



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“DISEÑO Y DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO
DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE
AIRE EN AGUA”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO ELECTRICO ELECTRONICO**

P R E S E N T A :

ENRIQUE JAVIER ROMERO GARCIA

**DIRECTOR DE TESIS:
ING. RODOLFO PETERS LAMMEL**



CIUDAD UNIVERSITARIA, 2006

AGRADECIMIENTOS

A Dios por pensar en mí para estar en éste su planeta y de regalarme el don de la vida que es realmente maravilloso.

A mis padres Francisco Romero Valenzuela y Rosalba García Cruz pues siempre me han apoyado en todo este camino de mi vida su apoyo moral e incondicional han bendecido en todo momento mi alma.

Al Ingeniero Rodolfo Peters Lammel pues me brindo la oportunidad de ser su tesista y a pesar de que ésta fue larga siempre estuvo en todo momento brindándome su accesoria y apoyo que lo caracteriza.

A la UNAM por abrirme las puertas del máximo conocimiento y disciplina en la que un Mexicano se puede formar. Estoy plenamente agradecido con la Facultad de Ingeniería pues en mi vida ella ya esta marcada.

A mis amigos de la preparatoria que me motivaron a estudiar ingeniería. Edgar Moreno, Salvador Mejía, Rodolfo Alonso, Iván Sandoval y al profesor Gustavo Acosta castañeda que fue mi plataforma en las matemáticas.

A mis amigos de la facultad de Ingeniería. Florencio Bravo, Luís Mata, Gustavo Moreno, Martín Núñez, Ángel Pérez Nieto, Carlos Guzmán.

A mi amigo incondicional Marco Antonio Mejía Serrato y a mi amigo noble Luís Apartado gracias por su apoyo no los olvidare nunca.

Agradecimientos a todas las demás personas que de manera directa o indirecta han participado en mi vida.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
 CAPÍTULO I MEDIDAS DE CAPACITANCIA	 4
1.1 Dieléctricos	6
1.2 Reactancia capacitiva	6
1.3 Capacitancia párasita	7
1.4 Pérdidas en circuitos con capacitores	8
1.5 Medición de capacitancia	9
 CAPÍTULO 2 MEDIDAS DE CONDUCTIVIDAD	 13
2.1 Resistencia, conductancia y conductividad	13
2.2 Conductancia molar y equivalente	15
2.3 Variación de la conductividad con la concentración	16
2.4 Variación de la conductancia molar con la concentración. Ley de Kohlrausch	16
2.5 Ley de la migración independiente de los iones	18
2.6 Medida de la conductancia	19
2.6.1 Fuentes de poder y puentes de resistencia	19
2.6.2 Celdas	20
2.6.3 Determinación de la constante de celda	21
2.6.4 Influencia de la temperatura	22
2.6.5 La variación de la conductancia equivalente con la temperatura	23
2.7 Determinación de la solubilidad y el kps de sales insolubles	23

2.8 Determinación de la constante de disociación de ácidos débiles	25
CAPITULO 3 MEDIDAS DE TEMPERATURA	26
3.1 Conducción	26
3.2 Convección	27
3.3 Radiación	27
3.4 Escalas de temperatura	28
3.5 Escala de temperatura termodinámica o absoluta	29
3.6 Instrumentos de medición de temperatura	32
3.6.1 Termómetro de líquido en tubo de vidrio	33
3.6.2 Termómetro de líquido en tubo metálico	36
3.6.3 Bulbos y receptáculos	38
3.6.4 Errores de capilar	39
3.6.5 Termómetros de presión de vapor	40
3.6.6 Termómetros de tira bimetálica	42
3.6.7 Indicación de la temperatura por el cambio de estado de los sólidos	45
3.6.8 Barras termoscópicas Holdcroft	46
3.6.9 Pinturas y lápices	46
3.7 Termoelectricidad	47
3.8 Ley de los metales intermedios	48
3.9 Ley de las temperaturas intermedias	48
3.10 Pirómetros termoeléctricos	49
3.10.1 Regulación de la temperatura de la unión fría	50
3.11 Aplicaciones de los pirómetros de termopar	53
3.12 Termopilas	56
3.13 Errores de termopar	56
3.14 Medición de la temperatura por detección de la radiación	57
3.15 Cuerpo negro	58
3.16 Medición de la temperatura por variación de la resistencia eléctrica	60
3.17 Termómetros de resistencia eléctrica	61

3.17.1 Conexión de tres conductores	62
3.17.2 Conexión de cuatro conductores	62
3.18 Termistores	64
3.19 Sondas de vidrio	67
3.20 Sondas metálicas	67
3.21 Calibrado	68
3.21.1 Calibrado primario	68
3.21.2 Calibrado secundario	70
 CAPÍTULO 4 MEDIDAS DE PRESIÓN	 71
4.1 Medición de la presión estática	71
4.2 Medición de la presión diferencial	72
4.2.1 Medición del manómetro simple de tubo U	73
4.2.2 Manómetro de cubeta	75
4.2.3 Manómetro de tubo inclinado	76
4.2.4 Manómetro de diafragma sencillo, de diafragmas apilados y de fuelle	79
4.2.5 Balanza anular	82
4.3 Medición de la presión manométrica	84
4.4 Medición de la presión absoluta	88
4.5 Medición del vacío elevado	90
4.5.1 Vacuómetro de Macleod	91
4.5.2 Vacuómetro Pirani	93
4.5.3 Vacuómetro termoiónico o de ionización con cátodo caliente	94
4.5.4 Vacuómetro de ionización con cátodo frío	96
4.5.5 Vacuómetro magnetrón de cátodo frío	98
4.5.6 Vacuómetro magnetrón de cátodo caliente	99
4.5.7 Vacuómetro de ionización de partículas alfa	100
4.6 Medición de la presión dinámica	100
4.6.1 Indicador para motores	101

4.6.2 Transductores de presión eléctricos activos	102
4.6.3 Transductores de presión eléctricos pasivos	103
CAPÍTULO 5 ELECCION DE LOS SENSORES REFERIDOS AL PROYECTO	108
5.1 Sensores capacitivos	108
5.2 Sensores de conductividad	112
5.3 Sensores de temperatura	116
5.4 Transductores de presión	119
CAPÍTULO 6 PRUEBAS REALIZADAS EN EL PROYECTO	121
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	129
Anexo A	130
Anexo B	131

INTRODUCCION

En las presas del sistema hidroeléctrico nacional es necesario tener control de los niveles de agua. Por tal motivo, cuando hay un exceso de nivel es necesario desalojar el agua a través del vertedor de demasías. Dicho vertedor es parecido a un gran tobogán el cual es hecho de concreto y que se puede dañar debido a los efectos de cavitación. La cavitación es una vaporización local del líquido, inducida por una reducción hidrodinámica de la presión. En los líquidos aparecen impurezas microscópicas de gases a las que se les llama núcleos de cavitación. Estos núcleos son diminutas burbujas de gases adheridas a materiales sólidos presentes en los líquidos, burbujas retenidas en fisuras en los conductos de transporte del mismo, o gases absorbidos por el líquido.

Estos núcleos al ser sometidos a una zona de baja presión comienzan a expandirse. Si aún sigue disminuyendo la presión en una magnitud tal que se alcance la presión de vapor del fluido a la temperatura respectiva, entonces el líquido que rodea a este núcleo (micro burbuja) se vaporiza y comienza a crecer hasta que se hace visible en forma de burbuja. Si en el líquido hay disuelto otros gases, ellos también pueden colaborar en formar esta cavidad por difusión de los mismos, cuando las condiciones físicas (de presión y temperatura) lo permitan.

Por tal razón los altos contenidos de gas parecen favorecer la cavitación debido a que originan una mayor cantidad de burbujas. Con elevados contenidos de aire la presión para el comienzo de la cavitación sería superior a la presión de vapor, lo que origina el retardar la cavitación y también de la implosión de las burbujas. Al ocurrir la implosión causaría ondas de presión que viajarían en el líquido y las mismas pudieran disiparse en la corriente del líquido o pudieran chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse y se inicia una erosión que además de dañar la superficie provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor.

Para contrarrestar dicho efecto se ha incluido en el vertedor una estructura denominada aireador que permite la inyección de aire al flujo de agua, a través del cual se controla la cantidad de aire inducida en el agua y de acuerdo con los resultados el poder operar la apertura del vertedor. Esto es de suma importancia para evitar la destrucción de la infraestructura de la presa. Por tal razón se realizó el diseño y la construcción del elemento de medición para determinar la cantidad de aire en agua. En el presente trabajo se señalan todas las variables involucradas para la medición del contenido de aire en agua, dichas variables están involucradas de manera directa en el proceso de medición del contenido de aire en agua. Desde la variable en esencia que es la capacitancia y como ésta es afectada por otras variables que pueden cambiar las condiciones del dieléctrico. Variables tales como la conductividad, la temperatura y la presión pueden modificar las mediciones de capacitancia, las cuales darán los niveles de aire en el dieléctrico (agua).

Como se verá en el presente trabajo las variaciones en cuanto a conductividad no afectarán las mediciones debido a que la salinidad del agua no es un factor fundamental para modificar al dieléctrico, en tanto las mediciones de temperatura y presión será necesario seguirlas debido a que tanto la temperatura como la presión tienen una gran dependencia de la época del año puesto que las condiciones climáticas son distintas y esto puede ocasionar que el dieléctrico tenga un comportamiento distinto, lo que daría una capacitancia distinta. Por ese motivo se pretende que a través de las distintas mediciones hacer un análisis de los factores que han afectado la capacitancia. Se debe tener certeza de que los cambios experimentados por el capacitor fueron por causas físicas del medio más no por falta de aireación en el dieléctrico dichos cambios los debe verificar el personal de técnicos encargados.

Por lo tanto cada uno de los capítulos de esta tesis contiene información relacionada con los sensores utilizados para el diseño del equipo. Los capítulos son:

Capítulo 1: **Medidas de capacitancia** donde hay información concerniente a las características más importantes que tiene el sensor capacitivo.

Capítulo 2: **Medidas de conductividad** existe información de las características de las sustancias desde el punto de vista de sus iones; es decir, desde un estudio electroquímico.

Capítulo 3: **Medidas de temperatura** en este capítulo se encuentra información de los medidores de temperatura más simples hasta los más complejos, pasando por los eléctricos y no eléctricos.

Capítulo 4: **Medidas de presión** se hace una descripción de los medidores más simples hasta los más complejos, desde los estáticos a los dinámicos.

Capítulo 5: **Elección de los sensores referidos al proyecto** en este capítulo existe información concerniente a los sensores que por sus características se utilizaron. También se encuentran los resultados obtenidos en las mediciones de capacitancia. Está incluido en este capítulo la demostración matemática del por qué no considerar un sensor para medir la conductividad. Además existen tablas con información de las ventajas y desventajas de los sensores de temperatura y presión las cuales fueron un gran apoyo para elegir el mejor sensor.

Capítulo 6: **Pruebas realizadas en el proyecto** contiene básicamente información relacionada con los resultados experimentales obtenidos.

CAPITULO 1

1. MEDIDAS DE CAPACITANCIA

Los cuerpos que poseen cargas eléctricas opuestas se atraen entre sí por fuerzas cuya magnitud se calcula mediante la ley de Coulomb. Para ayudar a representar esta fuerza, se puede calcular un campo eléctrico y un voltaje entre esos cuerpos. Se ha observado que, para cada configuración particular de dos cuerpos cargados en la que la forma y la separación de dichos cuerpos permanecen fijos, la relación de carga (q) a voltaje (v) que existe entre ellos es una constante. Esta observación se expresa matemáticamente como

$$C=q/v \quad (1.1)$$

A la constante C se le llama la capacitancia de la configuración geométrica en particular. Planteándolo de otro modo, la capacitancia es la cantidad de carga que la configuración puede almacenar por cada volt de diferencia de potencial que existe entre los cuerpos **figura 1.1**

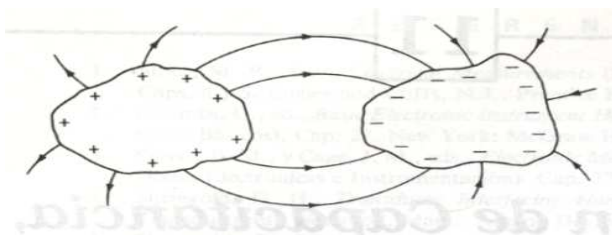


Fig. 1.1

Dos cuerpos separados por una distancia fija (y que no están conectados mediante algún conductor) almacenarán una cantidad constante de carga por cada volt de diferencia de potencial aplicada.

Si se construye un elemento de circuito de modo que posea deliberadamente un valor determinado de capacitancia, a ese elemento se le llama capacitor. La unidad de capacitancia es el farad (F) y se expresa como

$$1 \text{ farad (F)} = \frac{1 \text{ coulomb de carga almacenada (C)}}{1 \text{ volt (V)}} \quad (1.2)$$

Un coulomb es una cantidad muy grande de carga y la cantidad de carga almacenada por cada volt en la mayoría de los capacitores reales es mucho más pequeña que un coulomb. Esto hace que el farad sea demasiado inadecuado para describir la capacitancia de los capacitores reales. Como resultado, es más común ver la capacitancia de configuraciones particulares y capacitores expresadas en picofarads(1pF), o en microfarads(1μF).

El símbolo de circuito que se emplea para el capacitor es, ya sea

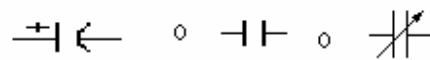


Fig.1.2. Símbolos de capacitores

este último representa a los elementos variables. Se emplea la configuración especial de dos placas de metal paralelas separadas por una distancia muy pequeña para construir casi todos los elementos de circuito que se utilizan como capacitores. Estos capacitores se llaman capacitores de placas paralelas, y en la **figura 1.3**. se muestra un ejemplo de su forma

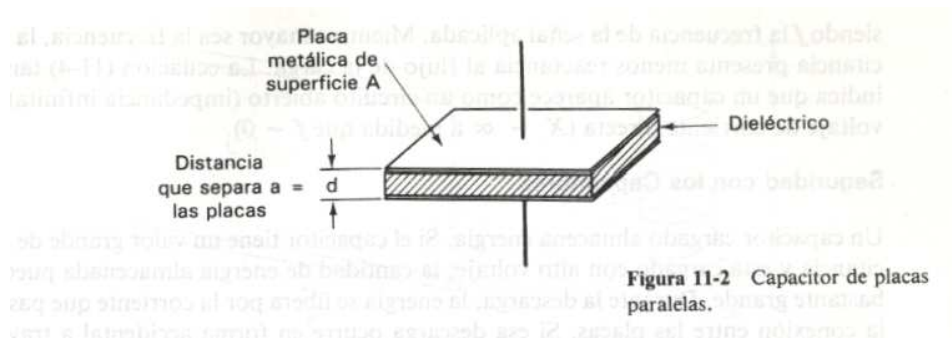


Fig. 1. 3 Capacitor de placas paralelas.

El valor de la capacitancia para estructuras de placas paralelas se calcula mediante la ecuación

$$C = \frac{K\epsilon_0 A}{d} \quad (1.3)$$

en donde **K** es la constante dieléctrica, **ε₀** es una constante cuyo valor es **ε₀ = 8.85x10⁻¹² F/m**, **A** es la superficie de cada una de las placas sobrepuestas (en metros cuadrados) y **d** es la distancia entre las placas (en metros). De la ecuación (1.3) se puede ver que para aumentar el valor de la capacitancia de una estructura de placas paralelas, se puede: ya sea aumentar su superficie, el valor de la constante dieléctrica o disminuir la distancia entre las placas.

También puede existir capacitancia entre conductores de otras formas y separaciones no paralelas (por ejemplo como se ve en la figura 1.1). Cuando se tienen configuraciones con forma irregular que originan capacitancias, se deben emplear técnicas de cómputo más elaboradas que la ecuación (1.3) para calcular sus valores de capacitancia resultantes.

1.1 Dieléctricos

Un dieléctrico es un material aislante colocado entre las placas de un capacitor, para aumentar el valor de la capacitancia. Se pueden obtener muchos valores diferentes de capacitancia a partir de dos placas paralelas del mismo tamaño y separación utilizando diferentes dieléctricos.

La constante dieléctrica **K** que se presentó en la ecuación (1.3) es el parámetro que indica en cuánto puede aumentar la capacitancia, en relación con el espacio vacío, un dieléctrico particular introducido entre las placas del capacitor.

1.2 Reactancia capacitiva

Si el voltaje entre las placas de un capacitor varía con el tiempo, se ve de la ecuación (1.1) que el voltaje cambiante origina un cambio en la carga almacenada en el capacitor. Este almacenamiento de carga debe ir acompañado de un flujo de carga, la corriente requerida es directamente proporcional a la velocidad de cambio del voltaje del capacitor. Sin embargo, el voltaje a través de un capacitor no puede cambiar instantáneamente ya que un cambio de voltaje discontinuo instantáneo necesitaría de una corriente infinita. Así, el capacitor reacciona contra los cambios de voltaje a través

de él; o sea presenta una impedancia o reactancia capacitiva, X_c . La reactancia capacitiva tiene unidades de ohms (Ω) y depende de la frecuencia de acuerdo con la siguiente ecuación

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C} \quad (1.4)$$

siendo f la frecuencia de la señal aplicada. Mientras mayor sea la frecuencia, la capacitancia presenta menos reactancia al flujo de la carga. La ecuación (1.4) también indica que un capacitor aparece como un circuito abierto (impedancia infinita) a un voltaje de corriente directa ($X_c \rightarrow \infty$ a medida que $f \rightarrow 0$).

1.3 Capacitancia Parásita.

Como se hizo notar anteriormente, la capacitancia puede existir y de hecho existe entre conductores que están a distintos potenciales, sin importar su forma. Se tienen varias configuraciones de elementos de circuito y de puntas de prueba que con frecuencia presentan esa capacitancia. Generalmente, el efecto de capacitancia no es planeado y es indeseable porque aparece como un elemento adicional de capacitancia en un circuito o sistema. Por este motivo, es usual llamarle capacitancia parásita. A veces los efectos de la capacitancia parásita son pequeños y se pueden despreciar; otras veces, los efectos pueden ser relativamente grandes y pueden originar cambios significativos en la conducta de un circuito. Por ejemplo, a altas frecuencias la capacitancia parásita puede desviar grandes cantidades de energía de señal que deberían transferirse en realidad a otros puntos en el circuito. Cuando la capacitancia parásita es significativa, se debe reducir o incluir su magnitud en el análisis del circuito o diseño del sistema de medición. En la **figura 1.4** se muestran ejemplos de situaciones que pueden dar lugar a capacitancia parásita.

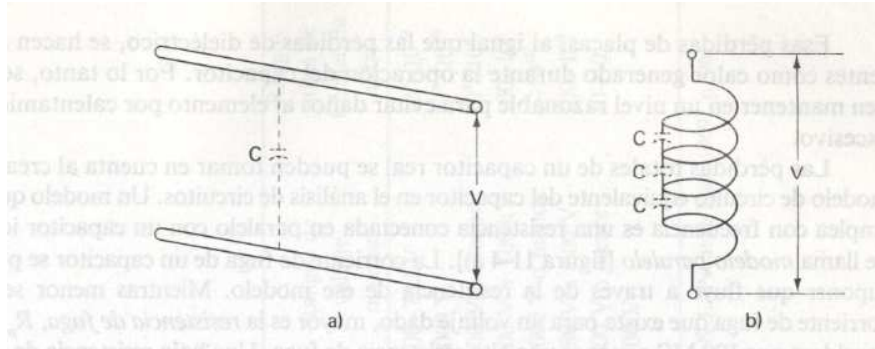


Fig. 1.4 Efectos de la capacitancia parásita: a) capacitancia parásita entre dos conductores de corriente a diferentes potenciales; b) capacitancia parásita que surge entre las espiras vecinas de una bobina.

1.4 Pérdidas en circuitos con capacitores

El factor de disipación o pérdida, D , depende de la frecuencia. Se define este factor para el modelo paralelo como la relación de la conductancia ($G = 1/R_p$) por la reactancia capacitiva ($X_c = 1/wC_p$) de un capacitor.

$$D = \frac{1}{wC_p R_p} \quad (1.5)$$

Aquí w es la frecuencia del voltaje aplicado y C_p y R_p son los valores de los elementos del modelo paralelo medidos a la frecuencia aplicada. Para el modelo en serie, D se calcula mediante la relación de la conductancia ($G = R_s$) entre la reactancia capacitiva ($X_c = 1/wC_s$) de un capacitor.

$$D = wC_s R_s \quad (1.6)$$

siendo C_s y R_s los valores de los elementos de la capacitancia y de resistencia de este modelo, medidos a la frecuencia aplicada. El factor de disipación también se define como la relación de la cantidad de energía disipada por cada medio ciclo con respecto a la energía promedio almacenada por cada medio ciclo. En cierto sentido, es una medida de la eficiencia de un capacitor para almacenar y después descargar energía. Los valores típicos de D para capacitores comerciales van desde 0.001 hasta 0.0001. Mientras menor sea el valor, mejor será el capacitor. Algunos fabricantes emplean el término *factor de calidad* y no el de *factor de disipación*. Estos términos simplemente son recíprocos entre sí.

En un capacitor ideal, D sería cero si R_p fuera infinito o si R_s fuera cero. En un capacitor real, mientras mayor sea el valor de D , mayor será la pérdida general. Los valores de D varían desde aproximadamente 0.1 en los capacitores electrolíticos hasta aproximadamente 10^{-4} en los de poliestireno.

Además de las pérdidas de un capacitor, hay otros parámetros que representan una desviación del comportamiento eléctrico con respecto al de la estructura ideal de un capacitor. El más importante de ellos es la *ruptura del dieléctrico*. Cuando el voltaje a través de un dieléctrico rebasa un determinado valor, las ligaduras que restringen a los electrones unidos a los átomos del material se rompen violentamente. Esto ocasiona que pase una gran corriente a través del capacitor y a esto se le llama *ruptura del dieléctrico*. El valor del campo eléctrico al cual se produce la ruptura se le llama *campo eléctrico máximo o de ruptura*.

El voltaje máximo que puede resistir un capacitor dado es el producto de la fuerza dieléctrica y del espesor de su capa dieléctrica. A esto se le llama *voltaje de ruptura del capacitor*.

1.5 Medición de capacitancia

Circuitos de Puente para Medir Valores de Capacitancia

La condición de equilibrio en el puente Wheatstone es

$$R_x R_1 = R_2 R_3 \quad (1.7)$$

Siendo R_x el valor desconocido de la resistencia y R_1 , R_2 y R_3 los valores conocidos. Si se sustituyen las resistencias del puente de Wheatstone por impedancias de naturaleza resistiva y reactiva (figura 1.5), y se aplica un voltaje de corriente alterna entre los puntos A y B del circuito, la ecuación de equilibrio es, en general,

$$Z_x Z_1 = Z_2 Z_3 \quad (1.8)$$

Como cualquier impedancia, Z se puede expresar como un número complejo

$$Z = R + jX \quad (1.9)$$

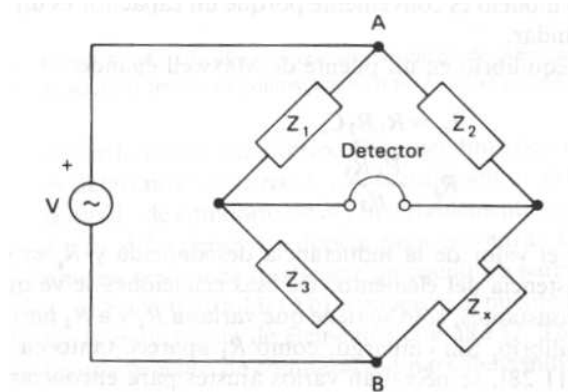


Fig. 1.5 Circuito puente de impedancia de corriente alterna.

entonces no es tan fácil deducir una Z_x desconocida a partir de la condición de equilibrio como lo es encontrar R_x en un puente puramente resistivo. En efecto, para lograr una condición de cero, es necesario especificar dos condiciones que se igualen: una para la parte resistiva de Z_x y una para la parte reactiva

$$Z_x = R_x + jX_x = \frac{Z_2 Z_3}{Z_1} = \text{Re}\left(\frac{Z_2 Z_3}{Z_1}\right) + j \text{Im}\left(\frac{Z_2 Z_3}{Z_1}\right) \quad (1.10)$$

Generalmente se emplean dos tipos de circuitos de puentes de capacitancia para los valores de la capacitancia y los factores de disipación de un capacitor. Si el factor de disipación de un capacitor es pequeño ($0.001 < D < 0.1$), se emplea el *puente de comparación de capacitancia en serie* **figura 1.6.a** . Si D es mayor ($0.05 < D < 50$), se emplea el puente de comparación de capacitancia en paralelo **figura 1.6.b**.

Para el puente de comparación de capacitancia en serie, las impedancias de la ecuación (1.10) son $Z_1 = R_1$, $Z_2 = R_2$, $Z_3 = R_3 - j(1/\omega C_3)$ y $Z_s = R_s - j(1/\omega C_s)$. Sustituyendo esas impedancias en la ecuación (1.10) y separando las partes imaginarias y reales, se tiene que cuando se establece el equilibrio se calculan R_s y C_s mediante las siguientes ecuaciones:

$$R_s = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad \text{y} \quad C_s = C_3 \frac{R_1}{R_2} \quad (1.11)$$

C_s es el valor de la capacitancia que se desea determinar.

Nótese que si se escogen a R_2 y C_3 como cantidades fijas, y a R_3 y R_1 como los elementos variables, se puede lograr una condición nula variando R_3 y R_1 y a continuación calcular R_3 y C_s . En este circuito los únicos elementos variables son resistencias, y no hay que ajustar elementos reactivos para lograr la condición de equilibrio. Esto ayuda al usuario a acercarse rápidamente al valor cero. Además, a C_s , el puente también indica el factor de disipación (D). Por lo general, se calibra un indicador en el medidor de modo que se calcula en forma automática el valor de D y se indica directamente.

La condición de equilibrio para el puente de comparación de capacitancia en paralelo es

$$R_p = \frac{R_1 R_3}{R_2} \quad \text{y} \quad C_p = \frac{C_1 R_2}{R_3} \quad (1.12)$$

En este puente, R_2 y C_1 son fijos y R_3 y R_1 son variables. Tanto C_p como D se leen directamente en los ajustes del puente en el estado de equilibrio.

Para medir capacitores en circuitos donde el ángulo de fase es casi 90° ; el puente de Schering da lecturas más exactas que los circuitos de comparación de capacitancia. Este puente se muestra en la **figura 1.6.c**

Emplea una red RC en paralelo (R_1 y C_1) para Z_1 , una resistencia R_2 para Z_2 y una capacitancia C_3 para Z_3 . Por lo tanto, para un elemento desconocido en el lugar de Z_4 , las condiciones de equilibrio para el puente de Schering son

$$R_x = \frac{R_2 C_1}{C_3} \quad \text{y} \quad C_x = \frac{R_1 C_3}{R_2} \quad (1.13)$$

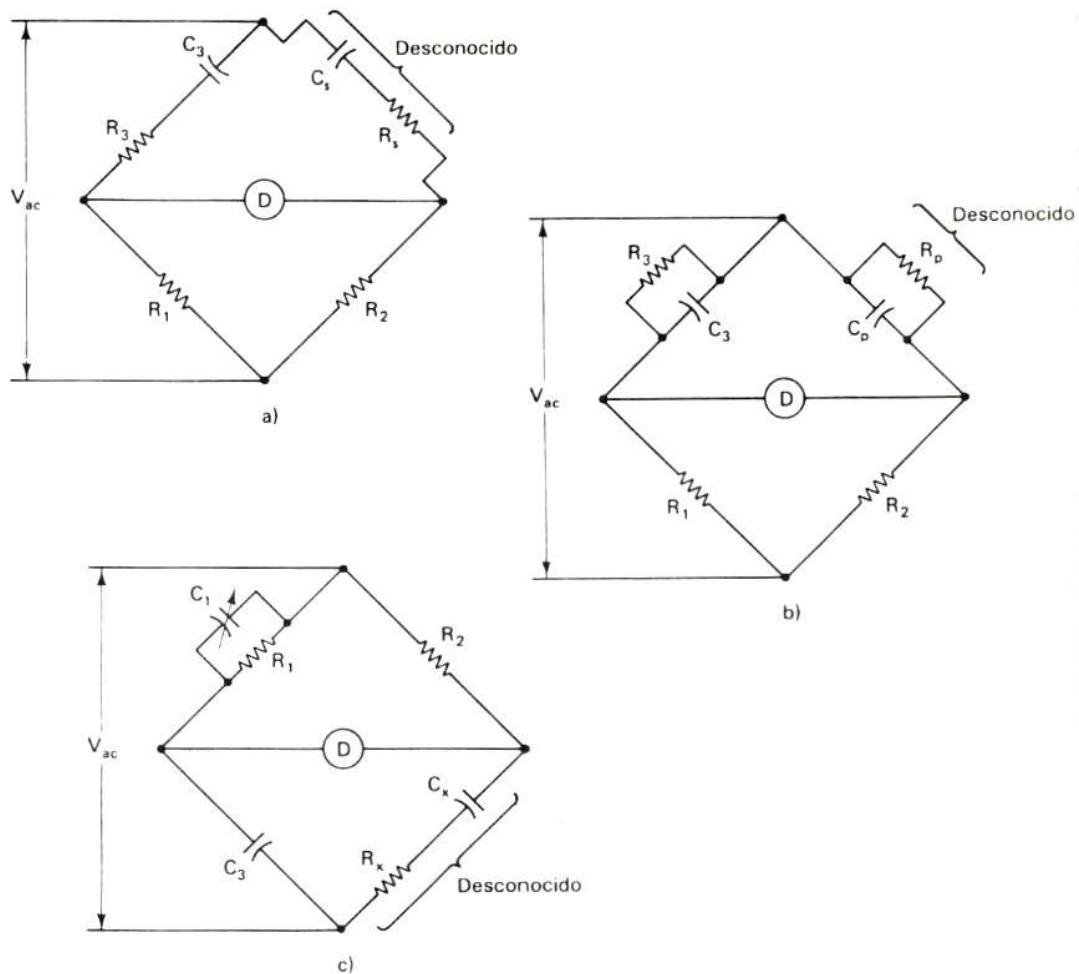


Fig. 1. 6. Circuitos puente para medición de capacitancia: a) puente de comparación en serie; b) puente de comparación en paralelo; c) puente de Schering

CAPÍTULO 2

2. MEDIDAS DE CONDUCTIVIDAD

El transporte de la corriente a través de conductores metálicos es realizado por el movimiento de los electrones del metal, bajo la acción de una diferencia de potencial aplicada. En este caso, por tratarse de un solo tipo de transportador (electrones), puede considerarse al *conductor electrónico* como homogéneo, y para él es válida la Ley de Ohm

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.a)$$

donde R es la resistencia del conductor (en Ω u ohm), V es la diferencia de potencial aplicada (en V) e I es la intensidad de corriente que circula a través del conductor (en A).

En el caso de las disoluciones electrolíticas, la corriente es transportada por los iones de la disolución, los cuales se mueven en distintos sentidos (de acuerdo con el signo de su carga) bajo la acción del campo eléctrico producido por la diferencia de potencial aplicado. En este caso, el *conductor iónico* también puede considerarse como homogéneo, y al igual que el conductor electrónico, seguirá la Ley de Ohm .

Esta propiedad de conducir la corriente que poseen las disoluciones electrolíticas es la base de la *Iónica*, una de las áreas del conocimiento dentro de la Electroquímica, y una de las primeras en desarrollarse.

2.1 Resistencia, conductancia y conductividad

En ausencia de un campo eléctrico, los iones que constituyen un conductor iónico se encuentran en un constante movimiento al azar, de manera que la distancia efectiva recorrida por los iones en su conjunto es nula. Este movimiento se origina por acción de fuerzas térmicas y de convección. Ahora bien, cuando se somete a dichos iones a la acción de un campo eléctrico (por la aplicación de una diferencia de potencial), los mismos se moverán, en un sentido u otro, de acuerdo con su carga, fenómeno que se conoce como *migración iónica*.

En estas condiciones, se puede considerar a la disolución como un conductor electrónico, que sigue la Ley de Ohm.

Considerando un cierto volumen de una solución (Figura 2.1), la resistencia medida R

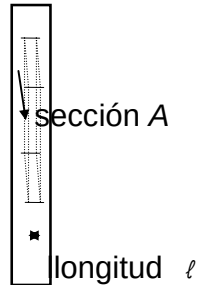


Fig. 2.1 Porción de disolución

correspondiente vendrá dada por:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} \quad (2.1)$$

donde ρ es la resistividad (en ohm.m) de la solución, A es el área a través de la cual se produce el flujo eléctrico (en m²) y ℓ es la distancia entre las dos planos considerados (en m).

Se define a la *conductancia electrolítica* (G) como la magnitud recíproca de la resistencia:

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.2)$$

cuya unidad en el SI es el Siemens (S)•

Combinando las ecuaciones 2.1 y 2.2 se obtiene:

$$G = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{A}{\ell} = \sigma \frac{A}{\ell} \quad (2.3)$$

donde σ es la conductividad de la disolución (en S.m⁻¹), definida como la inversa de la resistividad.

De acuerdo con esto, la conductividad de una disolución es la conductancia de la misma encerrada en un cubo de 1 cm³ ($\ell = 1\text{cm}$, $A = 1\text{cm}^2$).

2.2 Conductancia molar y equivalente

La conductividad es una propiedad que mide la facilidad con que los portadores de carga migran bajo la acción de un campo eléctrico. Para el caso de un conductor iónico, son los cationes y los aniones de la misma los que intervienen en el transporte de la corriente y por lo tanto, el valor de conductividad dependerá del número de iones presentes. Para normalizar la conductancia, respecto a las cantidades de iones presentes se introduce una nueva magnitud, la *conductancia molar* (Λ_m), que se define como:

$$\Lambda_m = \frac{\sigma}{C} \quad (2.4)$$

donde C es la concentración del electrolito.

Generalmente la *conductancia molar* se expresa en ($\text{S}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{eq}^{-1}$), por lo que habrá que introducir un factor de corrección para hacer compatibles las unidades, ya que la $[\sigma]$ se expresa en ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y la concentración en ($\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$). Considerando que $1\text{L} = 1000\text{ cm}^3$, la ecuación 2.4 se convierte en:

$$\Lambda_m = 1000 \cdot \frac{\sigma}{C} \quad (2.5)$$

donde el factor 1000 da cuenta del cambio de unidades de L (dm^3) a cm^3 .

Debido a que algunos iones poseen carga múltiple, la cantidad de corriente que pueden transportar (para un tamaño iónico dado) es mayor.

Nuevamente, con el fin de normalizar la medida, se introduce la magnitud *conductancia equivalente* (Λ_{eq}), que considera a todos los iones como monocargados, lo que permite la comparación de sus valores. Debemos recordar que en el área de la *iónica*, el concepto de equivalente se refiere exclusivamente a la carga de la especie considerada, y no toma en cuenta la reacción en la que toma parte el ión.

La relación entre Λ_{eq} y Λ_m es:

$$\Lambda_{eq} = \frac{\Lambda_m}{z} \quad (2.6)$$

donde z representa la carga de la especie considerada.

2.3 Variación de la conductividad con la concentración

La conductancia molar depende de la concentración del electrólito. Sería independiente de la misma si la conductividad fuese directamente proporcional a la concentración, pero esto no es así debido a que la interacción entre los iones es disociativa a concentraciones bajas y asociativa a concentraciones altas.

En la Figura 2.2 se muestra la variación de la conductividad con la concentración para distintos electrólitos. El comportamiento general es el mismo para todos los electrólitos. Existe un aumento inicial de la conductividad a medida que aumenta la concentración hasta un valor máximo, lo que se explica por existir un mayor número de iones dispuestos para la conducción. A partir de un determinado valor de concentración, la conductividad comienza a disminuir, debido a que las interacciones asociativas entre los iones dificultan la conducción de la corriente.

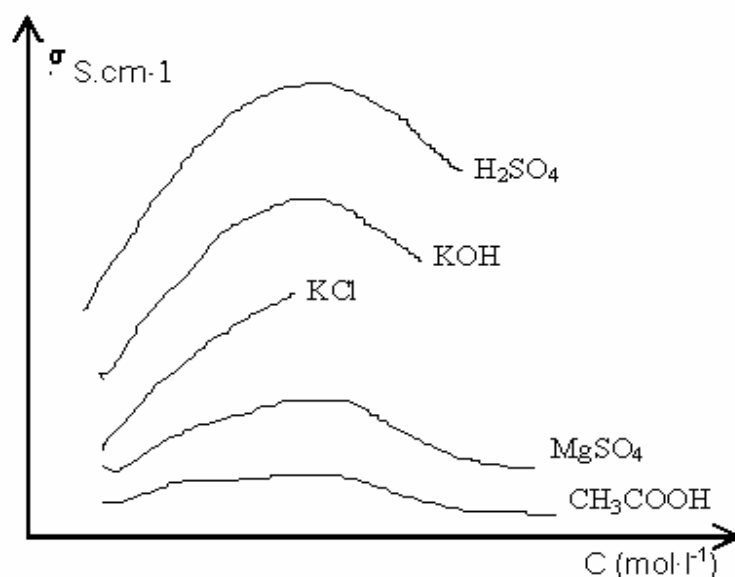


Fig. 2.2 Variación de la conductividad con la concentración para distintos electrólitos

2.4 Variación de la conductancia molar con la concentración: Ley de Kohlrausch

Las medidas realizadas por Kohlrausch de conductancia molar para diferentes electrólitos mostraron la existencia de dos tipos de comportamientos. Los mismos se ejemplifican en la Figura 2.3 para el KCl y el ácido acético (HAc).

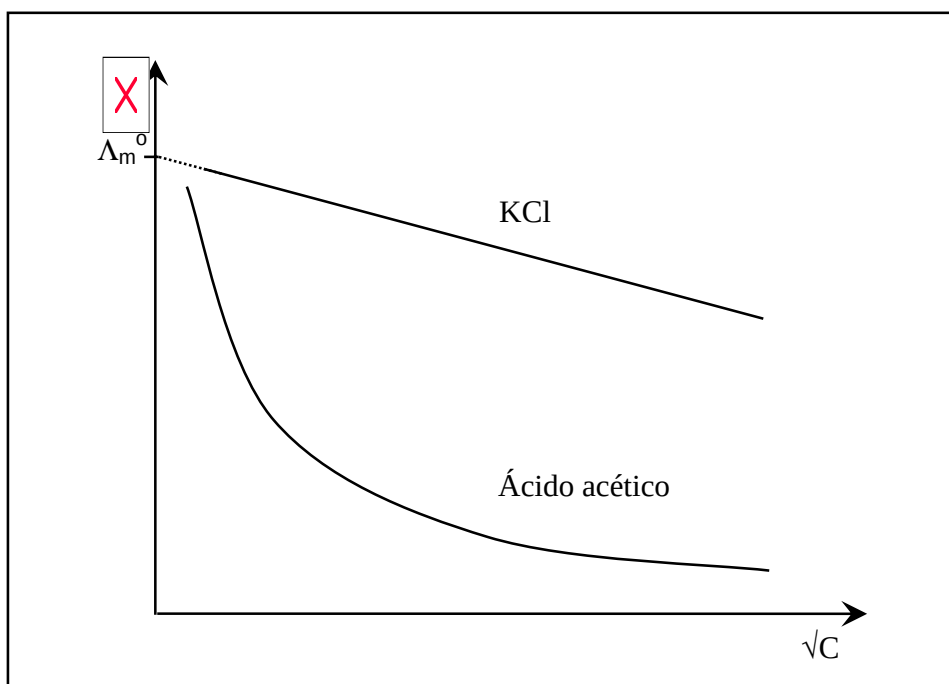


Fig. 2.3 Variación de la conductancia molar con la raíz de la concentración

Por un lado están los electrolitos verdaderos o fuertes, como el KCl, el H_2SO_4 , etc., muestran una disminución lineal de la conductancia molar con la raíz cuadrada de la concentración. Por otro lado, los electrolitos potenciales o débiles, como el ácido acético, el agua, etc., muestran valores máximos de conductancia molar cuando $C \rightarrow 0$ (dilución infinita), pero disminuyen rápidamente a valores bajos cuando aumenta la concentración.

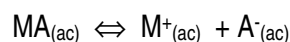
Los electrolitos verdaderos son sustancias que están completamente ionizadas en disolución, por lo que la concentración de iones dispuestos para la conducción es proporcional a la concentración del electrolito. Sin embargo, existe cierta relatividad en la denominación *verdadero* y *potencial* ya que la ionización depende fuertemente de la naturaleza del disolvente.

Para los electrolitos verdaderos, Kohlrausch demostró que:

$$\Lambda_m = \Lambda_m^0 - A \cdot \sqrt{C} \quad \text{Ley de Kohlrausch} \quad (2.7)$$

donde Λ_m^0 es la *conductancia molar límite* (correspondiente a la ordenada en el origen de la recta de la Figura 2.3) y A es un coeficiente (la pendiente de la gráfica de la Figura 2.3) que depende de la naturaleza del electrólito, del disolvente y de la temperatura.

La pronunciada dependencia entre la conductancia molar y la concentración para los electrólitos débiles se debe al desplazamiento del equilibrio:



hacia la derecha cuando $C \rightarrow 0$. La conductividad depende del número de iones presentes en disolución y, por ende, del grado de disociación α del electrólito.

2.5 Ley de la migración independiente de los iones

Kohlrausch también demostró que Λ_m^0 , para cualquier electrólito, se puede expresar como la suma de las contribuciones de las conductancias iónicas de cada una de las especies constituyentes. Esta relación es conocida comúnmente como la *Ley de las Migraciones Independientes de los Iones*:

$$\Lambda_m^0 = z_+ \cdot \lambda_+^0 + z_- \cdot \lambda_-^0 \quad (2.8)$$

donde λ_+ y λ_- a las conductancias molares de los cationes y los aniones respectivamente y z_+ y z_- es la carga de los cationes y aniones respectivamente por fórmula unidad del electrólito. Los valores de λ_+^0 y λ_-^0 se encuentran tabulados (Tabla 2. 1).

Tabla 2.1 Conductancias molares a dilución infinita (λ^0 , S.cm².mol⁻¹) para distintos iones a 25°C

Catión	λ_+^0	Anión	λ_-^0
H ⁺	349.6	OH ⁻	199.1
Na ⁺	50.1	Cl ⁻	76.4
K ⁺	73.5	Br ⁻	78.1
Zn ⁺²	105.6	SO ₄ ⁻²	160.0

Cálculos

La conductancia de una mezcla de acuerdo con la *Ley de las Migraciones Independientes de los Iones* puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{1}{k} \sum_i C_i \cdot \lambda_i^0 \quad (2.9)$$

donde k es la constante de la celda y C_i y λ_i^0 representan la concentración y la conductancia molar de la especie iónica respectivamente. Nótese que este cálculo es posible gracias a que la conductancia es una propiedad aditiva.

2.6 MEDIDA DE LA CONDUCTANCIA

2.6.1 Fuentes de poder y puentes de resistencia

La medida de la resistencia eléctrica de una solución es la base para la medida de la conductancia de la misma. Para ello, se utiliza una celda de conductividad conectada a un puente de Wheatstone adaptado para funcionar con una fuente de corriente alterna, el *puente de Kohlrausch*.

El puente descrito en la Figura 2.4 consta de un juego de 4 resistencias (una de ellas la resistencia de la disolución), una fuente de corriente alterna y un galvanómetro (G). La resistencia variable R_2 se modifica su valor hasta que la lectura en el galvanómetro sea nula. Posteriormente aplicando las leyes de Kirchhoff, con el valor de R_2 y conociendo R_1 y R_4 se puede calcular R_3 (resistencia de la disolución).

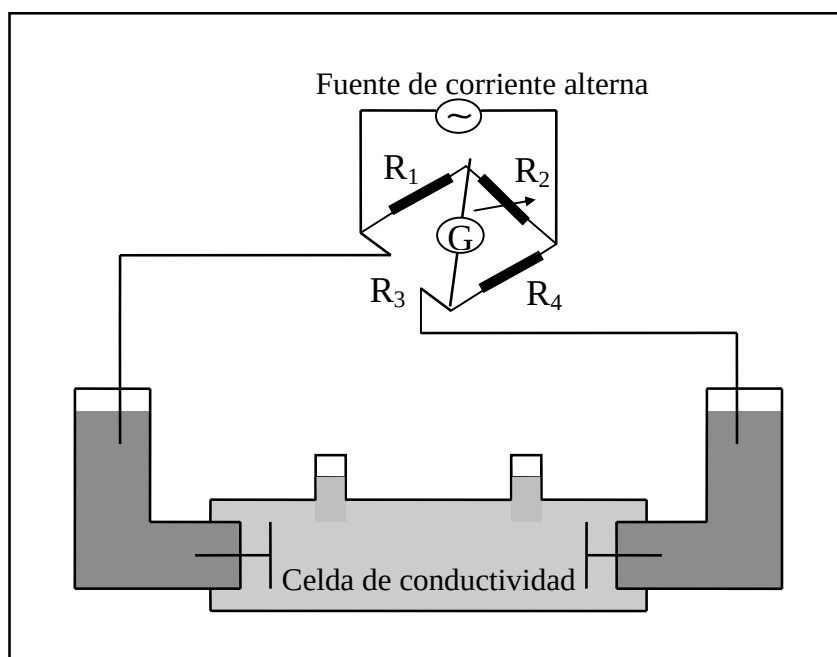


Fig. 2. 4 Puente de Kohlrausch para la medida de la resistencia de una disolución

La utilización de la corriente alterna no es arbitraria. Si se utilizara una corriente continua se produciría polarización de los electrodos (acumulación de carga en las capas de disolución en contacto con los electrodos) y electrólisis de la solución. Sin embargo, una corriente alterna con una frecuencia mayor que 20 kHz evita estos fenómenos, pues la carga acumulada durante la primera mitad del ciclo se elimina en la otra mitad.

2.6.2 Celdas

Las celdas pueden tener diferentes configuraciones físicas dependiendo de las necesidades de la medida, que pueden incluir consideraciones acerca de su volumen o espacio.

El valor de constante k de la celda caracteriza a la misma. Las celdas con valores de constante en el entorno de 1 cm^{-1} usualmente poseen electrodos pequeños y espaciados, mientras que las celdas con valores de constante en el entorno de 0.1 cm^{-1} poseen electrodos grandes y poco espaciados.

Como k es un factor que refleja una configuración física particular de la celda, el valor observado de la conductancia debe ser multiplicado por el valor determinado de la constante de la celda para obtener la conductividad. Por ejemplo, para una lectura de conductancia de $200 \text{ } \mu\text{S}$ usando una celda de constante 0.1 cm^{-1} el valor de conductividad será de $200 \times 0.1 = 20 \text{ } \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$.

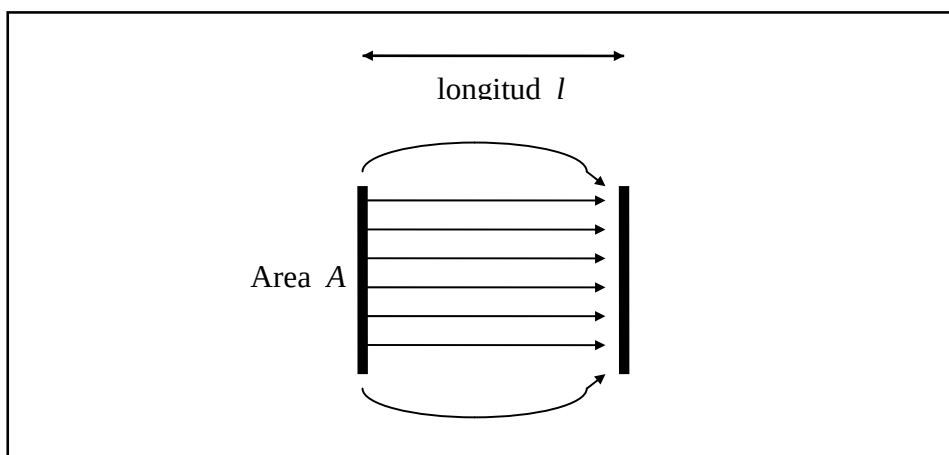


Fig. 2.5 Líneas de campo eléctrico entre electrodos paralelos.

2.6.3 Determinación de la constante de celda

En teoría, y según la definición vista una celda de conductividad de valor $k = 1 \text{ cm}^{-1}$ estaría formada por dos electrodos de 1 cm^2 de superficie, separados una distancia de 1 cm . Sin embargo, el valor de la constante de la celda no queda determinado exclusivamente por los valores de ℓ y A , ya que la superficie de los electrodos no es perfectamente lisa y porque no todas las líneas de campo eléctrico son perfectamente perpendiculares a la superficie (efecto borde). Como esto no se conoce *a priori*, lo que se hace es calibrar la celda con una solución de conductividad conocida.

El efecto del campo eléctrico está esquematizado en la Figura 2.5. Entre ambos electrodos se establece un campo eléctrico que provoca el movimiento de los iones de acuerdo con sus cargas. Sin embargo en los bordes de los electrodos, las líneas de campo eléctrico no son perpendiculares a la superficie del electrodo, lo que implica una mayor área efectiva, en una cantidad ΔA . De esta manera, la constante de la celda vendrá dada por:

$$k = \frac{\ell}{A + \Delta A} \quad (2.10)$$

Como normalmente no es posible medir el aumento del área debido a los efectos de borde, el valor de k no puede ser determinado teóricamente. Para poder determinar experimentalmente (*calibrar*) el valor de k se mide la conductancia de una disolución patrón de conductividad conocida. El valor de k vendrá dado por 2.3 y 2.10 cuando se desprecia ΔA :

$$k = \frac{\sigma}{G} \quad (2.11)$$

Para la calibración se usan disoluciones de KCl en agua ultrapura de concentración exactamente conocida, cuyos valores de conductividad se encuentran tabulados (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 conductividades de disoluciones de KCl a 25°C

Concentración de KCl (g/L)	Conductividad a 25°C (S.cm ⁻¹)
0.74526	0.0012205
7.4191	0.012856
71.135	0.11134

2.6.4 Influencia de la temperatura

La conductividad de una disolución a una concentración electrolítica determinada cambia con la temperatura. La relación entre el cambio en la conductividad en función de la temperatura se describe en términos del *coeficiente de temperatura* para la disolución. Estos coeficientes de temperatura varían con la naturaleza y concentración del electrólito, como se deduce de la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Coeficientes de temperatura entre 25 y 50°C (% de cambio de conductividad por °C).

Disolución	% cambio / °C
agua ultrapura	4.55
KCl	2.01
NaCl	2.12
5% NaOH	1.7
Amonio diluido	1.88
10% HCl	1.32
5% H ₂ SO ₄	0.96
98% H ₂ SO ₄	2.84

Usualmente, los conductímetros tienen la capacidad de compensar las medidas por los cambios de temperatura. Esta compensación puede realizarse manualmente o estar fija en un valor usual (p.ej. 2.1%), dependiendo del equipo. Por definición, un valor de conductividad compensado por cambio de temperatura es la conductividad que tendría la disolución a la temperatura de referencia (que puede ser distinta de la temperatura de trabajo). Esta temperatura de referencia puede ser 20 o 25°C, y cuanto más cercana sea la temperatura de medida a la temperatura de referencia, menor será el error cometido.

2.6.5 La variación de la conductancia equivalente con la temperatura .

$$\Lambda_o(T) = \Lambda_o(T_o) [1 + b (T - T_o)] \quad (2.12)$$

donde

$\Lambda_o(T)$ = conductancia equivalente del soluto a dilución infinita y temperatura t ,

T_o = Temperatura inicial considerada.

T = Temperatura final considerada

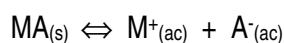
$\Lambda_o(T_o)$ = conductancia equivalente estándar,

b = constante.

b es una constante, que en el caso de las sales ordinarias vale 0.022 a 0.025, y la de los ácidos 0.016 a 0.019. Análoga conducta es exhibida por las concentraciones equivalentes de los electrolitos fuertes en concentraciones finitas. Sin embargo, con los débiles la variación de Λ con la temperatura no es tan regular, porque en ellos no sólo cambian las velocidades de los iones y las fuerzas interiónicas, sino también el grado disociación.

2.7 Determinación de la solubilidad y el K_{ps} de sales insolubles

Supongamos que queremos determinar la solubilidad (S) y el K_{ps} (constante del producto de solubilidad) de la sal insoluble MA en agua a 25°C. El equilibrio de solubilidad para dicha sal puede escribirse como:



La solubilidad vendrá dada por la concentración de los iones M^+ y A^- en disolución, la que, por tratarse de una sal insoluble, es muy pequeña.

Como de acuerdo a la ecuación 2.5:

$$C_{ion} = 1000. \frac{\sigma_{ion}}{\Lambda_m} \quad (2.13)$$

donde $C_{ion} = S$. Por otro lado, σ_{ion} puede expresarse en función de las conductividades de la disolución y del agua:

$$\sigma_{ion} = \sigma_{sol} - \sigma_{agua} \quad (2.14)$$

por lo tanto relacionando las ecuaciones 2.13 y 2.14 implica:

$$S = 1000. \frac{(\sigma_{sol} - \sigma_{agua})}{\Lambda_m} \quad (2.15)$$

Como la disolución es muy diluida en sus iones, la conductancia molar puede ser sustituida por su valor a dilución infinita:

$$S = 1000. \frac{(\sigma_{sol} - \sigma_{agua})}{\Lambda_m^0} = 1000. \frac{(\sigma_{sol} - \sigma_{agua})}{\sum_i \lambda_i^0} \quad (2.16)$$

En resumen, midiendo las conductividades de la disolución de una sal insoluble y la del agua en que se preparó dicha solución, y conociendo los valores tabulados de las conductancias iónicas a dilución infinita, se puede calcular la solubilidad de una sal insoluble.

Recordando que, para una sal insoluble del tipo MA, el K_{ps} viene dado por

$$K_{ps} = S^2 \quad (2.17)$$

se puede demostrar sencillamente que aplicando la ecuación 2.15 en 2.17 implica:

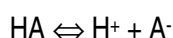
$$K_{ps} = \left[1000. \frac{(\sigma_{sol} - \sigma_{agua})}{\Lambda_m^0} \right]^2 \quad (2.18)$$

2.8 Determinación de la constante de disociación de ácidos débiles

A cierta concentración, un electrólito puede estar sólo parcialmente disociado. En 1887, Arrhenius sugirió que el *grado de disociación* α de un electrólito podía calcularse como:

$$\alpha = \frac{\Lambda_{\text{eq}}}{\Lambda_0} \quad (2.19)$$

Para un ácido débil dado HA de concentración $C \text{ mol.L}^{-1}$:



la constante de equilibrio para la disociación ácida es:

$$K_{HA} = \frac{[H^+].[A^-]}{[HA]} \quad (2.20)$$

Las concentraciones de las especies involucradas pueden escribirse en función del grado de disociación α , teniendo en cuenta que por cada mol de HA , se producen α moles de H^+ y A^- . Entonces:

$$K_{HA} = \frac{(C\alpha).(C\alpha)}{C.(1-\alpha)} = \frac{C\alpha^2}{(1-\alpha)} \quad (2.21)$$

Por lo tanto 2.21 se transforma en:

$$K_{HA} = \frac{C\Lambda^2}{\Lambda_0(\Lambda_0 - \Lambda)} \quad (2.22)$$

Reordenando la ecuación 2.22 se obtiene:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{K_{HA} \cdot \Lambda_0^2} \cdot (\Lambda \cdot C) + \frac{1}{\Lambda_0} \quad (2.23)$$

Por lo tanto, trazando la gráfica $(1/\Lambda)$ vs. $(\Lambda \cdot C)$, se puede obtener Λ_0 de la ordenada en el origen y K_{HA} de la pendiente.

CAPÍTULO 3

3. MEDIDAS DE TEMPERATURA

La medición de la temperatura de un cuerpo depende del establecimiento de equilibrio termodinámico entre el cuerpo y el dispositivo empleado para percibir aquélla, es decir, un termómetro de bulbo o un pirómetro de termopar. En la práctica, raramente se consigue esta condición, ya que es difícil establecer instantáneamente un equilibrio completo, por lo que debe tenerse mucho cuidado en la elección de un método que se acomode al problema, con objeto de obtener condiciones satisfactorias para la medición de la temperatura. Los dispositivos sensores de temperatura poseen características térmicas que dependen en gran medida de su tamaño, forma y de los materiales de que están contruidos; estas características, por ejemplo, la gran capacidad calorífica, afectan a su facultad de conducir, radiar o reflejar el calor desde sus alrededores. La introducción de un sensor de temperatura en un cuerpo tiende a modificar las condiciones térmicas en el punto de aplicación, modificándose el cuerpo en virtud de cualesquiera agujeros taladrados, o por la inserción de receptáculos protectores para acomodar los instrumentos perceptores de la temperatura.

En la mayoría de los casos, el sensor va conectado a un instrumento registrador mediante un sistema intermedio, tal como un tubo de Bourdon o conductores eléctricos, a través de los cuales se transmite la señal. El sistema intermedio y el registrador pueden estar sometidos a variaciones de temperatura u otras, por lo que corrientemente se incorporan sistemas de compensación para reducir o eliminar los errores.

El calor se transmite desde un lugar a otro por conducción, convección y radiación, siendo necesario tener esto en cuenta cuando se elija un método de medición de temperatura.

3.1 Conducción

El flujo de calor a lo largo de un conductor es análogo al de la electricidad. El calor fluye por un conductor siempre que éste está sometido a un gradiente de temperatura. Algunas sustancias son buenos conductores, por ejemplo, el vidrio, los plásticos, los óxidos. El gradiente de temperatura a

través de un mal conductor cae bruscamente; así, los malos conductores resultan buenos aisladores. Con cierta aproximación, las conductibilidades de los metales son del orden de mil veces las de otros sólidos o líquidos, excepto el mercurio, que es un metal líquido, y de diez mil veces las de los gases.

Es deseable que el calor sea conducido tan rápidamente como sea posible al sensor de temperatura, el cual debe ir directamente sumergido en el medio calentado, o, si esto no es posible, debe proveerse un receptáculo protector y sumergirse al sensor en un buen conductor, tal como el mercurio. Esta técnica reducirá la pérdida de tiempo.

3.2 Convección

Los líquidos son malos conductores de calor, y los gases pueden considerarse, en la mayor parte de los casos, como no conductores. Cuando los líquidos y los gases transmiten calor en virtud de su desplazamiento desde un lugar a otro, lo hace por convección. La convección puede ser natural, o bien, forzada. El radiador de agua caliente doméstico es un ejemplo de convección natural; transfiere la mayor parte de su calor calentando al aire ambiental, el cual se expande, asciende y es remplazado por aire más frío. Por otra parte, el calentador provisto de ventilador transfiere la mayor parte de su calor dirigiendo mecánicamente una corriente de aire al elemento incandescente; en este caso se tiene una convección forzada.

3.3 Radiación

Se considera que el calor radiante (radiación infrarroja), como la luz, toma la forma de una onda electromagnética, la cual se traslada a la misma velocidad que la luz (300000 km/s) en el vacío y en el aire; asimismo, absorbida y radiada por los materiales. Sus diferencias esenciales respecto a la luz, son: a) no es visible; b) tiene una longitud de onda mayor, pues va desde $0.7\ \mu\text{m}$ hasta unos $100\mu\text{m}$; c) cuando incide sobre la piel produce la sensación de ardor. Todas las sustancias radian el

calor a cualquier temperatura por encima del cero absoluto; así, si se intenta medir la temperatura de un gas caliente rodeado de paredes más frías mediante un termopar, se encuentra que la temperatura registrada es inferior a la del gas. El par y las paredes intercambian radiación; así, el termopar se torna más frío emitiendo más radiación de la que recibe hasta que alcanza la radiación de equilibrio con las paredes más frías, En este momento, uno y otras prosiguen por igual la transmisión de radiación.

3.4 Escalas de temperatura

Muchas sustancias cambian de fase sólida a líquida y líquida a gas, a temperatura constante. El efecto de la presión barométrica en el cambio de estado sólido/ líquido es despreciable, pero el cambio de líquido/gas viene afectado por dicha presión, ya que un incremento de presión eleva el punto de ebullición y una disminución lo reduce.

En un termómetro de mercurio, las posiciones de los puntos de fusión del hielo y de ebullición del agua se establecen colocando el termómetro en hielo en fusión y luego en vapor producido por agua en ebullición. En ambos casos, se usa agua destilada y, para el punto de ebullición, debe de tomarse en consideración cualquier desviación a partir de la presión barométrica de 760mm de mercurio. Estos puntos fijos, definidos como 0°C y 100°C, se llaman a menudo punto de hielo y punto de vapor.

Los termómetros de vidrio que contienen mercurio se basan en la variación de volumen que sufre el mercurio con los cambios de temperatura. Otros tipos de termómetros, basados en otras propiedades, tales como la variación de resistencia eléctrica o la variación de presión, proporcionan sus propias escalas de temperatura, las cuales concuerdan unas con otras sólo en los puntos fijos donde sus lecturas están definidas como 0°C y 100°C o alguna otra temperatura de equilibrio aceptada. La escala establecida por un termómetro de resistencia de platino difiere de la dada por el mercurio en un tubo de vidrio, excepto en los puntos fijos, debido a que la respuesta de la resistencia de platino no sigue la misma ley que el mercurio en el vidrio. En la tabla 3.1 se muestra una comparación de tales escalas.

Tabla 3.1

Mercurio en vidrio (°C)	0	50	100	200	300
Resistencia de platino (°C)	0	50.25	100	197	291

3.5 Escala de temperatura termodinámica o absoluta

Esta escala fue establecida por primera vez en 1854. El término “termodinámica” significa que la escala de temperatura se ajusta a las leyes termodinámicas y es independiente de cualquier sustancia termométrica.

La segunda ley de la Termodinámica aplicada a los gases “perfectos” establece que:

$$\text{Presión} \times \text{Volumen} = \text{Constante} \times \text{Temperatura absoluta} \quad (3.1)$$

La escala puede establecerse por varios sistemas, pero el más usado es el termómetro de gas de volumen constante. El grado unidad en la escala se definió primero como la centésima parte del intervalo de temperatura entre el punto de fusión del hielo y el de ebullición del agua pura. Este intervalo de temperatura se denominó intervalo fundamental. La escala termodinámica presente se denomina escala Kelvin y su único punto de definición es el punto triple de agua, es decir, 273.16K (0.01°C). El Kelvin actual no difiere del establecido originalmente en 1854. El punto de hielo corresponde a 273.15 en la escala Kelvin, que equivale al cero de la escala Celsius.

No existen gases que obedezcan perfectamente a las leyes de los gases, pero a una presión de alrededor de una atmósfera, su comportamiento se acerca al ideal y sus escalas de temperatura se corresponden. Puede observarse la desviación de un gas con relación al comportamiento perfecto y efectuar las correcciones pertinentes. El termómetro de gas de volumen constante, que consiste esencialmente en un bulbo metálico lleno de hidrógeno o nitrógeno, se utiliza para medir el

incremento de presión, se tiene un medio por el cual puede establecerse con precisión la temperatura termodinámica.

El establecimiento de la escala termodinámica por la termométrica del gas es una técnica difícil que requiere gran habilidad; por esto, se estableció la Escala Práctica Internacional de Temperatura que concuerda estrechamente con la escala absoluta, utilizando instrumentos para la determinación del punto fijo, que reproducen con precisión y comodidad las temperaturas dentro del alcance de la escala.

Escala Práctica Internacional de Temperatura(IPTS) 1968

En la tabla 3.2 se indican los puntos fijos fundamentales de la escala IPTS, los cuales se determinaron a estados de equilibrio específicos entre fases de sustancias puras y, en la mayoría de los casos, en una atmósfera normal (101325 Pa).

Tabla 3.2. Definición de los puntos fijos de la Escala IPTS (1968)

Estado de equilibrio	Escala Kelvin T(K)	Escala Celsius t(°C)
Equilibrio entre las fases sólido, líquido y vapor del hidrógeno en equilibrio (punto triple del hidrógeno en equilibrio)	13.81	-259.34
Equilibrio entre las fases líquido y vapor del hidrógeno en equilibrio a una presión de 33330.6 Pa(25/76 atmósfera normal)	17.042	-256.108
Punto de ebullición del hidrógeno en equilibrio	20.28	-252.87
Punto de ebullición del neón	27.102	-246.048
Punto triple del oxígeno	54.361	-278.789
Punto de ebullición del oxígeno	90.188	-182.962
Punto triple del agua	273.16	0.01
Punto de ebullición del agua	373.15	100
Punto de fusión del cinc	692.73	419.58
Punto de fusión de la plata	1235.08	961.93
Punto de fusión del oro	1337.58	1064.43

Los métodos utilizados para instituir la escala se especifican en la siguiente tabla 3.3.

Se establecieron valores intermedios entre los puntos aplicando una fórmula apropiada al intervalo en consideración. En la escala IPTS se define también un gran número de puntos secundarios, los cuales permiten determinar temperaturas intermedias de la escala fundamental, proporcionando también puntos fijos para graduar los instrumentos hasta más allá de 13337.58K. En la tabla 3.4 se muestran algunos de tales puntos secundarios.

Tabla 3.3

Gama	Método	Característica medida
13.8 hasta el punto del antimonio, es decir 630.74°C	Termómetro de resistencia de platino	Resistencia eléctrica
630.74°C hasta el punto de radiación de Planck	Pt/Pt + 10% Rh	Fuerza electromotriz

Por encima de 1337.58K (1063.43°C), la Escala IPTS viene definida por la ley radiación de Planck.

Tabla 3.4

Sustancia (equilibrio sólido/líquido)	Temperatura T(K)	Temperatura t(°C)
Mercurio	234.288	-38.862
Agua (punto de hielo)	273.15	0
Bismuto	544.592	271.442
Plomo	600.652	327.502
Antimonio	903.89	630.74
Níquel	1728	1455
Platino	2045	1772
Rodio	2236	1963
Iridio	2720	2447
Tungsteno	3660	3387

¹ Los puntos triples y los puntos de ebullición de un cierto número de gases se especifica también para la gama a partir de 13.956 K.

No existe escala IPTS desde el cero absoluto hasta 13.81K, pero las temperaturas comprendidas en la gama de 0K a 20K se miden mediante termómetros magnéticos, de presión de vapor y ultrasónicos (ruido).

3.6 Instrumentos de medición de temperatura.

Éstos pueden dividirse en dos grupos: eléctricos y no eléctricos.

Métodos no eléctricos

1. Termómetros de líquido, presión de vapor y de gas.
2. Termómetros de tira bimetalica.
3. Conos refractarios, pintura y lápices.

Métodos eléctricos

4. Pirómetros de resistencia eléctrica.
5. Pirómetros de termopar.
6. (I) Pirómetros de radiación total.

(II) Pirómetros fotoeléctricos

(III) Pirómetros ópticos

Los instrumentos relacionados en el número 6 miden la radiación emitida de varias formas.

3.6.1 Termómetro de líquido en tubo de vidrio

El mercurio es el líquido más usado en los termómetros de vidrio, aunque también se utilizan otros líquidos, tales como el alcohol y el pentano, que poseen puntos de solidificación más bajos que el mercurio y no ocasionan contaminación al romperse el tubo. Ver tabla 3.5.

Tabla 3.5 Líquidos usados en los termómetros de líquido en tubo de vidrio

Líquido	Gama (°C)		Gama (K)
Mercurio	-35	a +510	238 a 683
Alcohol	-80	a +70	293 a 343
Tolueno	-80	a +100	293 a 373
Pentano	-200	a +30	73 a 303
Creosota	-5	a +200	268 a 573

Un incremento de temperatura hace que líquido se dilate y ascienda dentro del tubo. Cuando se miden temperaturas que rebasan el punto de ebullición del mercurio (357°C a la presión atmosférica), el espacio existente encima del líquido se llena con nitrógeno a presión, lo que hace subir el punto de ebullición y permite medir temperaturas de hasta 510°C. ver figura 3.1.

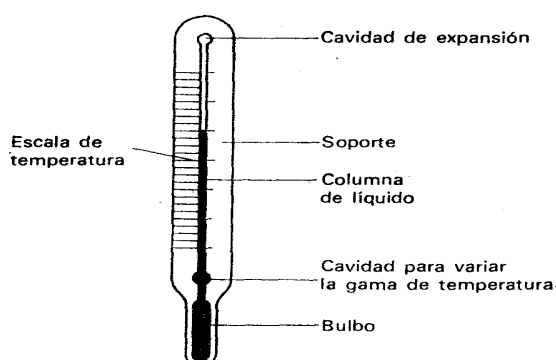


Fig.3.1 Termómetro de líquido en tubo de vidrio.

Incorporando una pequeña cavidad encima del bulbo, la cual debe llenar el mercurio antes de subir por el tubo, es posible variar la gama o alcance. En los termómetros de líquido tienen una capacidad calorífica considerable en los termómetros de vidrio y no responde inmediatamente a las variaciones rápidas de temperatura; el cristal que ha sido calentado y luego enfriado no recupera en seguida su volumen original, lo que tiende a producir una lectura lenta, aunque, en muchos casos, esta discrepancia es de poca importancia.

Los termómetros pueden clasificarse en “químicos” e “industriales”; los primeros se usan como normales en los laboratorios o para comprobaciones en plantas industriales, siendo calibrados cuidadosa y regularmente, cuando se hallan en uso, comparándolos con instrumentos patrón.

Los termómetros industriales pueden ir incorporados a tuberías o a otros aparatos para proporcionar indicaciones rutinarias de temperatura. Para reducir el riesgo de rotura, se monta a menudo en ellos un blindaje protector; por otra parte, puede dotárseles de un tubo extralargo para sumergirlos en líquidos calientes, o bien, estos termómetros pueden ser del tipo registrador para indicar las temperaturas máxima y mínima. Siempre que es posible, los termómetros se calibran, normalizan y utilizan cuando están totalmente sumergidos hasta las lecturas, pero, en caso necesario, pueden normalizarse para inmersión parcial. Como en todos los instrumentos de medición, debe aplicarse una tolerancia a la precisión de las lecturas. En el caso de los termómetros, ésta se basa en un porcentaje de campo de la escala, pero depende también de cómo se ha efectuado la división en grados. Por lo general, cuanto más pequeña es la longitud de la escala para un grado, y mayor la gama de temperaturas, más amplia es la tolerancia de precisión. Existen tipos especiales que tienen un pequeño campo de escala, normalmente de 5 °C con un intervalo de grado de 50mm de longitud, los cuales pueden proporcionar valores estimados del orden de 0.001°C a 0.002°C cuando se emplean conjuntamente con un microscopio de pocos aumentos.

A continuación se resumen las características esenciales de los termómetros de líquido en tubo de vidrio.

Características esenciales

- 1) Baratos.
- 2) Sencillos.

- 3) Fácilmente portátiles.
- 4) Frágiles.
- 5) No se precisan instrumentos de indicación adicional.
- 6) Pueden utilizarse únicamente donde son visibles de lecturas en el tubo.
- 7) Capacidad calorífica relativamente alta que ocasiona pérdida considerable de tiempo entre las variación de temperatura y la respuesta del termómetro.
- 8) No son adecuados para lecturas a distancia.
- 9) No son adecuados para mediciones de temperatura superficial.

Aplicación.

Sólidos. El termómetro puede introducirse en un agujero lleno de mercurio o polvo de aluminio para asegurar una rápida conducción del calor. Son necesarias condiciones estables de temperatura en la zona de medición para asegurar lecturas precisas, y el volumen de agujero debe ser pequeño comparado con el volumen del sólido.

Líquidos. La inmersión total, esto es, la inmersión incluyendo la escala de lectura de la columna en el líquido continuamente agitado, es el mejor sistema para medir la temperatura media del líquido, pero deben aplicarse correcciones cuando parte de la columna queda al descubierto.

Gases. Debido a que los gases son malos conductores del calor, los errores de lectura son causados por el intercambio de radiación entre el termómetro y las paredes de recipiente, que pueden estar a diferente temperatura respecto al gas. Para mejorar la precisión de medición, se utilizan resguardos de metal pulido alrededor del termómetro, un flujo forzado de gas o un dispositivo de ventilación. Debe evitarse condensación del vapor, ya que el calor latente de condensación puede ocasionar errores de lectura.

3.6.2 Termómetros de líquido en tubo metálico

Dentro de la gama -40°C hasta 650°C , y particularmente cuando se requiere una indicación continua en posiciones alejadas hasta 65m del punto de medición, los termómetros de líquido en tubo de acero ofrecen muchas ventajas. Estos instrumentos son del tipo de cubeta o bulbo y tubo capilar de Bourdon; se llenan con líquido a presión, midiendo la variación de volumen de líquido. El bulbo tiene una gran capacidad calorífica y está supeditado a una retardación considerable, pero ofrece la ventaja de ser mucho más robusto que el termómetro de vidrio. En la tabla 3.6 se indican los líquidos más usados con sus gamas de aplicación correspondientes.

Tabla 3.6. Líquidos utilizados en los termómetros metálicos.

Líquido	Gama($^{\circ}\text{C}$)	Gama(K)
Mercurio	-39 a +650	234 a 923
Xileno	-40 a +400	233 a 673
Alcohol	-46 a +150	227 a 423
Eter	+20 a +90	293 a 363

El tubo de Bourdon puede ser espiral o helicoidal y al expansionarse el volumen de líquido bajo la influencia de un aumento de temperatura, tiende a enderezarse; el movimiento del extremo libre se transmite, a través de una articulación, a una aguja indicadora que se desplaza sobre una escala.

Las ventajas principales de estos instrumentos son:

- 1) Escala aproximadamente lineal.
- 2) Amplia gama de temperaturas.
- 3) Se dispone de mucha fuerza para accionar el tubo de Bourdon, con lo que se tiene un buen control de la aguja indicadora.
- 4) El líquido puede mantenerse a presión elevada, lo cual reduce los errores de "columna".

- 5) No hay impresiones debidas a variaciones de presión barométrica.
- 6) Los tubos capilares largos permiten grandes diferencias en los niveles del bulbo e indicador.
- 7) Indicación de temperatura a distancia; los errores en el sistema pueden provenir de:
 - a) Errores de cero del tubo de Bourdon; por ejemplo, si varía la temperatura del tubo, el indicador dará lecturas incorrectas. Esto puede compensarse mediante una hélice bimetálica unida al indicador y que actúe en oposición al error.
 - b) Errores de tubo capilar debidos a la variación de temperatura. Este error puede reducirse por uno de los sistemas siguientes: un capilar con microagujero que asegure que cualquier variación de volumen es insignificante en comparación con el efecto de la temperatura en el bulbo; o un segundo capilar situado junto al capilar principal, pero no unido al bulbo y que actúe sobre un segundo tubo de Bourdon conectado mecánicamente al Bourdon principal, en oposición al error de temperatura figura 3.2.

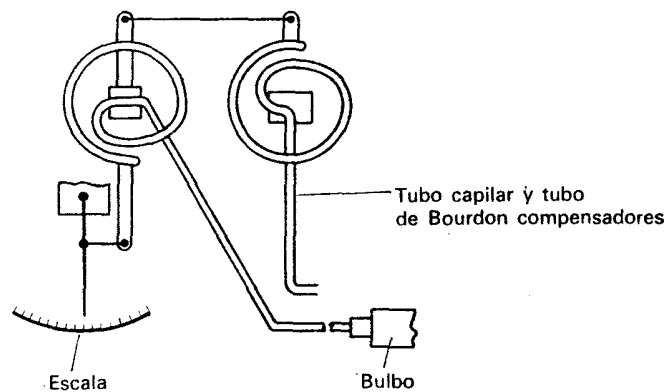


Fig. 3.2. Líquido compensado en un termómetro metálico.

- c) A la sección transversal del tubo capilar puede dársele forma anular mediante la inserción de un alambre de invar a lo largo de toda su longitud; esto reduce el volumen de líquido en el capilar, de modo que la variación de su volumen cúbico cuando está expuesto a un cambio de temperatura, es exactamente igual a la variación de volumen en el espacio entre el alambre y las paredes del capilar. Otro método basado en el mismo principio consiste en la

introducción de cámaras de compensación a intervalos a lo largo del tubo capilar. Estas cámaras son compensadoras tanto para el líquido que contienen, como para el líquido que hay en las porciones intermedias del tubo capilar figura 3.3.

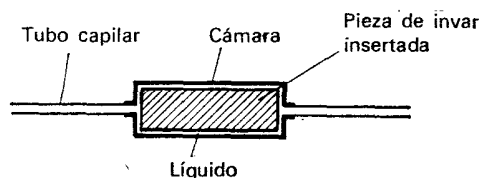


Fig. 3.3. Cámara de compensación del tubo capilar.

Precisión. Hasta 300°C, es del orden de $\pm 1/2\%$ del alcance de la escala, y, cuando se recupera esta temperatura, de $\pm 1\%$.

3.6.3 Bulbos y receptáculos

En estos instrumentos, el tamaño del bulbo suele oscilar entre unos 25mm y 375mm de longitud, y entre 12 y 18 mm de diámetro, lo cual depende de las exigencias; al objeto de reducir al mínimo la pérdida de tiempo, la relación entre el área superficial y el volumen de líquido se hace lo mayor posible. Para registrar variaciones pequeñas de temperatura, debe aumentarse el volumen de líquido en el bulbo; así, las gamas de temperaturas bajas requieren longitudes de bulbo mayores. El aumento de longitud del bulbo se consigue con formas de bulbo especiales, con las que se mejora la sensibilidad figura 3.4. El bulbo puede

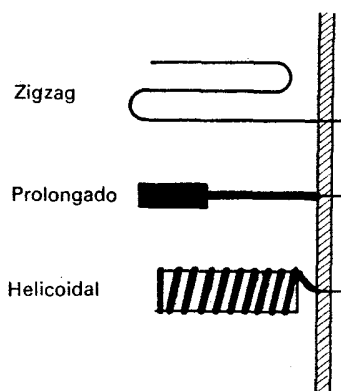


Fig. 3.4 Formas de bulbo especiales.

sumergirse directamente, en cuyo caso la respuesta del instrumento es algo mejor que el termómetro de mercurio en tubo de vidrio, el cual a menudo requiere un receptáculo metálico para protección. Cuando el termómetro metálico se emplea en sistemas que trabajan a alta presión de un gas inerte que llena el instrumento; así, éste actúa como un manómetro. Pueden medirse temperaturas comprendidas en la gama -130°C a 540°C ; la gama para un instrumento dado no suele ser menor de 50°C .

La principal ventaja de este instrumento es su respuesta rápida a una variación de temperatura, ya que el gas tiene una capacidad calorífica mucho menor que los líquidos o sólidos.

Los gases poseen un coeficiente de dilatación cúbica mucho más elevado que los líquidos y sólidos; por ejemplo, para el N_2 es 3.6744×10^{-3} , y para el Ne , 3.6617×10^{-3} , valores que pueden compararse con el del Hg , que es 0.181×10^{-3} , y con el del acero al carbono, que es 0.033×10^{-3} . Pero la relación entre el tamaño del bulbo y el del capilar más tubo de Bourdon debe ser muy grande, si se quiere que los efectos de la temperatura ambiente sobre el último sean suficientemente pequeños para no afectar la precisión del instrumento.

3.6.4 Errores del capilar

- 1) Los errores del capilar aumentan con la temperatura del bulbo.
- 2) Los errores del capilar disminuyen al aumentar la gama diferencial(temperatura máxima menos temperatura mínima).

Para compensar estos errores existen dos métodos:

- 1) Aumentar la gama diferencial.
- 2) Aplicar un segundo capilar, o uno auxiliar.

Mediante una compensación adecuada y un diseño cuidadoso, estos termómetros ofrecen las ventajas de la medición a bajas temperaturas, del bulbo de tamaño pequeño en comparación, por ejemplo, con el de mercurio en acero, y de capilares largos (hasta 60m).

La compensación del tubo de Bourdon se efectúa por medio de una tira bimetálica; no se dan errores de columna, pero las variaciones de presión barométrica o altitud hacen necesario el ajuste de lectura a cero.

La precisión es de $\pm 1/2\%$ de la gama hasta los 320°C y, por encima de esta gama, de $\pm 1\%$.

3.6.5 Termómetros de presión de vapor

Si se introduce un vapor, por ejemplo, éter, en una cámara vacía, la presión en ésta aumenta debido a la presión del éter. Si se introduce más éter, continúa subiendo la presión hasta que se alcanza un punto en que no se produce cambio de presión; entonces aparece en la cámara una pequeña cantidad de éter líquido, diciéndose que el vapor está saturado. El aumento o disminución del volumen de la cámara no da lugar a variación alguna en la presión de vapor, siempre que todavía exista líquido presente; así, los vapores saturados no obedecen a la ley de Boyle porque su presión es independiente de su volumen. Análogamente, los vapores saturados no obedecen a la ley de Charles porque su presión varía groseramente de forma exponencial al variar la temperatura.

El termómetro de presión de vapor tiene un tubo de Bourdon con capilar y un bulbo parcialmente lleno de un líquido volátil tal como cloruro de metilo o anhídrido sulfuroso; el resto del sistema está lleno de vapor. Un aumento de temperatura en el bulbo ocasiona una vaporización ulterior, causando el aumento de presión que se origina al movimiento del tubo de Bourdon.

La condición descrita tiene lugar en el instrumento cuando la temperatura ambiente del tubo de Bourdon con capilar es superior a la del bulbo figura 3.5a. Cuando la temperatura ambiente del capilar y del tubo de Bourdon es inferior a la del bulbo, rellenan con vapor condensado, esto es, con líquido y la presión del vapor en el bulbo se transmite a través del líquido figura 3.5b. La nueva puesta a punto del sistema líquido/vapor y algunos otros factores estrechamente relacionados, que involucran la retardación en respuesta y la falta de precisión en la lectura, contribuyen a que los termómetros de presión de vapor sean inadecuados para la medición de temperatura ambientales. Las diferencias en el nivel entre el bulbo y el tubo de Bourdon, respecto al establecido en el calibrado, introducen un error de “columna”, pues, aunque la presión en el bulbo puede permanecer

constante, la presión debida a un capilar lleno de vapor será menor que la debida a una columna similar de líquido.

Un termómetro que supera las dificultades ambientales tiene el tubo Bourdon, el capilar y la partes del bulbo llenos de un líquido que no se evapora figura 3.5c; así, se evita que el fluido volátil entre en el capilar y el tubo de Bourdon, pero este termómetro sólo puede utilizarse satisfactoriamente cuando el bulbo se encuentra en posición vertical.

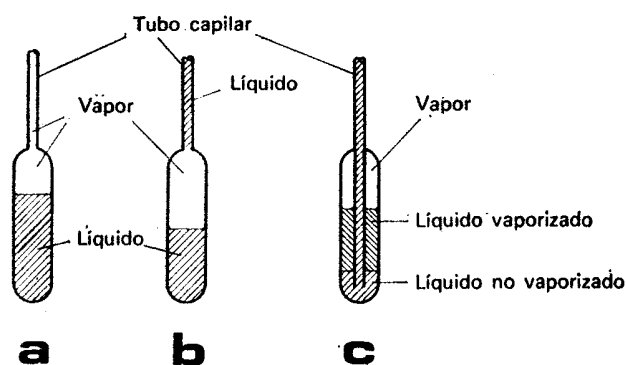


Fig. 3.5. Termómetros de presión de vapor.

Tabla 3.7. Líquidos utilizados en termómetros de presión de vapor

Líquido	Punto de ebullición (°C)	Temperatura Crítica (°C) ¹	Gama (°C)
Cloruro de metilo	-23.7	143.1	0-50
Eter dietílico	34.5	193.8	60-160
Alcohol etílico	78.5	243.1	90-170
Agua	100	374.0	120-220
Tolueno	110.5	320.6	150-250
Argon	-185.7	-122	(²)

¹ Temperatura a la cual el líquido y el vapor tienen la misma densidad.

² Utilizado para medir la temperatura de los gases licuados, llegando hacia abajo hasta -253°C(20K).

Los termómetros de presión de vapor son de costo inicial inferior al de los de mercurio en acero, pero debido a sus limitaciones son inadecuados para aplicación universal. Sus características principales son:

- 1) La escala no es lineal, lo que puede modificarse mediante un sistema de palancas o eligiendo un instrumento cuya escala sea aproximadamente lineal en la sección media donde las lecturas de temperatura deben ocurrir.
- 2) El alcance de la escala es de el orden de 100°C , o menos, con una precisión de hasta $\pm 1\%$ del alcance diferencial; por ejemplo, con éter dietílico, va de 60°C a 160°C .
- 3) La retardación de estos instrumentos es mucho menor que en la mayoría de los demás tipos.
- 4) Pueden emplearse metales no ferrosos en todas partes.
- 5) Lectura a distancia hasta 65m.
- 6) Corrientemente pueden medirse temperaturas entre -50°C y 310°C , pero el alcance para la mayoría de los aparatos comerciales abarca desde 0°C hasta 250°C .
- 7) Las variaciones normales de temperatura ambiente en el capilar y en el Bourdon no afectan apreciablemente la precisión de la lectura sobre la escala, siendo ello prácticamente independiente de la longitud del capilar.
- 8) La altitud barométrica y los errores de "columna" se corrigen reajustando la aguja indicadora.
- 9) Pueden utilizarse tamaños de bulbo menores que para los termómetros de mercurio en acero del mismo alcance.
- 10) Cuando la introducción por rotura de mercurio u otros contaminantes en la sustancia medida pueda ser perjudicial, por ejemplo, en alimentos, puede elegirse un líquido no nocivo.

En la tabla 3.7 se da una relación de los líquidos usados en los termómetros de presión de vapor.

3.6.6 Termómetros de tira bimetálica

Las tiras bimetálicas están constituidas por dos metales o aleaciones diferentes que poseen distinto coeficiente de dilatación (por ejemplo, invar y latón), unidos firmemente entre sí por soldadura. Cuando la cinta se calienta o enfría, se produce una dilatación o contracción diferencial que la hace curvar como se muestra en la figura 3.6.

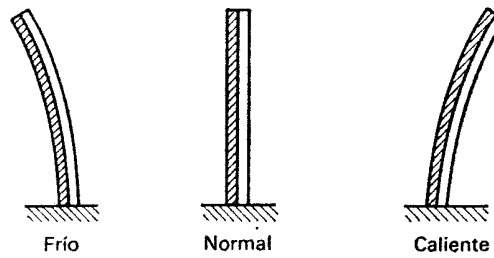


Fig. 3.6 Tira bimetálica.

El metal de mayor coeficiente de dilatación es el que se representa rayado en los dibujos de la figura.

Muchos dispositivos interruptores o conmutadores, tales como los de los termostatos de hornos, planchas eléctricas y lámparas intermitentes de coches, funcionan según este principio. Se usan también como sensores de temperatura o como compensadores para variaciones de temperatura ambiente en termómetros de líquidos, metálicos, de presión de vapor y de expansión de gas, en barómetros aneroides, y como compensadores de péndolas en algunos relojes.

Los termómetros bimetálicos usuales de aplicación industrial figura 3.7a constan de una tira continua arrollada en varias hélices de compensación, una dentro de la otra; esta disposición ofrece la ventaja de ser compacta y de proporcionar a la vez la gran longitud de cinta requerida para el desplazamiento adecuado del indicador, confiriendo también la seguridad de que no se produzca desplazamiento lateral alguno del husillo de transmisión libremente flotante, el cual así, no necesita estar guiado por cojinetes efectivos.

Los termómetros de tira bimetálica en espiral figura 3.7b se usan mucho para la medición de temperaturas ambientales y de hornos, disponiéndose de tipos con pinza de sujeción para comprobar la temperatura de tubos de agua caliente. Entre otras muchas aplicaciones para estos termómetros, cabe citar la medición de temperaturas en cámaras de vapor, asfalto, macadam alquitranado, pastas y pinturas.

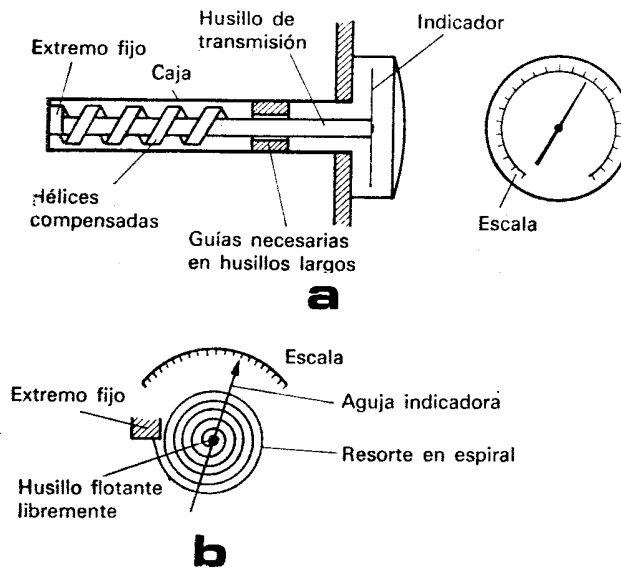


Fig. 3.7. Termómetro de tira bimetálica.

Características esenciales

- 1) Baratos: utilizados a menudo en sustitución de los termómetros de líquido en tubo de vidrio.
- 2) Compactos: el volumen del metal utilizado en la envoltura de protección es pequeño; así, la capacidad calorífica es baja, lo que reduce la retardación.
- 3) Robusto: buena resistencia al choque mecánico debido al husillo que flota libremente.
- 4) Completamente lineal en todo el alcance de la temperatura.
- 5) Alcance: baja temperatura, desde -30°C hasta 200°C ; alta temperatura, desde 0°C hasta 550°C .
- 6) Precisión: (baja temperatura) 1% del alcance de la escala; (alta temperatura) 2% del alcance de la escala.
- 7) Pueden construirse con vástagos de muy pequeño diámetro, de hasta 4mm. Las longitudes del vástago oscilan entre 75mm para líquidos de calor específico y conductibilidad térmica bajos, por ejemplo agua, y 250mm para aire y gas; para aceite, la longitud requerida se encuentra entre estos dos límites.

Con gases secos, limpios y no corrosivos, los vástagos o husillos pueden perforarse para mejorar la respuesta; y para reducir las fugas de calor, puede utilizarse el acero inoxidable (13% de Cr), que tiene una conductividad baja.

3.6.7 Indicación de la temperatura por el cambio de estado de los sólidos.

Esta forma de indicación de la temperatura se divide en dos grupos:

- 1) *Cambio de formación o de tamaño.* Este grupo comprende los conos pirométricos como se ve en la figura 3.8, las barras termoscópias, los registradores térmicos y los anillos.
- 2) *Variación de color.* Pinturas y lápices.

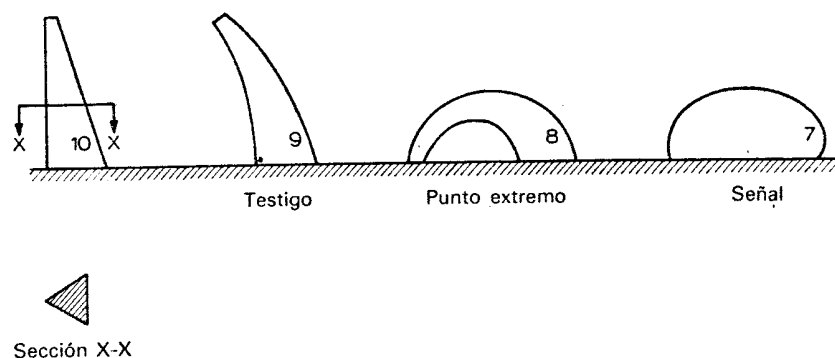


Fig. 3.8. Conos pirométricos.

Conos pirométricos. Se construyen con varias mezclas de materiales, porcelana, arcilla, talco, feldespato, cuarzo, etc., que se disponen en una serie numerada en correspondencia con las temperaturas de una gama que se extiende desde 600°C hasta 2000°C. Sobre una placa de refractario se monta un mínimo de tres conos con diferentes puntos de fusión. La temperatura requerida viene indicada cuando el cono elegido alcanza su punto extremo, es decir, cuando su punta establece justamente contacto con la placa. Como se muestra en la figura.

3.6.8 Barras termoscópicas Holdcroft. Se trata de cuatro barras pequeñas, de unos 55mm de longitud y sección cuadrada de 6mm de lado, apoyadas horizontalmente en sus extremos y separadas entre sí unos 12mm. La barra de número más bajo comienza a doblarse al aumentar la temperatura, viniendo indicada la temperatura requerida precisamente en el momento en que la barra elegida comienza a doblarse, sin que las otras barras queden afectadas. Campo de aplicación, entre 600°C y 1.550°C.

Registadores térmicos Watkins. En principio, son similares a los conos indicadores. Se montan en un dispositivo de sujeción cinco pastillas cilíndricas de unos 9mm de longitud por 6 de diámetro. Al calentar, algunas de estas pastillas se fundirán; una de ellas empezará a fundirse por la superficie superior, mientras que las otras superficies no serán afectadas. Esta pastilla, justamente cuando empieza a fundirse superficialmente, indica la temperatura.

Anillos Bullers. Este método evalúa la temperatura por comparación del diámetro de un anillo de arcilla sin cocer, antes y después de calentarlos. Se colocan en un soporte varios anillos de unos 64mm de diámetro exterior y 22mm de diámetro interior; luego se distribuye un cierto número de éstos en un horno secador. Los anillos se extraen durante el ciclo de calentamiento, se enfrían y se miden. Cuando se ha obtenido una contracción dada, se completa la cocción. Gama de aplicación, entre 960 °C y 1400°C.

3.6.9 Pinturas y lápices. Son útiles para calentamientos en pequeña escala de piezas de acero, soldaduras, para tratamiento de eliminación de tensiones y precalentamientos, etc. La pintura o lápiz cambian de color o de aspecto a una temperatura fijada.

Los conos, barras, registradores y anillos se utilizan en estufas de tratamiento térmico para objetos cerámicos, muelas, ladrillos, refractarios, porcelana eléctrica, loza, materiales sanitarios, tejas y porcelana, etc., midiéndose las temperaturas con una precisión de unos $\pm 10^\circ\text{C}$.

Con frecuencia se usan conjuntamente con un pirómetro, el cual dará la temperatura real a lo largo de un ciclo de calentamiento, en un punto particular del horno o estufa, y actuará como elemento de

comprobación de la velocidad de calentamiento, que no debe ser demasiado rápida si se requiere obtener productos correctamente cocidos.

3.7 Termoelectricidad

En determinadas circunstancias, el calor puede transformarse en energía eléctrica, o viceversa. Este proceso termoeléctrico reversible no debe confundirse con la conversión irreversible de la energía eléctrica en calor (efecto Joule) que tiene lugar cuando una corriente eléctrica pasa por una resistencia causando un incremento de temperatura en la misma.

Los efectos termoeléctricos se originan de dos maneras:

- 1) Cuando dos metales distintos están en contacto uno con otro, existe siempre una diferencia de potencial entre ellos.
- 2) Incluso en un solo metal existe un gradiente de potencial si hay un gradiente de temperatura.

Así, si se unen dos metales distintos para formar un circuito cerrado (termopar) y se mantiene una unión a temperatura diferente de la otra, circulará espontáneamente una corriente eléctrica a través del circuito. Esto se denomina efecto Seebeck. La magnitud de la corriente y su dirección depende de las características termoeléctricas de los dos metales en cuestión y de la temperatura de sus uniones.

La variación de la f.e.m. del termopar con la temperatura se refleja en la curva de la figura 3.9, la cual se refiere al termopar tungsteno/molibdeno.

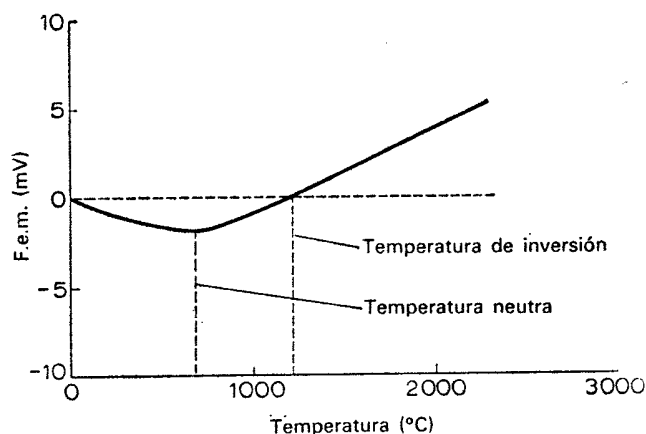


Fig. 3.9. Variación de la f.e.m con la temperatura (termopar W-Mo).

En este caso, cuando la temperatura de la unión fría se mantiene constante a 0°C, un incremento de temperatura en la unión caliente produce un aumento de la fuerza electromotriz en sentido negativo, alcanzando esta f.e.m. su valor máximo a unos 800°C, aproximadamente; este valor máximo se denomina temperatura neutra. Un incremento ulterior de la temperatura hasta unos 1200°C reduce a cero la f.e.m.; esto se denomina temperatura de inversión. A partir de este punto, la f.e.m. se vuelve positiva. Si se utiliza un pirómetro termoeléctrico para medir una gama de temperaturas en la que se halla la temperatura neutra para el termopar, dos temperaturas diferentes darán el mismo valor para la f.e.m.; así, una gama de temperaturas medida por un termopar no debe incluir su temperatura neutra o la de inversión.

3.8 Ley de los metales intermedios

En la práctica, la medición de la temperatura por medio de termopares involucra por lo menos la introducción en el circuito de un milivoltímetro, con lo que se incrementa el número de uniones, pero si la temperatura no varía en donde se han introducido las uniones, la f.e.m. del circuito no queda afectada.

3.9 Ley de las temperaturas intermedias

Esta ley se refleja en la siguiente figura 3.10.

Consideremos un termopar dado en la figura 3.10a con una f.e.m. E_1 , una unión fría a 0°C y una unión caliente a 500°C. El termopar es la suma de dos termopares similares, uno con unión fría a 0°C y una unión caliente a 20°C como se ve en la figura 3.10 b, y el otro, con una unión fría a 20° y una unión caliente a 500°C figura 3.10 c. Las f.e.m. para estos pares se designan por E_2 y E_3 , respectivamente. Así,

$$E_1 = E_2 + E_3 \quad (3.2)$$

Regulación de la temperatura de la unión fría.

Un instrumento para la medición de la f.e.m. , ya sea un milivoltímetro, o bien, para mayor precisión, un sistema potenciométrico.

Conductores de compensación para poder colocar el instrumento de medición a una distancia considerable del par sin necesidad de utilizar materiales de par caros como conductores de prolongación. Los conductores de compensación para termopares de metales preciosos suelen ser de cobre puro y una aleación cobre-níquel adecuada que tiene la misma f.e.m. termoeléctrica que los mismos alambres del par, pero dentro del margen de temperaturas de la unión fría. Se incorpora en el milivoltímetro una resistencia de compensación para tener la seguridad de que el mismo tiene una gran resistencia en comparación con el circuito del par, de este modo, cualquier cambio de temperatura y, por consiguiente, cualquier variación de resistencia de los conductores de compensación, serán insignificantes, con lo que la precisión del sistema no quedará afectada figura 3.11.

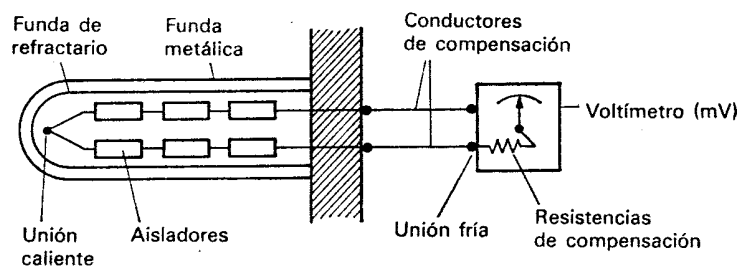


Fig. 3.11. Pirómetros termoelectrico.

3.10.1 Regulación de la temperatura de la unión fría

Ésta puede conseguirse sumergiendo la unión fría en un frasco-termo lleno de hielo en fusión, pero esto sólo es adecuado para condiciones de laboratorio. Un método moderno, aplicable tanto en laboratorios como para usos industriales, consiste en regular la unión fría mediante el dispositivo de Zeref/Zerac, fabricado por la firma De La Rue Ltd figura 3.12.

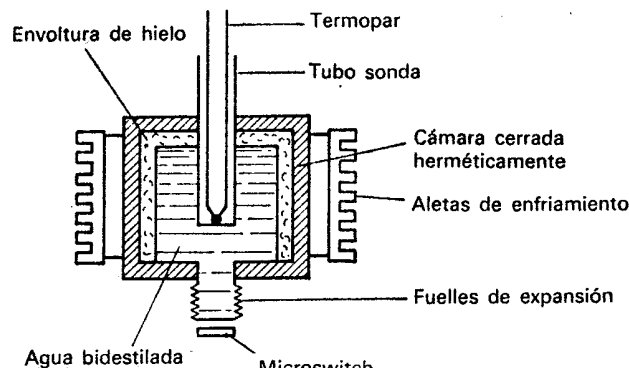


Fig. 3.12 Sistema de unión fría consistente Zeref

Se sumerge la unión fría en un recipiente cilíndrico, de cobre, que contiene agua bidestilada; el cilindro está cerrado por un extremo, y el otro lleva un fuelle. Se extrae el calor mediante una bomba termoeléctrica compacta y consistente. Al formarse hielo, se produce una expansión que hincha el fuelle, de modo que, en un momento dado, acciona un microinterruptor y se para la bomba; el hielo comienza a fundirse y el fuelle se deshincha, conectándose eventualmente el interruptor de la bomba; así, la unión fría se mantiene en el verdadero punto de hielo del agua. El sistema de referencia del punto de hielo Zerac puede mantener 100 uniones frías a la temperatura de referencia.

En la tabla 3.8 se da una relación de los termopares de uso común. Las f.e.m generadas en los pares de metal base son mucho mayores que las generadas en pares de metal precioso, por lo tanto, aquellos pares son más sensibles a las pequeñas variaciones de temperatura. Debido a su precio relativamente bajo, pueden utilizarse alambres de mayor diámetro(hasta 3mm) y más resistentes, pero son incapaces de soportar altas temperaturas sin fundirse ni sufrir daños por ataque de los gases. Las tolerancias para los termopares de metal base varían desde $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en la zona inferior hasta $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$ en la zona superiores de sus gamas de temperatura. Los pares de metal precioso soportan bien las temperaturas, por lo que pueden utilizarse alambres de diámetros más pequeños (0.5mm o menos), lo cual ayuda a reducir el coste y facilita la medición “directa” de la temperatura. Sus tolerancias oscilan desde $\pm 1^{\circ}\text{C}$ a bajas temperaturas hasta $\pm 3^{\circ}\text{C}$ a temperaturas elevadas.

Tabla 3.8 Termopares comunes y sus características.

Tipo	Termopar	Sensibilidad aproximada, milivoltios (°C) ¹	Gama de temperatura normal (°C)	Temperatura máxima (°C) ⁵	Características de utilización
Metal base	Cobre/constantan ²	0.03	-200 + 400	+ 600	Alta resistencia a la corrosión por humedad condensada. Par de poco coste
Metal base	Hierro/constantan	0.05	-200 + 800	+ 1000	que resiste la oxidación y las atmósferas reductoras.
Metal base	Cromel ³ /Alumel ⁴	0.04	-200+ 1200	+ 1350	Resiste las atmósferas oxidantes
Metal base	Platino/Platino 90%/Rodio 10%	0.006	0 + 1400	+ 1700	Resiste la oxidación, por la f.e.m. queda afectada por la presencia de metales, carbono o silicatos en una atmósfera reductora.

¹ A las temperaturas más bajas, es decir 20 °C.

³

90% Ni, 10%Cr.

² 60% Cu, 40% Ni (Eureka).

⁴

95% Ni, 2% Al, 3% Mn.

⁵

Inmersión de corta duración

3.11 Aplicaciones de los pirómetros de termopar

Debido a su seguridad de respuesta y sensibilidad, el par Pt/Pt-10% Rh se utiliza para definir la Escala de Temperatura Práctica Internacional en la gama de 630.74°C hasta 1064°C, y, por lo general, debido a su adaptabilidad, pueden construirse termopares que, prácticamente, se acomoden a cualquier temperatura, aunque es posible que esto sea siempre conveniente o económico. Aparte de los destinados a aplicaciones industriales normales, medición de la temperatura del horno, etc., los termopares se fabrican suficientemente pequeños para aplicaciones tan delicadas como tomar la temperatura de los nervios de los insectos más pequeños, de los transistores, etc. La conducción térmica a lo largo de los alambres del par pueden reducirse casi hasta desvanecerse con el uso de alambres muy finos que pueden situarse en los lugares más difíciles e inaccesibles. Los termopares se emplean para medir la temperatura de sólidos, líquidos y gases, debiendo aplicarse la unión caliente de forma tal que se adapte a las características de la sustancia a medir. En la siguiente figura se indican varios métodos de aplicación de termopares.

En la figura 3.13, de (a) a (d) , muestra métodos de medición superficial. La unión se efectúa soldando eléctricamente a la superficie (la soldadura por descarga de capacitancia ofrece un método de empalme excelente), o bien, por medio de soldadura amarilla. En a, los alambres se desplazan por la superficie formando un buen contacto con ella sobre un corto trayecto, lo cual reduce o elimina la conducción del calor hacia fuera de la unión. En b se muestra un método alternativo donde el empalme directo no es adecuado. La unión se produce sobre una placa delgada de cobre que se mantiene firmemente en posición mediante grapas o ataduras, para asegurar una buena transmisión del calor al bordón extremo. En c puede estimarse la temperatura superficial por extrapolación a lo largo de X-X. Los muros de ladrillos, hormigón, etc., pueden medirse según se muestra en d;

alternativamente, puede utilizarse un trozo de plancha de amianto para cubrir el encaje que contiene el par.

El esquema ilustra la medición del gradiente de temperatura a través de una pared y, en f, se muestran grupos de dos termopares que permiten obtener temperaturas medias a través de un líquido. Cuando se miden líquidos en reposo, debe tenerse cuidado en asegurarse de que los mismos estén bien mezclados para evitar variaciones locales de temperatura, siendo necesario que los pares no se coloquen en zonas “muertas”, por ejemplo, en las esquinas. La transferencia de calor a una unión caliente puede mejorarse sumergiendo el par en mercurio o polvo de aluminio según se muestra en g y h, pero este método limita la aplicación del par que sólo puede estar en posición vertical. Los metales líquidos pueden medirse por inserción directa del par sin empalmar, pero debe tomarse la precaución de asegurarse de que tal inserción se efectúa bien por debajo de la escoria superficial. Cuando se mide acero líquido se utiliza una funda protectora de silicio, la cual puede adaptarse convenientemente; el tiempo de inmersión es de sólo unos pocos segundos.

La medición de temperaturas de gases lleva consigo dificultades particulares debido al intercambio de radiación entre el par y la envolvente más fría de las paredes del horno; esto significa que el par indica una temperatura más baja que la del gas en el que se encuentra sumergido. Para superar esta dificultad se usa un pirómetro de aspiración(k). El gas se extrae del horno y circula sobre el par que está protegido contra la radiación por una serie de envolturas de metal o de refractario, lo cual depende de la temperatura y condiciones de gas. La función de las envolturas protectoras es mantener una radiación igual entre ellas y el par; así, el par puede medir la temperatura real del gas.

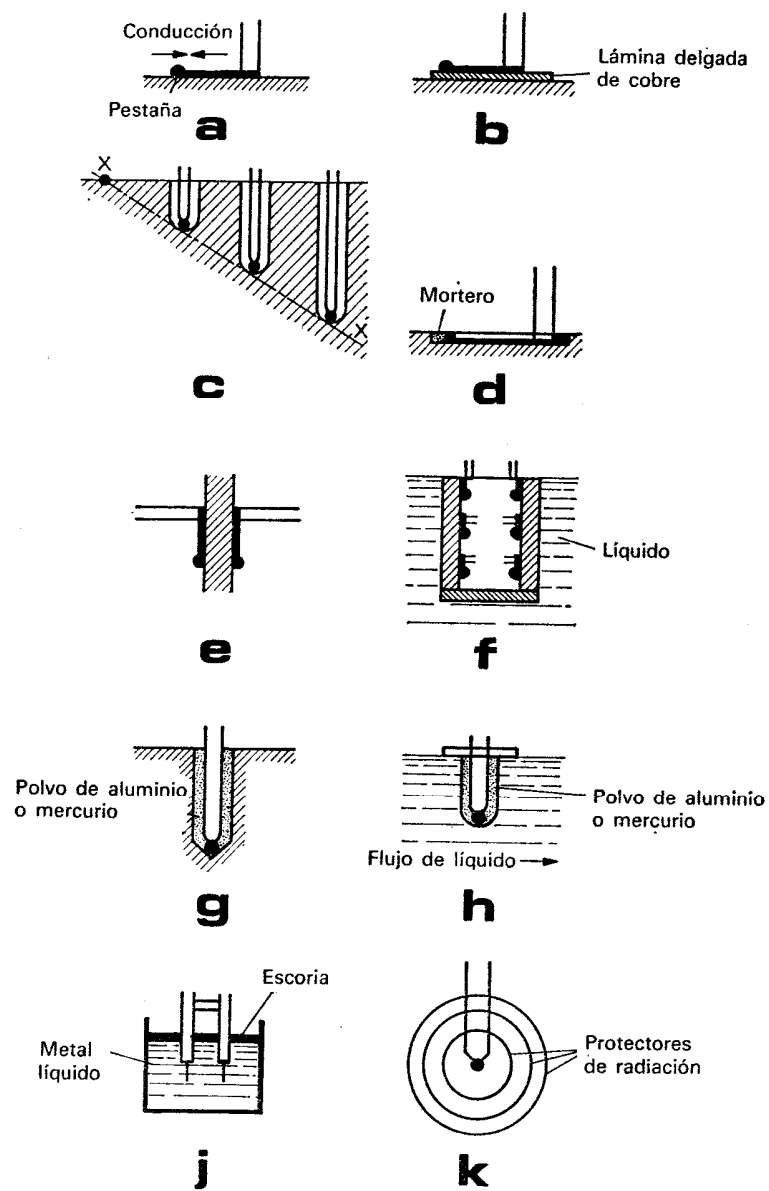


Fig. 3.13. Aplicaciones de termopar.

3.12 Termopilas

Se trata de termopares conectados en serie, en los cuales varias uniones calientes se colocan una al lado de otras o en estrella, teniéndose así la formación que recibe el nombre de termopila. La f.e.m. de salida total es igual a la suma de las f.e.m. individuales, consiguiéndose así un elemento mucho más sensible. Una termopila de cromel/constantan con catorce pares proporciona aproximadamente $1 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ y alcanza una sensibilidad de 0.002°C . Las uniones calientes de los pares deben aislarse cuidadosamente entre sí. Las termopilas que constan de semiconductores en serie se utilizan para finalidades especiales, tales como la medición de temperatura de una lámina de vidrio.

Los termopares dispuestos en paralelo pueden utilizarse para determinar temperaturas medias. Como se ve en la figura 3.14.

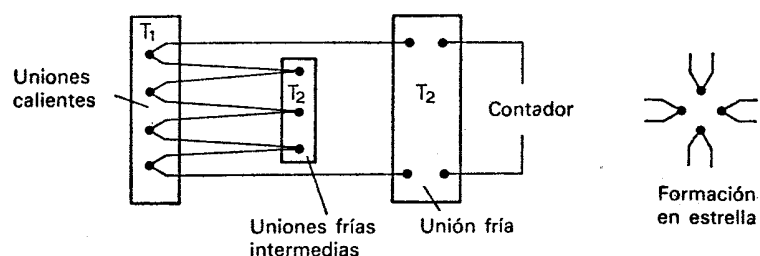


Fig. 3.14. Termopares.

3.13 Errores de termopar

Los errores de medición pueden proceder de condiciones que provocan cambios en las características eléctricas del par, por ejemplo, alambres demasiado tensados, contaminación

por vapores metálicos, gases, inclusiones de óxido en la unión caliente durante la soldadura, etc. La conducción a través de los alambres del par es motivo de reducción en el valor de las lecturas, a pesar de que no cause variaciones en las características eléctricas; para reducir al mínimo este efecto, deben tomarse precauciones en la instalación y utilizar alambres de muy poco diámetro. Muchas aplicaciones exigen una gran protección de la unión caliente, lo que incrementa el tiempo que necesita el par para percibir la temperatura verdadera. Cuando se mide en condiciones de temperatura estables, esta pérdida de tiempo puede no ser de consideración, pero se convierte en un factor importante cuando las temperaturas fluctúan, ya que el termopar no puede en caso alguno registrar fielmente la temperatura verdadera en un tiempo dado ver en la figura 3.15

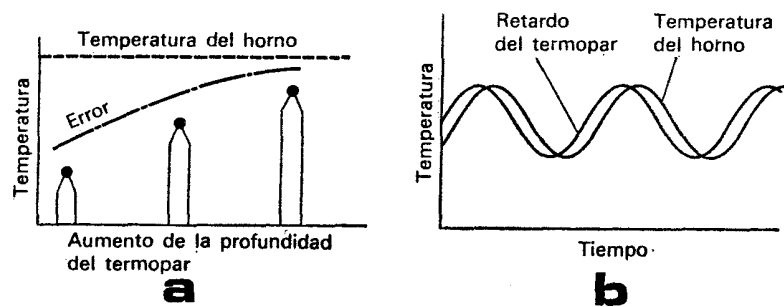


Fig. 3.15. Errores de termopares. a) Temperaturas estable. b) Temperatura fluctuante.

Una comprobación sencilla de la presencia de inclusiones no metálicas en el circuito del par, consiste en aplicar una llama a uno de los alambres de este circuito. Si el circuito está sano, no deben observarse cambios de lecturas en el contador, ya que los gradientes de f.e.m. creados se equilibran entre sí.

3.14 Medición de la temperatura por detección de la radiación.

Un cuerpo que irradia calor con una intensidad dada emite un espectro o campo de radiación de longitudes de onda variables, pero, al descender la temperatura, desciende

también la intensidad de radiación. La disminución en la intensidad de radiación va acompañada del correspondiente incremento de longitud de onda de tal radiación. Si la temperatura del cuerpo aumenta, la intensidad de radiación también aumenta, y la longitud de media onda de esta radiación decrece. A unos 500°C, algunas de las longitudes de onda comienza a ponerse incandescente; un nuevo aumento de la temperatura incrementa la proporción de longitudes de onda luminosas emitidas, y, cuando el cuerpo alcanza el rojo, emite a la vez radiación infrarroja(calor) y toda la gama de radiación visible(luz). A temperaturas elevadas, también se emite una pequeña cantidad de radiación ultravioleta, que posee longitud de onda uniforme más corta que la luz visible, aumentando la proporción de estas radiaciones con la temperatura. Se ve en la figura 3.16.

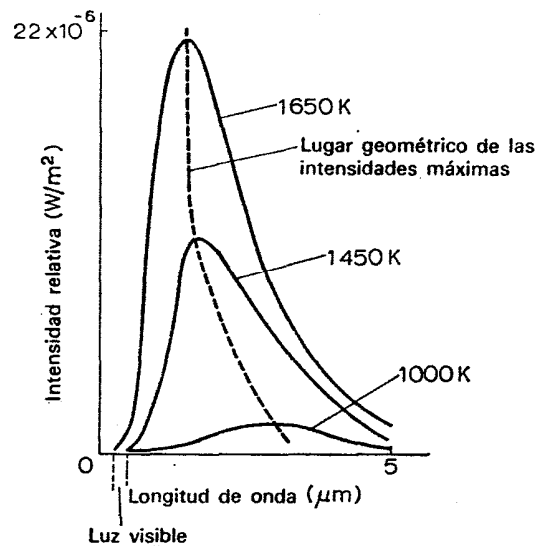


Fig. 3.16 Intensidades de radiación de un cuerpo negro.

3.15 Cuerpo negro

El calor se transmite normalmente por conducción, convección y radiación combinadas.

La transmisión por conducción requiere un material por el cual el calor puede fluir, y la transmisión por convección requiere el desplazamiento de un material calentado. La

radiación no requiere medio alguno para la transmisión de calor; así, si se suspende un cuerpo radiante en el vacío, todo el calor perdido o ganado por este cuerpo lo será por radiación, ya que la conducción y la convección no tiene lugar en el vacío.

De la misma forma, si la superficie del cuerpo fuese un deflector perfecto, la cantidad de calor en el mismo no variaría, con lo que, así, permanecería a temperatura constante. Debe ponerse de manifiesto que tales condiciones no se presentan en la práctica, aunque pueden fabricarse superficies altamente reflectoras.

Un cuerpo que es capaz de absorber todas las radiaciones que inciden sobre él, sin reflejar ni transmitir alguna, se denomina “cuerpo negro”, dependiendo esta facultad del estado de su superficie. Bajo condiciones similares, un cuerpo negro absorberá y cederá calor más rápidamente que un cuerpo no negro.

Las superficies que absorben fácilmente la radiación, poseen las características siguientes:

Color: cuanto más se acerque al negro, mejor absorberá las radiaciones.

Acabado superficial: una superficie mate o rugosa absorbe mejor la radiación que una brillante y lisa, cualquiera que sea el color.

El calor radiado por un cuerpo negro se caracteriza únicamente por su temperatura; prácticamente, cualquier espacio casi cerrado por completo, como el interior de un horno de mufla, cumple con las exigencias de radiación del cuerpo negro. Así, si puede medirse la radiación que sale por una pequeña abertura de un horno, los resultados indicarán la temperatura del interior del horno. Para esta finalidad se emplean pirómetros de radiación total.

Un cuerpo que no irradia como un cuerpo negro, emite menos calor radiante y la relación entre esta radiación y la del cuerpo negro se denomina *poder emisivo total* de la superficie. Así, puede decirse que un cuerpo negro posee un poder emisivo de uno, mientras que los cuerpos que reflejan o transmiten parte de la radiación que reciben tienen un poder de emisión inferior a uno.

Si E = radiación que incide sobre el cuerpo(W/m^2),

α = fracción de energía radiante absorbida por el cuerpo,

e = poder emisivo total,

$$e = \alpha E/E = \frac{\text{Radiación emitida desde el cuerpo}}{\text{Radiación que incide sobre el cuerpo}} \quad (3.3)$$

La tabla siguiente consta de una selección de valores de poder emisivo total para varios materiales.

Tabla 3.9 Valores totales del poder de emisión para varios metales

Material	Estado	Poder emisivo total
Chapa de acero	En bruto	0.97
Acero	Pulido	0.08
Hierro fundido	Fuertemente oxidado	0.95
Hierro fundido	Pulido	0.21
Aluminio	Oxidado	0.11
Aluminio	Pulido	0.028

Nota: Los valores del poder emisivo varían con la temperatura, teniendo tendencia a aumentar con la misma.

3.16 Medición de la temperatura por variación de la resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica de los conductores y semiconductores permanece constante si no varían sus condiciones físicas y químicas. Cuando varía la temperatura de un conductor, su resistencia también varía. Se utilizan dos tipos de termómetros de resistencia eléctrica: los que emplean metales de gran pureza, como cobre, níquel o platino, y que poseen coeficientes de variación de resistencia con la temperatura positivos, esto es, aumenta la resistencia con la temperatura; y los que se fabrican con mezclas de óxidos metálicos sinterizados, carbono, aleaciones de germanio, etc., las cuales poseen un coeficiente de resistencia negativo, esto es, decrece la resistencia eléctrica. Los primeros se basan en la

variación de resistencia de los metales, a menudo platino; y en el caso de los termistores(resistencias térmicas) en la variación de resistencia de los semiconductores, normalmente aleaciones a base de germanio.

3.17 Termómetros de resistencia eléctrica

Los aspectos más apreciados de estos termómetros son su precisión, sensibilidad y estabilidad, que, con un circuito cuidadosamente proyectado son de un orden tan elevado que los hace adecuados para la determinación de la Escala de Temperatura Práctica Internacional. Se emplean para la medición en la gama de 10K a 1300K, pero, industrialmente, se utilizan entre 73K y 873K(de - 200 a 600°C), aunque más frecuentemente en la parte superior de la gama. Constan de un alambre enrollado en forma no inductiva sobre una matriz aislante, todo lo cual se introduce en una cápsula protectora de refractario como se ve en la siguiente figura 3.17.

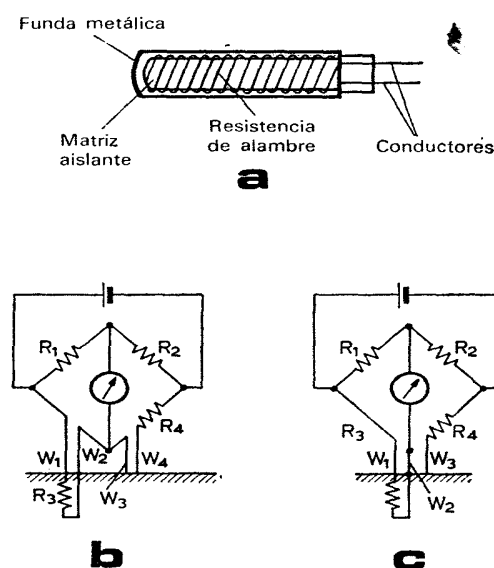


Fig. 3.17 Termómetro de resistencia eléctrica

Se conectan los conductores de cobre que provienen de la bobina a un puente de Wheatstone. Cuando los conductores provenientes de termómetros son cortos, se construyen de gran sección transversal para reducir su resistencia y así permanecer inalterables con las variaciones de temperatura ambiente,

pero, cuando son largos, y para reducir su coste, se utilizan conductores adicionales, los cuales toman la forma de tres y cuatro conexiones de conductor al puente como se ve en la (figura b y c).

3.17.1 Conexión de tres conductores

La bobina de resistencia del termómetro se conecta por medio de tres alambres conductores W1 W2 y W3, al circuito del puente. Si los conductores W1 y W3 son de material, longitud, diámetro y condición similares, cualquier variación de la temperatura ambiente causará una variación de la resistencia en ambos. Así, los brazos del puente a los cuales van conectados sufren igual variación de resistencia y el puente solamente mide la variación de resistencia de la bobina.

3.17.2 Conexión de cuatro conductores

En este caso se ponen dos conductores, W3 y W4, en corto circuito cerca de la bobina; también aquí el puente permanece en equilibrio y sólo mide las variaciones en la bobina.

Cuando se requiere gran precisión y sensibilidad, se utiliza una de las formas de puente de Wheatstone equilibrado.

Aplicaciones

Las lecturas de temperaturas desde puntos muy alejados entre sí pueden traspasarse conjuntamente y fácilmente a un panel central bien separado del cuerpo de medición; así, los termómetros de resistencia

pueden emplearse donde las longitudes del tubo capilar de los termómetros de dilatación de líquidos serían excesivas.

Los termómetros de resistencia existen en una gran variedad de formas que incluyen los tabiques, bandas y cintas para medición de la temperatura superficial, y los tipos de alambre descubierto que dan una respuesta mejorada para medición en el aire y en fluidos no corrosivos; también se utilizan para medir las temperaturas de los gases. Puede disponerse de sondas especiales en forma de agujas o de sondas en forma de estribo para medir materiales blandos tales como goma o carne. Pueden conectarse varios termómetros en serie dentro de un puente para obtener temperaturas medias de líquidos, pastas o sólidos granulados. Las diferencias de temperatura pueden hallarse conectando dos elementos de resistencia exactamente similares a dos brazos de puente. Los bulbos se mantienen a la misma temperatura y el puente equilibrado; la escala puede entonces graduarse por diferencia de temperatura entre los bulbos.

Los bulbos del termómetro de resistencia pueden diseñarse para casi cualquier variación de resistencia deseada que corresponda al intervalo fundamental (entre puntos de hielo y de vapor), pero los termómetros industriales suelen tener un intervalo de 50 a 100 ohmios, lo que da una gran variación de resistencia en el bulbo, en comparación con los alambres conductores. La corriente utilizada para los puentes del termómetro de resistencia puede ser alterna o continua; esta corriente incrementará la temperatura del circuito del puente. No obstante, este efecto es pequeño y, para la mayoría de las finalidades pueden despreciarse.

Fuentes de error

- 1) La resistencia por impurezas en el metal, que puede causar difusión dentro del mismo, provocando segregación de fases y evaporación. De hecho, los materiales disponibles son de pureza muy elevada.
- 2) Un metal que ha sido deformado sufrirá variación en las características de resistencia, por lo que debe ser recocido a una temperatura superior.
- 3) Las deformaciones resultantes de deficiencias de instalación, vibraciones, etc., o las deformaciones surgidas por la dilatación diferencial entre el elemento de medición y el sólido al que va unido cuando se mide la temperatura superficial.

Precisión. Los termómetros de resistencia eléctrica poseen una precisión de $\pm 0.75\%$ de la gama de la escala a temperaturas de hasta 600°C .

3.18 Termistores

Los átomos metálicos comparten mutuamente sus electrones de valencia, así estos electrones están en estado de movimiento continuo a través del metal, ya que se desplazan de un átomo a otro; los electrones se sienten “libres”. Al aumentar la temperatura, se incrementa la vibración de los átomos en el retículo metálico, aumentando también el volumen del espacio ocupado por aquéllos, dificultándose de este modo cada vez más el flujo de electrones a través del retículo. Los electrones de valencia en los semiconductores(termistores) están más firmemente unidos a sus átomos, pero el incremento de temperatura permite que algunos de ellos se liberen y fluyan; así, este incremento de temperatura hace disminuir la resistencia eléctrica por mejorar las condiciones para el flujo. Los elementos del termistor utilizados para la medición de la temperatura tienen coeficientes de resistencia con la temperatura mucho mayores que el cobre o el platino, pues, a 25°C , el platino es 0.0036, y el de los termistores, en general

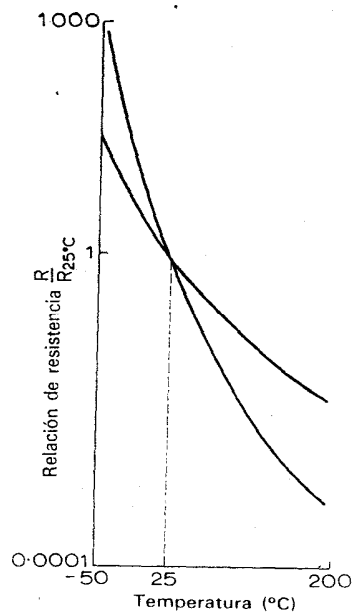


Fig. 3.18. Curvas hípicas de relación de resistencia

es de -0.045. La resistividad es también muy superior a la de cualquier metal puro; así, son extraordinariamente sensibles a pequeñas variaciones. En la figura 3.18 se muestran las curvas típicas de relación de resistencia. Los semiconductores poseen una relación temperatura-resistencia exponencial, de la forma siguiente

$$R = ae^{(b/K)} \quad (3.4)$$

Donde R = resistencia (ohmios)

K = temperatura absoluta

e = base neperiana

a y b son constantes sobre una pequeña gama de temperaturas.

Cuando está equilibrado, el circuito en puente Wheatstone ordinario tiene un voltaje de salida que es hiperbólico con respecto a la variación de resistencia de un brazo particular. Equiparando

cuidadosamente las características no lineales del termistor y del puente, es posible tener una respuesta lineal en la escala sobre una pequeña gama de temperaturas.

Dentro de una variedad de materiales semiconductores, el más usado es el germanio conteniendo proporciones exactas de arsénico, palio o antimonio, debido a que, al revés de muchos otros semiconductores, es muy estable y su derivación a partir del calibrado es pequeña; también muestra una disminución considerable de resistencia al aumentar la temperatura.

La gama de temperaturas medidas con los termistores es -250°C a 650°C , aunque es posible medir temperaturas más bajas y más altas. Bajo condiciones de laboratorio rigurosamente controladas, pueden efectuarse mediciones precisas entre 0.001K y unos 4K .

Se fabrican aparatos que funcionan con batería y otros alimentados con corriente de la red de suministro; en los dos casos pueden ser portátiles o fijos y con márgenes de escala tan reducidos como 10°C y subdivisiones de 1°C . Debido a su gran resistividad, es posible disponer de elementos de termistor muy pequeños, los cuales permiten la medición de temperatura punta. Cuando hace falta, pueden emplearse instrumentos de lectura continua, en la forma de unidades de canal único o múltiple. Los termistores son de configuración diversa: sondas, listones, varillas y discos; algunas veces se utilizan sin protección, pero normalmente van revestidos de vidrio o colocados dentro de una cápsula de metal. Los discos y las varillas se usan más como elementos de medición donde no tenga importancia el retardo de respuesta, como compensadores de temperatura y para el control de voltaje y potencia de los circuitos electrónicos figura 3.19. Para la medición de temperaturas superficiales de metales, gases y líquidos, se utilizan sondas de metal y vidrio de diámetro inferior a 2mm .

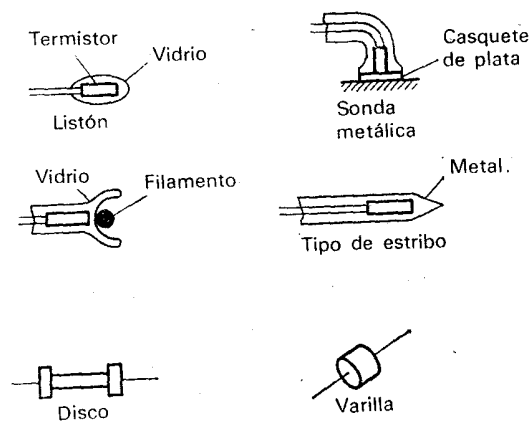


Fig. 3.19. Termistores.

3.19 Sondas de Vidrio

Se construyen con vidrio especialmente endurecido y se calibran sobre superficies metálicas o en líquidos. Son muy adecuadas para materiales o líquidos que son malos conductores de calor y que tiene baja capacidad calorífica., por ejemplo, materiales aislantes, polvos, plásticos, textiles, superficies barnizadas o pintadas. Se utilizan para comprobación de piezas pequeñas como transistores, bobinados, escobillas de fricción y cables en tensión de hasta 450V, siempre que se tomen las precauciones debidas.

3.20 Sondas metálicas

Éstas se calibran directamente sobre superficies metálicas o en líquidos o gases, utilizándose para comprobar temperaturas superficiales, por ejemplo, en calas y piezas muy pequeñas. Debido a su reducido diámetro, la cantidad de calor extraído de la superficie a **medir** es insignificante, por lo que apenas afecta la temperatura de la pieza. Las sondas metálicas son especialmente útiles en la industria de la alimentación, ya que aquí no puede admitirse la contaminación que produciría la

rotura de las sondas de vidrio. En los materiales blandos pueden insertarse sondas del tipo de aguja de acero inoxidable.

Los termistores de germanio son muy estables, aunque después del calibrado tienen tendencia a desviarse con el tiempo. No obstante, puede obtenerse una estabilidad del orden 0.1°C por año. Para mantener el calibrado, el instrumento no debe utilizarse más allá de los límites de su gama de temperatura, debiendo evitarse las vibraciones y tensiones.

Para medir piezas que vibran ligeramente, se utilizan sondas especiales.

3.21 Calibrado.

Los aparatos pueden calibrarse directamente haciendo referencia a las temperaturas de equilibrio de ciertas sustancias (calibrado primario), o por comparación con instrumentos normales que han sido calibrados de esta manera (calibrado secundario).

3.21.1 Calibrado primario

El sensor de temperatura, por ejemplo un termopar o un termómetro de resistencia en la forma en que debe usarse y conectarse en circuito, se sumerge en un metal puro completamente fundido y en estado de enfriamiento lento. Al iniciarse la solidificación, esto es, cuando el sólido empieza a formarse, el descenso de temperatura de la sustancia se detiene y entonces permanece estacionaria hasta que se completa la solidificación. Una Curva de enfriamiento directo, o una inverso, indican cuándo se ha alcanzado la temperatura de solidificación. Se obtiene una curva de enfriamiento directo marcando, a intervalos regulares, las lecturas del milivoltímetro en relación con un tiempo base de duración del enfriamiento; y una curva del enfriamiento inverso se obtiene marcando las lecturas del milivoltímetro en función del tiempo requerido por éste para que se produzca un descenso de una división de escala. Luego pueden marcarse los puntos de solidificación combinados para un cierto número de sustancias, al objeto de formar una curva de

calibrado total para el instrumento figura 3.20. Por supuesto, es esencial asegurarse de que todas las fuentes de error del sistema se han eliminado antes de intentar el calibrado.

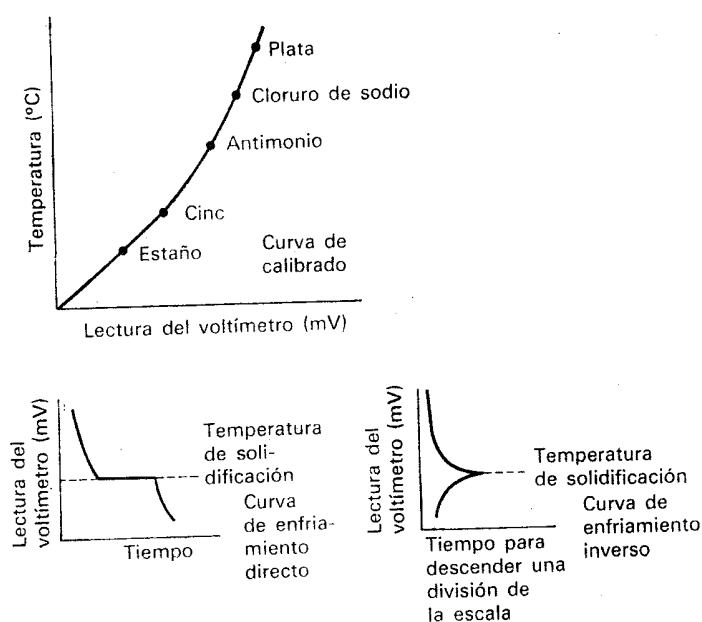


Figura 3.20

Pueden calibrarse termopares de metales raros en el punto de fusión del oro (1064.43°C), fijando un pequeño trozo de alambre de oro entre los extremos libres de la unión caliente del termopar. Este método requiere la aplicación de la ley de los metales intermedios. Se calienta muy lentamente el termopar en la zona del punto de fusión y, simultáneamente, se observan las lecturas del milivoltímetro. Cuando la temperatura es suficiente para fundir el alambre, se rompe el circuito del termopar, considerándose la lectura del milivoltímetro en este instante como punto del oro. Esta técnica puede utilizarse también para determinar el punto del paladio (1552°C) y, con algunas modificaciones, el punto del platino (1772°C), pero no adecuado para metales que se oxidan rápidamente, salvo que se adopten precauciones especiales.

3.21.2 Calibrado secundario

La forma más simple de calibrado secundario comporta la comparación directa con un aparato previamente calibrado, siendo éste el método utilizado para temperaturas hasta del punto de oro. Para temperaturas de hasta 550°C, se utilizan baños de agua, aceite, sal o metal provistos de un agitador y de un sistema de calefacción; también pueden insertarse los instrumentos en un bloque que se calienta uniformemente en un baño. Para temperaturas superiores a los 550°C, el calibrado se lleva a cabo en un horno del tipo usado para la determinación del punto de solidificación de los metales. Cualquiera que sea el método utilizado, es esencial que los instrumentos estén lo mas cerca posible unos de otros, y que se obtenga una temperatura estable antes de efectuar cada lectura. Cuando no se requiere el calibrado total, un punto de comprobación en la gama de funcionamiento normal del instrumento bastará para indicar cualquier defecto importante.

CAPÍTULO 4

4. MEDIDAS DE PRESIÓN

La medición de la presión puede adoptar las formas siguientes:

- a) Medición de la presión estática.
- b) Medición de la presión dinámica.

El término “presión estática” se usa mucho en la medición de la presión, del nivel de líquidos y de caudal. Cuando, en un proceso, un fluido permanece quieto o “estático”, la presión estática en un punto del fluido es la ejercida por la columna del mismo encima de este punto. Si consideramos un tubo lleno de un fluido en movimiento, la presión estática en un agujero de derivación perforado en la pared del tubo puede hallarse conectando un aparato de medición de presión a esta derivación.

Cuando se requiera medir una presión que fluctúa rápidamente(por ejemplo, la presión en un motor de combustión interna), los métodos utilizados para la medición de la presión estática no resultan adecuados. En este caso se utiliza un transductor de presión el cual convierte a dicha presión en una señal que puede registrarse.

4.1 Medición de la Presión Estática

La medición de la presión estática puede considerarse convenientemente comprendida en uno de los epígrafes siguientes:

- a) Medición de presión diferencial.
- b) Presión manométrica, que es la medida por encima de la presión atmosférica local.
- c) Presión absoluta, que es la presión total medida partiendo de la presión cero como punto de referencia. Cuando la presión absoluta excede de la atmosférica local, puede considerarse que es la suma de la presión manométrica y la presión atmosférica.

- d) Medición del vacío. En este caso, la presión a medir es inferior a la presión atmosférica local.

4.2 Medición de la Presión Diferencial

Uno de los aparatos de medición de presión diferencial más conocidos es el manómetro de tubo en U. Se trata de un tubo de vidrio en forma de U lleno, hasta aproximadamente la mitad, de líquido, normalmente agua o mercurio. Se fija una escala entre las ramas del tubo, de forma que puede medirse. Figura 4.1

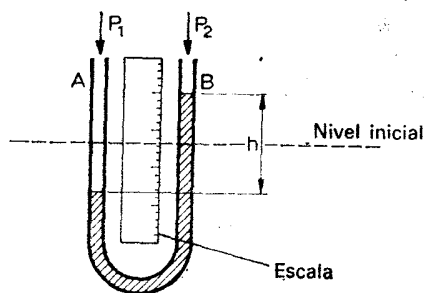


Fig.4.1. Manómetro de tubo en U

La diferencia de nivel entre las columnas A y B debida a una presión diferencial ($P_1 - P_2$). Si se aplica a A la presión P_1 más elevada, y a B, la presión más baja P_2 , el líquido en A se ve forzado a descender, y el de B a ascender, de forma que esta acción continúa hasta que la presión P_1 es equilibrada por la suma P_2 más la presión debida a la altura h de la columna líquida entre los dos niveles. Luego,

$$P_1 = P_2 + \rho gh \quad (4.1)$$

Donde P_1 y P_2 son presiones absolutas (N/m^2 o Pa),

h = diferencia de niveles (m),

ρ = densidad del fluido del manómetro (kg/m^3)

g = aceleración debida a la gravedad (m/s^2).

O, alternatively,

$$P_1 - P_2 = \rho gh \quad (4.2)$$

donde $P_1 - P_2$ es la diferencia de presión aplicada a través del manómetro. Si la rama B del manómetro está abierta a la atmósfera, tenemos que P_2 es la presión atmosférica, con lo que la ecuación de arriba se transforma en

$$P_1 - \text{presión atmosférica} = \rho gh \quad (4.3)$$

Por tanto, en este caso, el manómetro mide la diferencia entre la presión absoluta y la local atmosférica, diferencia que se denomina ***presión manométrica***.

4.2.1 Alcance del manómetro simple de tubo en U

Este manómetro se utiliza normalmente entre $10 \times 10^{-3}\text{m}$ de la columna de agua y $0\text{-}1.25\text{m}$ de columna de mercurio ($0\text{-}162000\text{N/m}^2$ o $0\text{-}162\text{ kPa}$).

En la figura 4.2 se muestra una realización industrial del manómetro simple en U para la medición de altas presiones. En este caso, hay una rama de mucho mayor diámetro que la otra, además, las ramas se construyen a menudo de acero.

Se aplica una presión al manómetro diferencial, de modo que la presión menor P_2 , actúa en la rama de mayor diámetro, y la mayor, P_1 en la rama de menor sección. El líquido de la rama mayor sube, y el de la menor desciende, hasta que se consigue el siguiente equilibrio de presión:

$$P_1 = P_2 + \rho gH = P_2 + \rho g(h+d) \quad (4.4)$$

donde, H = diferencia total de niveles.

h = diferencia entre el nivel en la rama de menor diámetro y el nivel cero(m),

d = diferencia entre el nivel en la rama de mayor diámetro y el nivel de cero (m).

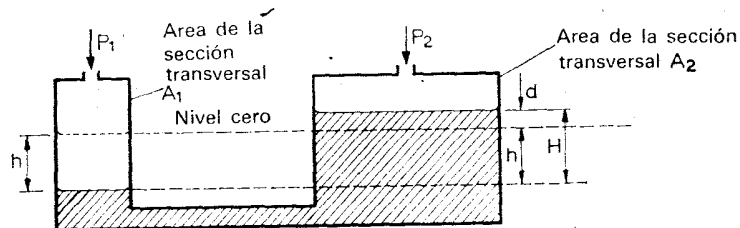


Figura 4.2. Manómetro de tubo en **U** industrial

Asimismo, el volumen que se ha desplazado de la rama izquierda A (rama menor) debe ser igual al volumen que ha pasado a la rama B (rama mayor), es decir,

$$A_1 h = A_2 d, \quad \text{y de aquí,} \quad h = A_2 d / A_1$$

donde, A_1 = sección transversal de la rama de menor diámetro (m^2),

A_2 = sección transversal de la rama de mayor diámetro (m^2).

Sustituyendo,

$$P_1 = P_2 + \rho g d \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \right) \quad (4.5)$$

o

$$P_1 - P_2 = \rho g d \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \right)$$

0

$$d = \frac{P_1 - P_2}{\rho g d (1 + A_2/A_1)} \quad (4.6)$$

Por lo tanto, la altura que sube el líquido en el tubo mayor es proporcional a la presión diferencial ($P_1 - P_2$). En muchos manómetros industriales de este tipo se incluye un flotador metálico en la rama de sección mayor, el cual va conectado a través de un mecanismo de articulación, a una aguja indicadora o a un lapicero de registro. Así como que el nivel de líquido varía en la respuesta a las variaciones de los diferenciales de presión, el flotador ascenderá sobre la superficie de líquido y registrará el cambio de nivel o presión diferencial.

4.2.2 Manómetro de cubeta

El funcionamiento del aparato anterior no se altera si se inserta directamente el tubo pequeño en la rama mayor, según puede apreciarse en la siguiente figura 4.3. Si se le aplica al manómetro una presión diferencial ($P_1 - P_2$), se tiene

$$P_1 - P_2 = \rho g (h + d)$$

Como $A_1 d = A_2 h$, y, por tanto, $d = \frac{A_2}{A_1} h$, resulta

$$P_1 - P_2 = \rho g h \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \right). \quad (4.7)$$

Si el valor A_2/A_1 es tan pequeño que se puede despreciar. Por consiguiente, la presión del líquido en el tubo estrecho $P_1 - P_2 = \rho g h$.

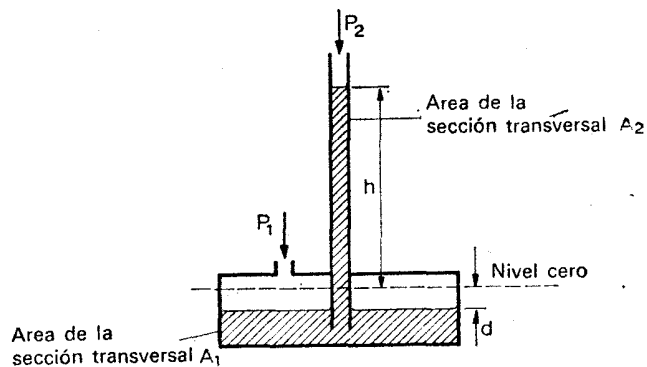


Fig. 4.3. Manómetro de cubeta.

En la práctica, el diámetro de la cubeta(rama ancha) se hace muy grande en comparación con el tubo estrecho; así, la caída de nivel, d , desde el nivel cero en la cuba puede despreciarse.

4.2.3 Manómetro de tubo inclinado

El manómetro de tubo inclinado es un perfeccionamiento del manómetro de tubo en U. La ventaja del dispositivo con tubo inclinado es que incrementa la longitud de la escala en comparación con el tubo sencillo en U, para una misma presión diferencial. Una rama está constituida por un tubo de vidrio inclinado formando un cierto ángulo con la horizontal o la vertical, y la otra, por una cámara o cubeta de gran volumen. El tubo inclinado lleva una escala adyacente al mismo. En la figura 4.4 se muestra una disposición típica de este manómetro.

$$P_1 - P_2 = \rho g (h_1 + d \sin \alpha)$$

$$A_1 h_1 = A_2 d, \text{ esto es, } h_1 = \frac{A_2}{A_1} d$$

$$P_1 - P_2 = \rho g d \left(\frac{A_2}{A_1} + \sin \alpha \right) \quad (4.8)$$

Y, como en el ejemplo anterior, si A_1 es mucho mayor que A_2 , la relación A_2/A_1 puede despreciarse. Entonces, tenemos

$$P_1 - P_2 = \rho g d \sin \alpha \quad (4.9)$$

$$d \sin \alpha = h$$

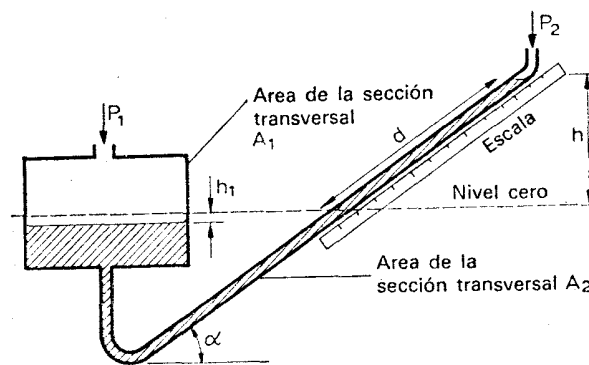


Fig. 4.4. Manómetro tubo en U inclinado.

donde h es la altura que se habría registrado empleando un tubo en U simple. Si el tubo está inclinado a 30° respecto a la horizontal, esto es, $\sin \alpha = 1/2$, tenemos,

$$d \times \frac{1}{2} = h \quad \text{o} \quad d = 2h$$

por lo tanto, con un tubo que forme un ángulo de 30° con la horizontal se obtiene una longitud de la escala de lectura de aproximadamente el doble del valor normal.

Uso de líquidos de separación no miscibles en los manómetros: Manómetros de tubo en U con dos líquidos.

Cuando se miden las presiones de ciertos líquidos con un tubo manométrico en U, puede ser necesario separar el líquido a medir del manómetro por medio del fluido de separación. Por ejemplo, si los dos líquidos pueden experimentar una reacción química al mezclarlos, es preciso utilizar un fluido de separación. Los fluidos de separación han de ser no miscibles con el del manómetro o con el que se va a medir y, por tanto, deben ser más ligeros que el fluido del manómetro, pero más pesados que el que se mide como se ve en la figura 4.5.

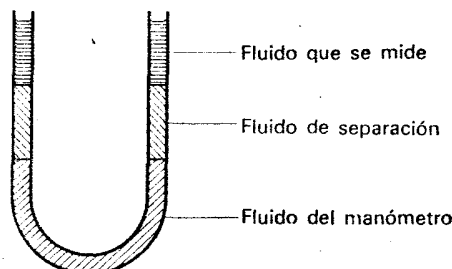


Fig. 4.5. Manómetro tubo U con fluido no miscible para separación.

Se añade exactamente la misma cantidad de líquido de separación a ambas columnas del manómetro, al objeto de que se invaliden.

Con los fluidos no miscibles suelen usarse las cámaras de cierre. Éstas son simples depósitos de diámetro mucho mayor que el tubo del manómetro, a fin de que, al aplicar la presión, el nivel del líquido no miscible no varíe significativamente. La figura 4.6 muestra un manómetro típico de tubo en U junto con el fluido no miscible y las dos cámaras de cierre.

$$P_1 + \rho_1 g h_2 = P_2 + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= \rho_1 g (h_1 - h_2) + \rho_2 g h \\ &= -\rho_1 g h + \rho_2 g h = (\rho_2 - \rho_1) g h \end{aligned} \quad (4.10)$$

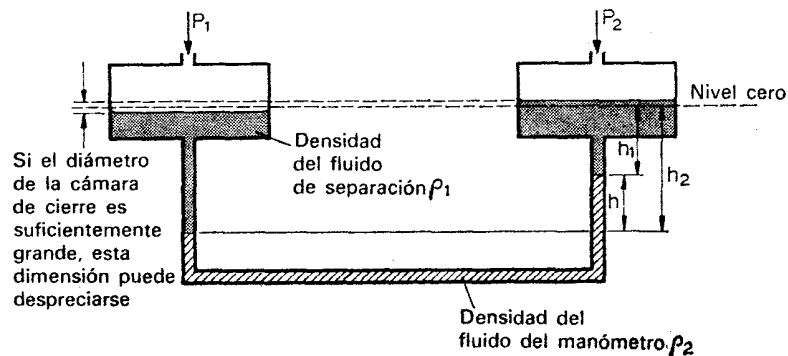


Fig. 4.6. Manómetro de tubo en U con fluido de separación y cámaras de cierre.

4.2.4 Manómetros de diafragma sencillo, de diafragmas apilados y de fuelle

El manómetro de diafragma único, en su forma más sencilla, consta de una lámina delgada, plana y circular. Esta lámina va fijada circunferencialmente por su borde, y cuando sobre ella actúa una presión diferencial, se abomba según muestra la figura 4.7a. Únicamente para deformaciones relativamente pequeñas existe una relación lineal entre la presión y el abombado, siendo deseable alguna modificación de este caso sencillo para la aplicación práctica de los instrumentos.

Para la medición de bajas presiones se requiere un diafragma extremadamente flexible. El conjunto de este diafragma tiene la forma de un anillo de tela con un disco metálico, o de cualquier material rígido, en el centro. En la figura 4.7b se muestra el principio de funcionamiento de un manómetro para presión diferencial del tipo de diafragma de tela o "flojo".

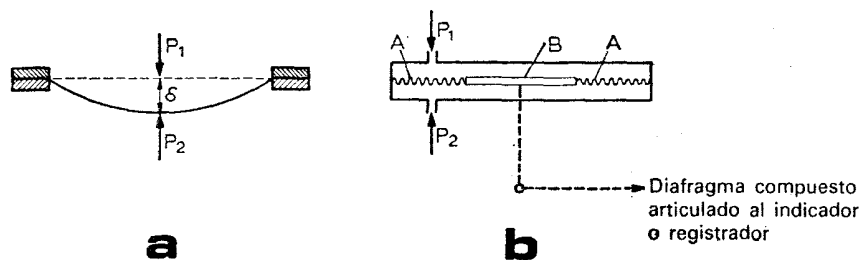


Fig. 4.7. a) Diafragma único: presión diferencial = $P_1 - P_2$. b) Manómetro para presión diferencial de diafragma compuesto.

La pieza A es el anillo de tela, y la B, la pieza central sólida que va articulada a la aguja indicadora o al lapicero registrador. Con el manómetro de diafragma “flojo” no es necesario que el conjunto sea de forma circular, pudiendo con bastante frecuencia ser alargado. Se han utilizado una gran variedad de materiales para este tipo de diafragma, siendo los más corrientes: cuero, plástico, tela, cauchutada, nylon y seda. Los manómetros que funcionan según este principio pueden utilizarse hasta 1m de columna de agua o hasta unos 10 kPa.

Otra forma de dispositivo de medición de presión es el de cápsula metálica.

Este instrumento consta de dos diafragmas circulares, metálicos, conectados dorso a dorso formando una cápsula elástica según muestra la figura 4.8.

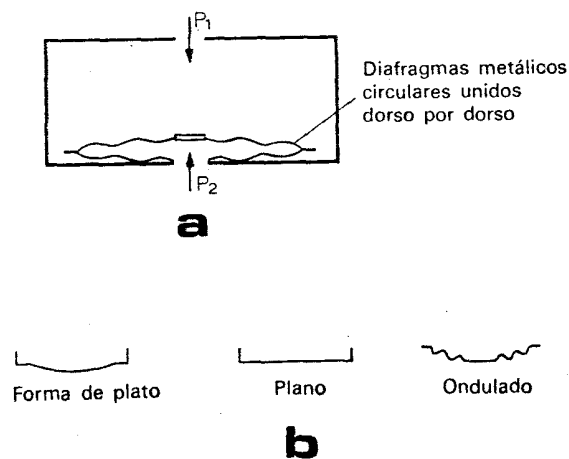


Fig. 4.8 a) Manómetro de cápsula metálica. b) Formas típicas del diafragma.

Se aplica una presión al interior de la cápsula sobre la cual actúa exteriormente otra presión. La flexión de la cápsula tiene una relación lineal con la presión siempre que la deformación no sea excesiva. Los diafragmas utilizados en el manómetro de cápsula tienen generalmente la forma de plato, plana u ondulada figura b.

Con una serie de diafragmas metálicos ondulados puede obtenerse una flexión mucho mayor que con una sola cápsula. Entonces, cada diafragma contiene un orificio central y se unen con cierre estanco por los bordes interiores o exteriores, tal como lo muestra la figura 4.9. Si $P_1 > P_2$, el montón de diafragmas, o diafragma compuesto, está sometido a compresión. El número de diafragmas utilizados puede variar desde dos (la cápsula) hasta unos veinte.

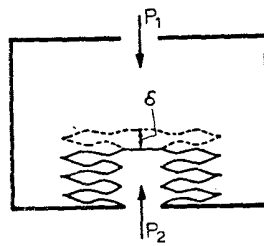


Fig. 4.9 Diafragma compuesto. El montón se comprime en una magnitud δ bajo la acción de una presión diferencial $P_1 > P_2$.

El fuelle metálico es de forma similar a la del montón de diafragmas, pero su sistema constructivo es totalmente diferente. Se comienza tomando un tubo de pared fina y, mediante prensas hidráulicas, se le da una forma ondulada según se aprecia en la figura 4.10. Los fuelles pueden producirse en diámetros bastante grandes, de hasta unos 300mm. Sin embargo, los tamaños mayores se usan principalmente en válvulas de mando y no para instrumentos de medición de presión.

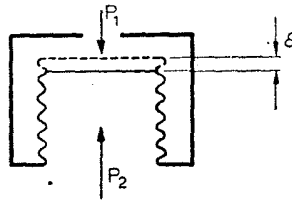


Fig. 4.10. Manómetro de fuelle metálico. El fuelle metálico se contrae en magnitud δ bajo la acción de una presión diferencial $P_1 > P_2$.

En la figura 4.11 se muestra un manómetro industrial típico utilizado para medición de la presión diferencial. La disposición en doble fuelle de la izquierda se conecta mediante articulación a un lapicero registrador o a una aguja indicadora, mientras que el fuelle de la derecha actúa como cierre para el resorte de ajuste del alcance de medición.

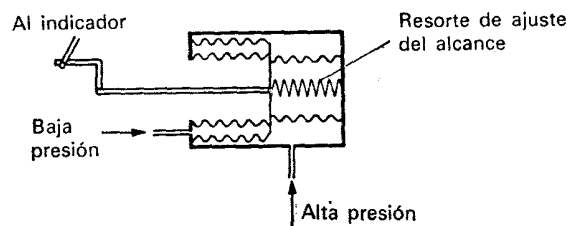


Figura 4.11. Manómetro de fuelle industrial utilizado para medir la presión diferencial.

Los materiales más comúnmente utilizados para la fabricación de diafragmas son: acero, bronce fosforoso, metal blanco y cobre-berilio. Los materiales utilizados para los fuelles son principalmente latón 80-20 (80% de cobre y 20% de cinc), bronce fosforoso, acero inoxidable y cobre-berilio.

4.2.5 Balanza anular

Este aparato consta de un arco hueco o de sección anular, dividido en dos secciones por una partición B y un líquido de cierre figura 4.12. Las secciones en uno y otro lado de la partición están conectadas a las dos fuentes de presión.

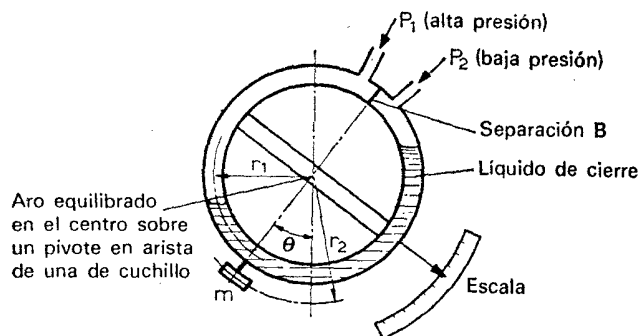


Fig. 4.12. Balanza anular.

El anillo pivota en su centro sobre un apoyo en arista de cuchillo y, cuando se aplica una presión diferencial de una parte a otra de la partición, se origina un momento de giro. El aro empieza a girar en un sentido de alejamiento de la presión más elevada hasta que el momento de oposición, creado por la masa unida a la parte inferior del aro, equilibra el momento de giro. Así, tenemos

$$\text{Momento de giro} = (P_1 - P_2)Ar_1 \quad (4.11)$$

donde $P_1 - P_2$ = presión diferencial,

A = área de la sección transversal del tubo,

r_1 = radio medio del aro.

También,

$$\text{Momento de restitución} = mgr_2 \sin\theta \quad (4.12)$$

Donde m = masa

r_2 = radio de su punto de aplicación,

θ = ángulo de giro,

g = aceleración de la gravedad.

Por tanto,

$$(P_1 - P_2)Ar_1 = mgr_2 \sin\theta$$

o

$$P_1 - P_2 = \frac{mgr_2}{Ar_1} \sin\theta \quad (4.13)$$

Luego la presión diferencial aplicada a la balanza anular es proporcional al ángulo de giro, esto es, el ángulo de giro es una medida de la presión diferencial. Los alcances típicos para este instrumento están dentro de los límites 0-300mm de columna de agua.

4.3 Medición de la presión manométrica

El manómetro de pistón libre con peso muerto se ha utilizado durante casi ochenta años para determinar, con la mayor exactitud posible, las presiones estables. Este manómetro que se muestra en la figura 4.13 consta de un pistón mecanizado con precisión, de peso conocido, que va insertado con ajuste estrecho a un cilindro; se conoce, además, la sección transversal de ambas piezas. Primero se cargan varias masas de peso conocido sobre el extremo libre del pistón, aplicándose entonces una presión de fluido en el otro extremo hasta que se desarrolla una fuerza suficiente para levantar el pistón junto con los pesos. Cuando el pistón flota libremente dentro del cilindro, se encuentra con la presión del sistema. Por consiguiente,

$$P(\text{presión del peso muerto}) = F_e/A_e \quad (4.14)$$

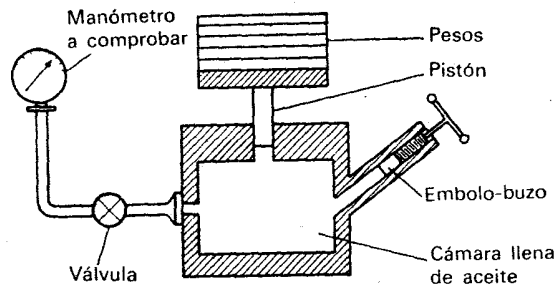


Fig. 4.13. Aparato de prueba de presión con peso muerto.

donde F_e es la fuerza equivalente de la combinación pesos-pistón, y A_e es el área equivalente de la combinación pistón-cilindro. La película de fluido que se escapa del sistema por el huelgo entre el pistón y el cilindro proporciona lubricación, haciendo girar también el pistón para, además, reducir el rozamiento. Quizás el manómetro más comúnmente usado para la medición de la presión manométrica es el manómetro de tubo de Bourdon. Consta de un tubo metálico, de sección transversal aproximadamente elíptica, que tiene forma de C obtenida mediante máquinas especiales. El tubo está fijo por un extremo, que queda abierto para aceptar la presión aplicada, pero por el otro extremo queda libre y está cerrado. Cuando se incrementa la presión en el interior del tubo, la sección transversal del mismo tiende a tomar la forma circular, y todo el tubo tiende a enderezarse. Así, el extremo cerrado del tubo se desplazará, siendo este desplazamiento proporcional a la diferencia de presión entre el interior y exterior del tubo. El movimiento del extremo cerrado puede amplificarse y transmitirse a una aguja indicadora mediante un mecanismo de palanca, piñón y cremallera como en la figura 4.14. La presión de referencia en la caja que contiene el tubo de Bourdon suele ser la atmosférica, por lo que la aguja indicadora marca la presión manométrica.

Otras dos formas de tubo de Bourdon son el tipo helicoidal y el espiral plano. El principio de funcionamiento para ambos tipos es el mismo que para el tipo en forma de C, esto es, un extremo del tubo está cerrado y posee libertad de movimiento, y el otro, está fijo. Si se aplica dentro del tubo

una presión mayor que la exterior, el extremo libre del mismo se desviará y este movimiento puede transferirse a una aguja indicadora, como en el caso anterior.

Los tubos de Bourdon se usan normalmente para medir presiones de hasta 500MPa. Los materiales más usados son el bronce fosforoso o aleaciones de bronce similares, el acero y el cobre al berilio. La medición de presiones muy elevadas con el tubo de Bourdon depende de si se ha construido con un material de límite elástico elevado. Por tanto, el bronce fosforoso que posee un límite elástico bastante reducido, se descarta para aplicaciones de alta presión, usándose en tal caso, el acero o el cobre al berilio.

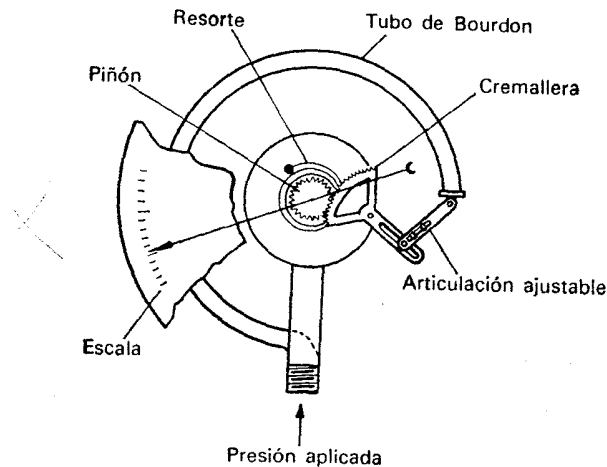


Figura 4.14. Manómetro de tubo de Bourdon.

Los diafragmas individuales, los diafragmas amontonados y los fuelles pueden también utilizarse para la medición de la presión manométrica. Las disposiciones básicas son las mismas que para la medición de la presión diferencial, pero en este caso se hace que una de las presiones sea la atmosférica. La figura 4.15 muestra un manómetro de fuelle del tipo adecuado para medir la presión manométrica.

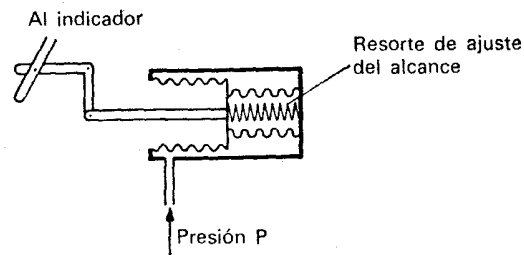


Fig. 4.15. Manómetro de fuelle para la medición de la presión manométrica. Desviación proporcional a $P - P_a$, o sea, proporcional a P_g donde P_a = presión atmosférica y P_g = presión manométrica.

Para la medición de la presión manométrica puede utilizarse perfectamente el manómetro de tubo en U si una rama del mismo está abierta a la presión atmosférica, según muestra la figura 4.16.

Ahora, $P_1 - P_a = \rho g h$ y $P_1 = P_g + P_a$, donde P_g = presión manométrica.

Por tanto,

$$P_g = \rho g h \quad \text{o} \quad h = P_g / \rho g$$

Así, h es una medida de la presión manométrica P_g .

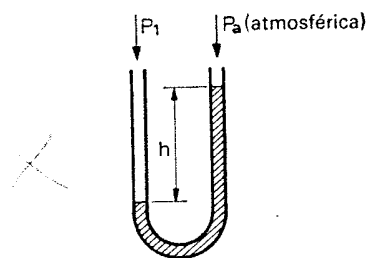


Fig.4.16. Manómetro de tubo en U para medir la presión manométrica.

4.4 Medición de la presión absoluta.

El manómetro de cubeta se encuentra cerrado de su extremo del tubo como se ve en la figura 17.

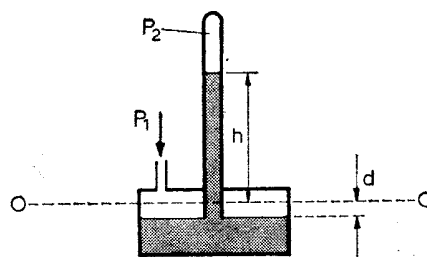


Fig. 4.17 Manómetro de cubeta para medir la presión Barométrica.

Si P_2 se hace ahora cero, esto es, se produce un vacío perfecto en el espacio existente encima del líquido, resulta

$$P_1 = \rho gh(1 + A_2/A_1)$$

y, por tanto, la altura de la columna líquida es proporcional a la presión absoluta P_1 . Un caso particular lo tenemos en el barómetro donde P_1 es igual a la presión atmosférica P_a . El barómetro de cuba más generalizado es el de Fortín, en el que puede ajustarse la altura de la superficie del mercurio en la cubeta figura 4.18.

En este caso, la cuba es una bolsa de cuero colocada en un recipiente de bakelita. Se hace girar el tornillo de ajuste de la superficie de referencia hasta que el mercurio de la cubeta establece justamente contacto con el índice de marfil, que es cuando la superficie del mercurio está alineada con el acero de la escala del instrumento. Luego se determina la altura indicada de la columna de mercurio en el tubo de vidrio por alineación del canto inferior del anillo visor con la parte superior del

menisco en el tubo. Entonces se lee sobre la escala del nonius para obtener la altura de mercurio indicada a la temperatura t del barómetro.

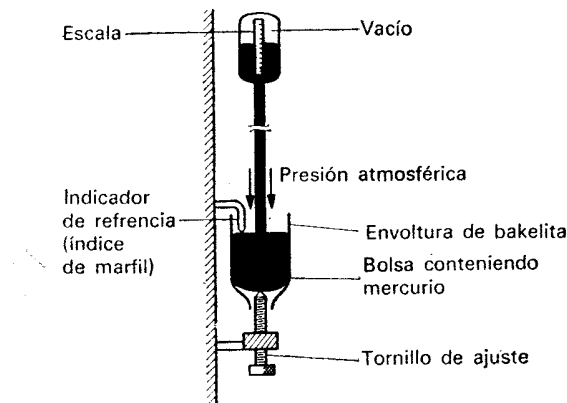


Fig. 4.18. Barómetro de Fortín.

Existe un barómetro que utiliza una cápsula de fuelle o un elemento de medición por diafragma y que se denomina barómetro aneroide. Se vacía la cápsula hasta obtener un elevado grado vacío y luego se cierra. La fuerza en el muelle debida a las variaciones atmosféricas es contrarrestada mediante un resorte resistente, transmitiéndose el movimiento del fuelle mientras varía la presión atmosférica, a través de un sistema de amplificación mecánico, a una aguja indicadora que marca sobre una escala a presión atmosférica en mm de mercurio. En la figura 4.19 se muestra un barómetro aneroide típico.

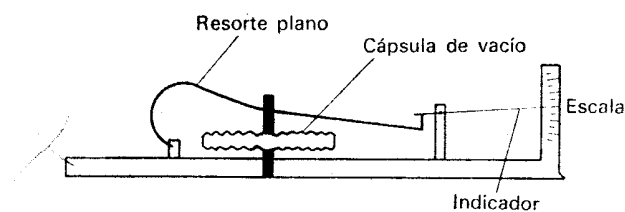


Fig. 4.19. Barómetro aneroide.

Este barómetro se calibra utilizando como patrón uno de mercurio del tipo Fortín. La amplificación es tan elevada que el rozamiento es importante, por lo que el manómetro debe golpearse ligeramente para reducir dicho rozamiento y obtener así lecturas correctas.

En la figura 4.20 se muestra cómo pueden utilizarse diafragmas amontonados o instrumentos de fuelle para la medición de la presión absoluta. Si se produce el vacío en un fuelle, y se efectúa un acoplamiento adecuado con otro, los efectos sobre los dos fuelles debidos a la presión atmosférica y a la temperatura ambiente son iguales dentro de un margen razonable. Al estar estos efectos en oposición, no influyen sobre la aguja indicadora o lapicero registrador. Con los efectos atmosféricos exteriores desequilibrados y con una presión despreciable en un fuelle, la desviación del registrador o indicador debe ser proporcional a la presión total en el otro fuelle, es decir, a la presión absoluta aplicada a estos fuelles. Estos manómetros pueden utilizarse para medir presiones absolutas de hasta aproximadamente 500kPa.

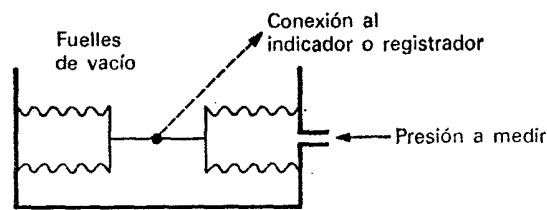


Fig. 4.20. Instrumento de fuelles para medir la presión absoluta.

4.5 Medición de vacío elevado

Algunos de los instrumentos ya descritos pueden utilizarse para medir las condiciones de vacío. Por ejemplo, pueden obtenerse instrumentos de tubo de Bourdon que miden presiones en descenso hasta 20mm de columna de mercurio y existen instrumentos de diafragma que miden presiones tan bajas como 1mm de columna de mercurio.

La región por debajo de 1mm de columna de mercurio puede dividirse convenientemente en tres partes:

- a) Vacío medianamente elevado: de 1 a 10^{-3} mm mercurio;
- b) Vacío elevado: de 10^{-3} a 10^{-7} mm de mercurio ;
- c) Vacío ultraelevado: 10^{-7} mm de mercurio y menos .

4.5.1 Vacuómetro de Macleod

En la figura 4.21 se muestran los elementos fundamentales del Vacuómetro de Macleod. El tubo capilar A está cerrado por arriba, y las ramas B y C están conectadas al sistema de vacío. Los tubos A y B son capilares y tienen el mismo diámetro, mientras que el tubo C es de mayor diámetro y sirve de ayuda para reducir los errores debidos a la capilaridad.

Inicialmente, se baja el recipiente desplazable hasta que la columna de mercurio se encuentra por debajo del nivel de la abertura W. En esta posición, los tres conductos se conectan a la presión que se ha de medir. Entonces se eleva el recipiente hasta que el mercurio llena el bulbo y asciende por el tubo capilar A, lo cual corresponde al cero de la escala. El gas de la rama A se comprime de acuerdo con la ley de Boyle.

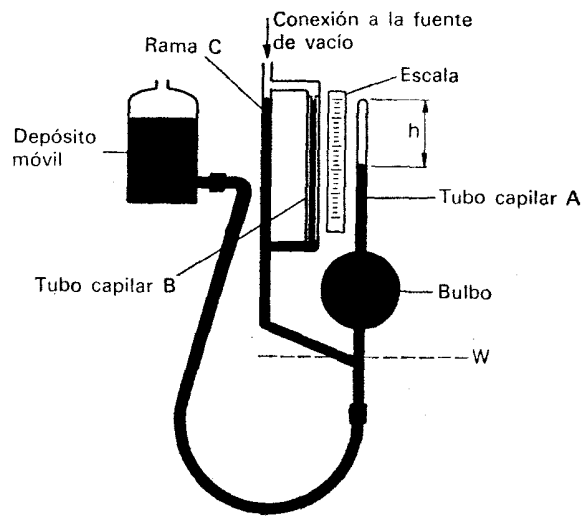


Fig. 4.21. Vacuómetro de Macleod.

Si V es el volumen del bulbo y la rama A por encima del nivel W ; p , la presión del gas en el sistema conectado a B y C; v , el volumen del gas en la rama cerrada después de la compresión, y P_1 , la presión del gas en esta rama después de la compresión, tenemos:

$PV = P_1v$ donde P y P_1 se mide en mm de Hg

También,

$$v = ah \quad \text{y} \quad h = P_1 - P$$

donde a es el área de la sección transversal del tubo A y h es la diferencia de niveles entre A y B.

Sustituyendo,

$$P = \frac{ah^2}{V - ah} \quad (4.15)$$

Para la medición de bajas presiones, el valor de V debería ser grande comparado con a . La relación V/a se denomina relación de compresión y, en la práctica, su valor máximo queda limitado debido al hecho de que, si a es demasiado pequeña, el mercurio tiende a detenerse en el tubo capilar y si V es demasiado grande, lleva consigo un peso excesivo de mercurio.

El campo de aplicación del vacuómetro de Macleod va 10 a 10^{-4} mm de mercurio, utilizándose con frecuencia como dispositivo de calibrado de otros equipos de medición del vacío elevado. Un inconveniente muy serio de este vacuómetro es que, si el gas cuya presión se está midiendo contiene vapores condensables, no obedece la ley de Boyle y pueden producirse errores.

4.5.2 Vacuómetro de Pirani

El vacuómetro de Pirani figura 4.22 se basa en el principio de que si se coloca un filamento calentado en el interior de una cámara de gas, la conductibilidad térmica del gas depende de la presión; por tanto, la transferencia de energía desde el alambre al gas es proporcional a la presión de éste. Si se mantiene constante el suministro de energía calefactora al filamento, y se varía la presión del gas, se alterará la temperatura del filamento, lo cual representa un método de medición de presión. Alternativamente, si varía la temperatura del filamento, ocurre lo mismo con la resistencia, lo que proporciona un segundo método de medición de la presión.

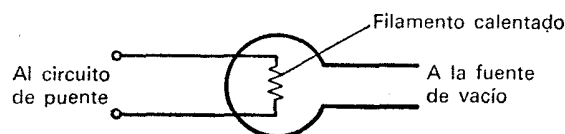


Fig. 4.22. Vacuómetro de Pirani.

Si se desea medir la resistencia del filamento, se emplea un puente de resistencia. El método usual consiste en equilibrar el puente a cierta presión y de referencia utilizar las corrientes que no equilibran para todas las otras presiones como una medida de las presiones relativas.

La pérdida de calor desde el filamento es también una función de la temperatura ambiente, pudiendo conseguir en la práctica una compensación para este efecto conectando dos vacuómetros en serie según muestra la figura 4.23.

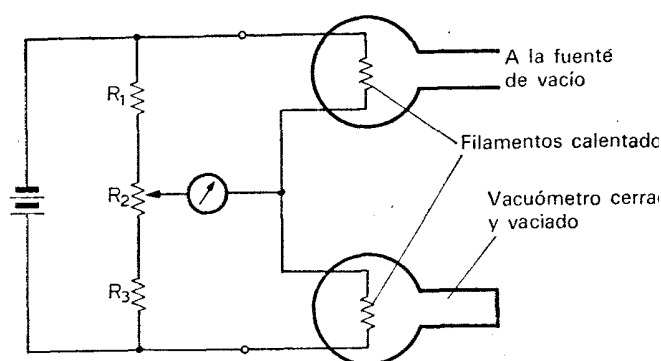


Fig. 4.23. Disposición para compensar variaciones de temperatura ambiente.

Primero se vacía el vacuómetro de medición, el cual, conjuntamente con el vacuómetro cerrado, se expone a las mismas condiciones ambientales. Luego se ajusta el circuito de puente a través de la resistencia R_2 para tener una condición nula. Cuando se expone el vacuómetro de medición a las condiciones de presión de prueba, la desviación del puente desde la lectura cero será independiente de las variaciones en la temperatura ambiente.

El alcance del vacuómetro de Pirani se extiende desde 10^{-4} mm hasta 5mm de columna de mercurio, aproximadamente.

4.5.3 Vacuómetro termoiónico o de ionización con cátodo caliente.

Este vacuómetro consiste en un conjunto de triodo termoiónico contenido en recinto de vidrio que puede ponerse en comunicación con el sistema cuya presión se va a medir. En la figura 4.24 se muestra un montaje típico. El ánodo está conectado a un potencial negativo y la rejilla a uno positivo, con respecto al filamento. Los electrones emitidos desde el filamento colisionan con las moléculas

de gas y las ionizan; luego, los iones positivos se desplazan hacia el ánodo cargado negativamente. En este momento circulará alrededor del circuito del ánodo una corriente de ionización, la cual es una medida de la presión absoluta del gas en el vacuómetro.

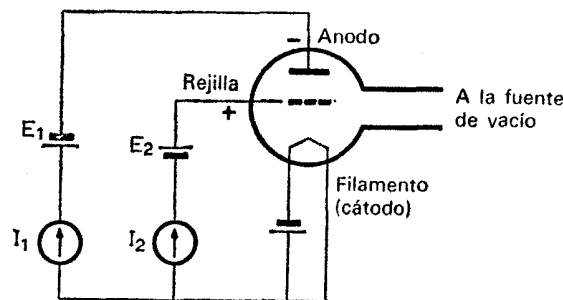


Fig.4.24 Vacuómetro termiónico o de ionización con cátodo caliente.

Finalmente, los electrones alcanzarán la rejilla cargada positivamente y originarán una corriente de electrones alrededor del circuito de la misma. Se cumple la siguiente relación aproximada:

$$P = kc \, I_1/I_2 \quad (4.16)$$

donde P = presión absoluta,

c = factor de probabilidad,

k = una constante que depende de los potenciales utilizados en el vacuómetro y de geometría de los electrodos,

I_1 = corriente de ionización (corriente del circuito del ánodo),

I_2 = corriente electrónica (corriente del circuito de rejilla).

Por consiguiente, siempre que no se alteren los potenciales y la corriente electrónica, la presión absoluta del gas es proporcional a la corriente de ionización. En la disposición de triodo representada en la figura siguiente, el filamento puede ser de tungsteno puro, de tungsteno al torio o de una aleación de platino recubierta de óxidos de bario y estroncio. La rejilla tiene normalmente la forma de una hélice cilíndrica de alambre de molibdeno que rodea el filamento. El ánodo suele ser

un cilindro de níquel abierto por los extremos, el cual rodea la rejilla, pero, en un diseño, está formado por placas de níquel paralelas a los lados aplanados de la hélice.

Un inconveniente del vacuómetro de ionización caliente es su tendencia a producir rayos-X cuando los electrones ionizados chocan con la rejilla. Los rayos-X dan lugar a una emisión secundaria en el ánodo que origina una corriente en el circuito del mismo, en la misma dirección que la debida a los iones. En virtud de este inconveniente, el límite interior del vacuómetro suele quedar restringido a 10^{-8} mm de mercurio.

4.5.4 Vacuómetro de ionización con cátodo frío

La forma más elemental de este vacuómetro consta de un tubo de descarga que incluye un tubo de vidrio, dos electrodos encerrados en su interior y conectados al sistema de vacío como se muestra en la figura 4.25. Cuando se aplica un voltaje elevado a los electrodos, se produce una descarga a baja presión y, a medida que la presión se reduce, el color y forma de la descarga puede proporcionar una indicación grosera del grado de vacío y de los gases presentes. A una presión de aproximadamente 10^{-2} mm de columna de mercurio, la descarga se ennegrece, pudiendo servir esta condición para dar una indicación aproximada del vacío presente.

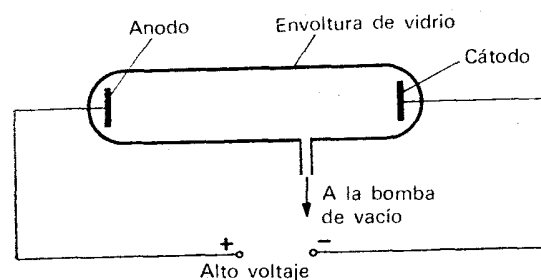


Fig. 4.25. Vacuómetro de ionización con cátodo frío sencillo (tubo de descarga).

El vacuómetro de Penning implica un sistema menos riguroso en cuanto a exactitud; en él, dos electrodos, un ánodo y un cátodo, se hallan dentro de un recipiente de vidrio figura 4.26. En el

modelo más sencillo, el cátodo consta de dos placas planas paralelas, mientras que el ánodo está constituido por un cuadrado de alambre colocado entre dichas placas. El vacuómetro se sitúa entre los polos de un electroimán, de modo que el campo magnético forme ángulo recto con las placas. Los electrones emitidos desde el cátodo se desplazan hacia el cuadro del ánodo siguiendo trayectorias helicoidales. La longitud de la trayectoria aumenta considerablemente y la probabilidad de colisión entre los electrones y las moléculas de gas para formar iones es mucho mayor que para el vacuómetro de ionización tipo triodo. Como resultado se obtiene una corriente de descarga relativamente grande para un voltaje moderado.

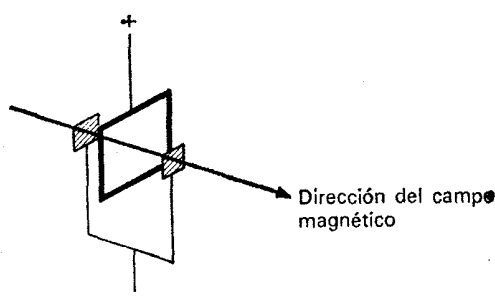


Fig. 4.26. Disposición típica de los ánodos y cátodos para un vacuómetro de Penning.

En la figura 4.27 se muestra una curva de calibrado típico de la presión en función de las lecturas del instrumento. Puede apreciarse que el gráfico es lineal para las presiones más bajas, pero, por encima de unos 1×10^{-4} mm de columna de mercurio, deja de serlo.

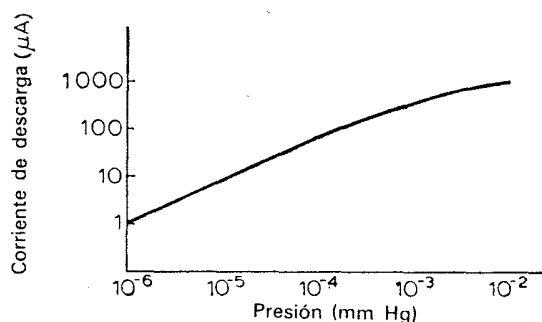


Fig.4.27. Curva de calibrado típica para el vacuómetro de Penning.

4.5.5 Vacuómetro magnetrón de cátodo frío

En la figura 4.28 se muestra un diagrama para un vacuómetro típico de esta clase. El cátodo consta de dos discos metálicos circulares, cuyos centros están unidos entre sí mediante un cilindro de muy poco diámetro, el cual actúa como fuente de electrones.

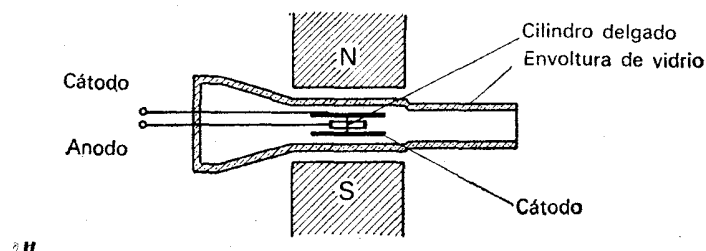


Fig. 4.28. Vacuómetro magnetrón de cátodo frío. El cátodo consiste en dos discos cuyos centros están conectados por un cilindro delgado.

El ánodo es un cilindro metálico colocado coaxialmente con el cilindro que une los discos. El conjunto ánodo-cátodo va encerrado en un recinto de vidrio que se coloca entre los polos N-S de un imán, según se ve en la figura siguiente. Los electrones emitidos desde el cátodo siguen una trayectoria cicloidal debido a los campos magnético y eléctrico. Estos electrones colisionan muchas veces con las moléculas de gas, lo cual produce iones que se dirigen directamente al ánodo. Así, se crea una corriente que sigue una relación lineal con la presión dentro del margen 10^{-4} a 5×10^{-1} mm de columna de mercurio.

$$I = KP^{1.7} \quad (4.17)$$

donde I = corriente de ionización;

K = constante; P = presión absoluta.

4.5.6 Vacuómetro magnetrón de cátodo caliente

El objeto de este vacuómetro es incrementar la longitud de la trayectoria de los electrones, aumentando así la probabilidad de producir iones. Se aplica el campo magnético longitudinalmente, en lugar de transversalmente, tal como se muestra en la siguiente figura 4.29. El filamento de tungsteno va rodeado por un ánodo cilíndrico de molibdeno. Cada extremo del ánodo está casi completamente cerrado por dos placas circulares, una de las cuales actúa como colector de iones, y la otra, como pantalla protectora.

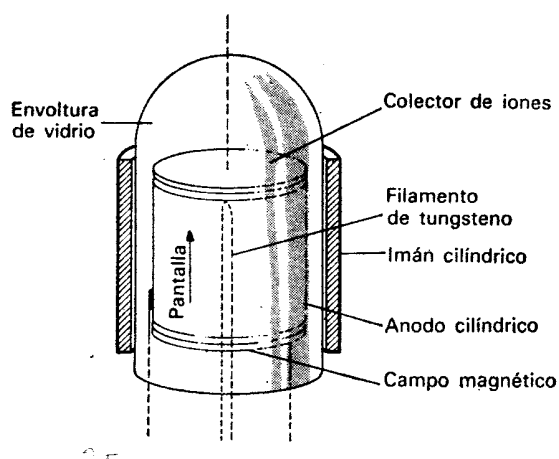


Fig. 4.29. Vacuómetro magnetrón de cátodo caliente.

El conjunto se encierra en una envoltura de vidrio, deslizando sobre ella un imán cilíndrico. La intensidad de flujo magnético es de unos 25×10^{-3} tesla, y los voltajes de funcionamiento normales son de -45V en el colector de iones y de -10 en la pantalla. La corriente iónica tiene una relación lineal con la presión absoluta entre los límites 4×10^{-14} y 5×10^{-8} mm de mercurio.

4.5.7 Vacuómetro de ionización de partículas alfa(alfatrón)

Las partículas alfa de una débil fuente radiactiva colisionan con las moléculas de gas produciendo iones. El vacuómetro contiene un conjunto de placa colectora y rejilla, siendo atraídos hacia esta última los iones positivos. Se origina una corriente de ionización que es proporcional a la presión del gas dentro del instrumento, cuyo esquema se muestra en la figura 4.30. La corriente iónica es del orden de 2×10^{-10} A/mm de mercurio de presión absoluta. Por tanto, a las presiones más bajas, la corriente iónica será muy pequeña, por lo que se necesitará un complejo sistema de amplificación de c.c. Así, un límite se halla en el extremo inferior de la gama de aplicación del vacuómetro, usándose éste normalmente dentro de la gama de 10 a 10^{-3} mm de columna de mercurio.

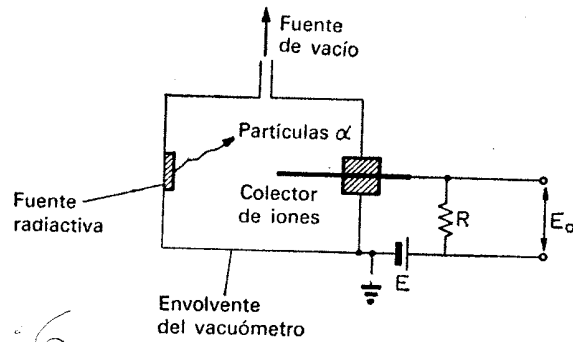


Fig. 4.30. Vacuómetro de ionización de partículas alfa (alfatrón).

4.6 Medición de la presión dinámica

Cuando una presión varía lentamente, suele ser posible seguir su variación tomando lecturas periódicas. Sin embargo, a medida que el grado de variación aumenta, se incrementa la dificultad de efectuar estas mediciones y disminuye la utilidad del manómetro normal para presión estática. Cuando el grado de variación de la presión se acerca a la frecuencia natural más baja de vibración del manómetro para presión estática, las lecturas se hacen imposibles, por lo que debe usarse algún tipo de instrumento de registro a mayor velocidad.

4.6.1 Indicador para motores

Uno de los problemas de medición más corriente en la industria, es la medición de la presión en el cilindro de una máquina de movimiento alternativo, tal como un compresor de aire o un motor de combustión interna. Normalmente se requiere un registro gráfico de la presión del cilindro en función del tiempo (diagrama $p-t$) o del volumen (diagrama $p-v$). En la figura 4.31 se muestra un indicador para motor junto con un diagrama $p-v$ o tarjeta de indicador. Un mecanismo hace subir un estilete en línea recta de modo que la altura de subida es proporcional a la presión en el pequeño cilindro situado en la base del indicador, el cual va conectado al cilindro del motor. El tambor giratorio sirve para obtener un movimiento lateral proporcional al volumen del cilindro. Se coloca un papel o tarjeta en el tambor y el estilete registrará la variación simultánea de presión y de volumen del cilindro. El estilete suele ser metálico y la tarjeta tiene un tratamiento adecuado para que el estilete deje una impresión. Utilizando el indicador del motor de modo que el tambor gire a una velocidad constante, puede obtenerse un registro $p-t$ como se ve en la figura 4.32.

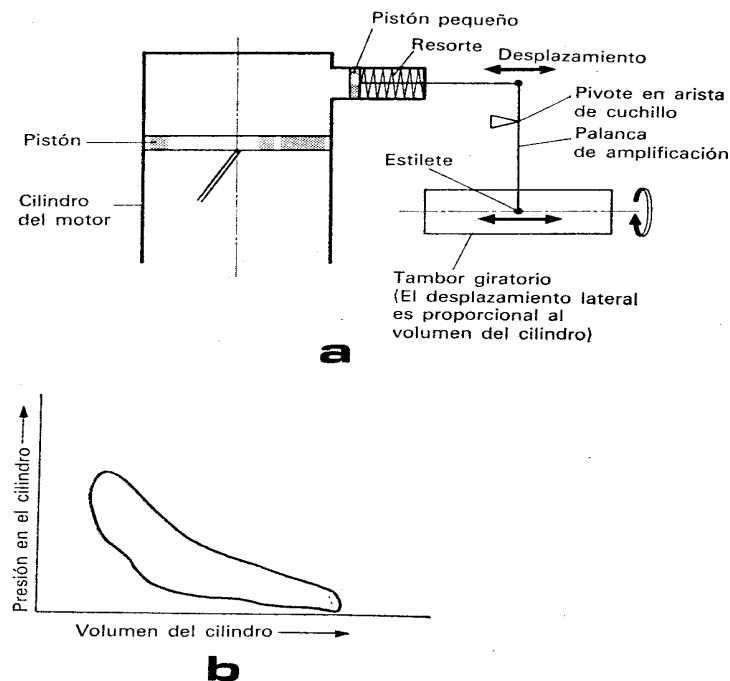


Fig. 4.31. Indicador mecánico para motores.

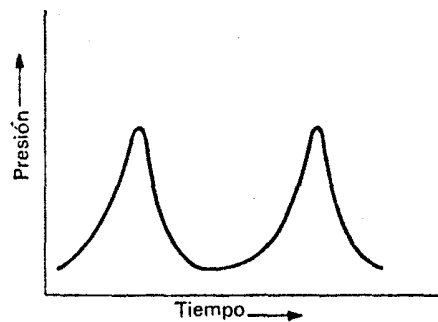


Fig. 4.32. Relación típica presión/tiempo para un indicador de motor.

El indicador para motor que se acaba de describir presenta dos inconvenientes importantes:

- 1) El serio problema de la inercia mecánica.
- 2) El volumen efectivo de un cilindro de motor varía cuando se conecta el indicador. Con motores pequeños, el incremento de volumen del cilindro puede ser de tal magnitud que los diagramas p-t obtenidos utilizando un indicador mecánico lleguen casi a no tener valor alguno.

Generalmente, los transductores de presión eléctricos se utilizan para registrar relaciones p-t a gran velocidad. Los transductores eléctricos pueden ser activos y pasivos. Un transductor activo es el que genera su propia energía eléctrica de salida como una función del desplazamiento mecánico, mientras que un transductor pasivo requiere una entrada auxiliar de energía que queda modificada como una función del desplazamiento mecánico, siendo la señal eléctrica modificada la de salida del transductor pasivo.

4.6.2 Transductores de presión eléctricos activos

El único transductor de presión eléctrico activo de uso común es el transductor piezoeléctrico. Los captadores piezoeléctricos tienen el cristal de geometría adecuada para dar una respuesta piezoeléctrica máxima en una dirección deseada con poca o ninguna respuesta en otras direcciones. La figura 4.33 muestra un transductor de presión piezoeléctrico del tipo Kistler donde el cristal

piezoeléctrico está contenido en un adaptador de bujía, el cual puede ajustarse a un tipo normal de bujía para así poder medir fácilmente las presiones de combustión de los motores de gasolina.

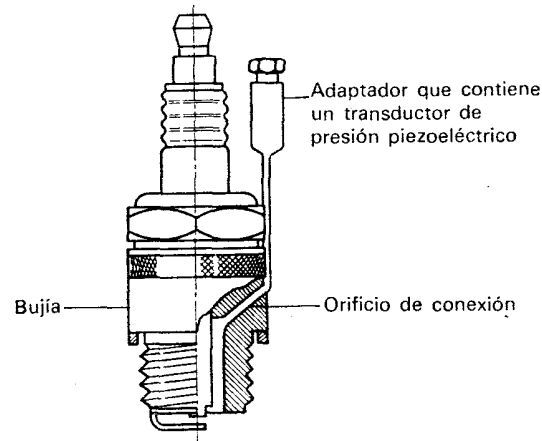


Fig. 4.33 Transductor de presión piezoeléctrico.

4.6.3 Transductores de presión eléctricos pasivos

Éstos pueden subdividirse en los tipos siguientes:

- 1) De resistencia variable,
- 2) De capacitancia,
- 3) De inductancia variable.

Los transductores de resistencia variable funcionan según el principio de que la resistencia eléctrica de un alambre varía con su longitud. En el transductor con indicador de deformación se empalman cuatro alambres entre una carcasa fija y una armadura móvil, según se aprecia en la figura 4.34. Estos conductores se fijan a la carcasa y a la armadura móvil mediante clavijas aisladas eléctricamente, instalándose bajo una tensión inicial y formando ramas activas de un circuito de puente convencional. Cuando se aplica presión al elemento elástico, se desplaza la armadura móvil haciendo que se alarguen dos de los conductores, mientras se reduce la tensión en los otros dos. La variación de resistencia debida a la variación de longitud hace que el puente sufra un desequilibrio proporcional a la presión aplicada. La utilización de cuatro conductores incrementa considerablemente la sensibilidad del puente.

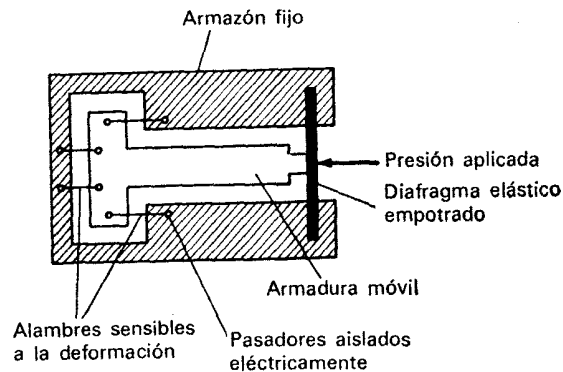


Fig. 4.34. Transductor de presión con indicador de deformación suelto.

En el transductor con indicador de deformación enganchado se fija uno o dos indicadores de deformación de lámina o alambre, mediante un cementante adecuado, a una placa o barra flexible que recibe la carga del elemento elástico. En la figura 4.35 se muestra un aparato de este tipo. Normalmente, se conectan dos elementos del indicador de deformación al circuito de medición del puente para alcanzar una compensación de temperatura.

Otros transductores de presión del tipo de resistencia variable actúan según el principio de los contactos movibles, tales como los que se encuentran en los potenciómetros o en los reóstatos de corredera.

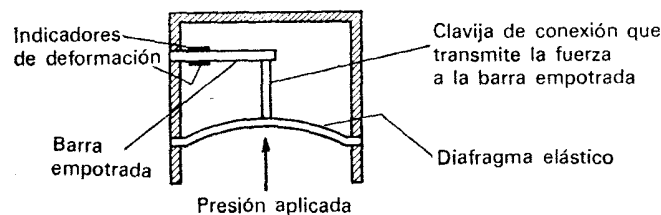


Fig. 4.35. Transductor de presión con indicadores de deformación unidos.

Con una disposición típica, el elemento elástico, es decir, un tubo de Bourdon en hélice, se conecta a un potenciómetro, variando así la resistencia del circuito de medición como se ve en la figura 4.36. El transductor de presión del tipo de capacitancia variable utiliza normalmente un diafragma metálico como elástico, que sirve como una placa de un condensador. Si se varía la presión, el diafragma se

desplaza con respecto a una placa fija, pudiendo medirse la variación de capacitancia resultante mediante un circuito de puente adecuado.

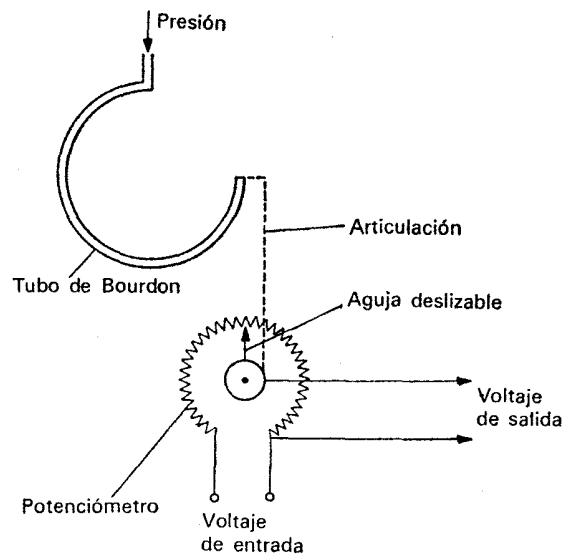


Fig. 4.36. Transductor de presión potenciométrico.

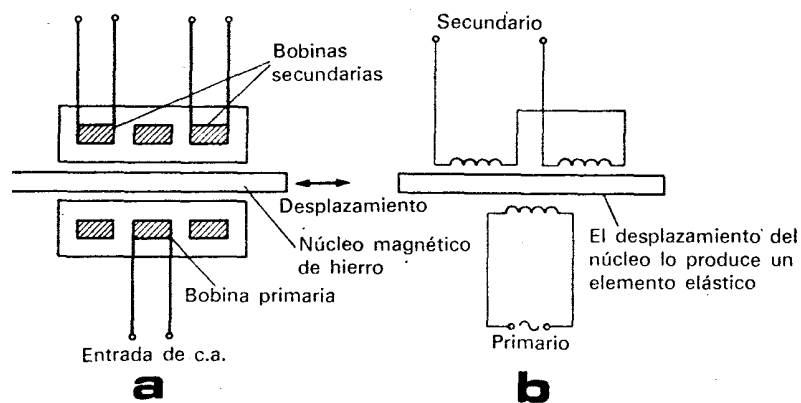


Fig. 4.37. Transformador diferencial variable lineal.

En la figura 4.37 se muestra un importante transductor de presión del tipo inductancia variable es decir, es decir, el transformador diferencial variable linealmente. El elemento eléctrico consta de tres bobinas montadas en una carcasa común. Centrado entre las tres bobinas, se desplaza un núcleo

magnético mediante un elemento elástico. La bobina principal es el arrollamiento primario del transformador y las otras dos bobinas forman los secundarios. Cuando el núcleo está centrado, los voltajes inducidos en estas dos bobinas exteriores son iguales y desfasados 180° , tomándose esta situación para representar la porción de presión cero. Cuando se desplaza el núcleo magnético por la acción de la presión aplicada, el voltaje inducido en uno de los arrollamientos secundarios aumenta, mientras que en el otro disminuye. Esta diferencia de voltaje de salida varía casi linealmente con la presión para desplazamientos pequeños del núcleo, siendo, por tanto, esta diferencia de voltaje una medida de presión aplicada.

Otra clase de transductores de presión en los que las señales eléctricas de salida derivan de inductancias variables en los circuitos de medición, son los de reluctancia variable. En un tipo, el elemento elástico es un diafragma magnético plano situado entre dos bobinas magnéticas de salida. Una variación en la presión aplicada produce un desplazamiento del diafragma, el cual hace variar la relación de inductancias entre las bobinas de salida, dando por resultado un voltaje de salida proporcional a la presión aplicada como se ve en la figura 4.38.

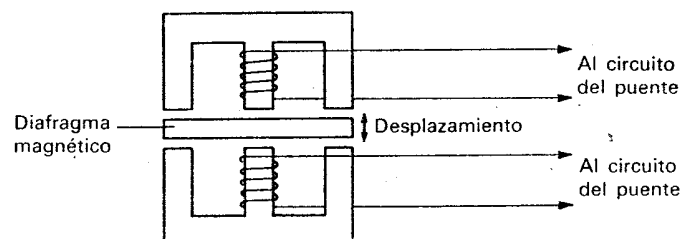


Fig. 4.38. Transductor de reluctancia variable.

Un segundo tipo de transductor de presión de resistencia variable es el que tiene por elemento elástico un tubo retorcido y plano. Al aplicar una presión, gira ligeramente una armadura magnética plana que va conectada directamente al extremo cerrado de tubo de Bourdon. Las consiguientes

pequeñas variaciones en el espacio del aire comprendido entre la armadura y las bobinas de salida electromagnética alteran las inductancias en un circuito de puente. Esta variación de inductancia se usa para modular la amplitud o frecuencia de un voltaje portador, produciendo una respuesta eléctrica que es proporcional a la presión aplicada.

CAPÍTULO 5

5. ELECCION DE LOS SENSORES REFERIDOS AL PROYECTO

5.1 SENSORES CAPACITIVOS

El dispositivo empleado en el proyecto fue un capacitor de placas paralelas con franjas como las mostradas en la siguiente figura.

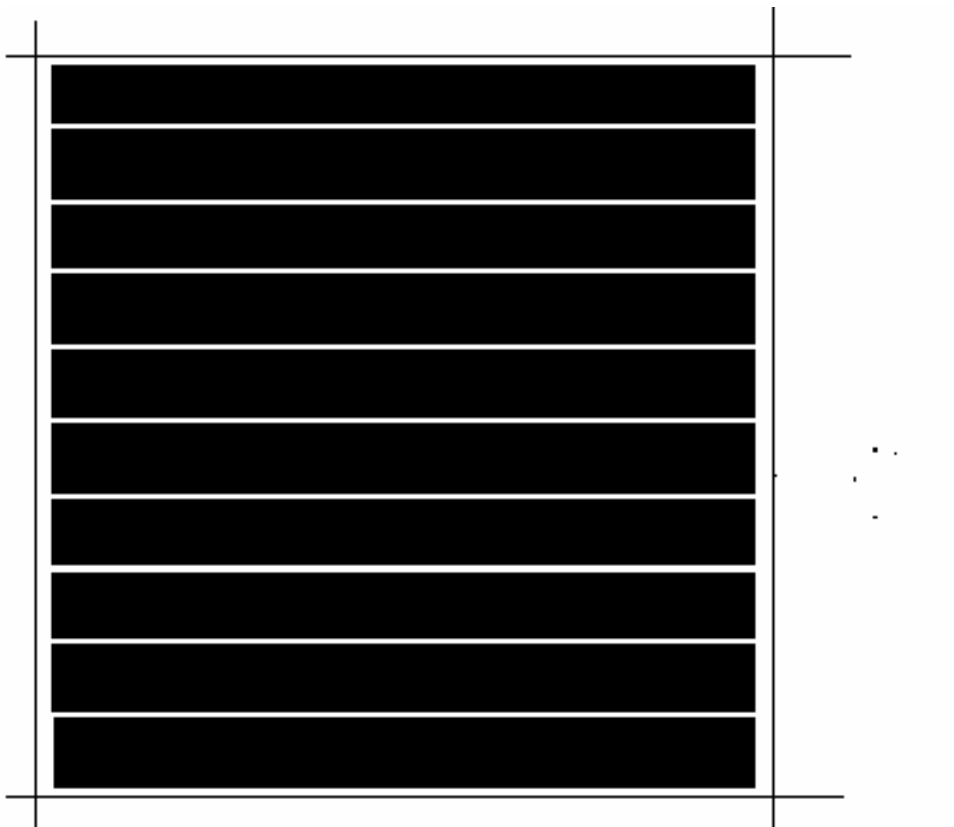


Fig.5.1 Vista frontal de una placa del capacitor

El cual resulto ser un buen dispositivo para realizar las medidas de capacitancia.

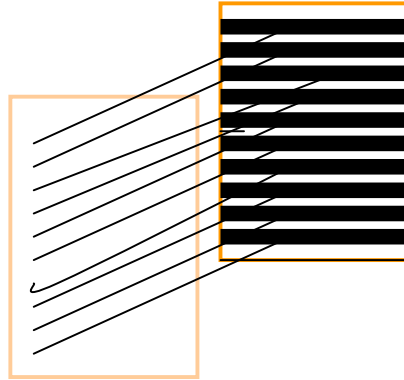


Fig. 5.2 Muestra el capacitor

De los resultados teóricos que obtuve fueron los siguientes:

Para una de las franjas del capacitor la capacitancia de franja a franja teóricamente está dada por:

$$C = K\epsilon_0 A / d \quad (5.a)$$

Donde:

K es la constante del dieléctrico

ϵ_0 es la permeabilidad en el vacío

A es el área de una de las franjas

d es la distancia entre las franjas.

Las capacitancias teóricas resultaron:

39.6pF en vacío y con agua como dieléctrico la capacitancia fue de 85.8 pF.

En la parte experimental utilicé un oscilador en las placas paralelas y la frecuencia que obtuve mediante el oscilador basado en un astable fue:

Tabla 5.1 Frecuencias experimentales obtenidas de oscilador

Capacitancia pF	Frecuencia kHz	Frecuencia kHz	Frecuencia kHz	Frecuencia kHz	Frecuencia kHz
Aire	92.3	92.3	92.3	92.3	92.3
Agua	66.5	66.6	66.5	66.3	66.6

Con esas frecuencias las capacitancias resultantes las calculé dado el oscilador astable mediante :

$$C = 1.44 / (R_a + R_b) * f \quad (5.b)$$

C en Aire = 48.6pF

C en Agua = 84.5pF

Quiero mencionar que los resultados fueron los mismos tanto para un solo capacitor como para todos que conforman las franjas.

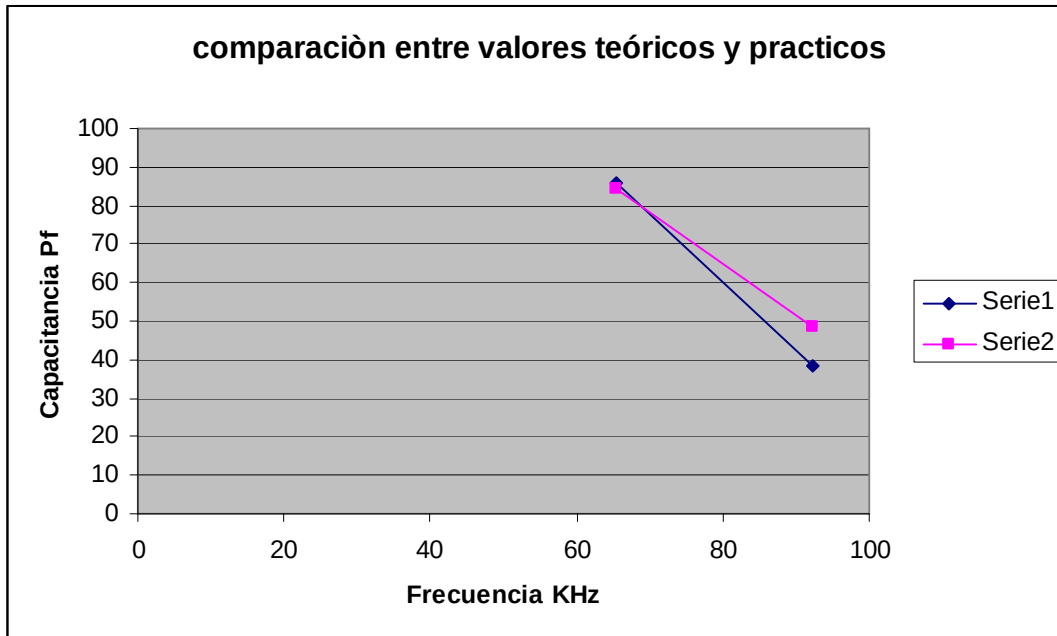


Fig. 5.3 Muestra la comparación entre a frecuencia contra la capacitancia de los valores teóricos y prácticos.

La serie 1: corresponde a los valores experimentales.

La serie 2: corresponde a los valores teóricos.

5.2 SENSORES DE CONDUCTIVIDAD

Dado las propiedades de conductividad.

De las propiedades que tiene el agua considerada libre del mayor número de impurezas es decir agua formada por solo iones de H^+ y de OH^- , la variación de la permitividad dieléctrica relativa del agua esta dada por la siguiente expresión.

$$K_{H_2O} = 78.54 [1 - 4.579 \times 10^{-3} (T - T_0) - 1.19 \times 10^{-5} (T - T_0)^2 - 2.8 \times 10^{-8} (T - T_0)^3] \text{ ec.....(5.1)}$$

Como se puede ver la permitividad dieléctrica relativa del agua es función de la temperatura.

Por otra parte la conductividad de todos los electrolitos se incrementa con la temperatura y en vista al capítulo 2 de conductividad. Esta variación puede expresarse mediante la ecuación:

$$\sigma_o(T) = \Lambda_o(T_0) [1 + b (T - T_0)]^2 C / 10 \times 10^8 (\Omega^{-1} \text{cm}^{-1})$$

$$\sigma_o(T) = \Lambda_o(T_0) [1 + b (T - T_0)]^2 C / 10^3 (\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}) \text{ ec(5.2)}$$

Donde $\sigma_o(T)$ es la conductividad equivalente límite a $T(^{\circ}\text{C})$, $\Lambda_o(T_0)$ la correspondiente conductancia equivalente que tome como temperatura inicial T_0 , C es la concentración del agua la cual es prácticamente constante y b es una constante que para el caso de los iones H^+ y OH^- son igual a :

$$b_{H^+} = 0.0142 (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$b_{OH^-} = 0.016 (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

Por lo tanto en vista de estas dos últimas ecuaciones pude obtener la incertidumbre de la relación entre permitividad dieléctrica relativa y la conductividad del agua.

Pude determinar la incertidumbre de la relación entre permitividad dieléctrica relativa y conductividad.

Considerando:

$$T_0 = 25^{\circ}\text{C}$$

$$T = 10 \pm 5^{\circ}\text{C}$$

$$\sigma = 0.02315 \pm 0.00746 \mu\text{S/cm}$$

$$\mathbf{C = 0.0553 \text{ eq cm}^{-3}}$$

$$\Lambda_0(T_0)\text{H}^+ = 350.1 \text{ cm}^2.\text{ohm}^{-1}.\text{eq}^{-1}$$

$$\Lambda_0(T_0)\text{OH}^- = 199.2 \text{ cm}^2.\text{ohm}^{-1}.\text{eq}^{-1}$$

Por lo tanto derivando KH_2O (ec. 5.1) respecto a T.

$$\frac{d\text{KH}_2\text{O}}{dT} = 78.54 \left(-4.579 \times 10^{-3} - 2(1.19 \times 10^{-5}(T - 25)) - 3(2.8 \times 10^{-8})(T - 25)^2 \right)$$

Para $T = 10^{\circ}\text{C}$

Implica

$$\frac{d\text{K H}_2\text{O}}{dT} = -0.3331 \dots\dots\dots(5.3)$$

Ahora derivando la ecuación 5.2 con respecto a T implica.

Para los iones H⁺

$$b = b(\text{H}^+) = 0.014(^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$\frac{d\sigma_o(T) \text{ H}^+}{dT} = \frac{\Lambda_o(T_o)\text{H}^+ C b [1+b (T-T_o)]}{500}$$

Sustituyendo los valores correspondientes

$$\frac{d\sigma_o(T) \text{ H}^+}{dT} = 0.00043$$

De la misma manera derivando la ecuación 5.2 con respecto a T implica.

Para los iones OH⁻

$$b = b(\text{OH}^-) = 0.016(^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$\frac{d\sigma_o(T) \text{ OH}^-}{dT} = \frac{\Lambda_o(T_o)\text{OH}^- C b [1+b (T-T_o)]}{500}$$

$$\frac{d\sigma_o(T) \text{ OH}^-}{dT} = 0.00027$$

Por lo tanto dado que la conductividad total del agua es.

$$\sigma_o(T) \text{ H}_2\text{O} = \sigma_o(T) \text{ H} + \sigma_o(T) \text{ OH}^-$$

Lo que implica que

$$\frac{d\sigma_o(T) \text{ H}_2\text{O}}{dT} = \frac{\sigma_o(T) \text{ H}}{dT} + \frac{\sigma_o(T) \text{ OH}^-}{dT}$$

Por lo tanto

$$\frac{d\sigma_o(T) \text{ H}_2\text{O}}{dT} = 0.0007 \dots\dots\dots\text{ec. (5.4)}$$

Ahora relacionando las derivadas (5.3) y (5.4)

$$\frac{dK \text{ H}_2\text{O}}{d\sigma_o(T) \text{ H}_2\text{O}} = - 475.8571 \text{ cm/ } \mu\text{S}$$

Además considerando

$$W\sigma = 0.00746 \text{ (} \mu\text{S/cm)}$$

Por lo tanto el análisis de incertidumbre indica que:

$$WK \text{ H}_2\text{O} = \frac{dK \text{ H}_2\text{O}}{d\sigma_o(T) \text{ H}_2\text{O}} W\sigma = 3.55 = 4.84\%$$

Dado $K \text{ H}_2\text{O} = 73.35$ a 10°C

Por lo tanto no es necesario el uso de un medidor de conductividad.

5.3 SENSORES DE TEMPERATURA

En la siguiente tabla enmarco algunas de las características más comunes entre los distintos dispositivos medidores de temperatura, sus ventajas y desventajas.

Transductor	Ventajas	Desventajas
Detector de temperatura de resistencia	Más estable. Más preciso. Más lineal que los Termopares	Caro. Lento. Precisa fuente de alimentación. Pequeño cambio de resistencia. Medida de 4 hilos Autocalentable
Termistores	Alto rendimiento Rápido Medida de dos hilos	No lineal. Rango de Temperaturas limitado. Frágil. Precisa fuente de alimentación.

		Autocalentable
Termopar	Autoalimentado Robusto Económico Amplia variedad de formas físicas Amplia gama de temperaturas	No lineal Baja tensión Precisa referencia El menos sensible
Sensores de IC	El más lineal El de más alto rendimiento Económico	Limitado a $< 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ Precisa fuente de alimentación Lento Autocalentable Configuraciones limitadas

La medición de la temperatura por radiación no se aplica para el proyecto.

Por tal motivo seleccioné un circuito sensor de IC. Debido a sus características opté por el LM 35 que resulto adecuado para el proyecto además de su simplicidad.

En la figura A.1 del apéndice A se encuentra la hoja de especificaciones del instrumento de medición utilizado.

Este sensor al ser lineal lo calibre al rango de temperatura del agua es decir entre $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Utilizando un termómetro de medidor patrón en la figura 5.4 aparece tal grafico el voltaje varia $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.

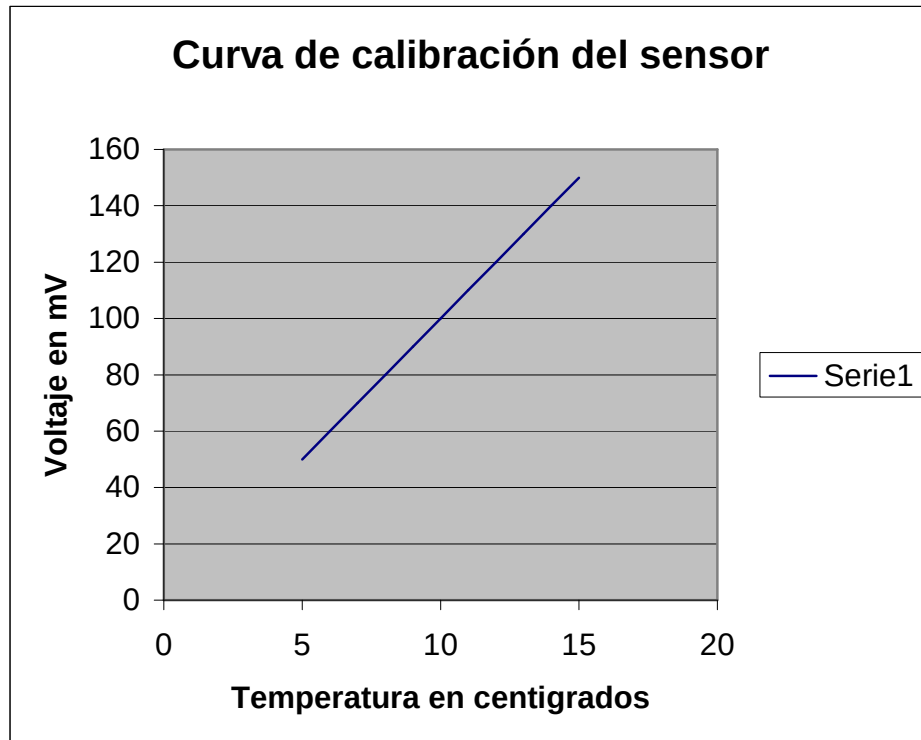


Fig.5.4 Curva de calibración del sensor LM 35.

5.4 TRANSDUCTORES DE PRESION

Para poder llevar a cabo la medición de la presión en el vertedor se debe de hacer mediante un medidor de presión dinámica ya que el hacerlo con un medidor de presión estática no me serviría puesto que el flujo del agua en el vertedor es a alta velocidad. Por tal motivo mi elección de escoger un sensor se basó en escoger un transductor entre los de distintos tipos tal y como lo mencioné en el capítulo 4. Por lo tanto realicé la siguiente tabla que demuestra las ventajas y desventajas de cada uno de los transductores y en vista de esta tomé al dispositivo mas adecuado al proyecto..

Transductor	Ventajas	Desventajas
Capacitivo	Poca masa. Excelente respuesta de frecuencia. Para presiones dinámica y estática. De fácil conversión para frecuencias variables.	Alta impedancia de salida. Sensible a la temperatura. Necesita un circuito adicional.
Transformador diferencial	Salida alta. Baja histéresis	Necesita presión dinámica. Masa alta. Respuesta de frecuencia pobre. Sensible a la vibración.
Piezoeléctrico	Bueno para frecuencias altas. Señal autogenerada. Pequeño resistente.	Sensible a la temperatura. La señal debe amplificarse. Sólo para presión en dinámica.
potenciométrico	Salida alta	Resolución aproximada. Sólo para frecuencia baja. Ruidoso.
Calibrador de deformación	Estático dinámico. Pequeño y resistente. Relativamente no sensible a la temperatura.	Baja amplitud de la señal. Alcance de temperatura limitado.
Semiconductor difundido	Exactitud excelente. Poca masa. Estabilidad excelente: estática y dinámica.	Gama de temperatura limitada

En el caso de la presión utilicé un sensor de presión (celda de presión) ya que resultan ser los mas sensibles a pequeños cambios de presión. Utilicé un sensor comercial con una salida de corriente. Este sensor me da una relación lineal entre presión y corriente.

En la figura del anexo B se muestra el sensor empleado con sus característica

CAPITULO 6.

PRUEBAS REALIZADAS EN EL PROYECTO.

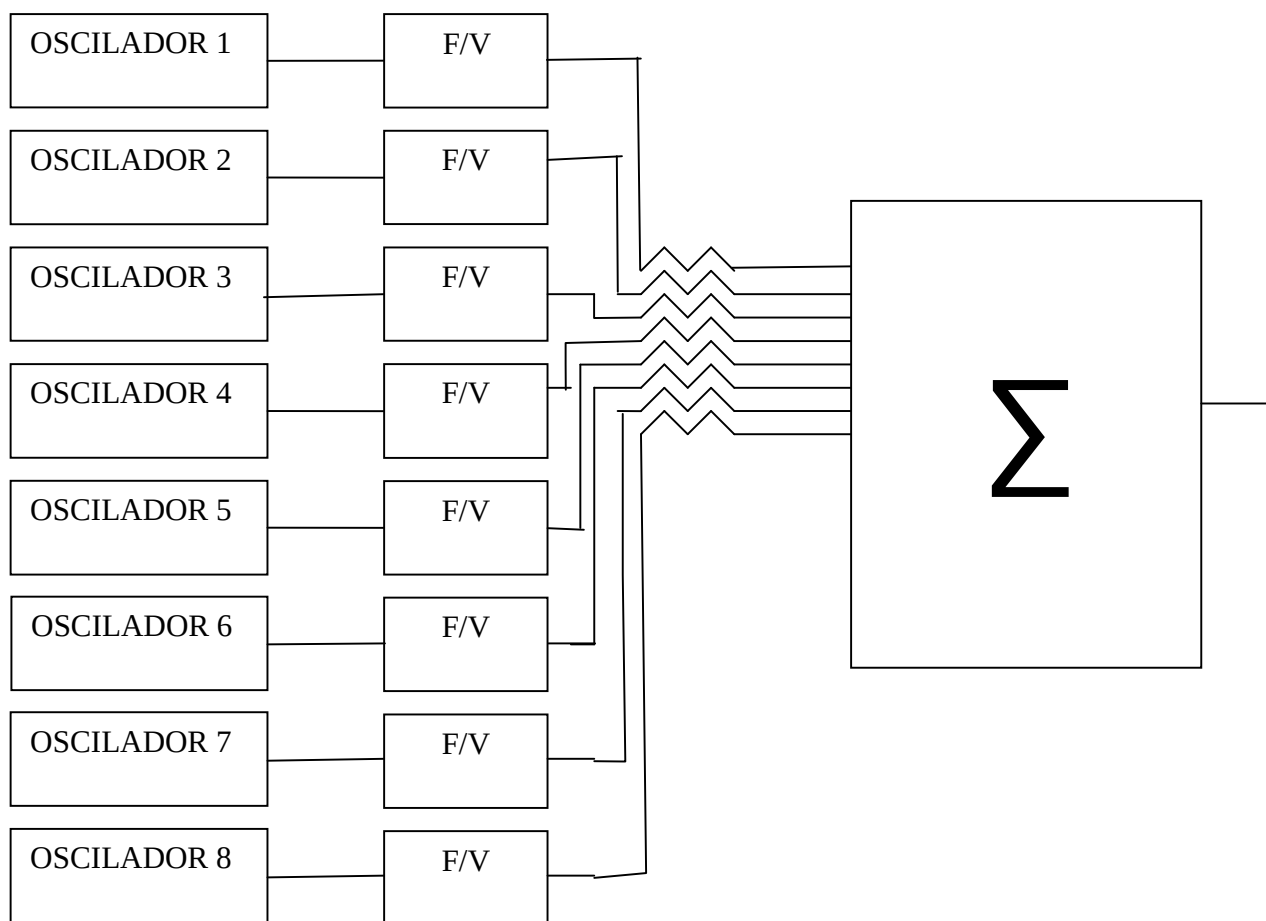


Fig.6.1. Circuito completo de los elementos electrónicos empleados.

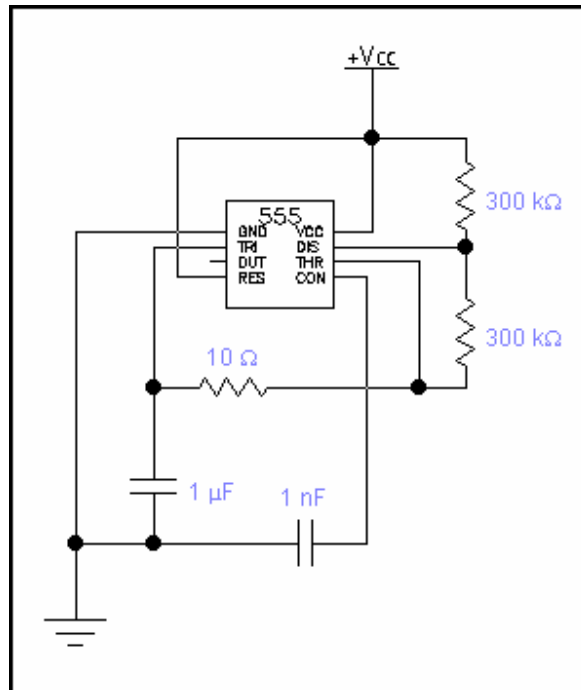


Figura 6.2. Oscilador propuesto en el proyecto.

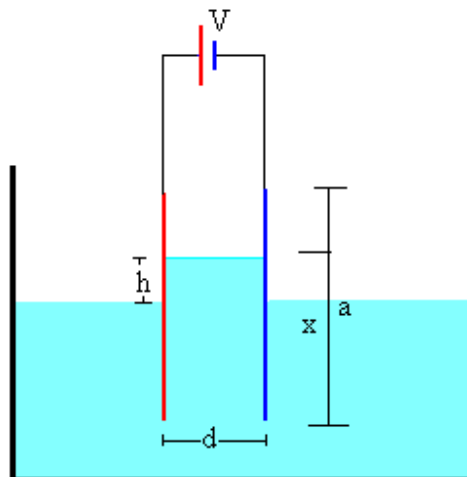


Fig.6.3. Un esquema del experimento realizado.

Tabla 6.1. Valores de medición de capacitancia y frecuencia en función de la variación de Aire.

CAPACITANCIA TOTAL	pF	kHz	cm ³ de Aire
C1	72	66.67	-----
C2	64.89	73.97	1
C3	57.78	83.07	2
C4	50.67	94.73	3
C5	43.56	110.192	4
C6	36.45	131.687	5
C7	29.34	163.599	6
C8	22.23	215.924	7
C9	15.12	317.460	8
C10	8.01	599.250	9
C11	0.9	5333.333	10

Tabla 6.2. Se determina el valor de la capacitancia del volumen de aire contenido en líquido.

CAPACITANCIA	pF	kHz	cm ³ de Aire
C1	0.09	53333.33	1
C2	0.18	26666.66	2
C3	0.27	17777.77	3
C4	0.36	13333.33	4
C5	0.45	10666.66	5
C6	0.54	8888.88	6
C7	0.63	7619.19	7
C8	0.72	6666.66	8
C9	0.81	5925.25	9
C10	0.90	5333.33	10

GRÁFICA DE LA TABLA 6.1

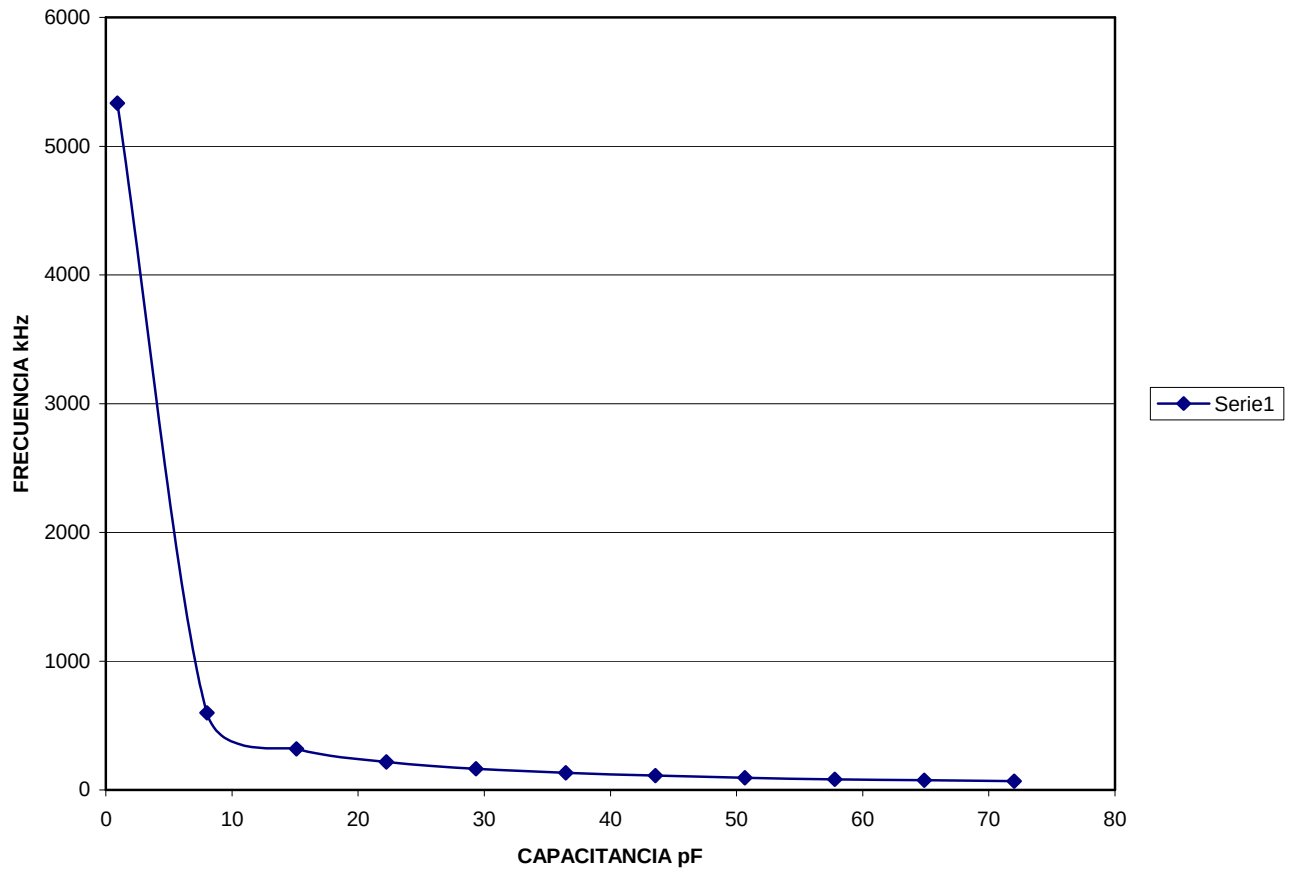


Fig.6.4. Gráfico de la tabla 6.1 donde se muestra la variación de la frecuencia en función de la capacitancia según el aire aplicado.

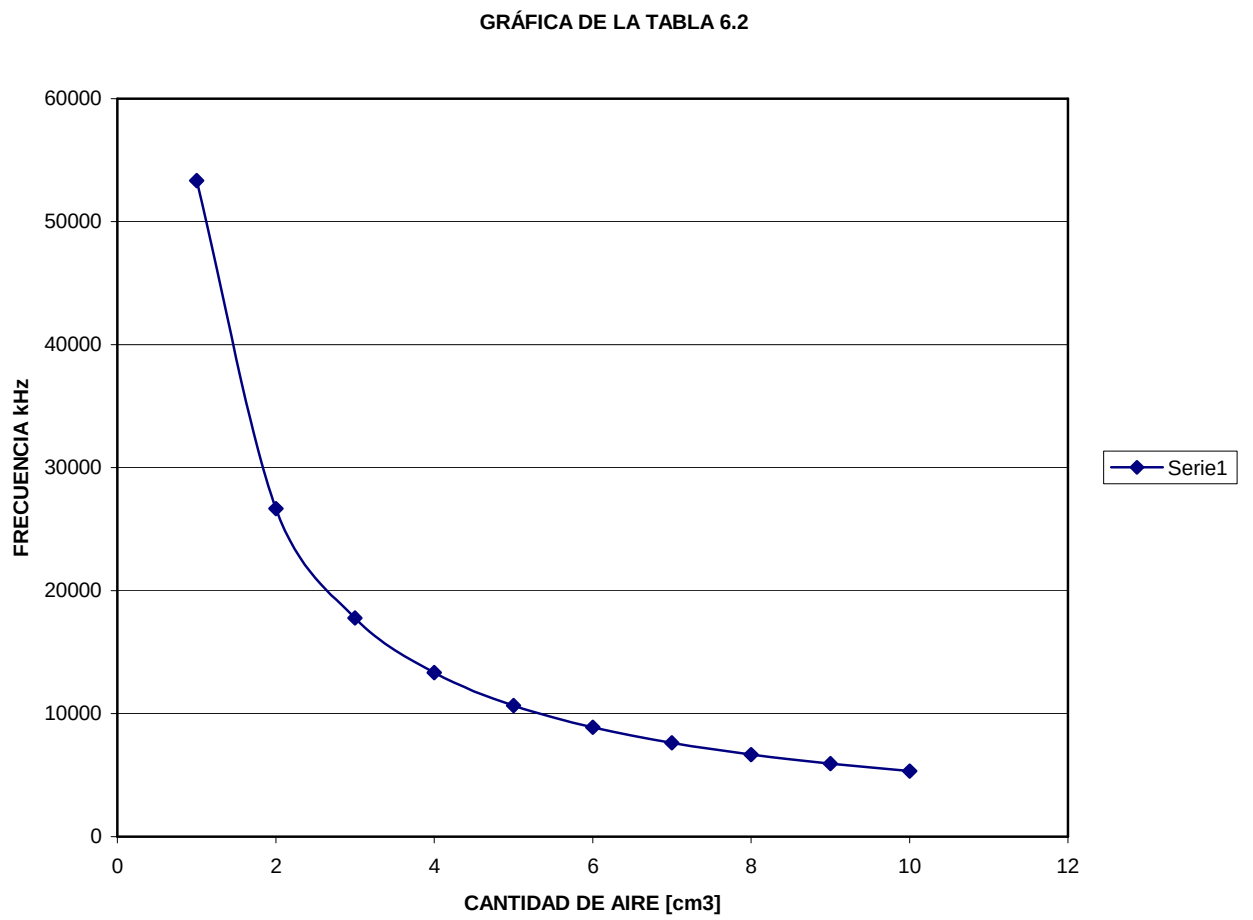


Fig.6.5. Gráfico de la tabla 6.2 dada la cantidad de aire en cm³ como varía la frecuencia.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En las mediciones pude constatar que a pesar de no conocer la distribución del aire en el seno del líquido sí puedo conocer su volumen mediante las pruebas de capacitancia. Por lo que todos los elementos empleados en el medidor tuvieron que ser de la más alta sensibilidad y precisión dado que al hacer las pruebas con la introducción de aire éste lo podía contener muy poco tiempo ya que el aire ascendía a la superficie en fracciones de segundo. Por lo que en todo momento fui cuidadoso de las pruebas realizadas, pues las mediciones tenían que ser las mismas cada vez que metía aire. Con el método capacitivo de franjas pude constatar su adecuada sensibilidad para medir capacitancia por niveles pues la capacitancia es variante dependiendo donde hay más aire que líquido en el fluido. En cuanto a las variaciones de temperatura y presión éstas no fueron tan significativas como para alterar la capacitancia. Pues en el caso de la temperatura del líquido ésta aunque aumente unos cuantos grados no altera prácticamente las mediciones, mismo caso que la presión. En el caso de conductividad como se explica en el capítulo 5 ésta es muy poco significativa puesto que la salinidad de flujo hidráulico de la presa es prácticamente constante, por lo que en el desarrollo matemático pude constatar con la incertidumbre obtenida que la conductividad del flujo hidráulico no afecta prácticamente la capacitancia.

En las mediciones experimentales pude constatar que al introducir aire al seno del líquido cuando en un principio toda la placa estaba cubierta de líquido la capacitancia tendía a disminuir por cada cm^3 insertado de aire lo que obviamente tenía que pasar puesto que la constante dieléctrica del aire es menor que la del agua. También tengo que señalar que el oscilador en el modo astable con el circuito integrado 555 me resultó muy útil puesto que en todo momento obtuve las mediciones esperadas de frecuencia puesto que el haberlo hecho únicamente con un medidor de frecuencia iba a ocurrir que un momento determinado el medidor no me iba a dar una respuesta de lectura, de ahí la importancia del oscilador.

Este trabajo de investigación se está extendiendo puesto que compañeros del Instituto de Ingeniería ya trabajan sobre las dimensiones de las burbujas de aire introducidas en el seno del líquido mediante cámaras de vídeo y el empleo del procesamiento de imágenes para tener más detalles de lo que está ocurriendo cuando se abre una presa para liberar agua y conocer de ese modo las condiciones internas que existen en la tobera. Pues con este método de investigación se pretende conocer con gran precisión las entrañas del fluido que corre en la tobera.

BIBLIOGRAFIA

Instrumentación Industrial
Antonio Creus
Alfaomega
1993.

Manual de Instrumentación Aplicada
Douglas M. Considine, S.D. Ross.
Continental, S. A. de C.V.
1988.

Sensores y Acondicionadores de señal
Ramón Pallas Areny .
Marcombo
1982.

Instrumentación Industrial
Harold. E. Soisson
Ed. Limusa
1990.

Manual de Servicio de Instrumentación Industrial
Gradys. Carroll
Ed. Labor, S.A.
1975.

Mediciones en Ingeniería
C.V. Collett, A. D. Hope
Gustavo Gili; S. A.
1976.

Conversión de Energía Electromecánica
Vembu Gourishankar
Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A
1975.

Campos Electromagnéticos
Marcelo Rodríguez Danta, Consuelo Bellver Cebreros
Publicación de la Universidad de Sevilla
1995.

Teoría Clásica de los Campos
L. D Landau, E. M. Lifshitz
Reverté
1987.

Propiedades Electrónicas
Robert. M. Rose, Lawrence A. Sherpard
Limusa
1978.

The Measurement Instrumentation and Sensors
John G. Webster
IEEE PRESS
1999.

Chemistry
Rob Lewis and Wynne Evans
Ed. Macmillan
1997.

Química General
Ralph H. Petrucci
Pretince Hall
1999.

Ange's Handbook of Chemistry
Jhon A. Dean
McGraw-Hill, INC.
1972.

ANEXOS

ANEXO A. CONDUCTIVIDAD DEL AGUA ULTRAPURA A VARIAS TEMPERATURAS Y LA CONDUCTANCIA EQUIVALENTE DE LOS IONES HIDROGENO Y HIDROXILO .

Temp., °C	Conductivity, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Resistivity, $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$	Equivalent conductance, $\text{cm}^2\cdot\text{ohm}^{-1}\cdot\text{equivalent}^{-1}$	
			λ^0, H^+	λ^0, OH^-
0	0.011 61	86.14	224.1	117.8
5	0.016 61	60.21	250.0	133.6
10	0.023 15	43.21	275.6	149.6
15	0.031 53	31.71	300.9	165.9
18	0.037 54	26.64	315.8	181.6
20	0.042 05	23.78	325.7	182.5
25	0.055 08	18.15	350.1	199.2
30	0.070 96	14.09	374.0	216.1
35	0.090 05	11.10	397.4	233.0
40	0.112 7	8.88	420.0	267.2
45	0.139 3	7.18	442.0	267.2
50	0.170 2	5.88	463.3	284.3
55	0.205 5	4.86	483.8	301.4
60	0.245 7	4.06	503.4	318.5
65	0.291 2	3.43	522.0	335.4
70	0.341 6	2.93	539.7	352.2
75	0.397 8	2.51	556.4	368.8
80	0.459 3	2.18	572.0	385.2
85	0.525 8	1.90	586.4	401.4
90	0.597 7	1.67	599.6	417.3
95	0.675 3	1.48	611.6	432.8
100	0.756 9	1.32	622.2	448.1
150	1.84	0.543		
200	2.99	0.334	824	701
250	3.31	0.302		
300	2.42	0.413	894	821

Source: Data from T. S. Light and S. L. Licht, *Anal. Chem.*, 59:2327–2330 (1987).

ANEXO B. SENSOR (CELDA) DE PRESIÓN SELECCIONADA.

FLUSH MOUNT CURRENT OUTPUT TYPE PRESSURE TRANSDUCER DESIGNED FOR FLUSH MOUNT ADAPTORS

440 Series
0-6 TO 0-20,000 PSIG
INTERNAL VOLTAGE REGULATOR

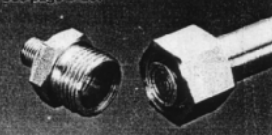
New Improved Accuracy



Shown actual size
See Page C-4 for Mating
Connectors: PT06F-10-6S

From
\$650

Shown with AD-1SS Adaptor
See page B-29



Unregulated 14 to 50 V dc
Excitation

316SS on Ranges 50 PSI
and Under

15-5 pH Stainless Steel on
100 and Over/PSI/Ranges

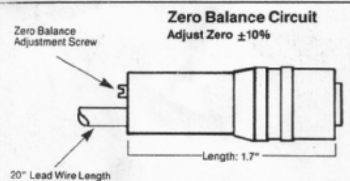
Ranges 100/PSI and Over
are Sealed (PSIS)

2,000 Ohms Maximum

**CURRENT OUTPUT
B**

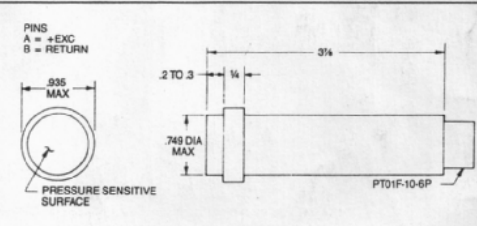
See Selection Guide For Compatible Instrumentation

Zero Balance Circuit
Adjust Zero $\pm 10\%$



Model ZB-440 \$75

PINS
A = +EXC
B = RETURN



DIMENSIONS IN INCHES

SPECIFICATIONS

Excitation: 12 to 36 Vdc
Output: 4-20 mA
Accuracy: $\pm 1.0\%$ full scale (B.F.S.L. Linearity, Hysteresis & Repeatability)
Zero Balance: ± 0.4 mA
Operable Temperature Range: -40 to 180°F (-40 to 82°C)
Compensated Temperature Range: 30 to 130°F (-1 to 55°C)
Thermal Zero Effect: $\pm 0.02\%$ full scale/°F ($\pm 0.04\%$ /°C)
Frequency Response: 300 Hz
Proof Pressure: 2 x full scale or 30,000 PSI whichever is less
Burst Pressure: 5 x full scale or 50,000 PSI whichever is less
Gages: Semiconductor on Bending Beam
Body/Diaphragm Material: 316 L SS ≤ 50 PSI; 15-5 PH SS ≥ 100 PSI
Weight: 4 ozs.

To Order (Specify model number)

PRESSURE RANGE	MODEL NUMBER	PRICE	COMPATIBLE METER*
0- 5 PSIG	PX 440-005G I	\$650	DP41-E, DP2000P8, TX81
0- 15 PSIG	PX 440-015G I	650	DP41-E, DP2000P9, TX81
0- 25 PSIG	PX 440-025G I	650	DP41-E, DP2000P8, TX81
0- 50 PSIG	PX 440-050G I	650	DP41-E, DP2000P8, TX81
0- 100 PSIS	PX 440-100S I	650	DP41-E, DP2000P8, TX81
0- 200 PSIS	PX 440-200S I	650	DP41-E, DP2000P9, TX81
0- 500 PSIS	PX 440-500S I	650	DP41-E, DP2000P8, TX81
0- 1000 PSIS	PX 440- 1KS I	650	DP41-E, DP2000P8, TX81
0- 5000 PSIS	PX 440- 5KS I	650	DP460-E, DP3002-E
0-10000 PSIS	PX 440-10KS I	650	DP460-E, DP3002-E
0-20000 PSIS	PX 440-20KS I	650	DP460-E, DP3002-E

HIGHLIGHTED MODELS STOCKED FOR FAST DELIVERY

B-70