
Introducción a los sensores

PID_00257321

Ferran Domínguez Gros
Jordi Solé Casals

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 6 horas



Ferran Domínguez Gros

Ingeniero técnico en Telecomunicaciones (Universitat Politècnica de Catalunya). Colaborador de la UOC desde el 2003 en los Estudios de Ingeniería Informática, ETTT, grado de Telecomunicación, posgrado y máster de Seguridad informática. Trabaja desde hace tiempo en diferentes empresas privadas del sector de las telecomunicaciones, informático y sanitario en diferentes proyectos de las TIC.

Jordi Solé Casals

Doctor ingeniero de Telecomunicaciones (Universitat Politècnica de Catalunya). Licenciado en Humanidades (Universitat Oberta de Catalunya). Colaborador de la UOC desde el 2001 en los Estudios de Ingeniería Informática, ETTT, grado de Telecomunicación. Actualmente es profesor titular en el Departamento de Tecnologías Digitales y de la Información de la Universidad de Vic. Su ámbito de investigación se centra en el procesamiento de señales biomédicas.

Tercera edición: febrero 2019
© Ferran Domínguez Gros, Jordi Solé Casals
Todos los derechos reservados
© de esta edición, FUOC, 2019
Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona
Diseño: Manel Andreu
Realización editorial: Oberta UOC Publishing, SL

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción | 5 |
| Objetivos | 7 |
| 1. Sensores de temperatura | 9 |
| 1.1. Resistencias metálicas (RTD) | 10 |
| 1.1.1. Modelo matemático | 11 |
| 1.1.2. Metales más utilizados en la construcción de RTD | 11 |
| 1.1.3. Diferentes aspectos de los RTD | 14 |
| 1.1.4. Aplicaciones de los RTD | 17 |
| 1.1.5. Acondicionamiento de la señal para los RTD | 17 |
| 1.2. El termopar | 22 |
| 1.2.1. Tipos de termopares | 25 |
| 1.2.2. Tipos de unión de los metales que conforman los termopares | 27 |
| 1.2.3. Acondicionamiento de la señal por los termopares | 28 |
| 1.3. El termistor (NTC) | 29 |
| 1.3.1. Modelo matemático: exponencial | 31 |
| 1.3.2. Relación temperatura-resistencia en los NTC | 31 |
| 1.3.3. Algunos modelos comerciales de termistores NTC | 32 |
| 1.4. Sensores de silicio | 33 |
| 1.5. Comparativa y cuadro resumen de los diferentes sensores de temperatura | 37 |
| 1.6. Sensores de radiación | 38 |
| 2. Sensores de distancia | 43 |
| 2.1. Medida de la posición lineal | 43 |
| 2.1.1. Medidas de la distancia sin contacto físico | 44 |
| 2.1.2. Medidas de la distancia con contacto físico | 46 |
| 2.2. Medida de la posición angular | 53 |
| 2.2.1. Potenciómetros | 54 |
| 2.2.2. Sensores electromagnéticos rotativos de posición angular | 56 |
| 2.2.3. Sensores inductivos | 58 |
| 2.2.4. Codificadores de pulsos | 60 |
| Resumen | 64 |
| Ejercicios de autoevaluación | 65 |
| Solucionario | 67 |

| | |
|---------------------------|----|
| Glosario | 71 |
| Bibliografía | 73 |

Introducción

Un paciente ingresa en un hospital y le tienen que practicar una exploración cardíaca. Un centro de proceso de datos requiere la medida correcta y constante de la temperatura y la humedad ambiental para el correcto funcionamiento de su hardware. Un supermercado quiere utilizar un sistema fácil de cobro de los productos que vende a sus clientes mediante, por ejemplo, un lector de código de barras asociado a cada producto. La DGC (Dirección General de Carreteras) quiere controlar la velocidad a la que circulan los coches por una autovía. Una determinada industria quiere medir el flujo de fluido que pasa por un punto concreto en un momento determinado.

Estos son solo unos pocos ejemplos de una lista infinita de casos o circunstancias en las que pretendemos detectar y medir variables concretas.

Así pues, en nuestra vida cotidiana y en muchos ámbitos profesionales, de la industria y en una amplia variedad de negocios, se hace necesaria la medida de variables mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas, biológicas, químicas, etc.

Los sensores son los elementos que permiten obtener las variaciones de estas señales físicas y convertirlas en otras señales, traduciéndolas en magnitudes con características específicas. Esta traducción nos permite interpretar y manipular las variaciones de estas variables físicas.

Establecer un criterio para la asignación de un tipo de sensor concreto y apropiado para cada tipo de variable física podría desbordar el alcance mismo de estos materiales didácticos. De hecho, si hacemos una clasificación orientada no al tipo de sensor, sino al tipo de variable, podríamos hablar de:

- Medida de la temperatura.
- Medida de la distancia (posición).
- Medida de la presencia y proximidad.
- Medida de la velocidad.
- Medida de la aceleración y la vibración.
- Medida de la fuerza y el peso.
- Medida de la presión.
- Medida del nivel.
- Medida del capital.

En esta clasificación podríamos añadir más variables físicas para medir, pero nos centraremos en concreto en las dos primeras: **temperatura** y **distancia**.

En este punto matizaremos la medida de las variables de presencia y proximidad, en las que los sensores utilizados tienen la función de detectar la existencia de un objeto dentro de su radio de acción. A pesar de que a veces se hace muy difícil establecer cuándo se trata de una variable de proximidad o de una variable de presencia, el concepto de un sensor que mida la presencia siempre va referido a un campo de acción relativamente grande, mientras que el de proximidad siempre tiene un radio de acción más limitado.

La medida de la **distancia** va referida en realidad a la **posición** de un objeto concreto, y suele ser un caso muy habitual dentro de la instrumentación industrial actual.

Objetivos

Los objetivos que debéis alcanzar con este módulo didáctico son los siguientes:

- 1.** Conocer los diferentes tipos de sensores para detectar y medir las variables de temperatura y distancia.
- 2.** Entender la base de funcionamiento de estos sensores.
- 3.** Conocer sus posibles aplicaciones en situaciones reales.
- 4.** Saber interpretar sus principales características dadas por los fabricantes, para tener criterio a la hora de elegir uno de acuerdo con nuestras necesidades.

1. Sensores de temperatura

La medida de la temperatura tiene una importancia fundamental en numerosos procesos industriales, tecnológicos, sanitarios y, también, domésticos, por determinar solo unos pocos. De este modo, de todos los sensores que se pueden encontrar en el mercado los sensores de temperatura son, sin duda, de los más importantes.

En general, se hace indispensable disponer de una medida de la temperatura precisa. La obtención de unos valores incorrectos puede tener consecuencias graves, como por ejemplo la reducción de la vida útil de un equipamiento si sufre un sobrecalentamiento de algunos grados.

Es evidente que gracias a la evolución de la tecnología y su integración, las prestaciones de los sensores de temperatura también han mejorado. Si bien hace unos años los sensores de temperatura únicamente nos servían para medir una temperatura concreta –por ejemplo, la de un habitáculo–, actualmente no solo podemos tener la certeza de la temperatura exacta sino también de la temperatura que tendremos en función del sistema de ambientación/climatización que se utilice, así como de la que tendríamos en proporción a la medida de la habitación que se esté revisando.

La elección del sensor más adecuado para cada aplicación no resulta siempre evidente. Entre los sensores de temperatura más habituales, podemos enumerar los siguientes.

- Resistencias metálicas (RTD¹).
- Termopar.
- Termistor (NTC²).
- Sensores de silicio.
- Sensores de radiación.

En realidad, y en función de las aplicaciones concretas en las que queramos utilizarlos, podemos agruparlos en tres grupos de alternativas posibles:

- Decidir entre resistencias metálicas o termopares.
- Decidir entre termistores y sensores de silicio.
- Decidirnos por los sensores de radiación.

Instrumentación industrial

Es el grupo de elementos que sirven para medir, convertir, transmitir, controlar o registrar variables de un proceso para optimizar los recursos utilizados en el mismo.

⁽¹⁾Del inglés *resistance temperature detector*.

⁽²⁾Del inglés *negative temperature coefficient*.

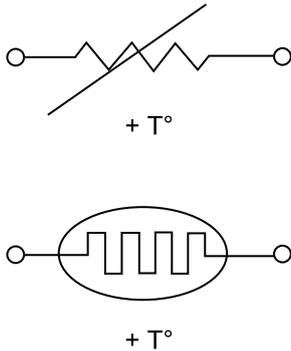
Inclinarnos por una alternativa u otra es una cuestión para la que necesitamos tener algo más de criterio.

Vamos a ver, una por una, sus características principales.

1.1. Resistencias metálicas (RTD)

Los símbolos normalmente utilizados para los RTD se muestran en la figura 1.

Figura 1. Símbolos de un RTD



Los metales se caracterizan por tener coeficientes térmicos positivos de variación de la resistencia eléctrica. Cuando aumenta su energía interna, se incrementa su resistividad.

Esta propiedad de los metales se utiliza desde hace tiempo en el diseño y la construcción de sensores de temperatura de resistencia metálica o RTD.

Recordemos que la resistencia eléctrica R de un conductor metálico viene dada por la ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad 4.1$$

Donde ρ es su resistividad, l la longitud del conductor y S su sección. En equilibrio térmico, este conductor metálico presentará una resistencia R_{T1} proporcional a la temperatura T_1 del medio, con lo cual prácticamente no se producirá un intercambio de energía (el hilo metálico tendrá, en realidad, la misma temperatura que el medio).

Equilibrio térmico

Representa la situación en la que la temperatura dentro de un sistema es uniforme.

Si la temperatura del medio aumenta a T_2 , la resistividad, la longitud y la sección del conductor también cambiarán por el efecto de la dilatación del metal. Si consideramos mínimos los cambios que sufrirán esta sección y la longitud del hilo metálico por efecto de la dilatación en comparación con los cambios de resistividad con el aumento de la temperatura, vemos que la resistencia también cambiará linealmente con su resistividad. Por lo tanto, observamos

que un incremento de la temperatura del medio produce también un incremento lineal en la resistencia del conductor metálico. Este efecto sobre los metales es el que se aprovecha en la construcción de RTD.

1.1.1. Modelo matemático

Como hemos visto, el fundamento de los RTD es la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. En un conductor, el número de electrones disponibles para la conducción eléctrica no cambia de manera apreciable con la temperatura. No obstante, si la temperatura aumenta, las vibraciones de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio también se incrementan, lo que dispersa de manera más eficaz los electrones y reduce su velocidad media. Este hecho implica un coeficiente térmico positivo, es decir, un aumento de la resistencia con la temperatura (R_T). Esta dependencia se puede expresar como:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \Delta T^3 + \dots) \quad 4.2$$

Donde:

R_0 es la resistencia del RTD a la temperatura de referencia (T_0), es decir, para $T = T_0 = 273 \text{ K} = 0 \text{ °C}$.

ΔT es la variación de temperatura respecto a la referencia ($T - T_0$) y por lo tanto, si la referencia es $T_0 = 273 \text{ K} = 0 \text{ °C}$, entonces ΔT será la temperatura T expresada en °C.

α , β , γ , etc. son los coeficientes del modelo de RTD utilizado para los términos lineal, cuadrático, cúbico, etc. Hay que tener en cuenta que las unidades de estos coeficientes dependerán de si trabajamos con °C o K para la temperatura.

Generalmente, los valores de β y γ son muy pequeños (del orden de 10^4 y 10^9 veces menos respectivamente, comparándolos con el valor de α para el caso del platino) y, por lo tanto, podemos aproximar la fórmula como:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \Delta T) \quad 4.3$$

1.1.2. Metales más utilizados en la construcción de RTD

Los metales más utilizados normalmente para la construcción de RTD son el platino (Pt), el níquel (Ni) y el cobre (Cu).

El platino es el que presenta el coeficiente térmico más bajo, mientras que el níquel es el que lo tiene más alto. Esto quiere decir que los RTD de níquel presentarán una mayor sensibilidad que los de platino. Esta mayor sensibilidad del RTD de níquel se traduce en el hecho de que ante un cambio en su temperatura, se producirá también una mayor variación en su resistencia.

Por el contrario, el platino tiene una mayor resistividad que facilita la construcción de hilos conductores mucho más finos, no demasiado largos y con una buena resistencia. El níquel no experimenta una linealidad tan buena si se aumentan sus dimensiones.

Este diferente comportamiento en la linealidad de la resistencia en función de la temperatura hace que no todos los metales puedan ser utilizados en la construcción de RTD.

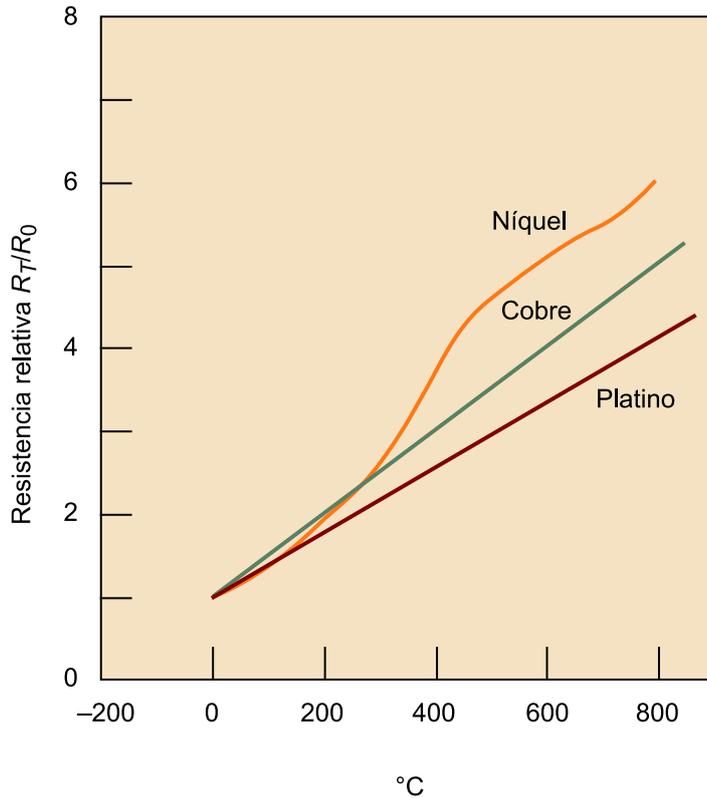
En la tabla 1 se presentan los metales más utilizados para la construcción de RTD –el platino (Pt), el níquel (Ni) y el cobre (Cu)–, con sus coeficientes térmicos (α , variación de la resistencia a temperatura ambiente) y sus resistividades (ρ).

Tabla 1. Metales más utilizados para la construcción de RTD

| Metales | Resistividad (ρ) $\Omega\cdot\text{m}$ | Coefficiente térmico (α) K^{-1} |
|--------------|---|---|
| Platino (Pt) | $10,6 \times 10^{-8}$ | $3,9 \times 10^{-3}$ |
| Níquel (Ni) | $6,84 \times 10^{-8}$ | 7×10^{-3} |
| Cobre (Cu) | $1,68 \times 10^{-8}$ | $4,3 \times 10^{-3}$ |

A partir de los valores de la resistencia de cada uno de los metales en función de la temperatura, los fabricantes de RTD elaboran las respectivas **curvas de calibración** (figura 2).

Figura 2. Curvas de calibración del platino, el níquel y el cobre



Nota: tened presente que las 3 curvas tienen que pasar por 1 a 0 $^{\circ}\text{C}$.

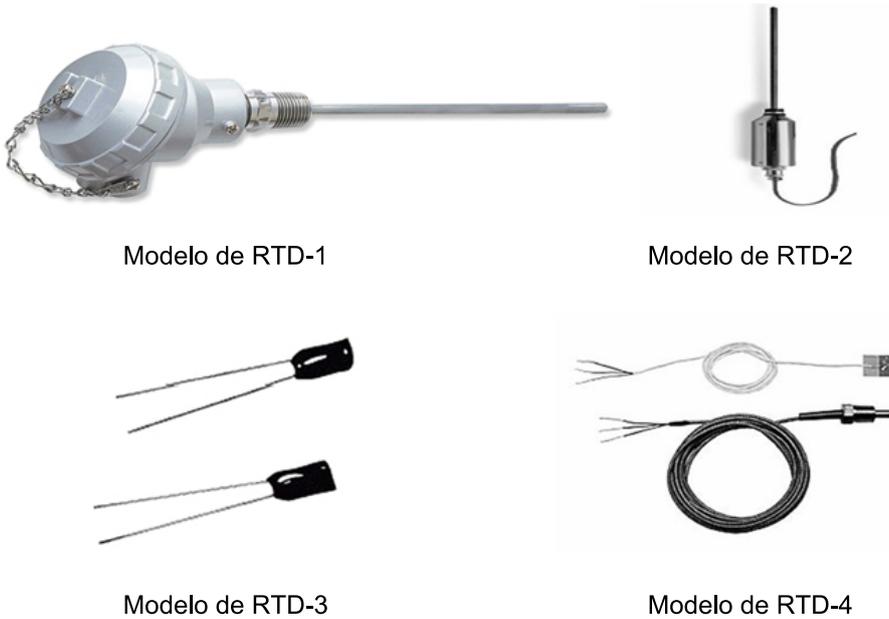
En estas curvas de calibración, observamos que los RTD que tienen una mayor linealidad son los de platino y los de cobre, motivo por el cual los fabricantes acostumbran a utilizarlos para la gran mayoría de las aplicaciones. No obstante, seguimos notando que el RTD de níquel es más sensible que el de cobre y bastante más que el de platino.

En general, las resistencias metálicas son un tipo de sensores muy utilizados actualmente, tanto en aplicaciones industriales como en el ámbito doméstico, generalmente en climatizadores de gran precisión. Esta gran aceptación se debe, principalmente, a tres características:

- Gran estabilidad en el tiempo.
- Muy buena precisión.
- Respuesta rápida.

Además, encontramos una gran variedad de encapsulados para los RTD. En la figura 3, tenemos algunos ejemplos comerciales con diferentes tipos de estos encapsulados.

Figura 3. Diferentes ejemplos de encapsulados de RTD comerciales



1.1.3. Diferentes aspectos de los RTD

A continuación, veremos un conjunto de características que nos permitirán clasificar los RTD. Consideraremos las siguientes.

- Tipo de metal.
- Su forma o encapsulado.
- Características del medio.
- Su medida.
- El valor resistivo R_0 .
- La tolerancia.

1) Teniendo en cuenta el **tipo de metal** que utilizan los fabricantes para su elaboración, los RTD más populares son los de platino, gracias a su linealidad y su estabilidad en el tiempo. Utilizado por diferentes aplicaciones y en contacto directo con el medio, el RTD de platino presenta muy baja reactividad y, por lo tanto, una baja deformación en un amplio abanico de temperaturas.

Como se ha visto, también se fabrican con cobre para aplicaciones a bajas temperaturas y cuando la precisión no es un aspecto indispensable de la aplicación. El wolframio, del que no hemos hablado hasta ahora, también es un metal utilizado cuando el RTD tiene que trabajar con temperaturas altas y con baja precisión.

Para mejorar la poca linealidad del níquel, también se utiliza una aleación con hierro (70% de níquel y 30% de hierro) que proporciona un RTD utilizado para aplicaciones de bajo coste y sensible a bajas temperaturas.

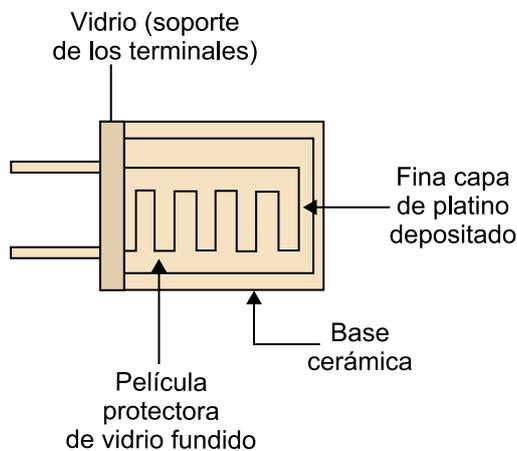
2) Considerando su **forma o encapsulado**, en realidad los RTD pueden ser de dos tipos:

- Película metálica.
- Bobinados.

Los de película metálica consisten en una fina película de platino sobre una base cerámica (material aislante eléctrico y buen conductor del calor) y recubierta por una película de vidrio fuera a modo de protección.

En la figura 4, podemos ver un esquema del RTD de película metálica.

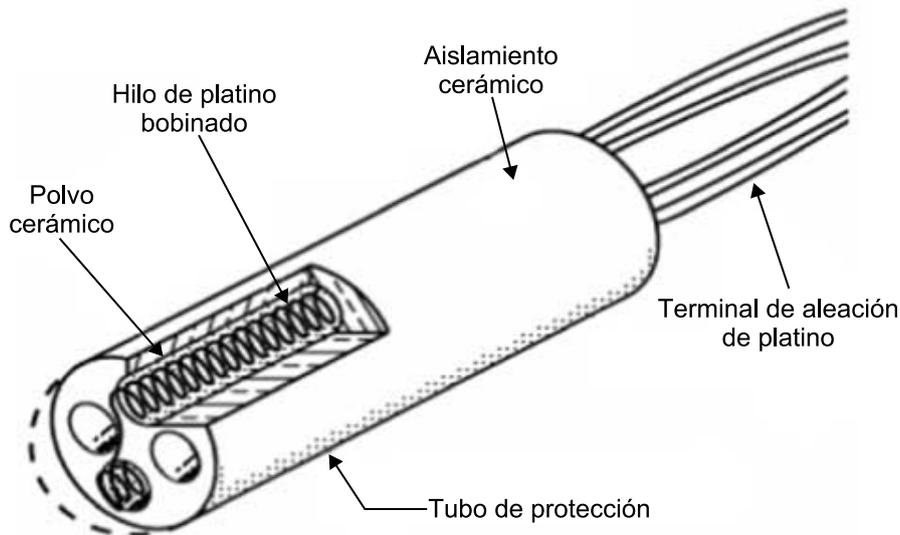
Figura 4. Esquema de RTD de película metálica



Los bobinados disponen el hilo conductor bobinado sobre un elemento cerámico que permite la dilatación de este hilo con el cambio de temperatura. Encontramos una variación de este tipo de RTD, los denominados RTD de bobina suspendida, en los que el bobinado del hilo metálico tiene forma helicoidal dentro de tubos de cerámica llenos de polvo cerámico y sellados con vidrio en sus extremos.

Podemos ver un esquema de RTD de bobina suspendida en la figura 5:

Figura 5. Esquema de RTD de bobina suspendida



3) Teniendo en cuenta las características del **medio**, diferenciamos los de contacto superficial y los de inmersión en el fluido, ya se trate de líquidos o de gases. Los de contacto superficial normalmente son de película metálica con una base plana o flexible para adaptarse a la superficie con la que hará contacto. Los de inmersión en el fluido suelen ser bobinados y están protegidos con un tubo de acero inoxidable.

4) Teniendo en cuenta la **medida** del RTD, podemos encontrar sensores diminutos si la aplicación que lo utiliza pretende medir un punto concreto del medio. Si, por el contrario, se trata de obtener la temperatura promedio de toda un área, la medida del RTD puede ser de varios centímetros.

5) Considerando el **valor resistivo** R_0 a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, vemos en la tabla 2 un cuadro de RTD con los metales de fabricación más utilizados y su margen útil de temperatura. En la columna de los valores resistivos R_0 a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, encontramos los valores comerciales más utilizados para cada tipo de metal.

Tabla 2. Metales más utilizados para RTD, con valor de R_0 y márgenes de temperatura

| Metal | Valores R_0 (Ω) | Margen útil de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) |
|----------------------------|----------------------------------|---|
| Platino | 25, 100, 400, 500, 1.000 y 2.000 | $-260 \div 900$ |
| Wolframio | 10, 50, 100, 1.000 y 2.000 | $-100 \div 1200$ |
| Níquel | 120, 1.000 | $-200 \div 430$ |
| Cobre | 10, 100 y 1.000 | $-200 \div 260$ |
| Aleación (Ni 70% y Fe 30%) | 100, 1.000 y 2.000 | $-100 \div 230$ |

6) Por último, también podemos clasificar los RTD en función de su **tolerancia**. Recordemos que a menor tolerancia, tendremos una mayor precisión en este tipo de sensor de temperatura.

Por ejemplo, la norma UNE-EN60751 matiza dos tipos de tolerancias para los RTD de platino, PT100:

- Clase A para aplicaciones de alta precisión: $\pm 0,15 \text{ }^\circ\text{C} / \pm 0,06 \ \Omega \ (0 \text{ }^\circ\text{C})$.
- Clase B para aplicaciones estándar: $\pm 0,30 \text{ }^\circ\text{C} / \pm 0,12 \ \Omega \ (0 \text{ }^\circ\text{C})$.

También encontramos las de clase C y D, para aplicaciones de menor precisión.

Resumiendo, podemos concluir que aunque el **platino** se considere un metal precioso y de alto coste, gracias a su alto margen de estabilidad, linealidad y margen de trabajo los **RTD fabricados con este metal son los más ampliamente utilizados**.

1.1.4. Aplicaciones de los RTD

Como hemos podido ver, gracias a su gran estabilidad a lo largo del tiempo, su gran precisión (del orden de $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ en ámbitos industriales y $\pm 0,0001 \text{ }^\circ\text{C}$ para aplicaciones especiales de laboratorio), su gran variedad de encapsulados y su capacidad para permanecer inertes en aquellos casos en los que deben interactuar con el medio y dar una respuesta rápida, los RTD son los sensores de temperatura más utilizados en la actualidad, en aplicaciones industriales (controladores de equipos de frío y calor), domésticas (hornos de cocina, climatizadores), en los automóviles, etc.

1.1.5. Acondicionamiento de la señal para los RTD

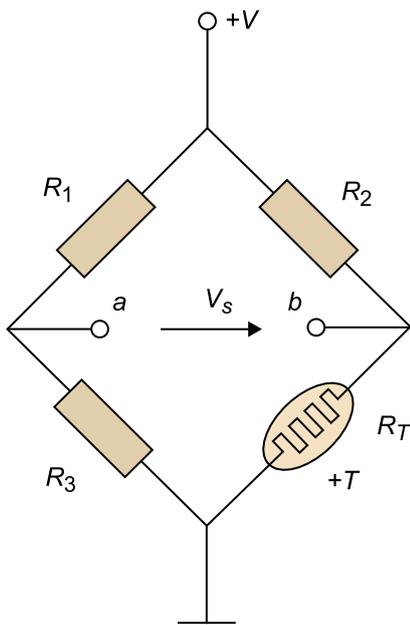
Como hemos visto, los RTD son sensores de temperatura que incrementan su resistencia con la temperatura. Medir esta temperatura implica, por lo tanto, medir la resistencia del RTD y, mediante su curva de calibración, evaluarla. Sin embargo, este método no ofrece una señal eléctrica proporcional a la temperatura que queremos medir.

Si hacemos circular una corriente I conocida por el RTD y medimos su diferencia de potencial, esta tensión será directamente proporcional a la temperatura. Para conseguir una tensión que sea proporcional a las temperaturas objeto de las medidas que hay que evaluar, se utilizan los circuitos acondicionadores.

El circuito acondicionador por excelencia de los sensores RTD, y el más utilizado, es el puente de Wheatstone alimentado por fuentes de tensión y/o corriente.

Analicemos el circuito acondicionador del sensor RTD (figura 6), el puente de Wheatstone, con el modelo lineal de este sensor: $R_T = R_0(1 + \alpha \Delta T)$.

Figura 6. Puento de Wheatstone como circuito acondicionador de un RTD



Se puede verificar que la tensión de salida V_s será:

$$V_s = V_b - V_a = V \cdot \frac{R_0(1 + \alpha\Delta T)}{R_0(1 + \alpha\Delta T) + R_2} - V \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad 4.4$$

Si consideramos la temperatura $T = 273, K = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ y $V_s = 0 \text{ V}$, entonces V_s coincidirá con el valor de la temperatura que queremos medir, por lo que en el puente se cumplirá:

$$\frac{R_0}{R_0 + R_2} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad 4.5$$

Una manera habitual de mantener una buena simetría en el puente, si las variaciones de R_T son pequeñas, consiste en utilizar resistencias iguales en las ramas superiores y con un valor r veces superior al de la resistencia R_0 del sensor RTD:

$$R_1 = R_2 = rR_0 \quad 4.6$$

Y seleccionar $R_3 = R_0$. Haciendo estas sustituciones en la ecuación 4, obtenemos:

$$V_s = V \frac{r\alpha\Delta T}{(r+1) \cdot (r+1 + \alpha\Delta T)} \quad 4.7$$

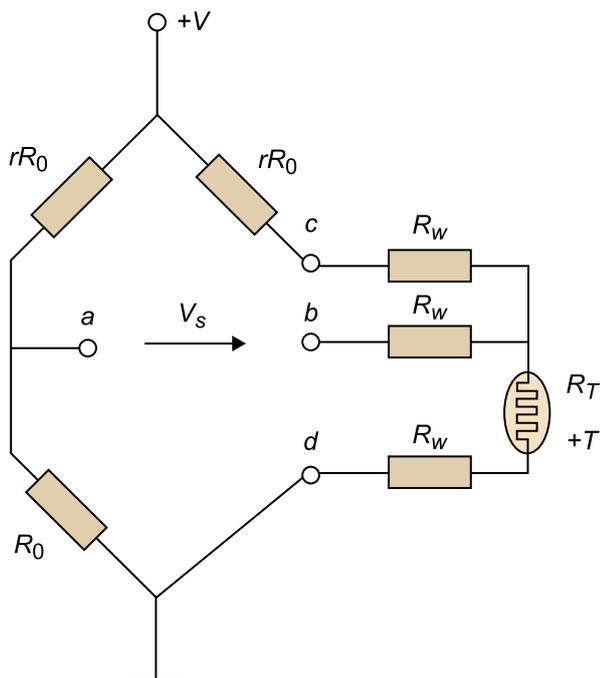
Es bastante habitual que estos sensores RTD no puedan estar físicamente ubicados donde tenemos el puente de Wheatstone. Para llevar a cabo esta conexión, se utilizan cables conductores de cierta longitud pero de resistencia R_w , muchas veces significativa en comparación con la propia resistencia del sensor R_T (figura 6).

Cuando se utilizan cables conductores hechos de aleaciones especiales como la manganina o el constantán, con un insignificante coeficiente térmico de variación con la temperatura, evitamos los errores en la medida provocados por el cambio de temperatura en los hilos. Las resistencias, por el contrario, acostumbran a ser altas.

Si por el contrario se utilizan cables conductores de cobre de muy baja resistencia, tendremos un alto coeficiente térmico que introducirá errores significativos en la medida.

Esta conexión remota del RTD al puente de Wheatstone se denomina **método Siemens** o **conexión a tres hilos** (figura 7).

Figura 7. Conexión remota de un RTD



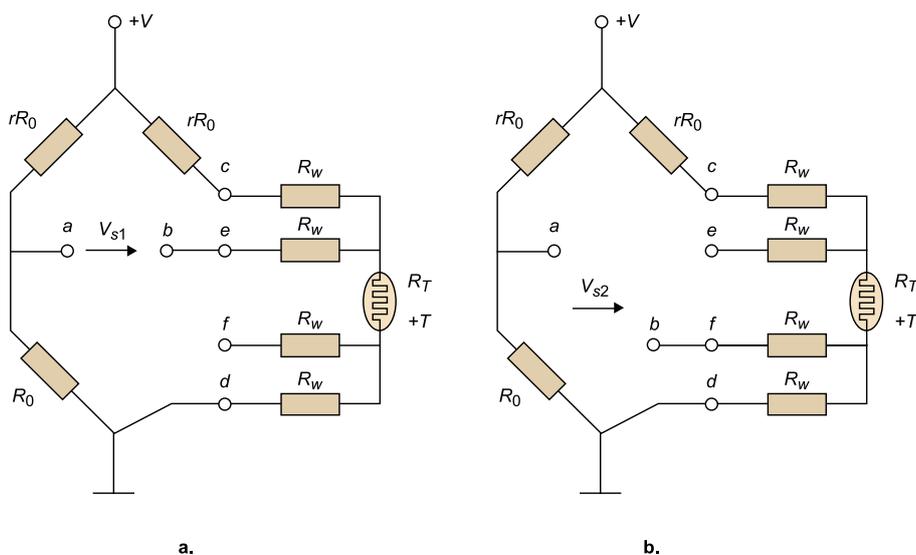
Si los hilos conectados al puente en los puntos c y d son iguales en longitud, sección y tipo de material utilizado, sus resistencias R_w son iguales. Si consideramos que la resistencia de la rama inferior es $R_w + R_T$ y que la resistencia de la rama superior es $R_w + rR_0$, la expresión que obtenemos en este caso del anterior 4.7 es la siguiente:

$$V_s = V \frac{r\alpha\Delta T + (r-1)\frac{R_W}{R_0}}{(r+1)\left(r+1+\alpha\Delta T+2\frac{R_W}{R_0}\right)} \quad 4.8$$

No obstante, para aquellos casos en los que se hace necesaria una medida de más alta precisión, se utiliza la denominada **conexión a cuatro hilos** (figura 8). Este tipo de conexión se utiliza para reducir los errores que introducen las resistencias de los cables conductores.

Vemos a continuación un ejemplo de este nuevo puente de Wheatstone a cuatro hilos en la figura 8, en la que se lleva a cabo una primera medida en los extremos de conexión del puente. A continuación, se efectúa una segunda medida cambiando de posición los extremos de conexión, según la figura 8b. La resta de estas dos medidas (V_{S1} y V_{S2}) elimina la dependencia en R_W (la que va del nodo d al RTD) en el numerador, haciendo que solo dependa de la suma de las R_W (las que van del nodo c y el nodo d al RTD). En este caso, y a diferencia que con el método Siemens, las diferencias que pueda haber entre hilos conductores no afectarán la medida.

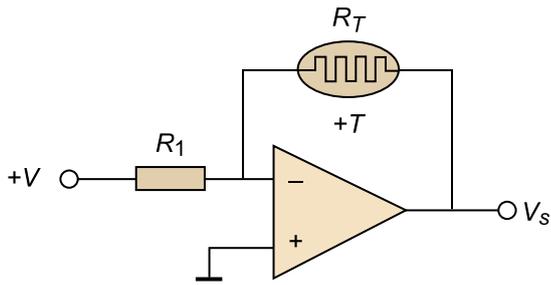
Figura 8. Puente de Wheatstone a cuatro hilos



Aparte de los circuitos acondicionadores de sensores RTD para puente de Wheatstone alimentado por tensión o alimentado por corriente, encontramos otros también bastante utilizados y diseñados con amplificadores operacionales. En este caso, el amplificador operacional se puede combinar de manera constructiva con el RTD en varias combinaciones para obtener diferentes circuitos. El objetivo de todos estos es compensar las interferencias y linealizar su respuesta.

Veamos a continuación unos ejemplos: un amplificador inversor (figura 9), un amplificador diferencial (figura 10) o un inversor con RTD en el bucle de realimentación (figura 11).

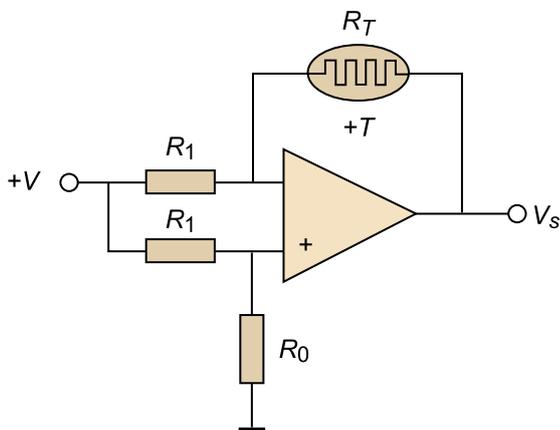
Figura 9. Amplificador inversor con RTD



En la figura 9 se muestra un amplificador inversor con RTD, en el que recordamos que $R_T = R_0(1 + \alpha \Delta T)$. La tensión de salida V_s tiene el valor:

$$V_s = -\frac{VR_0}{R_1} \cdot (1 + \alpha \Delta T) \quad 4.9$$

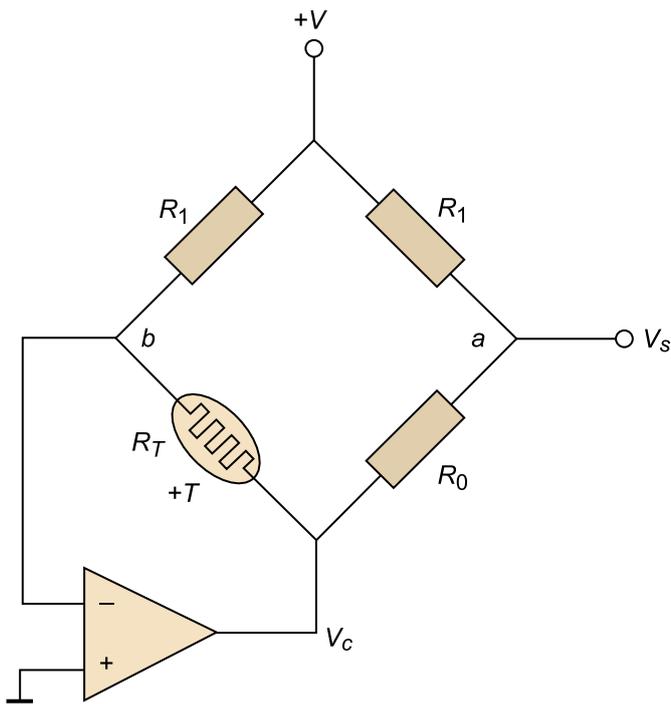
Figura 10. Amplificador diferencial con RTD



En la figura 10, se presenta un amplificador diferencial con RTD [$R_T = R_0(1 + \alpha \Delta T)$] en el que la tensión de salida V_s tiene el valor:

$$V_s = -\frac{VR_0}{R_1 + R_0} \cdot \alpha \Delta T \quad 4.10$$

Figura 11. Amplificador inversor con RTD en el bucle de realimentación



Por último, en la figura 11 se muestra un inversor con RTD [$R_T = R_0 (1 + \alpha\Delta T)$] en el bucle de realimentación, y en el que la tensión V_c y la tensión de salida V_s tienen los valores según las ecuaciones 4.11 y 4.12, de manera respectiva.

$$V_s = -\frac{VR_0}{R_1 + R_0} \cdot \alpha\Delta T \quad 4.11$$

$$V_c = -\frac{VR_0}{R_1} \cdot (1 + \alpha\Delta T) \quad 4.12$$

1.2. El termopar

El termopar es un sensor de temperatura constituido por dos metales diferentes y que tiene como característica principal el hecho de que produce una tensión proporcional a la diferencia de temperaturas entre los puntos de unión de los dos metales.

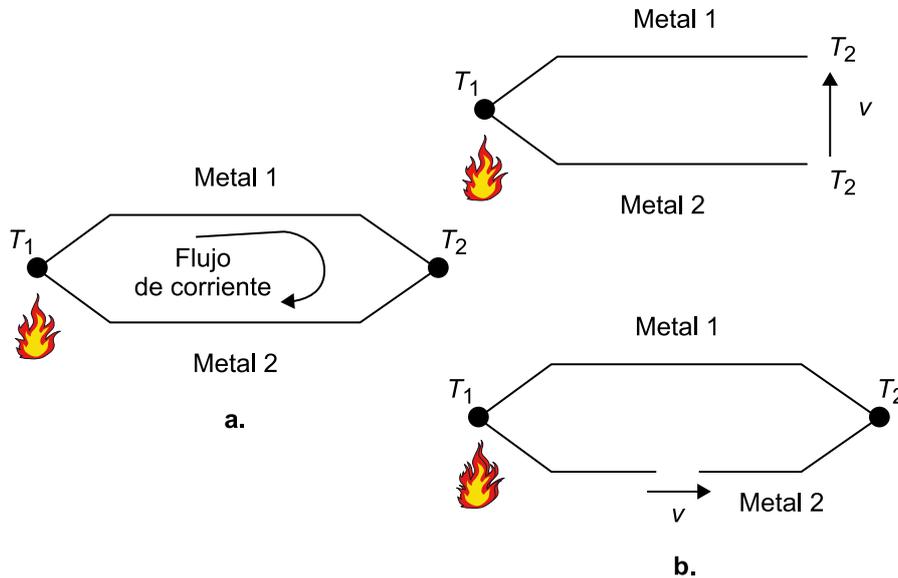
En el principio de funcionamiento del termopar están implicados tres fenómenos:

- El efecto Seebeck.
- El efecto Peltier.
- El efecto Thomson.

1) El primero fue descubierto por Thomas Johan Seebeck en 1821. Seebeck observó que si tenía un circuito cerrado formado por dos metales diferentes (termopar) y cada una de las uniones se encontraba a una temperatura distinta

(T_1 y T_2), se generaba una fuerza electromotriz que implicaba una circulación de corriente que se mantenía mientras las temperaturas de las uniones fueran diferentes (figura 12).

Figura 12. Funcionamiento esquemático del efecto Seebeck



a. Al calentar una de las dos uniones del termopar, la de temperatura T_1 , tendremos una diferencia de temperatura respecto a la unión con la temperatura T_2 , de modo que se producirá una circulación de corriente eléctrica proporcional a esta diferencia de temperaturas. b. Si abrimos el circuito del termopar, se observa una diferencia de tensión entre los dos terminales.

El efecto Seebeck se resume en la ecuación siguiente:

$$S_{ab} = - \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad 4.13$$

Donde ΔV es la diferencia de tensión entre los terminales (izquierda menos derecha) y ΔT es la diferencia de temperatura entre los mismos terminales. S_{ab} es el coeficiente Seebeck, también denominado **poder termoeléctrico**, y se mide en VK^{-1} (o en μVK^{-1} , dado el valor de los materiales más habituales utilizados).

2) El segundo efecto fue descubierto por Jean C. A. Peltier en 1834. Peltier descubrió un fenómeno inverso en este mismo circuito. Si se hace circular una corriente eléctrica por este circuito cerrado, una de las uniones se calienta y la otra se enfría.

Al invertir el sentido de circulación de la corriente, la unión que antes se calentaba ahora se enfría, y a la inversa. Esto supone una absorción de calor en una de las uniones y una disipación de calor en la otra.

El efecto Peltier se resume en la ecuación siguiente, en la que Π_{ab} es el denominado coeficiente Peltier:

$$\Pi_{ab} = \frac{Q}{I} \quad 4.14$$

I es la corriente eléctrica que circula por el circuito y Q , la cantidad de calor absorbido en la unión.

3) El tercer efecto fue descubierto por William Thomson Kelvin en 1854. Thomson observó que cuando hacía circular una corriente constante a través de un conductor, en el que uno de los dos extremos se mantenía a distinta temperatura que el otro, se producía una transferencia de calor proporcional, en gran medida, al producto de la corriente por el gradiente de temperatura. Al invertir el sentido de circulación de la corriente, también se invierte el sentido de la transferencia de calor. Notemos que este efecto es diferente al efecto Joule, que no admite esta inversión.

A diferencia de los dos anteriores efectos, el coeficiente Thomson puede definirse directamente por un único material mediante la ecuación:

$$\frac{dQ}{dx} = I \cdot \frac{dT}{dx} \zeta \quad 4.15$$

Donde $dQ(x)/dx$ es el gradiente de flujo térmico, $dT(x)/dx$ es el gradiente de temperatura, x es la coordenada espacial y ζ es el coeficiente Thomson del material.

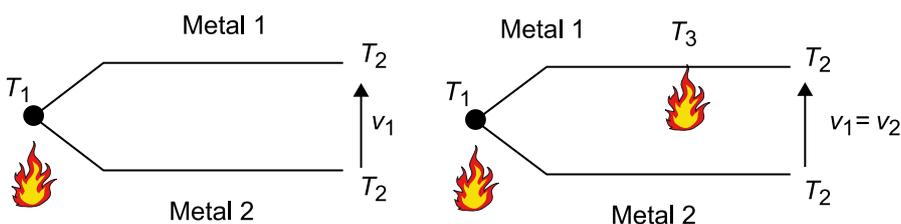
Del estudio experimental de los termopares se dedujeron tres leyes, denominadas leyes termoeléctricas.

Estas tres leyes son las siguientes:

- Ley de los circuitos homogéneos.
- Ley de los metales intermedios.
- Ley de las temperaturas intermedias.

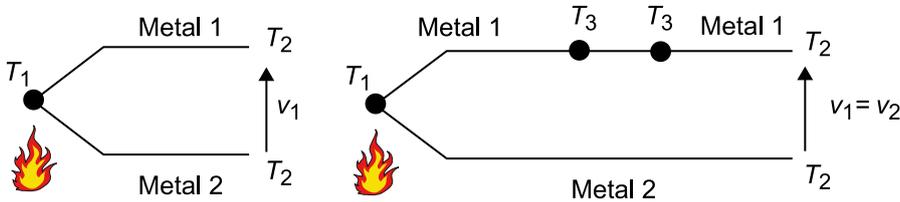
a) La **ley de los circuitos homogéneos** formula que la tensión generada por un termopar cuyas dos uniones se encuentran a temperaturas T_1 y T_2 no depende de la temperatura a la que estén los puntos intermedios (figura 13).

Figura 13. Ley de los circuitos homogéneos



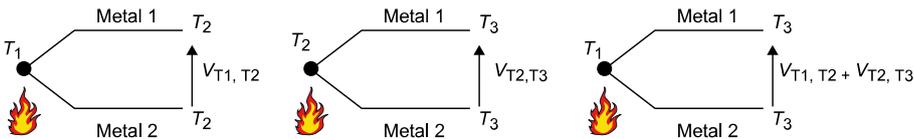
b) La **ley de los metales intermedios** postula que si introducimos un tercer metal en serie en uno de los dos que ya conforman el termopar, la tensión generada por el termopar no varía siempre y cuando los extremos del metal inserto estén a la misma temperatura (figura 14).

Figura 14. Ley de los metales intermedios



c) La **ley de las temperaturas intermedias** argumenta que si V_{T_1, T_2} es la tensión generada por un termopar cuyas uniones se encuentran a temperaturas T_1 y T_2 , y V_{T_2, T_3} es la tensión cuando están a T_2 y T_3 , entonces la tensión V_{T_1, T_3} , cuando las temperaturas de las uniones son T_1 y T_3 , será igual a $V_{T_1, T_2} + V_{T_2, T_3}$ (figura 15).

Figura 15. Ley de las temperaturas intermedias



No obstante, hay que aclarar que el efecto termoeléctrico se debe a la diferencia de temperaturas entre dos puntos de un mismo metal y no a la existencia de dos metales diferentes. A pesar de esto, la diferencia de tensión no se podría medir si tuviéramos un solo metal.

1.2.1. Tipos de termopares

La necesidad de disponer de un termopar estable y lineal a lo largo del tiempo y con un máximo de sensibilidad condiciona los tipos de metales que hay que utilizar.

Podemos dividir los termopares más importantes en dos grupos:

- Termopares de metales base, dado que están hechos de metales comunes como el aluminio, el níquel, el cobre, etc.
- Termopares de metales nobles, elaborados con platino y rodio.

En la tabla 3, se presentan los principales tipos de termopares y sus características más importantes.

Tabla 3. Tipos de termopares y características

| Tipo | Composición (terminal positivo - negativo) | Campo de medida | Sensibilidad (a 25 °C) |
|------|--|-----------------|---|
| J | Fe – Constantán | 0 a 760 °C | 51,5 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| K | Chromel – Alumel | -200 a 1.250 °C | 40,5 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| N | Nicrosil – Nisil | 0 a 1.260 °C | 26,5 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| T | Cu – Constantán | -200 a 350 °C | 41,0 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| R | 13% Pt - 87% Rh – Pt | 0 a 1.450 °C | 6 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| S | 10% Pt - 90% Rh – Pt | 0 a 1.450 °C | 6 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| B | 30% Pt - 70% Rh - 6% - Pt 94% Rh | 800 a 1.800 °C | 9 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (a 1.000 °C) |

1) **Tipo J:** hierro - constantán (55% Cu y 45% Ni). Indicado para atmósferas inertes. Sirve para medir temperaturas superiores a la del tipo T. No se recomienda su uso en ambientes donde se tenga oxígeno libre, dado que reduce rápidamente su vida útil. Tiene un coste muy bajo y esto permite que su utilización sea generalizada. Su principal inconveniente es que el hierro se empieza a oxidar rápidamente a temperaturas superiores a 550 °C.

Atmósfera inerte (neutra)

Atmósfera que contiene gases inertes, que no reaccionan con otras sustancias.

2) **Tipo K:** chromel (90% Ni y 10%Cr) - alumel (95% Al y 5% Ni). Este termopar puede medir temperaturas de hasta 1.250 °C. A diferencia del anterior de tipo J, sensible a la oxidación, el níquel hace que sea más resistente a la misma. Se utiliza con mucha frecuencia en los hornos de tratamientos térmicos. Su coste es considerable, lo que limita su utilización.

Atmósfera oxidante

Atmósfera que contiene de manera predominante moléculas de oxígeno, lo que provoca que se dé el efecto de oxidación.

3) **Tipo N:** nicrosil (84,4% Ni, 14,2% Cr y 1,4% Si) - nisil (95,6% Ni, 4,4% Si y 1,0% Mg). Utilizado para altas temperaturas gracias a su estabilidad y a su resistencia a la oxidación a estas temperaturas.

4) **Tipo T:** cobre y constantán. Adecuado para atmósferas inertes y oxidantes. Tiene un coste relativamente bajo y se utiliza para medir temperaturas bajo 0 °C. Como límite superior se pueden considerar los 350 °C, puesto que el cobre se enmohece de manera violenta a partir de los 400 °C.

5) **Tipos R, S:** platino y rodio. Los dos son de similares características. Los de tipo R son muy resistentes a la oxidación, pero no se aconseja su aplicación en atmósferas reductoras por su fácil contaminación con el hidrógeno y nitrógeno, los cuales modificarán su respuesta. Los de tipo S no pueden utilizarse a temperaturas elevadas porque los metales que los constituyen no son de alta pureza, y se producen alteraciones en la lectura a partir de los 1.000 °C.

Atmósfera reductora

Atmósfera falta de oxígeno. Cualquier proceso que ocurra en estas condiciones implica que algunos componentes pueden perder oxígeno, mientras que otros de mayor afinidad lo incorporan.

6) **Tipo B:** platino y rodio. Similar a los de tipos R y S, a pesar de que el límite de temperatura que puede medir es superior.

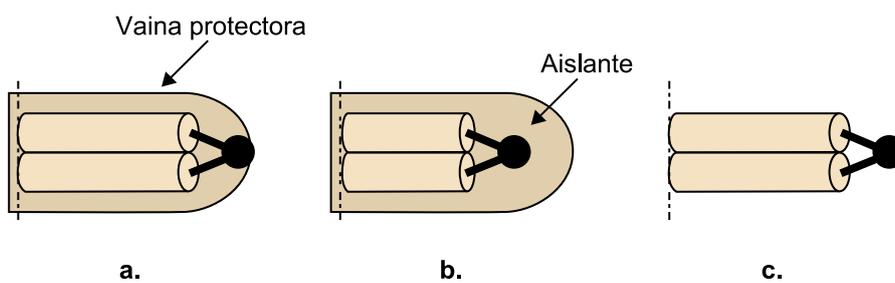
1.2.2. Tipos de unión de los metales que conforman los termopares

La unión entre los dos metales que conforman el termopar, denominada **unión caliente**, puede estar hecha mediante una soldadura, un par de cables trenzados o una fusión.

No obstante, en función de su encapsulado, tal y como se presenta en la figura 16, la unión puede ser de tres tipos.

- Unión a masa, en la que la unión hace contacto con la cápsula.
- Unión aislada, en la que la unión está separada de la cápsula mediante un aislante eléctrico de elevada conductividad térmica.
- Unión desnuda, en la cual la unión no está encapsulada.

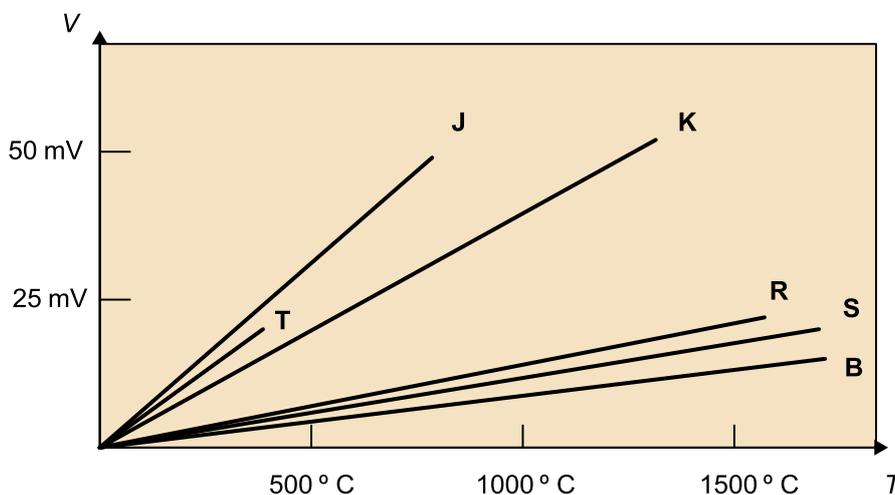
Figura 16. Tipo de unión caliente, en función de su encapsulado



a. Unión a masa. b. Unión aislada. c. Unión desnuda.

En la figura 17, vemos una gráfica de resumen con las **curvas de calibración** de los diferentes termopares. Podemos observar que son fuerza lineales, especialmente las correspondientes a los metales base, y con un error bastante pequeño que depende principalmente del campo de medida.

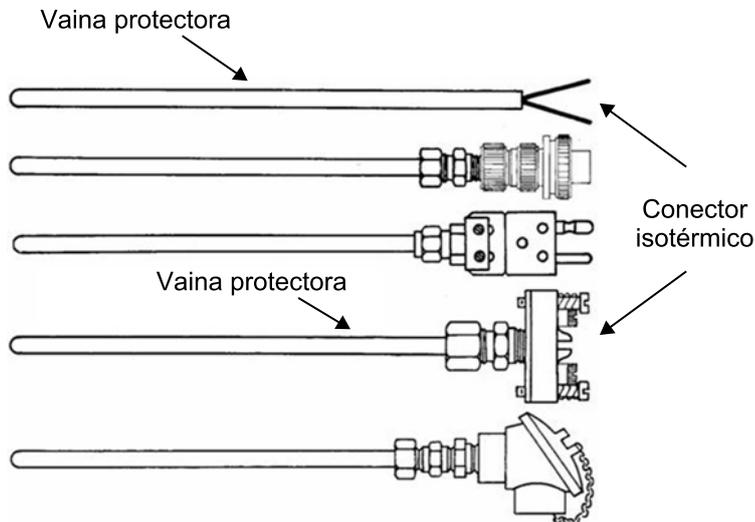
Figura 17. Curvas de calibración



La gráfica de la figura 17 relaciona la tensión termoeléctrica en los diferentes termopares en función de la temperatura de una unión cuando la otra se mantiene a 0 °C.

Finalmente, en la figura 18 se muestran diferentes **termopares comerciales**.

Figura 18. Ejemplos de termopares comerciales



1.2.3. Acondicionamiento de la señal por los termopares

Como hemos visto, el termopar es un dispositivo que responde a las características de los transductores, es decir, transforma fenómenos físicos (en nuestro caso, en la diferencia de temperaturas entre dos uniones) en señales eléctricas, como el voltaje y la resistencia eléctrica.

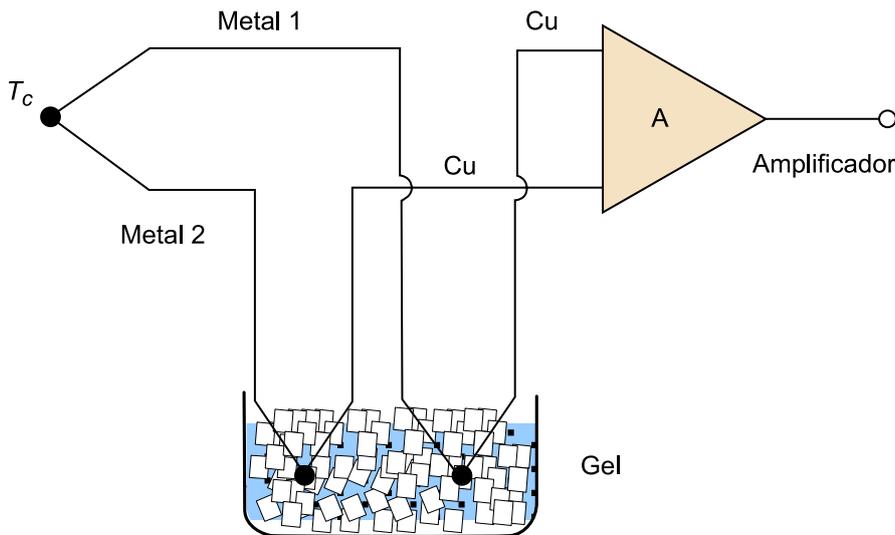
El termopar resulta económico y resistente y puede operar en un amplio margen de temperaturas. Sin embargo, el pequeño valor de tensión que proporciona, del orden de microvoltios por grado centígrado, requiere un acondicionamiento de la señal que debe tener presentes dos aspectos:

1) Para determinar la temperatura objeto de la medida, será necesario conocer también la temperatura de la otra unión.

2) El circuito acondicionador de la señal consistirá, básicamente, en un circuito amplificador.

Una de las alternativas para acondicionar la señal de un termopar consiste en lo que se conoce como **compensación mediante uniones de referencia**. Con este método se fija un valor conocido para una de las dos uniones –tradicionalmente a 0 °C– y, para conseguirlo y garantizar esta temperatura, se introducen las uniones de referencia en un baño de agua y hielo (figura 19).

Figura 19. Compensación mediante uniones de referencia



Donde T_c es la temperatura de la unión caliente.

El error que podemos tener con este tipo de montaje es muy pequeño, de unos 0,001 °C, y por este motivo esta es una solución típicamente de laboratorio y utilizada para hacer calibraciones.

Encontramos otras alternativas de acondicionamiento de la señal con montajes de software y hardware específicos.

1.3. El termistor (NTC)

El nombre de termistor tiene su origen en las palabras inglesas *thermal* y *resistor*. Como se puede deducir de las dos palabras, ya se nos avanza la idea de una resistencia sensible a la temperatura.

Los termistores son sensores de temperatura de tipo resistivo, y se dividen en dos grupos:

- Los NTC³.
- Los PTC⁴.

⁽³⁾Del inglés *negative temperature coefficient*.

⁽⁴⁾Del inglés *positive temperature coefficient*.

Los NTC tienen un coeficiente de temperatura negativo, es decir, el valor óhmico de su resistencia disminuye al aumentar la temperatura.

Por el contrario, los PTC tienen un coeficiente de temperatura positivo y su resistencia aumenta cuando también lo hace la temperatura.

Los *PTC* se utilizan de manera fundamental como detectores de nivel de líquidos, generadores de retrasos en señales eléctricas, protectores de sobrecorrientes eléctricas, arranque de motores, etc.

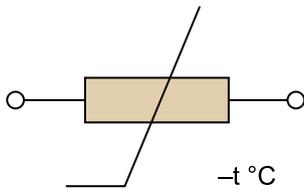
La medida de la temperatura es la aplicación más común de los *NTC*. Por este motivo, en este subapartado nos centraremos en estos últimos.

Los *NTC* están constituidos por una mezcla de óxidos metálicos. Utilizan combinaciones como las siguientes.

- Ni-Mn-O.
- Ni-Cu-Mn-O.
- Ti-Fe-O.

En cuanto al símbolo del sensor *NTC*, se muestra en la figura 20, en la que el signo menos indica que la sensibilidad es negativa y la línea que corta la resistencia indica que esta cambia con la temperatura.

Figura 20. Símbolo del *NTC*



Encontramos dos tipos de termistores, en función de la forma en la que se unen los cables al cuerpo del *NTC*:

- **Termistores tipo gota o *bead*.**
- **Termistores metalizados.**

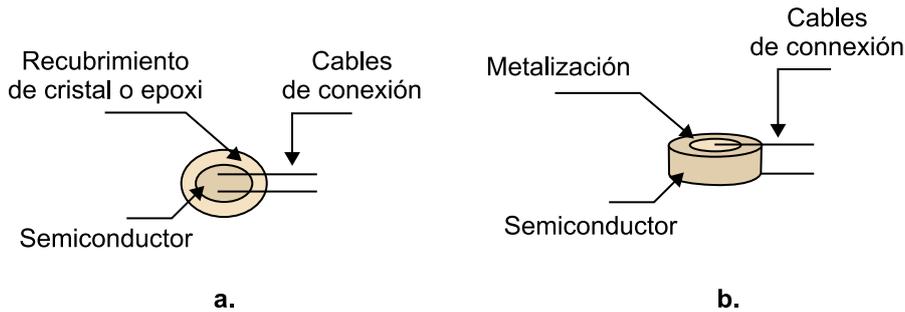
a) En los *NTC* tipo gota, los cables se sinterizan junto con el cuerpo del termistor, con lo que forman parte del mismo (figura 21).

b) En los *NTC* metalizados, generalmente en forma de disco, los cables se conectan directamente a la superficie del termistor previamente metalizado (figura 21).

Sinterización

Recordemos que la sinterización es el proceso que permite unir, por difusión en estado sólido, partículas pequeñas de un material.

Figura 21. Tipos de NTC



a. Esquema del NTC tipo gota. b. Esquema del NTC metalizado.

Los NTC tipo gota son más estables y soportan más altas temperaturas (hasta 550 °C) que los metalizados (hasta 130 °C). Las tolerancias de los termistores NTC convencionales suelen ser elevadas, del 20% para los de tipo gota y del 5% para los de tipo metalizado. Por el contrario, los metalizados son más económicos que los tipos *bead*, los cuales tienen un mayor coste.

En general, los NTC son sensores muy sensibles y robustos, fiables y económicos. Presentan, como gran inconveniente, su lentitud de respuesta, amplios márgenes de tolerancia en sus especificaciones, un campo de medida limitado y un envejecimiento con el paso del tiempo.

1.3.1. Modelo matemático: exponencial

La ecuación más sencilla que reproduce el comportamiento de un termistor es la siguiente:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad 4.16$$

Donde B es el índice de sensibilidad térmica, que puede variar entre 2.000 y 6.000 K.

R_0 es la resistencia del termistor a la temperatura T_0 .

T_0 es la temperatura de referencia (298 K, o 25 °C).

T es la temperatura absoluta (en K).

1.3.2. Relación temperatura-resistencia en los NTC

La sensibilidad es una característica muy importante en cualquier sensor. La alta sensibilidad es la mayor ventaja de los termistores respecto al resto de los sensores utilizados para medir temperatura. A bajas temperaturas, la sensibilidad de un sensor NTC es muy alta y va disminuyendo conforme la temperatura aumenta.

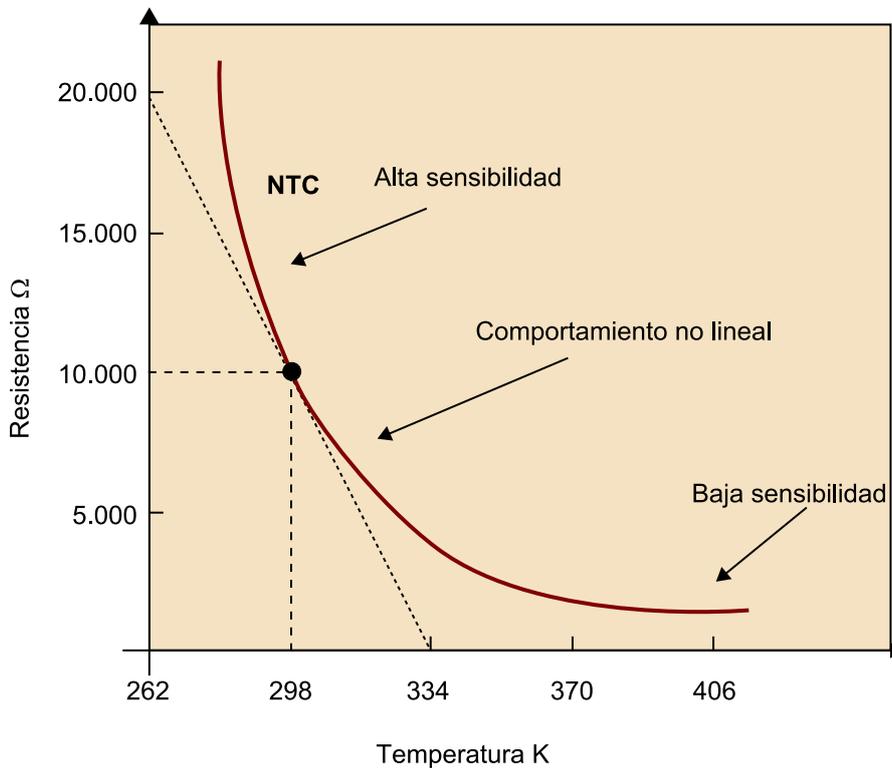
Por otro lado, la relación entre temperatura y resistencia no es lineal, sobre todo cuando consideramos márgenes de temperatura grandes. Esta relación entre resistencia y temperatura ($R-T$) se presenta en la figura 22. A la hora de linealizar esta relación, se utiliza con frecuencia una resistencia R_p conectada

en paralelo al NTC, de modo que el punto de inflexión de la nueva curva linealizada $R-T$ esté en el centro (allá donde el comportamiento se asimila más al lineal) del margen de temperaturas que se quiere medir. De manera aproximada, esta resistencia R_p se calcula como:

$$R_p = \frac{B-2T}{B+2T} R_T \quad 4.17$$

Donde T es la temperatura media del margen de temperaturas que hay que medir.

Figura 22. Relación entre resistencia y temperatura en los NTC



Los NTC miden temperaturas absolutas con un valor que llega hasta los 500 °C como máximo (a pesar de que con los nuevos materiales podría llegar a los 1.000 °C) y hasta -70 °C como mínimo. En lo que respecta a los valores nominales de resistencia, varían entre los 10 Ω y 20 MΩ.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la velocidad de respuesta no es una de las mejores características de este tipo de sensores, a pesar de que cuanto menor es el NTC más alta es su velocidad de respuesta, gracias a la baja inercia térmica que pueden presentar.

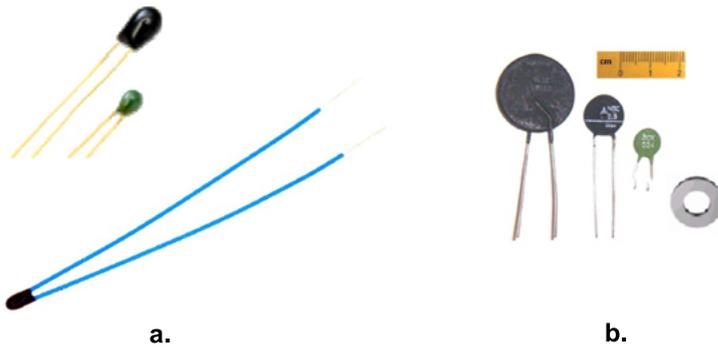
1.3.3. Algunos modelos comerciales de termistores NTC

En la figura 23, vemos algunos modelos comerciales habituales que pueden encontrarse fácilmente en el mercado de termistores NTC.

Inercia térmica

Propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la que la cede o absorbe del entorno.

Figura 23. Ejemplos de modelos comerciales de NTC



a. NTC tipo gota con cubierta de cristal. b. NTC tipo disco y arandela.

Actividad

Buscad información en Internet sobre diferentes tipos de NTC. Comparad sus características principales (margen de valores de resistencia, margen de temperatura de trabajo y sensibilidad térmica). Encontraréis *datasheets* de NTC a <http://category.alldatasheet.com>.

1.4. Sensores de silicio

Una de las invenciones más importantes del siglo XX fue, sin duda, el transistor. Este dispositivo dio el pistoletazo de salida para el posterior desarrollo de procesos de fabricación de dispositivos semiconductores y circuitos integrados (tecnología CMOS, transistores de unión bipolar, etc.). Para la construcción de estos elementos electrónicos, los materiales semiconductores más estudiados y utilizados han sido el silicio (Si) y el germanio (Ge).

Cuando las capacidades electrónicas del silicio están fuera de las posibilidades exigidas para la construcción de determinadas aplicaciones, los diseñadores optan por utilizar semiconductores compuestos. No obstante, la gran mayoría de estos desarrollos están basados en el silicio.

Los televisores modernos, la telefonía celular, los dispositivos de corrección auditiva o los sistemas de monitoreo neuronal son solo algunos de los ejemplos de sistemas que no solo incluyen circuitos integrados, sino también sensores. Los diseñadores actuales han aprovechado las propiedades sensoras del silicio, dado que no penalizan la fabricación de este tipo de componentes electrónicos con un coste elevado.

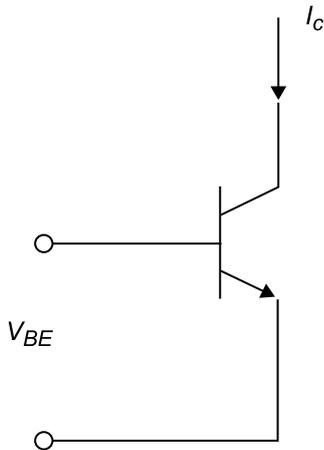
En lo que respecta a las cualidades de los sensores de silicio para la medida de la temperatura, ya hemos indicado que el coste de fabricación del sensor es bajo y su inclusión en un componente electrónico también resulta económica.

El alcance de medida de los sensores de silicio gira en torno a los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, sus tolerancias son del $\pm 1\%$ y $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presentan una sensibilidad de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.

Los sensores de silicio están basados en la relación entre la tensión base-emisor (V_{BE}) y la corriente de colector (I_C) de un transistor de unión bipolar BJT ⁽⁵⁾. Veámoslo gráficamente en la figura 24.

⁽⁵⁾Del inglés *bipolar junction transistor*.

Figura 24. Transistor BJT



Con la expresión matemática mostrada en la ecuación 4.17 que identifica esta relación:

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{I_C}{I_s} \quad 4.18$$

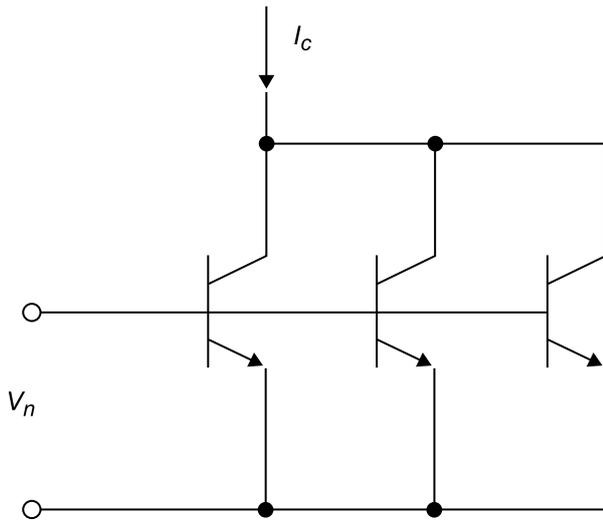
Donde k es la constante de Boltzman.

T es la temperatura absoluta en grados Kelvin.

Q es la carga de un electrón: $-1,6 \times 10^{-19}$ C.

I_s es la corriente inversa de saturación que depende de la geometría y de la temperatura del transistor.

En la figura 25, se muestra el caso en el que se disponen n transistores idénticos al anterior.

Figura 25. Unión de n transistores

Se supone la corriente de colector I_c repartida de igual manera entre todos estos, y la relación de la tensión base-emisor V_n de todos los transistores es la que vemos expresada en la ecuación 4.19.

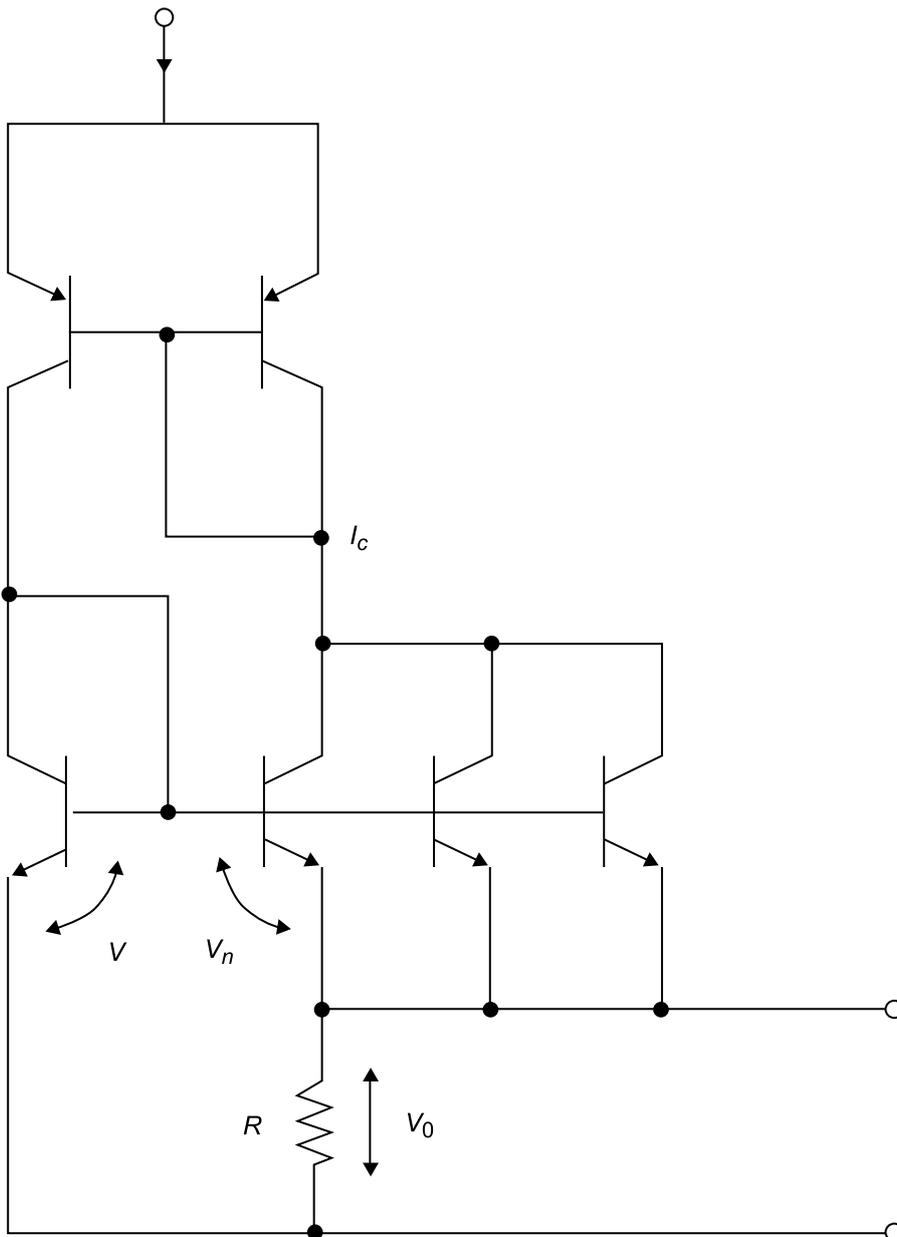
$$V_n = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{I_c}{nI_s} \quad 4.19$$

No obstante, este tipo de circuitos presenta el problema de que no pueden utilizarse de manera aislada, debido a la fuerte dependencia de la corriente inversa de saturación I_s respecto a la temperatura. La manera de resolverlo es conseguir que la temperatura del colector I_c sea igual en los n transistores. De este modo, la diferencia de tensión entre las tensiones de base y emisor V_{BE} acaba siendo proporcional a la temperatura absoluta y deja de depender de la corriente inversa de saturación I_s .

Veamos a continuación un circuito práctico de medida de temperatura formado por transistores PNP configurados en espejo y con $N + 1$ transistores NPN (figura 26). En este nuevo circuito, si la corriente de colector I_c del transistor de unión bipolar es igual que en los N transistores BJT , entonces la diferencia de potencial entre V y V_N —es decir, V_0 — será proporcional solo a la temperatura absoluta. Además, la resistencia del conjunto resulta estable a la temperatura.

Este circuito se completaría con la circuitería necesaria para que los transistores de unión bipolar trabajasen en conmutación, es decir, como si fueran interruptores y poniéndose a ON cuando se aplica una tensión y a OFF en caso contrario.

Figura 26. Sensor de temperatura formado por transistores *PNP* configurados en espejo y con $N + 1$ transistores *NPN*



El circuito básico es el de la figura 26, donde la diferencia de potencial entre V y V_N —es decir, V_0 — vendrá expresada por la ecuación 4.20.

$$V_0 = V - V_N = \frac{kT}{q} \cdot \ln N \quad 4.20$$

Para acabar, en la figura 27 se muestran unos ejemplos comerciales de sensores de temperatura de silicio en un circuito integrado.

Figura 27. Ejemplos comerciales de sensores de temperatura de silicio integrados



1.5. Comparativa y cuadro resumen de los diferentes sensores de temperatura

Como hemos podido ver hasta el momento, a pesar de tener a nuestro alcance una buena variedad de sensores, la elección de un tipo concreto no es una tarea evidente.

A modo de resumen, en la tabla 4 vemos una comparativa entre los diferentes sensores de temperatura: RTD, termopares, NTC y sensores de silicio.

Tabla 4. Comparativa de diferentes tipos de sensores de temperatura

| Características | Sensor | | | | |
|--------------------------|--|--|-----------------|--|--------------|
| | RTD de película (platino) | RTD bobinado (platino) | Termopar | Termistor NTC | Silicio |
| Coste del sensor | De moderado a bajo | Moderado | Bajo | De bajo a moderado | Bajo |
| Coste del sistema | Moderado | Moderado | Alto | De bajo a moderado | Bajo |
| Alcance de medida | -200 a 750 °C (560 °C máx., típicamente) | -200 a 850 °C (600 °C máx., típicamente) | -270 a 1.800 °C | -100 a 500 °C (125 °C máx., típicamente) | -40 a 125 °C |
| Tolerancia | ±0,1%, ±0,3 °C | ±0,06%, ±0,2 °C | ±0,5%, ±2 °C | ±10%, ±0,2 °C | ±1%, ±3 °C |
| Estabilidad | Excelente | Excelente | Pobre | Moderada | Moderada |
| Sensibilidad | 0,39%/°C | 0,39%/°C | 40 μV/°C | -4%/°C | 10 mV/°C |
| Sensibilidad relativa | Moderada | Moderada | Baja | Muy alta | Moderada |
| Linealidad | Excelente | Excelente | Moderada | No es lineal | Moderada |
| Pendiente de la recta | Positiva | Positiva | Positiva | Negativa | Positiva |
| Susceptibilidad al ruido | Baja | Baja | Alta | Baja | Baja |

1.6. Sensores de radiación

Los sensores de radiación llevan a cabo sus medidas a partir de la energía que emiten todos los materiales, en función de su temperatura en la región del espectro electromagnético infrarrojo. Por lo tanto, trabajan bajo el principio de que la temperatura de un material determina la longitud de onda de la radiación emitida.

Los sensores de radiación se componen del propio sensor, de un sistema óptico que le ayuda a enfocar el objeto que hay que medir y de un sistema electrónico de acondicionamiento de la señal y visualización. En muchos casos, se incluyen unos diodos láser o LED que iluminan la zona que hay que medir y que, por lo tanto, ayudan al usuario a reconocer fácilmente qué se está midiendo.

En función de la emisividad de los materiales –es decir, la capacidad de emitir radiación–, se resumen en tres tipos.

- **Cuerpo negro:** es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre el mismo. Su emisividad es igual a 1. En realidad, se trata de un concepto totalmente teórico dado que todos los materiales presentan una emisividad menor a 1.
- **Cuerpo gris:** aquel material que presenta una emisividad constante pero menor a 1. Muchos materiales presentan emisividades con valores comprendidos entre 0,85 y 0,95, a pesar de que el hielo, por ejemplo, presenta un valor de 0,97, el agua de 0,98 y un papel negro o un papel blanco de 0,9; por el contrario, el oro pulido presenta 0,02 y el cobre pulido, 0,01.
- **Cuerpo no gris:** el material presenta una emisividad variable en función de su longitud de onda. Un buen ejemplo de esto es el vidrio, en función de su opacidad y grosor.

Las emisividades de casi cualquier material se miden a 0 °C, pero no difieren de manera significativa a temperatura ambiente.

No obstante, hay que considerar que la longitud de onda a la que tiene lugar el pico de emisión de radiación de un material depende de la temperatura, y son inversamente proporcionales una de otra. Por este motivo, la respuesta espectral es uno de los parámetros más importantes para llevar a cabo la selección del tipo de sensor de radiación.

A diferencia de otros tipos de sensores que hemos visto, como los RTD o los termopares, que necesitan estar en contacto con el medio cuya temperatura quieren medir, los sensores de radiación no lo necesitan y llegan a medir temperaturas de hasta 3.000 °C. Esto hace que se utilicen allí donde no pueden emplearse los otros tipos de sensores.

En general, se utilizan cuando no se pueden usar los RTD, los termopares u otros tipos de sensores, a partir de los criterios de utilización siguientes:

- Medidas sin contacto (por ejemplo, con aplicaciones médicas o alimentarias).
- Para altas temperaturas, fuera del alcance de las especificaciones de otros sensores.
- Cuando se necesita un tiempo de respuesta muy pequeño, por ejemplo de menos de un segundo.
- Cuando el objeto se encuentra en un medio con muchas interferencias, por ejemplo rodeado de un fuerte campo electromagnético, como podría ser un horno de inducción.

No obstante, los sensores de radiación presentan algunos inconvenientes que hay que considerar.

- La presencia de vapor de agua, polvo o gases situados entre el objeto que hay que medir y el sensor de radiación puede representar importantes desviaciones en el valor final de la medida.
- Son mucho más costosos que otros termómetros basados en sensores como los termopares o los RTD, y también son más imprecisos.
- El valor de la emisividad de cada material es una medida obtenida de manera perpendicular al objeto (formando un ángulo recto de 90°). Para otros ángulos, si se quiere mantener la exactitud, se necesita una corrección experimental.

Algunos de los sensores más utilizados para la medida de la radiación son los siguientes.

a) Sensores piroeléctricos: también utilizados como detectores de movimiento. Presentan una sensibilidad relativamente alta y permiten un campo de medida grande gracias a su respuesta espectral amplia. El efecto piroeléctrico es análogo al piezoeléctrico pero, en lugar de que aparezcan cargas eléctricas cuando se deforma un material, aquí se producen cargas superficiales en una

determinada dirección cuando el material experimenta un cambio en su temperatura. Una de las principales aplicaciones es la medida de la radiación térmica a temperatura ambiente. Por ejemplo, la pérdida de calor en los edificios.

b) Fotorresistencias (*LDR*)⁶: son componentes electrónicos que tienen la característica de disminuir su resistencia en función de la intensidad de la luz incidente. También se conocen como células fotoeléctricas. Presentan una respuesta espectral amplia y centrada en longitudes de onda más largas, por lo que resultan adecuados para la medida de temperaturas bajas. Algunos de los más utilizados son los de PbS (sulfuro de plomo) y los de InSb (antimonio de indio).

⁶Del inglés *light-dependent resistor*.

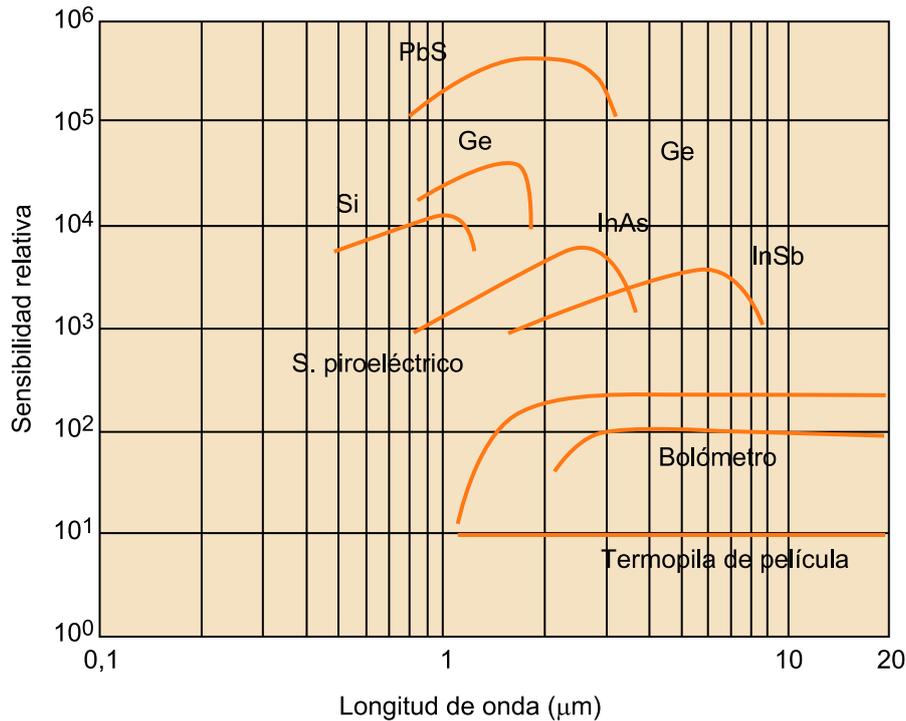
c) Fotodiodos: son semiconductores construidos con una unión *PN*, sensibles a la incidencia de luz visible o infrarroja. En ausencia de luz exterior, generan una tensión muy pequeña. La corriente generada en ausencia de luz recibe el nombre de corriente de oscuridad. Para que su funcionamiento sea correcto, se polariza de manera inversa. El material empleado para la construcción de un fotodiodo es un factor muy importante para definir sus propiedades. Si se elabora con silicio (Si), el fotodiodo será sensible a la luz visible (longitud de onda de hasta 1 μm). Si su elaboración es con germanio (Ge), será sensible para la luz infrarroja (longitud de onda de hasta 1,8 μm aproximadamente). Los de InAs (arseniato de indio) permiten medir temperaturas más bajas. En cualquier caso, serán bastante adecuados para medir temperaturas elevadas, generalmente mayores de 600-1.000 °C.

d) Termopilas: las termopilas están constituidas por decenas de termopares en serie para aumentar la sensibilidad de todo el conjunto y medir la temperatura de un objeto. La termopila detecta la temperatura de un objeto mediante la absorción de los rayos infrarrojos de radiación que se emiten desde la superficie de este objeto. La mayoría de las termopilas están equipadas con una superficie de cuerpo negro para absorber de manera apropiada esta radiación. Su utilización ha crecido de manera espectacular en los últimos años, gracias a la aparición de termopilas de película muy fina fabricadas con técnicas similares a las de los semiconductores. Su respuesta espectral amplia permite un margen de temperatura muy grande (en función del material, puede ser de entre -200 °C a +1.200 °C), con un precio relativamente bajo, una medida reducida y una sensibilidad aceptablemente buena.

e) Bolómetro: termómetros de resistencia (RTD o NTC) configurados para medir radiación de una manera similar a la de las termopilas.

Vemos en la figura 28 la respuesta espectral de estos sensores utilizados como termómetros de radiación.

Figura 28. Respuesta espectral de sensores de radiación



En función de la porción del espectro que se utilice para obtener la medida de la temperatura, los sistemas se clasifican en:

- Pirómetros de radiación total.
- Pirómetros de radiación parcial.
- Pirómetros ratiométricos.

1) Los **pirómetros de radiación total** disponen de un sensor –generalmente un piroeléctrico o una termopila– con una respuesta espectral muy amplia, desde 300 nm hasta 2,5 μm , lo que permite un margen bastante grande de radiación térmica emitida por el objeto. Los campos de medida van de los 0 $^{\circ}\text{C}$ a los +1.000 $^{\circ}\text{C}$, y la exactitud está alrededor del 1% sobre el fondo de escala.

2) En los **pirómetros de radiación parcial**, la medida se efectúa en una zona estrecha, menor a 1 μm . El motivo viene dado por el hecho de que el propio sensor utilizado (generalmente un fotodiodo de silicio) ya tiene una respuesta espectral reducida o porque queda limitado por filtros ópticos. A pesar de que la sensibilidad es menor que en el caso anterior y de que puede resultar más laborioso de diseñar y, por lo tanto, más costoso, la ventaja respecto a los pirómetros de radiación total es su mayor exactitud dada su adaptabilidad a la aplicación para la que haya sido diseñado. Puede presentar exactitudes del 0,25% y campos de medida de -40 $^{\circ}\text{C}$ a +600 $^{\circ}\text{C}$ y +500 $^{\circ}\text{C}$ a +2.000 $^{\circ}\text{C}$.

3) En los **pirómetros ratiométricos**, se mide la energía recibida en dos bandas estrechas y obtenemos el valor de la temperatura a partir del cociente entre los dos resultados. Son adecuados por la medida de temperatura de materiales

no grises. La exactitud típica es del 1-2% sobre el fondo de escala, y algunos de los campos de medida comerciales que pueden encontrarse van de los +50 °C a los +3.700 °C.

2. Sensores de distancia

Tal y como comentábamos en la introducción de este módulo, la medida de la **distancia** va referida a la **posición** de un objeto concreto y acostumbra a ser un caso muy habitual dentro de la instrumentación industrial actual. Por este motivo, y dado que el concepto general de medida de la distancia a un objeto es muy amplio, nos centraremos en el ámbito de la instrumentación en el control industrial.

En general, la posición de un objeto cualquiera se puede observar desde dos puntos de vista:

- La medida de la posición lineal.
- La medida de la posición angular.

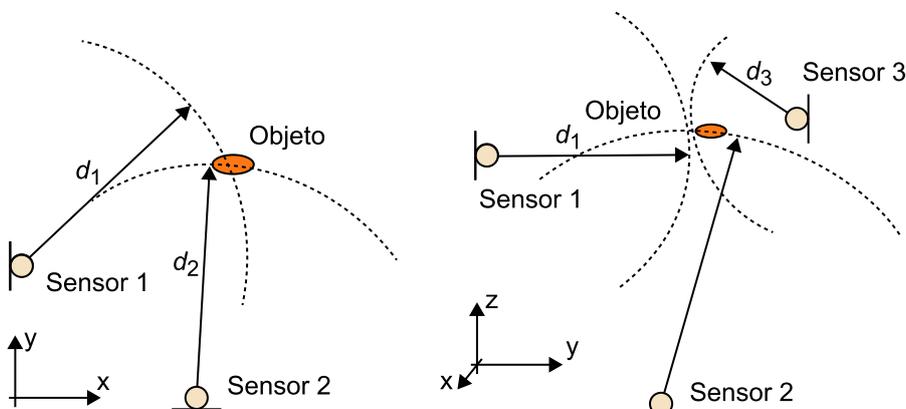
Veamos a continuación estas dos medidas.

2.1. Medida de la posición lineal

En el ámbito de la instrumentación industrial, nos encontramos con la necesidad de resolver el problema de la medida de la distancia a un objeto desde un punto concreto. Para hacerlo, utilizaremos un sensor en este punto concreto que detecte el objeto.

Si situamos dos sensores, entonces la posición vendrá dada por un plano x - y . En el caso de que sean tres los sensores utilizados por esta medida, obtendremos la posición del objeto en un espacio de tres dimensiones x - y - z , tal y como podemos observar en la figura 29.

Figura 29. Posición de un objeto en un plano (izquierda) o en el espacio (derecha)



La medida de la distancia de un objeto a un punto se puede tratar básicamente de dos maneras:

- Sin contacto físico con el objeto.
- Con contacto físico con el objeto.

El segundo tipo de medida acostumbra a ser más habitual en el ámbito de la instrumentación electrónica industrial dado que, una vez conocida esta distancia, se lleva a cabo una acción sobre este objeto.

2.1.1. Medidas de la distancia sin contacto físico

Para las medidas de la **distancia sin contacto físico** con un objeto situado a unas decenas de metros –una distancia media–, se usan sensores que utilizan el método del impulso-eco y se basan en ultrasonidos o técnicas de triangulación mediante luz, normalmente láser.

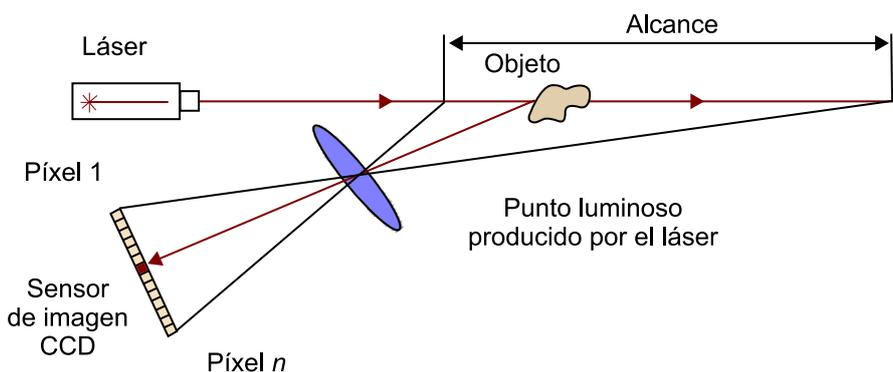
Telémetros láser

Los **telémetros láser** basan su funcionamiento en la proyección de un punto sobre un objeto cuya distancia se pretende medir. Esta proyección se detecta mediante un sensor de imagen (un *CCD*⁷ lineal) que es capaz de identificar la posición de este punto. El *CCD* lineal es un dispositivo con una línea de fotodetectores, que lleva a cabo la traslación de una imagen real a un formato (generalmente binario) el cual puede ser guardado en dispositivos de almacenamiento o memoria, de modo que esta imagen se pueda procesar posteriormente.

⁽⁷⁾Del inglés *coupled charge device*.

Podemos ver en la figura 30 un esquema explicativo de la medida de la distancia a un objeto sin contacto, formado por un telémetro láser y un sensor de imagen o *CCD* lineal:

Figura 30. Medida de la distancia a un objeto sin contacto



Para medir la distancia al objeto, el telémetro láser se basa en el principio de la medición de fases de la luz pulsada:

- Al ordenar la medición, el diodo láser emite pulsaciones de luz con unas características (una fase) constantes.

- El reflejo sobre el objeto que hay que medir (punto luminoso visualizado generalmente como un punto rojo) modifica la fase de la luz pulsada.
- La diferencia de fase es proporcional a la distancia entre el telémetro láser y el objeto. De este modo, el telémetro calcula la distancia al objeto.

Este procedimiento de medida de fases ofrece precisiones milimétricas, y el alcance de medida acostumbra a llegar hasta los 600 metros.

Los telémetros láser son muy utilizados en el sector industrial de la construcción (carpinteros, cerrajeros, albañiles, etc.), son fáciles de usar y, como hemos visto, tienen una buena precisión.

Este tipo de sensores, en diferentes formatos, se utiliza también en otros ámbitos, dentro de complejas aplicaciones para la navegación de barcos y aviones o sistemas de enfoque de imagen de cámaras fotográficas y de vídeo.

También se utilizan para largas distancias en aplicaciones con finalidades aeronáuticas o militares.

Sensores de distancia inductivos

Para cortas distancias, con un alcance de entre 2 y 100 mm, los aparatos de medida que se utilizan son de **origen inductivo** y por este motivo suelen ser muy selectivos, dado que se usan para detectar un objeto ferromagnético ubicado bajo la influencia del campo magnético generado por el dispositivo de medida.

No obstante, acostumbran a no tener una buena linealidad y su precisión es baja, de modo que presentan problemas condicionados por los aspectos siguientes.

- Una alta sensibilidad a los campos magnéticos cercanos.
- La calibración del aparato está muy condicionada a las propiedades del material.
- La temperatura del objeto afecta a la medida que se quiera efectuar.

Sensores de distancia capacitivos

Por otro lado tenemos los sensores de **origen capacitivo**, que cuentan con una mayor estabilidad y no se ven afectados en la medida por la temperatura o los campos magnéticos. Su alcance es similar al inductivo, pese a que pueden medir distancias a objetos metálicos inferiores al milímetro con una elevada precisión y una gran estabilidad. Estos detectores capacitivos se basan en la variación del estímulo de un campo eléctrico. Se mide el cambio en la capaci-

tancia de la zona activa del sensor, la cual depende de la constante dieléctrica, la masa y la medida del material que hay que detectar respecto a la distancia hasta la superficie sensible del detector capacitivo.

2.1.2. Medidas de la distancia con contacto físico

En cuanto a las medidas de la **distancia con contacto físico**, estas son mucho más frecuentes en el ámbito de la instrumentación industrial y resultan de gran utilidad en campos generales como los siguientes.

- La robótica.
- El control de máquinas-herramienta.
- La medida del alargamiento de cables de sujeción.
- Para sistemas de realimentación de la posición de un accionamiento.

Para efectuar estas medidas, encontramos varias posibilidades:

- Potenciómetros lineales.
- Transformador diferencial lineal (*LVD*T).
- *Encoders* lineales.
- Sensores de desplazamiento angular con accionamiento lineal.

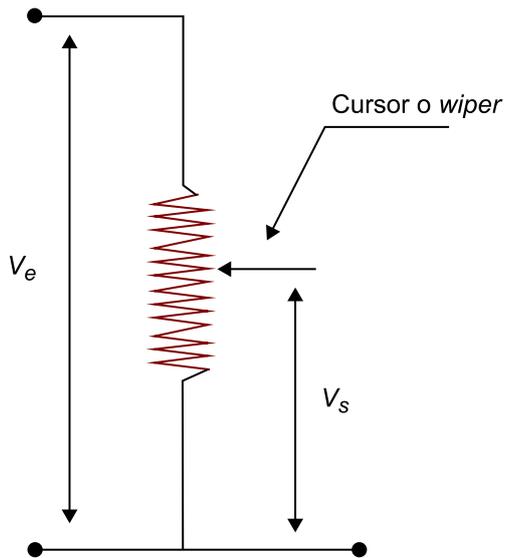
Todos estos sensores raramente superan el alcance de un metro de longitud en la distancia de medida. Este alcance viene condicionado por el contacto y la medida de desplazamiento con el elemento que queremos medir. El sistema de medida dispone de un accesorio que va desplazándose con el objeto y este desplazamiento actúa sobre el sensor, que facilita el valor de la distancia final.

El potenciómetro lineal

Los **potenciómetros lineales** son transductores de distancia y posición con contacto y rozamiento. Los potenciómetros, en general, son dispositivos capaces de medir la posición angular y pequeños desplazamientos de posición lineal. Según los tipos de posición para medir tendremos dos clases distintas de dispositivos, pero la idea básica es común para las dos.

La medida se obtiene mediante el deslizamiento de unas escobillas sobre una resistencia (normalmente una pista plástica resistiva) que, en función del punto donde se encuentre, dará un valor proporcional en resistencia. Además, encontramos un contacto unido a la resistencia que se desplaza a través de la misma, denominado *wiper*, y que se conecta físicamente al elemento cuyo movimiento y desplazamiento queremos medir.

Figura 31. Potenciómetro lineal



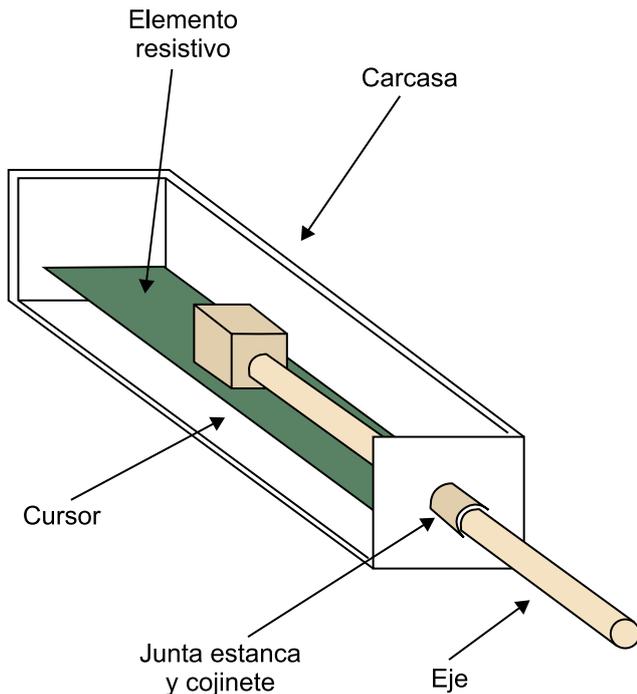
Cuando este elemento se mueva, el *wiper* también lo hará por la resistencia y su tensión de salida irá cambiando. Si medimos esta tensión de salida V_s , podremos determinar cuánto se ha desplazado el *wiper* y, por lo tanto, qué distancia se ha desplazado el elemento que queríamos controlar (figura 31). La variación es constante con respecto al desplazamiento del contacto móvil.

La aplicación más común de este dispositivo es como sensor de desplazamiento de tipo resistivo (figura 32). Hemos visto que el movimiento del cursor origina un cambio en la resistencia medida entre la terminal central y cualquiera de los dos extremos, de modo que actúa como divisor resistivo.

Para la obtención de una señal eléctrica relacionada con el desplazamiento se alimenta, en general, con corriente continua.

En la figura 32 vemos un esquema de un potenciómetro para la medida de pequeños desplazamientos de posición lineal.

Figura 32. Potenciómetro lineal



Su alcance se encuentra entre los 25 mm y los 950 mm, y su linealidad va del 0,2 al 0,075%.

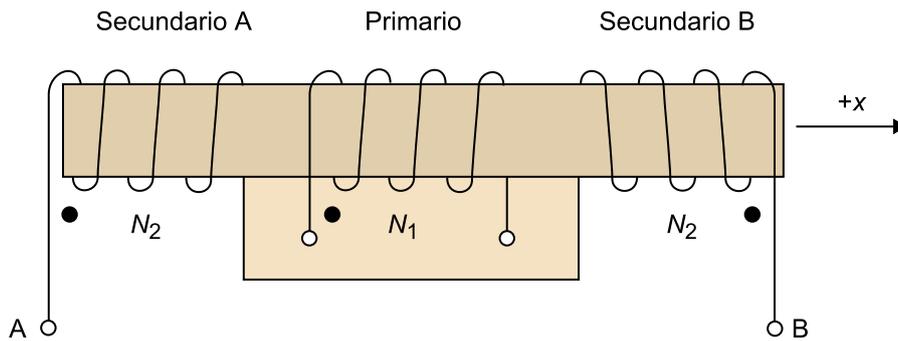
Transformador diferencial lineal (LVDT)

El **transformador diferencial lineal (LVDT⁸)** es uno de los sensores electrónicos basados en efectos electromagnéticos más utilizados en la medida de desplazamientos, pues presenta unas buenas características de linealidad, sensibilidad, rápida respuesta y gran resolución. No obstante, requiere un circuito de tratamiento relativamente complejo puesto que la detección del signo del desplazamiento del objeto no es trivial, y además presenta el inconveniente de que no puede medir grandes desplazamientos.

⁽⁸⁾Del inglés *linear variable differential transformer*.

El transformador diferencial lineal da una señal de voltaje de salida de corriente alterna que es proporcional a un desplazamiento físico. Consta de un devanado primario y dos devanados secundarios enrollados del mismo modo (figura 33).

Figura 33. Esquema de un LVDT



En la figura 33 podemos ver los tres devanados. Los de los extremos son los devanados secundarios (con N_2 espiras), y el del medio es el devanado que actúa como primario (con N_1 espiras).

Si los devanados secundarios están unidos tal y como se ve en la figura 33 y se introduce una señal sinusoidal en el primario del LVDT, con un valor máximo V_1 , la máxima tensión que tendremos en la salida del conjunto V_{AB} vendrá dada por la expresión matemática siguiente:

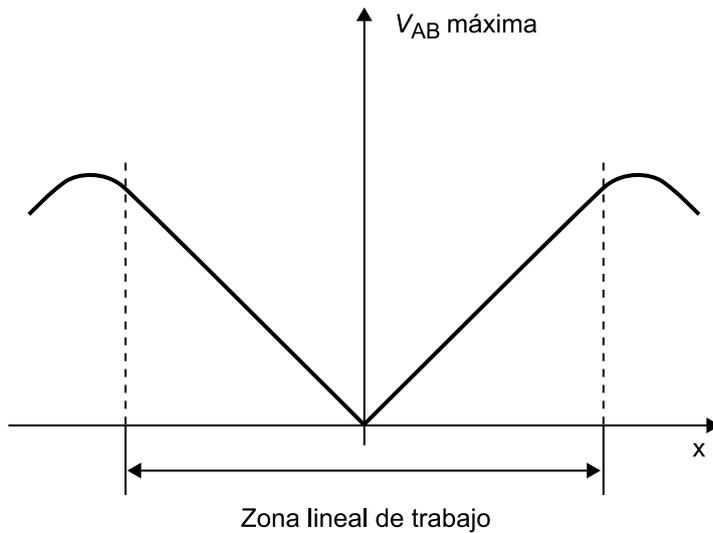
$$V_{AB} = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{d\varphi_{2a}}{d\varphi_1} - \frac{d\varphi_{2b}}{d\varphi_1} \right) \cdot V_1 \quad 4.21$$

Donde φ_1 es el flujo generado por el devanado primario, φ_{2a} es la parte del flujo φ_1 concatenada por el secundario A y φ_{2b} es la parte del flujo φ_1 concatenada por el secundario B.

El interior del transformador es vacío y contiene un núcleo magnético que puede deslizarse libremente dentro de su continente. Mientras el núcleo magnético esté perfectamente centrado en su continente, el enlace del campo magnético será el mismo tanto para el secundario A como para el secundario B.

Entonces el valor de φ_{2a} y φ_{2b} se modificará según varíe la posición del núcleo magnético, y tenderá a disminuir la parte del flujo que une el devanado sobre el que acaba teniendo la menor parte del núcleo. De este modo, el desplazamiento es directamente proporcional al valor de la tensión de salida obtenida.

Podemos ver esta relación entre desplazamiento y la tensión de salida del conjunto en la figura 34, con una zona de comportamiento muy lineal.

Figura 34. Relación entre desplazamiento y tensión de salida en un *LVDT*

El desplazamiento físico que puede medirse con los *LVDT* gira en torno a los 0,1 metros.

No obstante, tal y como se ha comentado anteriormente, se requiere un circuito de tratamiento relativamente complejo puesto que, viendo la simetría que presenta el sistema, no es factible detectar el signo del desplazamiento del objeto.

Por otro lado, la estabilidad de la fuente de excitación del primario es muy importante para el correcto funcionamiento de los *LVDT*, dado que la tensión de salida V_{AB} depende tanto de la posición del núcleo como de esta señal de excitación.

Para eliminar la influencia de perturbaciones en la señal de excitación inyectada en el primario del *LVDT* y conseguir que la información de salida sea una buena representación de la entrada, es decir, del desplazamiento, se utilizan diseños bastante optimizados de la fuente de excitación o de su influencia sobre la señal de salida. Un ejemplo de estos circuitos es la utilización de osciladores realimentados o circuitos de medida permanente de la señal de excitación mediante la suma de señales inducidas en los secundarios.

Encoder lineal

Como ya se ha comentado, la mayoría de los sistemas de medida de distancia con contacto físico tienen un alcance reducido, dado que el sistema de medida lleva implícito una varilla que tendrá una longitud igual al máximo de la longitud que se pretende medir.

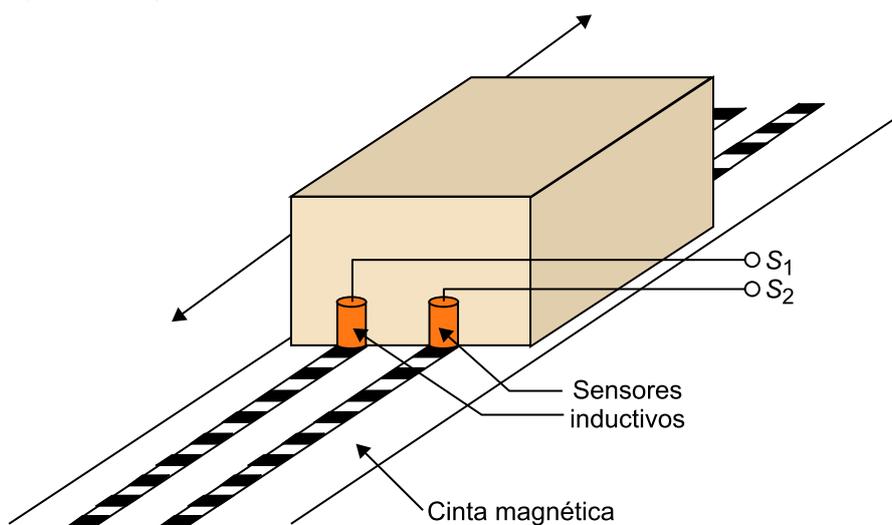
De este modo, estos tipos de sensores difícilmente superan el alcance máximo de medida del metro de distancia.

A pesar de esto, a veces se hace necesaria la medida más allá de esta distancia y se construye un sensor especialmente para efectuar la medida. Es el caso del **encoder lineal** de tipo relativo, con la utilización, por ejemplo, de sensores de tipo inductivo. Se denomina *de tipo relativo* dado que el sensor da una información de salida respecto a una posición conocida de referencia.

Este tipo de sensores son muy resistentes al polvo, la grasa, la humedad y a otros contaminantes comunes de los ambientes industriales, así como a golpes y vibraciones. Estas características los hacen especialmente interesantes para aplicaciones, por ejemplo, de control de máquinas-herramienta, en las que sea necesaria la medida de la distancia en los ámbitos comentados con anterioridad.

El alcance de este tipo de sistema de medida solo está limitado por la capacidad de los contadores de pulsos *U/D* (*up/down*), en función del sentido de la dirección de movimiento que tenga el objeto cuyo desplazamiento medimos. En general, la distancia máxima acostumbra a ser de unos 100 metros. Un ejemplo de utilización de este sistema sensor es el de la figura 35.

Figura 35. Ejemplo de utilización de un *encoder* lineal

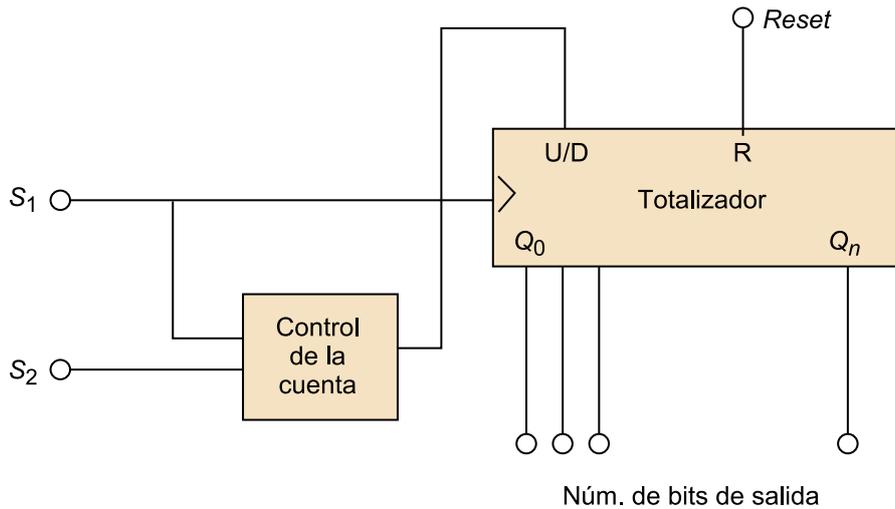


Como podemos ver, el sistema de medida consta de dos partes:

- Unas cintas magnéticas.
- Unos cabezales unidos al objeto cuya distancia se pretende medir. Estos cabezales son dos sensores inductivos que se van desplazando a lo largo de las cintas magnéticas pero sin rozamiento, dado que están separados a uno o dos milímetros de las cintas.

Al sistema habrá que añadirle otro que contabilice el movimiento ascendente y descendente (control de cuenta *up/down*, S_1 y S_2). Podéis ver la figura 36.

Figura 36. Contador de pulsos ascendentes y descendentes



Sensores de desplazamiento angular con accionamiento lineal

Dentro de la medida de la distancia, estableciendo un contacto con el objeto y en el ámbito de alcance reducido que estamos viendo en los últimos ejemplos anteriores, también podemos mencionar los sensores de desplazamiento angular. En este caso, los sensores de desplazamiento angular utilizados para la medida de la distancia disponen de accionamientos lineales, un caso muy típico en la instrumentación industrial actual.

Un caso habitual es el sensor de posición angular accionado por un cable y utilizado para la detección de la posición lineal. Vemos **dos casos** en los que calculamos la distancia o el desplazamiento de un objeto unido al sensor de posición angular mediante un cable (figuras 37 y 38). Observamos que la distancia d recorrida por el objeto es directamente proporcional al ángulo de giro α y al radio R de la corona dentada o del mismo sensor, según la ecuación $d = \alpha R$. Por lo tanto, con cualquiera de los dos sistemas podemos tener una medida del desplazamiento del objeto.

Figura 37. Sensor de desplazamiento angular con corona dentada

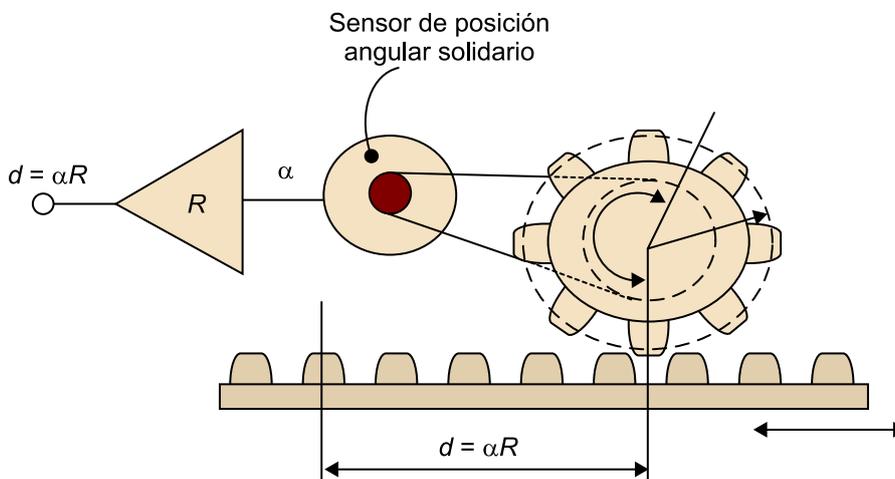
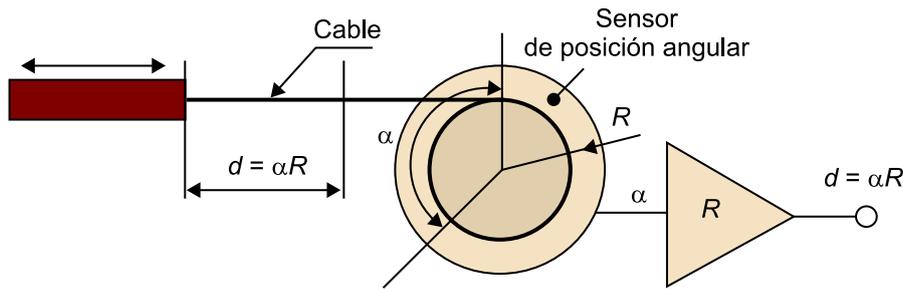


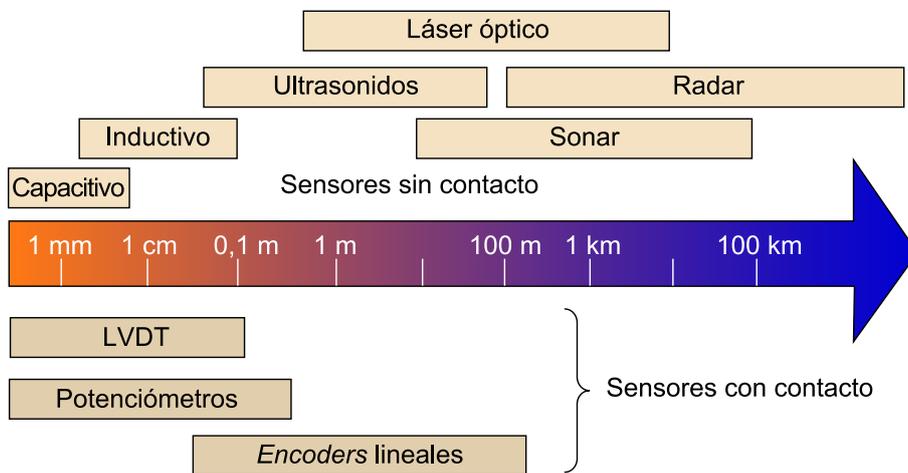
Figura 38. Sensor de desplazamiento angular



Comparativa de sensores de distancia de posición lineal

En la figura 39, vemos un resumen de los sensores de distancia de posición lineal con y sin contacto físico y su alcance en la medida de la distancia o el desplazamiento para el cálculo de la posición de un objeto.

Figura 39. Sensores de distancia de posición lineal



2.2. Medida de la posición angular

En este subapartado, nos referiremos al cálculo de la posición de un objeto desde el punto de vista de la medida de la posición angular. Dado que nos encontraremos con casos mezclados de contacto y no contacto, no utilizaremos esta característica como criterio de clasificación.

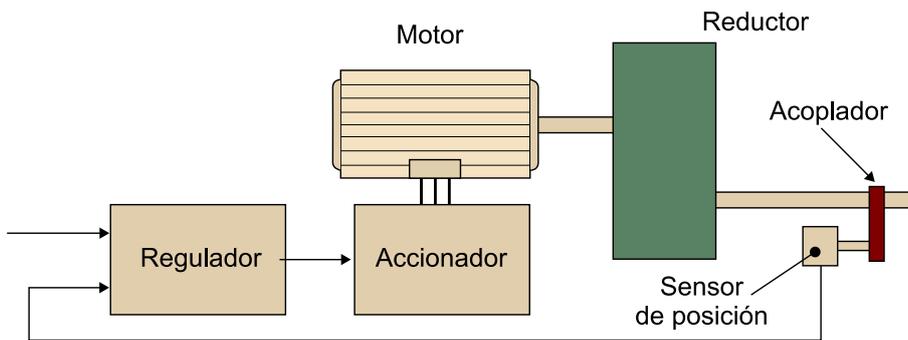
Este tipo de medida es muy habitual en accionamientos industriales en los que se necesita conocer el ángulo de giro de una determinada pieza, en sistemas que incluyen servomotores y, especialmente, en el ámbito de la robótica.

Un servomotor sería la materia prima para el diseño y la construcción de un robot. De hecho, el servomotor –o servo, como se le conoce habitualmente– es un pequeño dispositivo que tiene un eje de rendimiento controlado. Este eje puede ser llevado a posiciones angulares específicas si enviamos una señal

concreta codificada. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de su engranaje también lo hace. Esta determinada posición es lo que se conoce como servomotor de posición.

Vemos en la figura 40 un diagrama de bloques básico de un servomotor de posición muy utilizado en una cadena de montaje en la que se haga necesario el uso de brazos robotizados.

Figura 40. Diagrama de bloques básico de un servomotor de posición



Los servomotores se utilizan mucho para posicionar superficies de control como el movimiento de palancas, pequeños ascensores, timones y, obviamente, allí hasta donde llegue la imaginación humana en el diseño de robots.

Para la medida de la posición angular existe una gran variedad de sensores, a pesar de que los más típicos son los siguientes.

- Los **potenciómetros**.
- Los **sensores electromagnéticos rotativos**, también conocidos como *resolvers*.
- Menos utilizados para este tipo de medida son los **dispositivos inductivos y capacitivos**.
- Los **codificadores de pulsos** o *encoders* de tipo óptico, por encima de los de tipo magnético o capacitivo.

Como podemos ver, por lo tanto, las posibilidades son muy amplias.

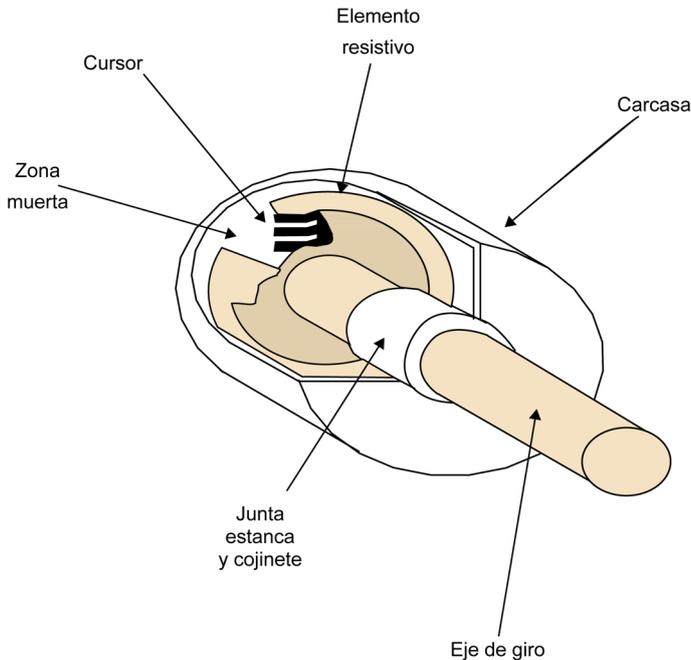
2.2.1. Potenciómetros

Tal y como ya se ha comentado sobre el **potenciómetro** lineal, este dispositivo constituye en sí mismo un buen elemento para la medida de la posición angular, pese a que también presenta problemas que hay que tener en cuenta.

El potenciómetro es un divisor resistivo cuya salida es proporcional a su ángulo de giro. El cambio en la resistencia se utiliza para la medida de los desplazamientos angulares de una pieza acoplada al cursor.

En la figura 41, se muestra un esquema de un **potenciómetro** para la medida de pequeños desplazamientos de posición angular.

Figura 41. Esquema de un potenciómetro para medidas de desplazamientos angulares



A partir de una clasificación general de los diferentes tipos de potenciómetros más habituales, podemos resumir los tipos existentes en tres grupos:

- De hilo bobinado.
- De plástico conductor (no bobinados).
- Híbridos (no bobinados).

1) Los potenciómetros de hilo **bobinado** tienen como elemento resistivo un hilo enrollado sobre un soporte. Este hilo suele ser un compuesto de una de las aleaciones siguientes.

- Níquel-cromo.
- Oro-platino.
- Cobre-níquel.

Su característica principal es la excelente estabilidad térmica y la capacidad para trabajar con niveles de potencia importantes.

2) Los potenciómetros de plástico **conductivo** se elaboran con resinas plásticas como las poliamidas, los poliésteres y el epoxi, y son muy utilizados gracias a su baja fricción, niveles de ruido bajo y su resolución, considerada como “ilimitada”. En la práctica, esta resolución está limitada por aspectos como el ruido de la resistencia de contacto o la estabilidad de la tensión de alimentación.

3) Los potenciómetros **híbridos** combinan las prestaciones de los de hilo bobinado y los de plástico conductivo, y se utilizan bastante para medidas que requieren precisión, pese a que su componente plástico limita la potencia que puede disipar. Se denominan *híbridos* porque combinan el hilo bobinado con el plástico conductivo, y esta especial disposición ayuda a mejorar sus prestaciones.

Vemos en la tabla 5 un cuadro de resumen de las características principales de estos tipos de potenciómetros.

Tabla 5. Características principales de los potenciómetros

| | Hilo bobinado | Plástico conductivo | Híbridos |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| Resolución | Limitada | Infinita | Infinita |
| Potencia | Alta | Baja | Baja |
| Estabilidad térmica | Excelente | Pobre | Muy buena |
| Ruido | Bajo | Muy bajo | Bajo |
| Vida media | $10^5 - 10^6$ ciclos | $10^6 - 10^8$ ciclos | $10^5 - 10^6$ ciclos |
| Comportamiento en alta frecuencia | Pobre | Bueno | Bueno |

Como se ha podido observar, el funcionamiento del potenciómetro es bastante sencillo. No obstante, la necesidad que lleva asociada el potenciómetro de tener contacto físico permanente entre el cursor y la superficie conductora del sensor provoca un desgaste progresivo del dispositivo.

De manera adicional, su ángulo muerto se suma a los problemas anteriores y origina que el potenciómetro vaya quedando cada vez más desplazado del campo de medida de posición angular y que se utilicen otras soluciones más ventajosas.

2.2.2. Sensores electromagnéticos rotativos de posición angular

Los **sensores electromagnéticos rotativos de posición angular**, conocidos como *resolvers*, son los más difundidos por su gran robustez y precisión.

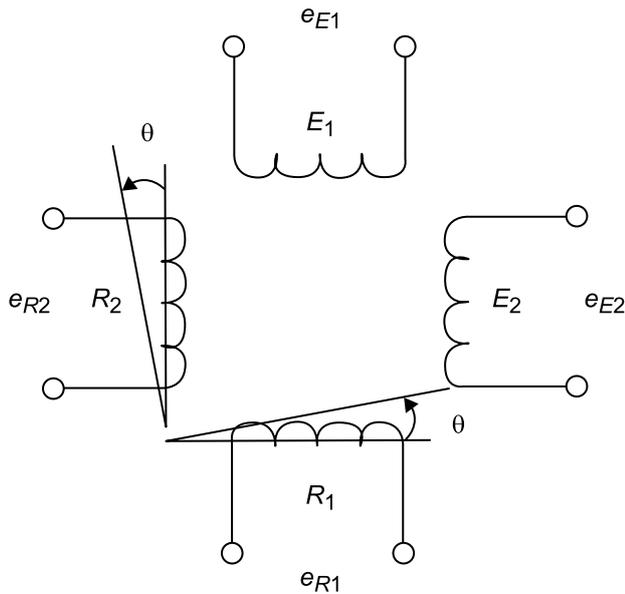
Ángulo muerto

Ángulo en el cual el potenciómetro no llega a medir la posición por limitaciones mecánicas de su construcción.

Tienen una gran fiabilidad y conservan la integridad de sus características con gran independencia de la temperatura. Pueden trabajar en ambientes poco limpios y a altas y muy bajas presiones.

Están compuestos por transformadores variables rotativos, con dos devanados en el estator (E_1 y E_2) dispuestos a 90° y otros dos en el rotor (R_1 y R_2) también a 90° . Podemos ver esta disposición en el esquema de la figura 42.

Figura 42. Disposición de los transformadores en un *resolver*



Observemos que si uno de los devanados del estator (E_1) es excitado con una señal de tensión sinusoidal de frecuencia f , y el otro (E_2) no es excitado o se pone en cortocircuito, por la disposición de los devanados encontramos una posición en la cual la tensión sinusoidal inducida en el secundario del rotor R_1 es máxima, mientras que la tensión del secundario R_2 es nula.

Vemos que al encontrarse el devanado E_2 perpendicular al E_1 , la fuerza electromotriz inducida en E_2 teóricamente es nula. En la práctica, se acostumbra a cortocircuitar para evitar posibles tensiones residuales inducidas.

Si hacemos un desplazamiento del rotor hasta un ángulo θ bajo las condiciones anteriores, las tensiones inducidas en los secundarios vendrán expresadas por las ecuaciones:

$$e_{R_1} = e_{E_1} \cos \theta \quad 4.22$$

$$e_{R_2} = e_{E_1} \sin \theta \quad 4.23$$

De las ecuaciones anteriores, observamos que este tipo de sensor ofrece tensiones en sus salidas, cuya amplitud depende del ángulo de posición del eje del rotor respecto a la posición de referencia.

También, si a partir de una posición angular concreta se hace girar el eje del rotor, en todo momento la señal de salida contiene información de la posición angular del eje y la cantidad de vueltas que ha dado, lo que hace posible el incremento de la precisión del posicionamiento si se utilizan engranajes reductores, como es el caso del posicionamiento de antenas de radar.

A modo de ejemplo, en el cuadro siguiente de la tabla 6 se presentan las características de los *resolvers* de la firma Vernitron MAGTECH:

Tabla 6. Ejemplo de características de un *resolver* comercial

| Parámetro | Magnitud |
|------------------------------|---|
| Diámetro exterior | 20 ÷ 300 mm |
| Frecuencia de excitación | 60 ÷ 10000 Hz |
| Velocidad angular ω_R | Hasta 20000 r.p.m. |
| Tensión nula de salida | 1 ÷ 3 mV/V |
| Exactitud | ± 10 arcoseg ⁹ ÷ ± 4 arcomin ¹⁰ |

⁽⁹⁾Abreviatura de arcosegundo. Equivalente a una sexagésima parte de un arcominuto.

⁽¹⁰⁾Abreviatura de arcominuto. Unidad de medida angular equivalente a una sexagésima parte de un grado.

Los *resolvers* se comercializan en una gran variedad de medidas y con un amplio abanico de velocidades angulares de rotor.

Podemos encontrar su ámbito principal de utilización en la robótica, en electrónica marina y en aplicaciones aeronáuticas y espaciales en las que no es posible utilizar otras técnicas de más bajo coste.

Como se ha comentado, los *resolvers* presentan las ventajas inherentes de los sensores de tipo electromagnético y, por lo tanto, una gran robustez frente a sobrecargas y niveles de señal elevados, por lo que tienen una buena capacidad de trabajo en ambientes con una profusa abundancia de interferencias.

En contrapartida, tienen como desventajas su coste, su elevado peso y la presencia de contactos móviles que supone un inevitable desgaste y el derivado coste por mantenimiento.

2.2.3. Sensores inductivos

Otro método que sirve para la medida de la posición angular es el caso de los **sensores inductivos**. Este tipo de sensores se basan en la tensión generada en una bobina, núcleo magnético y/o imán cuando se someten a una variación de un campo magnético.

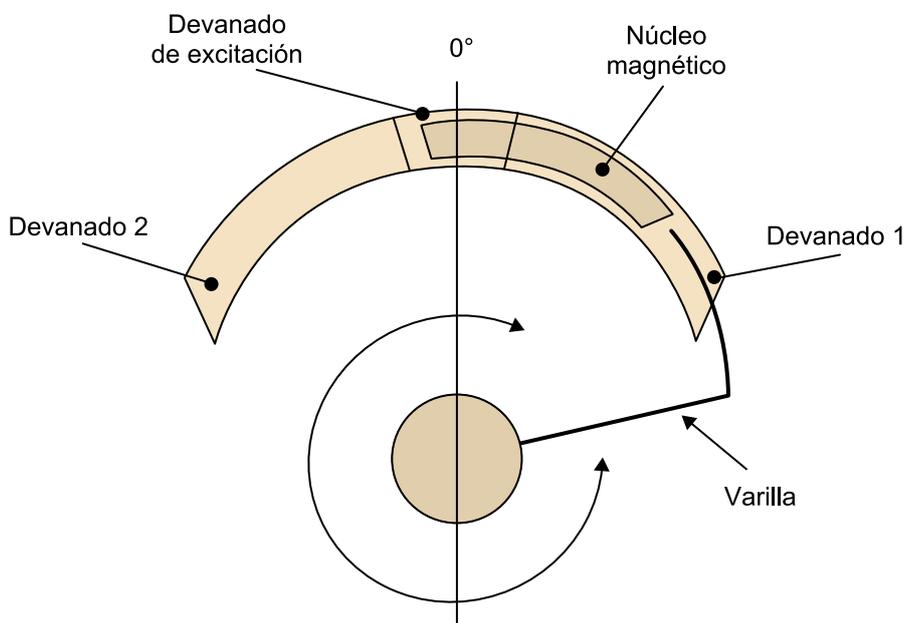
A pesar de que existe una larga lista de sensores inductivos comerciales para medir la posición angular, encontramos un par de sensores bastante útiles para llevar a cabo esta medida, dado que no tienen contactos móviles. Son el *RVDT* y el *magnesyn*.

1) Por un lado, el sensor *RVDT*⁽¹⁾ es un transductor electromecánico que proporciona una variable de corriente alterna, y su tensión de salida es linealmente proporcional al desplazamiento angular de su eje de entrada.

(1) Del inglés *rotary variable differential transformer*.

El funcionamiento del sensor *RVDT* es similar al *LVDT*, sensor que hemos visto anteriormente, pese a que su forma geométrica es distinta, según podemos ver en la figura 43.

Figura 43. *Rotary variable differential transformer (RVDT)*

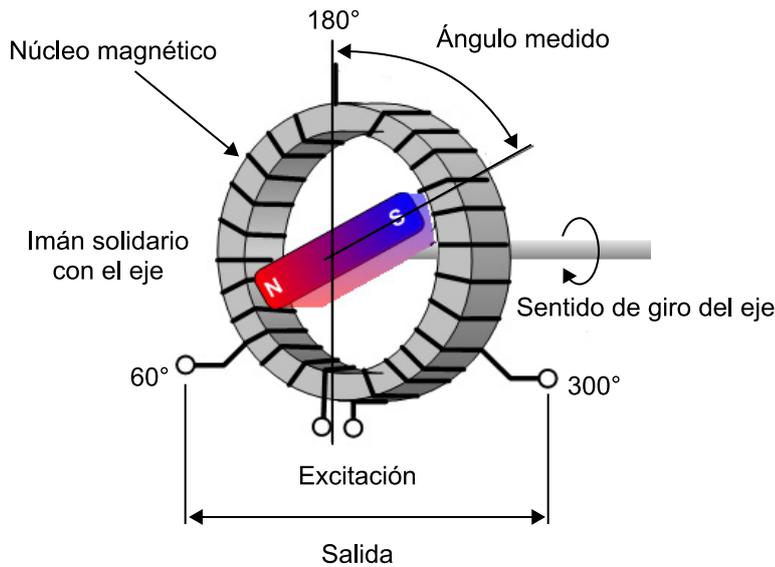


Este tipo de sensor presenta las ventajas de los *LVDT* si hablamos de sensibilidad y precisión, y también ofrecen un bajo coste, robustez y una medida pequeña. No obstante, presentan el inconveniente obvio que podemos observar en la figura 43: el ángulo de giro está limitado a un pequeño arco.

2) Por otro lado, el *magnesyn* es un imán solidario con el eje cuya posición queremos medir. Consta de un estator bobinado sobre un núcleo magnético con forma de toroide y de alta permeabilidad magnética. El sistema tiene distribuidas tres posiciones a diferentes tensiones situadas a 60°, 180° y 300°. La diferencia de potencial entre las presas ubicadas a 60° y 300° es proporcional al coseno del ángulo del imán respecto del punto ubicado a 180°.

Podemos observar la especial disposición del *magnesyn* en la figura 44.

Figura 44. Magnesyn



Las ventajas y los inconvenientes de este tipo de sensor son similares a los que presenta un sensor electromagnético. No obstante, el magnesyn ofrece como principal ventaja la ausencia de contactos móviles.

En conjunto, los **sensores inductivos** se utilizan bastante en el ámbito de la automoción para medir velocidades de rotación o detectar la posición angular de un determinado elemento. Su principal ventaja es el reducido coste y su simplicidad.

2.2.4. Codificadores de pulsos

Dentro del grupo de **codificadores de pulsos** o *encoders*, se incluye una amplia variedad de sensores con tipologías y tecnologías muy distintas y que presentan en general un rasgo común: **una salida digital que informa sobre la posición de un eje**.

Teniendo en cuenta el tipo de tecnología con la que se ha elaborado el *encoder*, encontramos los siguientes codificadores de pulsos.

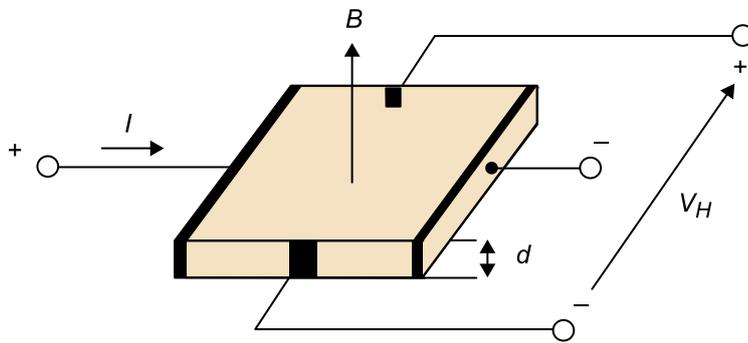
1) **Sistemas inductivos**: son aquellos sistemas que utilizan un detector de proximidad para contar los dientes metálicos de una rueda dentada solidaria al eje.

2) **Sistemas basados en el efecto Hall**: estos sistemas producen pulsos cada vez que un imán pasa por delante de un sensor Hall. El efecto Hall fue descubierto en 1879 por Edwin Herbert Hall, mientras trabajaba en su tesis doctoral.

En síntesis, Hall descubrió que cuando un conductor por el que circula una corriente eléctrica se sitúa en un campo magnético, se genera una tensión perpendicular en estos dos.

Podemos ver la ecuación matemática y el principio básico que define el efecto Hall en la ecuación 24 y en la figura 45, respectivamente:

Figura 45. Principio básico del efecto Hall



$$V_H = R_H \cdot I \cdot B / d \quad 4.24$$

Donde V_H es la diferencia de potencial en la salida (tensión Hall).

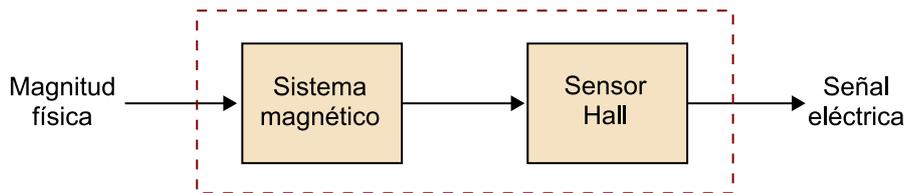
R_H es la constante de Hall.

I es la corriente eléctrica que circula a través de la lámina de material metálico o del semiconductor, de espesor d .

B es el campo magnético en el que se sitúa la lámina o el semiconductor, y resulta directamente proporcional a la corriente eléctrica e inversamente proporcional al espesor d de la lámina.

En la figura 46, vemos un diagrama de bloques con los diferentes elementos que conforman un dispositivo de medida de la posición angular basado en el efecto Hall.

Figura 46. Elementos de un dispositivo de medida de posición angular basado en el efecto Hall



3) Sistemas ópticos: en los sistemas ópticos, la medida de la posición angular se basa en un haz de luz entre un LED y un fotodiodo que se corta con una rueda dentada o con agujeros. De manera alternativa, también se puede producir o no reflexión sobre un disco en cuya superficie hay dibujadas líneas claras y oscuridades.

Hasta aquí nos hemos referido a una clasificación de los *encoders* o **codificadores de pulsos** teniendo en cuenta la tecnología.

Si por el contrario hacemos una segunda clasificación de los *encoders* desde el punto de vista de su aplicación, podemos agrupar este tipo de sensores en dos grupos.

a) **Sensores absolutos:** la inmensa mayoría de los sensores absolutos son de tipo óptico por reflexión sobre un disco en el que se dibuja el código Gray.

No tienen una resolución muy grande, pero son útiles para aplicaciones sencillas. En este tipo de sensores, para una misma posición siempre tendremos la misma salida.

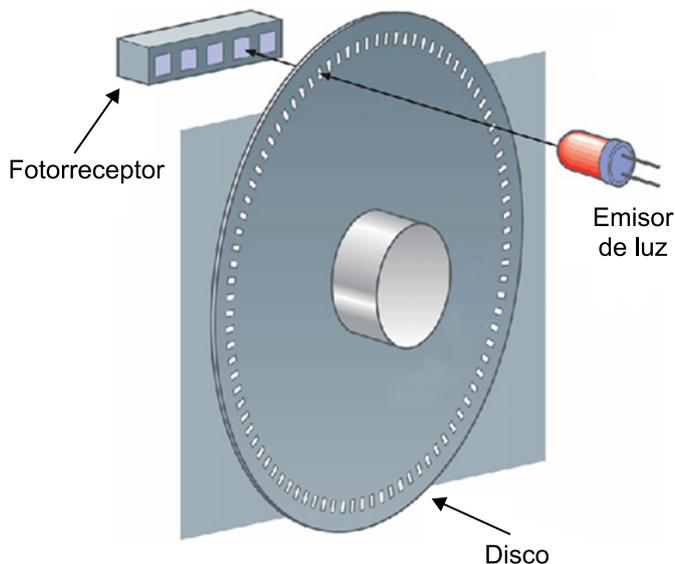
b) **Sensores relativos:** como su nombre ya indica, dada una posición de referencia la salida nos informará de un cambio de posición respecto de esta. A diferencia de los sensores absolutos, los relativos se pueden construir con cualquiera de las tecnologías mencionadas anteriormente para los codificadores, pese a que la mayoría sean también de tipo óptico. Su funcionamiento básico es muy sencillo, dado que contabilizan pulsos a partir de una determinada posición y el total indica la posición.

En general, a la hora de elegir un sensor de posición angular se suele tender hacia un dispositivo de tipo *encoder*, y generalmente óptico.

El motivo de esta elección consiste en que los *encoders* ópticos son económicos, de pequeñas dimensiones y poco peso (aspecto importante para no cargar demasiado el eje cuya velocidad de giro se quiere medir), y por lo tanto tienen una amplia oferta comercial.

Podemos ver un ejemplo gráfico sencillo de un *encoder* óptico en la figura 47.

Figura 47. *Encoder* óptico



El funcionamiento de este conjunto es muy sencillo. Cuando el sistema hace girar el eje solidario con el disco, el disco empieza un movimiento rotatorio y la luz pasa a través de cada uno de los agujeros que se interponen delante del mismo en el movimiento de giro. El fotorreceptor generará una señal eléc-

Código Gray

Código binario cuya principal característica consiste en que, dados dos números consecutivos cualesquiera del código, la diferencia entre los mismos es de un solo bit.

Código de Gray de 3 bits

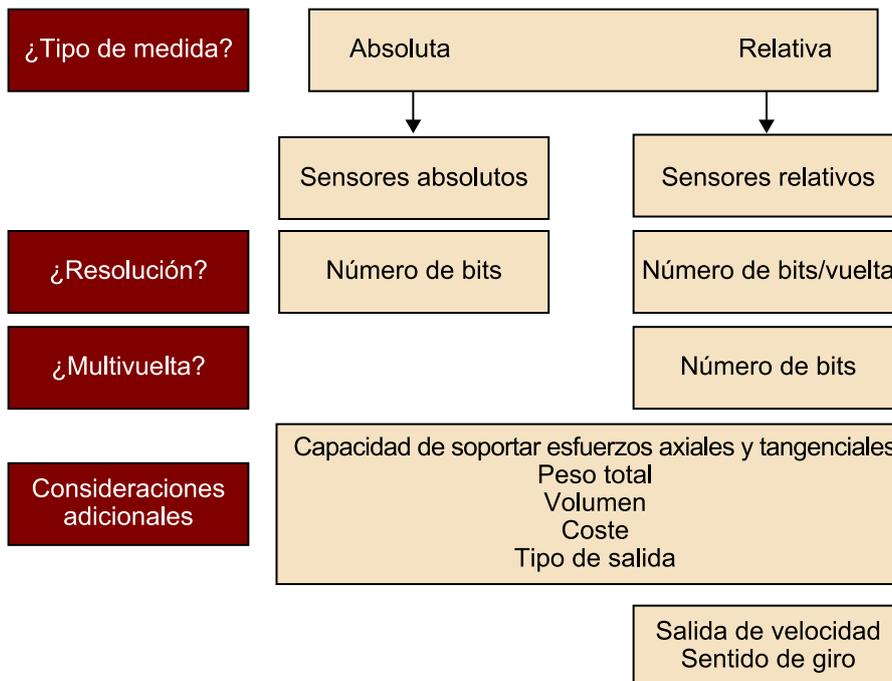
| b ₂ | b ₁ | b ₀ |
|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |

trica cada vez que incida luz sobre el mismo y un sistema contador podrá determinar el número de pulsos luminosos en función de las señales eléctricas generadas.

Esta información es enviada a un microprocesador que determinará las vueltas que ha dado el disco a partir del número de pulsos, así como la longitud recorrida, la velocidad y la nueva posición, que será proporcional al radio del disco. Sería el caso de un *encoder* capaz de contar un número superior al número de pulsos totales que es capaz de producir en una sola vuelta (es decir, 360°), por lo que se trataría de un dispositivo multivuelta.

A modo de resumen, y desde la óptica instrumental, la selección de un *encoder* desde el punto de vista de seleccionar un sensor de posición angular para una aplicación concreta es muy sencilla, dado que su salida es siempre de tipo digital. Podemos observar este resumen en la figura 48.

Figura 48. Resumen de los criterios que hay que tener en cuenta para la selección de un *encoder*



Resumen

En este módulo hemos hecho un repaso a los principales sensores de temperatura y posición, puesto que son dos de las variables físicas más importantes que hay que medir en el campo de la instrumentación electrónica.

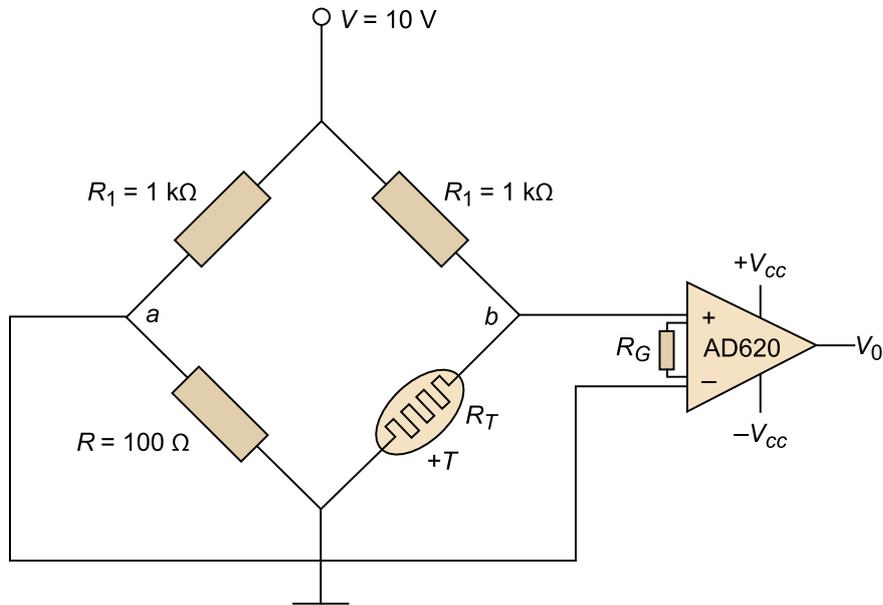
A lo largo del módulo se han presentado los diferentes tipos de sensores, el efecto en el que se basan para su funcionamiento, su modelo matemático, sus características más importantes y su campo de aplicación.

El campo de los sensores es muy extenso y abierto, por lo que alentamos a los estudiantes interesados en el tema a leer la bibliografía del módulo.

Ejercicios de autoevaluación

1. Sea el circuito de la figura 49, que es un ejemplo de sistema de medida de temperatura basado en un RTD.

Figura 49. Esquema de un sistema de medida de temperatura basado en un RTD



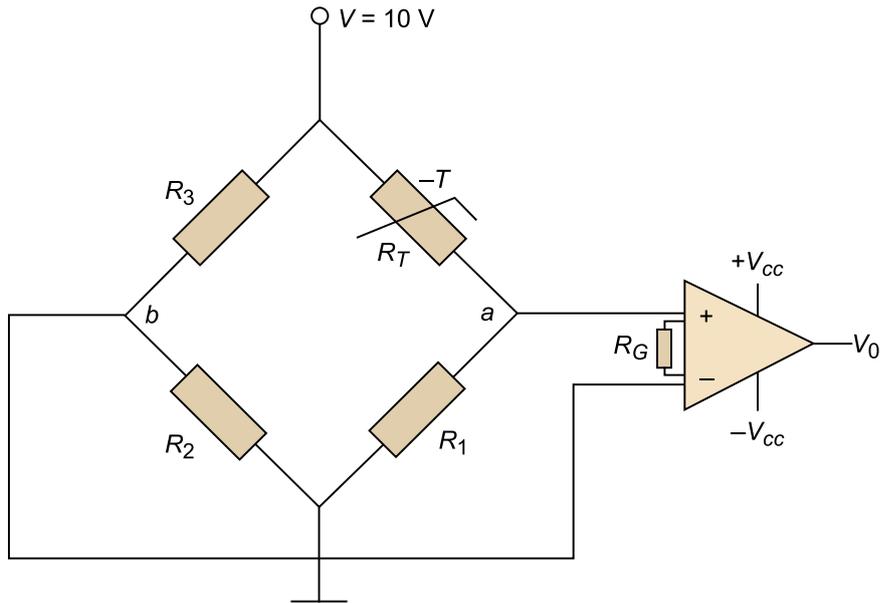
Si disponemos de un RTD de platino que tiene un coeficiente térmico de $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y valor de resistencia nominal (a $0 \text{ } ^\circ\text{C}$) de $R_0 = 100 \text{ } \Omega$, y queremos que nuestro sistema proporcione una tensión de entre 0 y 5 V cuando la temperatura varíe entre 0 y $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, determinad la expresión del valor de la tensión de salida del sistema. Representad la curva V_0 en función de la temperatura y discutid su linealidad.

2. Se quiere diseñar un termómetro clínico que sea capaz de medir la temperatura corporal desde $32 \text{ } ^\circ\text{C}$ hasta $42 \text{ } ^\circ\text{C}$, utilizando un NTC de $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ de la casa Vishay BCcomponents.

Utilizando una topología en puente como la presentada en la figura 51, determinad los valores para todos los elementos del circuito para tener valores de salida entre -5 V y $+5 \text{ V}$. Considerad que el amplificador es el mismo que en el ejercicio de autoevaluación anterior, y que la sensibilidad en el punto de equilibrio viene dada por la ecuación siguiente.

$$S(T) = \frac{V}{B} \left(\frac{B^2}{4T^2} - 1 \right) \quad 4.32$$

Figura 51. Esquema de un termómetro clínico basado en un NTC



Solucionario

Ejercicios de autoevaluación

1. En primer lugar analizamos de manera cualitativa el circuito que nos proponen, para entender el porqué de sus valores. Observemos que nos proponen la utilización de un puente de Wheatstone para diseñar el sistema de medida, en el que observamos que la resistencia de compensación R es igual a R_0 para el valor de temperatura en el cual el puente tiene que estar equilibrado, es decir, a 0°C . Por lo tanto, $R = 100\ \Omega$.

Para elegir las resistencias R_1 del puente, si queremos tener un error de linealidad pequeño es necesario que sean bastante superiores a la resistencia R . Observamos que, en el circuito propuesto, el valor de R_1 es 10 veces superior al valor de R : $R_1 = 10 R = 1\ \text{k}\Omega$.

En lo que respecta al amplificador que nos presentan, el AD620 es un amplificador de instrumentación monolítico con las características mostradas en el *datasheet* siguiente: http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/analogdevices/105505445AD620_e.pdf.

Observamos en el *datasheet* que su ganancia viene determinada por el valor de la resistencia R_G y, por lo tanto, la tendremos que determinar nosotros de manera conveniente a partir de la expresión que se nos indica y que reproducimos en la ecuación 26:

$$G = 1 + \left(\frac{49,4k}{R_G} \right) \quad 4.25$$

a) Pasamos a continuación a calcular el valor de la tensión de salida V_0 . Recordemos que el valor de R_T es:

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T) = 100(1 + \alpha(T - 0)) = 100(1 + \alpha T) \quad 4.26$$

Según la ecuación 4, tenemos:

$$V_b - V_a = V \cdot \frac{R_0(1 + \alpha T)}{R_0(1 + \alpha T) + R_1} - V \cdot \frac{R}{R_1 + R} \quad 4.27$$

Observemos que puesto que el puente debe estar equilibrado en $T = 0^\circ\text{C}$, entonces a esta temperatura tendremos $V_b - V_a = 0$ y, por lo tanto, se cumple que $\frac{R_0}{R_0 + R_1} = \frac{R}{R_1 + R}$, tal y como sucede en nuestro circuito.

Si en la ecuación anterior, por lo tanto, tomamos $R = R_0$ y recordamos que $R_1 = 10 R$, llegamos a:

$$V_b - V_a = V \cdot \frac{10\alpha T}{(10+1) \cdot (10+1+\alpha T)} = V \cdot \frac{0,0385 T}{11 \cdot (11+0,00385 T)} = \frac{0,385 T}{11 \cdot (11+0,00385 T)} \quad 4.28$$

El amplificador de instrumentación amplificará con una ganancia G esta tensión diferencial, por lo que la tensión final de salida será:

$$V_0 = G(V_b - V_a) = \left[1 + \left(\frac{49,4k}{R_G} \right) \right] \left[\frac{0,385 T}{11 \cdot (11+0,00385 T)} \right] \quad 4.29$$

Para conseguir los valores de tensión pedidos en la salida V_0 , necesitaremos que para $T = 100^\circ\text{C}$ tengamos $V_0 = 5\ \text{V}$. Por lo tanto, el valor de R_G lo encontraremos como:

$$5 = \left[1 + \left(\frac{49,4k}{R_G} \right) \right] 0,307 \quad 4.30$$

Es decir:

$$R_G \approx 3.200 \Omega \quad 4.31$$

b) Para hablar del error de linealidad, tenemos que ver lo bien que la expresión de V_0 se aproxima a una recta. Por ejemplo, utilizando Matlab para representarlo, haríamos:

```
% Parámetros del sistema:
G = 16.4375;           % ganancia amplificador
a = 0.00385;          % coeficiente alfa

contador = 0;
for T = 0:0.1:100
    contador = contador+1;
    Vo(contador)=G*100*a*T/(11*(11+a*T));% ecuación de la salida Vo
end

% representación gráfica
figure
plot(0:0.1:100,Vo,'.')

% ajustamos ahora una recta a los puntos de la gráfica
T = 0:0.1:100;
p = polyfit(T,Vo,1);% polinomio de primer orden

% calculamos ahora los puntos de la recta
f = polyval(p,T);
figure
plot(T,Vo, '.r',T,f, '.b')

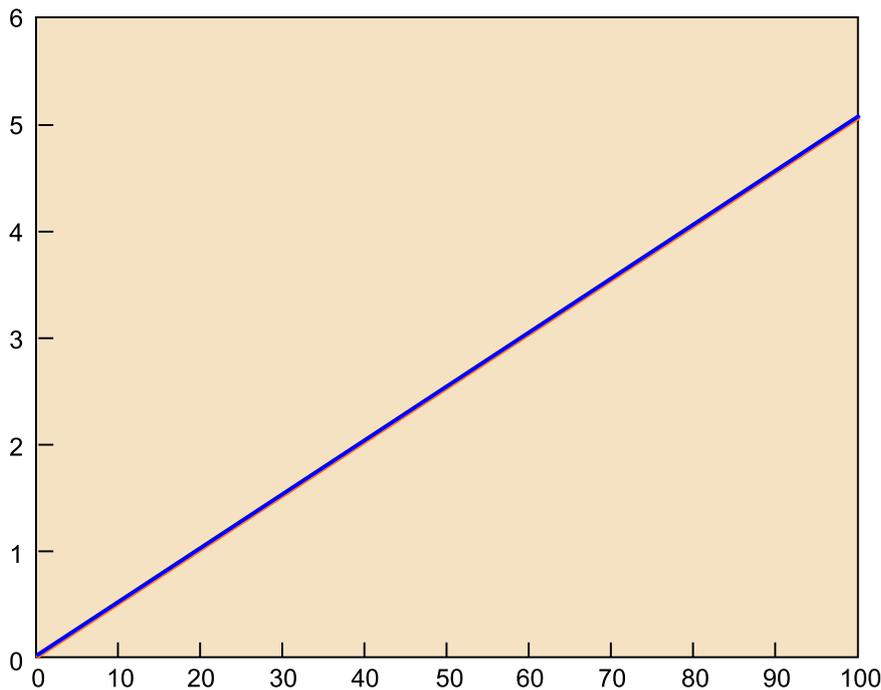
% calculamos la correlación entre las dos gráficas
c = corr(Vo',f');
% calculamos el error cuadrático medio
error = mean((Vo-f).^2);

% error de linealidad
[valor, posicion] = max(abs(Vo-f));% buscamos el punto donde el error es mayor
err_lin = 100*valor/(Vo(end)-Vo(1));% ponemos el error en % sobre el margen
```

El error de linealidad, calculado como $\text{err_lin} = |V_{o_real} - V_{o_lineal}|_{\text{máx}}$ y expresado en % sobre el margen de valores de V_o , es $\text{err_lin} = 100 \cdot |0 - 0,0292| / 5,0532 = 0,58\%$.

La relación es prácticamente lineal, con un coeficiente de correlación de valor 1 y un error cuadrático medio de $1,6853 \cdot 10^{-4}$. Las representaciones gráficas, prácticamente idénticas, se muestran en la figura 50.

Figura 50. Representación de la relación temperatura-tensión. En rojo, la curva medida. En azul, la recta de regresión



2. La idea del diseño mediante una estructura de puente de Wheatstone es la de dimensionar el valor de R_1 para garantizar la máxima linealidad, y los de R_2 y R_3 para determinar el cero del sistema de medida (el punto en el que $V_a = V_b$).

Para conseguir la máxima linealidad (podéis ver el criterio de linealización de la curva R/T del subapartado 1.3.2 de este módulo didáctico), tendremos que situar el punto de la curva de inflexión de la tensión V_a en el centro del campo de medida. Puesto que medimos entre 32 °C y 42 °C, este punto estará en 37 °C = 310 K. Para que esto sea así, necesitaremos que la resistencia R_1 valga:

$$R_1 = \frac{B-2T}{B+2T} R_T = \frac{B-2T}{B+2T} R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad 4.33$$

Poniendo valores, algunos de estos extraídos del *datasheet*, tendremos:

$$R_1 = \frac{3.977 - 2 \cdot 310}{3.977 + 2 \cdot 310} 10.000 e^{3.977\left(\frac{1}{310} - \frac{1}{298}\right)} = 4.360 \Omega \quad 4.34$$

Para calcular los valores de las resistencias R_2 y R_3 , tenemos que conseguir que produzcan la misma tensión que la otra rama del puente cuando la temperatura llegue a un valor determinado de temperatura. Elegimos esta temperatura, una vez más, como la temperatura media del margen que queremos cubrir, es decir, 37 °C, de modo que a esta temperatura tendremos el puente en equilibrio y $V_0 = 0$ V:

$$R_2 = R_1 = 4.360 \Omega \quad 4.35$$

$$R_3 = R_T|_{37^\circ\text{C}} = 5.970 \Omega \quad 4.36$$

La sensibilidad del sistema en el punto de equilibrio la calcularemos con la ecuación que nos han dado:

$$S(T) = \frac{V}{B} \left(\frac{B^2}{4T^2} - 1 \right) = \frac{10}{3.977} \left(\frac{3.977^2}{4 \cdot 310^2} - 1 \right) \approx 101 \text{ mV/K} \quad 4.37$$

Por lo tanto, a la temperatura de $310\text{ K} = 37\text{ °C}$, teniendo en cuenta el resultado anterior para la sensibilidad, tendremos:

$$V_a - V_b = 0,101(T - 310) \quad 4.38$$

La tensión más alta de salida la tendremos para $T = 42\text{ °C} = 315\text{ K}$, donde:

$$V_a = 10 \frac{R_1}{R_1 + R_T} = 10 \frac{4.360}{4.360 + 10.000 \cdot e^{3.977(\frac{1}{315} - \frac{1}{298})}} = 4,726\text{ V} \quad 4.39$$

Podemos calcular la tensión V_b a esta temperatura a partir de la ecuación anterior:

$$V_b = V_a - 0,101(T - 310) = 4,726 - 0,101(315 - 310) = 4,221\text{ V} \quad 4.40$$

En este caso, la tensión de salida será:

$$V_0 = G(V_a - V_b) = G(4,726 - 4,221) = G \cdot 0,505 \quad 4.41$$

Donde G es la ganancia del amplificador monolítico que fijaremos a partir de la resistencia externa R_G al valor que nos interese.

La tensión más baja de la salida la tendremos para $T = 32\text{ °C} = 305\text{ K}$:

$$V_a = 10 \frac{4.360}{4.360 + 10.000 \cdot e^{3.977(\frac{1}{305} - \frac{1}{298})}} = 3,720\text{ V} \quad 4.42$$

$$V_b = 3,720 - 0,101(305 - 310) = 4,225\text{ V} \quad 4.43$$

En este caso, la tensión de salida será:

$$V_0 = G(3,720 - 4,225) = -G \cdot 0,505 \quad 4.44$$

Por lo tanto, y suponiendo que el amplificador monolítico es el mismo del ejercicio anterior, determinaremos el valor de la ganancia G y de la resistencia R_G a partir de la expresión:

$$G = 1 + \left(\frac{49,4k}{R_G} \right) \quad 4.45$$

Puesto que debemos tener $G \cdot 0,505 = 5$, el valor de G será:

$$G = \frac{5}{0,505} = 9,901 \quad 4.46$$

Y por lo tanto:

$$R_G = \frac{49400}{8,901} = 5.550\ \Omega \quad 4.47$$

Glosario

atmósfera inerte (neutra) *f* Atmósfera que contiene gases inertes que no reaccionan con otras sustancias.

atmósfera oxidante *f* Atmósfera que contiene de manera predominante moléculas de oxígeno, lo cual provoca que se dé el efecto de oxidación.

atmósfera reductora *f* Atmósfera falta de oxígeno. Cualquier proceso que pase en estas condiciones implica que algunos componentes pueden perder oxígeno, mientras que otros de mayor afinidad lo incorporan.

bolómetro *m* Termómetros de resistencia (RTD o NTC) configurados para medir radiación de una manera similar a la de las termopilas.

codificador axial *m* sin. **codificador rotativo**
sin. **generador de impulsos**

codificador rotativo *m* Dispositivo electromecánico que se utiliza para convertir la posición angular de un eje a un código digital.
sin. **codificador axial**
sin. **generador de impulsos**
en encoder

efecto piroeléctrico *m* Efecto análogo al piezoeléctrico pero, en lugar de que aparezcan cargas eléctricas cuando se deforma un material, se producen cargas superficiales en una determina dirección cuando el material experimenta un cambio en su temperatura.

emisividad *f* Cociente entre la energía radiada por un cuerpo a una cierta temperatura T y la energía radiada por un cuerpo negro a la misma temperatura T .

encoder *m* Véase **codificador rotativo**.

equilibrio térmico *m* Situación en la que la temperatura dentro de un sistema es uniforme.

fotodiodo *m* Semiconductor construido con una unión PN , sensible a la incidencia de luz visible o infrarroja.

fotorresistencia *f* Componente electrónico que tiene la característica de disminuir su resistencia en función de la intensidad de la luz incidente.
sigla LDR
en light-dependent resistor

generador de impulsos *m* sin. **codificador rotativo**
sin. **codificador axial**

inercia térmica *f* Propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la que lo cede o absorbe del entorno.

instrumentación industrial *f* Grupo de elementos que sirven para medir, convertir, transmitir, controlar o registrar variables de un proceso para optimizar los recursos utilizados en el mismo.

LDR *m* Véase **fotorresistencia**.

light-dependent resistor *m* Véase **fotorresistencia**.

linear variable differential transformer *m* Véase **transformador diferencial lineal**.

LVDT *m* Véase **transformador diferencial lineal**.

potenciómetro lineal *m* Transductor de distancia y posición con contacto y rozamiento.

resistance temperature detector *m* Véase **resistencias metálicas**.

resistencias metálicas *f pl* Detectores de temperatura resistivos.
sigla RTD
en resistance temperature detector

resistividad *f* Capacidad que tiene un material de oponerse a la circulación de la corriente eléctrica.

RTD *m* Véase resistencias metálicas.

sensor de radiación *m* Sensor que lleva a cabo sus medidas a partir de la energía que emiten todos los materiales, en función de su temperatura, en la región del espectro electromagnético infrarrojo.

sensor de silicio *m* Sensor basado en la relación entre la tensión base-emisor (V_{BE}) y la corriente de colector (I_C) de un transistor de unión bipolar *BJT*.

sensor piroeléctrico *m* Sensor que basa su funcionamiento en el efecto piroeléctrico.

sintetización *f* Proceso que permite unir, por difusión en estado sólido, partículas pequeñas de un material.

telémetro láser *m* Dispositivo que permite medir distancias desde un observador a un objetivo. Su funcionamiento se basa en la medida del tiempo que tarda un pulso láser en llegar a un objetivo y volver. Los telémetros láser permiten medidas muy precisas de distancias no excesivamente largas (del orden del centímetro hasta distancias de 20 metros) y con condiciones de poca visibilidad.

termistor *m* Sensor de temperatura de tipo resistivo. Se distinguen dos tipos: los *NTC* (*negative temperature coefficient*), que se caracterizan por tener un coeficiente de temperatura negativo (es decir, su resistencia disminuye al aumentar la temperatura); y los *PTC* (*positive temperature coefficient*), que se caracterizan por tener un coeficiente de temperatura positivo, es decir, su resistencia aumenta al aumentar la temperatura.

termopar *m* Sensor de temperatura constituido por dos metales diferentes. Produce una tensión proporcional a la diferencia de temperaturas entre los puntos de unión de los dos metales. Los termopares se utilizan como sensores de temperatura en sectores tan diferentes como por ejemplo la automoción, la industria aeroespacial, la biotecnología o la electrónica.

termopila *f* Agrupación de decenas de termopares conectados en serie para aumentar la sensibilidad de todo el conjunto y medir la temperatura de un objeto.

transformador diferencial lineal *m* Sensor electrónico basado en efectos electromagnéticos y utilizado en la medida de desplazamientos. Presenta unas buenas características de linealidad, sensibilidad, rápida respuesta y gran resolución.

sigla LVDT

en linear variable differential transformer

Bibliografía

Dunn, W. C. (2005). *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. Nueva York: McGraw-Hill.

Fischer-Cripps, T. (2002). *Part 1 Transducers – 1.2 Temperature*. En: *Newnes Interfacing Companion: Computers, Transducers, Instrumentation and Signal Processing*. Oxford: Newnes, Elsevier Science.

Luecke, J. (2004). *Chapter 3: Sensors*. En: *Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications: Using the TI MSP430 Microcontroller*. Oxford: Newnes, Elsevier.

McMillan, G. K.; Considine, D. M. (1999). *Section 4: Process variables-Field instrumentation*. En: *Process/Industrial Instruments and Controls Handbook*. Nueva York: McGraw-Hill.

Park, J.; Mackay, S. (2003). *Chapter 2: Analog and digital signals*. En: *Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems*. Oxford: Newnes, Elsevier.

US Department of Energy (2010). *DOE Fundamentals Handbook: Instrumentation and Control: Volumes 1 and 2*.

Webster, J. G. (1999). *Section II Spatial Variables Measurement*. En: *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook CRCnetBASE 1999*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Wilson, J. (2004). *Sensor Technology Handbook*. Oxford: Newnes, Elsevier.

