
Sensores y actuadores

PID_00247316

Francisco Vázquez Gallego

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 2 horas



Universitat
Oberta
de Catalunya

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
1. Sensores analógicos moduladores	6
1.1. Resistivos	6
1.1.1. Sensores piezorresistivos (presión, fuerza)	6
1.1.2. Potenciómetros (distancia, posición, ángulo)	7
1.1.3. Sensores de temperatura resistivos	7
1.1.4. Termistores	8
1.1.5. Fotorresistencias	9
1.1.6. Higrómetros resistivos	9
1.1.7. Sensores resistivos para detección de gases	9
1.1.8. Magnetorresistencias	10
1.2. Capacitivos	10
1.2.1. Medida de distancia y posición	10
1.2.2. Medida de presión, fuerza y aceleración	11
1.2.3. Medida de humedad, análisis químico y nivel de fluidos	11
1.3. Inductivos	11
1.3.1. Medida de distancia, posición y espesores	12
1.3.2. Medida de presión, fuerza y aceleración	12
1.4. Transformadores diferenciales	12
1.5. Electromagnéticos	13
2. Sensores analógicos generadores	14
2.1. Piezoeléctricos	14
2.2. Piroeléctricos	14
2.3. Termopares	15
2.4. Electrodo de ion selectivo	15
3. Sensores digitales	17
3.1. <i>Encoder</i> de posición incremental	17
3.2. <i>Encoder</i> de posición absoluto	18
4. Otros tipos de sensores	19
4.1. Sensores basados en uniones semiconductoras	19
4.1.1. Sensores de temperatura	19
4.1.2. Sensores de luz	19
4.1.3. Sensores magnéticos	20
4.2. Sensores de imagen CCD	20
4.3. Sensores basados en radiación	20
5. Actuadores	22

5.1.	Actuadores electromecánicos.....	22
5.1.1.	Relés	22
5.1.2.	Motores	22
5.1.3.	Solenoides	22
5.1.4.	Electroválvulas.....	23
5.2.	Actuadores electotérmicos	23
5.2.1.	Células Peltier	23
5.2.2.	Calefactores.....	23
Bibliografía	24

Introducción

Los sensores y actuadores son las interfaces del sistema ciberfísico con el mundo real. Los sensores permiten adquirir las variaciones de las magnitudes físicas y convertirlas en señales eléctricas, y los actuadores permiten convertir señales eléctricas en acciones o variaciones de magnitudes físicas. Las magnitudes o señales físicas pueden ser de tipo mecánico, térmico, magnético, eléctrico, óptico y químico. El objetivo de este material consiste en describir el principio de funcionamiento de los diversos tipos de sensores y actuadores existentes.

Para realizar el estudio de los diferentes tipos de sensores se suele considerar la magnitud física a medir como criterio de clasificación. Sin embargo, debido a que el número de magnitudes físicas es demasiado grande, y para facilitar el estudio de los acondicionadores de señal asociados, en este material se clasifican los sensores atendiendo a las características de su señal de salida (sensores analógicos y sensores digitales) y al parámetro eléctrico que varíe al producirse un cambio en la magnitud física (resistencia, capacidad, tensión, corriente, etc.). En los sensores analógicos, la salida es de tipo analógico y requieren una cadena de acondicionamiento y un convertidor analógico-digital para conectarlos al procesador del sistema ciberfísico. En los sensores digitales, la salida es de tipo digital y no requieren conversión analógico-digital.

Los sensores analógicos se pueden clasificar en dos grupos dependiendo de si necesitan ser alimentados con una fuente de energía auxiliar [Pallás Areny (2005)]. Se denominan *sensores analógicos moduladores* aquellos que modulan la alimentación auxiliar a partir de las variaciones de la magnitud física de entrada. Se denominan *sensores analógicos generadores* aquellos que no requieren una fuente de energía auxiliar para su funcionamiento y la señal eléctrica de salida se genera directamente a partir de la energía de la magnitud física. Los sensores analógicos moduladores se presentan en el apartado 1, los sensores analógicos generadores se presentan en el apartado 2, y los sensores digitales se presentan en el apartado 3.

En el apartado 4 se introducen otros tipos de sensores basados en diferentes técnicas de detección, entre las que destacan: el uso de uniones semiconductoras; los sensores de imagen CCD; y la aplicación de una señal o radiación óptica, electromagnética o acústica.

Finalmente, los principales actuadores de tipo electromecánico y electrotérmico se describen en el apartado 5.

1. Sensores analógicos moduladores

Los sensores analógicos moduladores se clasifican según sea el parámetro eléctrico que varía a partir de los cambios en la magnitud física de entrada [Fraden (2015)]. En los siguientes subapartados, se presentan los diferentes tipos de sensores analógicos moduladores: resistivos, capacitivos, inductivos, electromagnéticos y transformadores.

1.1. Resistivos

Los sensores resistivos se basan en la variación de la resistencia de un conductor (o semiconductor) al producirse un cambio en la magnitud física de entrada. Por tanto, los sensores resistivos funcionan como una resistencia variable que cumple la siguiente expresión:

$$R = R_o + \Delta R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

donde R_o es la resistencia nominal del sensor, ΔR es la variación que experimenta la resistencia del sensor cuando varía la magnitud física, l y S son la longitud y la sección del conductor respectivamente, suponiendo que la geometría del sensor sea uniforme. La variación de la resistencia se puede producir debido a un cambio en la resistividad del material, a un cambio en la geometría o a ambas cosas, cambios provocados por el efecto de la variación en la magnitud física.

En los siguientes subapartados, se describen los principales sensores resistivos utilizados para medir magnitudes físicas de tipo mecánico, térmico, óptico, químico y magnético.

1.1.1. Sensores piezorresistivos (presión, fuerza)

Los sensores piezorresistivos (o galgas extensiométricas) se basan en la variación de la resistencia de un material cuando es sometido a una presión o esfuerzo mecánico. De manera simplificada, la variación ΔR en la resistencia del sensor ocurre cuando se aplica una presión mecánica P (en N/m^2) a lo largo del eje de la resistencia.

$$\Delta R = R_o \alpha P \quad (2)$$

donde R_o es la resistencia nominal y α es el coeficiente piezorresistivo (en m^2/N) del material del sensor. La presión aplicada es $P = F/S$, donde F es la fuerza que actúa sobre el piezorresistor y S es el área de la sección transversal sobre la que actúa. El coeficiente piezorresistivo α suele tener un valor negativo, por lo que el producto αP produce una disminución de R para la compresión y un aumento de R para el estiramiento.

1.1.2. Potenciómetros (distancia, posición, ángulo)

Los potenciómetros son resistencias variables con un contacto fijo y un contacto deslizante o giratorio. Suponiendo que la resistencia sea uniforme a lo largo de todo el potenciómetro, la resistencia entre el contacto fijo y el contacto móvil será proporcional al recorrido mecánico del contacto móvil.

Existen dos tipos de potenciómetros: los que admiten movimientos lineales y los que admiten movimientos circulares. Los potenciómetros de movimiento lineal se utilizan para medir distancias y la posición lineal. Los *joysticks* o palancas de mando son un ejemplo de sensor basado en dos potenciómetros lineales que determinan la posición de un punto en un plano. Cada potenciómetro mide la posición lineal del punto en uno de los ejes (x , y). Los potenciómetros de movimiento circular se utilizan para medir la posición angular. Existen algunos modelos cuya resistencia varía de forma no lineal con el desplazamiento. Por ejemplo, la resistencia puede variar según una función senoidal de la posición angular del contacto giratorio.

1.1.3. Sensores de temperatura resistivos

Los sensores de temperatura resistivos, también denominados RTD*, se basan en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Dicha variación se puede expresar de la forma siguiente:

$$R = R_o (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2 + \alpha_3 \Delta T^3 + \dots + \alpha_n \Delta T^n) \quad (3)$$

donde R_o es la resistencia nominal a la temperatura de referencia (0°C), ΔT es el incremento de temperatura respecto a la referencia, y α_i son los coeficientes de temperatura, que dependen de las características del material del sensor.

Generalmente, el valor de α_1 es mucho mayor que los valores de α_i con $i \geq 2$. Por tanto, la expresión anterior se puede aproximar como

$$R = R_o (1 + \alpha \Delta T) \quad (4)$$

* *Resistance temperature detector*, en inglés.

Los fabricantes de sensores de temperatura resistivos proporcionan los valores de R_o , α y los márgenes de medida del sensor. El platino es el material que ofrece mayor margen lineal y mejores prestaciones. Por ejemplo, la sonda Pt100 es uno de los sensores más comunes fabricados con platino. Presenta una $R_o = 100 \Omega$, $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} K^{-1}$, y un margen lineal entre $-200^\circ C$ y $+850^\circ C$.

Los sensores de temperatura resistivos presentan varias limitaciones. En primer lugar, no pueden utilizarse para medir temperaturas cercanas o superiores a la temperatura de fusión del conductor. En segundo lugar, el calentamiento del sensor producido por el paso de la corriente introducida por el circuito de acondicionamiento de señal puede provocar errores en la medida. Por último, la necesidad de un comportamiento lineal limita los márgenes de medida del sensor y el tipo de material que se debe utilizar.

1.1.4. Termistores

Los termistores, o *thermally sensitive resistors*, son resistencias variables con la temperatura que se fabrican con material semiconductor, en lugar de material conductor como los RTD.

Los termistores se clasifican de acuerdo con el signo de su coeficiente de temperatura. Si el coeficiente es negativo, se denominan NTC*, y si es positivo se denominan PTC**. En los NTC la resistencia disminuye al aumentar la temperatura, y en los PTC la resistencia aumenta con la temperatura. La resistencia de los NTC presenta una dependencia exponencial con la temperatura, tal como se muestra a continuación:

$$R = R_o e^{B(1/T - 1/T_o)} \quad (5)$$

donde R_o es la resistencia nominal a la temperatura T_o de referencia, T es la temperatura a la cual se encuentra el sensor, y B es la temperatura característica o índice de sensibilidad térmica del material. Estos parámetros son proporcionados por el fabricante del sensor.

La principal ventaja de los termistores respecto al resto de sensores de temperatura es su sensibilidad. 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 en márgenes de temperatura grandes. Para linealizar la curva de la resistencia del sensor, se suele utilizar una resistencia conectada en paralelo al NTC, de modo que el punto de inflexión de la nueva curva linealizada esté en el centro del margen de temperaturas que se quiere medir.

Los NTC pueden medir temperaturas en el margen de $-100^\circ C$ a $+500^\circ C$, y con algunos materiales se podría llegar a los $+1.000^\circ C$. Los valores de resistencia nominal varían entre los $0,5 \Omega$ y $100 M\Omega$.

* *Negative temperature coefficient*, en inglés.
 ** *Positive temperature coefficient*, en inglés.

1.1.5. Fotorresistencias

Las fotorresistencias, también denominadas LDR*, se basan en la variación de la resistencia de un semiconductor por efecto fotoeléctrico. Al incidir una radiación óptica en el sensor, disminuye la resistencia. La relación entre la resistencia del LDR y el nivel de luz incidente es no lineal, y suele expresarse de la forma siguiente:

$$R = AE^{-\alpha} \quad (6)$$

donde A y α dependen de las características del material, siendo $0,5 < \alpha < 0,9$, y E es la densidad superficial de energía recibida en el sensor (expresada en luxes). Los valores típicos de resistencia de un LDR pueden variar entre 10Ω con luz brillante y $1 \text{ M} \Omega$, o más, en la oscuridad.

Los LDR son muy sensibles a la temperatura y tienen una respuesta espectral muy estrecha. Por tanto, es necesario hacer una buena elección del sensor según sea la longitud de onda que se ha de detectar. Además, los tiempos de respuesta del sensor son muy diferentes al aumentar o reducir el nivel de luz. Cuando aumenta el nivel de luz, el LDR tarda unos milisegundos en disminuir su resistencia. Sin embargo, cuando se reduce el nivel de luz, el LDR tarda varios segundos en aumentar su resistencia.

1.1.6. Higrómetros resistivos

Los higrómetros resistivos, también llamados humistores, se basan en la variación de la resistencia de un conductor al producirse un cambio en la humedad relativa. Al aumentar el contenido de vapor de agua, se produce una disminución de la resistencia. La relación entre la humedad relativa y la resistencia es no lineal, y suele aproximarse con una función exponencial.

1.1.7. Sensores resistivos para detección de gases

Los sensores de gases están compuestos de óxidos metálicos, generalmente de estaño (S_nO_2). Se utilizan para la detección de un buen número de gases, como oxígeno, propano, metano, hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, etc. La resistencia del sensor disminuye al aumentar la concentración de gas. La relación entre la resistencia del sensor y el nivel de concentración C del gas es no lineal, y suele expresarse de la forma siguiente:

$$R = KC^{-a} \quad (7)$$

donde K y a son constantes que dependen del material.

* *Light dependent resistor,*
en inglés.

El principal inconveniente de los sensores de gas es la fuerte dependencia con la temperatura y la humedad. La temperatura afecta a la sensibilidad, por lo que se requiere un circuito de compensación de temperatura, y la humedad causa una reducción en la resistencia del sensor.

1.1.8. Magnetorresistencias

Las magnetorresistencias se basan en la variación de la resistencia de un conductor por el que circula una corriente eléctrica al aplicar un campo magnético. Dependiendo de la dirección del campo magnético, en el conductor se produce una reducción de la corriente al ser desviados algunos electrones de su trayectoria. La relación entre la resistencia y el campo magnético externo es cuadrática, y suelen utilizarse técnicas de linealización. Las magnetorresistencias tienen mayor sensibilidad, mayor margen de temperatura y mayor margen de frecuencias que los sensores de efecto Hall.

1.2. Capacitivos

Los sensores capacitivos son dispositivos en los que la magnitud física que hay que medir provoca un cambio en su geometría o en las características de un material dieléctrico, con el consiguiente cambio en la capacidad del sensor. Por tanto, de manera simplificada, los sensores capacitivos funcionan como un condensador variable que cumple la siguiente expresión:

$$C = C_o + \Delta C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (8)$$

donde C_o es la capacidad nominal del sensor, ΔC es la variación que experimenta la capacidad del sensor al variar la magnitud física, S es la sección de las placas del condensador, d es la distancia entre placas, ε_0 es la constante dieléctrica del vacío, y ε_r es la constante dieléctrica relativa del material entre placas. Cualquier cambio producido por la magnitud física en las variables de la ecuación (8) puede emplearse para realizar la medida.

Las aplicaciones de medida de los sensores capacitivos son muy diversas y dependen básicamente de la geometría y la disposición de las placas del condensador y de la colocación del dieléctrico. A continuación, se describen las principales aplicaciones de medida de los sensores capacitivos.

1.2.1. Medida de distancia y posición

La medida de desplazamiento es una aplicación típica de los sensores capacitivos. Suelen utilizarse para medir la distancia a la que se encuentra un objeto sin necesidad de contacto físico. Pueden medir distancias inferiores a 1 mm y hasta 100 mm. Se

pueden aplicar con objetos metálicos y también con materiales dieléctricos como madera, plástico, vidrio, etc. Presentan una elevada precisión y estabilidad, y no se ven afectados por la temperatura o los campos magnéticos.

1.2.2. Medida de presión, fuerza y aceleración

Los sensores capacitivos pueden utilizarse para medir cualquier magnitud física que pueda convertirse en un desplazamiento, como pueden ser la presión, la fuerza o la aceleración. Los acelerómetros capacitivos son menos susceptibles al ruido y a los cambios de temperatura; por lo general, disipan menos energía, y pueden tener anchos de banda más grandes que los sensores piezoeléctricos y los piezorresistivos.

1.2.3. Medida de humedad, análisis químico y nivel de fluidos

La variación de la constante dieléctrica en los sensores capacitivos suele aplicarse para medir la humedad relativa, para realizar el análisis químico de mezclas de dos fluidos con una constante dieléctrica muy diferente, y para determinar el nivel de líquidos en el interior de un recipiente.

1.3. Inductivos

Los sensores inductivos son dispositivos en los que la magnitud física que hay que medir provoca un cambio en su geometría o en las características de un material ferromagnético, con el consiguiente cambio en la inductancia del sensor. Por tanto, de manera simplificada, en un sensor inductivo construido con una bobina de sección S con N vueltas en torno a un material ferromagnético, y con una longitud l mucho mayor que sus dimensiones transversales, la inductancia variable del sensor se puede aproximar con la siguiente expresión:

$$L = L_o + \Delta L = \mu_0 \mu_r \frac{S}{l} N^2 \quad (9)$$

donde L_o es la inductancia nominal del sensor, ΔL es la variación que experimenta la inductancia al variar la magnitud física, μ_0 es la permeabilidad del vacío, y μ_r es la permeabilidad relativa del núcleo de la bobina. Cualquier cambio producido por la magnitud física en las variables de la ecuación (9) puede emplearse para realizar la medida.

Entre las ventajas de los sensores inductivos, destacan su alta sensibilidad y la poca afectación de la humedad ambiental en su funcionamiento. Las limitaciones de los sensores inductivos son las siguientes: son muy sensibles a campos magnéticos parásitos, la medida de desplazamiento está limitada a distancias muy cortas, funcionan en

un margen de temperaturas muy reducido, y pueden ser una fuente de interferencias para otros dispositivos cercanos.

Las aplicaciones de medida de los sensores inductivos son muy diversas. Dependen básicamente de la geometría y la disposición de la bobina y el material ferromagnético, y de su permeabilidad relativa. A continuación, se describen las principales aplicaciones de medida de los sensores inductivos.

1.3.1. Medida de distancia, posición y espesores

Igual que en el caso de los sensores capacitivos, una de las aplicaciones de los sensores inductivos consiste en la medida de desplazamiento y posición, y en la detección de proximidad de objetos metálicos sin necesidad de contacto físico, especialmente en entornos industriales con altas concentraciones de polvo y vibraciones. Pueden medir desplazamientos entre 2 y 100 mm. Otra aplicación particular de los sensores inductivos es la medida de espesores de piezas metálicas.

1.3.2. Medida de presión, fuerza y aceleración

Los sensores inductivos también pueden utilizarse para medir presión, fuerza y aceleración si se emplean elementos transductores que conviertan dichas variables en desplazamiento. Este tipo de sensores son recomendables en aplicaciones que requieran alta robustez y fiabilidad (por ejemplo, se utilizan en el tren de aterrizaje de los aviones para calcular el centro de gravedad).

1.4. Transformadores diferenciales

El transformador diferencial de variación lineal, también denominado LVDT*, se basa en la variación de la inductancia mutua entre el primario y cada uno de los secundarios de un transformador de tres devanados, al desplazarse en su interior un núcleo de material ferromagnético. El primario se alimenta con una tensión alterna, y al colocar el núcleo en la posición central, la tensión en los secundarios es idéntica. Al desplazar el núcleo, la tensión de uno de los secundarios aumenta, y la del otro disminuye. Por tanto, el desplazamiento del núcleo se convierte en una variación de amplitud en la tensión de salida del transformador.

* *Linear variable differential transformer*, en inglés.

El LVDT es uno de los sensores más utilizados en la medida de desplazamientos por contacto físico. El sensor LVDT ofrece buenas características de linealidad, sensibilidad, resolución y velocidad de respuesta. Sin embargo, no puede medir desplazamientos grandes, y la estabilidad de la fuente de excitación es muy importante para el correcto funcionamiento, debido a que la tensión de salida depende de la señal de excitación y de la posición del núcleo. El LVDT también suele aplicarse en medidas

de presión y aceleración mediante el uso de elementos transductores que convierten dichas magnitudes físicas en desplazamiento.

Los *syncros*, los *resolvers* y los *inductosyn* son otro tipo de transformadores variables en los que hay uno o varios devanados fijos y otros que se desplazan respecto a los anteriores, accionados por el elemento cuya posición o desplazamiento se desea medir.

1.5. Electromagnéticos

Existe una categoría de sensores en los que la magnitud física que hay que medir provoca un cambio de un campo magnético o eléctrico, sin que se produzca una variación en la inductancia o en la capacidad del sensor. Este tipo de sensores se basan en la ley de Faraday y en el efecto Hall. Según la ley de Faraday, cuando un flujo magnético variable incide sobre una bobina de hilo conductor, se produce una tensión proporcional al nivel del campo magnético. El efecto Hall consiste en la generación de una tensión en un hilo conductor por el que circula una corriente cuando se aplica un campo magnético en dirección perpendicular a la corriente.

Los sensores electromagnéticos suelen aplicarse en medidas de desplazamiento (velocidad y distancia) y de caudal. Son muy robustos e inmunes al polvo, la humedad y las vibraciones. Sin embargo, igual que los sensores inductivos, los sensores electromagnéticos son sensibles a campos magnéticos parásitos, y las distancias de detección de variaciones de campo son muy pequeñas.

2. Sensores analógicos generadores

Los sensores analógicos generadores generan una señal eléctrica a partir de la magnitud física de entrada. Este tipo de sensores no necesitan ser alimentados con una fuente auxiliar y requieren menos cableado que los sensores moduladores.

Los sensores generadores se pueden clasificar según sea la señal eléctrica que generan. En el grupo de sensores generadores con salida de carga eléctrica, están los sensores piezoeléctricos y los sensores piroeléctricos. En el grupo de sensores generadores con salida de tensión, están los termopares y los sensores de concentración de iones. En los siguientes apartados se presentan los diferentes tipos de sensores generadores.

2.1. Piezoeléctricos

Los sensores piezoeléctricos se basan en la aparición de cargas eléctricas en un material cuando este se deforma al ser sometido a un esfuerzo. Este tipo de sensores están compuestos por un material piezoeléctrico como el cuarzo. Al aplicar fuerza o presión, el material se estira o se comprime. Durante este proceso, la carga sobre el material cambia y se redistribuye. Una cara del material se carga positivamente, y la otra, negativamente. La carga neta en la superficie es proporcional a la fuerza aplicada.

Los sensores piezoeléctricos se utilizan en la medida de magnitudes mecánicas tales como la presión, la aceleración y las fuerzas dinámicas producidas por vibración, oscilación, impacto, compresión o tensión.

Estos sensores poseen una elevada sensibilidad; pueden medir variaciones de alta frecuencia, y presentan una gran rigidez mecánica. Sin embargo, tienen las siguientes limitaciones: son muy sensibles a la temperatura y su impedancia de salida es muy alta. Por esto se requiere un amplificador electrométrico para acondicionar su señal de salida.

2.2. Piroeléctricos

Los sensores piroeléctricos se basan en la aparición de cargas eléctricas superficiales en una determinada dirección cuando un material experimenta un cambio de temperatura producido por la absorción de radiación.

Los sensores piroeléctricos tienen múltiples aplicaciones de medida, entre las que destacan la medida de temperatura a distancia (por ejemplo, el uso de pirómetros en hor-

nos industriales o para la medición de la pérdida de calor en edificios), la medida de la potencia generada por una fuente de radiación, la detección de gases que absorben radiación de infrarrojos, y la medida de radiación de infrarrojos para detectar a personas y animales.

Los sensores piroeléctricos suelen ser dispositivos pequeños; poseen una alta sensibilidad a los cambios de temperatura, y al no necesitar llegar al equilibrio térmico con la fuente de radiación, tienen un tiempo de respuesta más corto que los termistores y los termopares.

2.3. Termopares

Un termopar es un sensor de temperatura construido con dos metales distintos que tienen dos puntos de unión entre sí. El principio de funcionamiento del termopar se basa en el efecto Seebeck, según el cual si los puntos de unión de los dos metales se someten a una diferencia térmica, se produce una tensión proporcional a la diferencia de temperaturas.

Los termopares son los sensores de temperatura más frecuentes y presentan las siguientes ventajas: tienen un margen de medida muy elevado, de -270°C a $+3.000^{\circ}\text{C}$; poseen una alta estabilidad a largo plazo y una alta fiabilidad; además, ofrecen mayor exactitud que los sensores de temperatura resistivos (RTD) a bajas temperaturas; su tiempo de respuesta es del orden de milisegundos, y al no necesitar una fuente de alimentación, no tienen problemas de autocalentamiento. No obstante, los termopares también presentan diversas limitaciones: en primer lugar, para evitar errores de medida, el circuito de acondicionamiento debe garantizar que la corriente que circula por el termopar sea mínima; en segundo lugar, es necesario mantener una de las dos uniones a una temperatura de referencia fija, y por último, la respuesta del termopar es no lineal y suele requerir una corrección en el acondicionador de señal.

2.4. Electroodos de ion selectivo

Los sensores electroquímicos denominados *electrodos de ion selectivo* (ISE*) se basan en la generación de una diferencia de potencial en respuesta a un cambio de concentración de iones en un líquido.

Este tipo de sensores se utilizan para examinar concentraciones de sustancias en múltiples aplicaciones: análisis de suelos agrícolas y fertilizantes, análisis de sangre y orina, medidas de contaminación ambiental, etc.

Estos sensores tienen un tiempo de respuesta corto y soportan temperaturas de hasta 1.000°C . Sus principales inconvenientes son la necesidad de mantenerlos a alta temperatura durante el proceso de medida y la alta impedancia de salida de los electrodos

* ISE, *ion selective electrodes*, en inglés.

(de $20\text{ M}\Omega$ a $1\text{ G}\Omega$), lo que requiere utilizar un amplificador electrométrico para evitar el tránsito de corriente y el consiguiente desequilibrio en la reacción química.

3. Sensores digitales

Los sensores digitales son aquellos que generan salidas digitales directamente a partir de la magnitud física de entrada. Por tanto, este tipo de sensores no requieren una etapa de conversión analógico-digital, y solo es necesario acondicionar las salidas del sensor para asegurar que los niveles de tensión sean compatibles con las entradas digitales del procesador del sistema ciberfísico. Los sensores digitales más comunes son los denominados *encoders* o codificadores de posición. Se utilizan para llevar a cabo medidas de desplazamiento lineal o angular por contacto físico. A continuación, se describen los dos tipos de *encoders* de posición existentes: los incrementales y los absolutos.

3.1. *Encoder* de posición incremental

El *encoder* de posición incremental empleado para medir desplazamientos lineales está formado por dos componentes: una cinta o regla codificada que permanece fija y un cabezal detector que se desplaza unido al objeto cuya posición lineal se desea medir. La regla codificada está dividida en pequeños sectores con una propiedad que los diferencia (magnética, óptica, eléctrica). El cabezal móvil incorpora sensores de tipo electromagnético u óptico para detectar el cambio de un sector a otro sobre la regla codificada, de manera que cada vez que se desplaza una distancia fija, produce un cambio en una señal digital de salida.

El *encoder* de posición incremental empleado para medir desplazamientos angulares está formado por un disco codificado, que se desplaza unido al objeto cuya posición angular se desea medir, y un cabezal detector, que permanece fijo. El disco codificado está dividido en sectores y el cabezal produce un cambio en una señal digital de salida cada vez que el disco se desplaza un ángulo fijo entre dos sectores.

Los *encoders* de posición incremental generan dos señales de salida desfasadas para determinar el sentido del movimiento. La posición absoluta respecto a una posición de referencia se puede obtener utilizando un contador de pulsos y un elemento que determine el sentido del movimiento. La posición de referencia suele definirse colocando un final de carrera en el extremo de la regla codificada. Cada vez que se produzca un fallo en la alimentación del sistema, será necesario desplazar el cabezal detector hasta el final de carrera.

3.2. *Encoder* de posición absoluto

En el *encoder* de posición absoluto (lineal o angular), cada sector de la regla o disco codificado está determinado por un código binario específico. Por tanto, la salida de este tipo de *encoders* es directamente una señal codificada que corresponde a la posición lineal o angular absoluta respecto a una referencia del propio sensor.

4. Otros tipos de sensores

A continuación, se exponen un conjunto de sensores que no están basados en ninguno de los principios de funcionamiento introducidos en las secciones anteriores.

4.1. Sensores basados en uniones semiconductoras

Existe una amplia gama de sensores basados en uniones semiconductoras. Una de las ventajas de este tipo de sensores es que permiten la integración de la etapa de acondicionamiento de señal, e incluso la conversión analógico-digital, en el mismo encapsulado del sensor. En los siguientes subapartados, se presentan los tipos más comunes de sensores basados en uniones semiconductoras.

4.1.1. Sensores de temperatura

El principio de funcionamiento de este tipo de sensores se basa en la relación entre la tensión base-emisor (V_{BE}) de un transistor bipolar y su corriente de colector (I_c):

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{I_s} \quad (10)$$

donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta, q es la carga del electrón, e I_s es la corriente inversa de saturación, que depende de la geometría y la temperatura del transistor. Existen sensores de temperatura que integran diversos transistores bipolares para conseguir una relación lineal entre la corriente eléctrica de salida y la temperatura del sensor. El margen de medida va de -40°C a $+125^\circ\text{C}$, con una sensibilidad de $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

4.1.2. Sensores de luz

El fotodiodo es un sensor de luz basado en unión semiconductor. Su principio de funcionamiento estriba en el efecto fotoeléctrico, según el cual, al incidir luz en una unión p-n, se genera una diferencia de potencial. Cuando se le aplica polarización inversa, el fotodiodo genera una corriente eléctrica proporcional al nivel de luz incidente. Este tipo de sensores presentan una respuesta rápida a las variaciones de nivel de luz. En combinación con diodos emisores de luz (ledes), los fotodiodos suelen utilizarse como detectores de cambio de sector en los *encoders* de posición.

4.1.3. Sensores magnéticos

El magnetodiodo y el magnetotransistor son dos tipos de sensores magnéticos basados en uniones semiconductoras. Su principio de funcionamiento estriba en la variación que provoca un campo magnético sobre las características tensión-corriente de una unión p-n. Este tipo de sensores presentan una respuesta rápida a las variaciones de campo magnético y suelen utilizarse como detectores de cambio de sector en los *encoders* de posición con propiedades magnéticas.

4.2. Sensores de imagen CCD

Un sensor de imagen CCD (*charged-coupled device*) está compuesto por un vector o matriz de píxeles que son sensibles a la radiación óptica. Por efecto fotoeléctrico, en cada píxel se genera un nivel de carga eléctrica que es proporcional a la intensidad de luz que incide en el píxel y al tiempo de exposición. El nivel de carga de cada píxel se convierte en un nivel de tensión que está conectado a la entrada de un registro de desplazamiento utilizado para realizar la lectura de la imagen adquirida a través de una o varias señales de salida. En las matrices CCD (o sensores de área), suelen emplearse registros de desplazamiento vertical, para desplazar los niveles adquiridos en cada línea de la imagen, y registros de desplazamiento horizontal, para desplazar los niveles de luz adquiridos en los píxeles de una línea. En los vectores CCD (o sensores lineales), basta con un registro de desplazamiento horizontal. El CCD incluye un conjunto de señales de entrada de sincronización que controlan la exposición y realizan el proceso de lectura de la imagen mediante el movimiento de los niveles de tensión a través de los registros de desplazamiento.

Los características principales de un sensor de imagen CCD son la resolución espacial, la sensibilidad a diferentes longitudes de onda, el margen dinámico y la frecuencia máxima de adquisición de imagen (*frame rate*). Según sean las características del sensor, las aplicaciones de los sensores de imagen CCD son muy diversas: medida de distancia, inspección óptica, detección de presencia, espectrometría, etc.

4.3. Sensores basados en radiación

Existe una categoría de sensores que se basan en la emisión de una radiación y en la detección de los cambios producidos por la magnitud física en la radiación. Cuando la radiación incide en un objeto, una parte es reflejada y otra parte es absorbida. Los sensores basados en radiación incluyen un elemento que recibe la radiación reflejada por el objeto y extrae el valor de la medida a partir de la amplitud de señal recibida, del retardo entre la señal emitida y la recibida, y de la desviación frecuencial producida por efecto Doppler cuando el objeto o el sensor están en movimiento.

Las aplicaciones típicas de los sensores basados en radiación son la medida de distancia, velocidad, detección de presencia y caudal de líquidos sin contacto físico. En

función de los rangos de medida y de las características del objeto que se debe detectar, se emplean diferentes tipos de radiaciones. Los sensores de radar utilizan radiaciones de microondas; los sensores de ultrasonidos emplean ondas acústicas en la banda de 20 kHz, y los sensores basados en radiación óptica suelen usar radiaciones de infrarrojos.

5. Actuadores

En este apartado se describen brevemente los principales tipos de actuadores utilizados en el diseño de sistemas ciberfísicos.

5.1. Actuadores electromecánicos

5.1.1. Relés

Un relé es un interruptor accionado eléctricamente mediante una señal digital. La entrada de control requiere poca potencia para abrir y cerrar los contactos del relé, que se usan para alimentar un circuito de potencia superior. Las características básicas de un relé son la tensión y la corriente máximas que pueden aguantar y conmutar los contactos, los tiempos de apertura y cierre, y la tensión y la corriente nominales de la entrada de control. En función de los requerimientos de la aplicación, es posible seleccionar entre relés electromagnéticos y relés de estado sólido.

5.1.2. Motores

Un motor convierte una señal eléctrica en giro o rotación de un eje mediante la interacción de dos dipolos magnéticos. Existen motores DC, alimentados por corriente continua; motores AC, alimentados por corriente alterna, y motores paso a paso. Las características básicas de un motor son el par de arranque, la velocidad, el par de salida y la regulación de velocidad.

5.1.3. Solenoides

El solenoide se utiliza para producir una fuerza sobre un elemento móvil a partir de una señal de control. Está formado por una bobina en el interior de un núcleo ferromagnético y un elemento mecánico móvil (vástago). Cuando circula corriente por la bobina, se genera un campo magnético que atrae el vástago y queda centrado en el interior de la bobina. Existen solenoides en los que el vástago se desplaza proporcionalmente a la tensión de entrada, y otros en los que el vástago solo tiene dos posiciones. Las características básicas del solenoide son la fuerza y el desplazamiento, el tiempo de respuesta, y la potencia y tensión necesarias en la señal de control.

5.1.4. Electroválvulas

Una válvula se utiliza para controlar la circulación de líquidos o gases a través de un conducto mediante una pieza que se abre y se cierra. Una electroválvula está formada por una válvula y un solenoide que puede accionar la válvula a partir de una señal de control. Además, existen válvulas motorizadas, en las que un motor acciona la válvula y permite regular el grado de apertura.

5.2. Actuadores electrotérmicos

Los actuadores electrotérmicos producen un aumento o una disminución de la temperatura a partir de una señal eléctrica de entrada.

5.2.1. Células Peltier

Se basan en el efecto Peltier, que consiste en la absorción o la cesión de calor en la unión de dos materiales distintos cuando circula una corriente eléctrica a través de esa unión. Las células Peltier se utilizan para refrigerar, es decir, para conseguir que un objeto alcance una temperatura inferior a la del ambiente. Sus características básicas son el coeficiente de Seebeck y la resistencia eléctrica.

5.2.2. Calefactores

Se utilizan para conseguir temperaturas superiores a 750°C a partir de una resistencia por efecto Joule. La resistencia se suele conectar directamente a la red eléctrica, y el paso de corriente se abre y se cierra con los contactos de un relé.

Bibliografía

Fraden, J. (2015). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer.

Pallás Areny, R. (2005). *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo.