALORES TÍPICOS DE C_v SEGUN TAMAÑO DE VALVULA

1/4"	0,3	3"	108
1/2"	3	4"	174
1"	14	6"	400
1-1/2"	35	8"	725
2"	55	10"	1.100

Las relaciones prácticas que se aplican en la selección de estas válvulas son:

Líquidos..... $Q_L = C_v * \sqrt{(P_1 - P_2) / \rho_e}$

Gases..... $Q_G = 960 * C_v * \sqrt{(P_1 - P_2) * (P_1 + P_2) / (T + 460) * \rho_e}$

donde: P_1, P_2 presión en psi, aguas arriba y abajo
 ρ_e gravedad específica del fluido (respecto del agua o del aire)
 T temperatura del gas en °F
 Q_L caudal en galones/min
 Q_G flujo en pies³/hora

Ejemplo 3.22 Seleccionar el tamaño de una válvula de control requerida para regular el flujo de Kerosene, si el máximo flujo es de 300galones/min, para una pérdida de 60psi. Asumir un factor de seguridad de 25%.

$$\rho_e = 800 / 1.000 = 0,8$$

$$C_v = 300 * 1,25 / \sqrt{(60 / 0,8)} = 43,3 \text{ (mínimo)}$$

De acuerdo con la Tabla 10.1 se requiere como mínimo una válvula de 2"

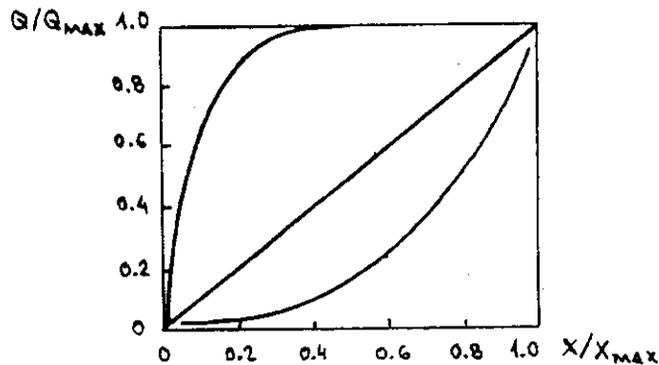
Ejemplo 3.23 Seleccionar el tamaño de una válvula de control para regular el flujo de un gas cuya gravedad específica es de 0,85 si el máximo flujo en condiciones normales (14.7psi-60°F) es de 20.000pies³/hora. La presiones de entrada y salida son 90psi y 70psi respectivamente, para una temperatura de trabajo del gas de 500°F. Asumir un factor de seguridad de 25%.

$$C_v = 1,25 * 20.000 / (960 * \sqrt{3,92}) = 13,15 \text{ (mínimo)}$$

que según la Tabla 10.1 se puede lograr con una válvula de 1"

CARACTERISIRICAS DE VALVULAS DE CONTROL:

Los diferentes tipos de válvulas de control se pueden clasificar de acuerdo la característica que presenta la relación entre el flujo a través de la válvula y la posición de su vástago. Se distinguen así tres tipos de válvulas:



- Válvulas de apertura rápida
- Válvulas lineales
- Válvulas isoporcentuales

Cada una de estas características se consiguen con un diseño específico del obturador de la válvula.

La válvula de APERTURA RAPIDA permite un cambio grande en el flujo, para un cambio pequeño en la posición de su vástago. Se utilizan generalmente para control ON-OFF.

La válvula LINEAL, se utiliza en sistemas donde la caída de presión total, es prácticamente determinada por la válvula. Esta característica se describe por la siguiente relación:

$$Q/Q_{MAX} = X/X_{MAX}$$

donde Q representa el caudal a través de la válvula, para una posición X del vástago de la válvula. Los valores de Q_{MAX} Y X_{MAX} , son suministrados por el fabricante.

La VALVULA ISOPORCENTUAL permite un cambio porcentual de flujo constante, para un mismo cambio en la posición de la válvula. Se diseñan para operar entre un mínimo y un máximo de flujo, valores que definen el FACTOR DE RANGO (Rangeability):

$$R = Q_{MAX}/Q_{MIN}$$

La mayoría de las válvulas de control presentan un FACTOR DE RANGO entre 30 y 50. Para un cambio pequeño en la posición de la válvula se cumple que:

$$\Delta Q/Q = K * (\Delta X/X_{MAX})$$

El valor de K depende del valor de R (diferente curva) y de la magnitud del cambio en la posición de la válvula. P.ej. para una curva con $R=50$ y $\Delta X=1\%$ el valor de K es 4%. Lo cual significa que un ajuste de 1% en la válvula origina un cambio de 4% en el flujo entregado por la válvula.

La curva característica es exponencial y puede representarse por la siguiente relación:

$$Q = Q_{MIN} * R^A$$

donde $A=X/X_{max}$ es el FACTOR DE APERTURA.

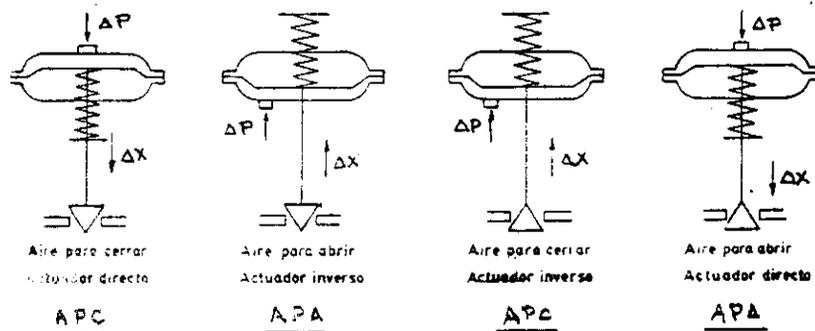
Ejemplo 3.24 Una válvula isoporcentual tiene un flujo máximo de 500 lts/min y un mínimo de 20 lts/min. Si el desplazamiento máximo es de 5 cm, calcular el flujo para una apertura de 1 cm.

Factor de rango..... $R = 500/20 = 25$

Factor de apertura.. $A = 1/5 = 0,2$

Flujo..... $Q = 20*(25)^{0,2} = 38.1$ lts/min

Según el tipo de acción, las válvulas de control se identifican como válvulas de ACCION PARA CERRAR (APC) y de ACCION PARA ABRIR (APA). Lo anterior significa que al aumentar la señal de control, la válvula APC cierra, mientras que la válvula APA abre.



De la gráfica anterior, se observa que existen dos formas posibles, para lograr cada uno de los dos tipos de acción, según el tipo de actuador que se utiliza y el diseño adecuado del obturador.

B I B L I O G R A F I A

1. Robert Bateson - INTRODUCTION TO CONTROL SYSTEM TECHNOLOGY
C.E. Merrill Publishing Company
Columbus, Ohio - 1.979
2. Antonio Creus S - INSTRUMENTACION INDUSTRIAL
Publicaciones Marcombo S.A.
México - Barcelona - 1.981
3. Antonio Creus S - INSTRUMENTOS INDUSTRIALES
Publicaciones Marcombo S.A.
México - Barcelona - 1.982
4. Curtis D. Johnson - PROCESS CONTROL INSTRUMENTATION TECHNOLOGY
John Wiley & Sons
New York - 1.982
5. J.T. Miller - INDUSTRIAL INSTRUMENT TECHNOLOGY
United Trade Press Ltd.
London - 1.975