

# TRANSDUCTORES.

**JUAN JOSE MARGAIX BAYARRI**

## **1. INTRODUCCIÓN.**

### **1.1. DEFINICIÓN.**

### **1.2. APLICACIONES.**

### **1.3. CARACTERÍSTICAS.**

### **1.4. CLASIFICACIÓN.**

#### **1.4.1. TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA.**

#### **1.4.2. TRANSDUCTORES DE FUERZA.**

#### **1.4.3. TRANSDUCTORES DE PRESIÓN.**

#### **1.4.4. TRANSDUCTORES DE NIVEL.**

#### **1.4.5. TRANSDUCTORES DE POSICIÓN.**

#### **1.4.6. TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD.**

#### **1.4.7. TRANSDUCTORES DE ACELERACIÓN.**

#### **1.4.8. TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO.**

## **2. TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD.**

### **2.1. TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA.**

#### **2.1.1. TIPOS DE TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA.**

### **2.2. TRANSDUCTORES DE HUMEDAD.**

#### **2.2.1. PRECISIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD.**

#### **2.2.2. PARÁMETROS TÍPICOS PARA DETERMINAR LA HUMEDAD.**

#### **2.2.3. DISTINTOS TIPOS DE SENSORES Y SUS APLICACIONES.**

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de todo el punto 1 se dará información algo más general de transductores, para en el punto 2 tratar de forma extensa dos de los transductores de mayor importancia en aplicaciones industriales, los de temperatura y los de humedad.

### 1.1. DEFINICIÓN

Son dispositivos que absorben energía de un sistema y, transformándola, la ceden a otro sistema en forma de diferente energía.

### 1.2. APLICACIONES

Aparecen continuamente en la vida cotidiana: teléfonos, micrófonos, paneles solares, estaciones eólicas...

Además de las aplicaciones industriales, entre las que destacan:

- Monitoreado de ensayos
- Control de procesos
- Mantenimiento predictivo.
- Controles en general

### 1.3. CARACTERÍSTICAS

#### Características estáticas

Se manifiestan cuando la entrada es constante o varía lentamente, y son las siguientes:

- Rango o alcance: valores extremos
- “Span”: diferencia entre el valor máximo y mínimo.
- Sensibilidad: relación entre la variación en la entrada y en la salida.
- Curva de calibración:  $e = f(m)$
- Umbral: valor mínimo a partir del cual el transductor genera una señal estable.
- Resolución: mayor cambio que puede darse en la entrada sin que se produzca cambio en la salida.
- Estabilidad: capacidad del transductor para mantener constante su curva de calibración.
- Deriva: desviación de la curva del transductor con el paso del tiempo.
- “No linealidad”: función que expresa la relación entre la salida real y la “lineal” ante una misma entrada. (Un transductor es lineal cuando lo es la relación entre la entrada y la salida. No obstante los transductores generalmente son “no lineales”.)
- Histéresis: se define a través de una función que es la diferencia de dos curvas, una medida para incrementos de la señal mecánica y otra medida para decrementos de la misma.

### **Características dinámicas**

Se manifiestan cuando la entrada se modifica repentinamente de un valor a otro (sistema en estado transitorio), y son estas:

- Respuesta en frecuencia: análisis de la variación de la sensibilidad del transductor con la frecuencia de la señal de entrada.

- Respuesta en fase: La señal de salida esta desfasada con respecto a la de entrada.

La variación de ese desfase en función de la frecuencia de entrada es la respuesta en fase.

- Tiempo de establecimiento: es el tiempo necesario para que la variación de la señal de salida se produzca dentro de un rango determinado alrededor del valor final.

## **1.4. CLASIFICACIÓN**

Son varios los criterios de clasificación que se pueden seguir en el caso de los transductores, a continuación se muestran tres de ellos:

### **Alimentación (tipo de excitación)**

- Activos o generadores
- Ellos mismos generan una tensión o corriente
- No necesitan ninguna alimentación externa
- Ejemplo: termopar
- Pasivos o moduladores
- Necesitan una alimentación externa
- Ejemplo: termistor

### **Fundamentos físicos**

- Los termopares basados en los efectos Seebeck, Peltier y Thomson.
- Transductores basados en el efecto piezoeléctrico.
- Transductores basados en el efecto fotoeléctrico.
- Transductores basados en la variación de resistencia eléctrica, de inductancia o de capacidad.

### **Magnitudes a medir**

Tratado más detalladamente a continuación, este criterio de clasificación tiene en cuenta cual es la magnitud que se mide, pudiendo ser: temperatura, fuerza, presión, nivel, posición, velocidad, aceleración, desplazamiento, ...

## 1.4.1. TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA

### RTDs

Se basa en la propiedad que presentan los materiales conductores de variar su resistencia eléctrica con la temperatura.

La variación de la resistencia R del sensor con la temperatura puede medirse mediante una ecuación:

$$R = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n)$$

$R_0$  es la resistencia a 0 °C. Los coeficientes “a” dependen del material del sensor. (habitualmente platino)

Se alimentan con tensiones muy bajas, para evitar el autocalentamiento.

### Termistores

Tipos: PTC y NTC (Coeficiente de temperatura Positivo/Negativo)

Elemento sensible a la temperatura: resistencia de material semiconductor.

Ventajas: mayor sensibilidad que las sondas de resistencia

Inconvenientes: “no linealidad” muy elevada (precisan circuitería de compensación)

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

Ecuación que define las curvas de resistencia de un termistor

### Termopares

Un termopar se compone de dos hilos de diferentes metales unidos en un extremo y abiertos en el otro.

La tensión que pasa por el extremo abierto es función de la temperatura de la unión y de los metales utilizados. (efecto Seebeck)

La unión del termopar nos proporciona una  $T_x$  (temperatura desconocida)

Conociendo  $T_{ref}$  (temperatura fija conocida: ‘hielo’) y el valor de V (medido con un voltímetro), podremos hallar  $T_x$  mediante la ecuación:

$$V = (T_x - T_{ref})$$

Inconvenientes: baja sensibilidad

Ventajas: precio económico

## 1.4.2. TRANSDUCTORES DE FUERZA

### Basados en la aplicación de la leyes de la estática

Examinando la aceleración angular con momento de inercia J

$$\Sigma F - m a = 0$$

Ley de Newton

$$\Sigma M - J(d\omega/dt) = 0$$

### Basados en el fenómeno de la reacción elástica

Ley de Hooke

$$F = - K \cdot \Delta x$$

## 1.4.3. TRANSDUCTORES DE PRESIÓN

La presión deforma una membrana y dicha deformación se transforma en una señal eléctrica mediante un transductor.

Formados básicamente de dos tipos:

-Convertir la presión en desplazamientos o movimientos.

-Convertir dichos desplazamientos en señales eléctricas a través de transductores

LVDT, transductores potenciométricos, “strain-gage”...

### Transductores de presión absoluta

Contienen la referencia del vacío y miden la presión absoluta del ambiente.

### Transductores de presión diferencial

Consiste en medir la presión diferencial que existe entre dos fuentes de presión.

### Transductores de presión relativa en el ambiente

Transductores de presión diferencial donde una fuente es la presión atmosférica.

Se pueden también clasificar en dos grupos:

### Mecánicos

Se dividen en elementos de medida directa que miden la presión comparándola con un líquido de densidad y altura conocidos.

### Electromecánicos

Utilizan un elemento mecánico elástico junto con un transductor elástico que genera la señal eléctrica correspondiente.

(Galgas extensométricas: se basan en la variación de la resistencia que experimentan los conductores y semiconductores cuando, al aplicarle una fuerza se deforma).

#### 1.4.4. TRANSDUCTORES DE NIVEL

Los sensores de nivel pueden ser de tipo continuo o discreto. A partir de la medida de nivel de un líquido en un tanque conociendo su geometría, dimensiones y densidad, puede determinarse el volumen y la masa.

##### **Captadores de nivel por boya**

Se basan en las variaciones de resistencia de un sensor resistivo producidas por una boya al flotar, y transmitidas a través de un eje al sensor resistivo. Si el captador resistivo se alimenta mediante un voltaje constante entre sus extremos, aparecerá entre su contacto variable y uno de sus extremos, una señal de voltaje proporcional al giro del eje sensor, y por tanto a la variación del líquido.

##### **Captadores de nivel por presión**

Medir la presión que se genera en el fondo del depósito debido a la presión hidrostática y relacionar dicha medida con la altura del líquido que crea dicha presión (se emplea un sensor de presión diferencial). Comprimir un tubo flexible que contiene un contacto eléctrico junto a un elemento resistivo variable, de modo que la resistencia medida varía con el aumento/disminución de nivel (tubo de Bourdon)

##### **Captadores de nivel capacitivos**

Basado en la variación de capacidad de un condensador, bien por la modificación de su geometría (superficie o separación de sus placas) o por la variación de su dieléctrico. Para medida de nivel en líquidos se utilizan como condensador pares de electrodos sumergidos en el seno del líquido. Las variaciones del dieléctrico debidas a la subida/bajada de nivel, hace que se modifique la capacidad.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

C=capacidad

$\epsilon_0$ =cte..dieléctrica

A = área electrodos

d=distancia electrodos

#### 1.4.5. TRANSDUCTORES DE POSICIÓN

Los transductores de posición se utilizan para determinar la posición de un objeto con respecto a un punto de referencia.

Las posiciones pueden ser lineales o angulares.

### **Transductores de posición lineales**

En la industria este tipo de sensores se emplean como medida de seguridad para evitar la colisión de robots con objetos.

En aplicaciones de robótica móvil los sensores permiten obtener información de distancia a los objetos.

### **Transductores de posición angulares**

El resolver es el encargado de medir el ángulo. Consta de tres bobinados en el cual el central (móvil) induce corriente sobre los otros dos (fijos y desfasados 90°). Analizando la corriente inducida en las bobinas fijas, se puede determinar la posición del eje móvil.

La misión de los transductores de posición y proximidad es determinar si un elemento está en una posición concreta o dentro de un margen previamente establecido. Se utilizan en sistemas en los cuales lo único importante es detectar la presencia de un objeto en cuestión. Según las características del objeto a detectar tenemos diversos tipos:

#### **Inductivos**

No precisan de contacto físico. Detectan la variación del flujo magnético producido por una bobina cuando es cortado o atravesado por un objeto metálico o ferromagnético.

#### **Ópticos**

Permiten detectar todo tipo de objetos y productos, tanto sólidos como líquidos.

#### **Magnéticos**

Estos sensores de contacto abren o cierran circuito ante la presencia o ausencia de un campo magnético, producido normalmente por un imán. Se denominan relés reed.

#### **Capacitivos**

Utilizan un campo eléctrico como fenómeno físico aprovechable para reaccionar frente al objeto a detectar.

## **1.4.6. TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD**

Podemos determinar la velocidad a partir de la información proporcionada por los transductores de posición por diferenciación  $v = (dr/dt)$

Algunos sensores de posición angular, al girar crean unos pulsos magnéticos.

Basta con contar esos pulsos para determinar la velocidad.

Un ejemplo es la dinamo tacométrica en la que se produce un complejo sistema de campos magnéticos que permiten medir la velocidad.



Los transductores de velocidad, también denominados tacómetros, miden únicamente velocidades angulares, aunque también se pueden utilizar para medir velocidades lineales mediante sistemas mecánicos que conviertan el movimiento lineal en angular o mediante sencillos cálculos.

Existen dos sistemas para medir la velocidad:

#### **Tacogeneradores**

Están basados en la ley de Faraday. Dependiendo del tipo de señal suministrada a la salida del tacogenerador, se dividen en tacodinamo (señal de c.c.) y tacoalternador (señal de c.a.)

#### **Tacómetros**

Normalmente son tacómetros eléctricos, que producen una tensión proporcional a la variación de rotación.

### **1.4.7. TRANSDUCTORES DE ACELERACION**

Los acelerómetros miden la fuerza requerida para acelerar una masa sujeta al acelerómetro. La medida del desplazamiento provocado por una masa interna con respecto al acelerómetro mide la fuerza a la que se ha sometido a la masa.

Cuando un sensor está sujeto a vibraciones debe tenerse en cuenta la curva de respuesta del sistema ante señales de distinta frecuencia (diagrama de Bode)

### **1.4.8. TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO**

Los transductores de desplazamiento son elementos capaces de realizar la medida de distancias lineales y angulares en márgenes más o menos amplios; por tanto, podemos distinguir:

#### **Distancias largas**

Se recurre a la emisión, recepción y posterior análisis de ondas electromagnéticas, como pueden ser los ultrasonidos (sonar, radar y láser)

#### **Distancias cortas**

Se utilizan normalmente transductores resistivos, capacitivos o inductivos.

#### **Medidores de ángulos**

Son muy utilizados en los sistemas de control. Al igual que en los transductores lineales, podemos construir transductores angulares aprovechando el efecto resistivo (potenciómetros), inductivo (syncros) y capacitivo, pero también se pueden utilizar discos codificados (encoders) que permiten un tratamiento digital de la información angular medida.

## **2. TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD.**

En este punto se expondrá con más detalle dos de los tipos de transductores de más relevancia por sus aplicaciones industriales.

### **2.1. TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA**

Es fácil realizar medidas de la temperatura con un sistema de adquisición de datos, pero la realización de medidas de temperatura exactas y repetibles no es tan fácil.

La temperatura es un factor de medida engañoso debido a su simplicidad. A menudo pensamos en ella como un simple número, pero en realidad es una estructura estadística cuya exactitud y repetitividad pueden verse afectadas por la masa térmica, el tiempo de medida, el ruido eléctrico y los algoritmos de medida. Esta dificultad se puso claramente de manifiesto en el año 1990, cuando el comité encargado de revisar la Escala Práctica Internacional de Temperaturas ajustó la definición de una temperatura de referencia casi una décima de grado centígrado. (Imaginemos lo que ocurriría si descubriéramos que a toda medida que obtenemos normalmente le falta una décima de amperio.)

Dicho de otra forma, la temperatura es difícil de medir con exactitud aún en circunstancias óptimas, y en las condiciones de prueba en entornos reales es aún más difícil. Entendiendo las ventajas y los inconvenientes de los diversos enfoques que existen para medir la temperatura, resultará más fácil evitar los problemas y obtener mejores resultados.

A continuación se compararán los cuatro tipos más corrientes de transductores de temperatura que se usan en los sistemas de adquisición de datos: detectores de temperatura de resistencia (RTD), termistores, sensores de IC y termopares. La elección de los transductores de temperatura adecuados y su correcta utilización puede marcar la diferencia entre unos resultados equívocos y unas cifras fiables. Los termopares son los sensores más utilizados pero normalmente se usan mal.

Una vez conocido la forma en que operan cada tipo de transductor de temperatura se analizarán las especificaciones técnicas de los mismos (de manera comercial) para determinar cuales son los factores más importantes a considerar para la elección de los mismos.

## **Conceptos Básicos de los Transductores de Temperatura.**

Los transductores eléctricos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y entre los cuales figuran:

- Variación de resistencia en un conductor (sondas de resistencia: RTDs).
- Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).
- f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
- Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación).

Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal, etc.).

Los metales puros tienen un coeficiente de resistencia de temperatura positivo bastante constante. El coeficiente de resistencia de temperatura, generalmente llamado coeficiente de temperatura es la razón de cambio de resistencia al cambio de temperatura. Un coeficiente positivo significa que la resistencia aumenta a medida que aumenta la temperatura. Si el coeficiente es constante, significa que el factor de proporcionalidad entre la resistencia y la temperatura es constante y que la resistencia y la temperatura se graficarán en una línea recta.

Cuando se usa un alambre de metal puro para la medición de temperatura, se le refiere como detector resistivo de temperatura, o RTD (por las siglas en inglés de resistive temperature detector).

Cuando se usan óxidos metálicos para la medición de temperatura, el material de óxido metálicos conformado en forma que se asemejan a pequeños bulbos o pequeños capacitores. El dispositivo formado así se llama Termistor. Los termistores tienen coeficientes de temperatura negativos grandes que no son constantes. En otras palabras, el cambio de resistencia por unidad de cambio de temperatura es mucho mayor que para el metal puro, pero el cambio es en la otra dirección: la resistencia disminuye a medida que se aumenta la temperatura. El hecho de que el coeficiente no sea constante significa que el cambio en la resistencia por unidad de cambio de temperatura es diferente a diferentes temperaturas.

La linealidad extrema de los termistores los hace poco apropiados para la medición de temperatura a través de rangos amplios. Sin embargo, para la medición de temperaturas dentro de bandas angostas, están muy bien dotados, pues dan una gran respuesta a un cambio de temperatura pequeño.

Como regla general, los termistores son preferibles cuando la banda de temperaturas esperada es angosta, mientras que los RTD son preferibles cuando la banda de temperatura esperada es amplia.

Ningún transductor es el mejor en todas las situaciones de medida, por lo que tenemos que saber cuándo debe utilizarse cada uno de ellos. Como podemos ver, en la Tabla siguiente se están comparando los cuatro tipos de transductores de temperatura más utilizados, y refleja los factores que deben tenerse en cuenta: las prestaciones, el alcance efectivo, el precio y la comodidad.

	RTD	Termistor	Sensor de IC	Termopar
Ventajas	Más estable. Más preciso. Más lineal que los Termopares.	Alto rendimiento Rápido Medida de dos hilos	El más lineal El de más alto rendimiento Económico	Autoalimentado Robusto Económico Amplia variedad de formas físicas Amplia gama de temperaturas
Desventajas	Caro. Lento. Precisa fuente de alimentación Pequeño cambio de resistencia. Medida de 4 hilos Autocalentable	No lineal. Rango de Temperaturas limitado. Frágil. Precisa fuente de alimentación Autocalentable	Limitado a < 250 °C Precisa fuente de alimentación Lento Autocalentable Configuraciones limitadas	No lineal Baja tensión Precisa referencia El menos estable El menos sensible

### **2.1.1. TIPOS DE TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA**

Un análisis más detallado de cada uno de estos cuatro tipos nos ayudará a entender las diferencias.

#### **Termómetros de Resistencia**

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

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

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

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

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

En la que:

$R_0$  = Resistencia en ohmios a 0°C.

$R_t$  = Resistencia en ohmios t °C.

$\beta$  = Coeficiente de temperatura de la resistencia.

#### **Detectores de temperatura de resistencia**

El detector de temperatura de resistencia (RTD) se basa en el principio según el cual la resistencia de todos los metales depende de la temperatura. La elección del platino en los RTD de la máxima calidad permite realizar medidas más exactas y estables hasta una temperatura de aproximadamente 500 °C. Los RTD más económicos utilizan níquel o aleaciones de níquel, pero no son tan estables ni lineales como los que emplean platino.

En cuanto a las desventajas, el platino encarece los RTD, y otro inconveniente es el autocalentamiento. Para medir la resistencia hay que aplicar una corriente, que, por supuesto, produce una cantidad de calor que distorsiona los resultados de la medida.

Una tercera desventaja, que afecta al uso de este dispositivo para medir la temperatura, es la resistencia de los RTD. Al ser tan baja, la resistencia de los hilos conductores que conectan el RTD puede provocar errores importantes. En la denominada técnica de dos hilos (Figura 1a), la resistencia se mide en los terminales del sistema de adquisición de datos, por lo que la resistencia de los hilos forma parte de la cantidad desconocida que se pretende medir. Por el contrario, la técnica de cuatro hilos (Figura 1b) mide la resistencia en los terminales del RTD, con lo cual la resistencia de los hilos queda eliminada de la medida. La contrapartida es que se necesita el doble de cables y el doble de canales de adquisición de datos. (La técnica de tres hilos ofrece una solución intermedia que elimina un cable, pero no es tan precisa.)

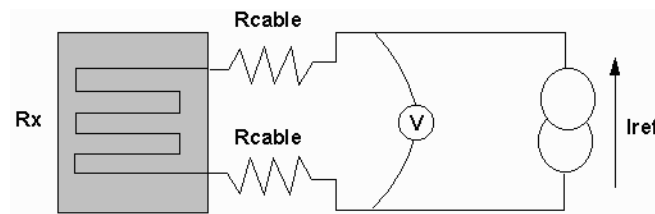


Figura 1a

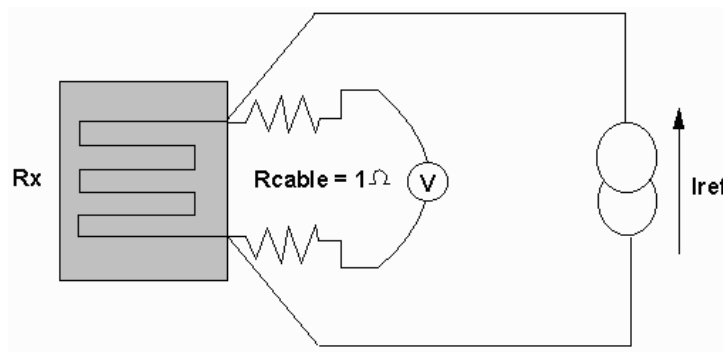


Figura 1b

## Termistores

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

La relación entre la resistencia y la temperatura viene dada por la expresión:

$$R_t = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

En la que:

$R_t$  = Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta  $T_t$ .

$R_0$  = Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia  $T_0$ .

$\beta$  = constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas.

Hay que señalar que para obtener una buena estabilidad en los termistores es necesario envejecerlos adecuadamente.

Los termistores se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos de medida de resistencia. En intervalos amplios de temperatura, los termistores tienen características no lineales. Al tener un alto coeficiente de temperatura poseen una mayor sensibilidad que las sondas de resistencia estudiadas y permiten incluso intervalos de medida de 1°C (span). Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor variando de fracciones de segundo a minutos.

La distancia entre el termistor y el instrumento de medida puede ser considerable siempre que el elemento posea una alta resistencia comparada con la de los cables de unión. La corriente que circula por el termistor a través del circuito de medida debe ser baja para garantizar que la variación de resistencia del elemento sea debida exclusivamente a los cambios de temperaturas del proceso.

Los termistores encuentran su principal aplicación en la compensación de temperatura, como temporizadores y como elementos sensibles en vacuómetros.

Los termistores, que son detectores resistivos fabricados normalmente de semiconductores cerámicos, ofrecen una impedancia mucho más alta que los RTD, por lo que la reducción de los errores provocados por los hilos conductores hace bastante factible el uso de la técnica de dos hilos, que es más sencilla. Su alto rendimiento (un gran cambio de resistencia con un pequeño cambio de temperatura) permite obtener medidas de alta resolución y reduce aún más el impacto de la resistencia de los hilos conductores. Por otra parte, la bajísima masa térmica del termistor minimiza la carga térmica en el dispositivo sometido a prueba.

No obstante, la baja masa térmica también plantea un inconveniente, que es la posibilidad de un mayor autocalentamiento a partir de la fuente de alimentación utilizada en la medida. Otro inconveniente del termistor es su falta de linealidad, que exige un algoritmo de linealización para obtener unos resultados aprovechables.

## **Sensores de IC**

Los sensores de circuitos integrados resuelven el problema de la linealidad y ofrecen altos niveles de rendimiento. Son, además, relativamente económicos y bastante precisos a temperatura ambiente.

Sin embargo, los sensores de IC no tienen tantas opciones de configuraciones del producto o de gama de temperaturas, y además son dispositivos activos, por lo que requieren una fuente de alimentación.

Los sensores de IC forman parte de la tendencia hacia los "sensores inteligentes", que son unos transductores cuya inteligencia incorporada facilita las actividades de reducción y análisis de datos que el usuario debe realizar normalmente en el sistema de adquisición de datos.

## **Termopares**

Los termopares se utilizan extensamente, ya que ofrecen una gama de temperaturas mucho más amplia y una construcción más robusta que otros tipos. Además, no precisan alimentación de ningún tipo y su reducido precio los convierte en una opción muy atractiva para grandes sistemas de adquisición de datos. Sin embargo, para superar algunos de los inconvenientes inherentes a los termopares y obtener resultados de calidad, es importante entender la naturaleza de estos dispositivos.

Estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales:

- I. Ley del circuito homogéneo. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.
- II. Ley de metales intermedios. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura A a otro punto B, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B.
- III. Ley de las temperaturas sucesivas. La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas  $T_1$   $T_3$  es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a  $T_1$   $T_2$  de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas  $T_2$   $T_3$ .



## Funcionamiento de los Termopares.

El comportamiento de un termopar se basa en la teoría del gradiente, según la cual los propios hilos constituyen el sensor. La Figura 2a ilustra este concepto. Cuando se calienta uno de los extremos de un hilo, le produce una tensión que es una función de (A) el gradiente de temperatura desde uno de los extremos del hilo al otro, y (B) el coeficiente de Seebeck, una constante de proporcionalidad que varía de un metal a otro.

Un termopar se compone sencillamente de dos hilos de diferentes metales unidos en un extremo y abiertos en el otro (Figura 2b). La tensión que pasa por el extremo abierto es una función tanto de la temperatura de la unión como de los metales utilizados en los dos hilos. Todos los pares de metales distintos presentan esta tensión, denominada tensión de Seebeck en honor a su descubridor, Thomas Seebeck.

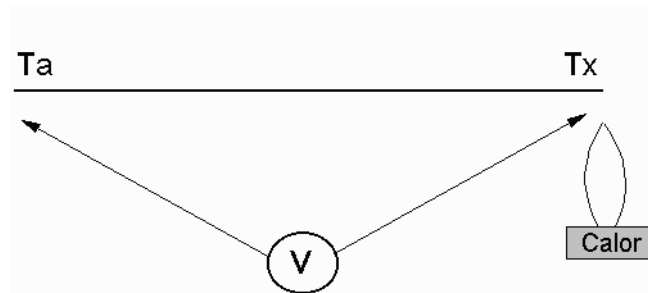


Figura 2a

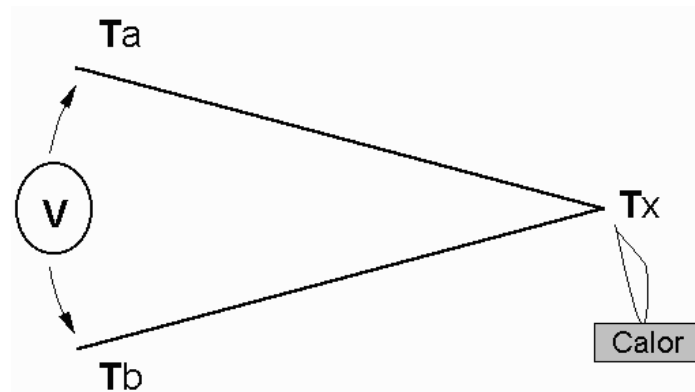


Figura 2b

En pequeñas gamas de temperaturas, los coeficientes de Seebeck de los dos hilos son constantes y la tensión de Seebeck es, por consiguiente, proporcional, pero en gamas más grandes, el propio coeficiente de Seebeck es una función de la temperatura, convirtiendo la tensión de Seebeck en no lineal. Como consecuencia, las tensiones del termopar también tienden a ser no lineales.

## Temperatura relativa frente a temperatura absoluta

Los RTD, termistores y sensores de IC miden todos ellos temperaturas absolutas, pero el termopar mide solamente temperaturas relativas, y el motivo resulta obvio cuando pensamos en la conexión de un termopar a un voltímetro o a un sistema de adquisición de datos. Supongamos que estamos utilizando un termopar Tipo J, que es el más normal y consiste en un hilo de hierro y otro de constantan (una aleación con un 45% de níquel y un 55% de cobre). ¿Qué ocurrirá cuando conectemos los dos hilos conductores de prueba, que probablemente sean de cobre? Que crearemos otros dos termopares (Figura 3), cada uno de los cuales aportará una tensión al circuito, con lo que tendremos tres termopares y tres temperaturas desconocidas.

La solución clásica a este dilema consiste en añadir un termopar opuesto y una unión de referencia a una temperatura conocida (Figura 4). En este ejemplo, el termopar opuesto es otra unión de cobre y hierro equivalente a la unión de cobre y hierro que hemos creado al añadir un hilo conductor de cobre al hilo conductor de hierro del termopar "real". Estas dos uniones, si están aisladas en un bloque isotérmico (temperatura constante), se anularán mutuamente. Ahora tenemos sólo dos uniones, la unión original del termopar ( $T_x$ ) y la de referencia ( $T_{ref}$ ) que acabamos de añadir. Si conocemos la temperatura de la unión de referencia, podremos calcular  $T_x$ . (Muchos sistemas de adquisición de datos y muchos voltímetros que efectúan medidas con un termopar realizan este cálculo de forma automática.)

Lamentablemente, la naturaleza de la temperatura dificulta un poco las cosas en este caso, ya que hay muy pocos puntos de referencia prácticos y económicos para la temperatura. Los puntos de congelación y ebullición del agua, a 0 y a 100 °C respectivamente, son prácticamente los únicos asequibles que nos ofrecen la Madre Naturaleza. Una forma habitual de determinar la temperatura de  $T_{ref}$  es introducir físicamente la unión en un baño de hielo, forzando la temperatura a 0 °C. De hecho, todas las tablas de termopares utilizan un baño de hielo como referencia.

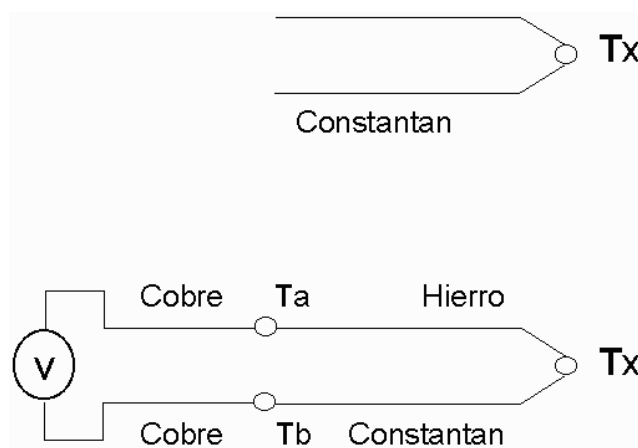


Figura 3

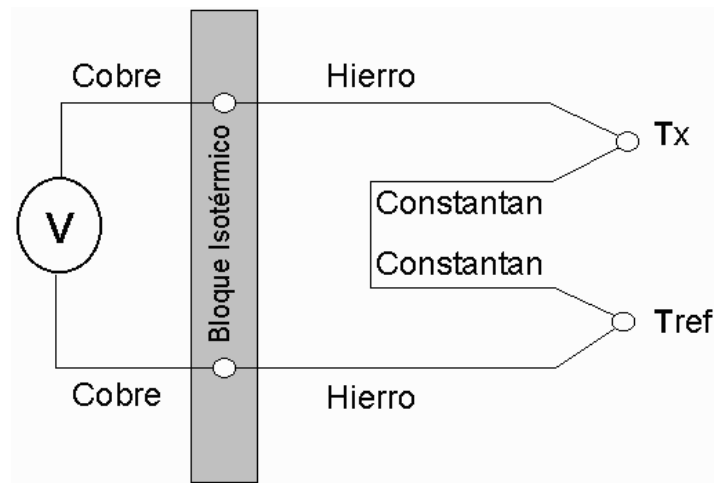


Figura 4

El enfoque del baño de hielo ofrece lecturas exactas, pero no es precisamente el accesorio más indicado para un sistema de adquisición de datos y, además, seguimos teniendo que conectar dos termopares. El primer paso hacia la simplificación es eliminar el baño de hielo. Si medimos  $T_{ref}$  con un dispositivo de medida de temperaturas absolutas (como por ejemplo un RTD) y compensamos el resultado matemáticamente, no tenemos necesidad de forzarlo a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El siguiente paso es eliminar el segundo termopar (Figura 5). Ampliando el bloque isotérmico para incluir  $T_{ref}$ , ajustamos la temperatura del bloque isotérmico a  $T_{ref}$  (puesto que los otros dos termopares del bloque siguen anulándose mutuamente).

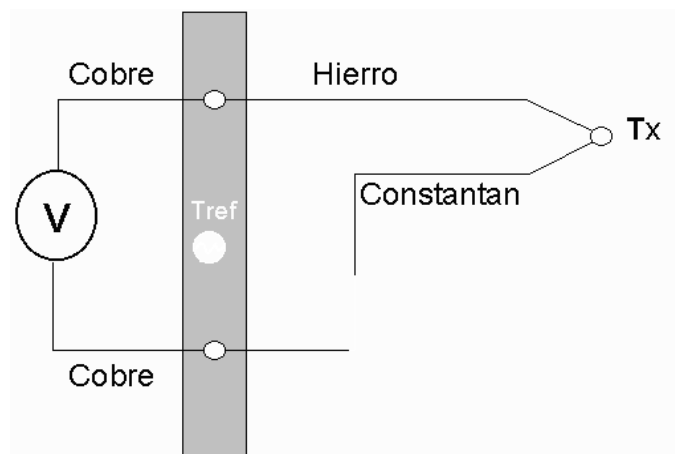


Figura 5

La determinación de  $T_{ref}$  es cuestión de medir la temperatura del bloque isotérmico con el RTD o con otro cualquier dispositivo de medida de temperaturas absolutas.

$T_{ref}$  es una de las dos cantidades que necesitamos conocer para calcular  $T_x$ . La otra es  $V$ , que medimos con el sistema de adquisición de datos (o voltímetro). Aplicando la fórmula  $V = (T_x - T_{ref})$ , podemos calcular tensiones equivalentes para los dos valores de temperatura y a continuación restar para determinar el valor de  $T_x$ .

En realidad, no queremos hacer el cálculo nosotros mismos, ya que el coeficiente no lineal de Seebeck convierte esta tarea en un trabajo rutinario. Como hemos dicho anteriormente, los voltímetros y los sistemas de adquisición de datos que efectúan medidas con termopares se encargan a menudo de realizar el cálculo.

Los coeficientes de Seebeck y las tensiones de salida resultantes son números pequeños (ver la Tabla siguiente), por lo que resulta difícil medir con exactitud tanto los niveles absolutos como los cambios relativos. En este punto el ruido eléctrico puede alterar la precisión de las medidas de temperatura. El acoplamiento magnético y electrostático se reduce utilizando cable de par trenzado, reduciendo al mínimo la longitud de los hilos conductores y permaneciendo alejado de campos magnéticos y eléctricos intensos. Por último, pero no por ello menos importante, se necesita instrumentación capaz de realizar medidas de bajo nivel limpias.

Tipo de Termopar	a 0 °C	a 100 °C	Tensión de salida a 100 °C
B	-0,25 V/C	0,90 V/C	0,033 mV
E	58,7 V/C	67,5 V/C	6,32 mV
J	50,4 V/C	54,4 V/C	5,27 mV
K	39,5 V/C	41,4 V/C	4,10 mV
S	5,40 V/C	7,34 V/C	0,65 mV

Tabla.

Coefficientes de Seebeck y tensiones de salida para los termopares utilizados habitualmente. Las dos cifras que representan los coeficientes para cada uno de los tipos muestran la no linealidad a través de una amplia gama de temperaturas.

Otro asunto muy importante en el uso de termopares en la industria tiene que ver con la variación de la temperatura ambiente en las uniones frías. Esta es la situación: si supiéramos de antemano la temperatura de las uniones frías, entonces en lugar de relacionar la lectura del voltímetro con la diferencia de temperatura, se podría relacionarla con la temperatura de la unión caliente misma. Esto sería posible pues podríamos construir las tablas de temperatura contra voltaje para que reflejaran el hecho de que las uniones frías están a una cierta temperatura de referencia (como se le denomina) conocida.

Ejemplo:

Considere un termopar tipo J. A una diferencia de temperatura de 400 °F, el voltaje de la malla del termopar es de 12 mV. Si se supiera que la unión fría siempre estará, digamos a 75 °F, entonces podríamos concluir que un voltaje de la malla de 12 mV representaría una temperatura de la unión caliente de 475 °F

(475 °F - 75 °F = 400°F ).

Mientras la unión fría se mantuviera constantemente a la temperatura de referencia de 75°F se podría ir directamente a la tabla del termopar y sumar 75 °F a cada lectura de diferencia de temperatura. El valor de temperatura resultante entonces representaría la temperatura de la unión caliente.

De hecho, esto es exactamente lo que se hace en las tablas de termopares industriales. La cifra de 75 °F se ha escogido porque representa una estimación bastante razonable de la temperatura ambiental promedio en una instalación industrial. (En las tablas de termopares para uso de laboratorio, se considera normalmente que la temperatura de referencia es de 32 °F, el punto de congelación del agua)

Para que el enfoque anterior funcione adecuadamente, la unión fría debe mantenerse constantemente a la temperatura de referencia de 75 °F. Esto por lo general es impráctico, a menos que el dispositivo de medición de temperatura esté colocado en un cuarto con aire acondicionado. Con toda seguridad, el equipo de medición estará ubicado junto con el equipo industrial y la maquinaria. La temperatura ambiente podrá variar con facilidad de unos 50°F en el invierno a unos 100 °F en el verano. Son comunes los cambios de estación aún mayores en la temperatura ambiente. Debido a esta variación en la temperatura de la unión fría, las mallas de termopares industriales deben ser compensadas.

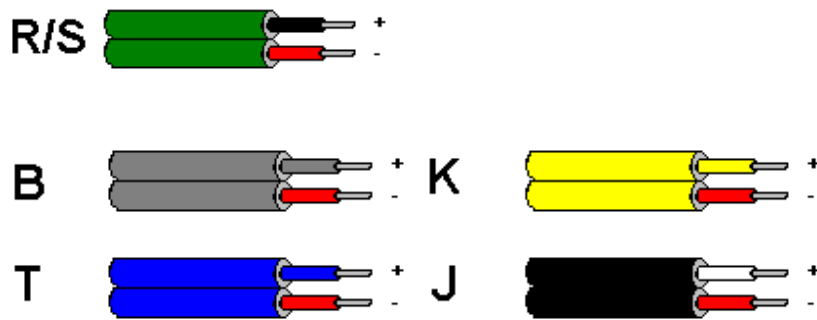
### Datos Técnicos de Referencia de las Termocuplas

Tipo de Termocupla	Materiales	Rango de Aplicación(°F )	mV
B	Platinum 30% Rhodium (+)	100 – 3270	0.007-13.499
	Platinum 6% Rhodium (-)		
C	W5Re Tungsten 5% Rhenium (+)	3000-4200	-
	W26Re Tungsten 26% Rhenium (-)		
E	Chromel (+)	32 – 1800	0 – 75.12
	Constantan (-)		
J	Iron (+)	-300 – 1600	-7.52 – 50.05
	Constantan (-)		
K	Chromel (+)	-300 – 2300	-5.51 – 51.05
	Alumel (-)		
N	Nicrosil (+)	1200-2300	-
	Nisil (-)		
R	Platinum 13% Rhodium (+)	32 - 2900	0 – 18.636
	Platinum (-)		
S	Platinum 10% Rhodium (+)	32 - 2800	0 – 15.979
	Platinum (-)		
T	Copper (+)	-300 – 750	-5.28 – 20.80
	Constantan (-)		

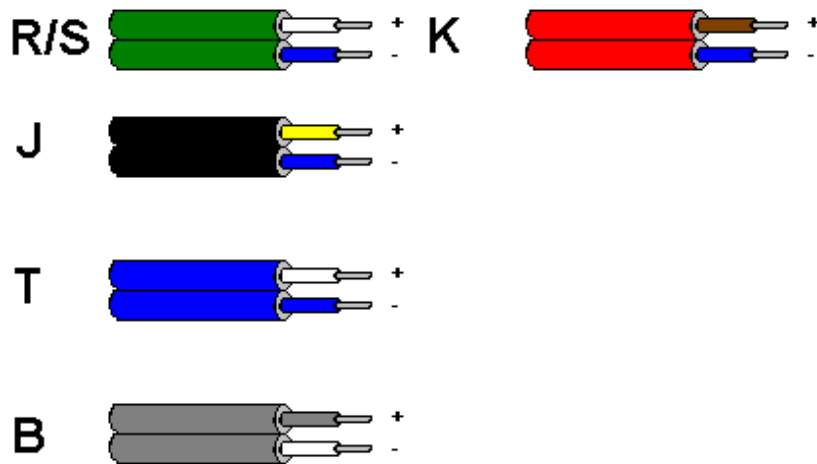
## Códigos de color de los Termocuplas

El alambrado de las termocuplas esta codificado dependiendo del tipo. Diferentes países utilizan códigos diferentes para los colores. Los códigos más comunes son:

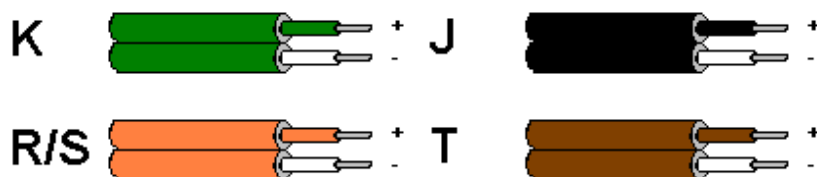
. United States ASTM:



British BS1843: 1952:

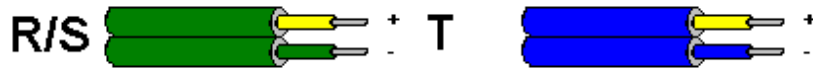


British BS4937: Part 30: 1993:

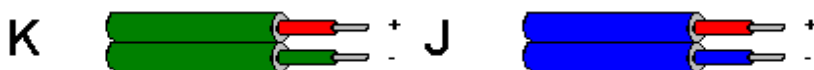
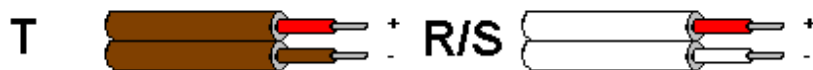




French NFE:



German DIN:



## Fotoceldas y Dispositivos Fotoeléctricos

Las Fotoceldas son pequeños dispositivos que producen una variación eléctrica en respuesta a un cambio en la intensidad de la luz. Las fotoceldas pueden clasificarse como fotorvoltaicas o fotoconductoras.

Una celda fotorvoltaica es una fuente de energía cuyo voltaje de salida varía en relación con la intensidad de la luz en superficie. Una celda fotoconductoras es un dispositivo pasivo, incapaz de producir energía. Su resistencia varía en relación con la intensidad de la luz en su superficie.

Industrialmente, las aplicaciones de las fotoceldas caen en dos categorías generales:

1. Detección de la presencia de un objeto opaco.
  - a. La detección puede hacerse en una base de todo o nada, en la que el circuito de la fotocelda tiene solo dos estados de salida que representan la presencia o la ausencia de un objeto. Este es el tipo de detección usada para contar las partes que viajan por una banda transportadora, o para evitar la operación de un mecanismo si las manos del operador no están fuera de la zona de trabajo.



- b. La detección puede hacerse en una base continua, teniendo el circuito de la fotocelda una salida continuamente variable que representa la posición variable del objeto. Este es el tipo de detección usada para "observar" la orilla de una tira de material en movimiento para evitar que se desvíe demasiado de su posición adecuada.

La ventaja principal de las fotoceldas sobre otros dispositivos de detección es que no se requiere ningún contacto físico con el objeto en detección.

2. Detección del grado de translucidez (capacidad de pasar luz) o el grado de luminiscencia (capacidad de generar luz) de un fluido o un sólido.

En estas aplicaciones, el proceso siempre ha sido dispuesto de manera que la translucidez o luminiscencia representen una variable de proceso importante. Algunos ejemplos de variables que pueden ser medidas de esta manera son densidad, temperatura y concentración de algún compuesto químico específico ( monóxido de carbono, dióxido de carbono, agua, etc. ).

### **Pirómetros de Radiación**

Los Pirómetros de radiación se fundan en la ley de Stefan Boltzmann, que dice que la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, es decir,  $W=KT^4$ . En la figura se representa el gráfico de la energía radiante de un cuerpo a varias temperaturas en función de la longitud de onda. Desde el punto de vista de medición de temperaturas industriales, las longitudes de onda térmicas abarcan desde 0.1 micras para las radiaciones ultravioletas, hasta 12 micras para las radiaciones infrarrojas.

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

### **Pirometros Opticos**

Los pirómetros ópticos manuales se basan en la desaparición del filamento de una lámpara al compararla visualmente con la imagen del objeto enfocado. Pueden ser de dos tipos:

- a. De corriente variable en la lámpara.
- b. De corriente constante en la lámpara con variación del brillo de la imagen de la fuente.

Los pirómetros ópticos automáticos son parecidos a los de radiación infrarrojos y consisten esencialmente en un disco rotativo que modula desfasadas la radiación del objeto y la de una lámpara estándar que inciden en fototubo multiplicador. Este envía una señal de salida en forma de onda cuadrada de impulsos de corriente continua que coinciden en brillo la radiación del objeto y la de la lámpara. En este momento la intensidad de corriente que pasa por la lámpara es función de la temperatura.

El factor de emisión de energía radiante depende mucho del estado de la superficie del cuerpo emisor; para un metal como el cobre pasa de 0,10 a 0,85 si el metal perfectamente cuenta con el valor de absorción de la superficie.

### **Pirómetros de Radiación Total**

El pirómetro de radiación total está formado por una lente de pyrex, silice o fluoruro de calcio que concentra la radiación del objeto caliente en una termopila formada por varios termopares de Pt-Pt/Rd de pequeñas dimensiones y montado en serie. La radiación está enfocada incidiendo directamente en las uniones calientes de los termopares.

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

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

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

El pirómetro puede apuntar al objeto bien directamente, bien a través de un tubo de mira abierto (se impide la llegada de radiación de otras fuentes extrañas) o cerrado (medida de temperatura en baños de sales para tratamientos térmicos, hornos).

## **2.2. TRANSDUCTORES DE HUMEDAD**

La humedad juega un rol muy importante en todos los procesos industriales. El solo hecho de que la atmósfera contiene humedad hace que, por lo menos, se estudie su efecto en el almacenamiento y operación de los distintos productos y dispositivos. El alcance que la influencia de la humedad podría tener en cualquier proceso industrial puede variar pero es esencial que al menos sea monitoreada, y en muchos casos controlada. Se puede decir que la humedad es una propiedad más difícil de definir y medir que sus parámetros asociados como pueden ser la presión y temperatura. La medición de la humedad es un proceso verdaderamente analítico en el cual el sensor debe estar en contacto con el ambiente de proceso a diferencia de los sensores de presión y temperatura que invariablemente se encuentran aislados del proceso por protecciones conductoras del calor o diafragmas respectivamente. Esto tiene, por supuesto, implicancias en la contaminación y degradación del sensor en niveles variables dependiendo de la naturaleza del ambiente. En este trabajo vamos a revisar distintas tecnologías de sensores de humedad y sus típicas aplicaciones en el contexto de los rangos de medición para los que son más apropiados. Los efectos de la contaminación, de alta significación dada la naturaleza analítica de las mediciones, se evalúan brevemente.

Como conclusión se sugiere que si el costo inicial no es de gran importancia, el higrómetro óptico de punto de rocío o sensor de espejo enfriado, ofrece el más preciso, repetible y confiable método para la medición de humedad con el rango de mayor amplitud posible. En este trabajo vamos a poner el acento en los sensores que miden el contenido de agua en los gases mencionando que hay otra familia de dispositivos basados en la absorción de microondas que se utilizan para determinar el nivel de humedad en los más diversos compuestos de uso industrial o alimentos como pueden ser: cereales, café, madera, pulpa de papel, adhesivos etc. Normalmente estos elementos cambian sus propiedades dieléctricas a medida que absorben el agua hecho que se toma como base para la aplicación de mediciones basadas en microondas.

### **2.2.1. PRECISIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD**

Los fabricantes y laboratorios de calibración buscan determinar la calidad del desempeño de los dispositivos para la medición de humedad, esto es, que tanto las especificaciones y como los datos de calibración reflejen la operación real de los sensores. Podemos definir la precisión de un sensor como la desviación con respecto a un patrón de laboratorio. Esta característica es afectada por los siguientes factores:

- Temperatura y humedad a la que fue calibrado el sensor

-Dependencia de la calibración con la humedad y la temperatura, muchos sensores son no-lineales y casi todos varían con la temperatura

-Como afecta al sensor el envejecimiento y la velocidad de envejecimiento

-Que tan sensitivo es el sensor a los contaminantes

-Que precisión tiene el estándar usado para construir el sensor y su certificación

A causa de estas variaciones es de notar que una declaración de una precisión  $\pm 1\%$  es poco representativa del desempeño efectivo en el ámbito de operación del sensor. Por ejemplo un sensor con una precisión especificada de fábrica del  $\pm 1\%$  podría, después de operar durante 6 meses, caer hasta una precisión de  $\pm 6\%$  mientras que otro sensor con una precisión de fábrica de  $\pm 2\%$  podría, luego de operar 6 meses en la misma aplicación, tener una precisión del  $\pm 2\%$ .

## **2.2.2. PARÁMETROS TÍPICOS PARA DETERMINAR LA HUMEDAD.**

### **Medición de la humedad relativa (RH).**

La medición de la humedad relativa consiste en la relación entre la presión parcial del vapor de agua en el gas de que se trate y la presión de saturación del vapor, a una temperatura dada. Por lo tanto la humedad relativa es función de la temperatura. La medición es expresada como un porcentaje. La humedad relativa es un parámetro utilizado principalmente en aplicaciones ambientales (ej. acondicionamiento de aire) o mediciones meteorológicas ya que impacta directamente en el confort humano. Cuando los niveles de humedad relativa son bajos puede producirse electricidad estática que dañe al equipamiento electrónico.

### **Medición del punto de rocío/escarcha (D/F PT).**

El punto de rocío es la temperatura, por sobre los  $0^\circ$  grados, al cual el vapor de agua presente en el gas condensa. El punto de escarcha es la temperatura, por debajo de  $0^\circ$  grados, a la cual el vapor se cristaliza en hielo. El punto D/F PT es función de la presión del gas pero independiente de su temperatura, y por lo tanto se lo considera una magnitud fundamental.

Los puntos de rocío y escarcha son utilizados cuando la sequedad de un gas es relevante, esto es en procesos en los que debe evitarse la condensación de el vapor de agua a bajas temperaturas. El punto de rocío se usa también como un indicador del contenido de vapor de agua en procesos de alta temperatura como el secado industrial.

### **Partes por millón (PPM).**

Expresión del contenido de vapor de agua por fracción de volumen (PPMv) o, si es multiplicado por la relación entre el peso molecular del agua y el aire como PPMw. Este parámetro es más dificultoso de conceptualizar porque está fuera del alcance del

cuerpo humano detectar los cambios de esta magnitud en la atmósfera. Este término y los asociados como pueden ser: El termino PPM u otros asociados como la relación de mezcla, el porcentaje de volumen y la humedad específica, se utilizan cuando el vapor de agua es una impureza o un componente definido en una mezcla de gases que participa de un proceso industrial. Un ejemplo práctico de su aplicación son los gases de uso medicinal, como pueden ser el óxido nitroso, dióxido de carbono y oxígeno cuando son utilizados en operaciones quirúrgicas que deben tener un contenido de humedad menor a 60ppm.

### 2.2.3. DISTINTOS TIPOS DE SENSORES Y SUS APLICACIONES.

No existe una tecnología de medición que sea apropiada para todas las aplicaciones. Algunas de las tecnologías típicamente usadas son:

#### **Técnicas para la medición de humedad relativa**

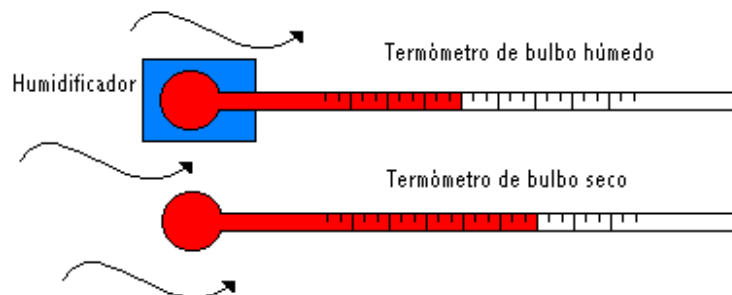
Las mediciones de humedad relativa puede ser hecha por sensores basados en: psicometría, desplazamiento, resistivos, capacitivos y por absorción de líquido. Algunos de los cuales describimos.

#### **Psicometría por bulbo húmedo/bulbo seco**

La psicometría desde hace tiempo es uno de los métodos más populares para el monitoreo de la humedad debido a su simplicidad e inherente bajo costo. Un psicómetro industrial típico consiste de un par de termómetros eléctricos acoplados, uno de los cuales opera en estado húmedo. Cuando el dispositivo funciona la evaporación del agua enfría el termómetro humedecido, resultando una diferencia medible con la temperatura ambiente o la temperatura del bulbo seco. Cuando el bulbo húmedo alcanza sus máxima caída de temperatura la humedad puede determinarse comparando la temperatura de los dos termómetros en una tabla psicométrica.

El psicómetro provee una alta precisión en las proximidades del punto de saturación (100% RH) y es fácil de operar y reparar, por otra parte a baja humedad relativa (menos del 20%) el desempeño es pobre y el mantenimiento debe intensificarse. No puede utilizarse a temperaturas menores de 0° y, siendo el propio psicómetro una fuente de humedad, no puede utilizarse tampoco en ambientes pequeños o cerrados.

Los psicómetros son utilizados típicamente para control ambiental en recintos.



Psicómetro

### **Sensores por desplazamiento**

Es quizás el tipo de sensor más antiguo y de uso común, utiliza un mecanismo para medir la expansión o contracción de un cierto material que es proporcional a los cambios en el nivel de humedad relativa. Los materiales más comunes el nylon y la celulosa. Las ventajas de este tipo de sensores son el bajo costo de fabricación y es altamente inmune a la contaminación. Las desventajas son la tendencia a la descalibración en el tiempo y los efectos de histéresis significativos.

### **Sensor de bloque de polímero resistivo**

Están compuestos de un sustrato cerámico aislante sobre el cual se deposita una grilla de electrodos. Estos electrodos se cubren con una sal sensible a la humedad embebida en una resina (polímero). La resina se recubre entonces con una capa protectora permeable al vapor de agua. A medida que la humedad permea la capa de protección, el polímero resulta ionizado y estos iones se movilizan dentro de la resina. Cuando los electrodos son excitados por una corriente alterna, la impedancia del sensor se mide y es usada para calcular el porcentaje de humedad relativa.

Por su misma estructura este tipo de sensores son relativamente inmunes a la contaminación superficial ya que no afecta su precisión aunque si el tiempo de respuesta. Debido a los valores extremadamente altos de resistencia del sensor a niveles de humedad menores que 20% es apropiado para los rangos altos de humedad.

### **Sensores capacitivos**

Los sensores capacitivos (polímero orgánico capacitivo) es diseñado normalmente con platos paralelos con electrodos porosos o con filamentos entrelazados en el sustrato. El material dieléctrico absorbe o elimina vapor de agua del ambiente con los cambios del nivel de humedad. Los cambios resultantes en la constante dieléctrica causa una variación en el valor de la capacidad del dispositivo por lo que resulta una impedancia que varía con la humedad. Un cambio en la constante dieléctrica de aproximadamente el 30% corresponde a una variación de 0-100% en la humedad relativa.

El material sensor es muy delgado para alcanzar grandes cambios en la señal con la humedad. Esto permite al vapor de agua entrar y salir fácilmente y el secado rápido para la sencilla calibración del sensor.

Este tipo de sensor es especialmente apropiado para ambiente de alta temperatura porque el coeficiente de temperatura es bajo y el polímero dieléctrico puede soportar altas temperaturas. Los sensores capacitivos son también apropiados para aplicaciones que requieran un alto grado de sensibilidad a niveles bajos de humedad, donde proveen una respuesta relativamente rápida. A valores de humedad superiores al 85% sin embargo el sensor tiene una tendencia a saturar y se transforma en no lineal.

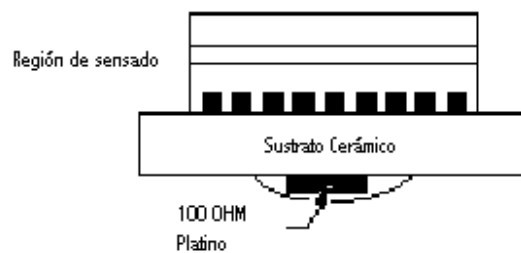


### Efectos de la temperatura y la humedad

La salida de todos los sensores de humedad por absorción (capacitivos, resistivos, de film resistivo etc.), se ven afectados sensiblemente por la temperatura y la humedad relativa. A causa de esto se utilizan mecanismos de compensación de temperatura en aplicaciones que demanden alto nivel de precisión o un amplio rango de temperaturas.

Cuando se compensa la temperatura de un sensor lo mejor es hacer la medición de temperatura tan cerca como sea posible de área activa del sensor, esto es en el mismo micro-ambiente. Esto es especialmente verdad cuando se combina la medición de RH y temperatura par derivar el punto de rocío

Los instrumentos de tipo industrial para medir humedad y punto de rocío incorporan una resistencia de platino (RTD) en la parte posterior del sustrato del sensor para la integridad de la compensación de la diferencia de temperaturas. Para estos sensores de alta temperatura no se proveen los circuitos electrónicos de acondicionamiento de señal.



Las aplicaciones típicas para los polímeros resistivos y capacitivos son:

- HVAC administración de energía
- Control de salas de computadora/ambientes limpios
- Instrumentos portátiles
- Monitoreo ambiental y meteorológico

### **Humedad relativa calculada con el punto de rocío y la temperatura**

Un transmisor óptico de punto de rocío con el agregado de medición de temperatura podría utilizarse para obtener un valor de humedad relativa de alta precisión. Este sería un costoso método para derivar un valor de una medición primaria.

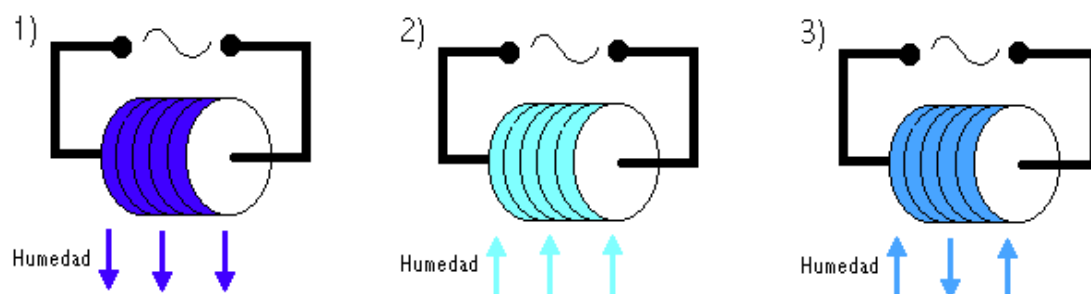
### **Dispositivos usados para medición del punto de rocío/escarcha**

Los sensores de sal saturada de cloruro de litio, óxido de aluminio y de espejo óptico enfriado son utilizados para la medición directa del D/F PT. Estos sensores proveen un amplio rango de medición en términos del punto de rocío o escarcha.

### **Sensor de sal saturada de cloruro de litio**

El sensor de sal saturada de cloruro de litio ha sido uno de los sensores de punto de rocío más ampliamente usados. Su popularidad es resultado de su simplicidad, bajo costo, durabilidad, y el hecho de que provee una medición fundamental.

El sensor consiste de una bobina recubierta con una tela absorbente y un arrollamiento de electrodos bifilares inertes. La bobina es revestida con una solución diluida de cloruro de litio. Una corriente alterna se hace pasar por el arrollamiento y la solución salina causando calentamiento por efecto joule. A medida que la bobina eleva su temperatura el agua de la sal se evapora a una tasa que es controlada por la presión de vapor de agua en el aire circundante. Cuando la bobina comienza a secarse, la resistencia de la solución salina se incrementa produciendo una disminución de la corriente que enfría la bobina. Este efecto de calentamiento y enfriamiento continúa hasta alcanzar un punto de equilibrio en el que no hay intercambio de agua con el ambiente. Esta temperatura de equilibrio es directamente proporcional a la presión de vapor de agua o el punto de rocío del aire circundante. Este valor es medido utilizando un termómetro de resistencia de platino (PRT).





Si el sensor de sal saturada se contamina puede fácilmente hacerse una recarga de cloruro de litio. Las limitaciones de esta tecnología son un relativamente bajo tiempo de repuesta y el límite inferior del rango de medición impuesto por la naturaleza del cloruro de litio. El sensor no puede usarse para medir puntos de rocío cuando la presión de vapor de agua cae por debajo de la presión de saturación de vapor del cloruro de litio que ocurre cerca del 11% de humedad relativa. Los sensores de sal saturada resultan atractivos cuando el bajo costo, la resistencia ambiental, el bajo tiempo de respuesta y la moderada precisión son requeridos.

Las aplicaciones típicas de estos sensores son:

- Controles de refrigeración
- Secadores
- Dehumificadores
- Monitorio de líneas de suministro de aire
- Equipos envasadores de píldoras

Para aplicaciones que requieren una gran precisión y un amplio rango de mediciones se deben considerar sensores del tipo electrolítico de condensación y a base de óxidos.

### **Sensores de punto de rocío de óxido de aluminio**

Los instrumentos de óxido de aluminio y sus derivados, tales como los sensores basados en cerámicos o silicio, son dispositivos que de forma indirecta infieren el valor del punto de rocío por la variación de su valor de capacidad que es afectada por la humedad ambiente. Están disponibles en una variedad de tipos, desde sistemas de bajo costo portátiles operados a batería, hasta sistemas multi-punto basados en microprocesador con la capacidad de calcular la información de la humedad en diferentes parámetros.

Un sensor de óxido de aluminio típico es un capacitor, formado por la deposición de una capa de óxido de aluminio poroso sobre un sustrato conductor que se reviste con una delgada lámina de oro. La base conductora y la lámina de oro forman los electrodos del capacitor. El vapor de agua penetra la lámina de oro y es absorbida por el óxido poroso. La cantidad de moléculas de agua absorbidas determina la impedancia eléctrica del capacitor que a su vez resulta proporcional a la presión de vapor de agua.

Los sensores de óxido son de reducido tamaño. Son apropiados para medir bajos puntos de rocío ( $-100^{\circ}\text{C}$ ) y pueden operar sobre un amplio rango que abarca las aplicaciones de alta presión. Pueden utilizarse también para medir la humedad en líquidos y, debido al bajo consumo de potencia, son apropiados para instalaciones intrínsecamente seguras y a prueba de explosiones.

Los sensores a base de óxido se usan frecuentemente en la industria petroquímica y de generación de potencia donde los puntos de rocío bajos deben monitorearse en línea con arreglos de múltiples sensores económicos.

La principal desventaja asociada con estos sensores es que son dispositivos de medición

secundaria y deben ser recalibrados frecuentemente para corregir los efectos de envejecimiento, histéresis y contaminación.

### **Higrómetro óptico de condensación**

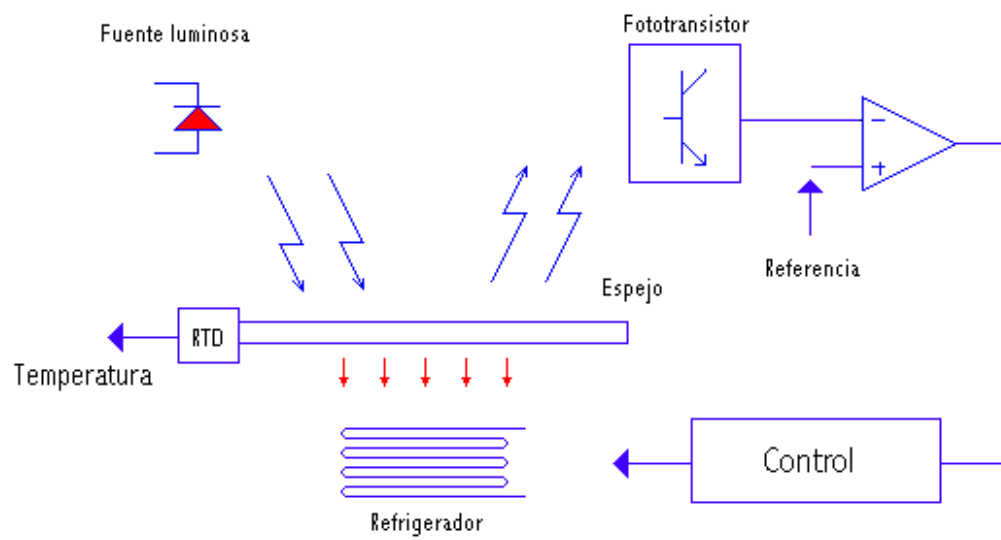
El higrómetro óptico es considerado el método más preciso para la medición del punto de rocío. Esta es una medición primaria, que mide, como su nombre indica, el punto efectivo de condensación del gas ambiente y para el que se pueden con facilidad establecer estándares internacionales de calibración. El sensor contiene un pequeño espejo metálico cuya superficie es enfriada hasta que el agua de la muestra de gas condense. El espejo es iluminado por una fuente de luz y su reflexión es detectada por un fototransistor. Cuando la condensación ocurre la luz reflejada sufre una dispersión y por lo tanto disminuye la intensidad captada por el detector. Un sistema de control se encarga de mantener la temperatura de espejo en el punto necesario para mantener una delgada capa de condensación. Un PRT embebido en el espejo mide su temperatura y por lo tanto la temperatura de punto de rocío.

Con el higrómetro óptico son posibles precisiones de  $\pm 0.2^\circ$ . Ciertos equipos especiales pueden tener un rango completo desde  $-85^\circ$  hasta casi  $100^\circ$  de punto de rocío. Los tiempos de respuesta son rápidos y la operación está relativamente libre de problemas de pérdida de calibración.

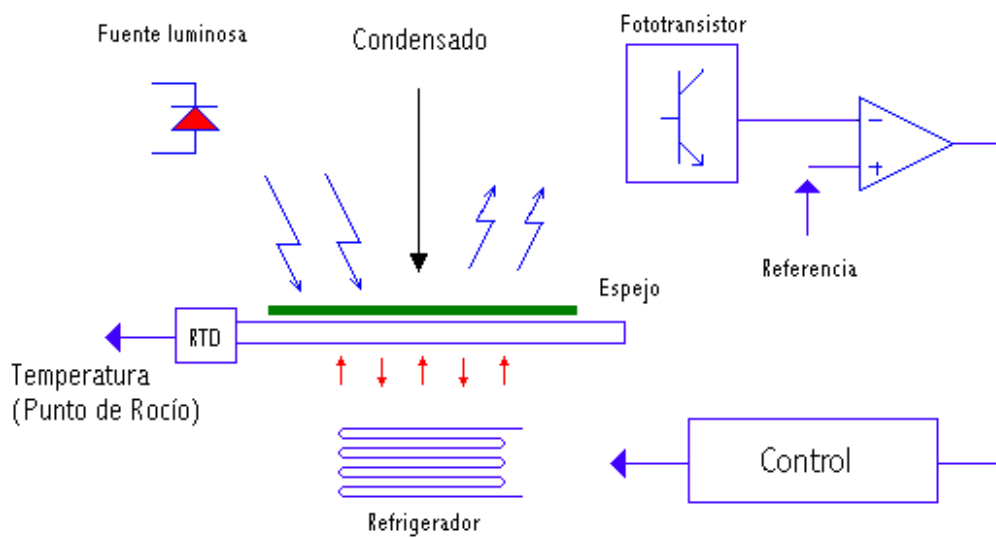
Las aplicaciones típicas de los higrómetros ópticos de condensación son:

- Líneas de aire medicinal
- Equipo electrónico refrigerado con líquido
- Computadoras refrigeradas
- Hornos de tratamiento térmico
- Hornos de fundición
- Control ambiental de recintos
- Secadores
- Estándares de calibración de humedad

Higrómetro óptico cuando empieza la medición



Higrómetro óptico cuando alcanza el punto de medición



### **Dispositivos usados para mediciones de PPM**

Para medir el vapor de agua en las regiones de bajo PPM se utilizan sensores electrólíticos, piezo-resonadores y ópticos. Cuando se hacen mediciones en este rango y utilizando el método de toma de muestras, en oposición a las técnicas de medición in-situ, ya que veces las condiciones del proceso, alta temperatura, presión, gases corrosivos etc., y/o cuando el tipo de tecnología del sensor utilizada imposibilita las mediciones in-situ, es vital asegurarse que los recintos para medición son herméticos, construidos con materiales no higroscópicos (por ejemplo acero inoxidable) y cuando se inicia la medición, se debe permitir un tiempo adecuado para que el sistema se equilibre y seque.

### **Higrómetro electrolítico**

El higrómetro electrolítico normalmente se utiliza para la medición de gases secos ya que provee una performance confiable para largos períodos en el rango de bajos valores de PPM. Los sensores electrolíticos típicamente requieren que el gas medido esté limpio y no debería reaccionar con la solución de ácido fosfórico, aunque desarrollos recientes en la tecnología de sensores de celda y los sistemas de acondicionamiento de muestras permiten aplicaciones más hostiles, como pueden ser la medición de humedad en cloruro.

Los sensores electrolíticos utilizan una celda revestida con una delgada capa de pentóxido fosforoso (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), que absorbe agua del gas bajo medición. Cuando una corriente eléctrica se aplica a los electrodos, el vapor de agua absorbido por el P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se disocia en moléculas de hidrógeno y oxígeno. La cantidad de corriente requerida para disociar el agua es proporcional a el número de moléculas de agua presentes en la muestra. Este valor junto con el caudal y la temperatura se usan para determinar la concentración de las partes por millón por volumen (PPMv) del vapor de agua. El sensor electrolítico se utiliza en aplicaciones secas de hasta un máximo de 1000 PPMv y es apropiado para el uso en procesos industriales tales como gases ultra-puros, química fina, y producción de circuitos integrados, etc. En cada uno de estos casos el éxito de estos procesos industriales depende del mantenimiento de condiciones inertes. Esto significa que un suministro continuo de nitrógeno o argón se debe usar para purgar el ambiente de producción. Así como el mantenimiento de la pureza del gas, el contenido de vapor de agua debería mantenerse muy bajo ya que estas son las condiciones para las que el higrómetro electrolítico trabaja apropiadamente.

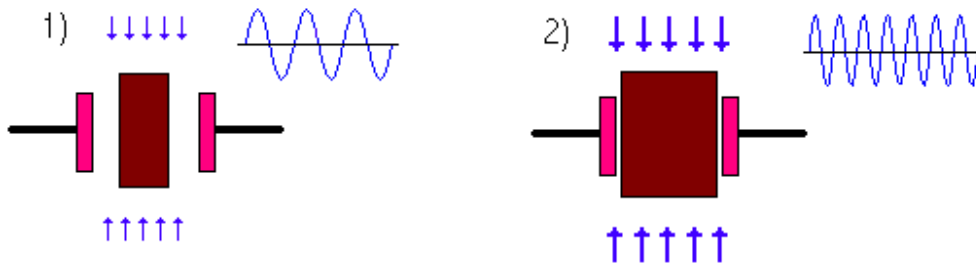
Aplicaciones típicas de este sensor:

- Generadores de ozono
- Líneas de aire seco
- Sistemas de transferencia de nitrógeno
- Soldadura con gas inerte

En resumen, el higrómetro electrolítico suministra una medición primaria y confiable a bajos niveles de humedad, pero la precisión del dispositivo depende del mantenimiento del un flujo de muestras controlado. Las aplicaciones deben seleccionarse cuidadosamente ya que ciertos gases podrían corroer y/o contaminar el sensor.

### Sensor Piezo-resonante

El sensor piezo-resonante opera con el principio de equilibrio de RH donde la absorción de agua incrementa la masa de cristal lo que afecta directamente su frecuencia de resonancia. El sensor tiene un revestimiento sensible a la humedad ubicado sobre la superficie del cristal resonante. La frecuencia de resonancia del cristal cambia a medida que el revestimiento sensitivo a la humedad absorba o elimine vapor de agua en respuesta a los cambios en los niveles de humedad ambiente. Esta frecuencia de resonancia es comparada con mediciones similares en el gas seco o a la frecuencia de referencia a la que ha sido calibrado.



### Higrómetro óptico por condensación con capacidad máxima de enfriamiento

Como se dijo previamente en la sección sobre la medición del punto de rocío/escarcha, un higrómetro óptico de condensación con múltiples niveles de enfriamiento, suplementado en algunos casos con enfriamiento adicional por aire o glicol/agua, puede alcanzar mediciones del punto de rocío a niveles menores de  $-85^{\circ}$ , lo que implica contenidos de agua de 0.25 PPMv a 1 atmósfera de presión.