



### Unidad 9 - INSTRUMENTACION DE TEMPERATURA Y NIVEL:

Subunidad A: Instrumentos de temperatura, particularidades en su medición y transmisión en un lazo de control realimentado, incidencia en el comportamiento del mismo.

La temperatura ha sido estudiada desde muy temprano por la ciencia y la tecnología, pues tiene un rol muy importante en muchísimos fenómenos naturales, que afectan a fenómenos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, esto no significa que su naturaleza sea universalmente bien comprendida, ni que su medición sea sencilla y correctamente practicada.

El sensado industrial de la temperatura requiere relacionar los cambios producidos en un elemento u objeto, con los cambios de cantidad de calor contenido en el mismo.

Algunas de las formas en que la temperatura puede ser inferida por los cambios que provoca son:

1. – Cambios de volumen
2. – Cambios de presión
3. – Cambios de densidad
4. – Cambios de viscosidad
5. – Tensión generada en la junta de 2 metales diferentes
6. – Cambios de resistencia eléctrica
7. – Intensidad de radiación total emitida
8. – Otros

Cualquiera de estos principios puede ser usado, y en la práctica son usados, para medir temperatura, pero un termómetro debe ser algo más que un elemento que responda a cambios de temperatura. Debe ser diseñado para la función, debe estar instalado en el lugar adecuado, y no debe alterar de ninguna manera el proceso que está midiendo.

La salida del sensor debe ser medible, de fácil interpretación, tan simple como sea posible, al mismo tiempo robusto y tan sensible como la aplicación lo requiera. Todos estos requerimientos ponen restricciones en el diseño del sensor y el instrumento de medición cuando es necesario.

El rango de temperaturas a medir en las distintas aplicaciones va desde  $0,65\text{ }^{\circ}\text{K}$  hasta los  $10.000\text{ }^{\circ}\text{K}$ , y este es un rango muy amplio que no puede ser abarcado por un solo sensor. Por lo tanto, una de las restricciones de los sensores de temperatura es el rango en el cual pueden medir con exactitud aceptable.

En nuestro caso nos limitaremos a los transductores o sensores que generan una tensión en la junta de dos metales diferentes (termocuplas o termopares) y en los basados en los cambios de resistencia eléctrica (RTD), ambos proveen una señal primaria de salida fácilmente procesada por un transmisor asociado constituido por una electrónica

analógica o digital, el cual brinda una señal de salida normalizada, por ejemplo de corriente en el rango de 4- 20 mA y en correspondencia con el rango de la temperatura medida y con la finalidad de ser transmitida a Sala de Control para su control o simple indicación.

En este campo, valen las mismas consideraciones que las expuestas en el Tema 8, Subunidad A.

## Subunidad B: Termocuplas

En un circuito cerrado formado por dos metales diferentes, se establecerá una corriente eléctrica si las dos uniones se mantienen a distinta temperatura (Figura 9.B.1). Este fenómeno, descubierto por Seebeck en 1821, es la base del método de medición de temperatura por medio de termocuplas o termopares.

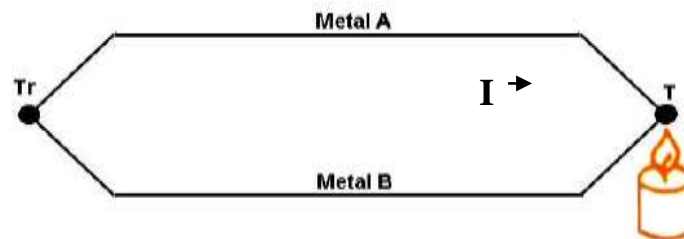


Figura 9.B.1

La aparición de la corriente en el circuito mencionado, es causada por la superposición de dos efectos termoeléctricos: el efecto Peltier y el efecto Thomson.

Efecto Peltier: los trabajos de Peltier sobre este tema datan de 1834, para nuestros fines podemos enunciar sus conclusiones de la siguiente manera: “cuando se unen dos metales diferentes, aparece una fuerza electromotriz (fem), la cual depende de la temperatura de la junta de los metales puestos en contacto, y es independiente de la forma y dimensión de los mismos”. Figura 9.B.2.

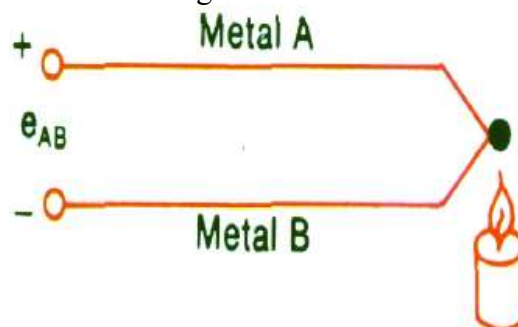


Figura 9.B.2

3. – Efecto Thomson: en 1851, W. Thomson (luego Lord Kelvin) llega a la conclusión de que el fenómeno observado por Seebeck no depende solo del efecto Peltier y en 1854 logra demostrar lo que luego se conocería como efecto Thomson: “si a lo largo de un conductor homogéneo, se crea un gradiente de temperatura, aparece una fem entre sus

extremos, que depende del metal del conductor y el gradiente de temperatura a lo largo de la misma”. Figura 9.B.3.

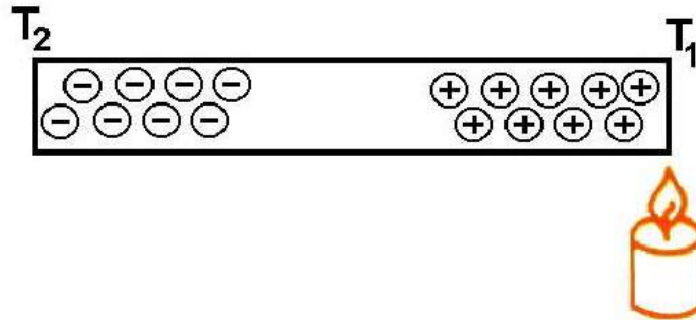


Figura 9.B.3 Efecto Thomson

Circuito básico de una termocupla: en el circuito de la Figura 9.B.4, la fem neta será la suma de las producidas por el efecto Peltier en ambas juntas y por el efecto Thomson en los conductores A y B, siempre que  $T_1 \neq T_2$  en los puntos p y q respectivamente, esto es:

- e1: fem en mV debida al efecto Peltier en la junta o punta p.
- e2: fem en mV debida al efecto Peltier en la junta o punta q.
- e3: fem en mV debida al efecto Thomson el metal A.
- e4: fem en mV debida al efecto Thomson en el metal B..

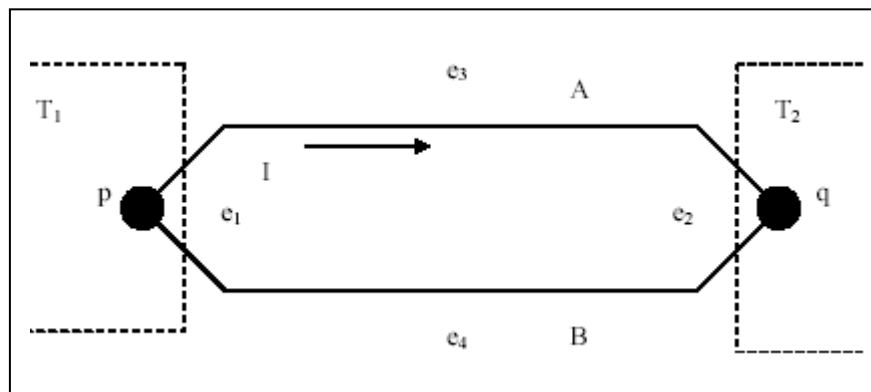


Figura 9.B.4

Si la resistencia total del circuito es R, tendremos que:

$$I = \frac{\sum e_i}{R} = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + e_4}{R}$$

Cuando las temperaturas de las uniones son iguales,  $T_1 = T_2$ , se cumplirá que  $e_1 = -e_2$  (efecto Peltier igual y contrario), y  $e_3 = -e_4$  (efecto Thomson nulo); por lo tanto no habrá



potencial neto, y no circulará corriente. Al producirse un desequilibrio de temperaturas, por ejemplo  $T_1 > T_2$ , no estarán compensados los efectos Peltier ( $e_1 \neq e_2$ ) y además  $e_3$  y  $e_4$  serán distintos de cero, estableciéndose una fem, y por lo tanto una corriente eléctrica que será función de la diferencia de temperaturas.

Manteniendo fija  $T_2$  (normalmente  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ) y variando  $T_1$ , la corriente que circula será, en alguna manera, representativa de  $T_1$ . Como la corriente depende de la resistencia del circuito, esta magnitud no es usada para la medición de temperatura, pues no hay relación absoluta entre temperatura y corriente.

*Por lo tanto se tomará como magnitud representativa de la temperatura la fem desarrollada, que depende solamente de los metales que forman el par y de la temperatura de las juntas.*

En las termocuplas usadas para medición de temperatura, la fem varía entre 1 y 7 milivoltios cuando la diferencia de temperatura entre juntas es de aproximadamente  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Esos mV son medidos primariamente por un voltímetro cuya condición necesaria es que tenga impedancia de entrada infinita, esto es, que no consuma corriente del circuito cuando mide la fem generada, este hecho hace que sean válidas las Tablas de temperatura – tensión para cada tipo de termopar, como se verá, adelantando que de las mismas se desprende también el hecho que la termocuplas no son absolutamente lineales.

La salida del voltímetro puede ser:

- Electrónicamente procesada para obtener una salida en 4- 20 mA, en este caso se trataría de transmisor de temperatura.
- Formar parte de un controlador de temperatura, al cual se conecta la termocupla a través de cables de extensión, hecho particular, sobre el cual se volverá.

Una de las punta o junta del termopar se denomina “*caliente*”, que es la expuesta al proceso cuya temperatura se desea medir, mientras la otra se denomina “*fría*”, esta última está referida a  $0\text{ }^\circ\text{C}$  y se logra mediante su apropiada inmersión en una mezcla de agua y hielo, si bien esta forma es usada, se limita a pruebas de laboratorio. En la práctica industrial, el voltímetro primario cuenta con un dispositivo electrónico auxiliar que mide la temperatura ambiente y suma una señal a la salida del mismo equivalente a la de estar sumergida la punta fría en la mezcla de agua y hielo, en este caso hablamos de “*punta o junta fría compensada electrónicamente*”.

La termocuplas también miden temperatura negativas (por debajo de  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ), por lo que la punta denominada caliente puede estar más fría que la así denominada. Por otro lado, una forma de observar la alinealidad de las termocuplas es ver en Tablas los mV que se obtienen, por ejemplo a  $+300\text{ }^\circ\text{C}$  y a  $-300\text{ }^\circ\text{C}$ , cualquiera sea el tipo de termopar y comprobar que los valores absolutos no son iguales.

Se define como la ganancia de una termocupla al cociente entre el cambio de fem generada y el cambio de temperatura en una junta que lo produjo; sus unidades son  $[mV/ ^\circ C]$ . Cuando la ganancia permanece constante en un intervalo de temperaturas, se dice que la termocupla es lineal dentro de esos valores. Alta ganancia y linealidad son dos factores importantes en el momento de seleccionar una termocupla.

**Polaridad:** en una termocupla formada por los metales A y B, si la corriente circula desde A hacia B en la junta a menor temperatura, A es considerado como termoeléctricamente positivo con respecto a B.

**Ley del metal intermedio:** para poder medir la fem generada en el circuito de una termocupla, debemos intercalar algún instrumento adecuado para esta función. Este instrumento estará formado por un circuito eléctrico cuyos conductores serán, generalmente, de cobre. Si el par de la termocupla son los metales A y B, la introducción del cobre, o en forma general un metal C, causará la aparición de nuevos termopares en las nuevas juntas. Para ver qué efecto tiene este tercer metal tendremos que tener en cuenta la llamada ley del metal intermedio que dice: “La inserción de un metal intermedio en el circuito de una termocupla, no afectará la fem, siempre que las dos juntas introducidas por este tercer metal estén a idéntica temperatura”.

En la Figura 9.B5 vemos, a la derecha de la igualdad, una termocupla o termopar tipo J, donde uno de los conductores es hierro y el otro una aleación llamada constantan. A la izquierda se han practicado unos bloques de unión que deben permanecer a la misma temperatura para que no se agreguen tensiones que no corresponden a la medición. Esto es así dado que los dos termopares formados en la parte superior del bloque: hierro – cobre y otro de cobre - hierro, resultan de igual magnitud y polaridad contraria, anulándose mutuamente, siempre que los bloques permanezcan isotérmicos, lo mismo sucede en la parte inferior con el constantan – cobre y cobre - constantan.

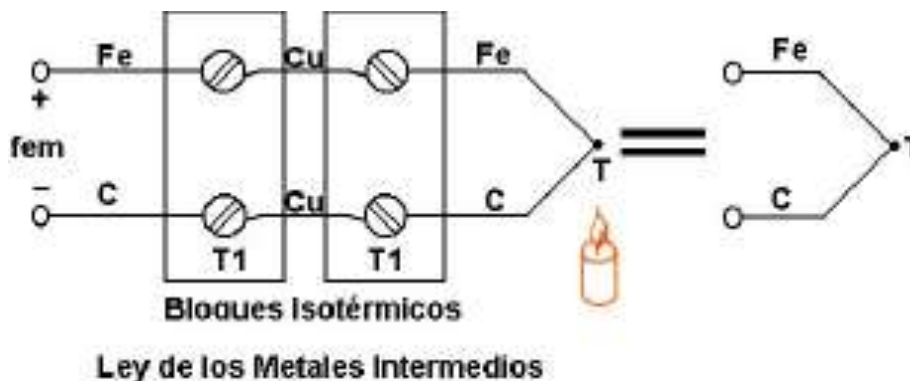


Figura 9.B.5

Aplicado al caso concreto de la medición de los mV generados, en la Figura 9.B.6 se observa la aplicación de esta ley al no permitir que inclusión de los cables de cobre del voltímetro interfiera con los mV debidos a los metales que conformar el termopar.

Por otro lado la Figura 9.B.7 muestra el circuito auxiliar del voltímetro para obtener una punta fría compensada electrónicamente y así prescindir de referirla a una mezcla de agua y hielo.

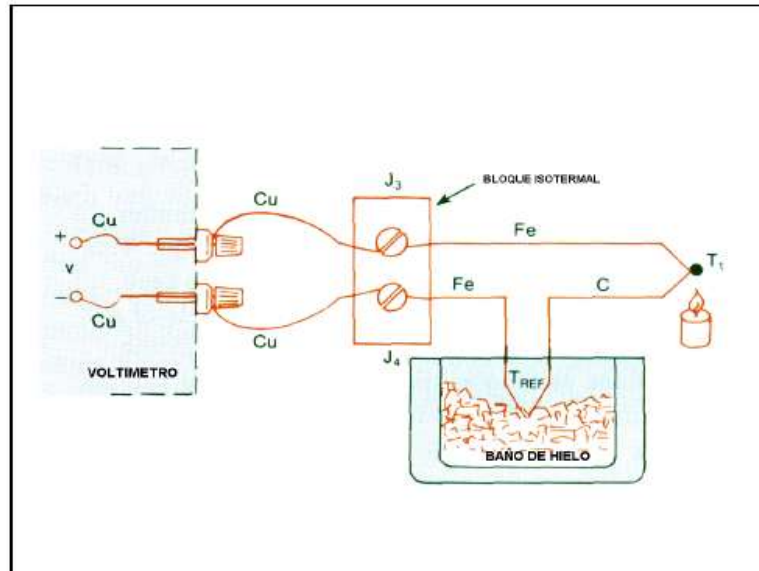


Figura 9.B.6

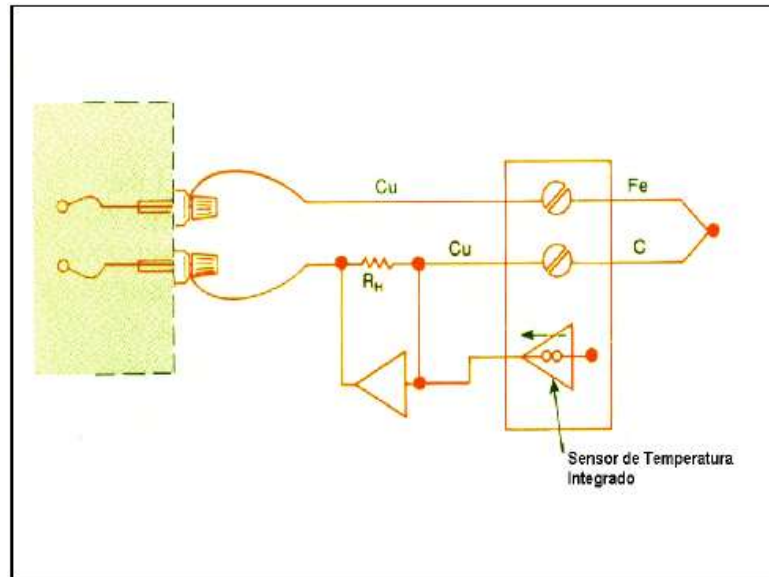


Figura 9.B.7

Tipos de termocuplas: aunque cualquier par de conductores diferentes puede conformar una termocupla, solamente ciertas combinaciones de conductores han sido encontradas convenientes como para ser utilizadas en mediciones de temperaturas, ya que ellas deberán cumplir con una serie de condiciones.

a) La f.e.m. de la termocupla deberá incrementarse continuamente con el incremento de la temperatura dentro del rango en que la misma será utilizada.



- b) El valor de la f.e.m. deberá ser lo suficientemente grande como para poder ser medida con razonable exactitud.
- c) Sus características termoeléctricas no deberán sufrir grandes alteraciones durante su uso ya sea por cambios internos de la aleación (evaporación de componentes, recristalización, etc.) o externos (contaminación, etc.).
- d) Deberán ser resistentes a la oxidación y corrosión en el medio y a la temperatura que son expuestas.
- e) Los termoelementos deberán ser homogéneos.
- f) La temperatura de fusión de los termoelementos que conforman la termocupla deberá ser mayor que el límite superior del rango de utilización de la misma.
- g) Los metales y aleaciones metálicas con los que se fabricarán los termoelementos deberán ser elaborados y obtenibles en forma reproducible y de calidad uniforme.
- h) El costo de la termocupla deberá ser razonablemente bajo.

Toda esta serie de condiciones restringe la selección de los pares de posibles termoelementos a unos pocos, mencionándose los más comunes en la tabla siguiente junto con el rango de temperaturas dentro del cual la termocupla puede ser utilizada así, como la máxima temperatura a que puede ser expuesta por un corto período de tiempo.

TIPO DE TERMOCUPLA	RANGO DE TRABAJO	MAX. TEMP.
	°C	°C
S Platino 10% Rodio – Platino	0 a 1.550	1.700
R Platino 13% Rodio – Platino	0 a 1.600	1.700
K Cromel - Alumel	-200 a 1.250	1.300
J Hierro – Constantan	-200 a 750	900
T Cobre – Constantan	-200 a 350	600
E Cromel- Constantan	-200 a 900	1.000
B Pt 30% Rodio – Pt 6% Rodio	0 a 1.700	1.800

Los nombres asignados a cada tipo de termocupla van a depender de cada norma en particular, pero en todas ellas, las termocuplas deberán cumplir con una determinada relación f.e.m. – temperatura, que cada norma tabula.

Debe tenerse en cuenta el hecho de que en la práctica, los usuarios son proclives a identificar las termocuplas con los nombres comerciales originalmente impuestos por los respectivos fabricantes y que en la mayoría de los casos son realmente más populares que las asignadas por las propias normas.

La vida útil de una termocupla dependerá de un conjunto de factores entre los que cabe mencionar, la temperatura de exposición, diámetro de los termoelementos, condiciones ambientales de uso. Estos factores deberán ser tenidos indefectiblemente en cuenta por cualquier usuario al momento de adquirir una termocupla, ya que el uso de una termocupla adecuada es condición necesaria – aunque no suficiente – para una buena medición de temperatura.

Conversión de f.e.m. a temperatura: hemos indicado que la f.e.m. de una termocupla se “lee” con un voltímetro dedicado con impedancia infinita de entrada y que en general compensa electrónicamente la punta fría a la temperatura de referencia (0°C).

Ahora solo resta convertir estos valores de f.e.m. en valores de temperatura, infortunadamente la relación f.e.m. – temperatura de una termocupla es siempre alineal. En la figura 9.B.8 se hallan graficadas las curvas de f.e.m. vs. temperatura para las termocuplas más comunes. Actualmente, al procesamiento de la “lectura” de la f.e.m. por parte del voltímetro arriba indicado, le continua una electrónica basada en microprocesador que linealiza la señal obteniendo una salida, por ejemplo en 4 a 20 mA que guarda una relación lineal con la temperatura medida por la termocupla de acuerdo a su tipo (J,K,R, etc.), la figura 9.B.9 muestra en forma parcial (hasta el convertor ADC) el mencionado dispositivo

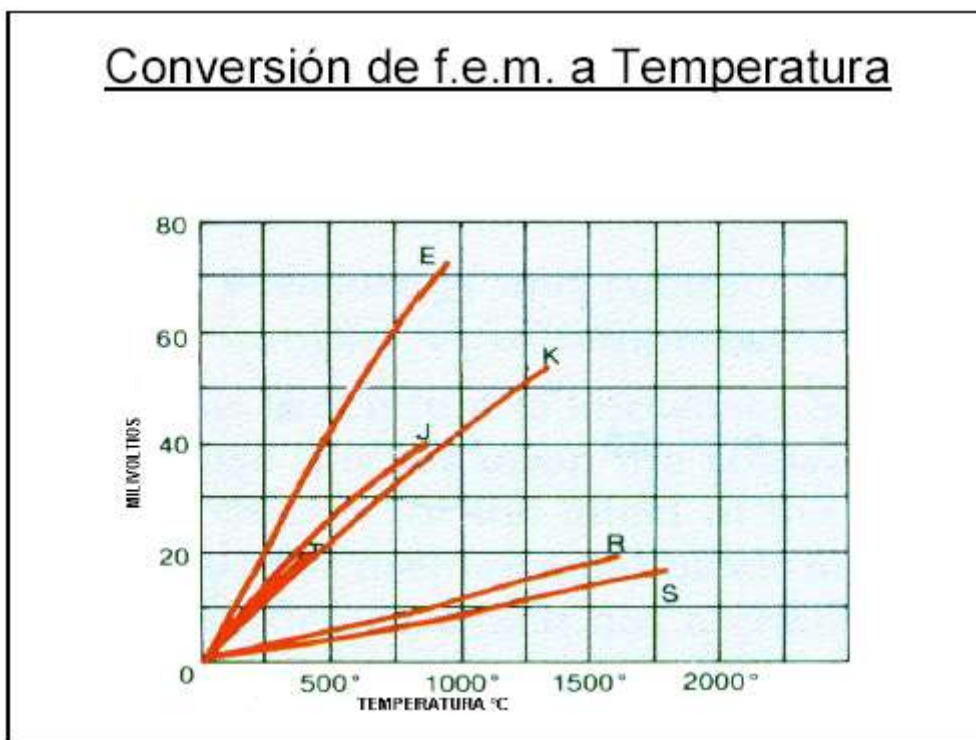


Figura 9.B.8

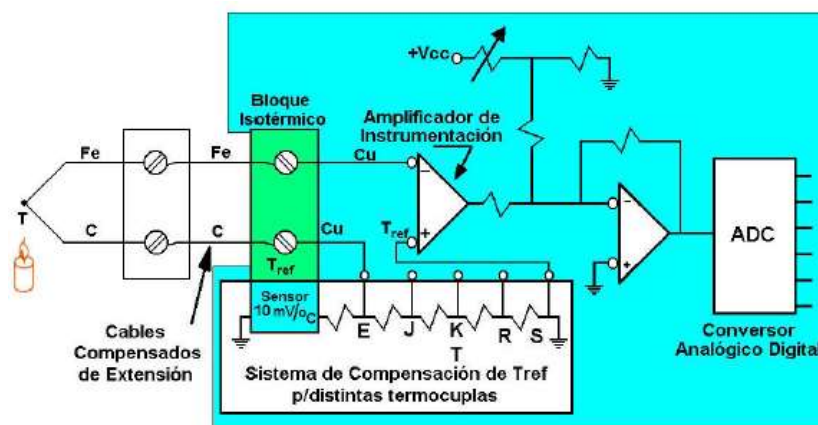


Figura 9.B.9



Cables de extensión y de compensación: hay casos, en instalaciones industriales, donde es necesario mantener la junta de referencia de la termocupla fuera del entorno que rodea a una fuente de calor. Esto es efectuado en la práctica de dos maneras diferentes dependiendo del tipo de termocupla.

Así por ejemplo, para termocuplas fabricadas con metales y aleaciones de bajo costo, el conexionado se hace utilizando cables de *extensión*, cuyos conductores tienen la misma composición química y características termoeléctricas de la correspondiente termocupla.

En termocuplas fabricadas con metales y aleaciones de alto costo (R o S, por ejemplo), el conexionado es efectuado mediante cables de *compensación*, cuyos conductores tienen diferente composición química pero las mismas características termoeléctricas que la misma entre 0 y 100 °C.

Los cables de extensión y de compensación han sido identificados en normas de estandarización por un determinado código de colores.

Ciertas precauciones deberán tenerse en cuenta durante el uso de este tipo de cables, entre las principales se pueden mencionar que se deberá asegurar que ambos puntos de conexión entre los cables de extensión (o de compensación) y la termocupla se encuentran a la misma temperatura (Ley de los metales intermedios).

Arreglos especiales: a veces es necesario aumentar la sensibilidad de las termocuplas, lo que se logra mediante una disposición en serie (Figura 9.B.10), por ejemplo un agrupamiento de 25 termocuplas tipo K, permite obtener una sensibilidad de 2 mV/°C.

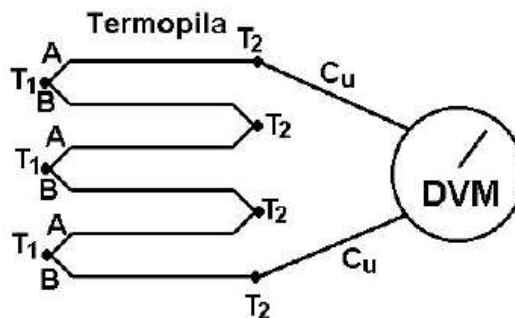


Figura 9.B.10

Termovainas: tanto las termocuplas como las termoresistencias (que se verán en la subunidad siguiente) deben estar adecuadamente protegidas, ello se logra mediante el uso de termovainas, las figuras 9.B.11 y 9.B.12 dan detalles constructivos de las mismas.

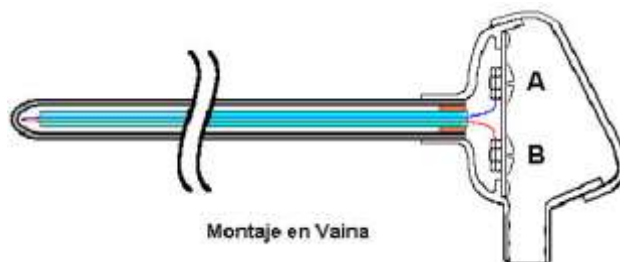
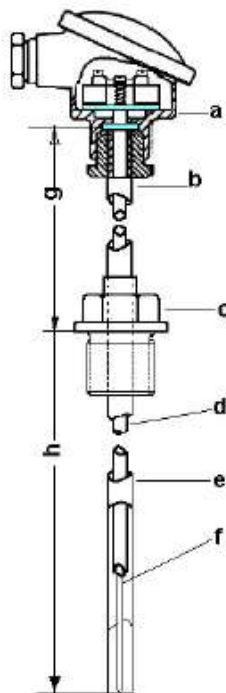


Figura 9.B.11



## Instalación

**a.-Cabezal**

**b.-Cuello**

**c.-Rosca a Proceso**

**d.-Aislador Cerámico**

**e.-Vaina Metálica**

**f.-Termocupla**

**h.-Longitud de la Vaina**

**g.-Longitud de del cuello**

Figura 9.B.12

Subunidad C: Termoresistencias : la termoresistencia o RTD ( resistencia dependiente de la temperatura, por sus siglas en inglés) , es el más exacto de todos los sensores de temperatura permitiendo algunos de ellos efectuar medidas de temperatura con una exactitud de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  a temperatura ambiente.

Su funcionamiento se basa en que la resistividad de un conductor metálico cualquiera depende de la temperatura. Esta dependencia fue anunciada por Sir Humphrey Davy el mismo año que Seebeck descubrió la termoelectricidad, 50 años más tarde, Siemens propuso al platino como elemento para la construcción de sensores de temperatura en base a la variación de resistencia.

Su elección demostró ser sumamente acertada, ya que hasta hoy en día, no solo es el elemento más utilizado como termoresistencia, sino que es el propuesto como elemento primario patrón de interpolación entre el punto triple del oxígeno, ( $- 182,96^{\circ}\text{C}$ ) y el punto de solidificación del aluminio ( $660,323^{\circ}\text{C}$ ).

El platino es sumamente apropiado para este propósito, ya que mantiene una alta estabilidad hasta temperaturas muy altas, y como metal noble, tiene una muy baja susceptibilidad a la contaminación, los otros metales usados en la construcción de termoresistencias son el cobre y el níquel.

Formas constructivas: una termoresistencia o RTD para usos industriales consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado, bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica, a su vez encapsulado y situado dentro de un tubo de protección (termovaina)

adecuado al fluido del proceso, con borneras en su cabezal que permiten la conexión de la termoresistencia con el instrumento de lectura mediante cables de extensión.(Figura 9.C.1)

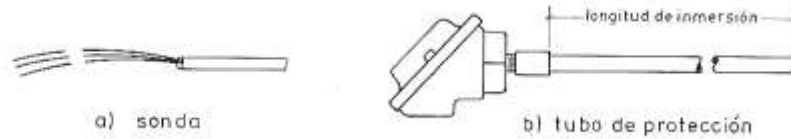


Figura 9.C.1

Características de las RTD: dado que el principio de funcionamiento de este termómetro está basado en la variación de la resistencia con la temperatura, aparece en forma evidente que la característica más importante del metal con que se fabrica el elemento resistivo es que posea una alta resistividad eléctrica y un coeficiente de variación de temperatura con la resistencia alto.

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

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

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

En la que:

$R_0$  = resistencia en ohmios a 0 °C

$R_t$  = resistencia en ohmios a la temperatura t.

$\alpha$  = coeficiente de temperatura de la resistencia.

En la figura 9.C.2 pueden verse las curvas de resistencia relativa,  $R_t / R_0$ , de los 3 metales usados como RTD en función de la temperatura.

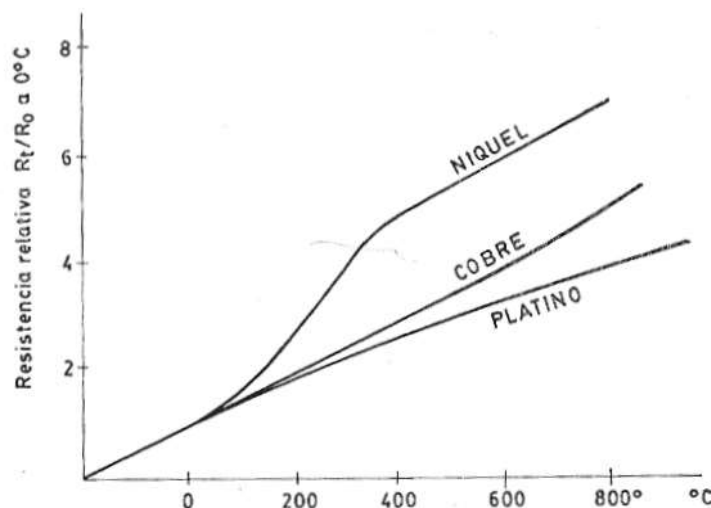


Figura 9.C.2

Reafirmando conceptos, los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, para que el instrumento sea sensible.

Alta resistividad ( mayor sensibilidad).

Relación lineal resistencia-temperatura.

Rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).

Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Como se dijo, los materiales que se usan normalmente en las sondas de resistencia son el platino, níquel y cobre. El platino es el material más adecuado desde el punto de vista de precisión y de estabilidad pero presenta el inconveniente de su costo. En general la sonda de resistencia de platino utilizada en la industria tiene una resistencia de 100 ohmios a 0°C y se le denomina por ello Pt-100.

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

El cobre tiene una variación de resistencia uniforme, es estable y barato, pero tiene el inconveniente de su baja resistividad y por lo tanto su arrollamiento resulta su muy abultado y de mayor tamaño.

La Tabla siguiente muestra estas características para los 3 metales usados como RTD.

Características de sondas de resistencia

Metal	Resistividad $\mu\Omega/\text{cm}$	Coficiente temp. $\Omega/\Omega, ^\circ\text{C}$	Intervalo útil de temp. $^\circ\text{C}$	$\varnothing$ min. de hilo mm	Coste relativo	Resis. sonda a 0° C, ohmios	Preci- sión $^\circ\text{C}$
Platino	9,83	0,00385	— 200 a 950	0,05	Alto	25, 100, 130	0,01
Níquel	6,38	0,0063 a 0,0066	— 150 a 300	»	Medio	100	0,50
Cobre	1,56	0,00425	— 200 a 120	»	Bajo	10	0,10

Instrumentos de lectura para las RTD: la variación de resistencia de las sondas es medida con un puente de Wheatstone dispuesto en montajes denominados de dos hilos, de tres hilos o de cuatro hilos (este último reservado para medidas de laboratorio), según sean los hilos de conexión de la sonda de resistencia al puente. En la figura 9.C.3 pueden verse los montajes de 2 y 3 hilos.

La salida del puente de Wheatstone es una tensión seguida por un procesamiento, en general digital y basado en microprocesador, cuya salida es una corriente de 4 -20 mA

o un protocolo de comunicaciones para ámbitos industriales tales como Profibus, Fieldbus, etc., representativas de la temperatura del proceso en la cual está inmersa la RTD en su correspondiente termovaina. En los gráficos siguientes, se habla de un galvanómetro como instrumento de medida local, si bien es usado, actualmente valen las consideraciones ya expresadas sobre el procesamiento de la señal, quedando reservado el uso de la palabra galvanómetro para una más simple descripción del puente de Wheatstone.

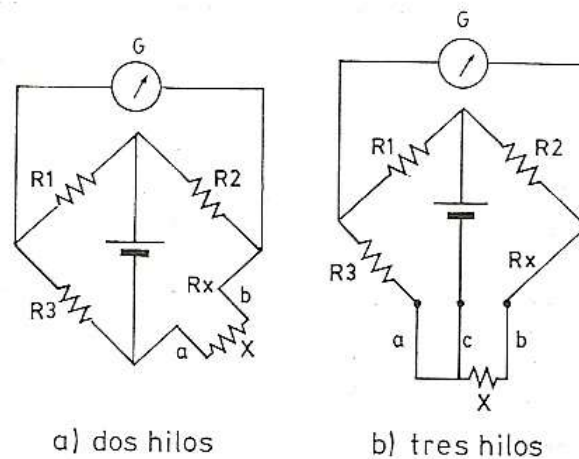


Figura 9.C.3

En el montaje de dos hilos la sonda de resistencia se conecta a uno de los brazos del puente y se varía  $R_a$  hasta que se anula la desviación del galvanómetro. En este instante, se cumple la ecuación:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{x} \longrightarrow x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

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

En efecto, la ecuación anterior pasa a:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{x + K(a + b)}$$

Con  $x$  = valor de resistencia en la RTD.

$K$  = coeficiente de resistencia por unidad longitud de los hilos de conexión.

$a$  y  $b$  = longitudes de los hilos de conexión de la sonda al puente.



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

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

En efecto, en la figura puede verse que la ecuación correspondiente es:

$$\frac{R_1}{R_3 + K \cdot a} = \frac{R_2}{x + K \cdot b}$$

Y como  $K \cdot a = K \cdot b$ , haciendo  $R_2/R_1 = 1$ ,  $R_3$  puede ajustarse a un valor igual a  $x$  para que el galvanómetro no indique tensión.

Subunidad D: Instrumentos de nivel, particularidades en su medición y transmisión en un lazo de control realimentado, incidencia en el comportamiento del mismo.

En la industria, la medición y control del nivel es importante, no sólo para el correcto funcionamiento del proceso, sino también para la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesador en la medida y transmisión de las variables industriales, tales como presión, caudal, temperatura y nivel, permite añadir "inteligencia en la medida" y obtener, en el caso particular del nivel, precisiones de lectura altas, del orden del  $\pm 0,2 \%$ , que se ven reflejadas en el correcto inventario de materias primas o finales o en transformación en los tanques del proceso. El transmisor de nivel "inteligente" hace posible la interpretación del nivel real (puede eliminar o compensar la influencia, en la lectura, de la espuma en flotación del tanque), la eliminación de las falsas alarmas (tanques con olas en la superficie debido al agitador de paletas en movimiento) y la fácil calibración del aparato en cualquier punto de la línea de transmisión.

Medir nivel es diferenciar interfases, las más usuales son aire – líquido, líquido – líquido y aire – sólido, cada una hace uso de diferentes principios físicos y de dispositivos para poder "apreciar" dicha interfase.

En este estudio nos limitaremos a las dos primeras, a partir del principio físico empleado, a saber:

- a) Dispositivos que utilizan el empuje producido por el propio líquido, llamado medidor de desplazamiento a barra de torsión.

- b) Dispositivos que miden nivel aprovechando la presión hidrostática, incluyendo el medidor por burbujeo.
- c) Dispositivos que emplean ultrasonido.

Subunidad E: Medidores de nivel por desplazamiento.

El medidor de nivel de tipo *desplazamiento* (figura 9.E.1) consiste en un flotador interno a un tanque y parcialmente sumergido en el líquido cuyo nivel se desea medir y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión unido rígidamente al tanque. Dentro del tubo y unido a su extremo libre se encuentra una varilla que transmite el movimiento de giro a un transmisor exterior al tanque.

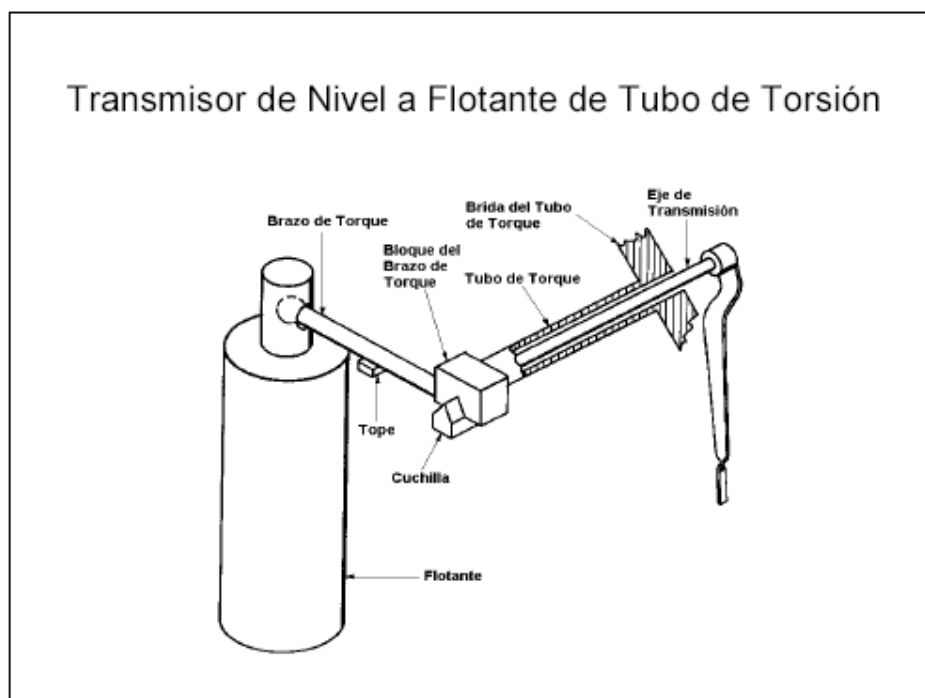


Figura 9.E.1

El tubo de torsión se caracteriza fundamentalmente porque el ángulo de rotación de su extremo libre es directamente proporcional a la fuerza aplicada, es decir, al momento ejercido por el flotador. El movimiento angular del extremo libre del tubo de torsión es muy pequeño, del orden de los  $9^\circ$ . El tubo proporciona además un cierre estanco entre el flotador y el exterior del tanque (donde se dispone el instrumento receptor del par transmitido). Según el principio de Arquímedes, el flotador sufre un empuje hacia arriba que viene dado por fórmula:

$$F = SH\gamma g$$

En la que:

$F$  = empuje del líquido

$S$  = sección del flotador

$H$  = altura sumergida del flotador

$\gamma$  = densidad

$g$  = aceleración de la gravedad

y el momento sobre la barra de torsión:

$M = (SH\gamma g - P) l$ , siendo  $l$  el brazo del tubo de torsión y  $P$  el peso del flotador. La figura 9.E.2 da detalles de lo expuesto.

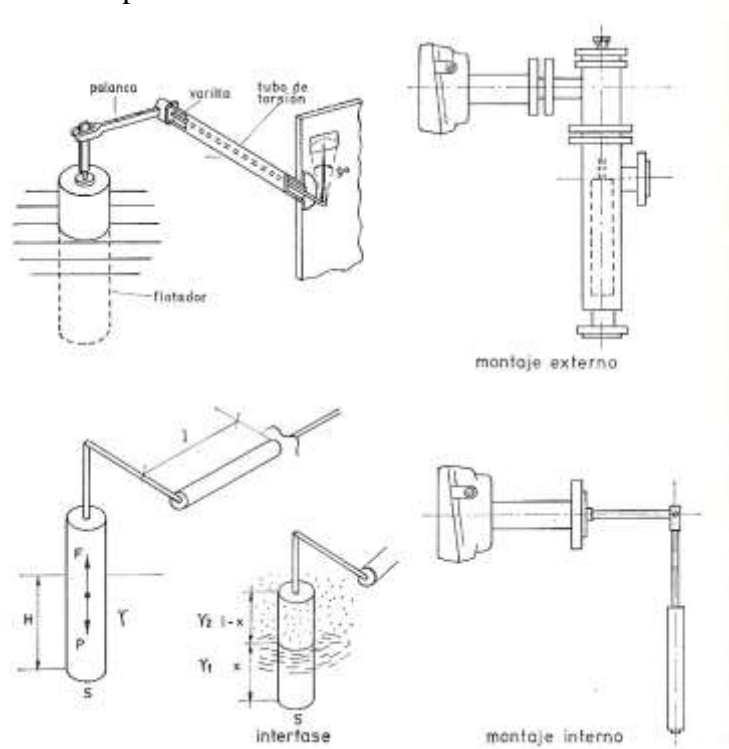


Figura 9.E.2

Tal como puede verse en la expresión anterior, al aumentar el nivel, el líquido ejerce un empuje sobre el flotador igual al volumen de la parte sumergida multiplicada por la densidad del líquido, tendiendo a neutralizar su peso propio, así que el esfuerzo medido por el tubo de torsión será muy pequeño. Por el contrario, al bajar el nivel, menor parte del flotador queda sumergida, y la fuerza de empuje hacia arriba disminuye, resultando una mayor torsión. Los instrumentos de este tipo se utilizan básicamente en servicios con fluidos sucios y temperaturas elevadas.

Muy importante, este instrumento puede utilizarse también en la medida de interfase entre dos líquidos de distinta densidad (por ejemplo, agua e hidrocarburo). En este caso el flotador es de pequeño diámetro y de gran longitud y está totalmente sumergido. El peso desplazado por el flotador, es decir, el empuje, se compone entonces de dos partes, del líquido más denso en la parte inferior y del menos denso en la parte superior, con una línea de separación (interfase) de la que depende el par de torsión. En efecto, si  $x$  es la zona del flotador inmersa en el líquido de mayor densidad,  $l$  es la longitud total del flotador y  $\gamma_1, \gamma_2$  son las densidades de los líquidos, resulta:

$$\text{Empuje hacia arriba} = F = S x \gamma_1 g + S (l - x) \gamma_2 g, \text{ siendo } \gamma_1 > \gamma_2$$



Se ve claramente que este empuje depende del nivel relativo de separación de los dos líquidos y que la amplitud de medida está determinada por la diferencia entre las densidades de los líquidos, es decir:

$$F_{\text{máx}} - F_{\text{mín}} = S l \gamma_1 g - S l \gamma_2 g = S l (\gamma_1 - \gamma_2) g$$

La expresión anterior hace referencia que la fuerza de empuje máxima corresponde cuando el flotador está sumergido totalmente en el líquido de mayor densidad  $\gamma_1$  y la mínima cuando está sumergido totalmente en el menor densidad  $\gamma_2$ .

La exactitud es del orden de  $\pm 0,5 \%$  a  $\pm 1 \%$  y el intervalo de medida puede variar de 0-300 a 0-2.000 mm de columna de agua.

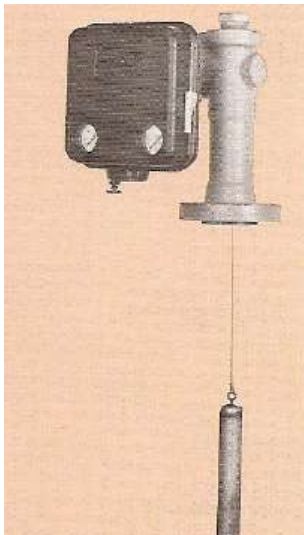


Figura 9.E.3

En la figura 9.E.3 se aprecia la parte superior del tanque que contiene al flotador y el instrumento que tiene por entrada al tubo de torsión y cuya salida puede ser una señal neumática de 3 a 15 psi (libras por pulgadas cuadradas), de corriente de 4 a 20 mA y en el caso de disponer de electrónica basada en microprocesador, esto es, una unidad “inteligente”, la señal de salida será un protocolo de comunicaciones industrial tal como Profibus o Fielbus, entre otros. En todos los casos, el conjunto se denomina transmisor de nivel y su señal de salida será empleada por un controlador o indicador de la variable medida en Sala de Control.

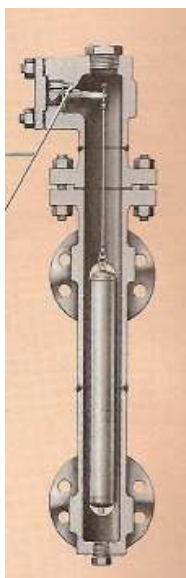


Figura 9.E.4

En la figura 9.E.4 se aprecia un corte con los internos y en la parte posterior las bridas que lo vinculan, válvulas exclusas manuales mediante, al tanque o torre principal cuyo nivel se pretende medir. Es entonces que por vasos comunicantes, el tanque del medidor donde está sumergido el flotador, toma el nivel del tanque o torre principal.

El alumno debe recordar que el mismo esquema, se ha visto en el Tema 2, punto Sistema con 2 capacitancias, medición de nivel, Figura 2.19, donde se estudia su fenomenología e indicaciones para el ajuste óptimo del lazo de control.

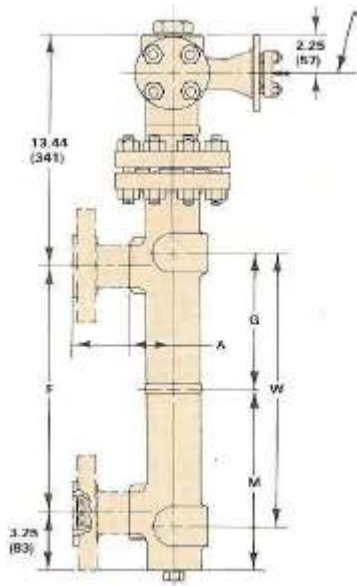


Figura 9.E.5

El instrumento puede utilizarse en tanques abiertos y cerrados a presión o al vacío, tiene una buena sensibilidad pero presenta el inconveniente del riesgo de depósito de sólidos o de crecimiento de cristales en el flotador, que afectan la precisión de la medida y es apto sólo para la medida de pequeñas diferencias de nivel, disponen de un dispositivo que permite el ajuste del peso específico del fluido que se mide.

La Figura 9.E.5 muestra el conjunto externo, destacándose las bridas de conexión al tanque o proceso principal.

### Subunidad F: Medidores de nivel por presión hidrostática y burbujeo.

El medidor de nivel por presión hidrostática es un método basado en inferir nivel mediante una *presión diferencial* y por lo tanto el uso de una celda de presión diferencial oficiando de transmisor de nivel.

La expresión que vincula nivel con presión es:

$$h = P \cdot \delta$$

donde:

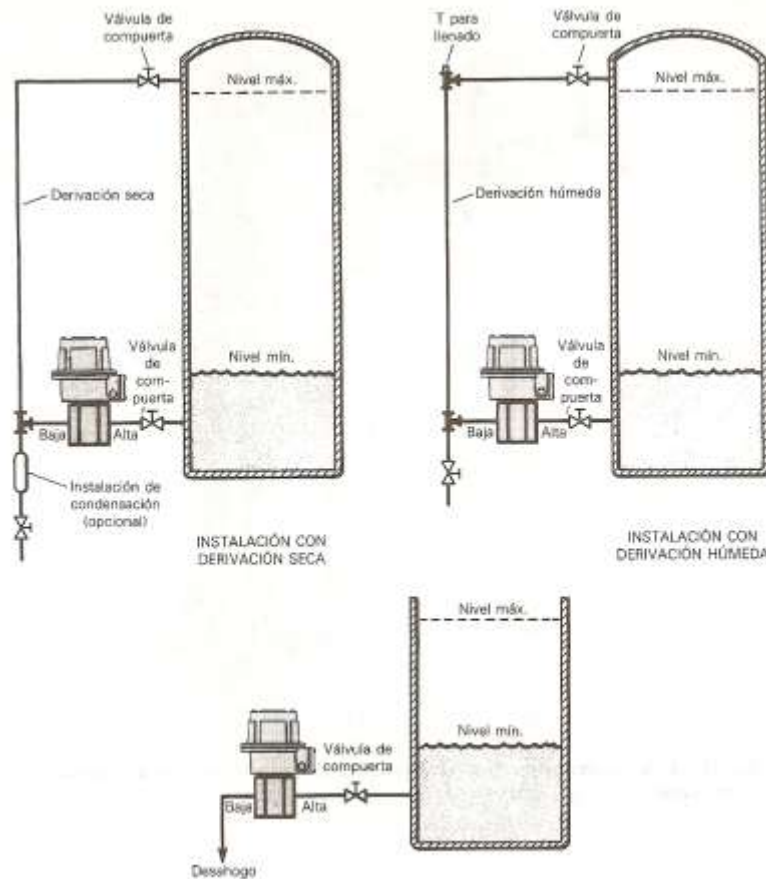
$h$  = nivel  
 $P$  = presión  
 $\delta$  = peso específico

La figura 9.F.1 muestra en los esquemas superiores el caso de la medición de nivel de recipientes a presión, el izquierdo con la cámara de alta de la celda de presión diferencial conectada a la parte inferior del tanque y la cámara de baja a la parte superior del mismo. Tiene el inconveniente que si la fase gaseosa condensa en la pierna superior, la columna de condensado allí formada falseará la lectura, a efectos de evitar tal situación se realiza en forma exterior a la tubería un acompañamiento de vapor o de conductores eléctricos específicos para ésta prestación, envolviéndola y aportando calor que evita la condensación asegurando así que dicha pierna sea una *“derivación seca”*.

La otra opción, para medir nivel en recipientes a presión cuya fase gaseosa pueda condensar, es dotar en la parte superior e inferior, a la salida del recipiente con sendos diafragmas de sello, pero que transmiten la presión, luego, las piernas se llenan, por ejemplo con glicerina y se les llaman *“derivación húmeda”*. Para esta disposición hay

que dar vuelta las cámaras de la celda de presión diferencial, en este caso, cuando sube el nivel, la presión diferencial disminuye, a la inversa que en el caso anterior.

El gráfico inferior corresponde a la medición de nivel de un tanque abierto, observar que la cámara de baja se expone a la atmósfera (*desahogo*).



Ver nota al pie de la figura

Figura 9.F.1

Nota: en la instalación con derivación húmeda se deben invertir las tomas de alta y de baja.

La exactitud de los instrumentos de presión diferencial es de  $\pm 0,5 \%$  en los neumáticos (salida 3 a 15 psi),  $\pm 0,2 \%$  a  $\pm 0,3 \%$  en los electrónicos, y de  $\pm 0,15 \%$  en los inteligentes.

Vemos como conclusión que se emplean en tanques abiertos y cerrados a presión (y al vacío, si fuere el caso), no tienen partes móviles, son de fácil limpieza, precisos y confiables, admiten temperaturas del fluido de hasta  $120^{\circ}\text{C}$  y no son influidos por las fluctuaciones de presión.

Medidor de tipo *burbujeo*: emplea un tubo sumergido en el líquido a cuyo través se hace burbujear un caudal de aire (unos 150 N litros /hora) a presión constante suministrado por regulador asociado (figura 9.F.2). La presión del aire en la tubería equivale a la presión hidrostática ejercida por la columna de líquido, es decir, al nivel.

La tubería empleada suele ser de 1/2" con el extremo biselado para una fácil formación de las burbujas de aire.

La presión de aire en la tubería, es decir, el nivel, se mide mediante un celda de presión diferencial, la cámara de alta en la tubería de burbujeo y la cámara de baja a la atmósfera, esto es así ya que al subir el nivel, la columna hidrostática contrapresiona más el extremo libre, dificultando el escape de las burbujas y contrapresionando el suministro de aire, aumentando la presión en la cámara de alta y por lo tanto la diferencia de presiones; por el contrario, al bajar el nivel, las burbujas escapan más fácilmente, depresionando la cámara de alta y por lo tanto disminuyendo la presión diferencial entre las mismas. Este hecho es acusado por la salida de la celda de presión diferencial, en este caso constituido como un transmisor de nivel, aumentando o disminuyendo, según corresponda, la salida en corriente (4 a 20 mA) o equivalente información si la salida se realiza con protocolos industriales, de ser su electrónica basada en microprocesador, como ya se mencionara.

El método de burbujeo es simple y da buen resultado, en particular, en el caso de líquidos muy corrosivos, con sólidos en suspensión o con emulsiones. No se recomienda su empleo cuando el fluido de purga perjudica al líquido y para fluidos altamente viscosos donde las burbujas formadas del aire o gas presentan el riesgo de no separarse rápidamente del tubo. Desde el punto de vista del mantenimiento, es muy útil situar una T con un tapón en la parte superior del tubo para su limpieza periódica.

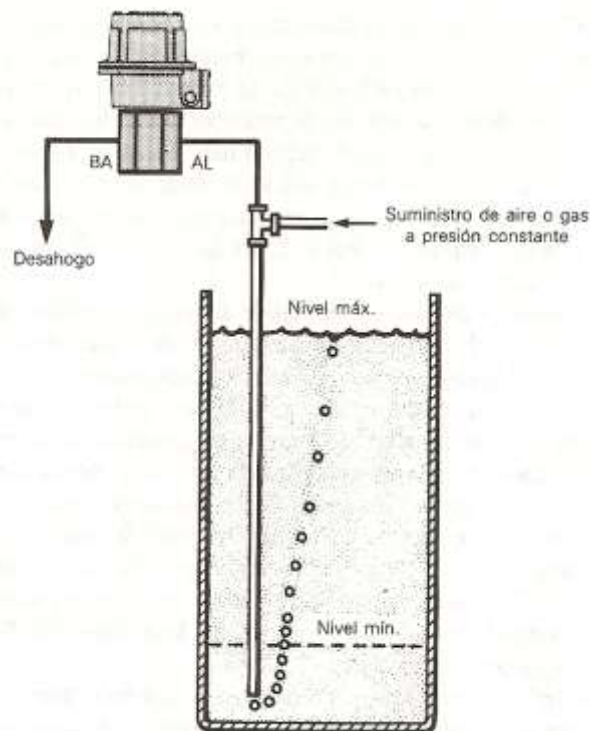


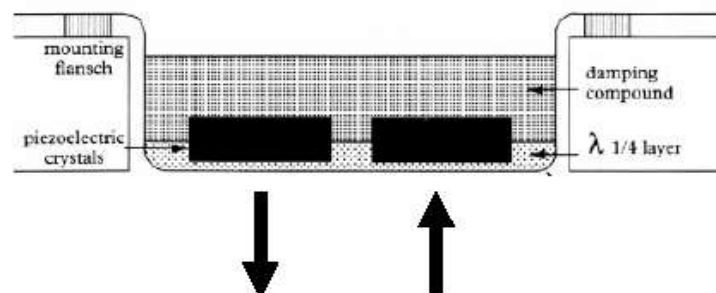
Figura 9.F.2

Subunidad G: Medidores de nivel por ultrasonido: constan de un medidor de ondas sonoras de alta frecuencia (entre 20 y 40 kHz) que se propaga por la fase gas (no necesariamente aire) hasta que choca con el líquido o sólido, se refleja y alcanza el receptor situado en el mismo punto que el emisor.

El tiempo entre la emisión de la onda y la recepción del eco es inversamente proporcional al nivel. El tiempo depende de la temperatura por lo que hay que compensar las medidas, además hay que evitar que existan obstáculos en el recorrido de las ondas, aunque algunos medidores compensan los ecos fijos debidos al perfil del depósito. Son sensibles al estado de la superficie del líquido (espumas).



La onda se refleja y teniendo en cuenta que viaja a 331m/segundo se calcula la distancia que recorre durante el tiempo de vuelo. La velocidad no es influida por la frecuencia ni por la presión pero si por la temperatura. En el sensor hay piezoelectricos sujetos a la membrana, unos emiten y otros reciben. El transmisor lo transforma en una señal de 4 a 20 mA. Por lo que un cristal piezoelectrico es activado a la frecuencia del sonido que se genera mediante una tensión oscilante. El otro cristal al recibir las ondas reproduce una salida eléctrica aunque atenuada pues es la onda reflejada. Los ecos del tanque pueden ser varios, el que nos interesa es el de la superficie del producto. Se pueden usar tanto para líquidos como sólidos.





**Sensores  
ultrasonicos de  
distintas  
capacidades.**

Subunidad H: Otras variables de interés industrial.

Mediante los Temas 8 y 9 se han visto las que en general son las variables de interés industrial de uso más frecuente, a su vez por cada una de ellas se han descrito las principales tecnologías empleadas para su medición y transmisión; ese conjunto de transductor / sensor y electrónica asociada que envía un señal de salida a Sala (recordar que  $c(t)$  o variable interés es transformada y transmitida como  $b(t)$  hacia el controlador indicador en Sala) .

Es necesario tener en cuenta y recordar que desde hace unos años se ha abierto nuevo capítulo respecto de la señal generada por los transmisores, ya que además de la conocida señal en corriente, se encuentran día a día con nuevos transmisores inteligentes con señales de salida digitales, regidas por algún protocolo, que establece un dialogo con los controladores o indicadores, en general estos estándares de comunicación son propietarios, mencionando, entre otros a Fieldbus, Profibus, etc.

A las ya vistas, se deben consideran otras variables de interés industrial, el listado siguiente se limita a su simple mención, recordando que por cada una de ellas se emplean distintos principios y tecnologías para su medición y transmisión.

## Variables físicas:

Peso

Velocidad

Densidad y peso específico

# Instrumentación y Control Automático

Unidad 9: Medición de Temperatura y Nivel



Universidad Nacional de Cuyo  
Facultad de Ingeniería

Humedad y punto de rocío.  
Humedad en aire y gases  
Humedad en sólidos  
Viscosidad y consistencia.  
Llama  
Oxígeno, dióxido y monóxido de carbono  
Turbidez  
Intensidad de radiación solar  
y otras.

## Variables químicas:

Conductividad  
pH  
Redox (potencial de oxidación-reducción) .  
Concentración de gases  
y otras

Profesor Titular: Ing. Alfredo Ernesto Puglesi  
Profesor Adjunto: Ing. María Susana Bernasconi  
JTP: Ing. Esther Bibiana Castiglione  
Ayudante Alumno: José Carlos Cortiñas