



df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# Sensores y actuadores

Aplicaciones con **Arduino®**

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Leonel G. Corona Ramírez  
Griselda S. Abarca Jiménez  
Jesús Mares Carreño



CD  
interactivo  
en esta  
edición

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# Sensores y actuadores

Aplicaciones con Arduino®

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Leonel Germán Corona Ramírez

Griselda Stephany Abarca Jiménez

Jesús Mares Carreño

**Instituto Politécnico Nacional**



df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

**Para establecer comunicación con nosotros puede hacerlo por:**



**correo:**  
Renacimiento 180, Col. San Juan  
Tlhuaca, Azcapotzalco,  
02400, México, D.F.



**fax pedidos:**  
(01 55) 5354 9109 • 5354 9102



**e-mail:**  
[info@editorialpatria.com.mx](mailto:info@editorialpatria.com.mx)



**home page:**  
[www.editorialpatria.com.mx](http://www.editorialpatria.com.mx)

Dirección editorial: Javier Enrique Callejas

Coordinadora editorial: Estela Delfín Ramírez

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

Supervisor de prensa: Gerardo Briones González

Diseño de portada: Juan Bernardo Rosado Solís/Signx

Ilustraciones: Adrian Zamorategui Berber/Nemesis

Fotografías: ©Thinkstockphoto

Revisión Técnica:

Dr. Jesús Manuel Dorador González

Jefe del Departamento de Ingeniería Mecatrónica

Facultad de Ingeniería, UNAM

Ing. Marco Antonio Trejo Lee

Universidad del Pedregal del Sur

*Sensores y actuadores. Aplicaciones con Arduino®*

© 2014, Leonel Germán Corona Ramírez, Griselda Stephany Abarca Jiménez, Jesús Mares Carreño

© 2014, GRUPO EDITORIAL PATRIA, S.A. DE C.V.

Renacimiento 180, Colonia San Juan Tlhuaca

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

Miembro de la Cámara Nacional de la Industrial Editorial Mexicana

Registro Núm. 43

ISBN ebook: 978-607-438-936-4

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de la presente obra en cualesquier formas, sean electrónicas o mecánicas, sin el consentimiento previo y por escrito del editor.

Impreso en México

Printed in Mexico

Primera edición ebook: 2014

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary



# Agradecimientos

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

**L**a motivación principal para la realización de esta obra ha sido nuestros estudiantes, ya que su constante interés por aprender ha impulsado de manera significativa el desarrollo de este libro. Agradecemos en especial a los estudiantes Yves Jesús Pérez Delgado, Rodrigo García Barragán, Marcial Becerril Tapia y César Gerardo Bravo Conejo, ya que gracias a su apoyo y arduo trabajo fue posible el desarrollo de las prácticas presentadas en esta obra.

También agradecemos a nuestra amiga y colaboradora, con la que compartimos convivencias e ideas, la M. en E. Elizabeth Rivas Bonilla, por su incondicional apoyo y contribución durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por estar con nosotros brazo con brazo a lo largo de este camino.

Agradecemos al Instituto Politécnico Nacional y a la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, nuestra *alma máter*, por facilitar nuestro desarrollo profesional e impulsar nuestra preparación como investigadores.

Transmitimos también nuestro agradecimiento a todos los colaboradores, editores y revisores que hicieron posible este texto; gracias a sus atinados comentarios y justas críticas hemos llegado a este saldo.

Finalmente, unimos nuestro reconocimiento y memoria a quienes nos han brindado su apoyo incondicional: la familia. Esta lleva consigo lealtad, nobleza, sinceridad, entrega, franqueza; recordamos y celebramos a todas estas personas que nos recuerdan nuestra efímera condición de seres humanos.

## Los autores

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary





# Prólogo

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

**H**oy en día, con la creciente importancia de los sistemas digitales de comunicación, las interfaces humano-máquina en el desarrollo tecnológico, los sistemas de producción automatizados, el control automático, la mecatrónica y muchas áreas de estudio científico-tecnológicas, así como la implementación de nuevas tecnologías que permiten un desarrollo más acelerado en los procesos de producción, no serían posibles sin el uso de sensores y actuadores, ya que por medio de estos los sistemas digitales interactúan con el mundo real.

En este libro el lector encontrará información actualizada sobre los sensores y actuadores que se usan hoy en día, ya que en esta era digital el uso de sistemas de detección va de la mano con las tarjetas de adquisición de datos, realizando el acondicionamiento de la señal del sensor de manera embebida en el microcontrolador. Se muestran ejercicios de aplicación en los cuales se minimiza el acondicionamiento de señales de manera analógica, dejando esta tarea a la tarjeta de adquisición de datos; en este caso la tarjeta elegida es Arduino®, debido a su gran versatilidad, bajo costo y facilidad de uso. En esta obra el lector podrá familiarizarse con sistemas de detección simples como un encoder hasta sensores iniciales de estado sólido, pasando por sensores MEMS programables.

Con la finalidad de facilitar la lectura y aplicación de la información aquí contenida, este libro está estructurado en tres partes básicas; el capítulo 1 se refiere a los transductores, y se hace mención de cómo funcionan los principios de transformación de energía para que el sensor o el actuador lleven a cabo su tarea. Después, en el capítulo 2 se explican de manera breve los tipos de

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary



acondicionamiento de señal que se requerirán para implementar dichos sensores y actuadores en sistemas digitales reales. Por último, en el capítulo de introducción a Arduino®, contenido en el material digital, se muestra una breve introducción sobre cómo la tarjeta de adquisición de datos le permitirá al usuario realizar el acondicionamiento de la señal del sensor o el actuador.

Una vez que el lector se ha introducido en la lectura de los primeros tres capítulos, de manera intuitiva tendrá la libertad de elegir cuál capítulo es de su interés, ya que están organizados por variable física a medir. De esta manera, el lector podrá cambiar de capítulo con facilidad, sin necesidad de consultar alguna otra sección para encontrar una respuesta útil a su problema de aplicación.

En este libro se abordan, desde un punto de visto práctico, sensores de posición, velocidad, aceleración, humedad, temperatura, campo magnético, sistemas de navegación, sensores de visión artificial, sensores de componentes RGB, flujo, fuerza, deformación, presión, etc. Así, el lector podrá encontrar una alternativa práctica y de fácil implementación a una amplia gama de problemas de detección en sistemas de ingeniería.



# Contenido

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Agradecimientos .....	iii
Prólogo .....	v
Tabla de símbolos.....	x

Capítulo 1. Introducción .....	1
--------------------------------	---

Introducción .....	2
1.1 Variables y magnitudes físicas .....	2
1.2 Transductores .....	2
1.3 Principios de transducción .....	3
1.4 Sensores .....	17
1.5 Actuadores.....	25

Capítulo 2. Acondicionadores de señal.....	39
--	----

2.1 Acondicionadores de señal.....	40
2.2 Circuitos divisores .....	41
2.3 Circuitos de puente .....	43
2.4 Circuitos amplificadores .....	45
2.5 Circuitos convertidores .....	57
2.6 Filtros .....	64
2.7 Puentes, amplificadores y convertidores de alterna .....	68

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

**Capítulo 3. Sensores de velocidad,  
posición y aceleración ..... 73**

Introducción .....	74
3.1 Potenciómetros .....	74
3.2 Encoder.....	78
3.3 Tacogeneradores .....	89
3.4 Transformador diferencial de variación lineal (LVDT) .....	90
3.5 Sistema de Posicionamiento Global (GPS) .....	91
3.6 Acelerómetros .....	98
3.7 Giroscopios .....	104
3.8 Compás (magnetómetros).....	108

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

**Capítulo 4. Sensores de color, luz y visión ..... 113**

Generalidades.....	114
4.1 Sensores infrarrojos, el fotodiodo y el fototransistor .....	115
4.2 Ecuación de la curva distancia vs. tensión.....	123
4.3 LDR o fotorresistencias .....	125
4.4 Sensores de color.....	128
4.5 Sensores de visión.....	133

**Capítulo 5. Sensores de nivel y proximidad ..... 141**

5.1 Introducción .....	142
5.2 Ultrasónicos .....	142
5.3 Resistivos .....	151
5.4 Ópticos.....	155
5.5 Capacitivos.....	156
5.6 Sensores capacitivos <i>touch</i> , como medidores de proximidad y desplazamiento.....	158
5.7 Sensores capacitivos en pantallas táctiles.....	165
5.8 Inductivos .....	166
5.9 <i>Red switch</i> (interruptor de lengüeta).....	169
5.10 Efecto Hall.....	172

**Capítulo 6. Sensores de temperatura y humedad..... 173**

6.1 Conceptos básicos de temperatura.....	174
6.2 De energía térmica a energía eléctrica .....	175
6.3 Termistor .....	175
6.4 Medición de temperatura.....	177
6.5 Termopar o termocupla.....	179
6.6 Sensor de temperatura resistivo (RTD).....	185
6.7 El diodo y otros CI como sensores de temperatura .....	188
6.8 Medidor de temperatura a distancia (pirómetro) .....	196

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

6.9 Sensores de humedad .....	200
6.10 Otros sensores y principios de funcionamiento .....	201

**Capítulo 7. Sensores de fuerza, torque y deformación ..209**

Introducción .....	210
7.1 Sensores piezoresistivos.....	210
7.2 Sensores piezoeléctricos.....	230
Sitios de Internet.....	234

**Capítulo 8. Sensores de flujo y presión.....235**

8.1 Sensores de presión.....	236
8.2 Sensores de flujo .....	251
Sitios de Internet.....	260

**Capítulo 9. Otros sensores .....** 261

Introducción .....	262
9.1 Sensores de gas.....	262
9.2 Sensores de corriente.....	267
9.3 Sensores de pH .....	273
9.4 Biosensores .....	275

**Capítulo 10. Actuadores.....279**

Generalidades.....	280
10.1 Actuadores eléctricos .....	280
10.2 Servomotores .....	286
10.3 Cilindros neumáticos .....	300
10.4 Cilindros hidráulicos.....	302

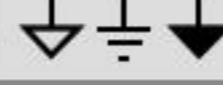


Descarga el  
capítulo

**Apéndice incluido en CD-ROM****Introducción a Arduino®**

Generalidades .....	A2
Ambiente de programación.....	A7
Librerías .....	A15
Configuración de entradas y salidas .....	A17
Terminales analógicas.....	A18
Operadores.....	A19

## Tabla de símbolos

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
$N_B$	Medición con fuente de "luz negra" para el color azul	$I_A$	Corriente de armadura
$\Delta L$	Variación de longitud	$\emptyset_p$	Flujo por polo
$\nu$	Relación de Poisson	$T_d$	Par
$\varepsilon_x$	Deformación en dirección X	$K_a$	Constante de la máquina eléctrica
$\varepsilon_y$	Deformación en dirección Y	$E_a$	Fuerza contraelectromotriz
$\varepsilon_z$	Deformación en dirección Z	$\omega_a$	Velocidad angular de armadura
$\Delta A$	Variación de área	$T_s$	Par de carga de salida
$\Delta_f$	Área final	$J_m$	Momento polar de motor
$S_A$	Sensitividad de la galga	$\theta_m$	Posición angular del motor
$Y_{xy}$	Deformación cortante en el plano x, y	$\xi$	Coeficiente de fricción viscosa
$\sigma$	Esfuerzo	$\theta_p$	Ángulo de paso
$F$	Fuerza	$n_f$	Número de fases
$\sigma_x$	Esfuerzo en dirección del eje x	$p$	Número de dientes del rotor
$\gamma_{max}$	Deformación constante máxima	$c$	Carrera del cilindro
$\tau_{max}$	Esfuerzo constante máximo	$n_c$	Número de ciclos
$G$	Módulo cortante	$T_c$	Constante de tipo de cilindro
$T$	Torque aplicado	$D_c$	Diámetro interior del cilindro
$r$	Radio del eje	$d_v$	Diámetro del vástago
$J$	Momento polar de inercia del eje	$\emptyset_R$	Flujo radiante
$D$	Densidad de flujo eléctrico	$P_v$	Presión del vapor
$C_{pz}$	Coeficiente piezoelectrónico	$P_{sat}$	Presión de saturación
$q$	Carga eléctrica	$P$	Presión
$\rho_d$	Densidad	$P_0$	Presión de referencia
$K_x$	Rigidez en dirección x	$Q_v$	Flujo volumétrico
$R_e$	Número de Reynolds	$Q_m$	Flujo másico
$\eta$	Viscosidad dinámica del fluido	$K_s$	Rigidez del sistema
			Tierra

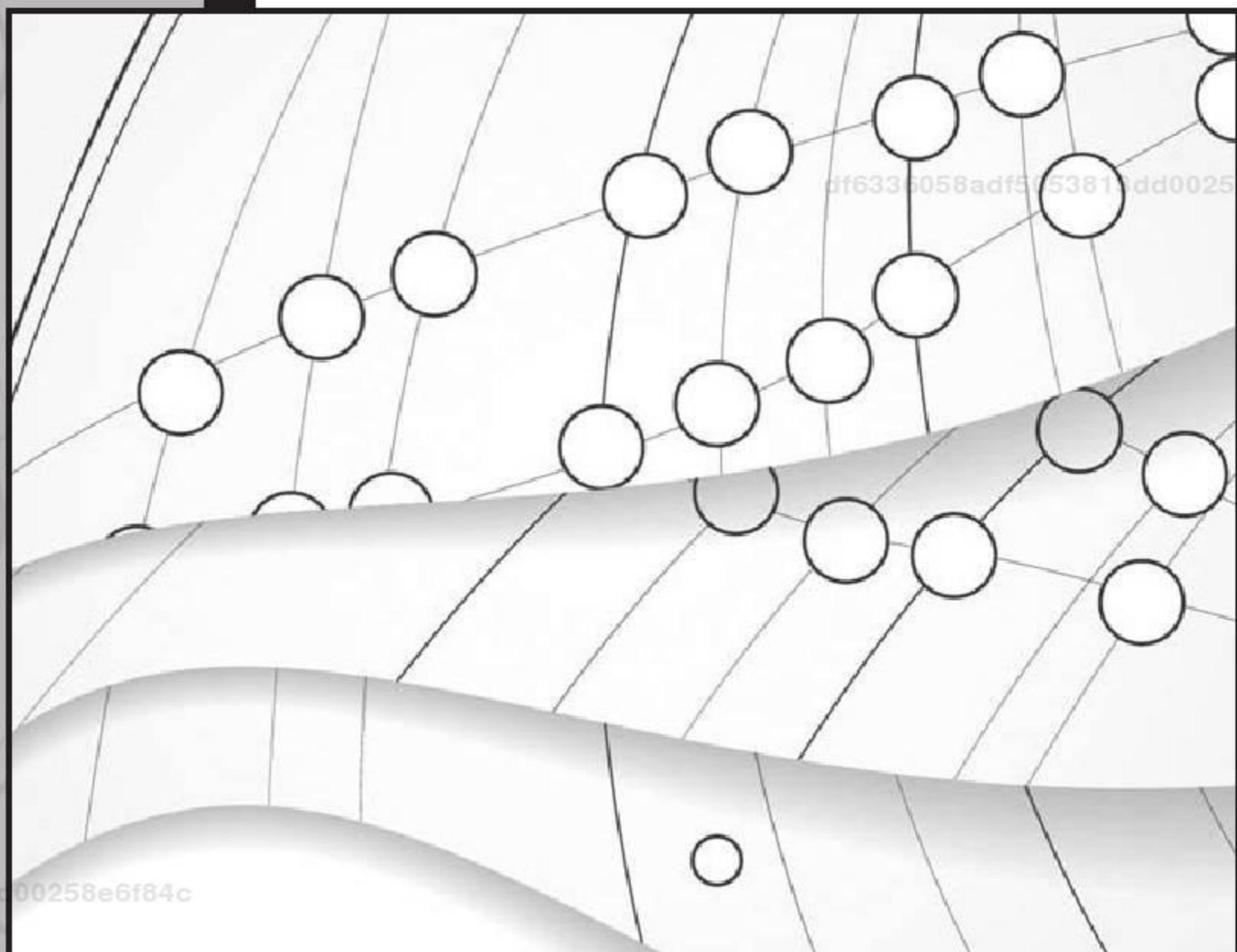
X



df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# 1

## Introducción



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

#### Objetivo general

- ▶ En este primer capítulo se presentan los principales modos de operación de sensores y actuadores, así como los principios de transducción de los sensores y los principios de funcionamiento para los actuadores, por lo que se recomienda un conocimiento básico previo de señales, circuitos y física.

#### Objetivos particulares

- ▶ Introducir al lector en los principios de transducción y funcionamiento usados en los sensores y los actuadores, con el fin de ofrecer una base sólida para la comprensión de los temas tratados en los capítulos posteriores, donde se usan los términos y definiciones que se presentan en este capítulo.
- ▶ ■ Generar un concepto claro acerca de qué es una variable física y cómo se relaciona esta con los sensores y los actuadores.
- Comprender los principios de transducción usados en los sensores.
- Comprender los principios de funcionamiento de los actuadores.
- Distinguir entre un transductor, un sensor y un actuador.
- Conocer las clasificaciones de los sensores y los actuadores.

## Introducción

La necesidad de obtener energía a partir de la naturaleza y transformarla en otro tipo de energía, con el fin de ser controlada para beneficio del ser humano, ha sido una constante durante toda la historia de la humanidad y ha anticipado, por mucho, el desarrollo tecnológico y los métodos actuales de conversión de la energía, mediante los que, a partir de un sistema integral, las variables y los atributos físicos son observados, cuantificados y modificados.

Por su parte, la importancia del uso de sensores y actuadores en la ingeniería se hizo presente desde la creación y el desarrollo de las máquinas automatizadas. El uso de sensores y actuadores es fundamental para el desarrollo de sistemas en la actualidad, ya que todo sistema requiere una interfaz con el mundo real que puede requerir que un usuario ingrese un dato, medir una variable física o realizar una cierta acción.

A lo largo de este capítulo se describen los sensores y los actuadores como unidad fundamental; además de cómo se clasifican estos y cuáles son sus principales características. Asimismo, se describe con detalle cómo son los principios de transducción utilizados en estos, desde el **efecto Hall**, utilizado en sensores magnéticos, hasta los motores neumáticos, usados en la industria manufacturera.

### 1.1 Variables y magnitudes físicas

La representación de un parámetro de algún fenómeno físico, mediante el cual, a su vez, se describa su comportamiento, se conoce como *variable física*. Por otra parte, el resultado de cuantificar un atributo físico, asignando valores numéricos a estos a través de una variable o constante física, se conoce como *magnitud física*.

Es importante destacar que tanto las variables físicas como las magnitudes físicas siempre están presentes en un sistema de procesamiento de información, ya que cuantificar una variable física constituye el inicio de todo proceso.

En general, un sistema de ingeniería moderno está compuesto por un sensor, una unidad procesadora y un sistema de actuación. De este modo, se puede afirmar que, de acuerdo con su función, los sensores son dispositivos que permiten cuantificar una variable física, mientras que los actuadores, a partir de la variable física medida por el sensor, tienen la tarea de realizar una acción, como consecuencia de haber procesado la magnitud que tendrá dicha variable.

Para su funcionamiento, los sensores y los actuadores se basan en el llamado *principio de transducción*. No obstante, los principios de transducción son muy variados; por tanto, la forma en que son utilizados dependerá de qué tipo de variable física tenga que cuantificar el sensor o de qué tipo de energía recibe el actuador para convertirla en movimiento.

### 1.2 Transductores

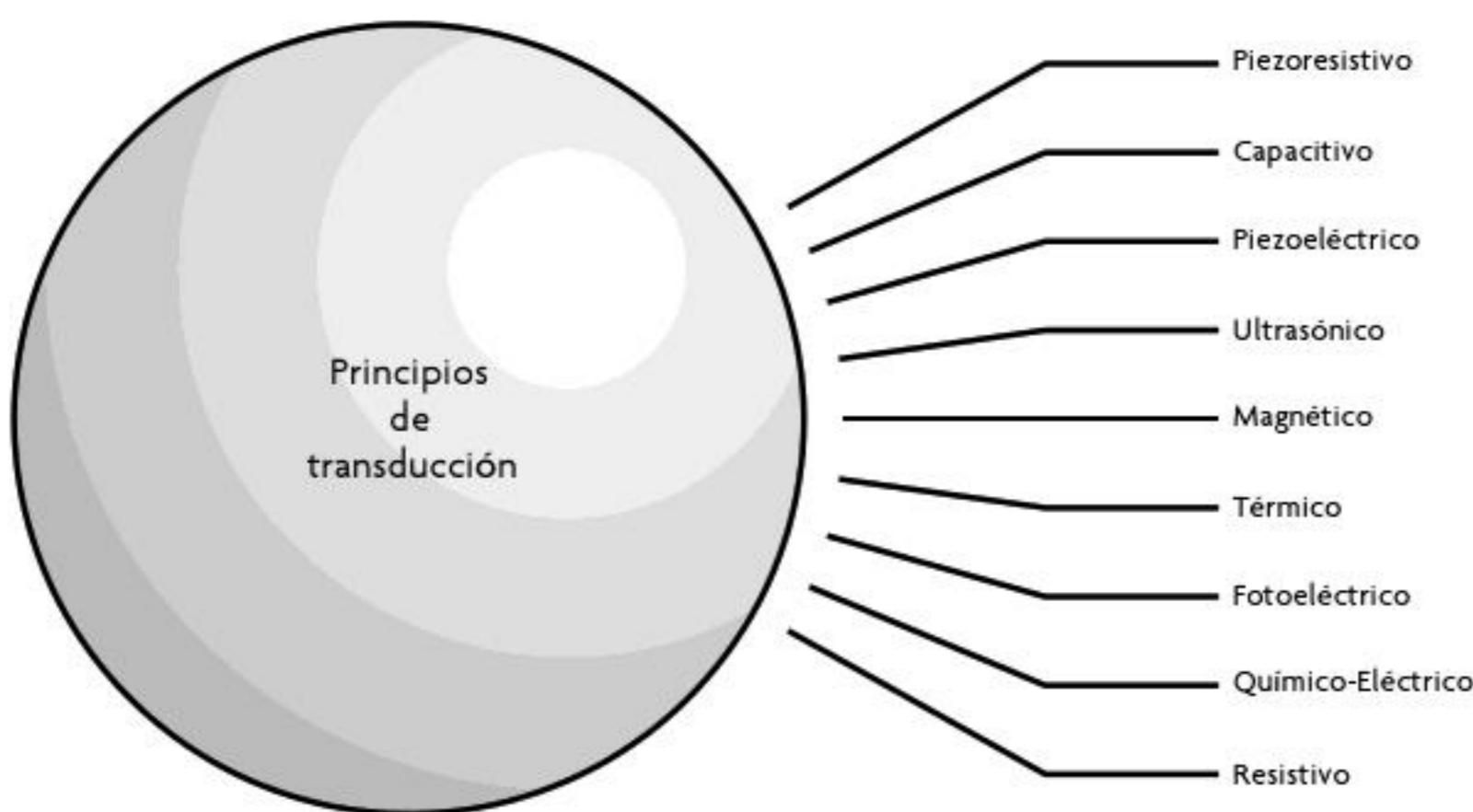
Un *transductor* se define como aquel dispositivo que es capaz de convertir una variable física en otra que tiene un dominio diferente. De acuerdo con esta definición, es posible afirmar que un transductor forma parte de un *sensor* o de un *actuador*; pero la diferencia entre un sensor, un actuador y un transductor radica en que el transductor simplemente cambia el dominio de la variable, mientras que el sensor proporciona una salida útil para ser usada como variable de entrada a un sistema de *procesamiento de la información* y el actuador se encarga de ejecutar la acción determinada por el sistema de procesamiento de la información. Por ende, de manera general, se dice que un transductor cambia la variable física medida a una señal eléctrica; sin embargo, esto no siempre se cumple. Por ejemplo, piénsese en una báscula, como se sabe las hay electrónicas y mecánicas, para el caso de las básculas electrónicas el transductor tiene la tarea de transformar el peso de un objeto en una señal eléctrica que es interpretada posteriormente, mientras que en la báscula mecánica el transductor convierte el peso del objeto en una señal mecánica que recorre un indicador. Entonces, de manera general, se dice que un transductor es capaz de convertir una variable física en un movimiento, en presión, en flujo, en una señal eléctrica, etcétera.

De manera muy general, los transductores se dividen en dos grandes ramas: **transductores de entrada** y **transductores de salida**. Cuando el transductor se usa como parte de un sistema de sentido, se dice que el transductor es de entrada. Por tanto, un *transductor de entrada* es aquel que se usa para medir una variable física cuya salida es utilizada por un *sistema de procesamiento de la información*. Por otro lado, cuando el transductor es parte de un *sistema de actuación* se dice que este es un *transductor de salida*. Así, un transductor de salida es aquel dispositivo que convierte la señal del sistema de procesamiento de la información en una acción tangible en el entorno; por ejemplo, el movimiento de un motor, la activación de una válvula, etcétera.

## 1.3 Principios de transducción

Para llevar a cabo su función, un transductor se vale de algún principio físico de transformación de energía, al que se denomina *principio de transducción*, como los que se muestran en el esquema de la figura 1.1.

Para una mayor comprensión del tema, a continuación se describen con mayor detalle los principios físicos de transformación de energía a los que se hace alusión en la figura 1.1.

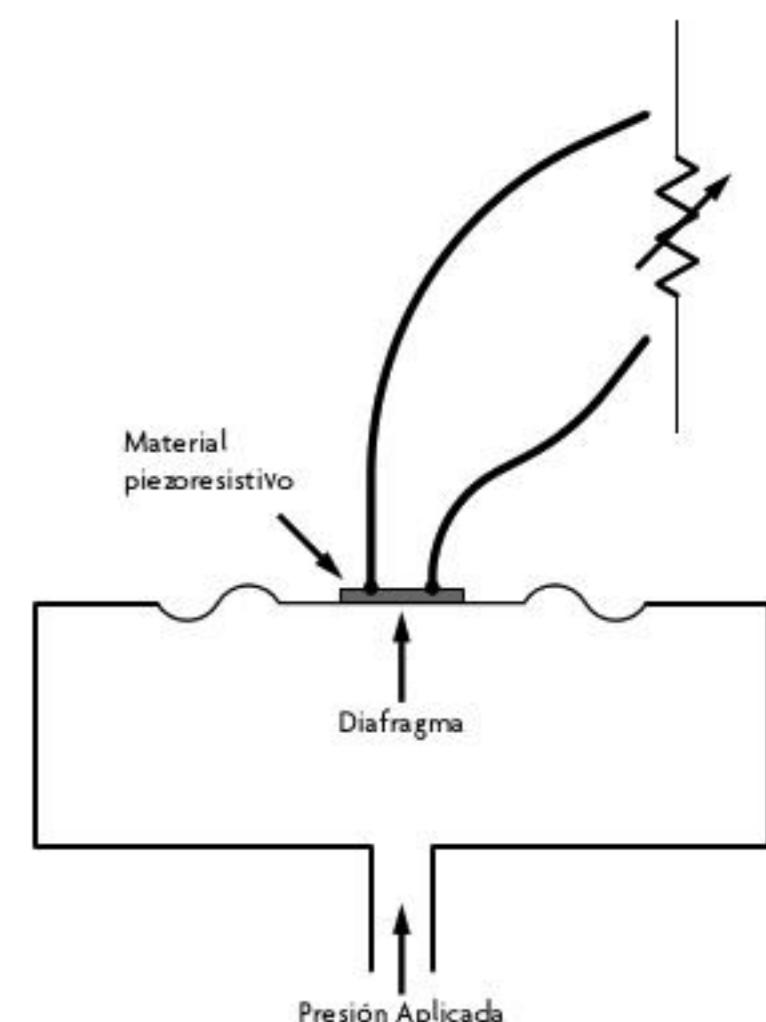


**Figura 1.1** Principios de transducción.

### Principio de transducción piezoresistivo

La *piezoresistividad* se define como la relación entre la resistencia eléctrica y la deformación. Por ejemplo, en un material en estado de reposo, los átomos que lo conforman están en estado de equilibrio, pero si en un instante dado dicho material sufre una deformación, los átomos de la celda unitaria<sup>1</sup> presentarán un movimiento relativo, modificando su resistividad, denominándolo, por esa razón, como *material piezoresistivo* (cabe aclarar que la diferencia entre la resistencia de un material y su resistividad es que la resistencia depende del volumen del material a tratar, mientras que la resistividad es una característica intrínseca que está relacionada con el hecho de cómo están acomodados los átomos en la celda unitaria que conforma a dicho material). Por tanto, es posible afirmar, de manera general, que la variación en la resistividad de un material debido a una deformación es lineal, siempre y cuando la deformación sea relativamente pequeña.

Para utilizar este tipo de principio de transducción, el material piezoresistivo comúnmente se conecta en forma de una resistencia dentro de un circuito eléctrico,



**Figura 1.2** Arquitectura base para transductores piezoresistivos.

<sup>1</sup> Una celda unitaria constituye el elemento más simple del que está compuesto un material.

por lo que al aplicar una diferencia de potencial al circuito es posible medir un voltaje entre las terminales del material piezoresistivo. Si se considera que la corriente que circula a través de este circuito es constante, el voltaje entre sus terminales variará si se deforma el material. En general, la deformación en el material se induce por la aplicación de una presión, ya que este tipo de materiales se usa primordialmente en sensores de presión. Para mejorar el desempeño en este tipo de transducción, se suele conectar la resistencia variable en un *ponte de Wheatstone*.

Es importante hacer notar que el *coeficiente de piezoresistividad* ofrece una medida acerca de qué tanto cambia la resistividad cuando existe una deformación en el material. Todos los materiales, sin importar su naturaleza, presentan un efecto piezoresistivo; aquellos que tienen una muy alta resistividad tienen un cambio muy grande en este parámetro comparado con el resto.

El coeficiente de resistividad ( $\pi$ ) se define como:

$$\pi = \frac{\Delta\rho}{E\varepsilon}$$

donde:

$\frac{\Delta\rho}{\rho}$ : cambio de resistividad

$E$ :

módulo de Young [N/m<sup>2</sup>]

$\varepsilon$ : deformación

Cuando un material piezoresistivo está siendo deformado, este cambia su resistencia eléctrica. Por tanto, la resistencia en un material se define como:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

donde:

$R$ : resistencia [ $\Omega$ ]

$\rho$ : resistividad [ $\Omega\text{-m}$ ]

$l$ : longitud [m]

$A$ : área de sección transversal [m<sup>2</sup>]

El cambio de resistencia se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.1)$$

Otra forma de medir el efecto piezoresistivo es mediante el factor de deformación (Gauge Factor:  $GF$ , por sus siglas en inglés), definido como:

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (1.2)$$

De manera general, entre más alto sea el factor de deformación de un material, su uso es más atractivo en los transductores piezoresistivos.

Es importante hacer notar que este tipo de transducción se basa en la medición del cambio provocado a la resistencia, debido a la deformación resultante cuando el material está bajo la aplicación de determinadas fuerzas. Algunas de las características más importantes de la transducción a través

de piezoresistencias es que esta es robusta y simple de implementar, además de su baja sensibilidad al ruido. Sin embargo, una de sus desventajas es que tiene un bajo desempeño si se observa su dependencia con respecto a la temperatura, ya que este tipo de sensado presenta una dependencia con la temperatura de 300 partes por millón por grado Kelvin (300 ppm/K).

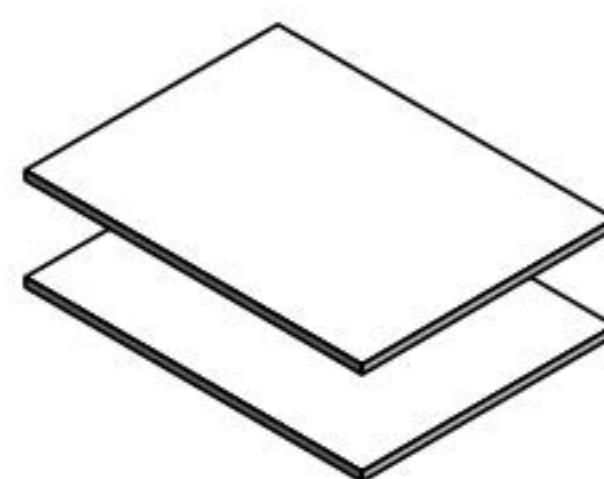
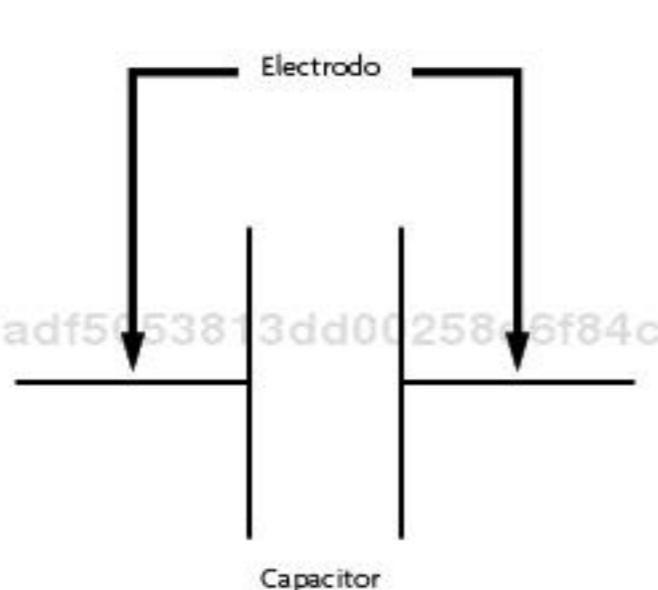
### Principio de transducción capacitivo

El principio de transducción capacitivo es muy usado debido a que tiene claras ventajas, entre las que destacan resolución infinita, bajo consumo de energía, es capaz de detectar casi cualquier tipo de material, tiene baja dependencia a la temperatura, soporta desalineaciones mecánicas y es fácilmente aislable de ruido de campos eléctricos, comparado con un principio de transducción magnético. Debido a estas importantes características, el principio de transducción capacitivo ha desplazado, poco a poco, a los principios piezoelectricos y piezoresistivos. No obstante, algunas de las desventajas de este tipo de principio de transducción es que requiere de circuitos de lectura muy especializados, además de las dificultades que implica el acoplamiento entre los circuitos de lectura y las estructuras capacitivas, ya que este acoplamiento debe realizarse durante el proceso de fabricación, para evitar la presencia de capacitancias parásitas, implícitas a una conexión eléctrica.

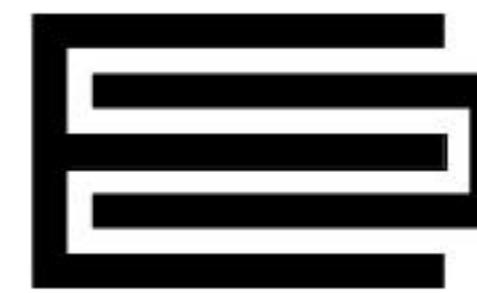
El principio básico de su funcionamiento consiste, en el caso de sensores de proximidad, en medir un cambio de capacitancia inducido por el movimiento relativo entre el sensor y un objeto, mientras que en el caso de sensores iniciales dicho principio básico consiste en el desplazamiento de una estructura móvil con respecto a una fija.

Para utilizar el principio de transducción capacitivo se necesita una estructura que esté constituida por uno o varios capacitores, donde un capacitor es un elemento que está formado básicamente por dos electrodos (o placas) y un medio dieléctrico entre estos (véase figura 1.3).

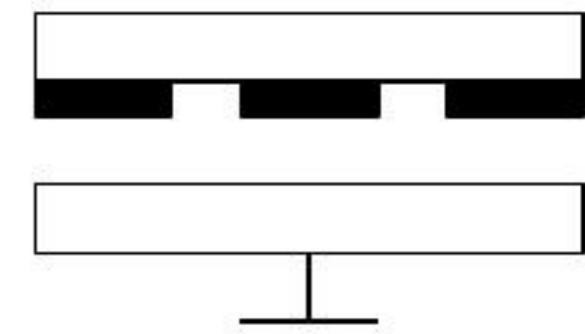
Las estructuras típicas más importantes para transductores capacitivos se muestran en la figura 1.4.



a) Placas paralelas



b) Interdigитado



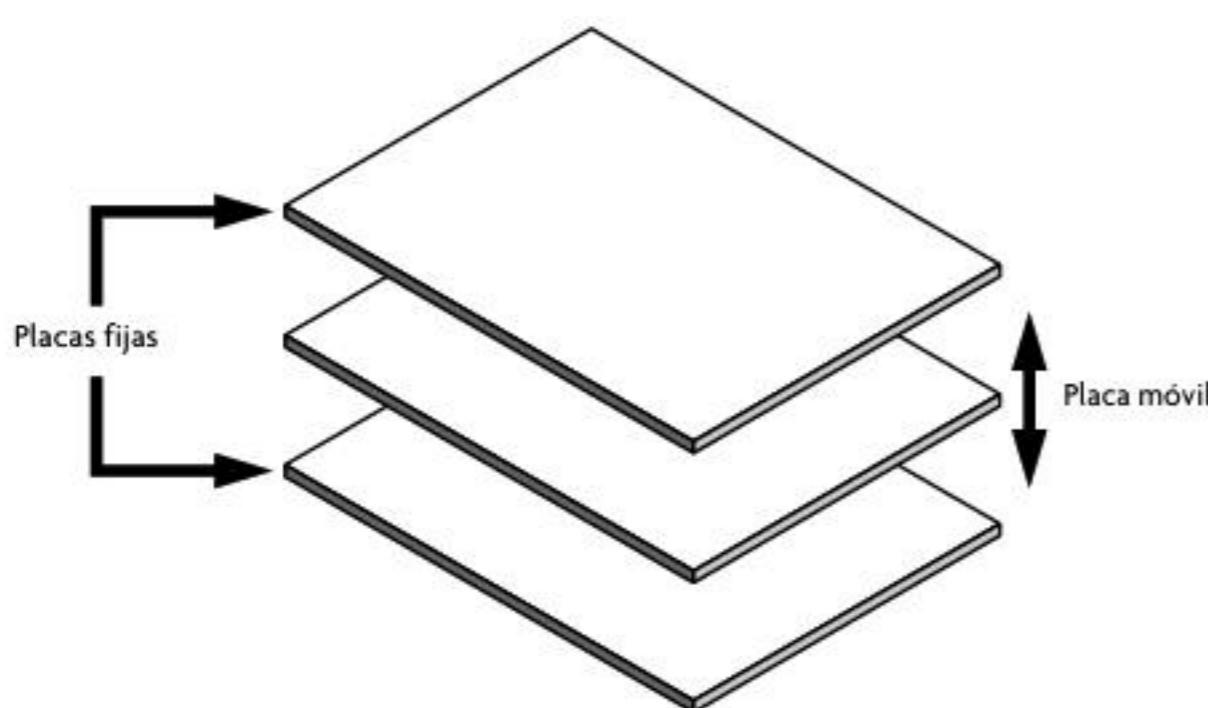
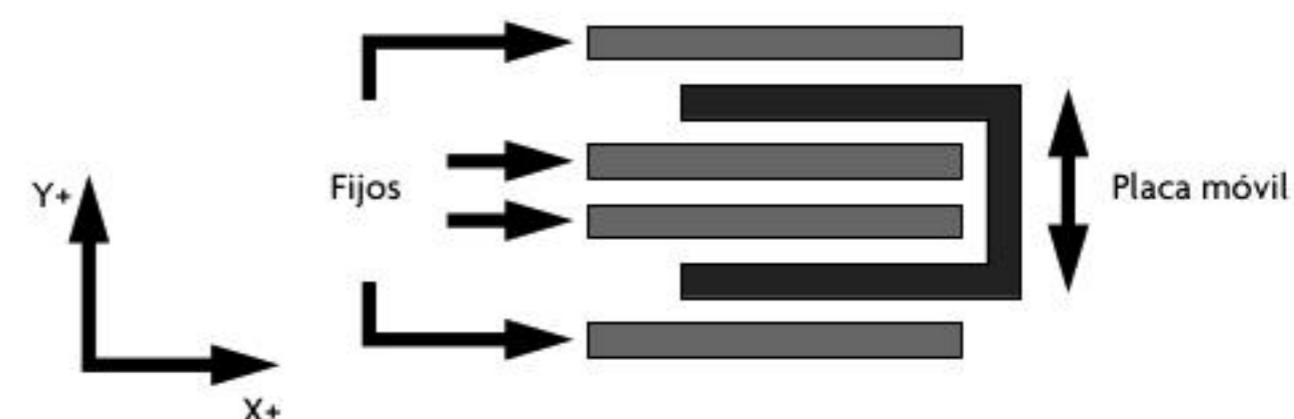
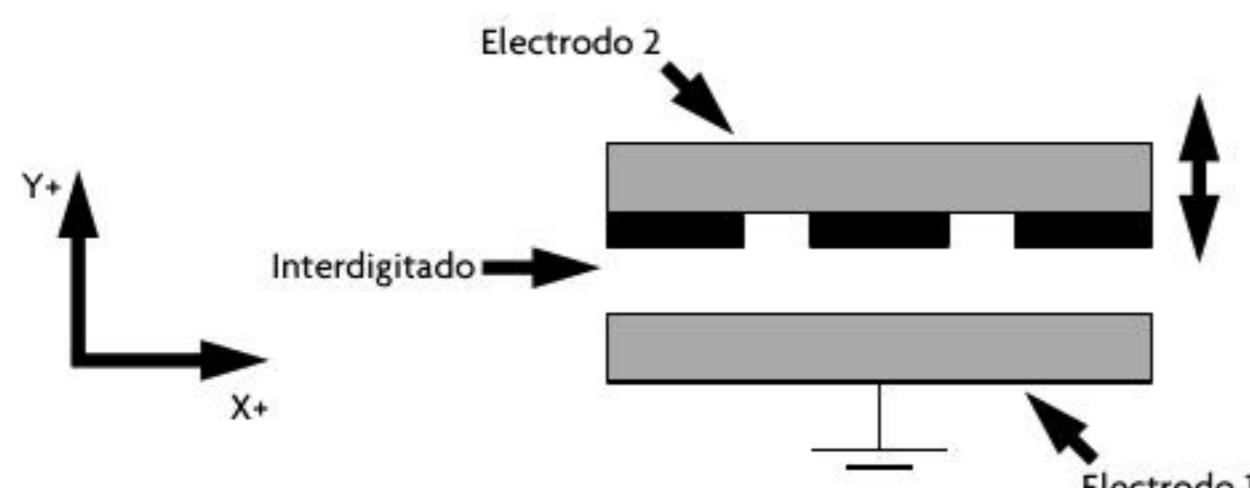
c) De franja

**Figura 1.3** Capacitor.

**Figura 1.4** Estructuras capacitivas.

El **capacitor de placas paralelas** es capaz de medir el desplazamiento en dirección normal a la superficie de la placa móvil respecto a las placas fijas. Además, esta configuración es comúnmente utilizada para medir desplazamientos en dirección tangencial a la superficie de la placa móvil, lo cual se traduce en una variación del área efectiva o de traslape que existe entre las placas (véase figura 1.5). Este tipo de configuración se usa con regularidad para transductores de presión a energía eléctrica.

En el **capacitor interdigitado**, la placa móvil consta de "dedos", misma que se desplaza al aplicársele una fuerza externa. En el caso de esta estructura, los dedos de la placa móvil forman capacitores con los dedos fijos, de tal forma que cuando la placa se desplaza en dirección Y+, el capacitor formado entre las placas superiores será mayor con respecto al capacitor formado en las placas inferiores (de cada dedo); lo mismo sucede a la inversa, esto es, cuando la placa móvil experimenta un

**Figura 1.5** Capacitor de placas paralelas.**Figura 1.6** Capacitor interdigitado.**Figura 1.7** Capacitor de franja.

lo que se logra variar la capacitancia. Este tipo de configuración se usa en sensores de proximidad.

En términos geométricos, un capacitor puede calcularse mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_t}{d}$$

donde:

$C$ : capacitancia [F]

$\epsilon_0$ : permitividad del vacío [F/m]

$\epsilon_r$ : permitividad relativa del medio [F/m]

$A_t$ : áreas de traslape entre los electrodos [ $m^2$ ]

$d$ : distancia entre los electrodos [m]

En general, el principio de transducción capacitivo usa esta relación geométrica para determinar cambios, ya sea de distancia entre electrodos o del área de traslape. Por lo común, la relación geométrica se usa de manera *diferencial*; esto significa que siempre que se tenga un capacitor que aumenta, existe otro que disminuye; por tanto, la diferencia entre estos deberá ser calculada. Algunas de las principales ventajas de esta configuración son:

- Provee una señal que es cero cuando está en el punto de equilibrio.
- La configuración diferencial indica cuál es el sentido del movimiento.
- El sistema es lineal alrededor del punto de equilibrio.

El reto de diseñar un transductor capacitivo radica en medir un cambio mínimo de capacitancia y convertirlo en un cambio sustancial de la variable física de salida.

Algunas aplicaciones típicas para este tipo de principio de transducción son las siguientes:

- Sensores de presión
- Micrófonos

desplazamiento en dirección Y-, el capacitor formado entre el dedo móvil y la placa fija de abajo (de cada dedo) tendrá un mayor valor de capacitancia con respecto al capacitor formado del lado inverso. Esta configuración se usa de modo principal en sensores MEMS iniciales (véase figura 1.6).

El **capacitor de franja**, que se observa con detalle en la figura 1.7, se forma con un capacitor interdigitado, que está implementado en el mismo sustrato que el electrodo 2, de tal forma que si dicho electrodo se desplaza sobre el eje Y, el capacitor interdigitado se acerca o se aleja del electrodo 1, con

- Sensores MEMS
- Posición lineal
- Sensado de nivel
- Sensores *Touch*
- Acelerómetros
- Sensado de proximidad
- Interruptores

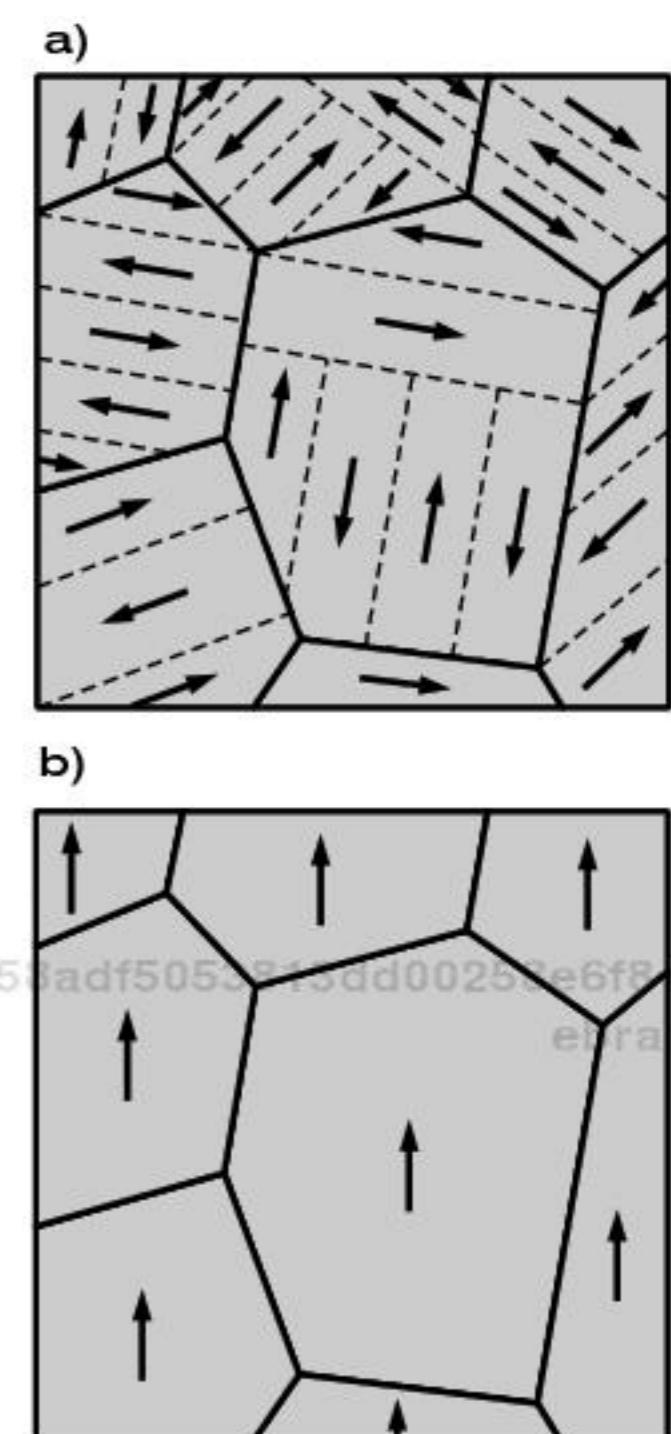
### Principio de transducción piezoeléctrico

La piezoelectricidad,<sup>2</sup> descubierta por los hermanos Pierre y Jacques Curie, constituye un fenómeno que se presenta en algunos materiales debido a sus características intrínsecas. Este tipo de materiales tiene la peculiaridad de generar carga eléctrica cuando una presión externa es aplicada sobre estos. El término *piezoelectricidad* relaciona estos dos importantes conceptos: electricidad y presión, de tal manera que la piezoelectricidad significa: *electricidad derivada de la presión*. Esta transducción está basada en el cambio de polarización del material debido a la deformación generada por una fuerza aplicada. Los materiales piezoeléctricos constituyen un subconjunto de los materiales ferroeléctricos, cuya característica principal es tener una polarización neta, incluso sin un campo aplicado.

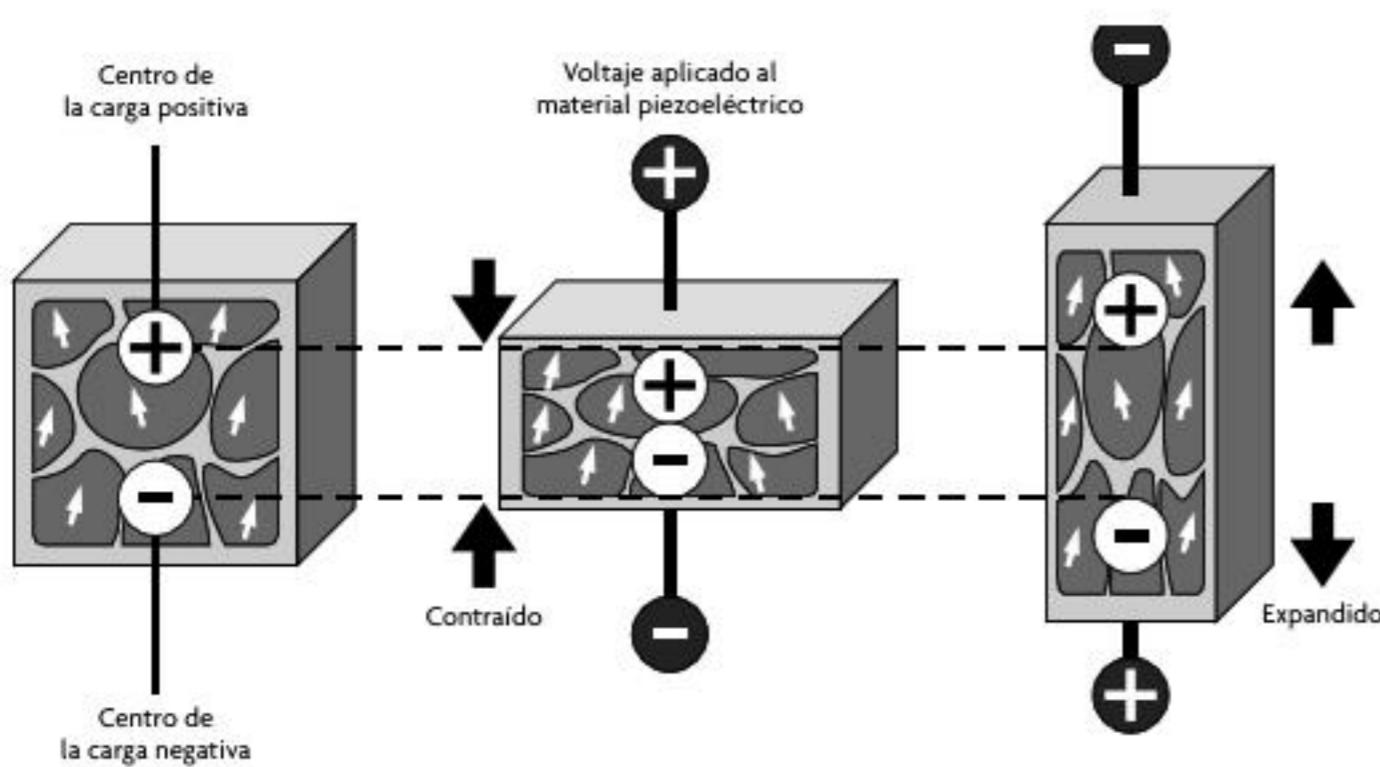
Un material piezoeléctrico no solo puede realizar el proceso de generar una diferencia de potencial debido a una presión aplicada, sino que también puede llevar a cabo el proceso inverso. Este tipo de materiales se utiliza con mucha frecuencia dada la naturaleza reversible del efecto piezoeléctrico. Imagíñese un trozo de material piezoeléctrico, como el que se observa en la figura 1.8 a); en este, cada elemento que conforma el material está formado por un *dipolo*, esto significa que cada elemento que conforma el material está polarizado, que un extremo es más negativo que el otro. Cuando el material experimenta una deformación (ya sea de extensión o de contracción), los dipolos se alinean de tal forma que es posible medir un voltaje, como se puede ver en la figura 1.8 b).

Por el contrario, si el material está en estado de reposo y se conecta una batería a este, el campo eléctrico que genera la batería provoca una deformación en el material, ya sea que este se contraiga o se extienda, dependiendo del sentido de polaridad de la batería (véase figura 1.9).

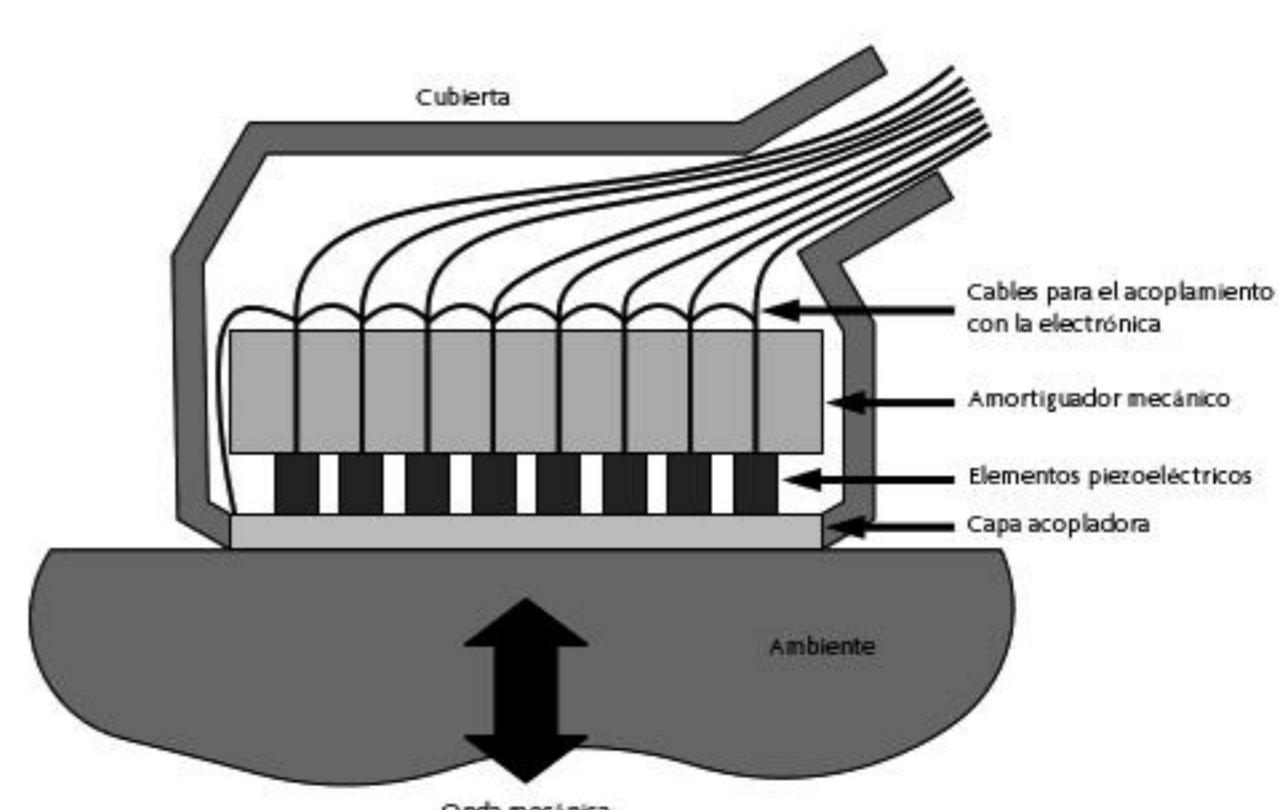
Una arquitectura muy usada en sensores piezoeléctricos es la que se describe en la figura 1.10, donde puede observarse que este tipo de sensores cuenta con una cubierta que aisla el elemento



**Figura 1.8**  
Material piezoeléctrico. a) En su estado normal.  
b) Polarizado  
(Nakamura, 2012).

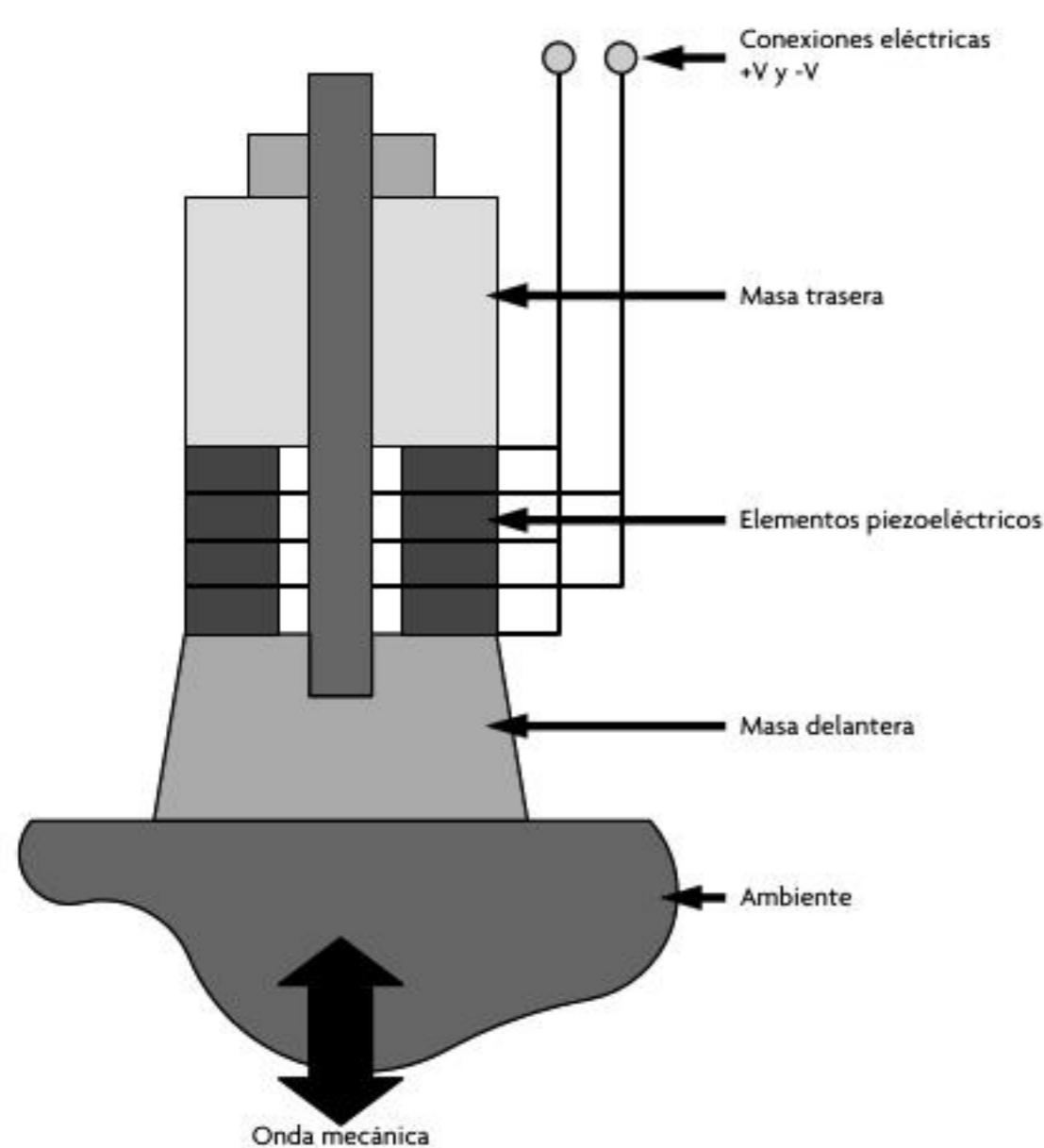


**Figura 1.9** Efecto piezoeléctrico inverso.



**Figura 1.10** Arreglo de un transductor piezoeléctrico  
(Nakamura, 2012).

<sup>2</sup> La expresión piezoeléctrico se deriva de la palabra griega *piezo*, que significa *presión*.



**Figura 1.11** Transductor de Langevin  
(Nakamura, 2012).

piezoeléctrico del ambiente, con el fin de evitar el ruido al momento de adquirir la señal, cables para acoplar eléctricamente el elemento piezoeléctrico a la electrónica del sensor, una interfaz que hace de amortiguador mecánico para evitar el daño del piezoeléctrico durante el sensado y una capa acopladora del transductor con el medio ambiente.

Por su parte, una arquitectura utilizada para aplicaciones de baja frecuencia en transductores piezoeléctricos es el transductor de Langevin, de sándwich o de Tonpilz, que se forma por anillos piezoeléctricos ordenados en pares. En el caso de estos transductores, dichos anillos son el elemento activo, ya que convierten la energía eléctrica en mecánica, la cual es transferida a la estructura metálica en la que están inmersos. Asimismo, en estos transductores también se incluye una masa trasera, cuya función es absorber la energía emitida por el piezoeléctrico en la parte distal, y una masa delantera que tiene dos funciones principales: acoplar el elemento activo con el medio y proteger a los anillos piezoeléctricos. Estos diseños o arquitecturas son utilizadas comúnmente en SONARES (véase figura 1.11).

En las configuraciones más simples, la masa de prueba actúa como placa piezoeléctrica y se comporta como un resorte. Debido a que el sensor es el que genera la corriente, a este se le conoce como sensor auto-generador (Kaajakari, 2009).

No obstante todas sus ventajas, la principal desventaja de los transductores piezoeléctricos es que todos estos tienen una alta susceptibilidad a la temperatura; supóngase que existe un alto incremento en la temperatura, esto generará una dilatación (deformación) del material, provocando, de manera indeseada, carga eléctrica que se traduce en ruido durante el sensado; otra desventaja importante es que la mayoría de los sensores implementados con el efecto piezoeléctrico no son compatibles con los procesos tecnológicos convencionales usados en microelectrónica, lo que encarece su fabricación.

Por otra parte, una ventaja del sensado piezoeléctrico es que la señal de salida es proporcional a la deformación del material, lo que le da linealidad a la salida.

Los materiales piezoeléctricos se caracterizan por la ecuación siguiente:

$$T = E\epsilon - eE_c \quad (1.3)$$

donde:

$e$ : coeficiente piezoeléctrico [ $C/m^2$ ]

$E_c$ : campo eléctrico [ $N/C$ ]

Es importante aclarar que un material piezoresistivo se diferencia de un material piezoeléctrico en que el primero cambia su resistencia eléctrica, mientras que en el segundo existe una variación de voltaje cuando el material es sometido a una deformación.

## Principio de transducción ultrasónico

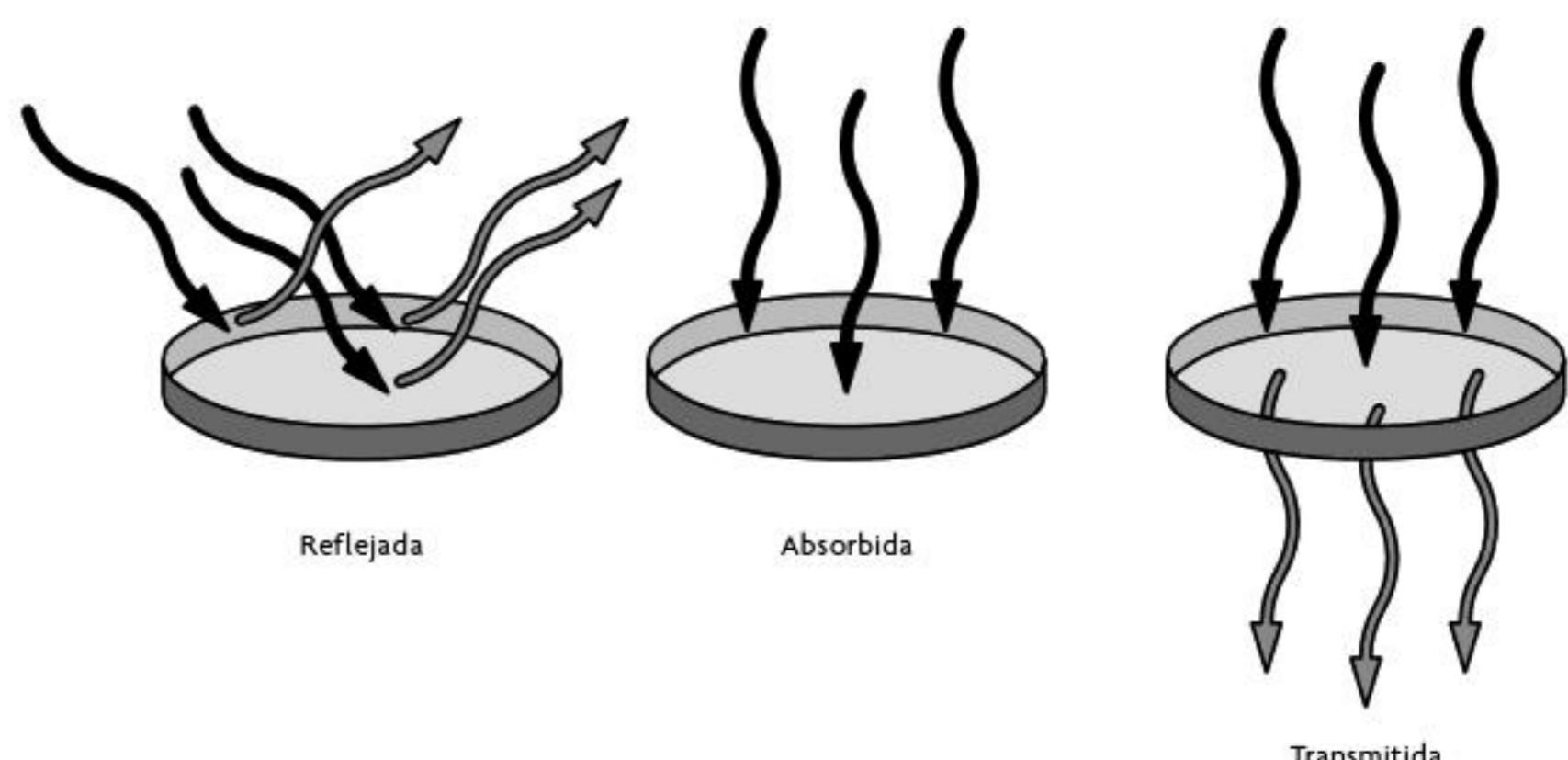
Una onda ultrasónica se define como aquella que se encuentra por encima de la frecuencia audible. Las ondas ultrasónicas son útiles para detectar y evaluar objetos en medios gaseosos, líquidos e, incluso, en medios sólidos. Una de las ventajas principales de las ondas ultrasónicas frente a las ondas electromagnéticas es que las primeras no se atenúan con rapidez en objetos metálicos y en el cuerpo humano, por lo que el principio de transducción ultrasónico es uno de los más utilizados en el área médica, en la detección de objetos metálicos y en la caracterización de materiales (Nakamura, 2012).

Otra característica de las ondas ultrasónicas es que estas son muy lentas comparadas con otros tipos de ondas; por ejemplo, con la velocidad de propagación de una onda electromagnética, ya que una onda ultrasónica se propaga a una velocidad de entre 300 m/s y 10 000 m/s, mientras que en las ondas electromagnéticas la velocidad de propagación llega a alcanzar hasta 1 000 000 m/s, lo cual hace que las ondas ultrasónicas sean detectadas con mayor facilidad. Pero la velocidad con la que una onda ultrasónica se propaga depende del medio a través del cual se transporte; así, este tipo de ondas tienen una mayor velocidad en medios sólidos como metales, una velocidad media en medios líquidos y una velocidad baja en medios gaseosos.

El principio de transducción ultrasónico se basa en la conversión de la energía mecánica que posee la onda ultrasónica en otro tipo de energía; por tanto, si esta onda mecánica incide sobre un objeto, una parte de esta será absorbida, otra reflejada y otra transmitida (véase figura 1.12). Debido a este fenómeno, los transductores ultrasónicos se utilizan principalmente para medir la velocidad con la que la onda regresa, el tiempo de su propagación, su atenuación o si la onda reflejada es o no interrumpida por algún objeto.

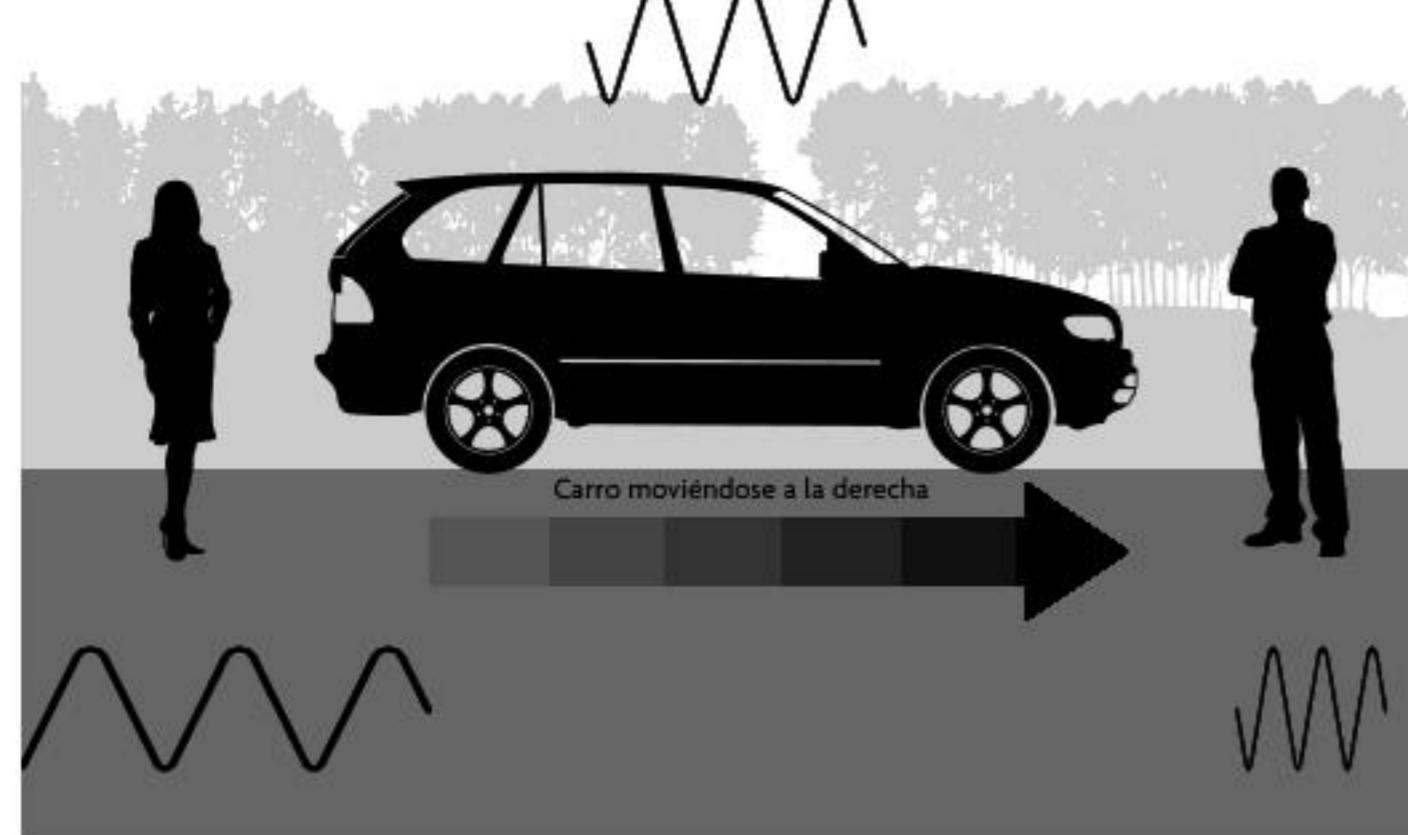
La base de los transductores ultrasónicos es el principio conocido como efecto Doppler, que es aquel que se produce cuando en un medio ultrasónico existe un aparente cambio en la frecuencia de radiación de la onda debido a un movimiento relativo entre la fuente emisora de dicha onda y el receptor (véase figura 1.13). En el caso de los transductores ultrasónicos, cuando el emisor y el receptor se acercan, la frecuencia aparente aumenta, mientras que cuando estos se alejan, la frecuencia aparente disminuye.

Además de utilizar el principio de efecto Doppler, los transductores ultrasónicos también necesitan de un transductor piezoelectrónico para su funcionamiento, de tal manera que la onda mecánica se encarga de excitar al piezoelectrónico, provocando que este se comprima o se tense para producir una señal eléctrica variable (véase figura 1.14). Algunas configuraciones usuales en los sensores ultrasónicos incluyen un emisor de las ondas ultrasónicas y un receptor, ambos colocados de forma conti-

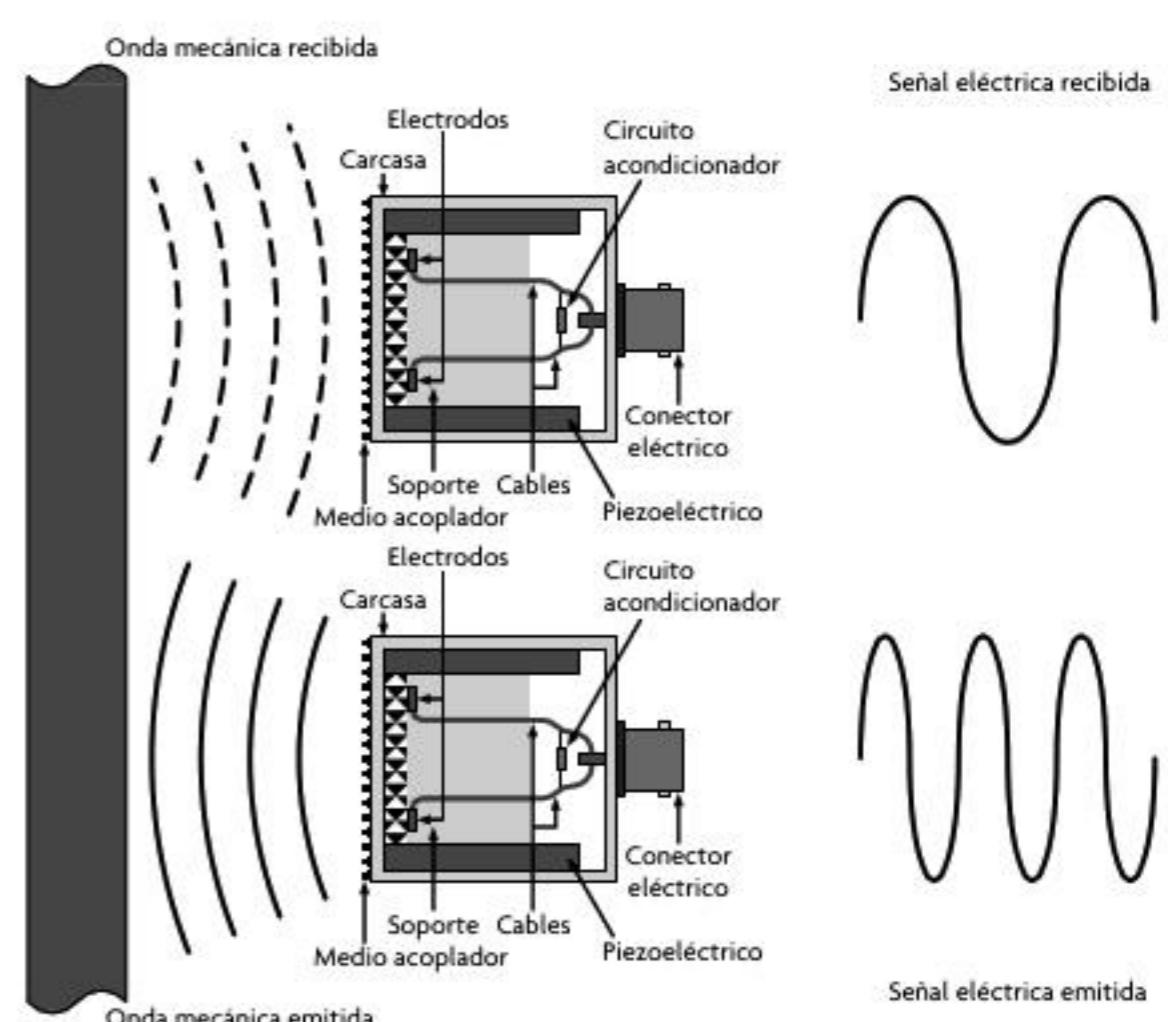


**Figura 1.12** Reflexión, absorción y transmisión de una onda.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary



**Figura 1.13** Efecto Doppler.



**Figura 1.14** Principio de transducción ultrasónico.

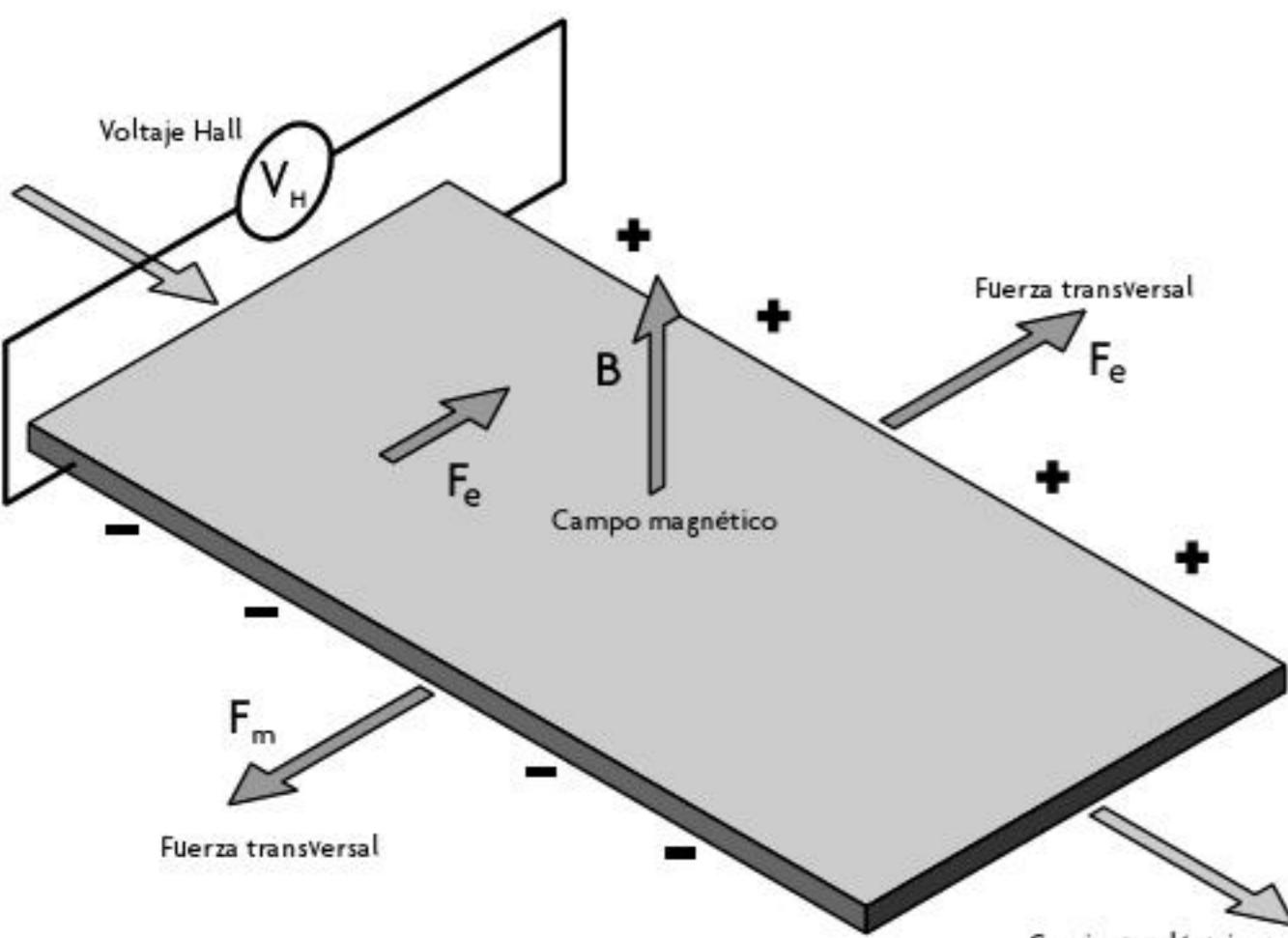
guía; esta configuración, por lo común, se usa para medir la proximidad o la velocidad de un objeto respecto a una referencia. En cambio, si el emisor y el receptor se colocan uno opuesto con respecto al otro, es posible detectar la interferencia de algún objeto o la velocidad de un fluido.

Algunas de las aplicaciones típicas de los transductores ultrasónicos son:

- Imagenología
- Diagnóstico médico
- Sonar (del inglés *Sound Navigation and Ranging*)
- Giroscopios de vibración
- Detección de fallas en metales
- Microscopios ultrasónicos
- Mecanizado, soldadura y limpieza

## Principio de transducción magnético

### Principio de transducción magnético basado en el efecto Hall



**Figura 1.15** Efecto Hall.  
ebrary

El principio de transducción magnético basado en el efecto Hall requiere de un campo magnético en corriente directa, generado por un imán permanente y una placa conductora, a diferencia de otros principios inductivos que utilizan bobinas y un flujo de campo magnético en corriente alterna.

El principio básico de su funcionamiento consiste en convertir un campo magnético a un voltaje equivalente mediante el efecto Hall.

El efecto Hall, descubierto en 1879 por Edwin F. Hall, establece que si una corriente eléctrica ( $I$ ) fluye a través de un conductor, en presencia de un campo magnético ( $B$ ), se ejerce una fuerza transversal (también llamada fuerza de Lorentz) que busca equilibrar el efecto de dicho campo, produciendo un voltaje, llamado voltaje Hall, medible en los extremos del conductor (véase figura 1.15).

El voltaje Hall ( $V_H$ ) para una placa conductora simple se puede calcular usando la ecuación:

$$V_H = \frac{IB}{ned_p}$$

donde:

- $n$ : densidad de portadores
- $e$ : carga del electrón
- $d_p$ : espesor de la placa conductora
- $I$ : corriente eléctrica
- $B$ : campo magnético

El uso de este principio de transducción depende del coeficiente conocido como *coeficiente de Hall* ( $R_H$ ), con unidades de  $\text{m}^3/\text{C}$ , el cual se calcula a través de la ecuación:

$$R_H = \frac{-1}{ne}$$

En materiales semiconductores, el voltaje y el coeficiente Hall son relativamente más complejos de calcular que en los materiales conductores, debido a la dificultad de determinar la densidad de

carga. Esto se debe a que en los semiconductores se presentan dos diferentes portadores de carga: electrones y huecos, y solo uno de ellos es *mayoritario*. En este caso, se dice que un portador es mayoritario cuando existe en mayor medida comparado con el otro; por ejemplo, si en un material semiconductor los portadores mayoritarios son electrones, se dice que el material es *tipo N*; por el contrario, cuando los portadores mayoritarios son huecos se dice que el material es *tipo P*.

La ventaja más importante de este principio de transducción radica en que este es inmune a casi cualquier tipo de suciedad, agua o polvo, a excepción de ruido de origen magnético, por lo que su uso se dificulta cuando se involucran motores o cualquier generador de campo magnético.

Por su parte, una de las principales desventajas de este tipo de transducción es que si el material tiene coeficiente piezoresistivo alto se puede generar un voltaje, debido a la deformación del mismo y no al efecto Hall. Otra importante desventaja es que la corriente que fluye a través del material genera calentamiento en este, provocando un cambio a la salida en el voltaje Hall y un cambio en la resistencia que presenta.

En la industria automotriz es muy común el uso de este principio de transducción en: df6336058adf5053813dd00258e6f84c ebrary

- Sensores de posición
- Detección de arranque de motor
- Cinturones de seguridad
- Cierre de puertas
- Posición de cigüeñal

### Transducción basada en la ley de Faraday

La inductancia es una propiedad de los conductores eléctricos; siempre que existe una corriente flujiendo en un medio conductor, existe un campo magnético asociado. De este modo, la inductancia ( $L$ ) del conductor es la capacidad que tiene dicho conductor para almacenar la energía electromagnética presente en el campo. Por ende, el principio de transducción basado en la ley de Faraday requiere de un elemento llamado inductor, el cual puede construirse con una bobina y un núcleo, como se muestra en la figura 1.16. Así, la inductancia se puede calcular usando la ecuación:

$$L = \frac{N^2 \mu_a A}{l} \quad (1.4)$$

donde:

$L$ : inductancia [H]

$N$ : número de vueltas

$l$ : longitud del núcleo [m]

$A$ : área de sección transversal [ $\text{m}^2$ ]

$\mu_a$ : permeabilidad absoluta del medio [H/m]

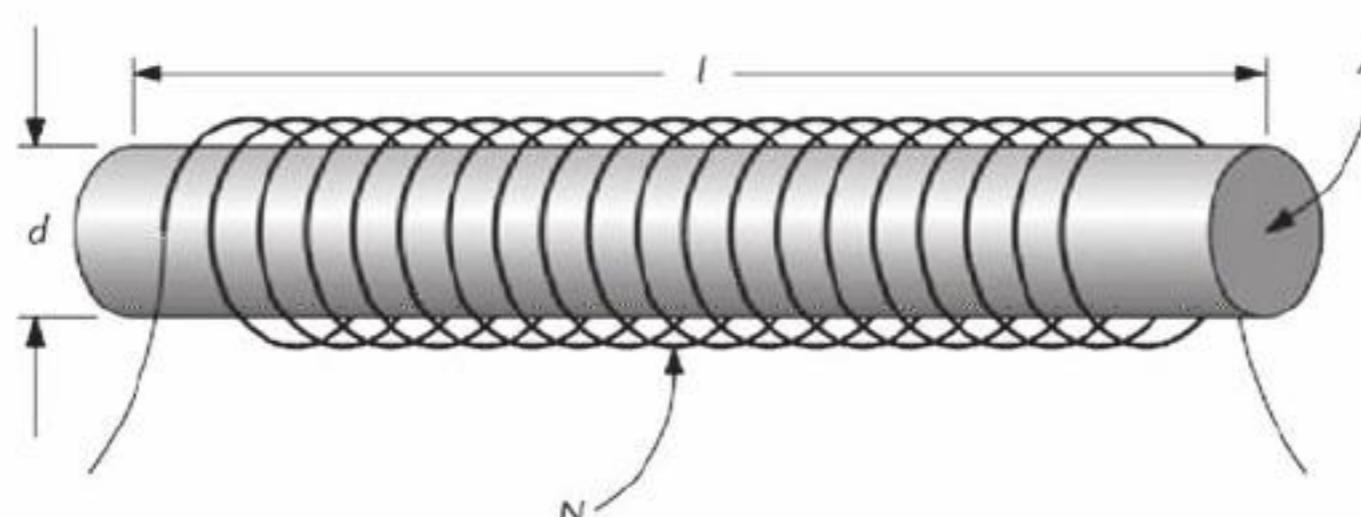
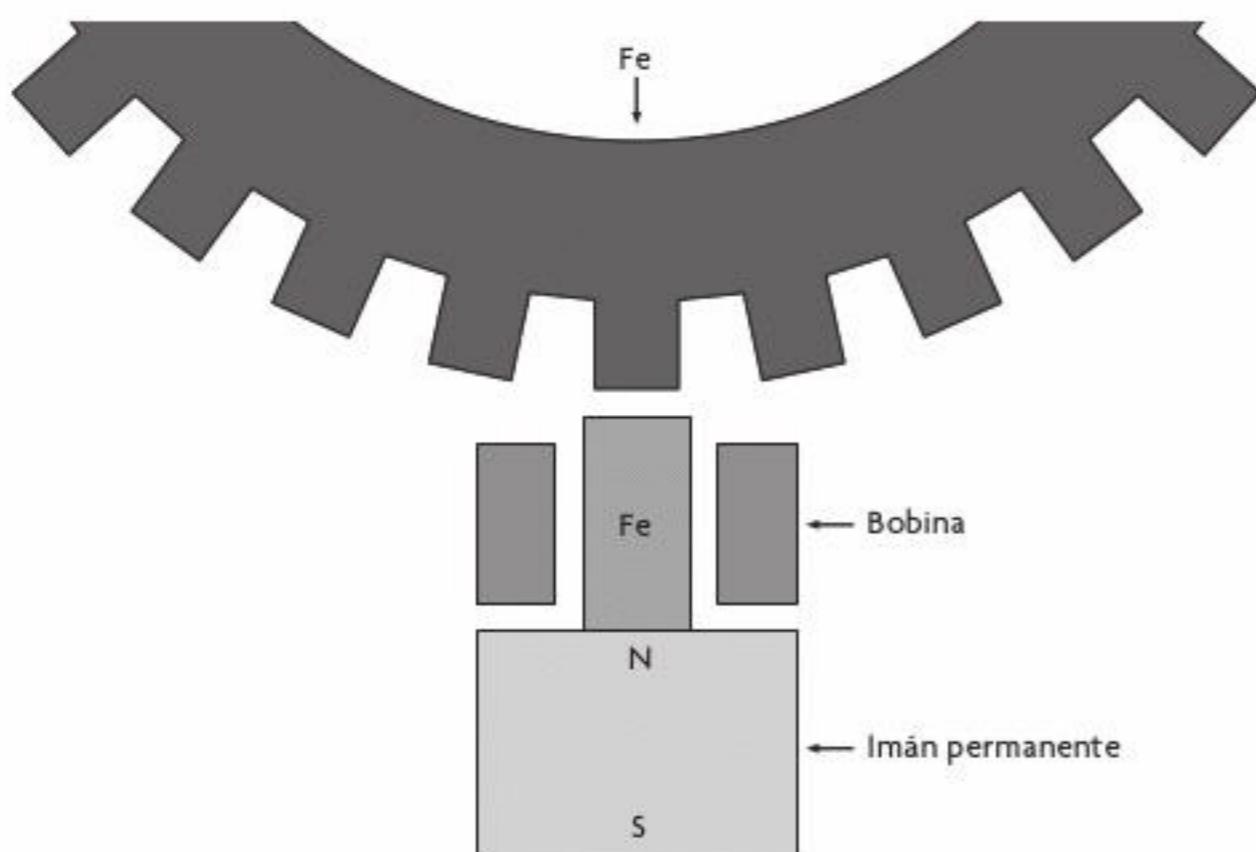


Figura 1.16 Bobina.

El principio de transducción de la ley de Faraday se basa en la interacción entre un campo magnético y un material ferroso, por lo que, al igual que el efecto Hall, este se ayuda de un campo magnético generado por un imán permanente; sin embargo, en este caso, la placa conductora en donde se presenta el efecto Hall es reemplazada por una bobina.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary



**Figura 1.17** Aplicación de la ley de Faraday en un transductor.

Es importante destacar que a través de este principio de transducción es posible convertir velocidad angular en voltaje, mediante una arquitectura base, como la que se muestra en la figura 1.17.

En este caso, cuando la rueda dentada gira se induce un voltaje en la bobina, el cual está dado por la Ley de Faraday:

$$V = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.5)$$

donde:

$V$ : voltaje inducido [V]

$N$ : número de vueltas en la bobina

$\frac{d\phi}{dt}$ : cambio de flujo magnético [Wb]

Pero supóngase que el flujo magnético cambia de manera periódica, y entonces el voltaje inducido se puede calcular usando la ecuación:

$$V = -\omega N n_T \phi_{pk} \cos(n_T \omega t) \quad (1.6)$$

donde:

$\omega$ : velocidad angular de la rueda [rad/s]

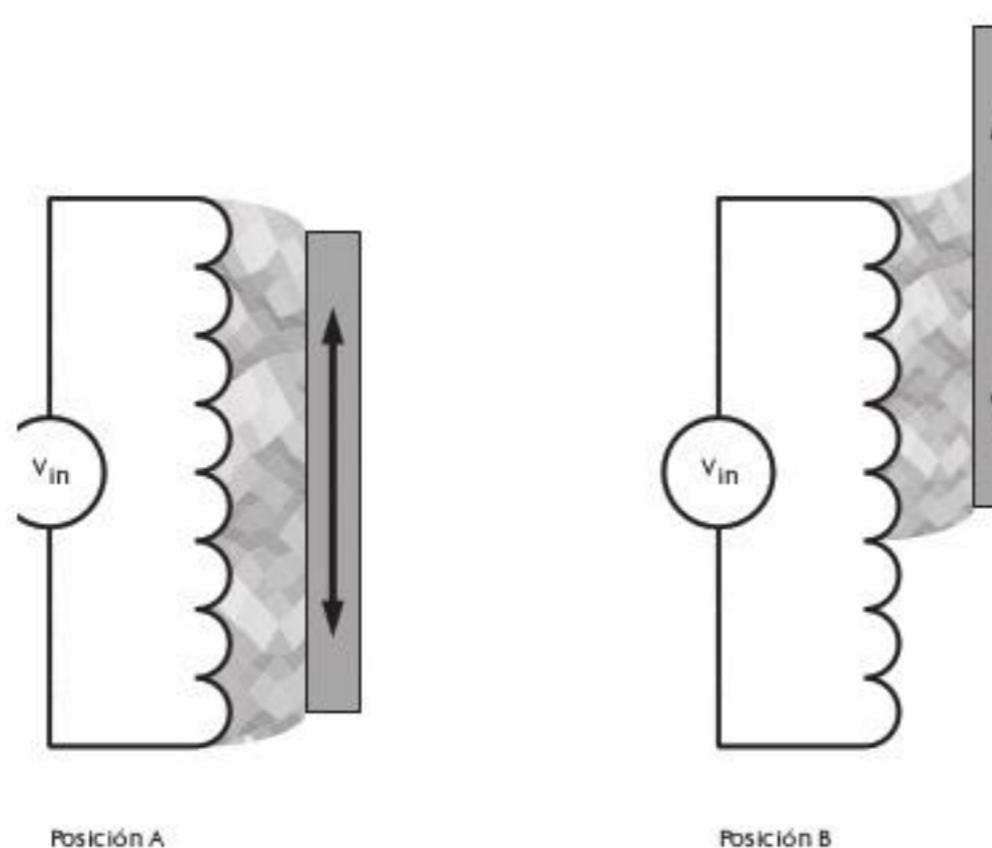
$n_T$ : número de dientes de la rueda

$\phi_{pk}$ : amplitud del flujo magnético [Wb]

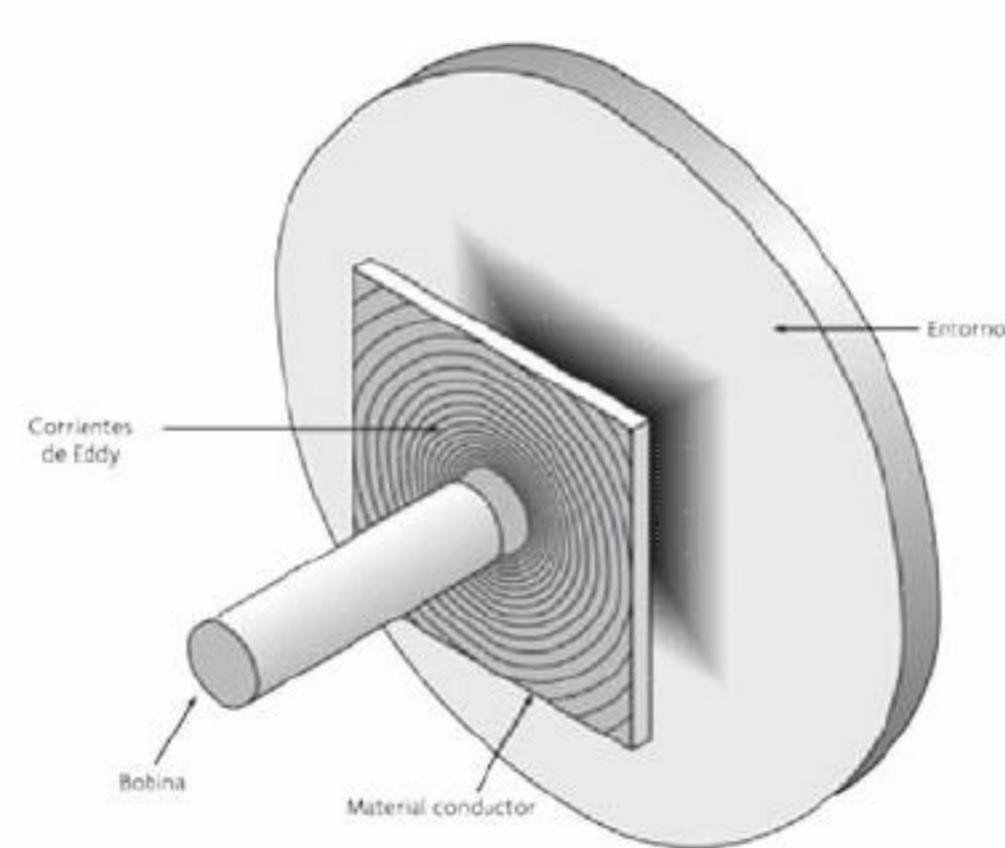
$t$ : tiempo [s]

Este principio de transducción se utiliza básicamente en sensores de reluctancia variable, aunque otras de sus principales aplicaciones es en la conversión del desplazamiento lineal en voltaje. Típicamente, este tipo de transductor consta de un núcleo móvil, hecho de material ferromagnético, y una bobina. Durante su funcionamiento, el núcleo se desplaza a través de la bobina; cuando este está casi afuera de la bobina, la inductancia en la bobina es muy baja, mientras que cuando se encuentra totalmente inmerso en la bobina, la inductancia aumenta, con lo cual es posible transformar el desplazamiento del núcleo móvil a inductancia (véase figura 1.18).

El principio de transducción inductivo se utiliza con mucha frecuencia debido a que su implementación es de bajo costo; no obstante, tiene la desventaja de no poder interactuar con materiales dieléctricos y su dificultad de enfocar el campo magnético en la dirección del núcleo móvil y el mayor consumo de energía, comparado con principios de transducción capacitivos. Al igual que los trans-



**Figura 1.18** Principio de transducción inductivo.



**Figura 1.19** Corrientes de Eddy.

ebrary

ductores capacitivos, los transductores basados en la Ley de Faraday también requieren un circuito de lectura altamente especializado.

### Transducción basada en corrientes de Foucault

La impedancia<sup>3</sup> de una bobina, cuando por esta circula una corriente alterna, depende de cómo sea su entorno. Si alrededor de la bobina se encuentra un material conductor o un material permeable, la impedancia de esta cambiará de manera significativa, generando en el material próximo a la bobina un fenómeno llamado *corrientes de Foucault, corrientes de Eddy* o *corrientes de remolino* (véase figura 1.19). La señal de corriente alterna que debe usarse para generar un cambio notable en la impedancia de la bobina oscila alrededor de algunas decenas de kilohertz.

La arquitectura base para un transductor basado en corrientes de Foucault se muestra de forma clara en la figura 1.20.

Si la corriente de Foucault en el conductor próximo a la bobina es muy grande, el cambio en la impedancia de la bobina también es grande. En general, el cálculo del cambio de impedancia en la bobina debido a este fenómeno es complejo, por lo que suele ser analizado mediante el uso de métodos de modelado con elemento finito. Este tipo de transducción se utiliza con mucha frecuencia para detectar objetos metálicos en la industria, ya que, al igual que el resto de los principios de transducción magnéticos, es poco susceptible al ruido y a la suciedad.

### Principio de transducción térmico

El calor es una forma de energía presente en los sistemas. No obstante, la cantidad de calor contenido en un sistema no puede ser medida directamente, aunque con los instrumentos apropiados sí es posible medir cambios de calor. En este sentido, la temperatura desempeña un papel muy importante, ya que constituye una medida del nivel de calor presente en un objeto, pero la forma de correlacionar la temperatura con algún otro tipo de energía es muy variada. Por ejemplo, cuando se desea convertir energía eléctrica en energía térmica, en general se hace uso de la alta dependencia que existe entre la temperatura y la corriente eléctrica a través de un dispositivo electrónico. Por el contrario, cuando se desea convertir energía térmica en energía eléctrica se usan las relaciones de

Thomson.  
ebrary

#### Efecto Joule

El efecto Joule debe su nombre a James P. Joule, quien fue el responsable de su descubrimiento. Este efecto, que es irreversible, relaciona el calor generado y el flujo de corriente en un conductor; así, cuando la corriente se incrementa, los portadores de carga en el circuito comienzan a colisionar, estas colisiones se pueden apreciar en forma de calor disipado por el conductor. El efecto Joule establece que el calor producido por una corriente eléctrica es igual al producto de la resistencia del conductor, el cuadrado de la corriente y el tiempo, y se representa a través de la siguiente ecuación:

$$Q = I^2 R t \quad (1.7)$$

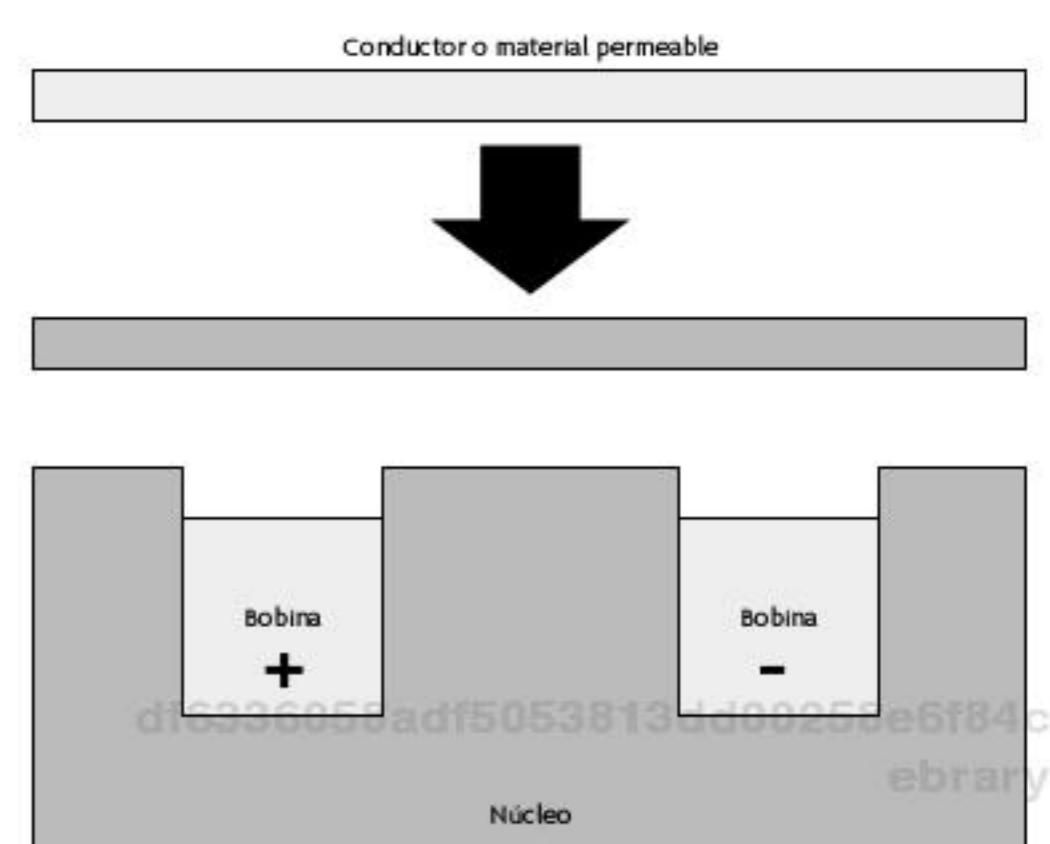
donde:

$Q$ : calor [J]

$I$ : corriente eléctrica [A]

$R$ : resistencia eléctrica [ $\Omega$ ]

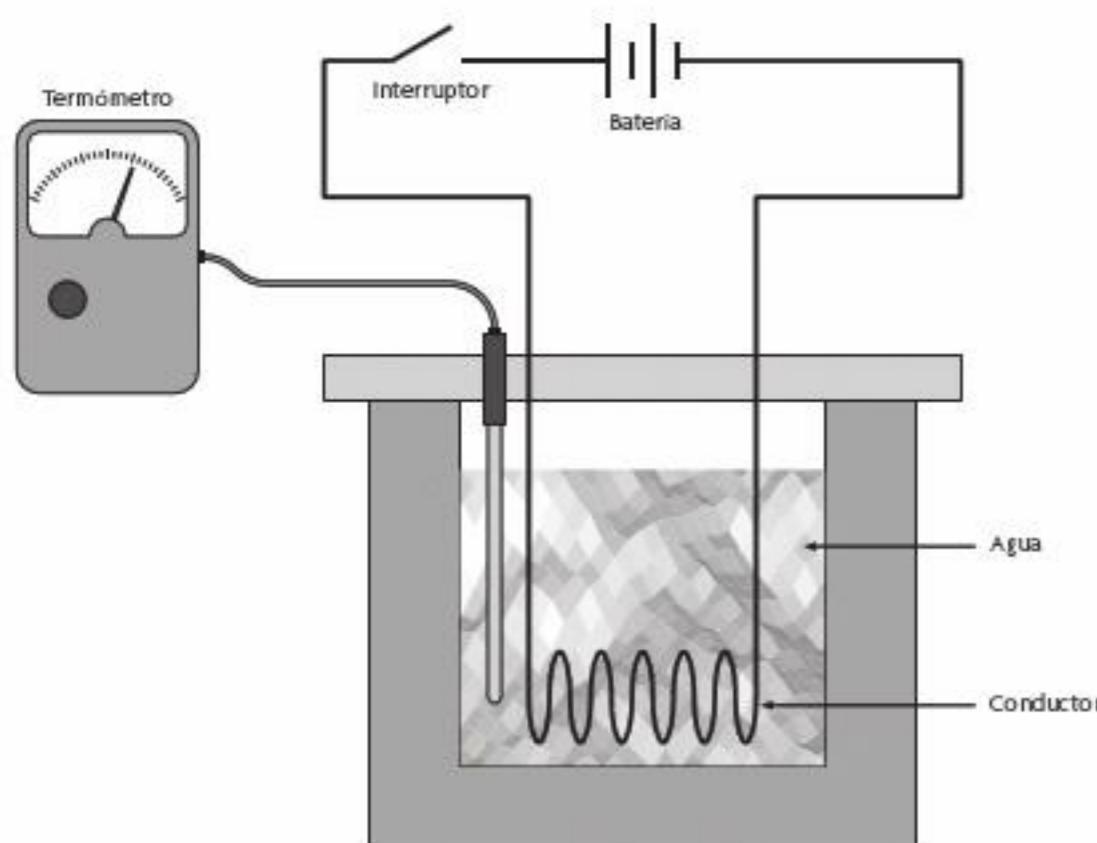
$t$ : tiempo [s]



**Figura 1.20** Arquitectura para un transductor por corriente de Foucault.

<sup>3</sup> La impedancia en un elemento constituye la oposición al paso de corriente alterna. Esta magnitud establece una relación entre el voltaje y la corriente.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary



**Figura 1.21** Efecto Joule.

Para comprender mejor el funcionamiento de este efecto, considérese que un voltaje es aplicado a un conductor, donde los portadores de carga, en este caso los electrones, adquieren energía cinética proveniente de la fuente de voltaje, la cual provoca que los electrones se muevan; por tanto, mientras más energía tengan más se moverán, provocando cada vez más colisiones entre estos, las cuales se transforman en vibraciones dentro del conductor y provocan que este incremente su temperatura (véase figura 1.21).

#### Relaciones de Thomson

De acuerdo con las leyes de la termodinámica, para convertir el calor emitido por un sistema en energía eléctrica es necesario que exista una diferencia de temperatura entre el sistema y una cierta referencia. Estos fenómenos termoeléctricos se pueden describir con el uso de las relaciones de Thomson: el efecto Seebeck, el efecto Peltier y el efecto de Thomson.

#### Efecto Seebeck

Este efecto fue descubierto en 1821 por Thomas Johann Seebeck. Se presenta cuando dos conductores distintos, que están a temperaturas diferentes, se ponen en contacto, formando un circuito, generando una fuerza electromotriz y, por tanto, creando una corriente eléctrica. Durante este efecto, si una de las uniones de los materiales cambia de temperatura, también cambia la corriente eléctrica que fluye a través del lazo que los une. Por ende, para que este efecto se presente es importante que cada punto de unión de los materiales esté a diferentes temperaturas (véase figura 1.22).

Si la temperatura de las dos uniones es la misma, el campo eléctrico presente en cada una de las uniones será de igual magnitud, pero de signos opuestos, por lo que no se registrará cambio alguno en la corriente; pero, si por el contrario, las puntas presentan distintas temperaturas, el campo eléctrico será diferente y se podrá observar un incremento o decremento de corriente eléctrica. Este principio de transducción es normalmente utilizado en termopares.

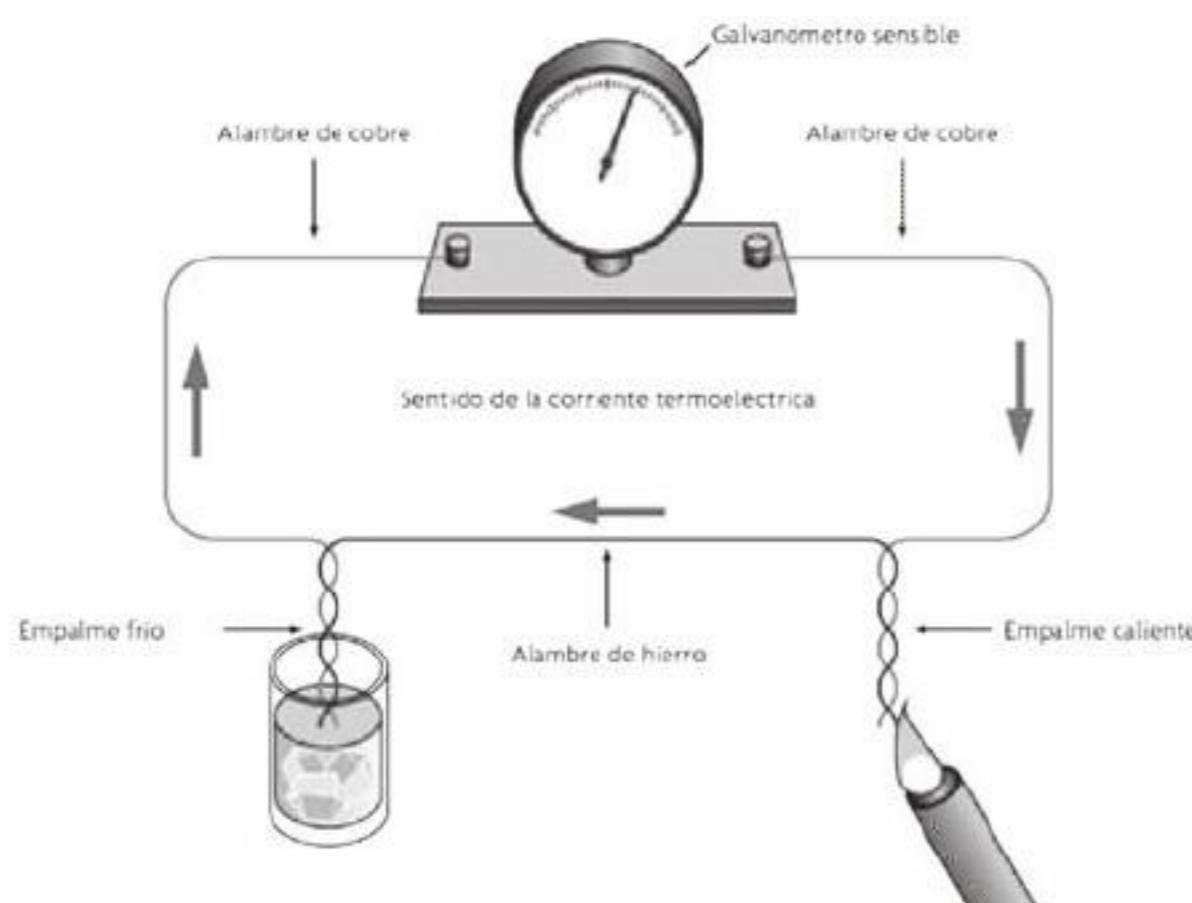
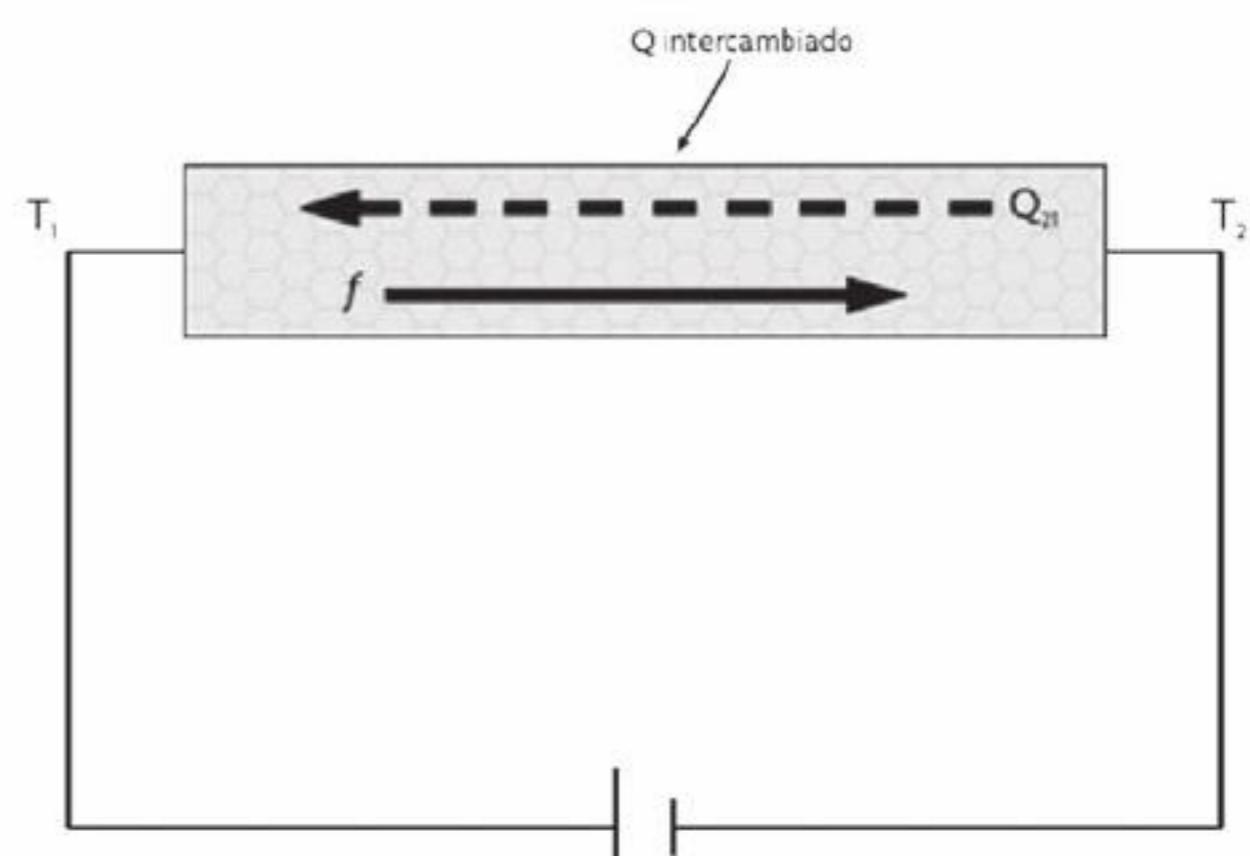
#### Efecto Peltier

Descubierto en 1834 por Jean Charles Athanase Peltier, a quien debe su nombre, este efecto está íntimamente relacionado con el efecto Seebeck. Como ya se sabe, al unir dos metales distintos se genera una corriente eléctrica; pero entonces surge la siguiente pregunta: ¿cómo se comporta la corriente eléctrica cuando las uniones entre los materiales absorben o emiten calor? El efecto Peltier explica precisamente este fenómeno, ya que este se presenta al unir dos metales diferentes entre sí en un circuito eléctrico; si la unión de estos metales puede absorber o emitir calor, esta absorción o emisión de calor será proporcional a la corriente eléctrica presente en el circuito; así, el sentido de la corriente determina si se está absorbiendo o se está emitiendo calor.



**Figura 1.22** Efecto Seebeck.

Supóngase que una de las uniones de los metales presenta una temperatura distinta a la del otro extremo; en este caso, el campo eléctrico generado induce el flujo electrónico, elevando la corriente eléctrica del circuito, pero si en ese mismo extremo la temperatura comienza a cambiar en sentido opuesto, el campo eléctrico generado irá en contra del flujo electrónico y la corriente eléctrica presente se verá disminuida. Este principio de transducción se ilustra en la figura 1.23.

**Figura 1.23** Efecto Peltier.**Figura 1.24** Efecto Thomson.

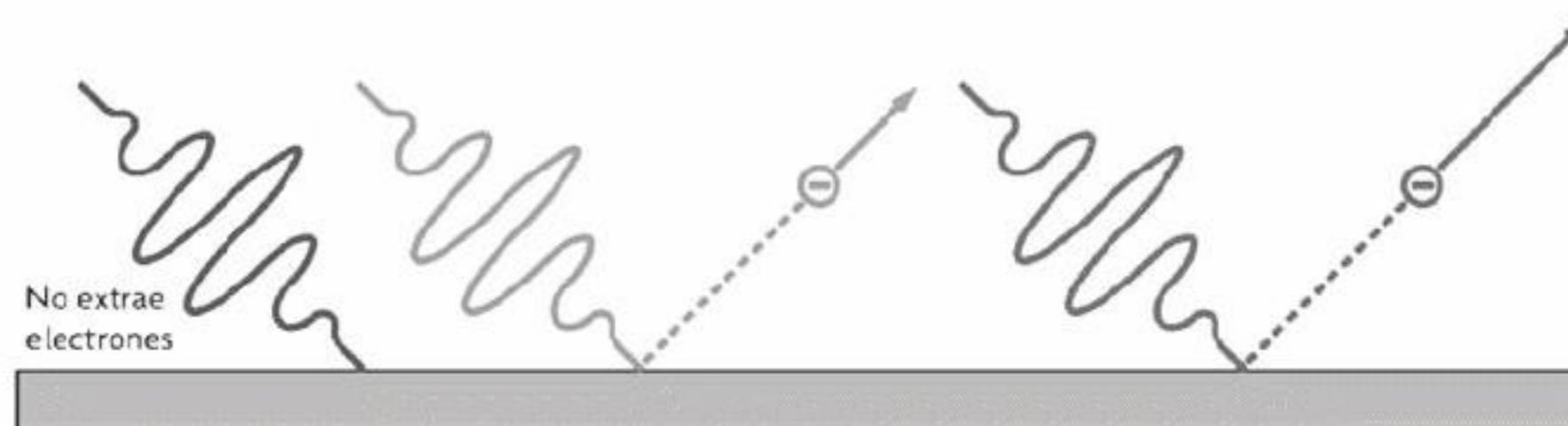
### Efecto de Thomson o calor de Thomson

El calor de Thomson es un efecto reversible, el cual establece que si una corriente fluye a través de un conductor, y dicho conductor se encuentra inmerso en un gradiente de temperatura, el calor generado o absorbido será proporcional al producto de la corriente y el gradiente de temperatura (véase figura 1.24).

El principio de transducción térmico influye en casi cualquier procedimiento de medición de variables físicas y es posible que se manifieste de diferentes formas; por ejemplo, en la variación de volumen o estado de un cuerpo (sólido, líquido, gas), la variación de la resistencia en algún material, la deformación o variación en la intensidad de radiación emitida, entre otros; en general, dichos fenómenos afectan de manera negativa a otros principios de transducción, ya que todos los materiales son sensitivos a la temperatura.

### Principio de transducción fotoeléctrico

Antes de estudiar cómo ocurre un fenómeno fotoeléctrico es necesario definir qué es un fotón. Un fotón es un tipo de partícula elemental, llamado originalmente por Albert Einstein "cuanto de luz". El término fotón es en extremo usado cuando se habla de una partícula de luz o un "cuanto de energía electromagnética". Se dice que un efecto fotoeléctrico ocurre cuando se hace incidir un fotón en un material, y dicho material emite un electrón. Así, el principio de transducción fotoeléctrico se define como la conversión de luz a una señal eléctrica. Los efectos fotoeléctricos ocurren dependiendo de cuánta energía tenga el fotón incidente y cuánta energía requiere el material para emitir un electrón. Si un fotón incidente no excede la energía necesaria para que el material emita un electrón, no existirá efecto fotoeléctrico. La energía contenida en un fotón está relacionada con su longitud de onda; así, entre más corta sea la longitud de onda, mayor energía tendrá el fotón (véase figura 1.25).

**Figura 1.25** Efecto fotoeléctrico.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Una de las formas más simples de lograr que este fenómeno ocurra es dirigir un haz de luz en dirección a una delgada película de material; así, cuando un fotón incide sobre el material, emite un electrón, por lo que la *conductancia*<sup>4</sup> de la película aumenta, incrementando la corriente presente en el circuito de medición.

La principal ventaja de este tipo de transducción es su alta sensibilidad y su gran capacidad para trabajar en diversas condiciones ambientales.

Las aplicaciones más significativas de este tipo de principio de transducción son en las mediciones de dimensiones, desplazamientos, deformaciones, fuerza, presión, torque, flujo y en algunos otros fenómenos dinámicos.

### Principio de transducción químico-eléctrico

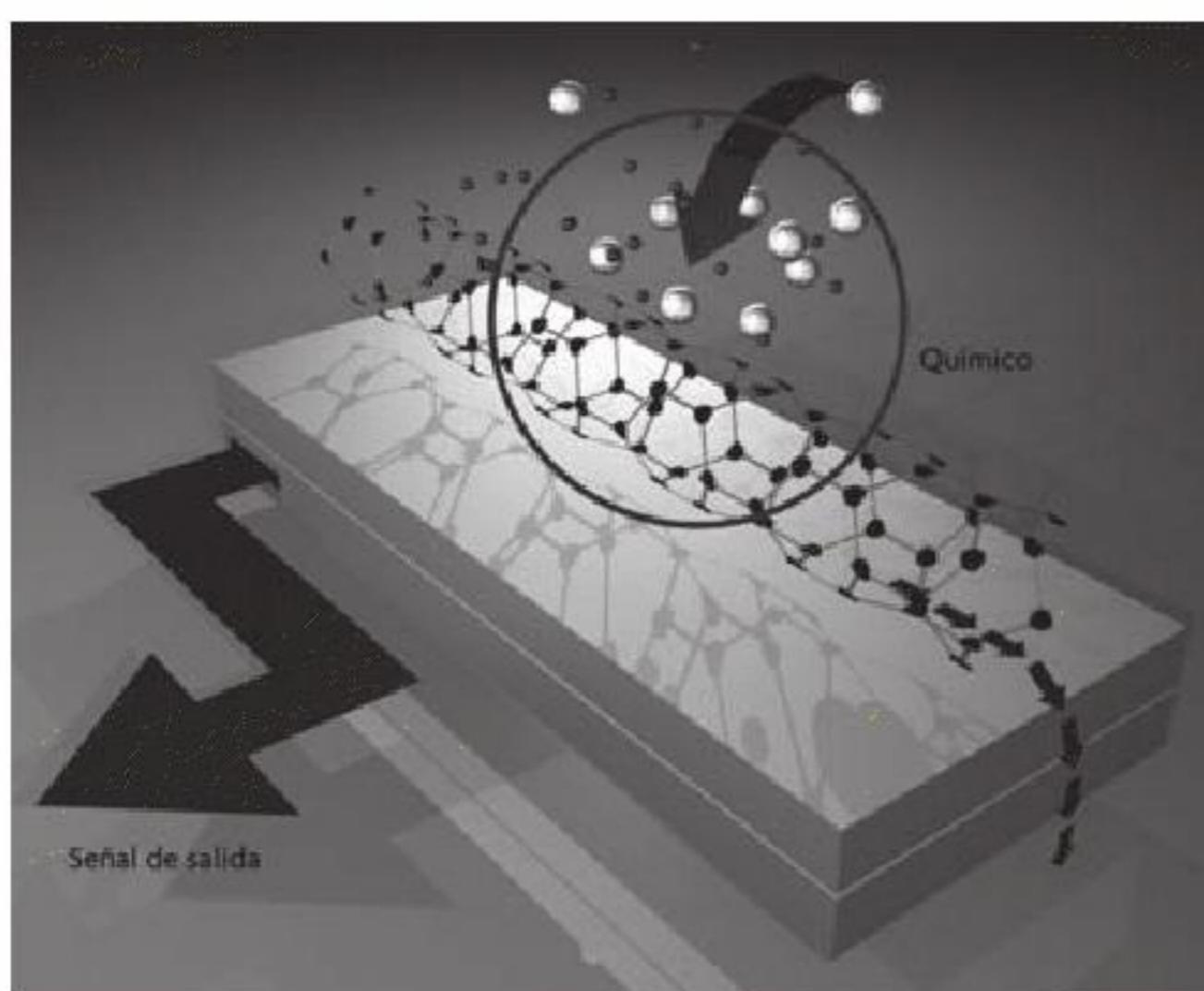


Figura 1.26 Principio de transducción químico-eléctrico.

El principio de transducción químico-eléctrico se basa en la idea de generar una señal eléctrica manipulable a partir de una actividad química. Las formas en la que se lleva a cabo este tipo de transducción son muy variadas y dependen del tipo de fenómeno químico del que se trate, así como del producto químico derivado de este fenómeno y que se desea transducir (véase figura 1.26).

Como todos los tipos de sistemas estudiados, este también requiere de un medio controlado para su correcto funcionamiento, ya que la calidad de señal de salida que entrega el transductor se ve comprometida si existe variación de temperatura o una concentración de algún componente que genere alteraciones en la medición, aun cuando este tipo de transductor es selectivo al componente que se desea medir. Por ejemplo, algunos transductores son selectivos a partículas de alcohol en el aire, pero si existe una gran variación de temperatura, este mismo transductor podría detectar concentraciones de benceno e incluso monóxido de carbono al mismo tiempo, lo que se vería reflejado en una señal eléctrica ruidosa y de poca utilidad. Una característica importante de este tipo de transductores es que la parte receptora del transductor que está en contacto con el fenómeno a medir no debe presentar reacción química alguna, de otra manera alteraría la medición.

### Principio de transducción resistivo

Este tipo de principio de transducción es hasta cierto punto sencillo de comprender, pues cuando un material presenta resistencia eléctrica significa que el elemento se opone al paso de corriente eléctrica a través de este. La resistencia de cada material depende del volumen del mismo, a diferencia de la resistividad, que es una característica intrínseca que depende de la naturaleza propia del material. Para una mayor comprensión al respecto, considérese la resistencia del sistema uno ( $R_a$ ) que se muestra en la figura 1.27; debido a que este dispositivo tiene mayor volumen, tam-

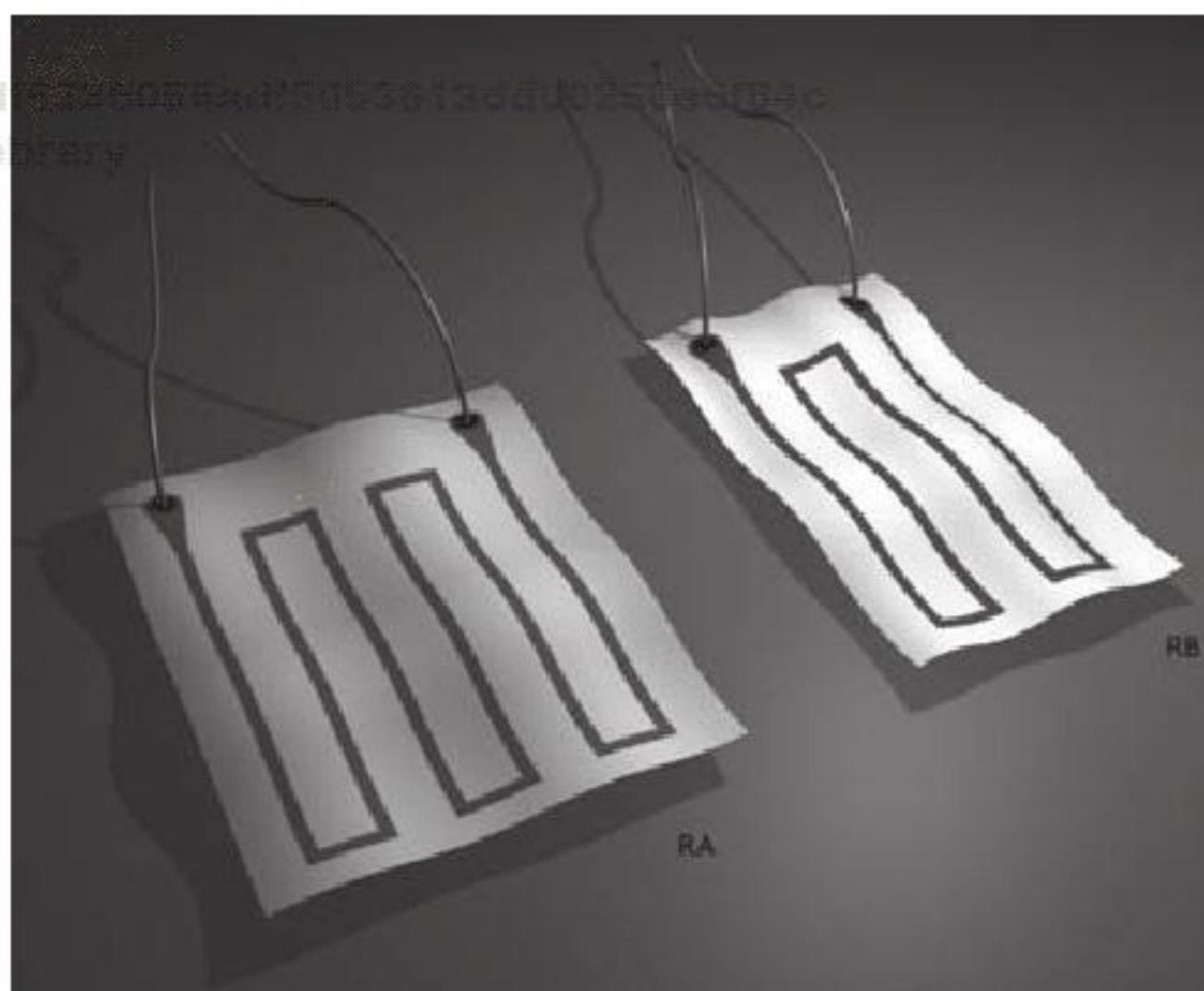


Figura 1.27 Resistencia.

<sup>4</sup> La conductancia es la propiedad que presenta un material para mover carga eléctrica.

bién tendrá mayor resistencia; por tanto, si se cortara un trozo de ese material y se midiera la resistencia presente en este ( $R_b$ ), esta sería más pequeña comparada con  $R_a$ .

La resistencia de un material se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1.8)$$

donde:

$R$ : resistencia eléctrica [ $\Omega$ ]

$\rho$ : resistividad [ $\Omega\text{m}$ ]

$l$ : longitud del material [m]

$A$ : área del material [ $\text{m}^2$ ]

Es importante mencionar que el principio de transducción resistivo es diferente al piezoresistivo, ya que mientras el primero se basa en el cambio de resistencia presente, el segundo se basa en el cambio de resistividad. Así, el principio de transducción resistivo depende de cuánto material esté presente en ese momento y no de un fenómeno que cambie la resistividad del mismo.

La resistencia eléctrica se define como la constante de proporcionalidad entre la corriente eléctrica y el voltaje; por tanto, su relación constitutiva está regida

por la ley de Ohm:

$$V = RI \quad (1.9)$$

donde:

$V$ : voltaje [V]

$R$ : resistencia [ $\Omega$ ]

$I$ : corriente eléctrica [A]

De modo esquemático, la relación entre el voltaje y la corriente es lineal, donde la pendiente de la recta constituye la resistencia. La forma en que se lleva a cabo este tipo de transducción es mediante el cambio de posición en la que se encuentra el contacto con respecto al elemento resistivo. Por ejemplo, considérese el esquema que se muestra en la figura 1.28, donde si la posición del cursor cambia, entonces también cambia el voltaje ( $V_s$ ) presente entre sus terminales.

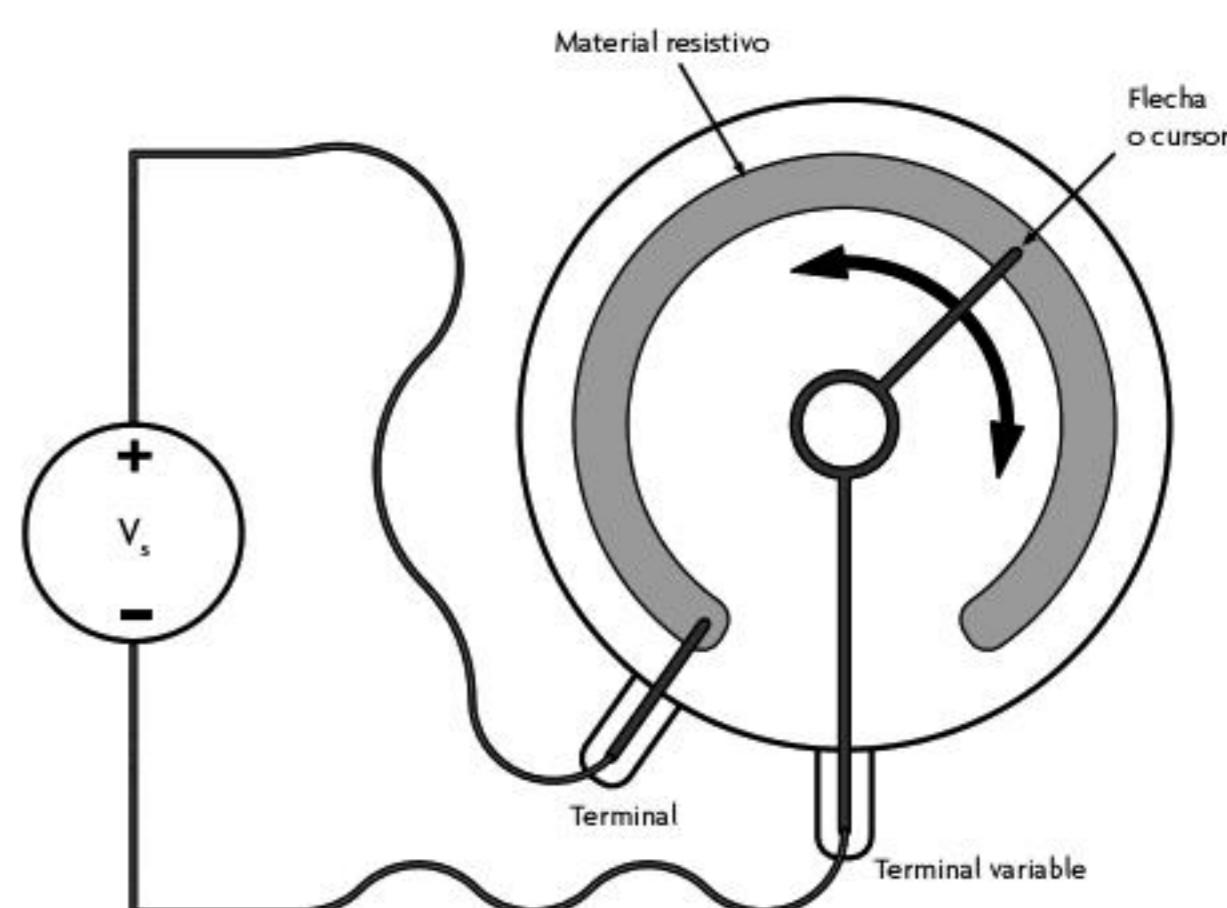


Figura 1.28 Arquitectura base para un transductor resistivo.

## 1.4 Sensores

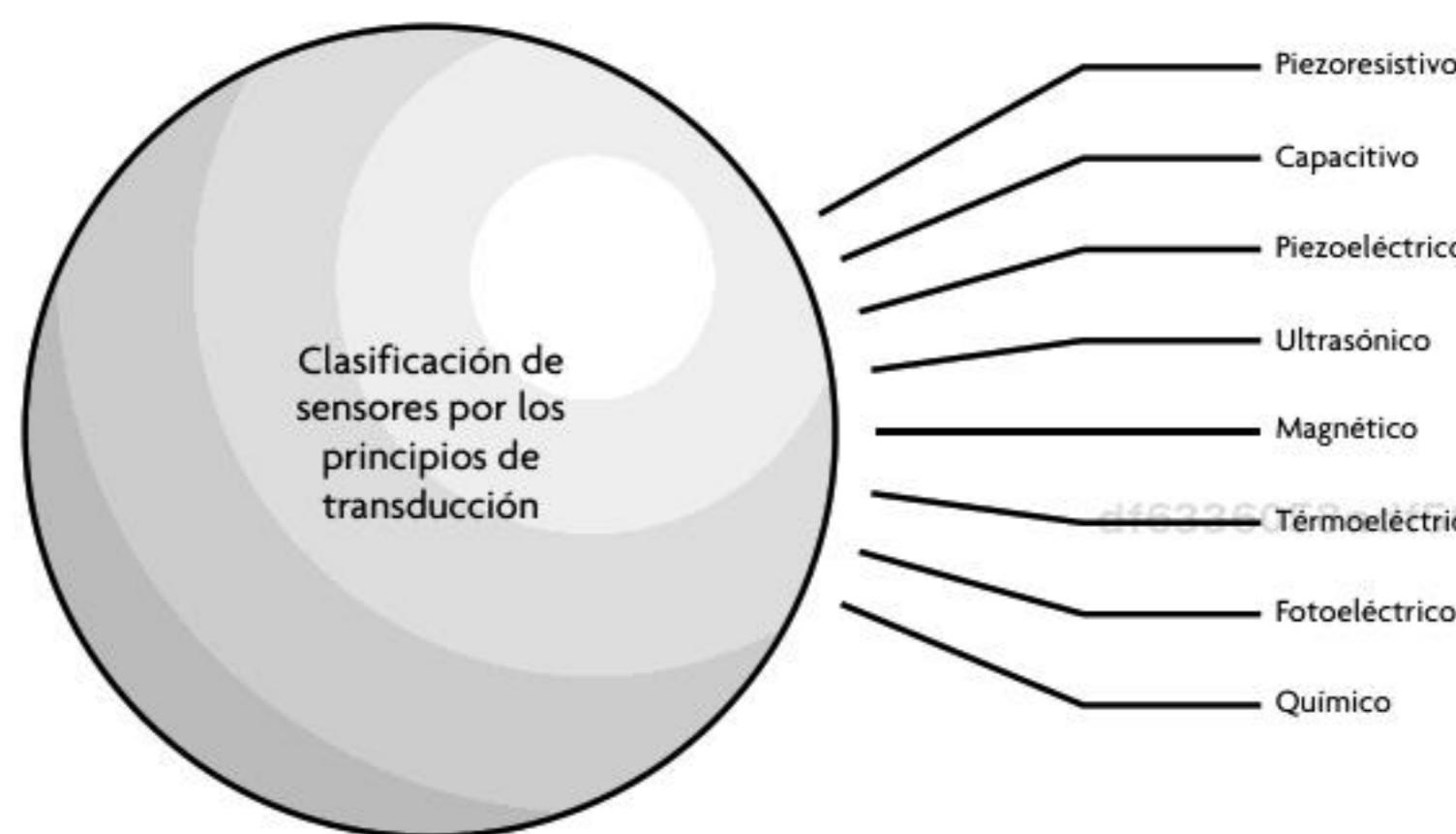
En secciones anteriores se define el concepto de transductor y se analiza cómo este convierte la energía de un dominio a otro. Entonces, se puede decir que la definición del concepto de **sensor** está íntimamente relacionada con la definición de transductor, ya que un sensor siempre hará uso de un transductor. No obstante, la principal diferencia entre un transductor y un sensor radica en que el sensor no solo cambia el dominio de la variable física medida, sino que además la salida del sensor será un dato útil para un sistema de medición. De este modo, un sensor se define como un dispositivo de entrada que provee una salida manipulable de la variable física medida.

A diferencia de un transductor, el **sensor** solo puede ser un dispositivo de entrada, ya que este último siempre será un intermediario entre la variable física y el sistema de medida. Así que en el caso de un sensor no basta con transformar la energía, este debe tener el tipo de dominio requerido. Hoy día, los sensores entregan señales eléctricas a la salida, ya sean analógicas o digitales, debido a que este tipo de dominio físico es el más utilizado en los sistemas de medida actuales.

Los sensores pueden clasificarse de muchas formas distintas, pero las más comunes son por el tipo de variable a medir o por el principio de transducción utilizado.

## Clasificación de los sensores por el principio de transducción

Como se afirma en la sección anterior, los sensores se pueden clasificar por el tipo de transductor que se utilice para su implementación; sin embargo, este tipo de clasificación suele ser poco práctica, ya que no ofrece una idea clara acerca de qué tipo de variable física puede medir este (véase figura 1.29).



**Figura 1.29** Clasificación de sensores por los principios de transducción.

## Clasificación de los sensores por el tipo de variable medida

Esta clasificación suele ser la más común; sin embargo, tiene la desventaja de provocar cierta confusión en el lector, ya que un mismo sensor puede ser utilizado para la medición de distintas variables físicas; por ejemplo, un sensor ultrasónico resulta muy útil si se desea medir proximidad, el nivel de un líquido, la presencia de un objeto, la velocidad de un fluido, etcétera. No obstante, su principio de funcionamiento siempre es el mismo, y solo depende del tipo de configuración en que se coloque y cómo se interprete la señal de salida del mismo. De aquí en adelante, en este libro se hace referencia al tipo de sensor dependiendo de qué tipo de variable física esté midiendo (véase figura 1.30).

Clasificación de los sensores según la variable física a medir	De posición, velocidad y aceleración
	De nivel y proximidad
	De humedad y temperatura
	De fuerza y deformación
	De flujo y presión
	De color, luz y visión
	De gas y pH
	Biométricos
	De corriente

**Figura 1.30** Clasificación de sensores por el tipo de variable medida.

Todos los sensores, sin importar cuál sea su tipo de principio de transducción o qué tipo de variable física sea la que midan, siempre tienen características particulares que los distinguen entre sí. Por ejemplo, supóngase que se desea implementar un sistema de visión en el que se usará una cámara para captar la información; si se utiliza una cámara de marca A y otra de marca B, cada una de estas tendrá características distintas entre sí, a pesar de que tienen el mismo fin de aplicación. En el caso de los sensores, las características que distinguen a un sensor con respecto a otro son de

carácter estático o dinámico. En este caso, las características estáticas se refieren a aquellos rasgos que no cambian con el tiempo, mientras que las características dinámicas son aquellas que describen al sensor en función del tiempo.

### Características estáticas

#### Sensitividad

La sensitividad de un sensor se define como la entrada mínima que requiere este para provocar una salida detectable. La representación gráfica de cómo cambia la salida del sensor con respecto a la entrada se conoce como **curva de salida**, donde la pendiente de la recta tangente a esta curva constituye la sensitividad del sensor.

Por ejemplo, en algunos acelerómetros analógicos, la sensitividad es de 800 mV/G; esto significa que cada  $9.81 \text{ m/s}^2$  de aceleración aplicada cambian 0.8 V, así que para encontrar una correlación entre la aceleración aplicada y la salida del sensor basta con formular una regla de tres; sin embargo, existen sensores que tienen un comportamiento no lineal, como sucede con la mayoría de los sensores de gas, en los cuales, para correlacionar la concentración de gas medida con el voltaje entregado a la salida, se debe hacer una caracterización en todo el rango de funcionamiento del sensor.

#### Rango

El rango de un sensor se define como el intervalo presente entre el valor mínimo y el valor máximo de la variable física que puede medir el sensor.

#### Precisión

La precisión de un sensor se refiere al grado de repetitividad de una medida. Por ejemplo, si se mide la misma variable física con el mismo valor, el sensor siempre deberá entregar exactamente la misma salida cada vez.

#### Exactitud

La exactitud se define como la diferencia máxima entre la salida actual del sensor y el valor real de la variable medida. Por lo común, la exactitud de un sensor se expresa de manera porcentual. En general, la mayoría de los sensores presenta una distribución alrededor del valor real de la variable física que está sensando, sin importar que el valor real no cambie.

### Linealidad estática

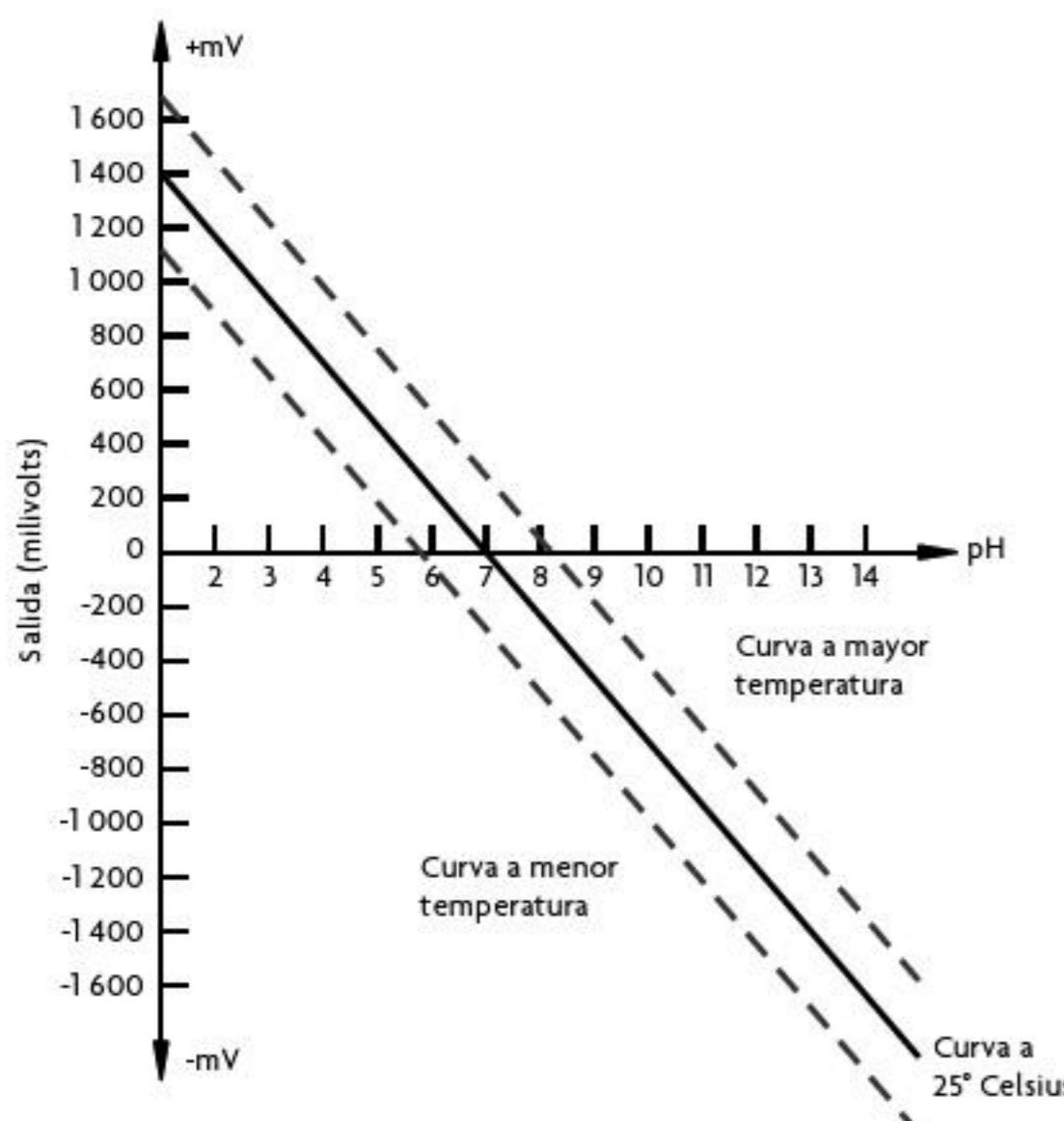
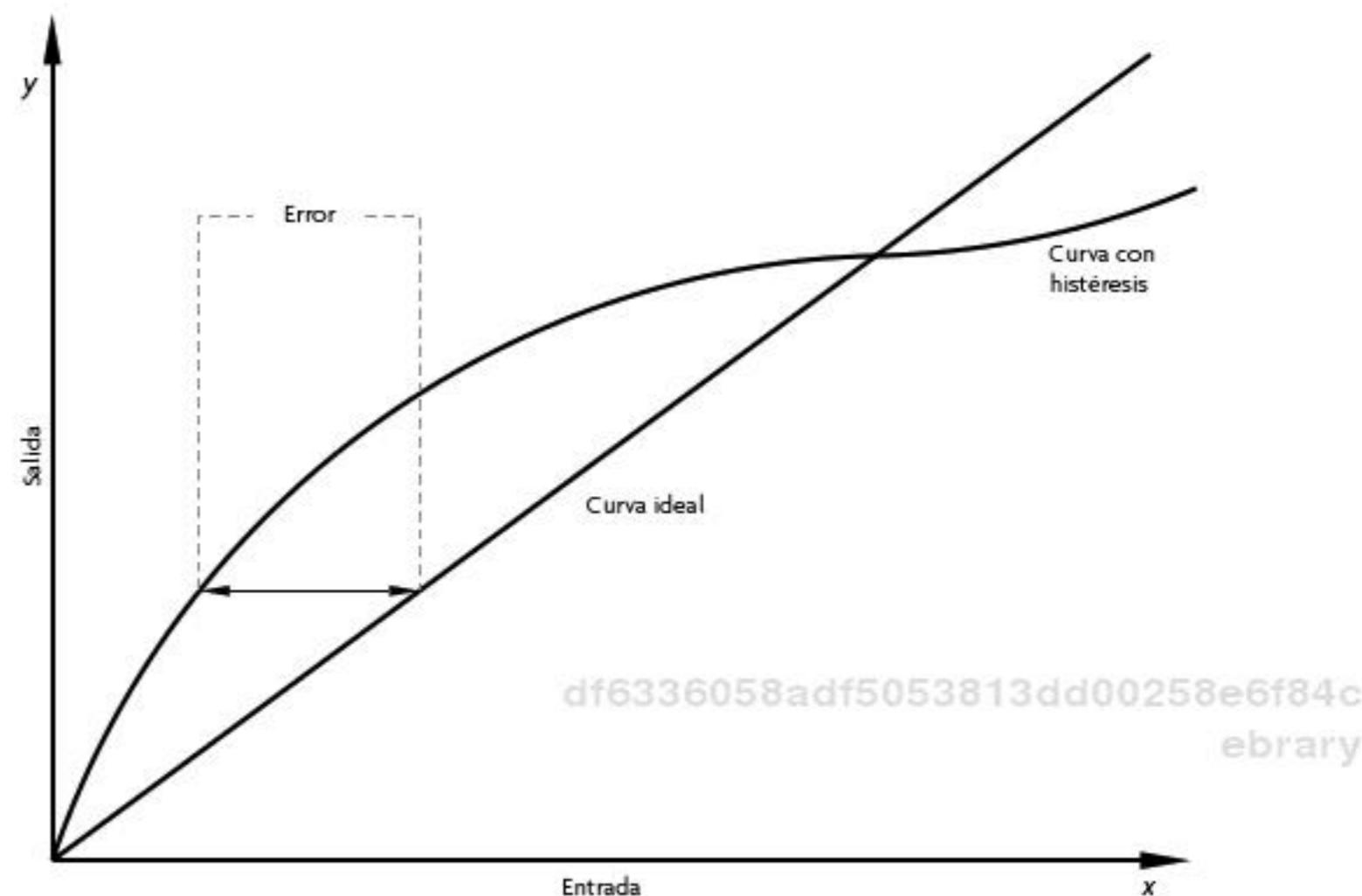
ebrary

La linealidad estática de un sensor depende de modo principal de factores ambientales, por lo que se define como la desviación que presenta el sensor entre la curva proporcionada por el fabricante en condiciones controladas y la curva de salida actual. En general, la no-linealidad estática se expresa en porcentaje, el cual refleja qué tanto se aleja el sensor de la curva ideal y el valor máximo a escala completa; esta se representa con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ no linealidad} = \frac{\text{desviación máxima}}{\text{valor máximo a escala completa}} \times 100$$

#### Offset

El offset en un sensor se define como un corrimiento en el eje y de la curva de salida, el cual se caracteriza por ser siempre igual en ciertas condiciones de operación. De manera alternativa, el offset constituye la salida que presenta un sensor cuando en realidad esta debería ser cero. Por ejemplo, considérese un sensor cualquiera cuya salida está dada en  $mV/x$ ; esto significa que deberá hacerse un cambio de  $y \text{ mV}$  por cada cambio  $x$  en la entrada. Debido a que la mayoría de los sensores tienen una alta dependencia a la temperatura, si el sensor es medido en condiciones ideales, este siempre tendrá una salida; por tanto, si la temperatura sube o baja, la curva de salida siempre tendrá un corrimiento en el eje y, como se muestra en la figura 1.31.

**Figura 1.31** Efecto de offset.**Figura 1.32** Representación gráfica de la histéresis.

### Resolución

La resolución de un sensor se define como el cambio más pequeño en la variable física que le es posible registrar.

### Error estático

Cuando una variable física es sensada o cuantificada siempre existe la posibilidad de cometer un error en la medición. En general, los errores estáticos en los sensores se deben a problemas en las lecturas. Por ejemplo, es común que el fabricante de un sensor proporcione a los usuarios una hoja de datos en donde se describe la variación de salida que tiene dicho sensor con respecto a la temperatura, pero si el valor que se busca en la gráfica se encuentra entre dos puntos dados, es seguro que el usuario asuma un valor intermedio, con lo que estará cometiendo un error de interpolación; así, el grado de error cometido depende del tipo de escala con la que se representen los datos, aunque el error es menor entre más lineal sea la gráfica.

### Características dinámicas

A continuación se presentan y describen las características dinámicas de los sensores.

### Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta se define como el periodo que transcurre desde que la variable sensada presenta un cambio de estado y el sensor lo registra. El tiempo de respuesta depende del tipo de magnitud que se esté midiendo y del sensor utilizado. Por ejemplo, por naturaleza, la temperatura es una variable física cuyos cambios son lentos, por lo que un sensor de temperatura no requiere un tiempo de respuesta muy corto; sin embargo, para variables como la velocidad angular en un motor, el sensor requerirá un tiempo de respuesta muy corto.

### Histéresis

La histéresis en un sensor es la capacidad que tiene el sensor para seguir a la curva de salida ideal debido a la tendencia de los cambios de la variable física; la principal diferencia entre la histéresis y la linealidad es que cuando un sensor presenta histéresis significa que la tendencia de salida cruza en ambos sentidos a la curva de salida ideal (véase figura 1.32).

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

### Linealidad dinámica

La linealidad dinámica de un sensor es la capacidad que tiene este para seguir correctamente la curva de salida dada por el fabricante cuando la variable física experimenta cambios repentinos y muy rápidos. En este caso, la no linealidad dinámica del sensor es el grado de distorsión que presenta dicho sensor a la salida, debido a los cambios abruptos del fenómeno que se está sensando.

### Error dinámico

Un error dinámico en un sensor puede ser causado por varias razones, y entre las más comunes destacan las cargas inducidas en el sensor debido a los aparatos de medición. Por ejemplo, supóngase que se tiene un sensor resistivo como parte de un circuito divisor de voltaje, de tal manera que cuando el sensor cambia su resistencia, la caída de voltaje presente en este también cambia. Cuando un voltímetro se coloca para medir la caída de voltaje, se induce una carga en el sensor que provoca una medición errónea. Otros errores dinámicos comunes dependen de manera directa de la naturaleza propia del sensor y cómo esté siendo usado este para caracterizar al sistema. En este caso, por ejemplo, si se usa un sensor de aceleración para medir la aceleración presente en un automóvil justo antes de impactarse, el error presente en la aceleración registrada dependerá de la posición en que estaba colocado el sensor y si hubo o no movimiento relativo cuando se registró la medición.

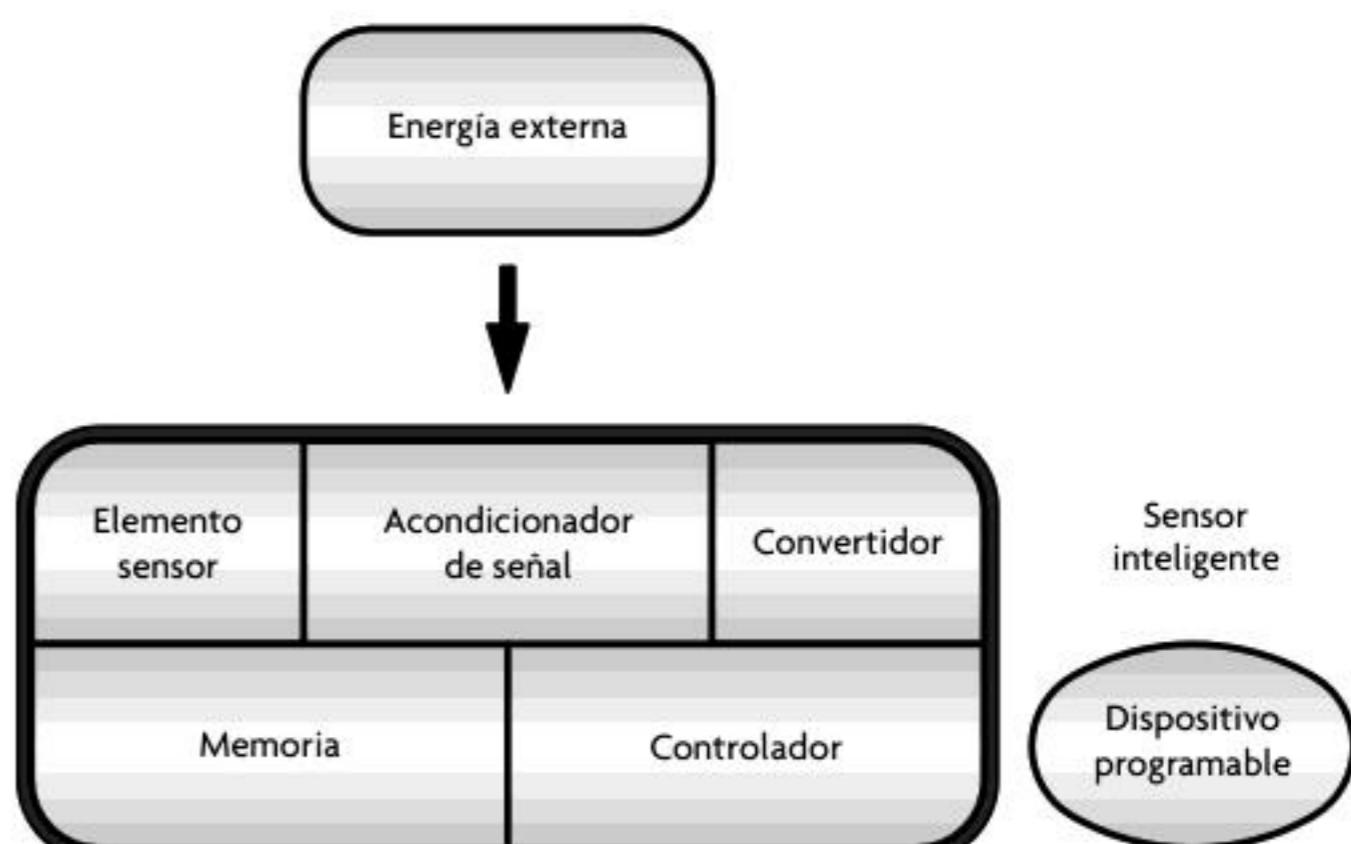
## Sensores inteligentes

La tendencia de la electrónica ha sido la reducción de tamaño y la minimización de costos; esto implica la creación de tecnología cada vez más integrada, con una disminución considerable en el número de elementos discretos, que en conjunto logren una función específica, ya que la interacción de muchos elementos discretos requiere de un mayor número de interconexiones, provocando que las placas de circuitos impresos se hagan más complejas y más costosas debido a la dificultad de ensamble. La idea de los sensores inteligentes surge de la necesidad de minimizar los problemas que representa este diseño de circuitos impresos y los altos costos de manufactura de ensamblar tantos componentes discretos. Los sensores inteligentes aparecen bajo la premisa de mayor practicidad para el diseño de sistemas más complejos, ya que en un solo elemento integran funciones que antes requerían de varios dispositivos discretos; en ocasiones, dependiendo de la escala de integración que tenga el sensor inteligente, dichas funciones se logran en un solo chip o en una sola tarjeta embebida.

El término *sensor inteligente* fue propuesto por primera vez a mediados de la década de 1980.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c Debido a que este término no ha sido aceptado ampliamente, la IEEE se dio a la tarea de definir a los ebrary sensores inteligentes en su estándar 1452.1, como "aquel sensor que provee funciones más allá de las necesarias para generar una correcta representación de una cantidad sensada o controlada. Esta función típicamente simplifica la integración del transductor en aplicaciones en un ambiente de red". Un sensor inteligente incluye, por lo común, una porción del sistema de control requerido para una cierta aplicación, protocolos especiales de comunicación, memoria, convertidores digitales-analógicos o analógicos-digitales, etcétera. En la figura 1.33 se observa la representación de un sensor inteligente en forma de diagrama a bloques.

No todos los sensores inteligentes poseen un dispositivo programable, como un microcontrolador, un procesador digital de señales o un FPGA, entre otros; en ocasiones este tipo de dispositivos se incluyen en el mismo chip o en una tarjeta de circuito impreso embebida, con la finalidad de incrementar la *inteligencia* del sensor.

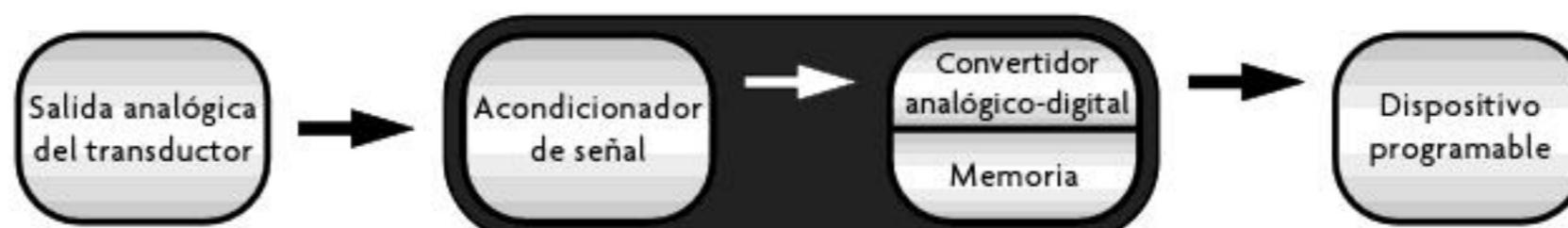


**Figura 1.33** Sensor inteligente.

### Escalas de integración de los sensores inteligentes

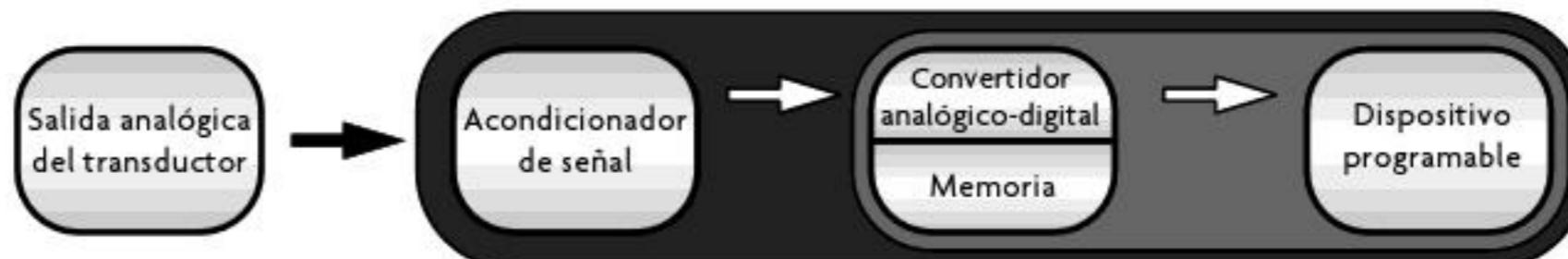
En la actualidad existen diferentes configuraciones de sensores inteligentes, dependiendo del modo de integración.

El primer modo de integración tiene una escala de integración baja, ya que los dispositivos discretos se incorporan en un mismo circuito impreso y el usuario final tiene acceso a este tipo de sensores en forma de tarjetas acondicionadoras (véase figura 1.34).



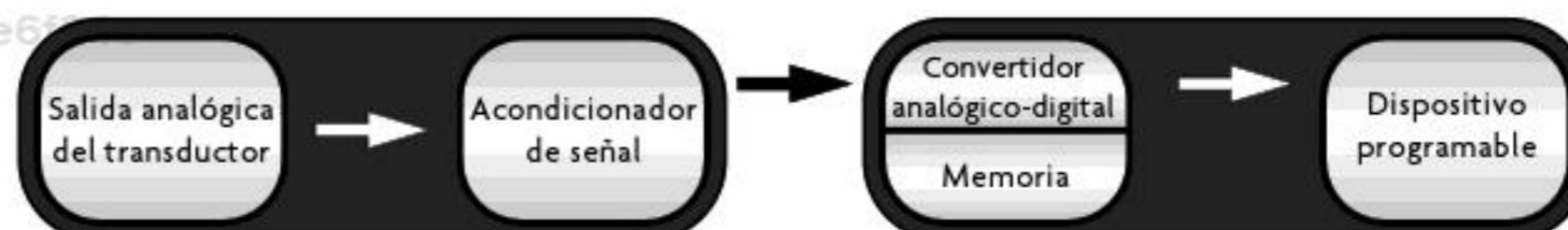
**Figura 1.34** Primer modo de integración de un sensor inteligente.

El segundo modo de integración es más alto, ya que los circuitos acondicionadores, los convertidores y el sistema de control necesario se implementan en un solo dispositivo, al tiempo que el sensor se maneja por separado, como un dispositivo discreto (véase figura 1.35).



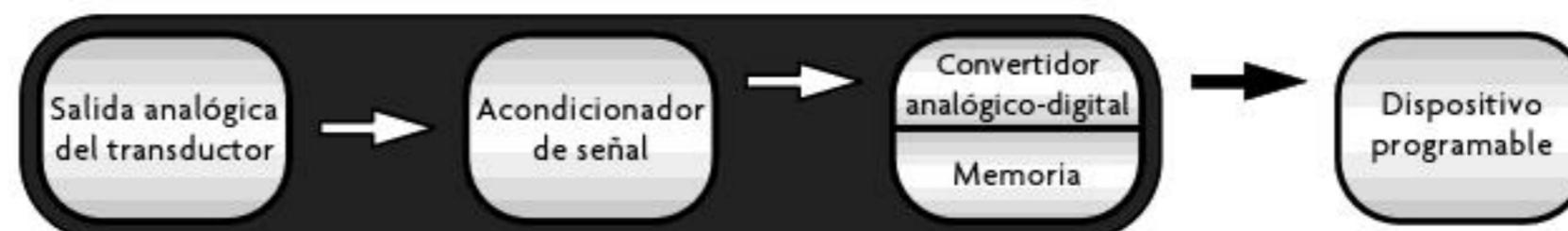
**Figura 1.35** Segundo modo de integración de un sensor inteligente.

Como ejemplo del tercer modo de integración sobresalen algunos sensores MEMS; este modo de integración se caracteriza porque el transductor se encuentra en el mismo chip que el acondicionador de señal, aunque la salida aún es analógica. De manera general, se puede decir que este tipo de sensores inteligentes son los más fáciles de usar; no obstante, son muy difíciles de modificar, lo que constituye una gran desventaja. Estos cuentan con uno o dos modos de operación (véase figura 1.36).



**Figura 1.36** Tercer modo de integración de un sensor inteligente.

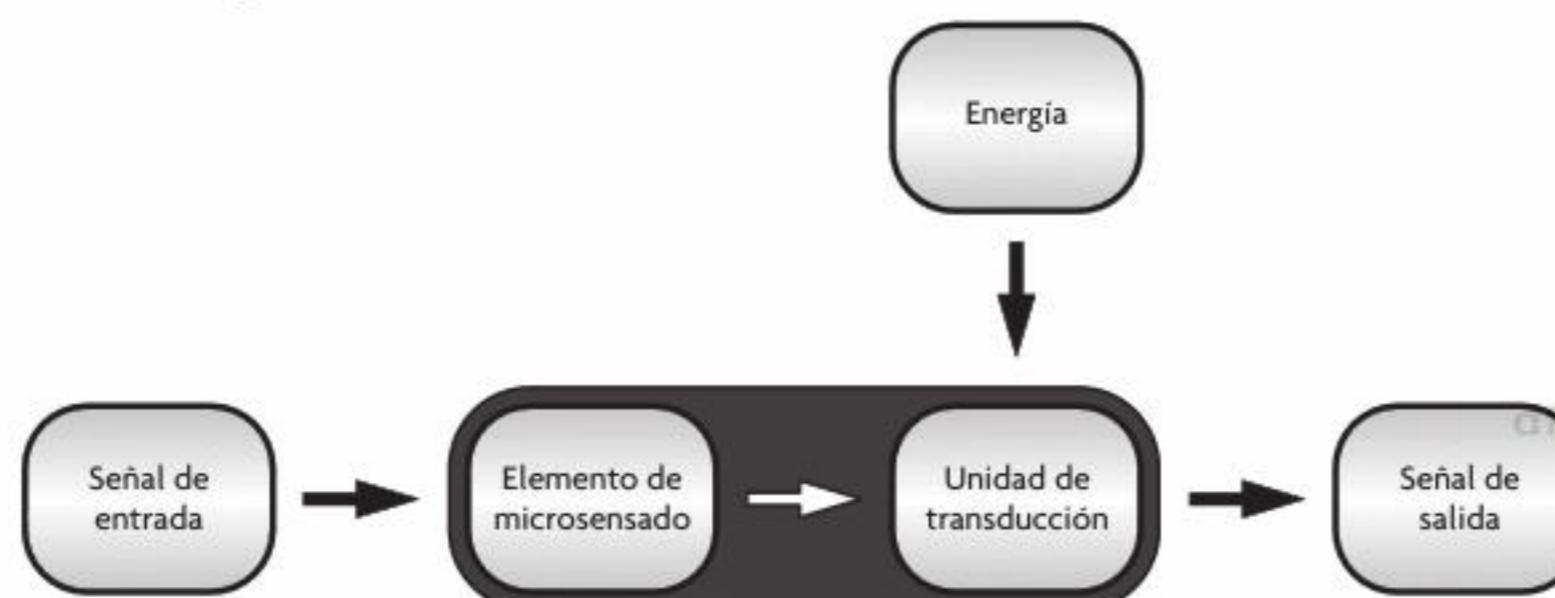
Como ejemplo del cuarto modo de integración se encuentran la mayoría de sensores MEMS, ya que en un solo encapsulado se integra el transductor, el acondicionador de señal y los convertidores analógico-digitales necesarios, para luego ser trabajados en un dispositivo programable externo. Este tipo de integración es de los más comunes, ya que es posible configurar el sensor en varios modos de operación con mucha facilidad, enviando un valor digital a través de un protocolo de comunicación (véase figura 1.37).



**Figura 1.37** Cuarto modo de integración de un sensor inteligente.

## Sensores MEMS

El término MEMS es una abreviación (por sus siglas en inglés) de Sistema Micro-Electro-Mecánico. Uno de los aspectos más importantes de un MEMS es que contiene componentes de tamaño micro-métrico ( $\mu\text{m}$ ). Un MEMS está diseñado para lograr una función específica en un sistema de ingeniería, por lo que contiene elementos mecánicos y electrónicos, entre otros. En general, el núcleo de un MEMS está compuesto de dos partes: un sensor o actuador y una unidad de transducción de la señal, como se muestra en la figura 1.38.



**Figura 1.38** Configuración de un sensor MEMS.

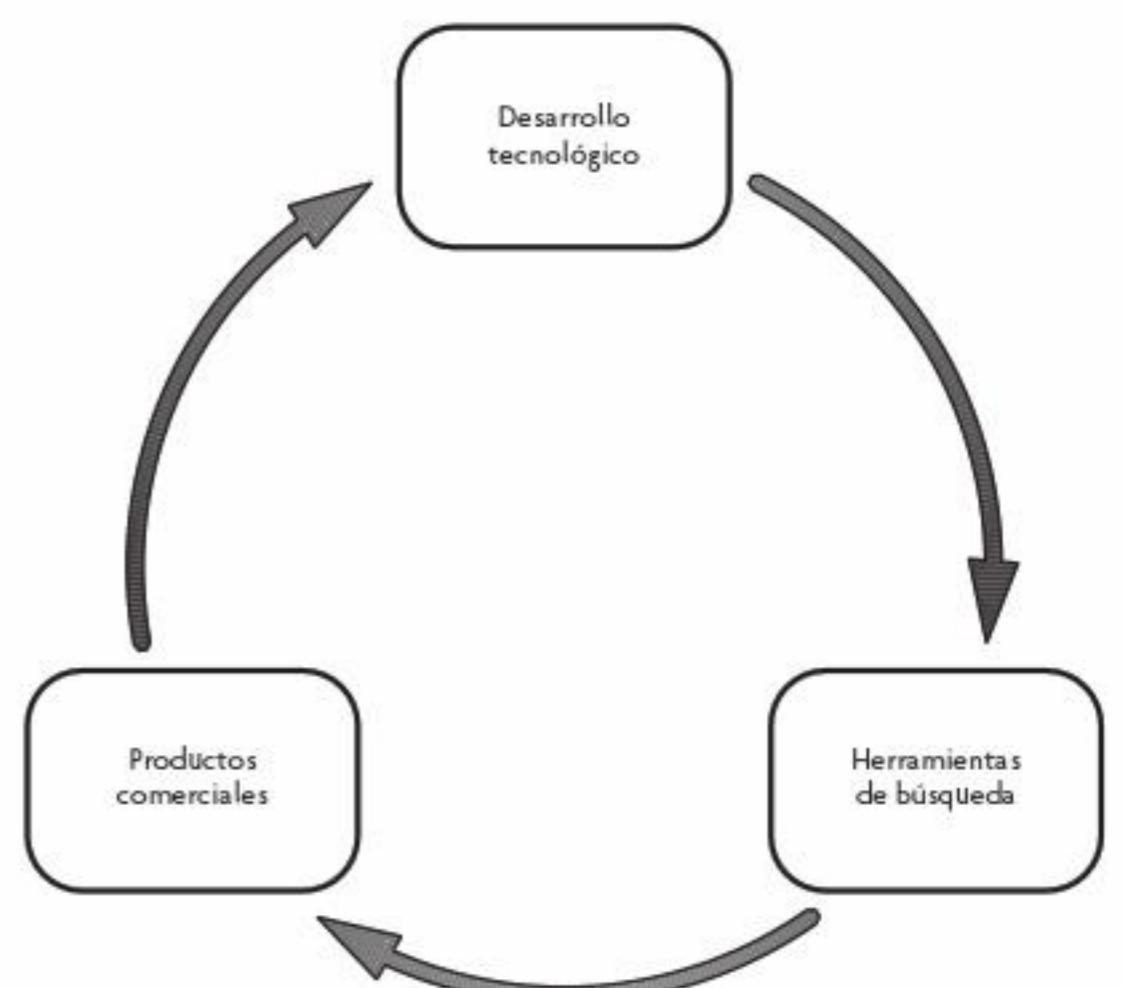
Este tipo de dispositivos está diseñado específicamente para sensar la existencia o la intensidad de cierta cantidad física o química, como temperatura, presión, fuerza, aceleración, radiación, flujo magnético o composición química. Los sensores MEMS se distinguen por el tipo de tecnología que utilizan para su fabricación. De este modo, existen sensores MEMS en los que el elemento sensor se encuentra en un chip y la electrónica asociada con este en otro chip donde ambos chips, a través de un proceso tecnológico, son encapsulados juntos, para tener un producto comercial final. Otro tipo de tecnologías fabrican los sensores MEMS en un mismo chip, compartiendo la estructura sensora y la electrónica asociada sobre un mismo sustrato.

En la actualidad, las tecnologías más utilizadas para este tipo de sensores MEMS son PolyMUMPs, SOI MEMS, LIGA, CMOS-MEMS.

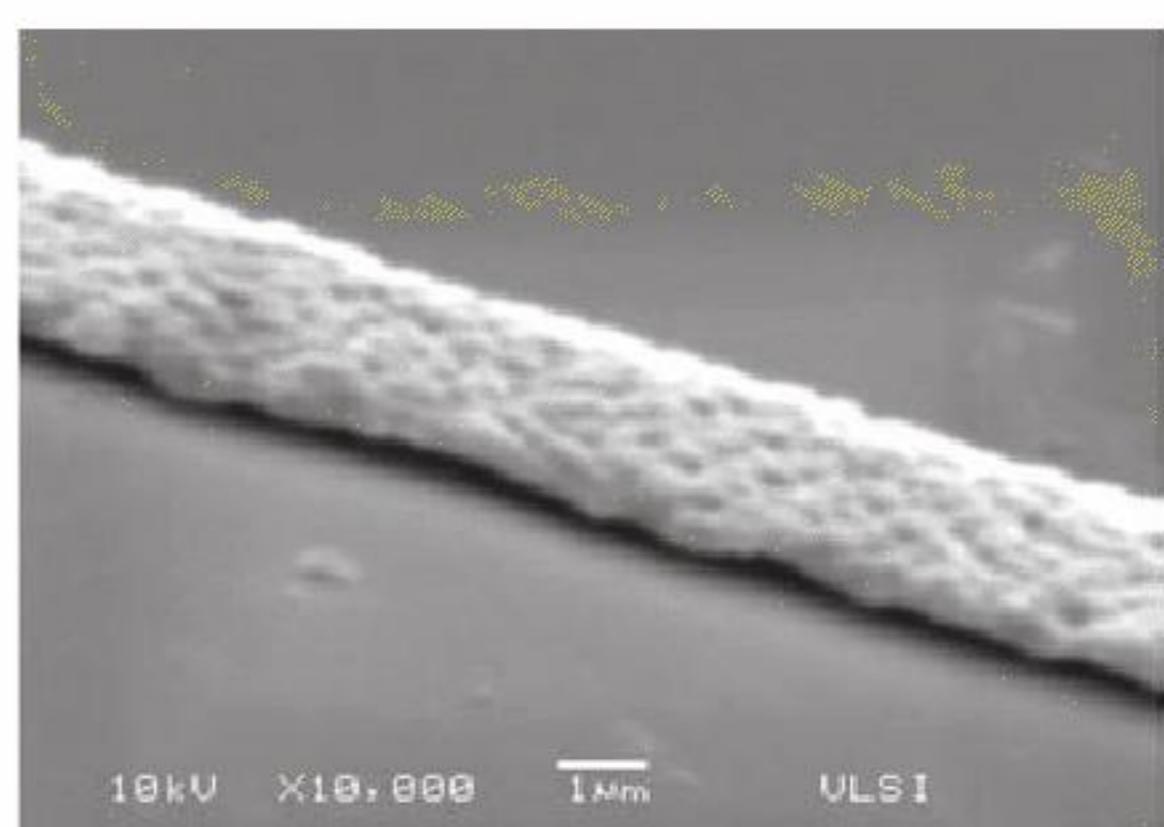
Hoy día, en el mercado ya existen sensores MEMS para muchas clases de aplicaciones; sin embargo, al tratarse de una tecnología relativamente nueva, comparada con los sensores convencionales, los sensores MEMS aún se encuentran en vías de desarrollo.

De manera general, estos microsensores se pueden agrupar en tres grandes categorías, las cuales se distinguen en la figura 1.39 y se estudian enseguida.

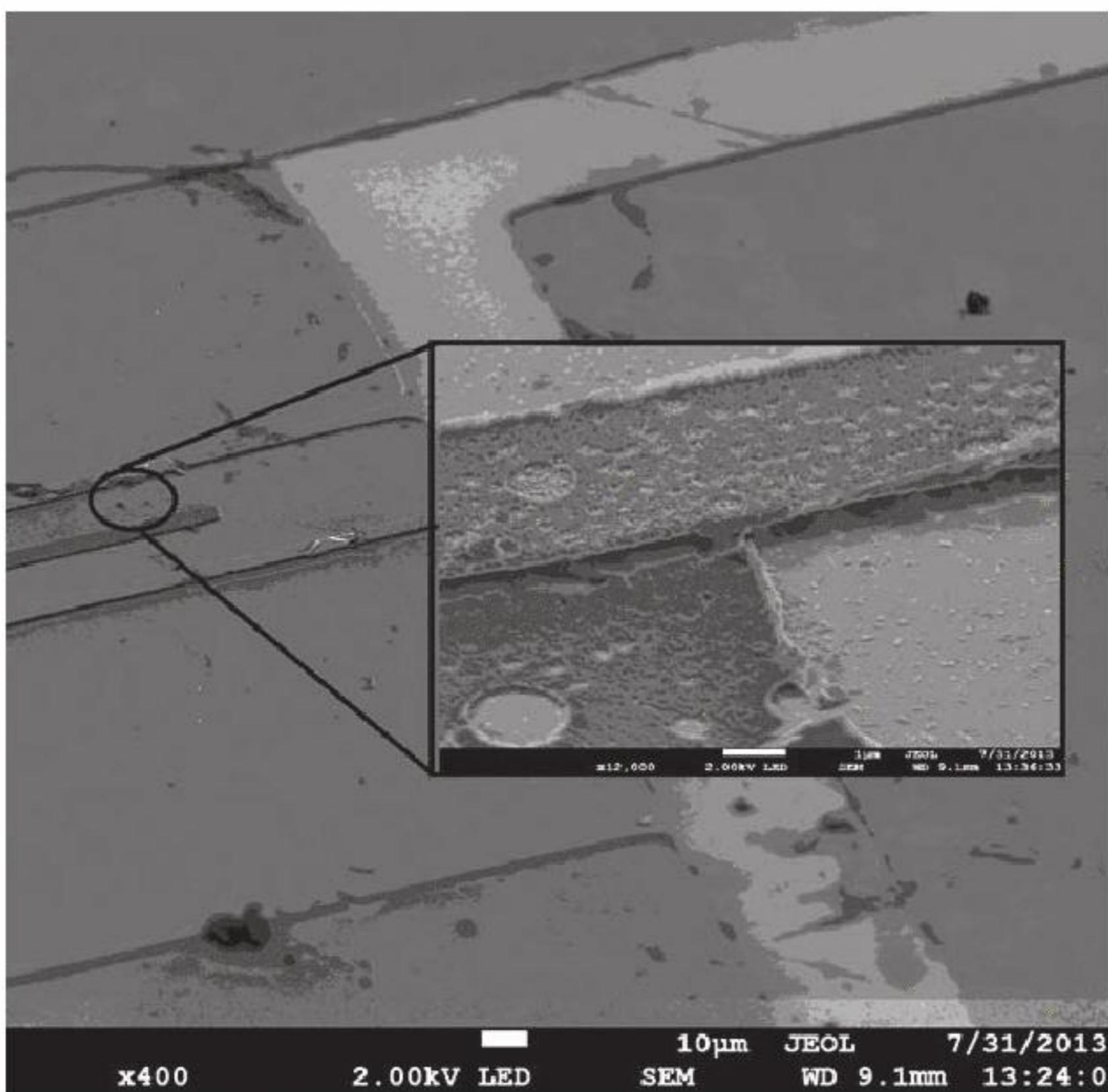
- **Desarrollo tecnológico:** De manera general, este tipo de desarrollo se centra en la actividad científica-tecnológica que persigue intereses de nuevas técnicas de implementación de MEMS. En el caso de esta clasificación, se trata de componentes o sistemas diseñados con el fin de desarrollar nuevas actividades, como probar un nuevo concepto científico o bien observar los límites de una tecnología en particular; por ejemplo, en la figura 1.40 se observa una microviga que forma parte de un sensor MEMS.



**Figura 1.39** Clasificación de sensores MEMS.



**Figura 1.40** Microviga de un sensor MEMS.



**Figura 1.41** Prueba de daño estructural en un sensor MEMS.

- **Herramientas de búsqueda:** Como parte de esta categoría destacan los sensores MEMS que han sido desarrollados para observar nuevos comportamientos o desempeñar tareas en extremo enfocadas. En general, estos buscan la implementación de nuevas técnicas de desarrollo. Uno de sus principales enfoques es la medición de propiedades de nuevos materiales usados en este tipo de microsistemas. En la figura 1.41 se observa una estructura para un sensor MEMS, cuyo objetivo es determinar el daño estructural que ha sufrido esta debido a un proceso tecnológico específico, como las pruebas para determinar cómo están funcionando los procesos de micromaqinado.<sup>5</sup>

- **Productos comerciales:** Como parte de esta categoría destacan productos comerciales como acelerómetros, giroscopios, magnetómetros y sensores de gas, entre otros. Dicha categoría comprende a los componentes y sistemas completos diseñados con fines de implementación en sistemas de medición, cuyo uso es común en equipo tecnológico cotidiano.

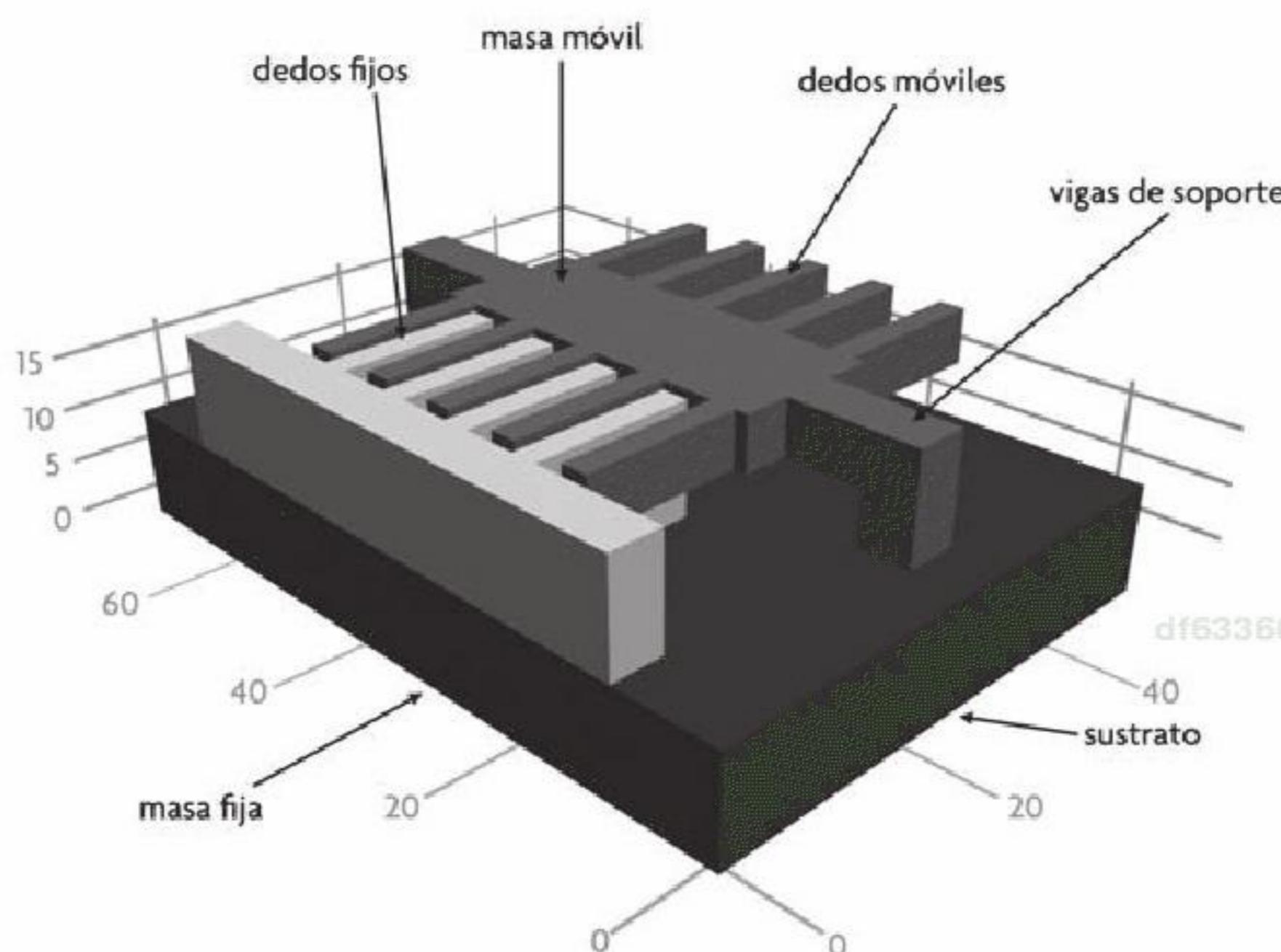
### Sensores de estado sólido y su relación con los MEMS

La característica principal de los sensores de estado sólido es que están formados por estructuras especializadas, las cuales constituyen la base del funcionamiento de este. Los sensores de estado sólido, como los MEMS, cuentan con unidades adicionales que contienen a la electrónica, la cual se encarga de extraer la información de la estructura especializada y convertirla en una señal eléctrica útil para el usuario. Por su parte, en sensores de estado sólido, como los biosensores o los sensores químicos, las películas semiconductoras forman las estructuras especializadas, ya que por medio de estas el sensor es capaz de seleccionar cierto tipo de compuesto químico o determinada característica biométrica.<sup>6</sup>

De manera general, un sensor de estado sólido está configurado por un sustrato o base y por capas superiores o *layers*, que se depositan o crecen sobre el sustrato, con el fin de crear las estructuras transductoras. Por ejemplo, cuando se fabrica un sensor MEMS de aceleración se utiliza el principio de transducción de capacitancia variable, donde el sustrato es el punto de referencia fijo y se tiene un electrodo móvil que constituye la estructura que sirve de transductor entre la aceleración y la capacitancia, mientras que el electrodo opuesto está fijo al sustrato, con lo que se logra el capacitor variable (véase figura 1.42).

<sup>5</sup> Un proceso de micromaqinado se refiere al proceso químico con el cual se obtienen las diferentes geometrías en un sensor MEMS.

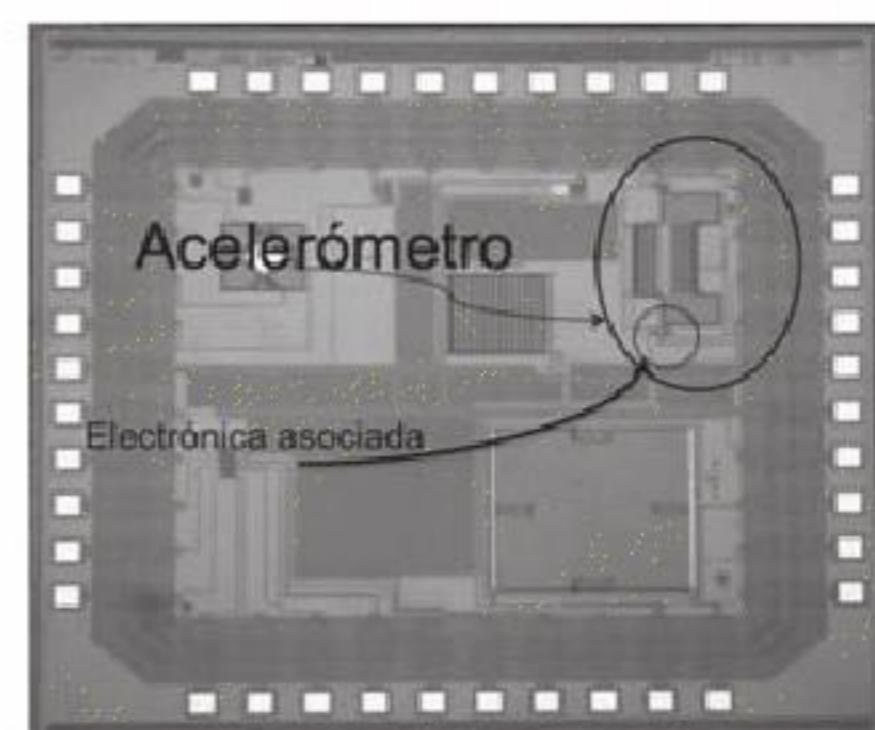
<sup>6</sup> Una característica biométrica se refiere a la identificación de seres humanos por sus características o rasgos físicos.



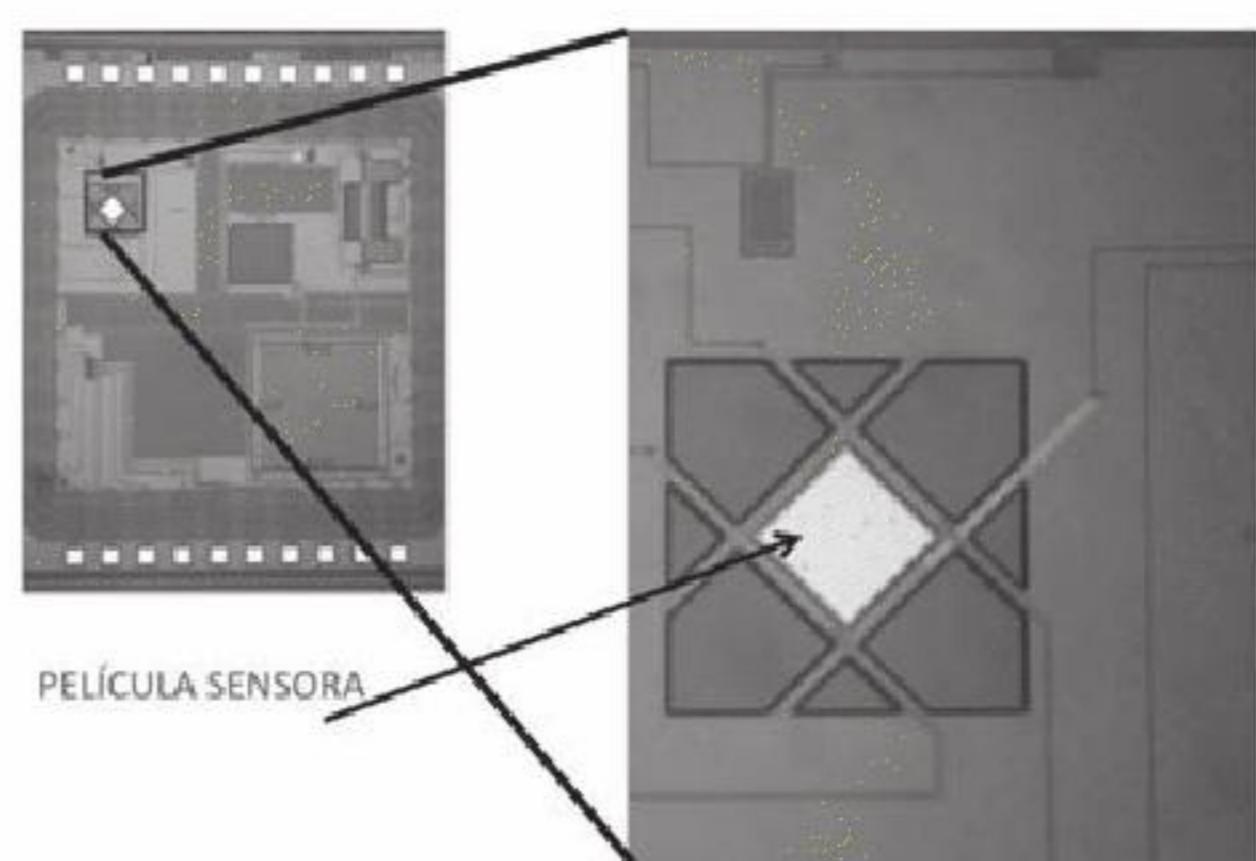
**Figura 1.42** Estructura clásica para un sensor de estado sólido de aceleración.

Toda vez que la estructura especializada se fabrica en conjunto con su electrónica asociada, dentro del mismo sustrato, se dice que estos se encuentran *integrados monóliticamente*. En cambio, cuando la electrónica no se encuentra en el mismo sustrato que la estructura se dice que estos no están integrados monóliticamente (véase figura 1.43).

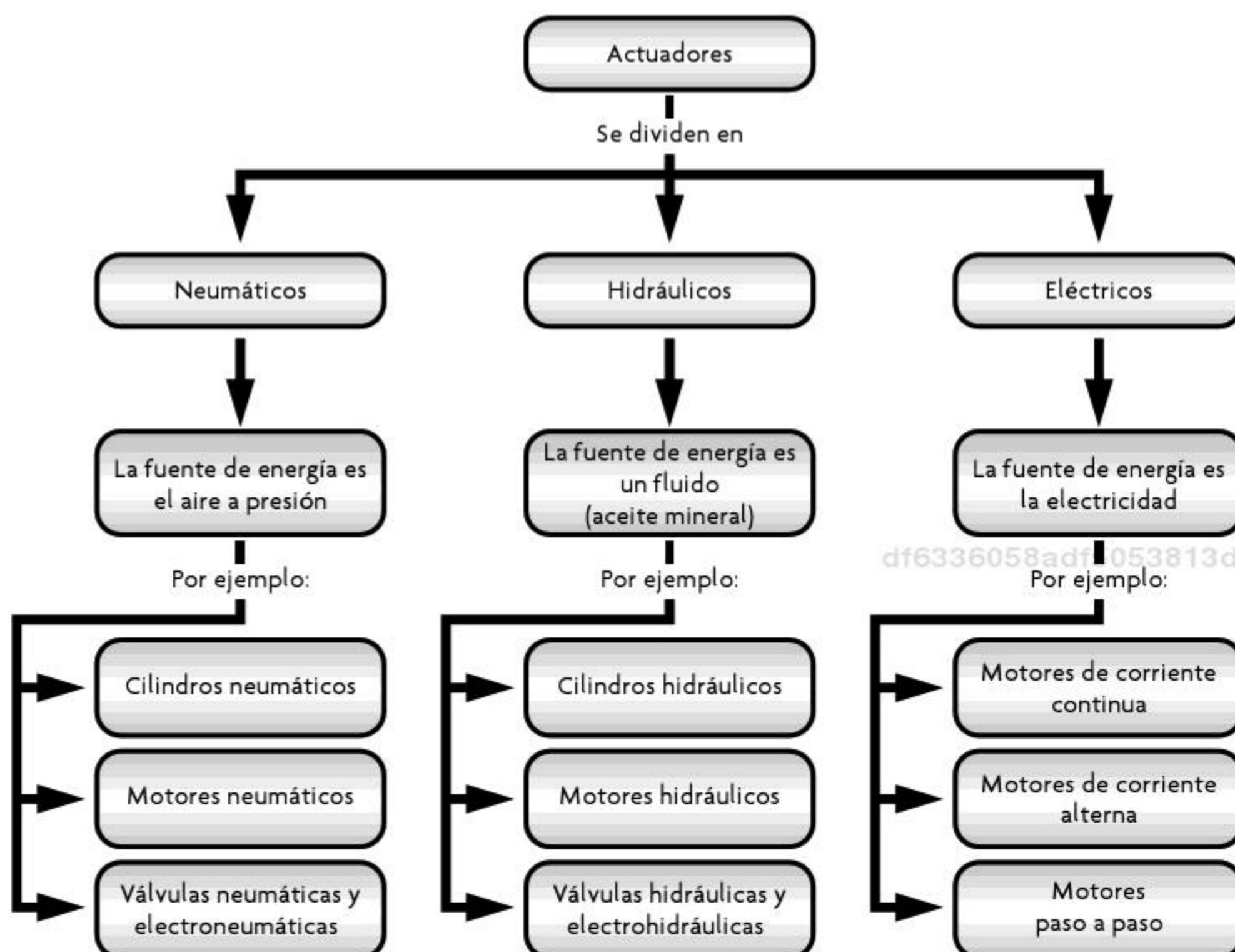
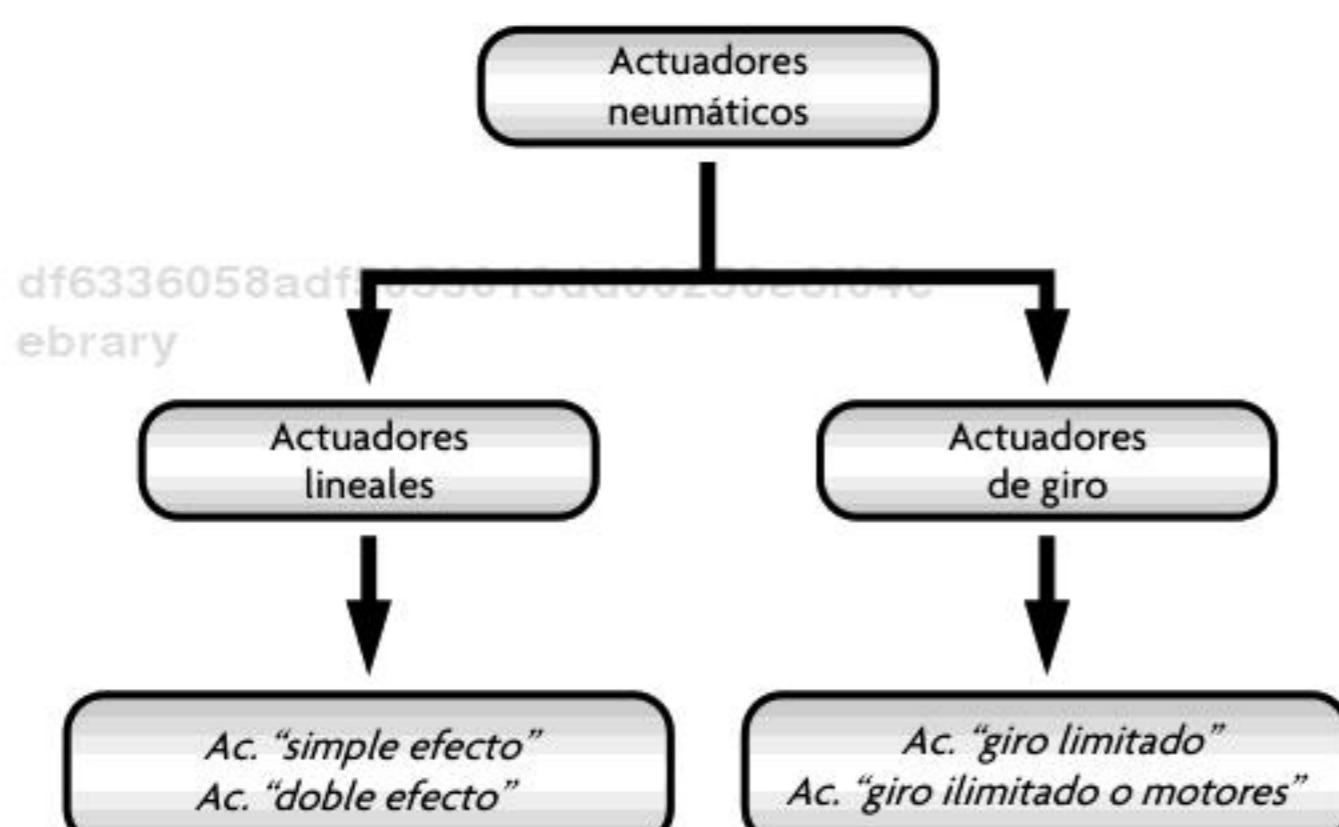
Otro tipo de sensor que se puede fabricar con el uso de esta misma tecnología es el sensor químico de gas, ya que durante la fabricación de este se crea la estructura base, que consta de una membrana en la cual se deposita la película selectora a un tipo de gas en específico, y la membrana se conecta con la electrónica, la cual tiene la tarea de acondicionar la señal (véase figura 1.44).



**Figura 1.43** Sensor de estado sólido.



**Figura 1.44** Sensor de gas de estado sólido.

**Figura 1.45** Clasificación de los actuadores.**Figura 1.46** Actuadores neumáticos.

## Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos transforman la energía acumulada del aire comprimido en trabajo mecánico de movimiento rotatorio o movimiento rectilíneo. Por lo común, estos se clasifican en cilindros o actuadores lineales y motores o actuadores de giro (véase figura 1.46).

### Principio de funcionamiento

El aire comprimido constituye una forma de energía mecánica que se puede almacenar para ser utilizada posteriormente. Esto es, si se ejerce fuerza sobre el aire contenido en un recipiente cerrado, dicho aire se comprime forzando las paredes del recipiente y la presión que se produce puede aprovecharse para generar fuerza o desplazamiento sobre algún elemento mecánico.

### Cilindros neumáticos

Los cilindros neumáticos se utilizan, en general, para inducir un movimiento lineal de algunos elementos mecánicos, los cuales conforman un sistema integral en el que confluyen e interactúan diversos dispositivos con la finalidad de automatizar algún tipo de proceso. Existen dos tipos fundamentales de cilindros neumáticos, que son de simple o de doble efecto, de los cuales se derivan otros modelos con construcciones especiales. Estos cilindros, independientemente de su forma constructiva, representan los actuadores más comunes que se utilizan en los circuitos neumáticos.

- Cilindro de simple efecto.** Consiste en una entrada de alimentación de aire comprimido a una cámara hermética, lo que provoca un movimiento rectilíneo en un solo sentido de un elemento móvil, conocido como vástago, el cual es el responsable de desarrollar el trabajo necesario (véase figura 1.47).

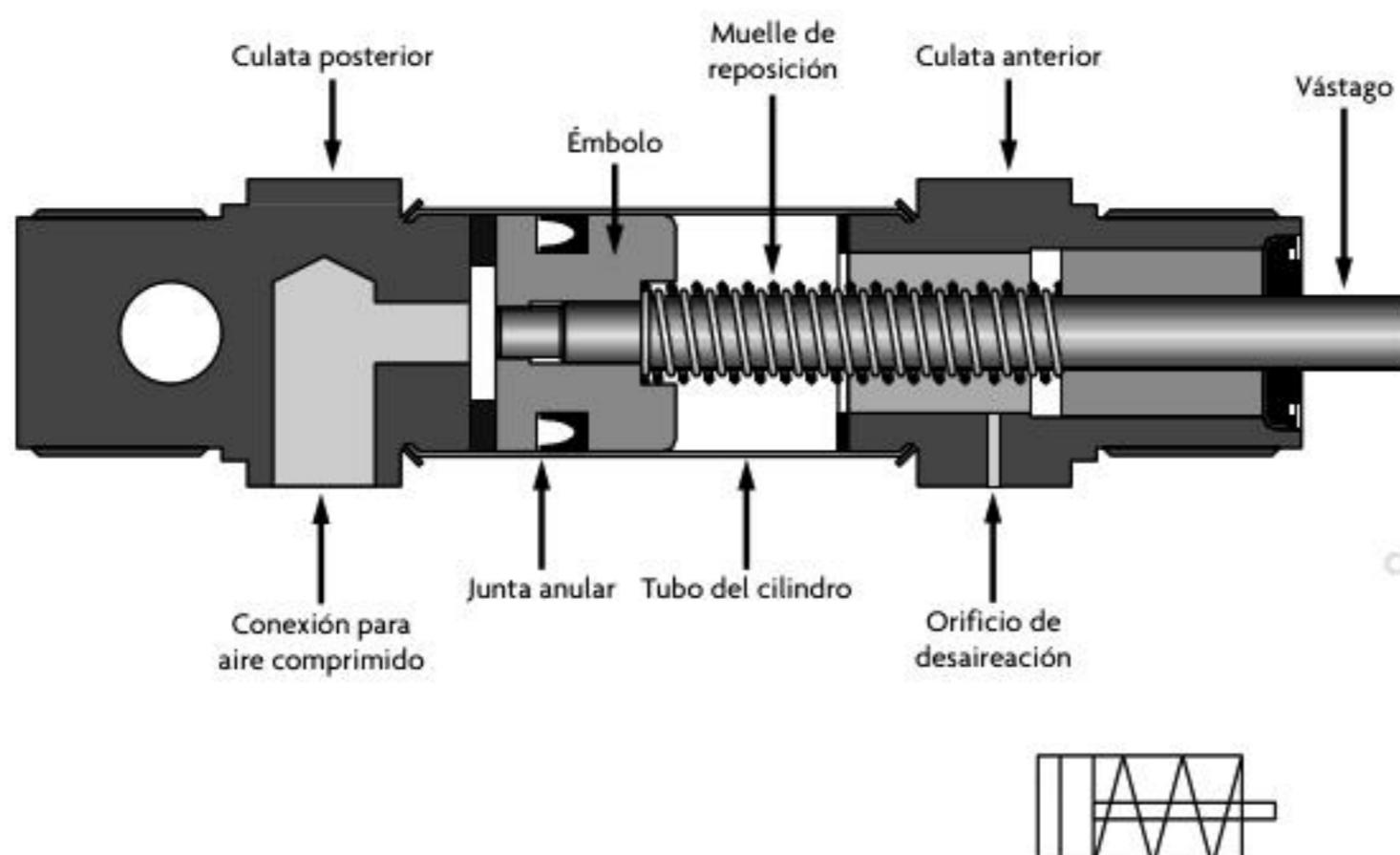


Figura 1.47 Cilindro de simple efecto.

- Cilindro de doble efecto.** Se compone de dos entradas de alimentación de aire comprimido, cada una colocada en el extremo de una cámara hermética, fabricada de tal manera que esta provoca un movimiento rectilíneo en dos sentidos al vástago del actuador, el cual se encarga de realizar tanto un trabajo de salida como uno de retroceso (véase figura 1.48).

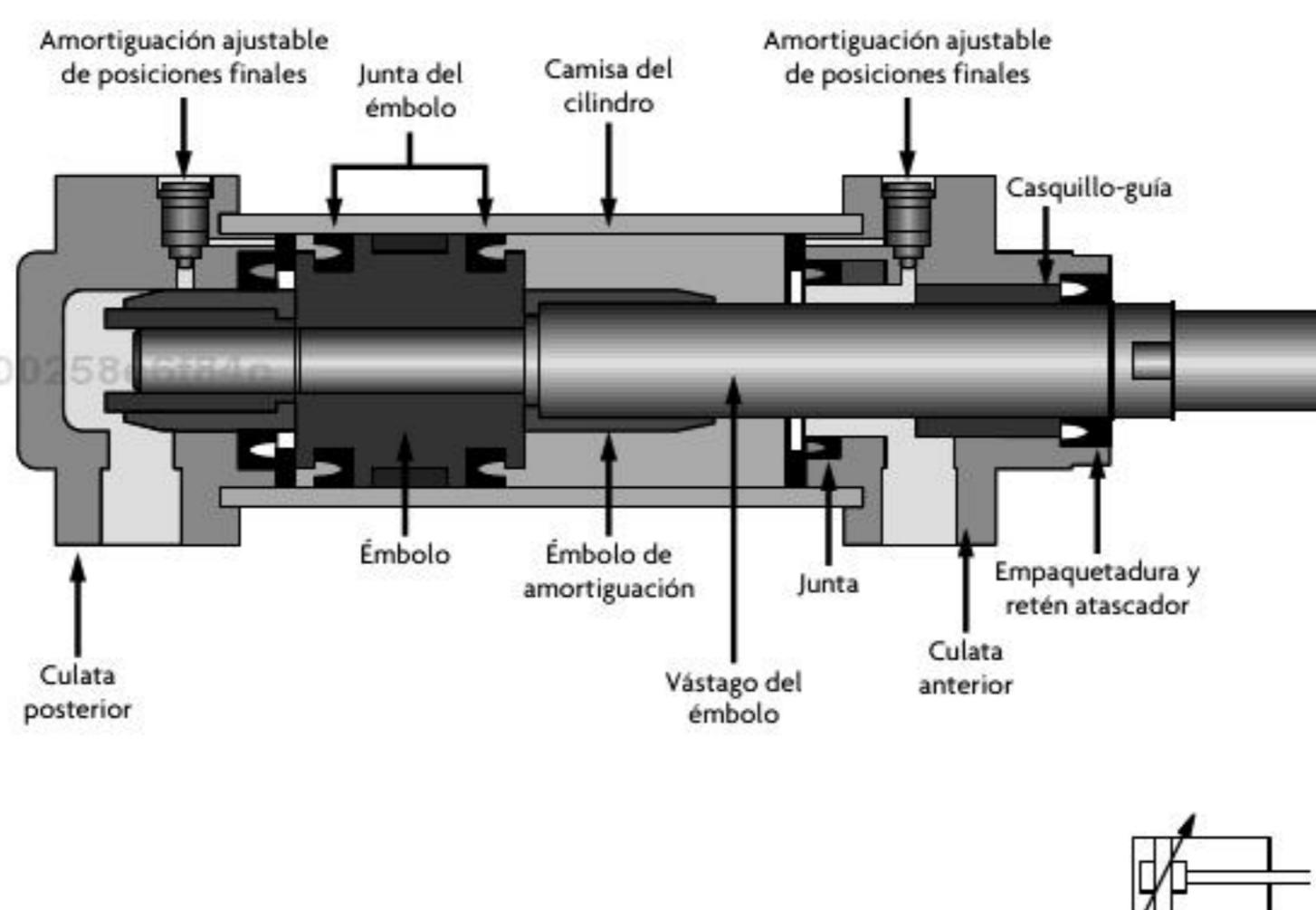
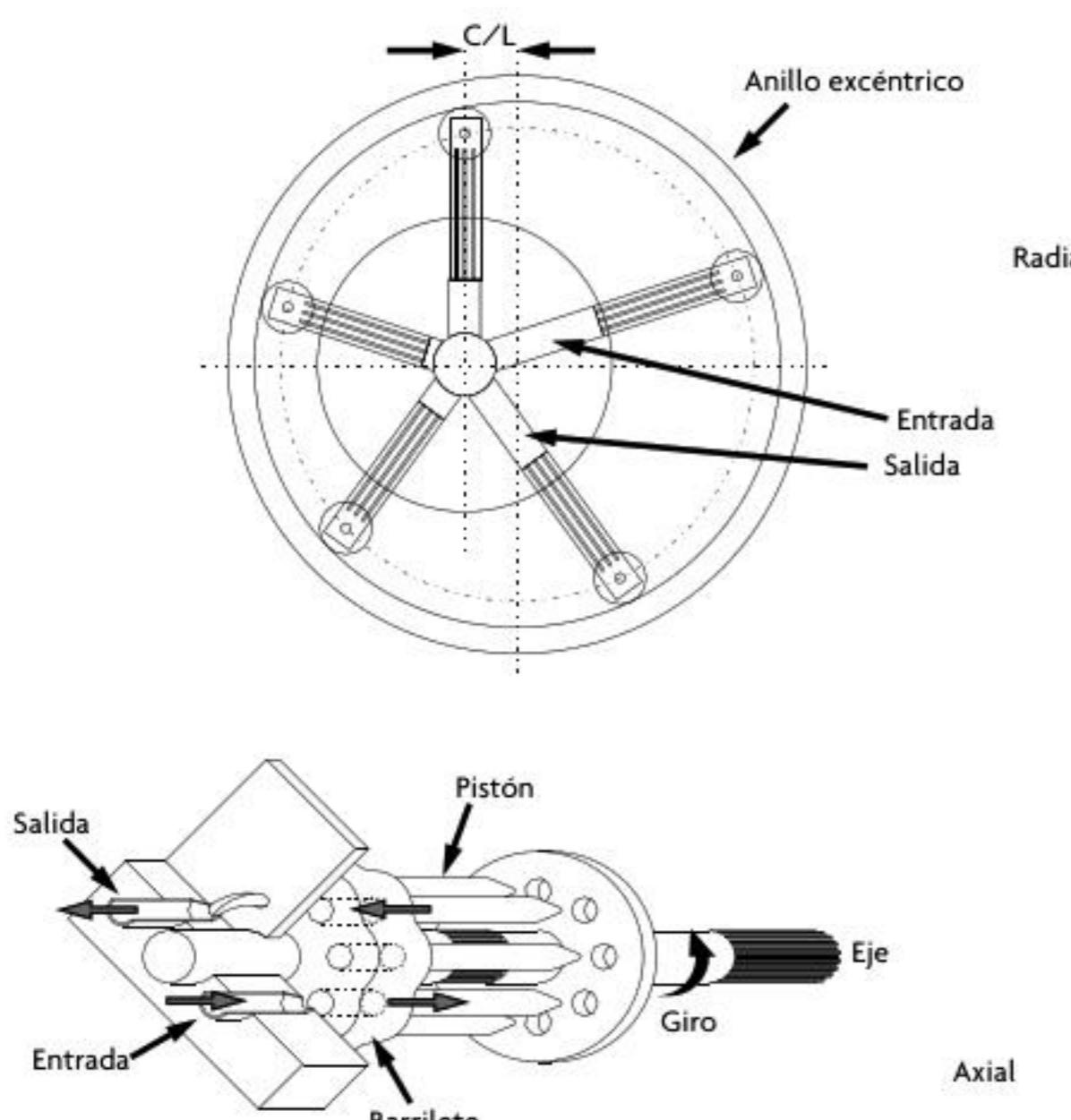
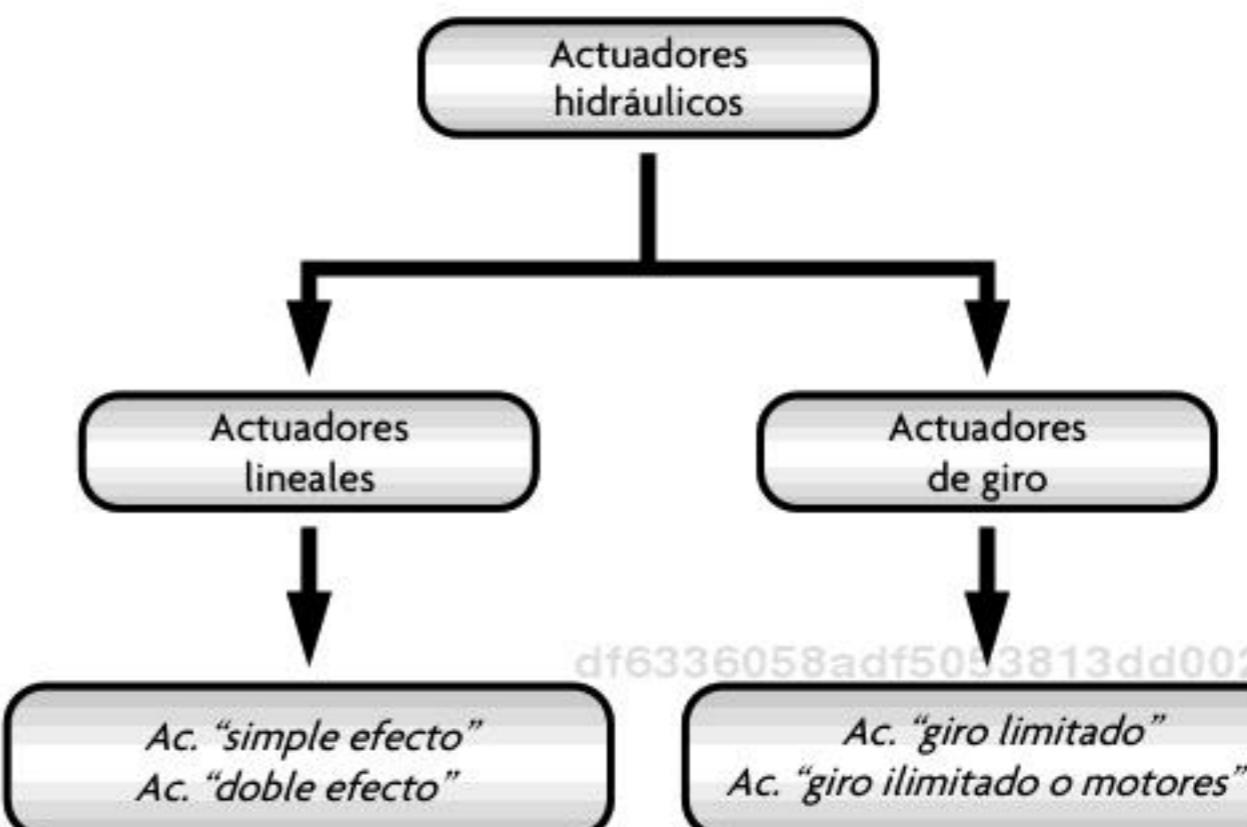


Figura 1.48 Cilindro de doble efecto.

## Motores neumáticos

Son actuadores con la capacidad de proporcionar energía mecánica de rotación a partir de la fuerza del aire comprimido que ingresa a un área hermética del actuador, el cual, al expandirse, provoca una fuerza contra los álabes de un mecanismo de rotación. En general, este tipo de motores proporciona un elevado número de revoluciones por minuto, pero con un bajo par a la salida (véase figura 1.49).

**Figura 1.49** Motor neumático.**Figura 1.50** Clasificación de actuadores hidráulicos.

## Actuadores hidráulicos

El funcionamiento de los actuadores hidráulicos es muy semejante al de los actuadores neumáticos, ya que ambos son dispositivos que transforman la energía almacenada de un fluido a presión en trabajo mecánico de movimiento circular o rectilíneo, con la única excepción de que en el caso de los actuadores hidráulicos, el fluido a presión que se utiliza no es el aire, sino algún tipo de aceite mineral. La ventaja principal de estos actuadores es su relación potencia/peso. Este tipo de actuadores se clasifican como se observa en la figura 1.50.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

### Principio de funcionamiento

En los sistemas hidráulicos, la energía se transmite a través de un sistema de distribución que, en general, está conformado por tubos y mangueras. Esta energía es función del caudal y la presión del aceite que circula en el sistema. Las propiedades del fluido utilizado en los actuadores hidráulicos definen diferencias importantes en su funcionamiento con respecto a los actuadores neumáticos; una de estas propiedades está relacionada con la precisión del movimiento generado por el actuador. En neumática, el aire es altamente compresible, lo que genera errores de posicionamiento, mientras que en hidráulica el aceite mineral usado tiene un bajo valor de compresibilidad, lo que implica un movimiento suave del vástago. Esta misma propiedad del fluido es la responsable de que en hidráulica se puedan manipular presiones superiores, permitiendo incrementar la fuerza de trabajo.

Por otra parte, la presión del fluido determina la fuerza de empuje de un cilindro; esto es, el caudal de ese fluido es el responsable de establecer la velocidad de desplazamiento del mismo. La combinación fuerza y recorrido produce trabajo, y cuando este trabajo es realizado en un determinado tiempo, este produce potencia. Los actuadores hidráulicos presentan estabilidad frente a cargas estáticas; esto indica que el actuador es capaz de soportar cargas, como un peso o una presión ejercida sobre una superficie, sin aporte de energía (para mover el émbolo de un cilindro sería preciso vaciar todo el aceite de este). Otro aspecto muy importante de este tipo de actuadores son sus características de autolubricación y robustez.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

No obstante todas sus ventajas, los actuadores hidráulicos también presentan ciertos inconvenientes. Por ejemplo, las elevadas presiones con las que trabajan propician la existencia de fugas de aceite a lo largo de la instalación. Asimismo, las instalaciones son más complicadas que las requeridas para los actuadores neumáticos y mucho más que para los eléctricos, necesitando de equipos de filtrado de partículas, eliminación de aire, sistemas de refrigeración y unidades de control de distribución.

### Cilindros hidráulicos

A los cilindros hidráulicos con frecuencia también se les llama motores lineales, porque inducen un movimiento lineal a los elementos mecánicos acoplados a los mismos. De manera análoga a los cilindros neumáticos, en hidráulica también existen dos tipos de cilindros: de simple y de doble efecto.

- Cilindros de simple efecto.** Se componen de una entrada para suministro de fluido hidráulico a un dispositivo hermético, de tal forma que este desplaza, en un sentido, a un elemento mecánico denominado comúnmente vástagos o pistón. En tanto, para lograr el movimiento en sentido inverso, se utiliza una fuerza externa, que en general es un resorte o la acción de la gravedad (véase figura 1.51).

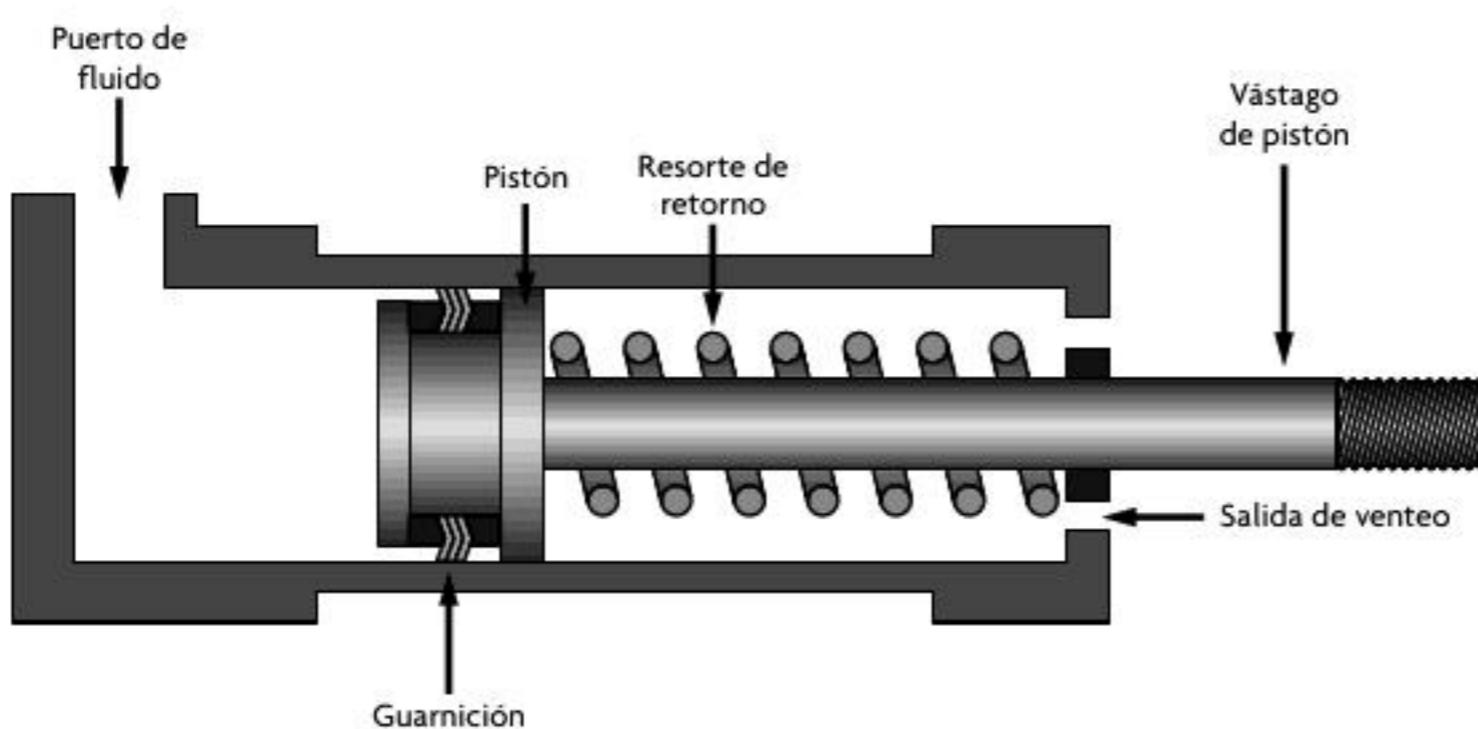


Figura 1.51 Cilindro de simple efecto.

- Cilindros de doble efecto.** Este tipo de cilindro utiliza la fuerza suministrada por el aceite mineral para mover el pistón, tanto en forma "directa" como "inversa", lo que se logra modificando el sentido del flujo hidráulico a partir de un mecanismo que regula el movimiento del fluido entre dos partes del cilindro, que en general es controlado por una válvula; entre las más comunes destacan las válvulas solenoide (véase figura 1.52).

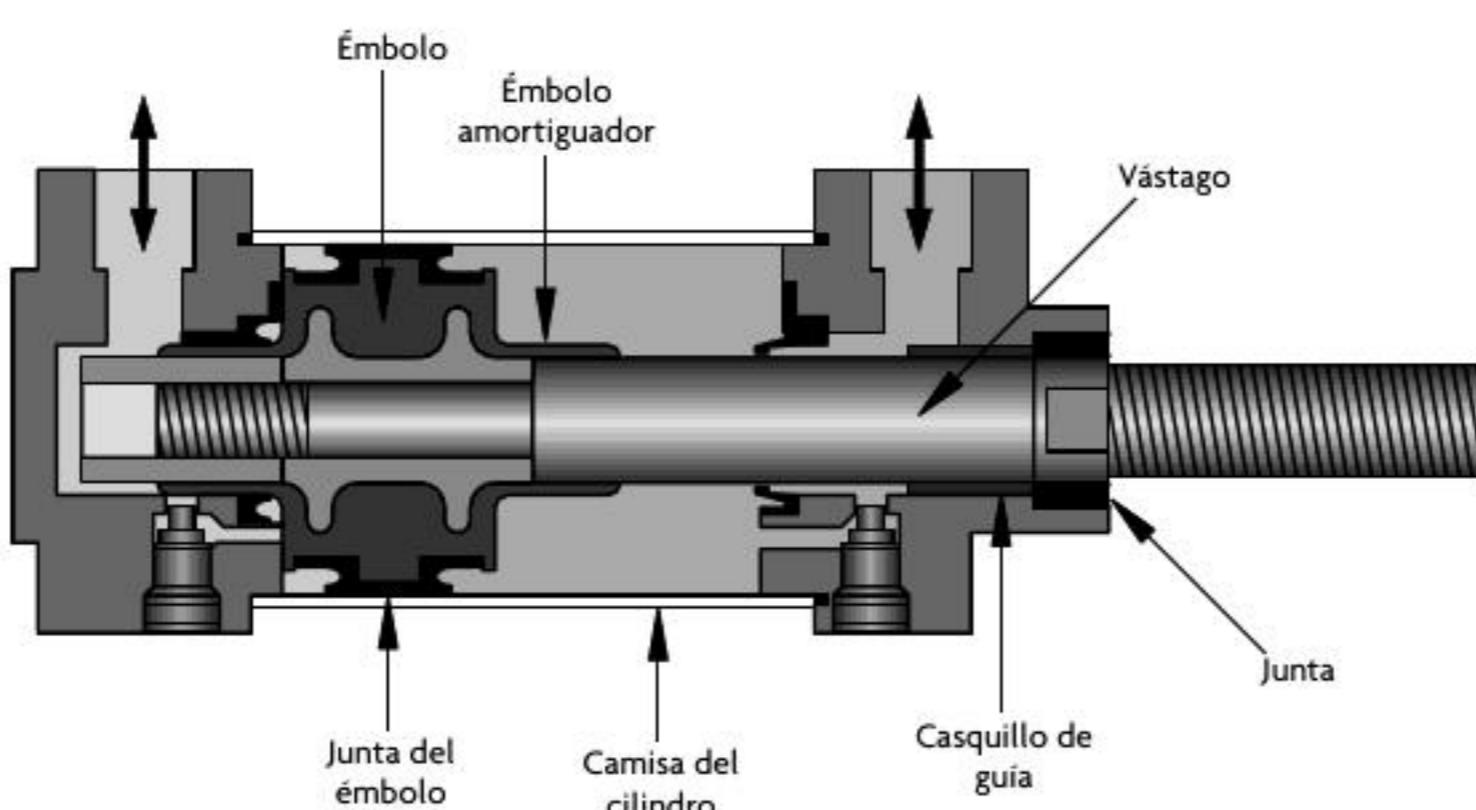


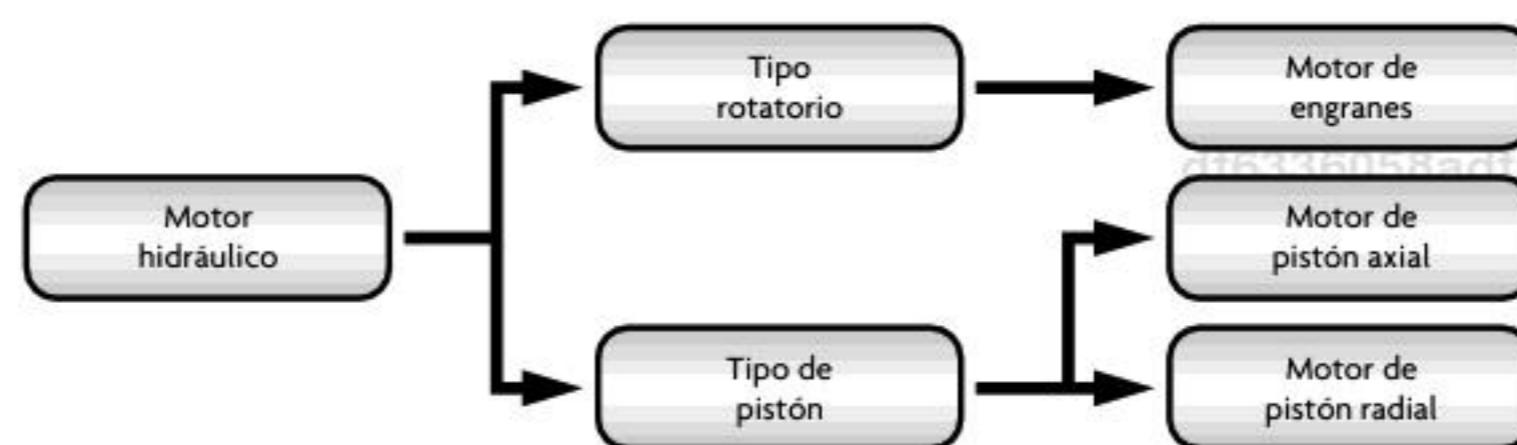
Figura 1.52 Cilindro de doble efecto.

Este actuador es el de mayor uso en los sistemas de posicionamiento, generación de fuerza y dirección del movimiento que tienen como base las propiedades de un fluido hidráulico.

### Motores hidráulicos

Este tipo de actuador genera una fuerza de torsión a partir de la presión que existe en un fluido, lo que, a su vez, provoca un desplazamiento angular sobre un eje de giro; de este modo, si el sentido de flujo cambia, también cambia el sentido de giro.

Los motores hidráulicos se pueden clasificar en dos categorías principales: de engranes y de pistón; este último, a su vez, se clasifica en motor de pistón axial y en motor de pistón radial (véase figura 1.53).



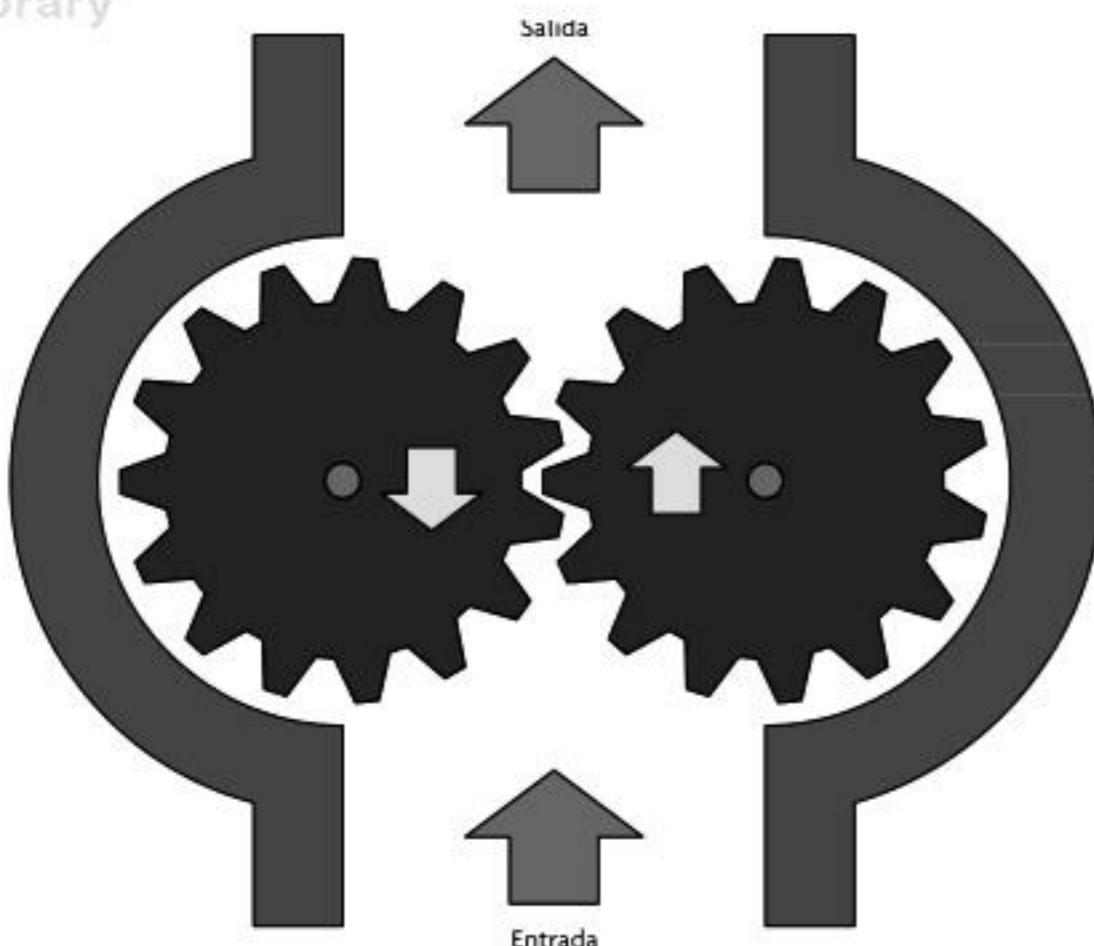
**Figura 1.53** Clasificación de motores hidráulicos.

#### Motor de rotación de engranaje

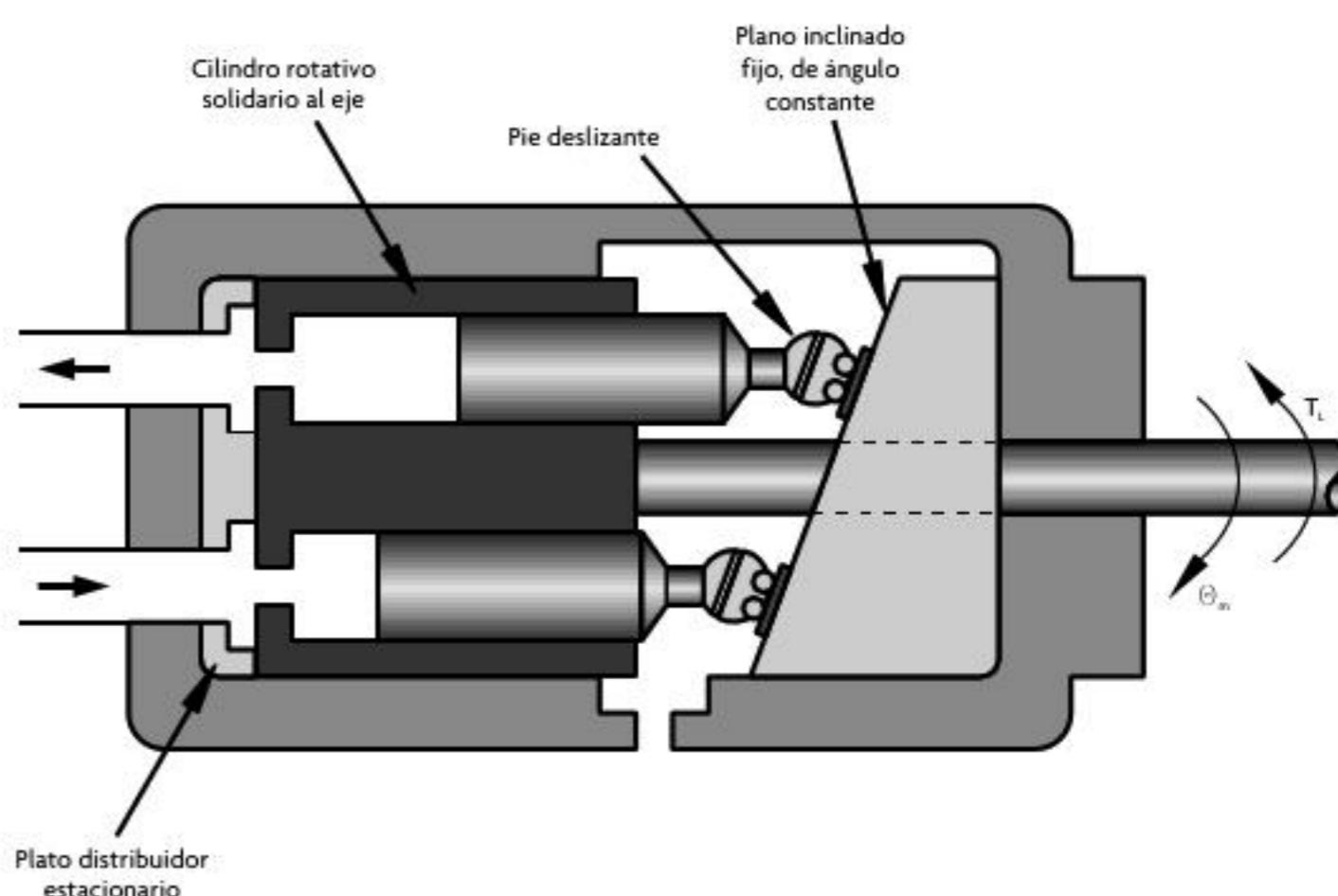
Está formado fundamentalmente por dos engranes de dientes rectos ubicados dentro de una cámara hermética. Debido a su confiabilidad y a que se considera, desde el punto de vista de su construcción, un motor relativamente simple y que permite alcanzar velocidades altas, en casos especiales incluso hasta velocidades de 6 000 RPM,<sup>7</sup> este principio de funcionamiento se utiliza con mucha frecuencia en los motores hidráulicos (véase figura 1.54).

#### Motor de pistones axiales

Consiste en un caparazón con un rotor, donde se encuentran alojados los pistones, los cuales van orientados en la misma dirección del eje del motor y son impulsados por el fluido hidráulico, con lo que se produce el giro del eje del motor (véase figura 1.55).



**Figura 1.54** Motor hidráulico de rotación de engranaje.



**Figura 1.55** Motor de pistones axiales.

<sup>7</sup> Consultado en <http://www.hidraulicacalvet.com/motores.html>.

## Motor de pistones radiales

Al igual que los motores axiales, los motores de pistones radiales están formados por pistones, solo que en el caso de este tipo de motores estos se ubican perpendicularmente al eje del motor. Por tanto, su principio de funcionamiento es similar al de los motores axiales, solo que en estos la fuerza que hace girar al elemento rotatorio se debe a una excentricidad que provoca que la componente transversal de la fuerza que el pistón ejerce sobre la carcasa sea distinta en dos posiciones diametralmente opuestas, dando lugar a una resultante no nula, que origina el par de giro (véase figura 1.56).

## Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos transforman la energía eléctrica en energía mecánica, ya sea rotacional o lineal. De los actuadores disponibles en el mercado, estos son los que se usan con mayor frecuencia, ya que su fuente de alimentación es la energía eléctrica, que es el tipo de energía que se encuentra disponible en la red de distribución eléctrica; por su parte, los actuadores que son alimentados con energía neumática o hidráulica requieren compresores para la generación de la misma.



**Figura 1.56** Motor de pistones radiales.

### Principio de funcionamiento de los actuadores eléctricos

En el ámbito de la física es bien conocido que una partícula cargada eléctricamente ubicada dentro del espacio de acción de un campo magnético está expuesta a una fuerza electromagnética ( $F_E$ ) (véase figura 1.56), la cual se representa mediante la siguiente expresión:

$$F_E = e(B + vu\vec{B})$$

donde:

$e$ : carga del electrón [c]

$v$ : vector de velocidad [m/s]

$B$ : intensidad del campo magnético [T/m]

$\vec{B}$ : vector de inducción magnética [ $\text{Wbm}^{-2}$ ]

Además, esta peculiaridad de la partícula puede extenderse a un filamento conductor por el cual circula una corriente eléctrica (véase figura 1.57), de acuerdo con la expresión que se muestra a continuación:

$$F_E = \int_0^L Idl \times \vec{B}$$

donde:

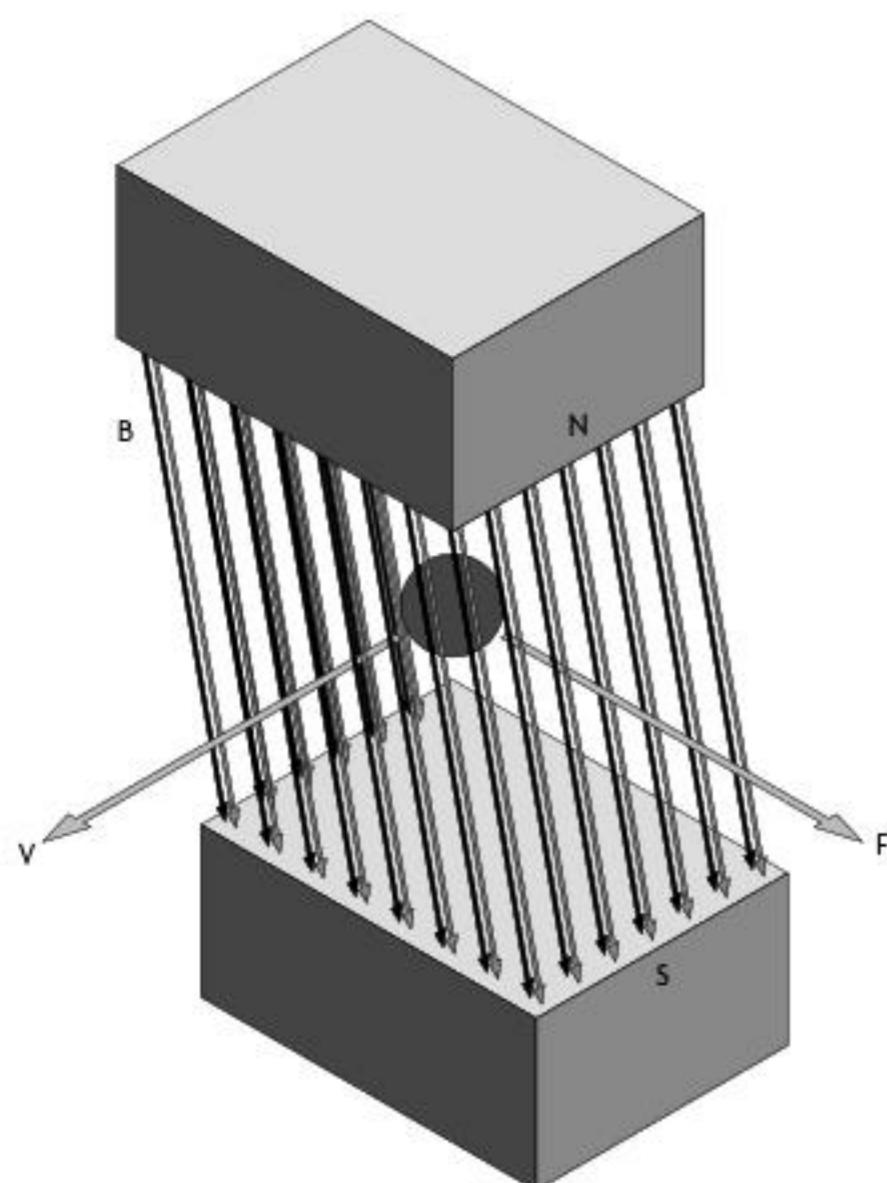
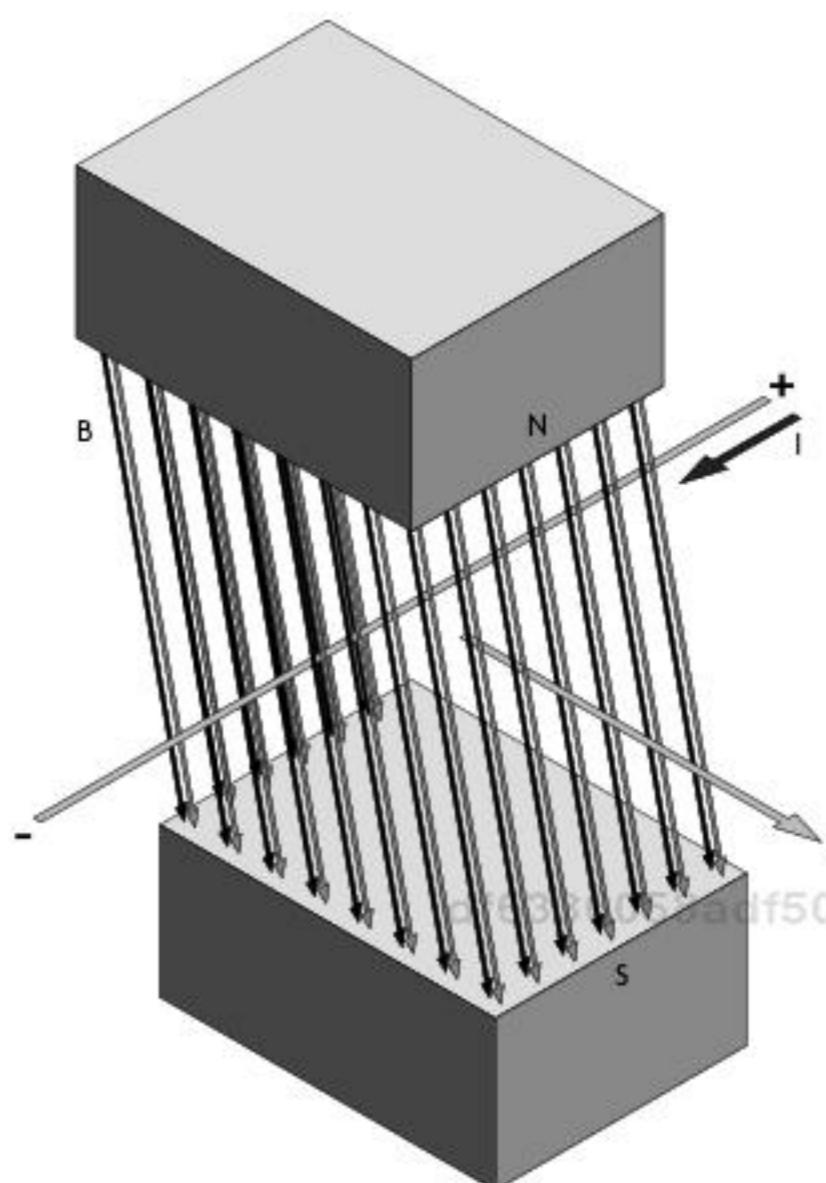
$L$ : longitud del conductor [m]

$I$ : corriente eléctrica [A]

$\vec{B}$ : vector de inducción magnética [ $\text{Wbm}^{-2}$ ]

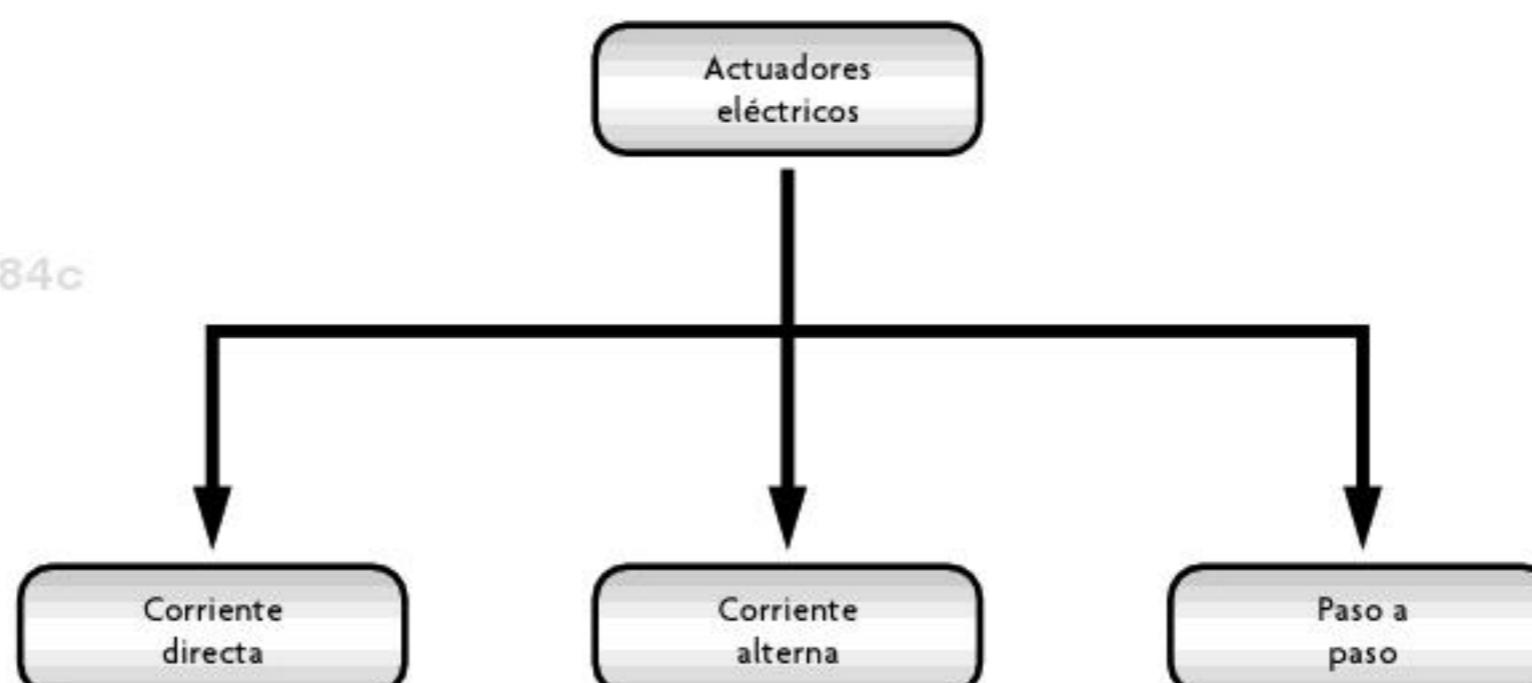
Como se dijo antes, los actuadores eléctricos se basan en el principio de funcionamiento descrito con anterioridad, en el cual se establece que si en un filamento conductor por el cual circula una corriente eléctrica se ubica dentro de la acción de un campo magnético, dicho filamento experimenta una fuerza electromagnética que induce un desplazamiento perpendicular a las líneas de acción del campo magnético.

Con el fin de aumentar la magnitud de la fuerza de desplazamiento, un actuador eléctrico está constituido por un gran número de filamentos conductores, conocidos como espiras. Debido a que la corriente eléctrica que circula a través de un conjunto de espiras adquiere propiedades magnéticas, esta provoca el movimiento circular en el eje (rotor) del actuador, gracias a la interacción con los polos (imanes o electroimanes), con lo que se produce la energía mecánica.

**Figura 1.57** Principio de funcionamiento de los actuadores eléctricos.**Figura 1.58**

### Clasificación de actuadores eléctricos

Por lo general, los actuadores eléctricos se clasifican de acuerdo con el tipo de energía eléctrica con la que son alimentados, por el tipo de movimiento que generan y por la forma de excitación, entre otros aspectos (véase figura 1.59).

**Figura 1.59** Clasificación de los actuadores por el tipo de energía de alimentación.

#### Actuadores de corriente directa (CD)

Para su funcionamiento, los actuadores de corriente directa demandan un flujo eléctrico de corriente que circula en un solo sentido. Este tipo de actuadores se compone de dos partes fundamentales, conocidas comúnmente como rotor y estator. El rotor constituye la parte móvil del actuador, además de que es la parte que proporciona la fuerza que actúa sobre el elemento mecánico. Por su parte, el estator constituye la parte fija del actuador y es aquella que provee el magnetismo necesario para inducir la fuerza electromotriz. Una de las principales características de los actuadores de corriente directa radica en que al variar el voltaje de alimentación se puede modificar la velocidad del eje del actuador, ya que la velocidad de rotación en un motor DC es proporcional al voltaje, además de que el par es proporcional a la corriente que circula por su devanado.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

### Actuadores de corriente alterna (CA)

Los actuadores de corriente alterna, por su parte, se sirven de un flujo eléctrico en el cual la intensidad cambia de dirección periódicamente, esto como consecuencia del cambio periódico de polaridad de la tensión aplicada en los bornes de alimentación del motor.

En aplicaciones de velocidad variable, los motores CA dependen fundamentalmente de la frecuencia de operación del voltaje aplicado para modificar los rangos de velocidad.

### Motores paso a paso

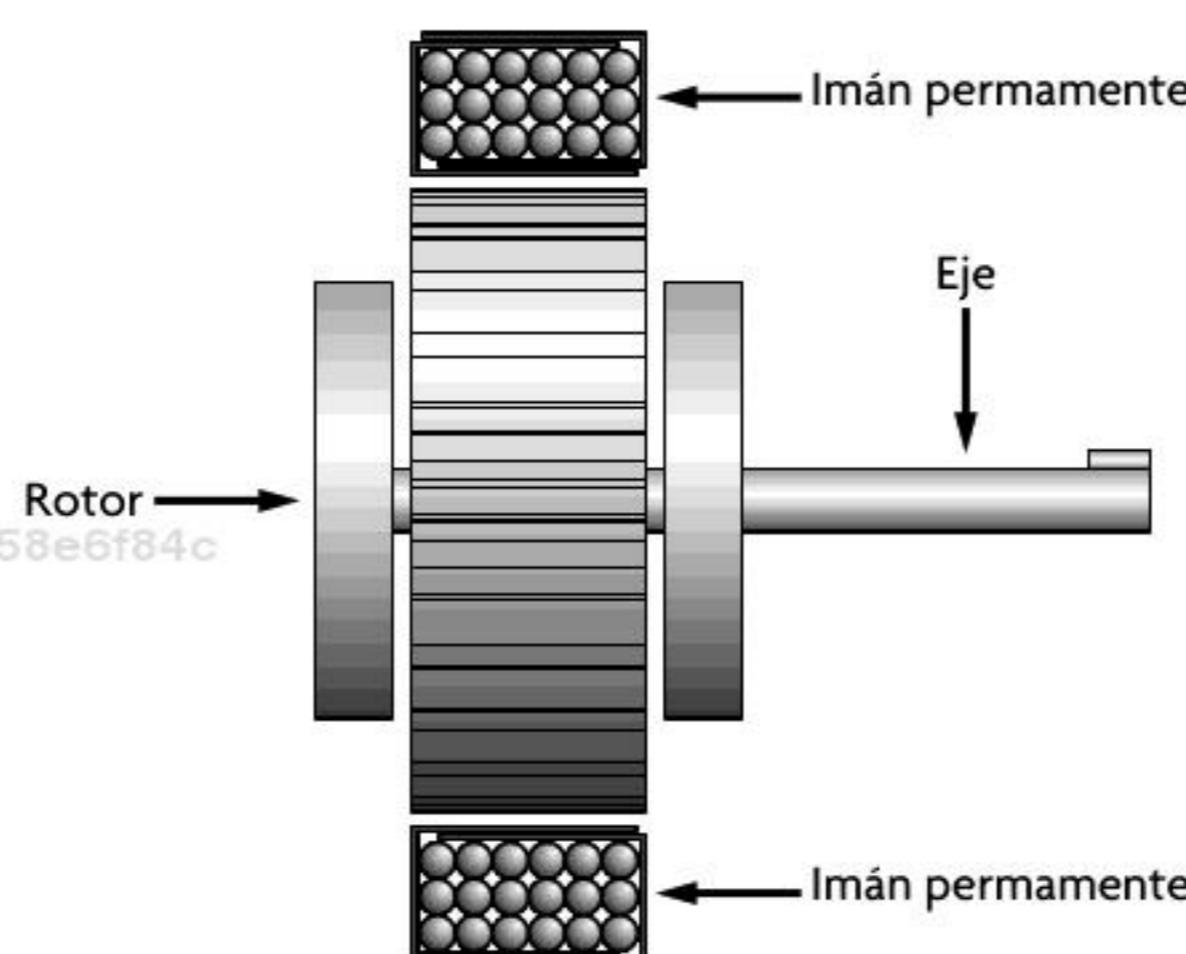
El motor paso a paso funciona con el mismo principio físico fundamental de los actuadores de CD y CA, solo que este tipo de actuador electromecánico convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo cual implica que este es capaz de avanzar un determinado valor en grados (pasos) del eje motriz dependiendo de las entradas de control. En la actualidad, en el mercado existen tres tipos de motores paso a paso:

- De imanes permanentes
- De reluctancia variable
- Híbridos

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

### Motores paso a paso de imán permanente

Este tipo de motor se conoce como motor paso a paso de imán permanente debido a que un imán cerámico con forma de cilindro dentado constituye el rotor de este y porque su estator está fabricado de material ferromagnético dispuesto en forma de láminas; esta característica del rotor representa una de las principales ventajas de este motor, debido a que en ausencia de excitación eléctrica el eje del motor permanece en la misma posición (véase figura 1.60).

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

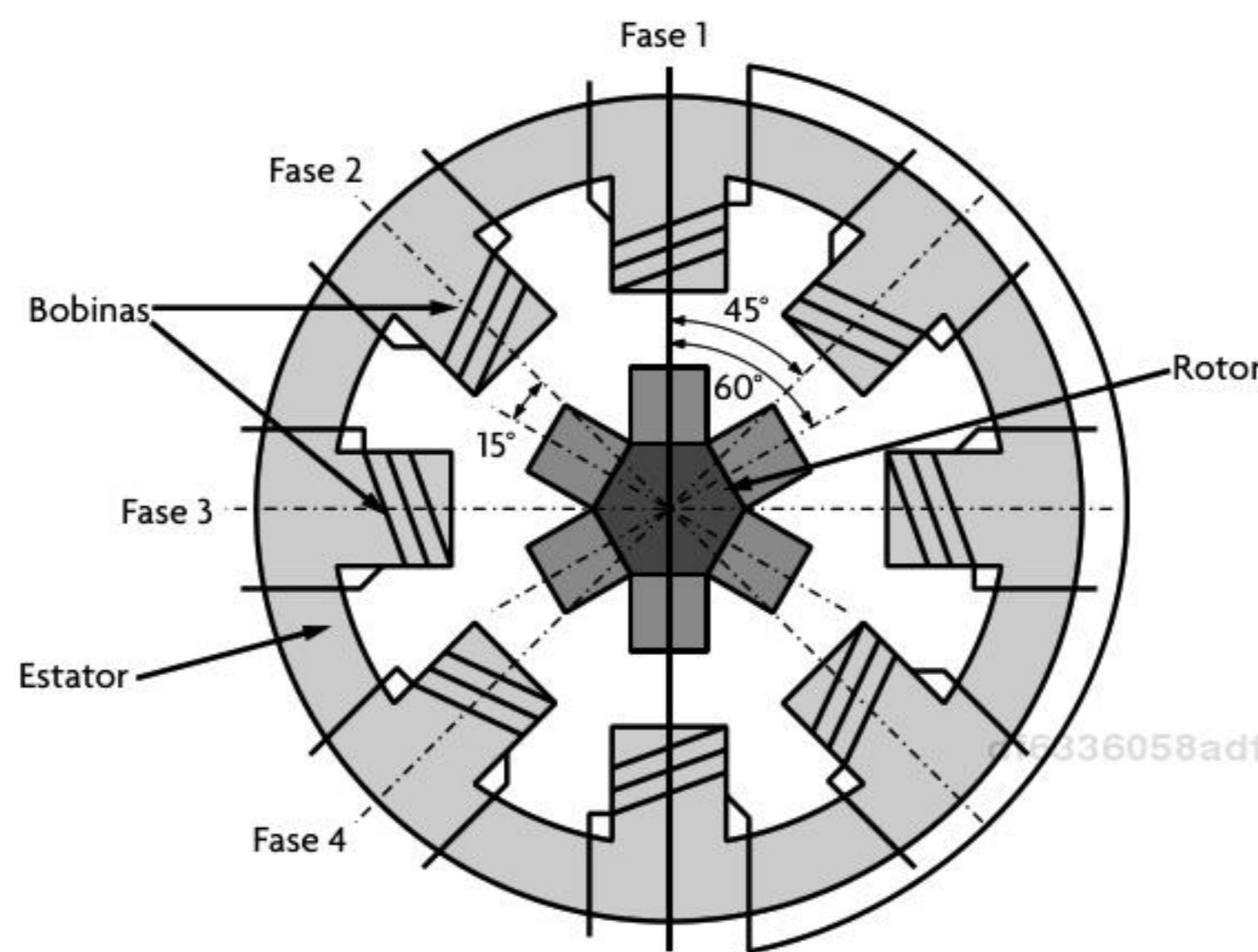
**Figura 1.60** Vista en sección de un motor paso a paso de imán permanente.

### Motores paso a paso de reluctancia variable

Este tipo de actuadores paso a paso está constituido por un rotor dentado construido a base de láminas ferromagnéticas y un estator donde se disponen bobinas que forman los polos, las cuales se alojan en ranuras, de manera longitudinal, de modo que hacen más efectiva la acción del campo magnético, gracias a que el material con que están construidas ofrece baja resistencia a la circulación del flujo magnético. Su funcionamiento es similar a los actuadores de imán permanente, aunque en condiciones de reposo no existe par en el eje del motor, lo que significa que el rotor gira con libertad.

La característica principal de este actuador es que si se requiere se puede construir para que funcione con pasos más pequeños que los de un motor de imán permanente (véase figura 1.61).

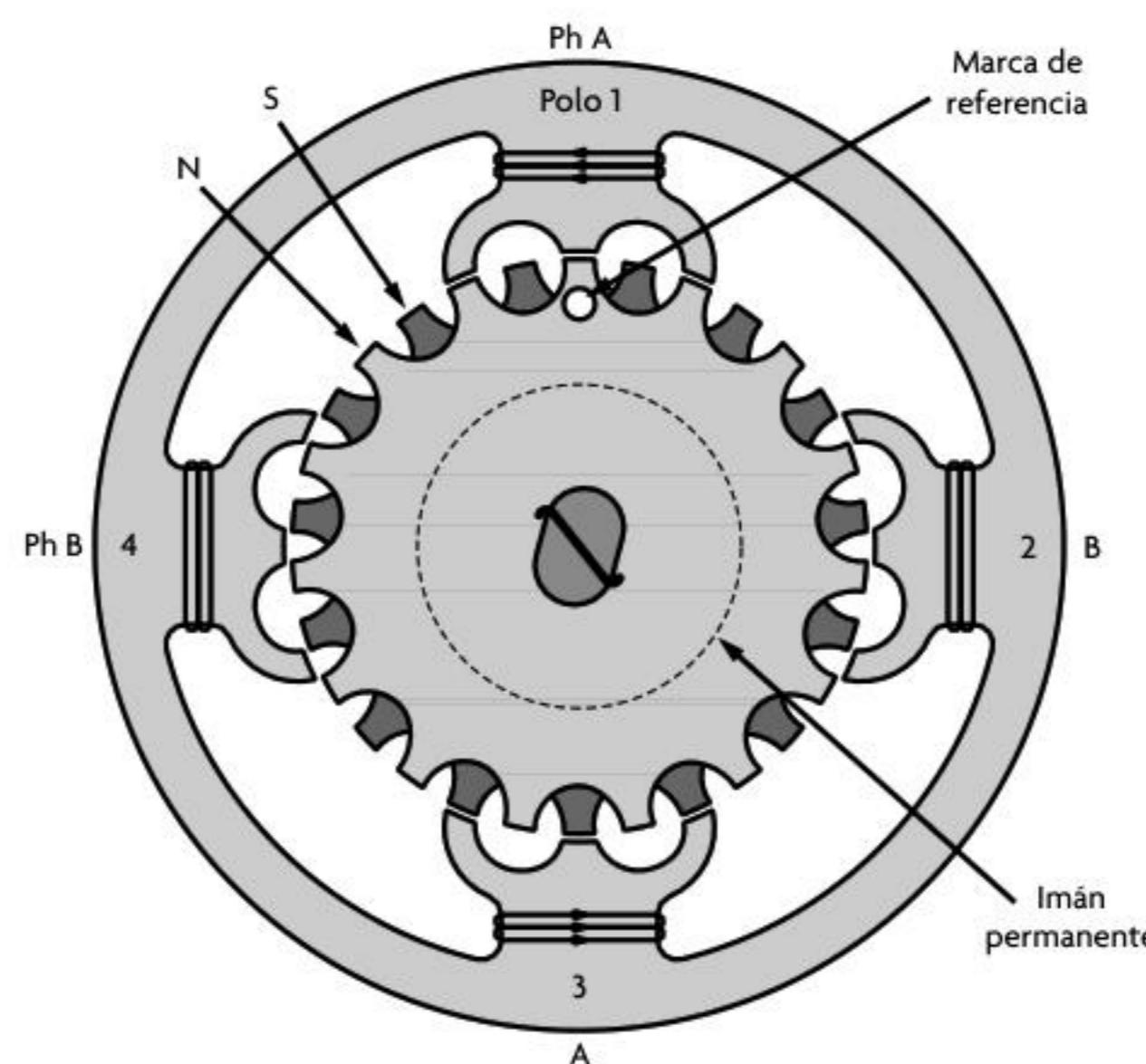
df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary



**Figura 1.61** Vista seccional de un motor por pasos de reluctancia variable.

#### Motores paso a paso híbridos

Se conocen como motores híbridos todos aquellos motores que combinan las características de los motores de imán permanente y de reluctancia variable. Una cualidad palpable de esta característica de hibridad es que este tipo de motores heredan las ventajas de cada uno de estos tipos de motores, las cuales se conjugan en un solo motor, lo que se ve reflejado en la obtención de ángulos pequeños de paso con un alto par. El estator en los motores híbridos es semejante al de los motores tratados antes; sin embargo, difieren en que el rotor de los motores híbridos está conformado por un imán o material imantado en forma de disco cilíndrico en posición longitudinal al eje, el cual produce un flujo magnético (véase figura 1.62).



**Figura 1.62** Motor paso a paso híbrido.

## Actividades sugeridas

### Medición experimental de resistencia

Con el fin de verificar que la resistencia depende de la cantidad de material presente en un elemento, tome un lápiz y elimine todo el material en sus extremos, de tal modo que deje el grafito expuesto; luego, mida con cuidado su longitud. Enseguida, coloque un multímetro en modo de medición de resistencia en los extremos del lápiz y observe con detenimiento cuánta resistencia marca el medidor. Acto seguido, elimine, poco a poco, un segmento del lápiz y repita

las mediciones de longitud y resistencia. Después de realizar sus mediciones, elabore una gráfica entre la longitud del lápiz y la resistencia que marca el medidor. ¿Qué observó en el medidor? ¿Qué sucedió cuando cortó el lápiz por la mitad y realizó nuevamente la medición? ¿Cómo es el comportamiento de la gráfica?

Elabore un reporte acompañado de la gráfica correspondiente.

## Trabajo de investigación

Realice una búsqueda en Internet acerca de **sensores de proximidad**; después, repita su búsqueda, pero esta vez coloque en el buscador el concepto **sensores de distancia**. ¿Qué tipo de sensores encontró? ¿Cómo puede

distinguir cada sensor? ¿Qué tipo de principio de transducción utiliza cada uno de estos tipos de sensores? ¿Cómo distingue a cada sensor?

## Problemas

**1.1** Defina qué es una variable física.

**1.2** Defina qué es una magnitud física.

**1.3** Complete:

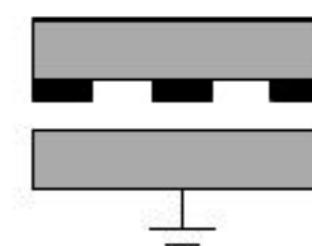
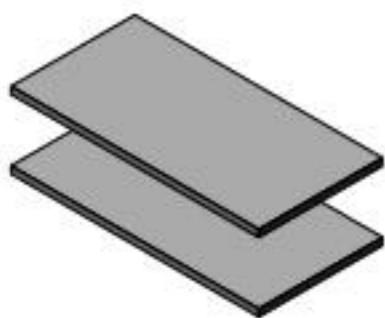
Un ..... es aquel dispositivo que transforma un tipo de energía en otro.

**1.4** Relacione cada uno de los siguientes principios de transducción con la descripción que mejor se ajuste a cada uno y escríbalos donde corresponda en la tabla siguiente.

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Resistivo</li> <li>■ Piezoeléctrico</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Piezoresistivo</li> <li>■ Ultrasónico</li> </ul> |
|---|---|

Principio de transducción	Descripción
	Hace uso de la relación entre la resistencia eléctrica y la deformación de un material.
	Se vale de materiales con la peculiaridad de generar carga eléctrica cuando una presión externa es aplicada sobre estos.
	Se basa en el efecto Doppler, además de que hace uso de materiales piezoeléctricos.
	Utiliza los cambios de resistencia.

- 1.5** Escriba el nombre correspondiente de cada una de las estructuras capacitivas que se representan de manera gráfica en las siguientes figuras.



- 1.6** Calcule el valor de capacitancia en un capacitor de placas paralelas con área de traslape de  $10 \mu\text{m}^2$  y una distancia entre placas de  $2 \mu\text{m}$ . Considere  $\epsilon_r = 1$  y  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ .

- 1.7** Agrupe los siguientes principios de transducción en la tabla siguiente, según corresponda.

- |                      |  |
|----------------------|--|
| ■ Efecto Hall        | ■ Efecto Seebeck                           |
| ■ Efecto Joule       | ■ Transducción basada en la ley de Faraday |
| ■ Corrientes de Eddy | ■ Efecto Thomson                           |
| ■ Efecto Peltier     |  |

Transducción magnética	Transducción térmica

- 1.8** Considerando la ecuación del efecto Joule, calcule el calor producido ( $Q$ ) por un voltaje de 25 V aplicado a una resistencia de  $1 \text{ k}\Omega$  durante 5 segundos.

- 1.9** Complete:

La ..... es la resistencia específica que presenta un material al paso de una corriente.

- 1.10** Calcule la resistencia de un trozo de material con sección circular de 1 mm de diámetro, una longitud de 30 mm y una resistividad de  $1.71 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ .

- 1.11** Explique cuándo ocurre el efecto fotoeléctrico.

- 1.12** Explique qué aplicaciones tiene el principio de transducción químico-eléctrico.

- 1.13** Explique cuál es la diferencia entre un sensor, un transductor y un actuador.

- 1.14** Complete la tabla siguiente con los principios de transducción que se emplean para medir cada variable física enunciada.

Variable física	Principios de transducción
Fuerza	
Velocidad	
Aceleración	
Presión	
Temperatura	

**1.15** Complete:

Las ..... estáticas de un sensor se refieren a aquellos rasgos que no cambian con el ....., mientras que las características dinámicas son aquellas que describen al sensor en ..... del tiempo.

**1.16** Relacione en la tabla siguiente cada una de las características referidas con su definición.

- Rango
- Resolución
- Sensitividad
- Offset

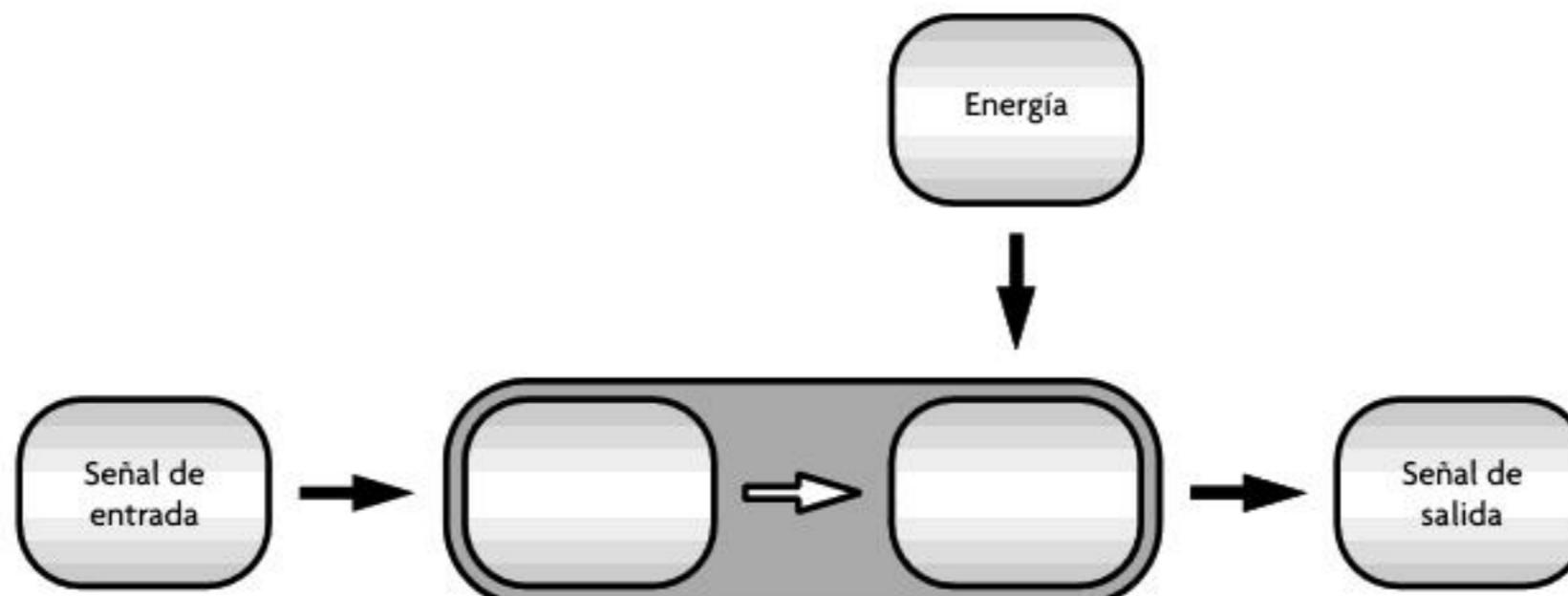
Característica	Definición
	Se define como un corrimiento en el eje y de la curva de salida de un sensor.
	Constituye el intervalo presente entre el valor mínimo y el valor máximo de la variable física que puede medir el sensor.
	Es el cambio más pequeño en la variable física que le es posible registrar.
	Se define como la entrada mínima que requiere para provocar una salida detectable.

**1.17** Explique la diferencia entre precisión y exactitud.**1.18** Realice la gráfica de una curva con histéresis.**1.19** Defina qué es el tiempo de respuesta de un sensor.**1.20** Complete:

La ..... dinámica del sensor es el grado de distorsión que presenta este a la ..... debido a los cambios abruptos del fenómeno que se está sensando.

**1.21** Complete:

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary El término de ..... fue propuesto por primera vez a mediados de la década de 1980.

**1.22** Realice un diagrama de los modos de integración de un sensor inteligente.**1.23** Explique cuándo se puede considerar que un sensor es inteligente.**1.24** Defina qué significa el término MEMS.**1.25** Complete el siguiente diagrama:

**1.26** Explique qué es un sensor de estado sólido.

**1.27** Complete la tabla que se presenta a continuación.

Actuador	Definición	Principio de funcionamiento	Clasificación
Neumático			
Hidráulico			
Eléctrico			

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

**1.28** En el ámbito de la física, una partícula eléctricamente cargada dentro de un campo magnético está expuesta a una fuerza electromagnética. Escriba la expresión que define esta fuerza.

**1.29** Algunas de las principales características de los actuadores de corriente directa radica en que al variar el voltaje de alimentación es posible modificar la velocidad. Explique cómo se lograría esta variación de velocidad en los motores de corriente alterna (CA).

**1.30** Explique cuál es la diferencia que hay entre un cilindro de simple efecto y uno de doble efecto.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

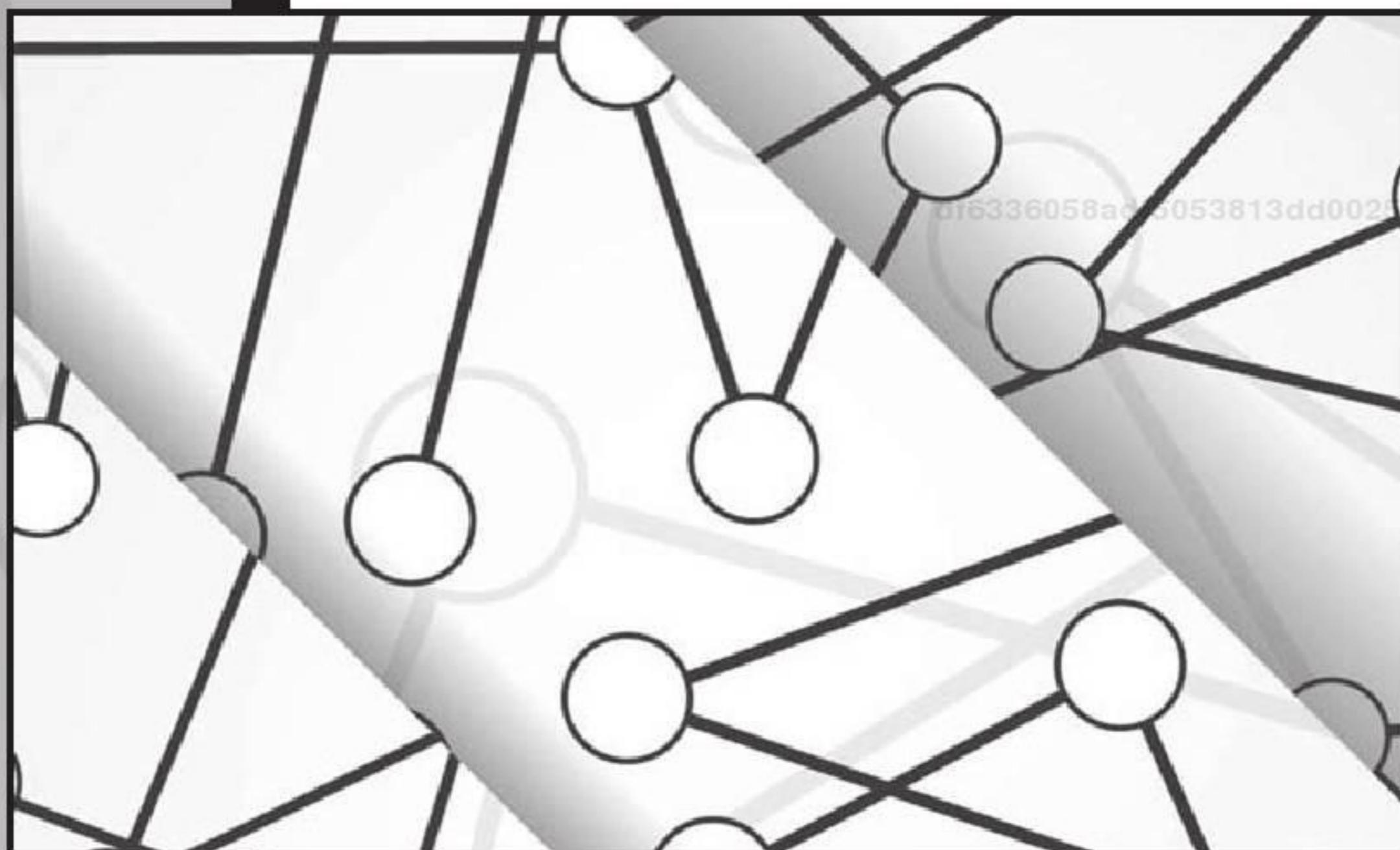
ebrary



Descarga en tu  
computadora

# 21

## Acondicionadores de señal



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

Para el estudio de este capítulo es deseable que el lector tenga conocimientos acerca de análisis básicos de circuitos eléctricos como:

- Leyes de Kirchhoff
- Respuesta de circuitos de primer orden RC y RL
- Respuesta de circuitos de segundo orden RLC
- Respuesta en régimen permanente sinusoidal

Además de conocimientos básicos de electrónica como:

- Funcionamiento de un diodo
- Funcionamiento de un transistor
- Circuitos de amplificación basados en transistores

### Objetivo general

Conocer los circuitos básicos de acondicionamiento de señal y sus principales características, para lo cual se estudian algunas configuraciones relevantes, así como el análisis de su comportamiento y la deducción de las ecuaciones que modelan su comportamiento.

### Objetivos particulares

- Conocer las distintas configuraciones de operación de un circuito puente.
- Aprender e identificar las distintas configuraciones de los circuitos de amplificación.
- Conocer e identificar las características de los tipos de convertidores, así como sus diferentes aplicaciones.
- Aprender e identificar las distintas configuraciones de filtros y sus aplicaciones en el acondicionamiento de señales electrónicas.

## 2.1 Acondicionadores de señal

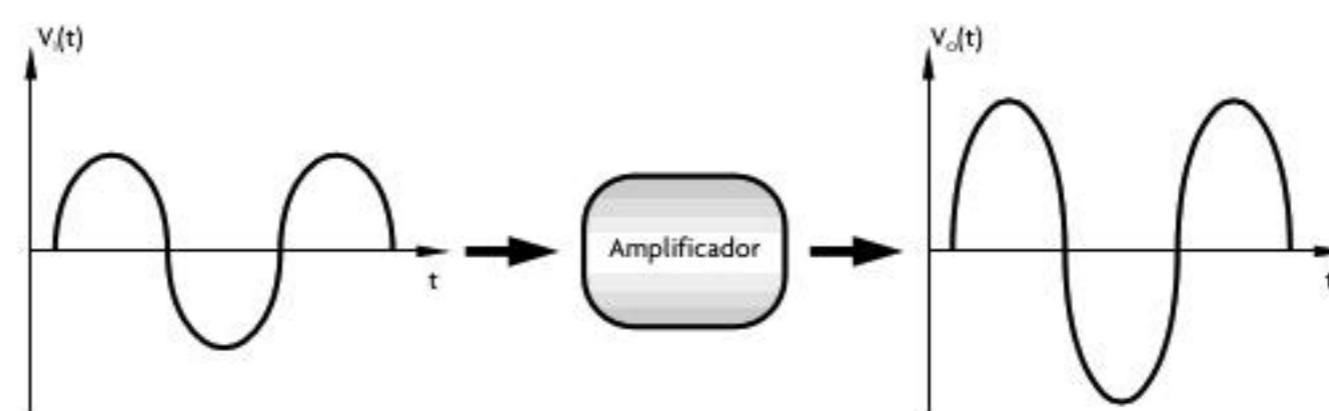
En el capítulo 1 se revisan los conceptos de transductor, sensor y actuador, así como sus principios de funcionamiento. Además, se establece que, en el sentido más general, un transductor forma parte de un sensor y que este último no solo cambia el dominio de la variable física medida, sino que, además, su salida se considera un dato útil para un sistema de medición.



**Figura 2.1** Sistema de medición.

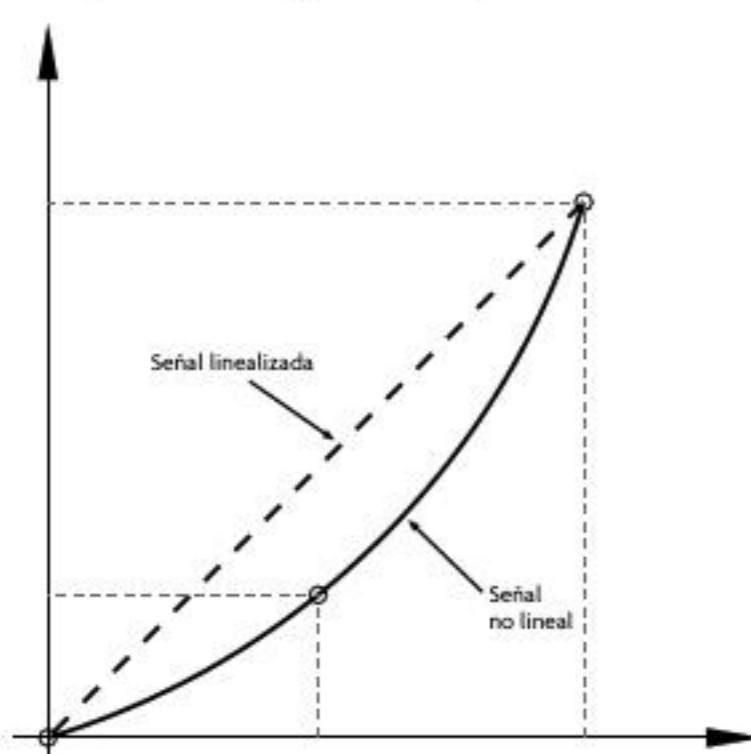
No obstante, lo que no se ha establecido es que aunque la salida del sensor es un dato útil, por lo común resulta necesario adecuar dicha señal de salida para que esta pueda ser interpretada en forma correcta por un sistema de procesamiento de la información (véase figura 2.1) y más adelante ejecutar alguna acción con base en los datos detectados. Los circuitos utilizados para la adecuación de la señal de salida de un sensor se conocen como **acondicionadores de señal** y su uso principal es convertir una señal, que puede ser difícil de leer por el sistema de procesamiento, en un formato más fácil de leer. Para realizar esta conversión, se llevan a cabo distintos procesos (según se requieran), los cuales incluyen:

- **Amplificación.** Es el proceso de aumentar la magnitud de una señal (véase figura 2.2); por ejemplo, llevar una señal de 5-10 mV a una señal de 0-5 V, donde  $A$  se denomina factor de amplificación. Para conocer más del tema, más adelante, en este capítulo, se presentan y revisan diversas configuraciones de amplificadores.

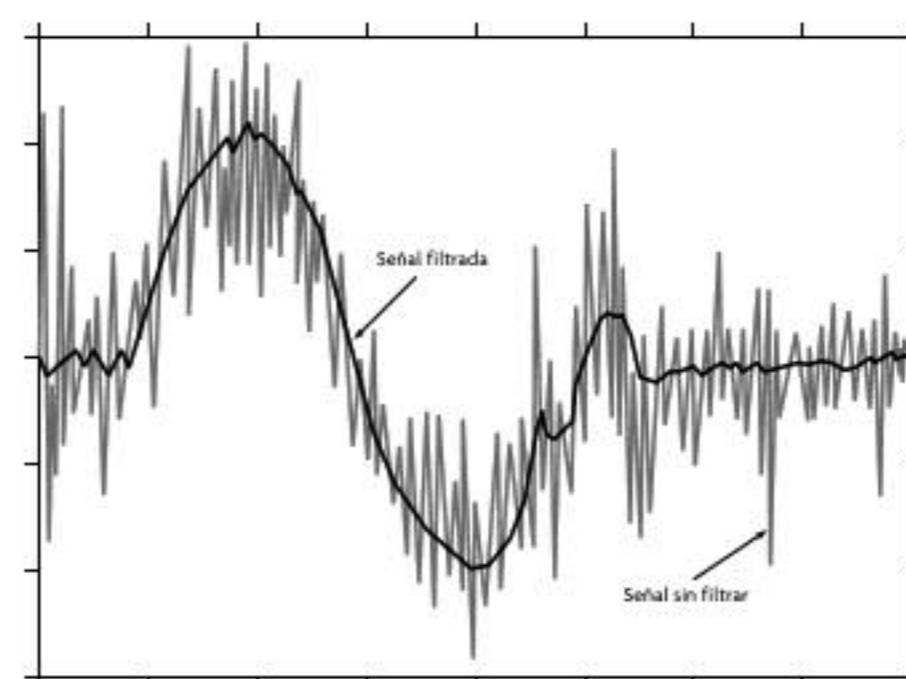


**Figura 2.2** Amplificación.

- **Linealización.** Es la conversión de una señal no lineal en una señal cuyo comportamiento sea lineal, también conocida como señal linealizada (véase figura 2.3).
- **Filtrado.** Es el proceso mediante el cual se desprecian componentes no deseadas de una señal (véase figura 2.4). Existen distintas configuraciones de filtros, de acuerdo con las compo-



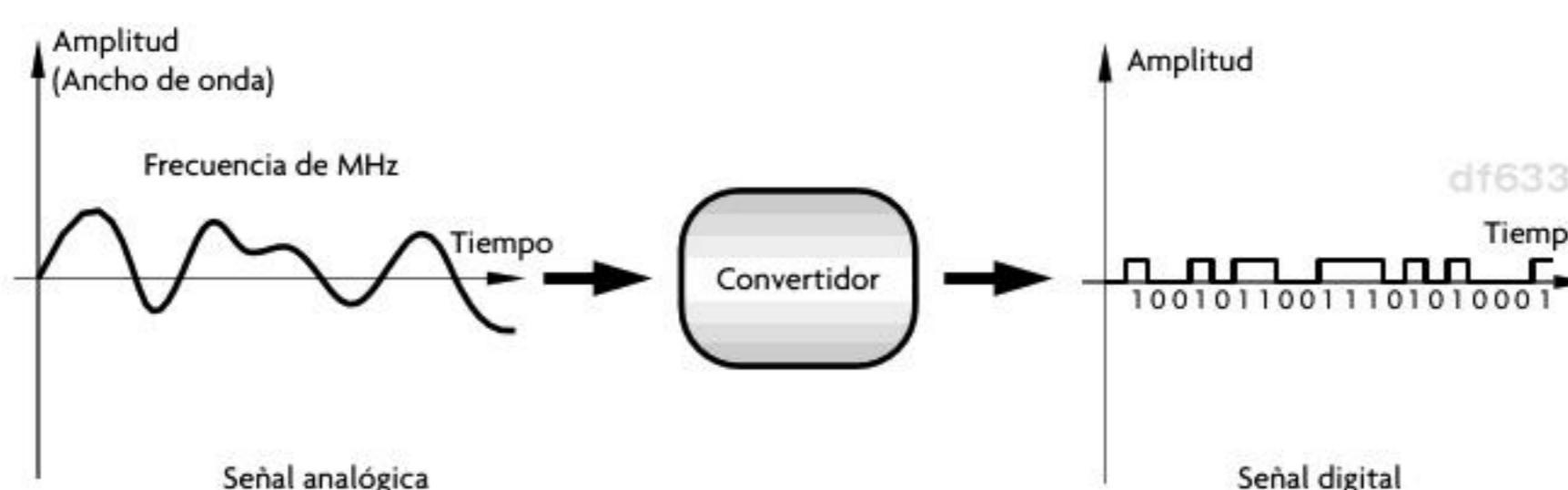
**Figura 2.3** Linealización.



**Figura 2.4** Filtrado.

nentes que se desean conservar o eliminar de la señal; estas configuraciones se exponen con más detalle en secciones posteriores de este capítulo.

- **Conversión.** Un caso común de aplicación de una conversión es aquel en que una señal continua o analógica, en términos de electrónica, se requiere en forma discreta o digital, para su posterior procesamiento por un dispositivo como un microcontrolador (véase figura 2.5). En situaciones como la descrita antes se utilizan circuitos denominados convertidores, los cuales pueden realizar el proceso de conversión analógica-digital o digital-analógica. De igual forma, también existen convertidores de frecuencia-voltaje, voltaje-frecuencia, corriente-voltaje, voltaje-corriente, directa-alterna y alterna-directa. Los circuitos de conversión se tratan en secciones subsecuentes.



**Figura 2.5** Conversión de una señal.

- **Aislamiento eléctrico.** Significa interrumpir el paso de la señal entre la entrada y la salida; es decir, no hay ningún cable físico entre la entrada y la salida. En general, la entrada es transferida a la salida mediante la conversión a una señal óptica o magnética. De este modo, se impide que las señales no deseadas en la línea de entrada pasen a través de la salida. El aislamiento es necesario cuando se debe hacer una medición sobre una superficie con un voltaje muy por encima del de tierra.
- **Excitación.** Muchos sensores requieren alguna forma de excitación para su funcionamiento; por ejemplo, los sensores con principio de transducción de reluctancia variable necesitan una señal en corriente alterna.

El adecuado acondicionamiento de las señales de salida de los sensores deriva en un mejor funcionamiento del sistema de sensado, al hacerlo más robusto; es decir, hace que el sistema sea poco sensible a determinadas fuentes de variación, como ruido o incapacidad de discernir entre los datos de salida.

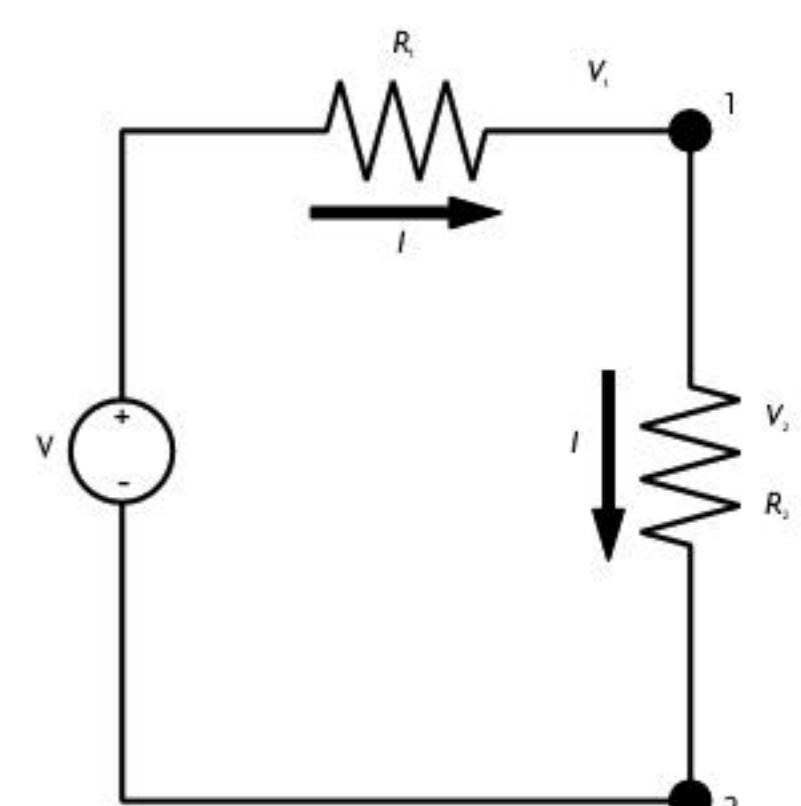
## 2.2 Circuitos divisores

Para el acondicionamiento de sensores resistivos, los circuitos divisores son los más sencillos de utilizar, pues tienen la ventaja de implementarse con facilidad y a un bajo costo; sin embargo, su alta sensibilidad a variaciones de corriente los hace menos populares que los circuitos de puente.

### Divisor de voltaje

Un circuito divisor de voltaje es aquel que permite obtener distintos niveles de voltaje, teniendo una única fuente. Si analizamos el circuito de la figura 2.6 mediante el uso de la ley de mallas de Kirchhoff obtenemos:

$$V = IR_1 + IR_2 \quad (2.1)$$



**Figura 2.6** Circuito divisor de voltaje.

Al despejar la corriente tenemos:

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2} \quad (2.2)$$

Si aplicamos la ley de Ohm sobre cada una de las resistencias obtenemos  $V_1$  y  $V_2$  en la forma:

$$V_1 = IR_1 = V \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.3)$$

$$V_2 = IR_2 = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.4)$$

Si se observan con cuidado las ecuaciones 2.3 y 2.4 es claro que los voltajes  $V_1$  y  $V_2$  son una función del voltaje  $V$  aplicado al circuito, y dado que el cociente que multiplica a  $V$  es siempre menor a 1, podemos afirmar que los voltajes sobre las resistencias  $V_1$  y  $V_2$  siempre serán menores a  $V$ .

Los divisores de voltaje se usan, sobre todo, como auxiliares para la medición con sensores resitivos, ya que si se mantiene una resistencia fija se puede conocer el valor de la otra resistencia con el uso de la ley de Ohm, si son conocidos los voltajes  $V_1$  o  $V_2$  del divisor. Así, al medir un voltaje sobre el divisor es posible saber el valor correspondiente de la resistencia del sensor y relacionar este, a su vez, con la magnitud física a detectar.

En este punto es importante resaltar la sensitividad del circuito divisor a las tolerancias de las resistencias, ya que si se adquieren resistencias comerciales con tolerancias de 10%, el valor de salida del divisor variará respecto al cálculo, lo que hace necesario medir los valores reales de resistencia y caracterizar el circuito antes de implementarlo.

Por último, cabe destacar que la respuesta del divisor de voltajes es lineal solo cuando el cociente de la resistencia fija entre la resistencia del sensor es igual o mayor a 100, y además la variación de la resistencia del sensor también es lineal.

### Divisor de corriente

Un circuito divisor de corriente es muy similar al circuito divisor de voltaje, la diferencia radica en que el arreglo de resistencias ahora es paralelo y la fuente de alimentación es una fuente de corriente; si se considera el circuito de la figura 2.7, al aplicar la ley de Ohm se puede obtener el voltaje  $V$  como:

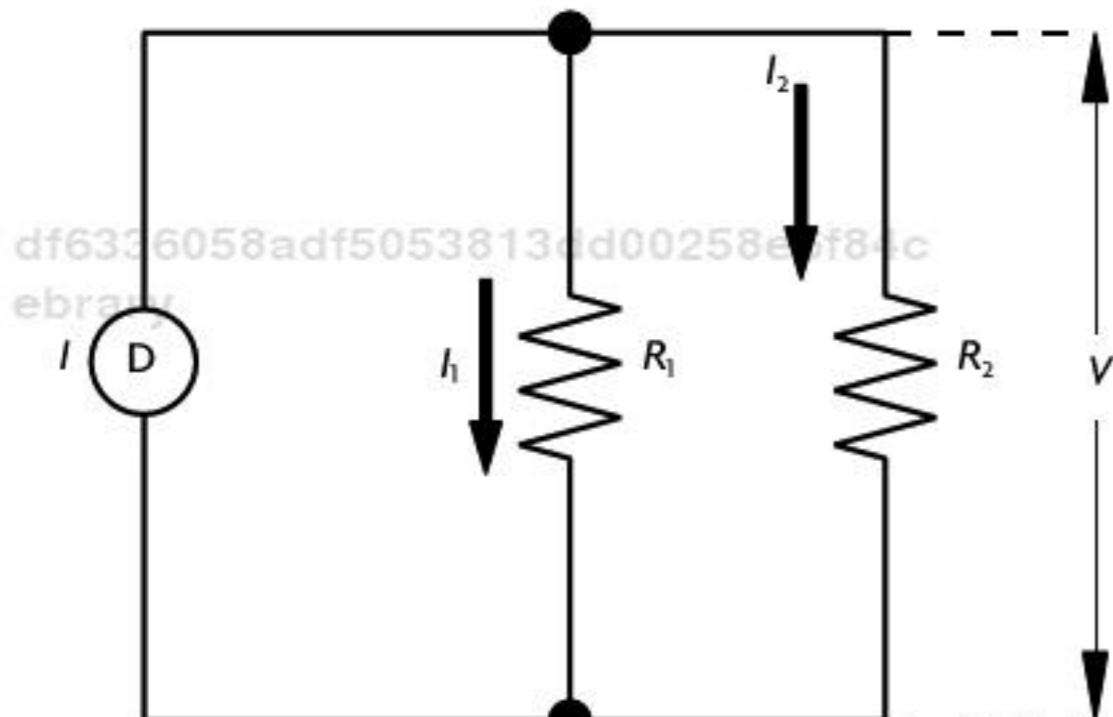
$$V_2 = I_1 R_1 = I_2 R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I \quad (2.5)$$

Ahora, a partir de la ecuación 2.5 podemos calcular las corrientes  $I_1$  e  $I_2$ , y obtenemos:

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.7)$$

Si se observan las ecuaciones 2.6 y 2.7 es claro que la corriente de alimentación del circuito se divide entre las dos resistencias. La aplicación de los divisores de corriente para el acondicionamiento de sensores resitivos es similar al de los divisores de voltaje; sin embargo, se prefieren estos últimos, ya que, de manera práctica, resulta más sencillo medir voltajes que corrientes.



**Figura 2.7** Circuito divisor de corriente.

## 2.3 Circuitos de puente

Los circuitos de puente se utilizan para obtener la lectura de sensores resistivos y piezo-resistivos, como las galgas extensiometrías, los RTD (Resistance Temperature Device) o fotorresistencias; son circuitos baratos y fáciles de implementar.

Para obtener la lectura de un sensor, los circuitos de puente se valen de las variaciones de resistencia de los sensores y los divisores de voltaje, de tal manera que el cambio en la resistencia del sensor se traduce en un cambio de voltaje entre dos terminales del circuito puente.

La ventaja de usar un circuito puente en lugar de un circuito divisor simple es que el primero permite la lectura de variaciones del orden de menos de 1% de la resistencia nominal base, al mismo tiempo que hace más robusto el sistema de medición respecto a variaciones de corriente, aunque la dependencia a las tolerancias de las resistencias se mantiene.

Los circuitos de puente utilizados para acondicionar la señal de salida de un sensor se conocen como puentes de Wheatstone y consisten en cuatro resistencias dispuestas de tal forma que describen un cuadrado y una fuente de excitación, ya sea de voltaje o corriente, conectada entre dos nodos opuestos y un medidor de voltaje conectado entre los otros dos nodos restantes (véase figura 2.8).

De forma más técnica, se puede establecer que un puente de Wheatstone está compuesto de dos arreglos, de dos resistencias en serie, conectados en paralelo, donde el voltaje a medir es aquel entre los dos nodos medios de los arreglos seriales. El voltaje medido  $V_0$  es:

$$V_0 = V \frac{R_1}{R_1 + R_4} - V \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (2.8)$$

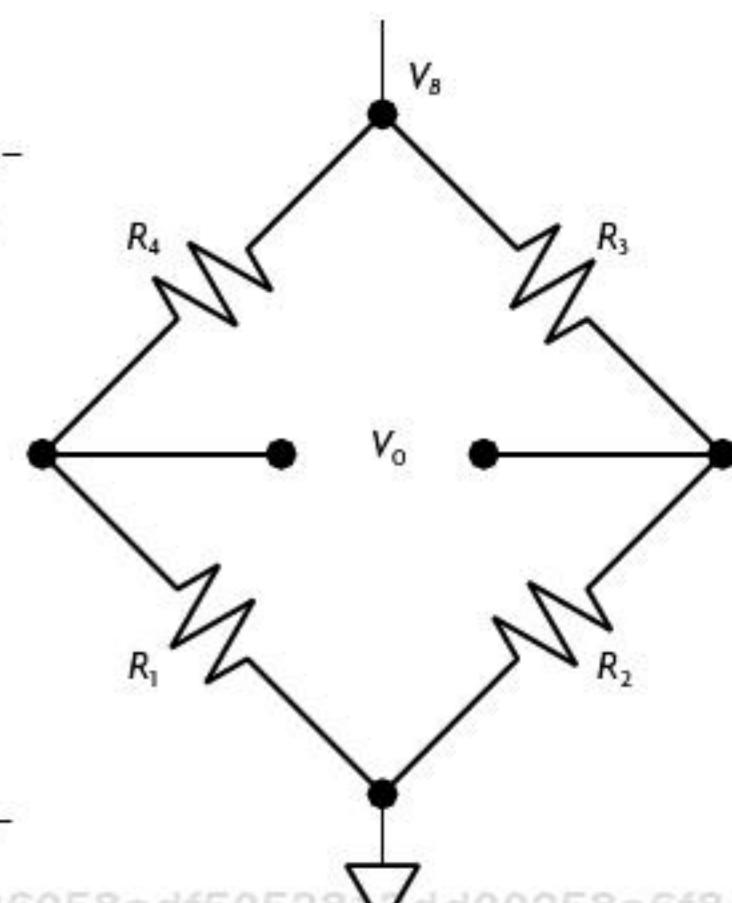
Si se analiza la ecuación anterior, es claro que el puente de Wheatstone en realidad consiste de dos divisores de voltaje y que el voltaje de salida medido solo es la diferencia entre los voltajes de salida de los dos divisores.

Pero si en lugar de una de las resistencias del puente, digamos  $R_1$ , se conecta un sensor (representado por una resistencia variable), entonces el puente se puede usar ya sea para detectar cuando un sistema alcanza un punto nulo o de estabilidad, o bien para medir los cambios en la magnitud de la resistencia del sensor. Para ejemplificar el modo de uso de detección de punto nulo, piénsese en una habitación en la cual se requiere mantener una temperatura constante y donde la temperatura es detectada mediante un RTD; en este caso, si se coloca el RTD como parte de un circuito puente, entonces es posible asegurar que la temperatura de la habitación va a permanecer constante siempre y cuando el circuito puente permanezca en equilibrio; es decir, que el voltaje  $V_0$  del puente sea nulo. Pero para lograr dicho equilibrio es necesario determinar los valores de las resistencias fijas del circuito, de tal manera que cuando el sensor registre la temperatura deseada, el equilibrio se mantenga, sino, de lo contrario, se altere. El cálculo de las resistencias se puede hacer apoyándose en el hecho de que para obtener un  $V_0$  nulo se debe cumplir la relación descrita en la ecuación 2.10.

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (2.9)$$

Despejando  $R_1$  se obtiene:

$$R_1 = R_4 \frac{R_2}{R_3} \quad (2.10)$$



**Figura 2.8** Puente de Wheatstone.

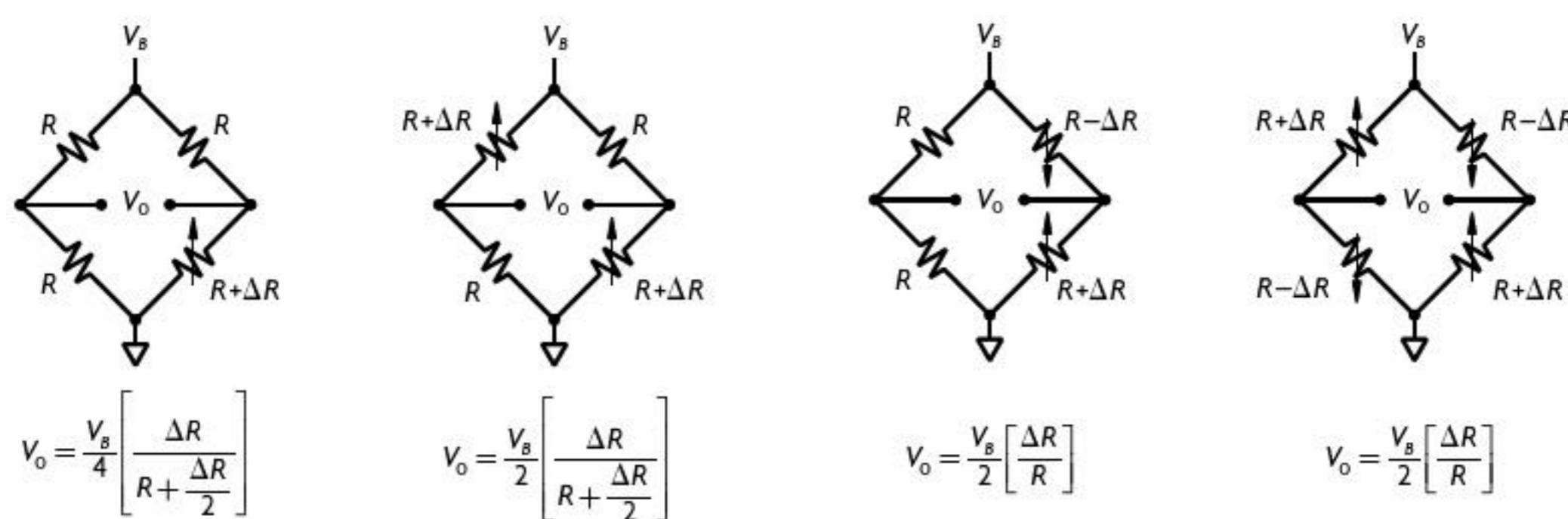
Pero como  $R_2$  y  $R_3$  son fijas, el cociente de estas en la ecuación 2.10 también es fijo; por tanto, tenemos:

$$R_1 = R_4 K \quad (2.11)$$

Si  $R_4$  también es fija, entonces se tiene un voltaje  $V_0$  nulo cuando el valor de la resistencia del sensor es tal que la ecuación 2.10 se cumple; por tanto, para poder calcular las resistencias fijas es necesario conocer el valor de resistencia del sensor cuando se alcanza la temperatura deseada; así, proponiendo un valor de  $R_4$  se puede determinar el cociente  $K$ , para después calcular los valores de  $R_2$  y  $R_3$ . El uso del puente de Wheatstone en modo de equilibrio se restringe a sistemas con realimentación, ya que cuando el puente sale de equilibrio indica una variación en el sistema, lo cual detona una acción en busca de restablecer el equilibrio.

Si el puente de Wheatstone se usa para medir la variación de la magnitud de la resistencia del sensor, entonces se debe realizar una caracterización del puente; es decir, primero se debe establecer qué valor de voltaje  $V_0$  corresponde a qué valor de resistencia y, después, a qué magnitud física corresponde dicha resistencia. Para lograr un acondicionamiento adecuado, los valores de las resistencias fijas deben ser tales que permitan un cambio legible de  $V_0$  ante una variación pequeña de  $R_1$ ; esto se puede lograr teniendo valores de resistencia iguales al valor nominal de  $R_1$ .

Para el caso de la medición de la variación de la magnitud de la resistencia de un sensor, se suelen utilizar puentes con más de un elemento variable; es decir, se usa más de un sensor. Las configuraciones más usadas para medir variaciones de magnitud se muestran en la figura 2.9.



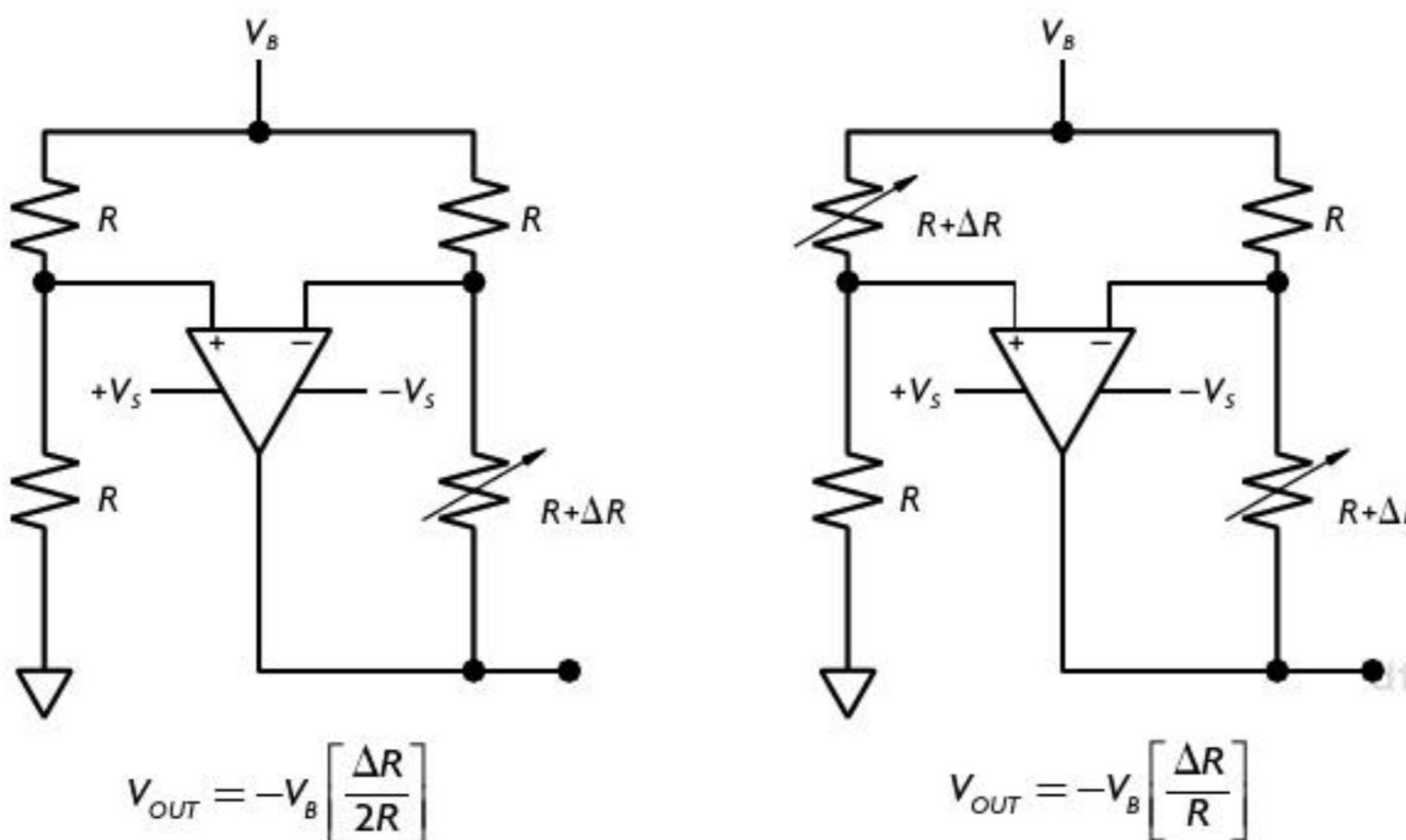
**Figura 2.9** Configuraciones del puente de Wheatstone para medir variaciones en la magnitud de la resistencia de un sensor.

La configuración con un solo elemento variable suele usarse con sensores de temperatura o galgas extensiométricas. Por su parte, la primera configuración con dos elementos variables de la figura 2.9 es usada de manera típica con sensores de presión, flujo o galgas; la diferencia de esta configuración con respecto a la configuración de un solo elemento variable es que se tiene el doble de ganancia. En tanto, la segunda configuración con dos elementos variables requiere que los dos elementos variables cambien en direcciones opuestas; su principal uso es con galgas extensiométricas en pruebas de flexión. Por último, la configuración con todos los elementos variables es la que otorga la mayor ganancia a la salida y, además, es la configuración que se utiliza para celdas de carga.

La sensitividad de un circuito puente se calcula como el cociente entre el voltaje de alimentación y la máxima salida del puente; por ejemplo, si se tiene una alimentación de 5 V y una salida máxima de 2.5 mV, la sensitividad del puente sería 0.5 mV/V.

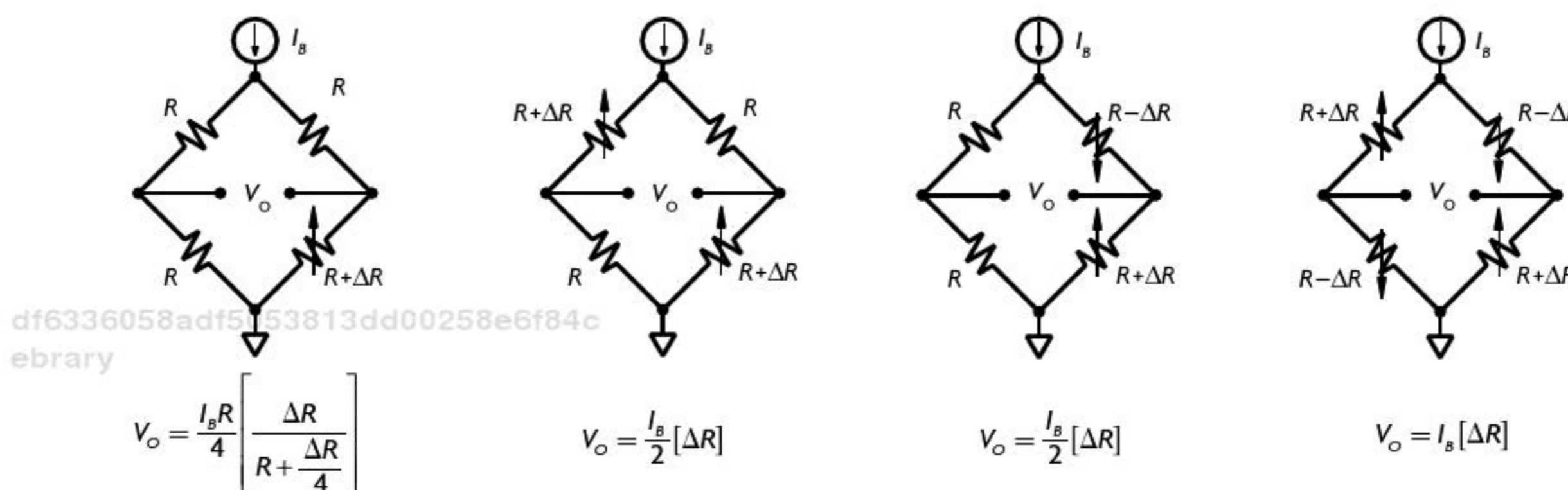
Si se observan las ecuaciones asociadas a cada configuración de puente es claro que el comportamiento de estos es no lineal (excepto en el caso de la configuración con cuatro elementos variables) y que dicha no linealidad es inherente al puente. Para la implementación de los puentes de Wheatstone es común que se busque la linealización de la salida del puente antes de enviar la información al sistema de procesamiento, a fin de facilitar la labor de este último. La linealización de la salida del

puente puede hacerse de forma digital o analógica; algunos circuitos analógicos típicos de linealización de puentes se muestran en la figura 2.10.



**Figura 2.10** Circuitos de linealización de puentes de Wheatstone.

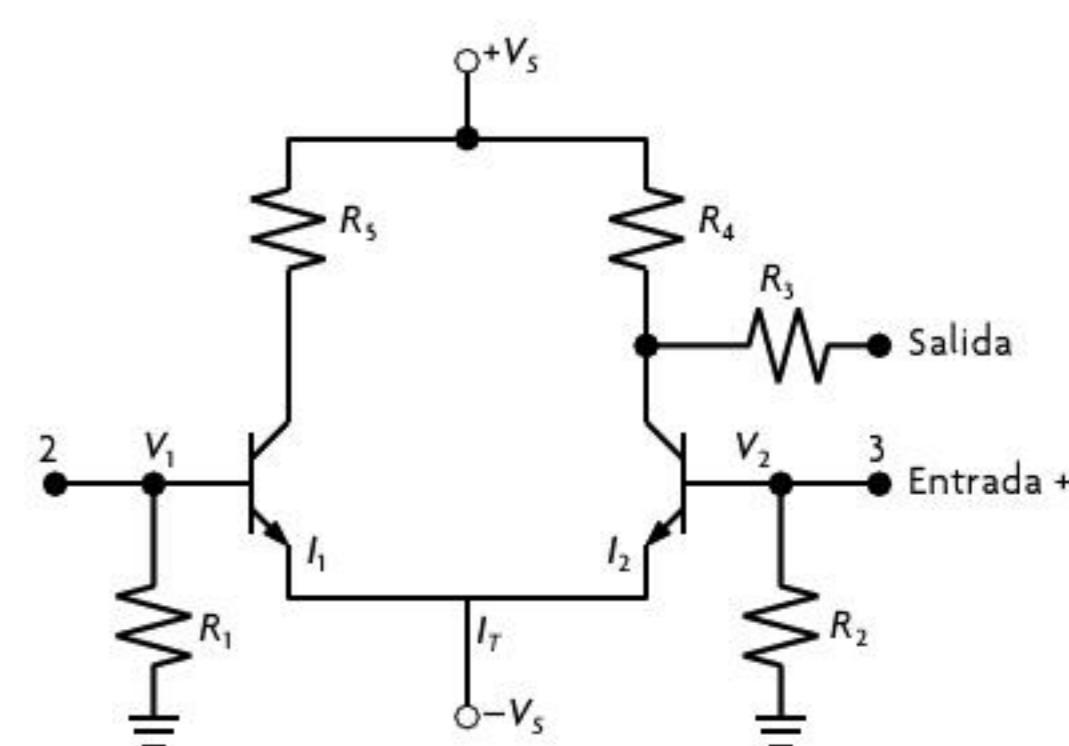
Los puentes de Wheatstone también pueden ser alimentados por una fuente de corriente, aunque no son tan populares como los divisores de corriente; sin embargo, sí son útiles cuando el puente se localiza lejos de la fuente, ya que la resistencia de los cables no induce a error en la medición, a diferencia de los circuitos puente alimentados por voltaje; además, a corriente constante todas las configuraciones de puente (excepto la de un elemento variable) son lineales (véase figura 2.11).



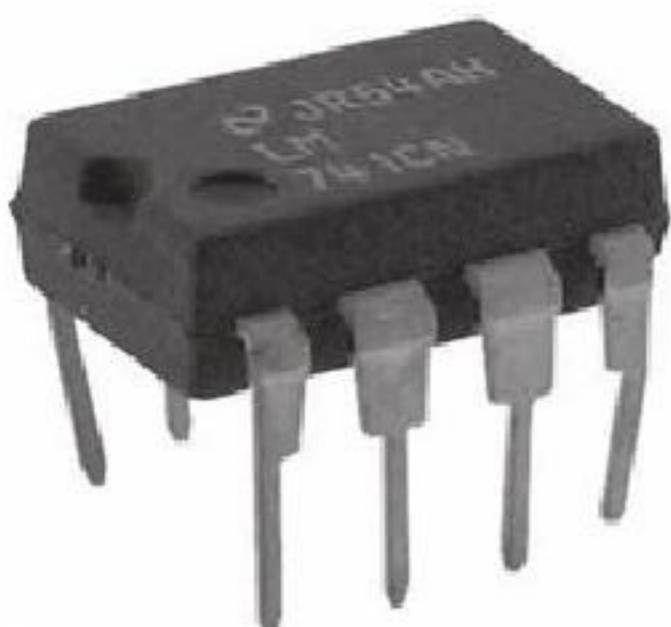
**Figura 2.11** Puentes de Wheatstone de corriente constante.

## 2.4 Circuitos amplificadores

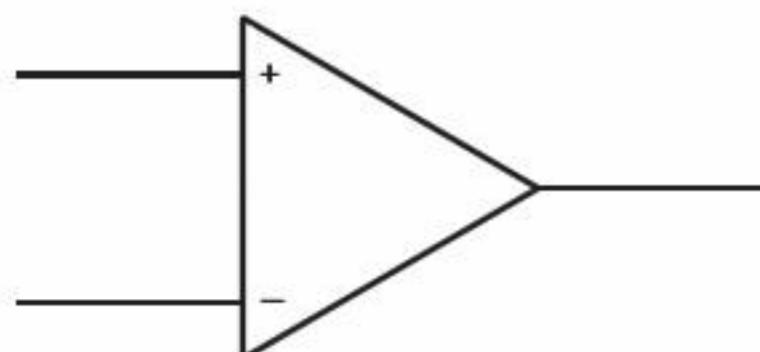
Los circuitos amplificadores se caracterizan por tener una gran cantidad de aplicaciones en el acondicionamiento de señales, dada la existencia de una gran cantidad de configuraciones. En las siguientes secciones se presentan las configuraciones básicas de circuitos amplificadores basadas en un amplificador operacional. Un amplificador operacional, por lo común llamado **OpAmp** (por su nombre en inglés), es un circuito de amplificación con dos entradas y una sola salida destinado para ser usado con elementos externos, con o sin realimentación, los cuales definen la función u operación que el amplificador deberá realizar. Un amplificador operacional puede construirse a partir



**Figura 2.12** Circuito de un amplificador operacional.



**Figura 2.13** Circuito integrado LM741.



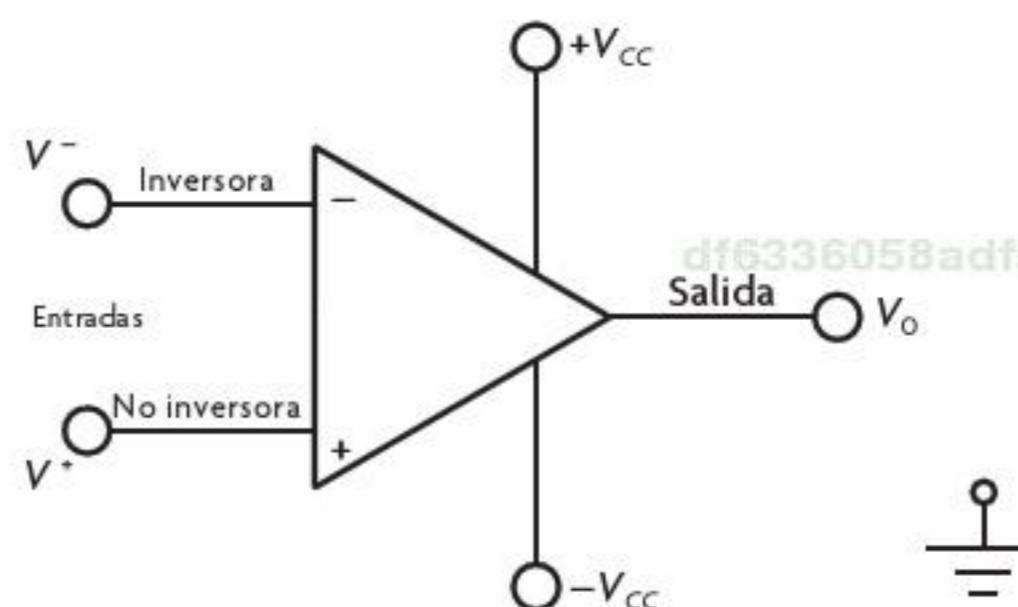
**Figura 2.15** Símbolo simplificado del amplificador operacional.

Características ideales que se consideran durante el análisis de circuitos que contienen amplificadores operacionales:

- **Ganancia infinita.** Esto indica que a la salida del amplificador operacional se puede tener cualquier valor de voltaje necesario para satisfacer las condiciones de entrada; es decir, las señales de entrada se pueden amplificar sin cota. Pero, en la realidad, el voltaje a la salida del amplificador operacional sí está acotado (por las fuentes de alimentación).
- **Ganancia nula en modo común.** Cuando las dos terminales tienen valores de voltaje iguales se dice que la ganancia a la salida es cero; es decir, no hay voltaje a la salida.
- **Voltaje nulo entre las entradas.** Esto significa que si una de las terminales de entrada es conectada a una referencia a tierra, la otra debe estar al mismo potencial.
- **Voltaje de offset nulo.** Se considera que la señal a la entrada se puede traducir exactamente igual a la salida del amplificador si se tiene una ganancia de 1. En dispositivos comerciales es posible tener voltajes de offset de entre  $1 \times 10^{-6}$  y  $1 \times 10^{-3}$  volts.
- **Impedancia infinita de entrada.** Esto significa que las corrientes que circulan por las entradas del amplificador son cero. Aunque en una aplicación real las corrientes de entrada no se nulifican, estas sí son bastante pequeñas con respecto al resto de las corrientes del circuito; para el caso de amplificadores construidos con transistores de efecto de campo, las corrientes en las entradas son del orden de  $1 \times 10^{-12}$  amperes, y en amplificadores constituidos por transistores bipolares son del orden de  $1 \times 10^{-6}$  amperes.
- **Impedancia nula a la salida.** Esto se traduce en el hecho de que al amplificador operacional se puede conectar cualquier carga sin que existan caídas de voltaje; de hecho, la impedancia de salida de la mayor parte de los amplificadores comerciales es de menos de 1 ohm.

<sup>1</sup> Algunos amplificadores especiales que se usan en radiofrecuencia cuentan con dos salidas.

<sup>2</sup> Existen amplificadores operacionales que pueden operar solo con una de las fuentes.



**Figura 2.14** Símbolo del amplificador operacional.

El símbolo que se utilizará para denotar a un amplificador operacional en el resto del texto es el que se muestra en la figura 2.15.

Dado que el amplificador operacional se usa como un bloque o elemento más de los circuitos de acondicionamiento, es importante tener en cuenta las características ideales que se consideran durante el análisis de circuitos que contienen amplificadores operacionales:

- Respuesta lineal en frecuencia.** Implica que la ganancia del amplificador no varía, si la frecuencia de la señal de entrada varía; además, se asume que no hay retardos en la respuesta. Si los amplificadores operacionales se usan a bajas frecuencias esto resulta cierto.

Otro punto importante a tener en cuenta, además de las características mencionadas antes, es el comportamiento del amplificador operacional en la transferencia de voltaje; la transferencia de voltaje es la relación entre el voltaje de salida y los voltajes de entrada (véase figura 2.16). Para el amplificador operacional, el voltaje de salida depende de la diferencia entre los voltajes de entrada.

De la figura 2.16 se puede ver que el amplificador operacional tiene tres regiones de operación. Cuando el valor absoluto de la diferencia entre los voltajes de entrada es pequeño, el amplificador operacional se comporta de forma lineal. Pero cuando el voltaje en la terminal inversora es mucho mayor que el voltaje en la terminal no inversora, se dice que el amplificador operacional se satura (véase figura 2.16); esto implica que la amplitud de la señal de salida alcanza un valor máximo, igual al valor de la fuente de voltaje negativa que alimenta al amplificador operacional. De manera análoga, cuando el voltaje en la terminal no inversora es mucho mayor al de la terminal inversora, el amplificador operacional se satura, pero en este caso con respecto a la fuente de voltaje positiva que alimenta al amplificador operacional.

Los amplificadores operacionales se emplean en circuitos acondicionadores de señal para sensores y actuadores, con fines diversos, como amplificación, atenuación, filtrado, linealización o comparación de señales. Para lograr dichas funciones, los amplificadores operacionales se conectan empleando diversas configuraciones, ya sean de lazo abierto, como se ve en la figura 2.17, o con realimentación (de lazo cerrado), como se muestra en la figura 2.18.

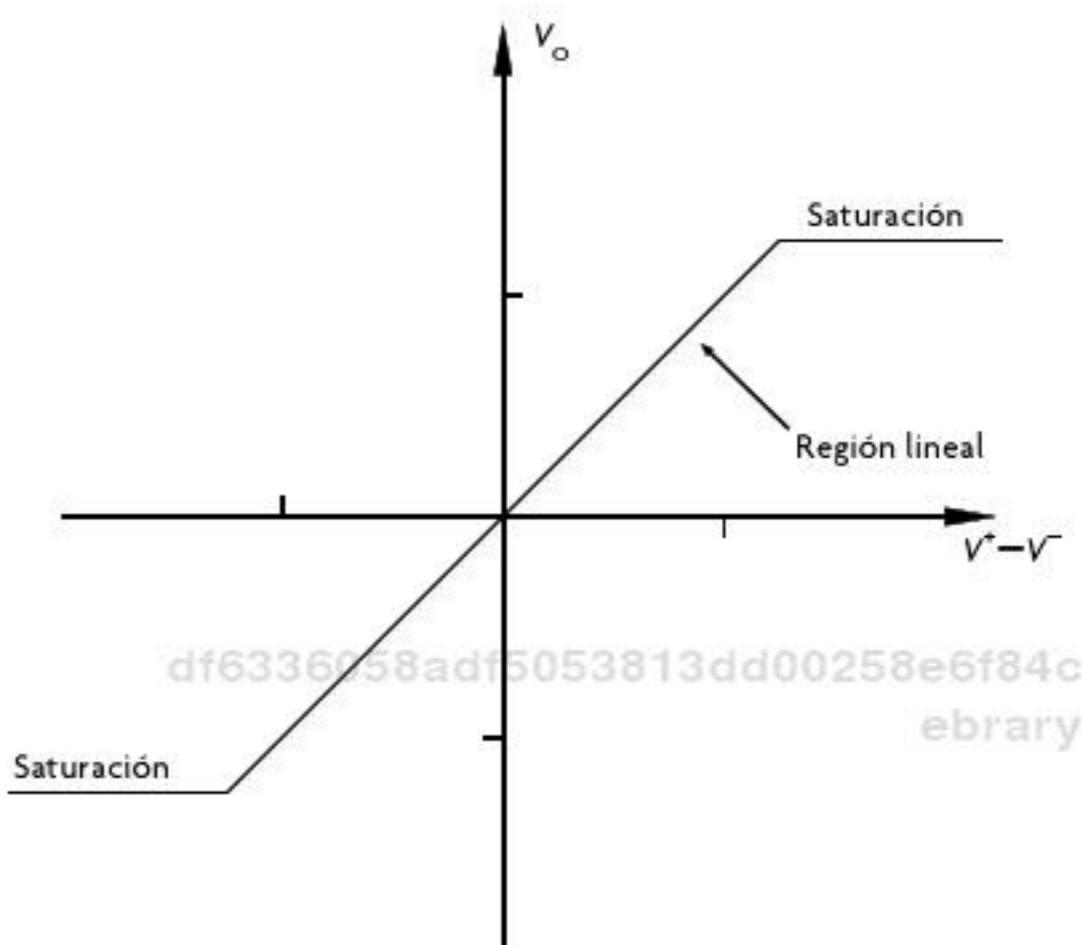


Figura 2.16 Transferencia de voltaje de un amplificador operacional.

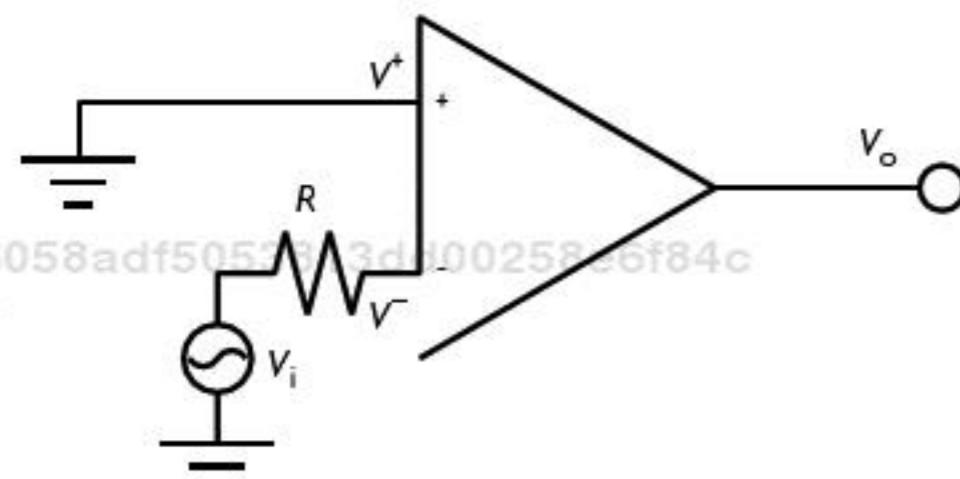


Figura 2.17 Amplificador operacional en lazo abierto.

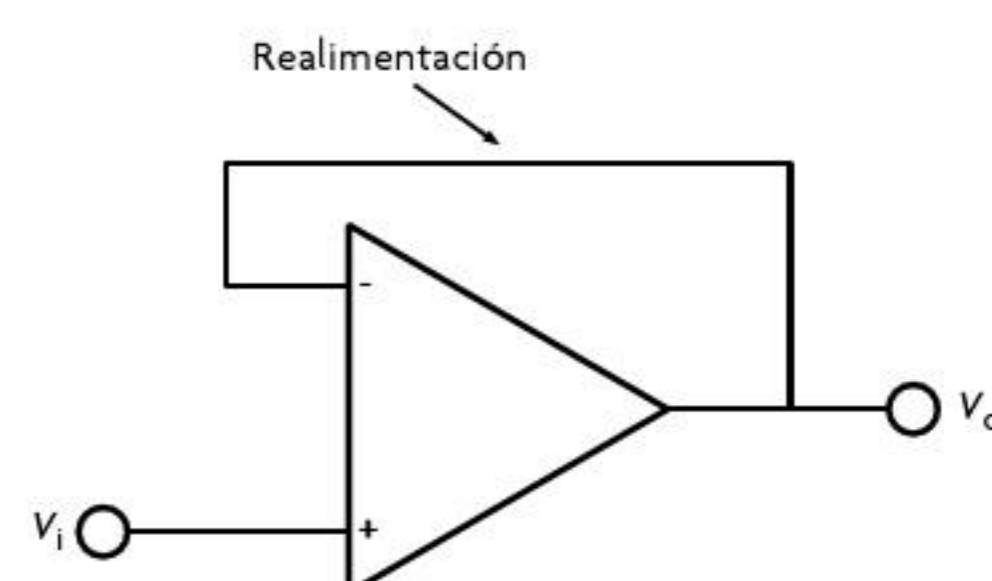


Figura 2.18 Amplificador operacional con realimentación.

En general, se dice que un circuito con realimentación es aquel en el que existe una conexión entre una salida y una entrada del mismo circuito; la conexión con realimentación básica de un amplificador operacional se muestra en la figura 2.18; en esta se tiene una señal de entrada por la terminal no inversora y una conexión entre la salida y la terminal inversora, la cual constituye la realimentación, con lo que se obtiene una configuración de lazo cerrado. En el lazo de realimentación pueden existir componentes extras que den a este un comportamiento resistivo, reactivo, lineal o no lineal.

La posibilidad de conectar componentes extras en el lazo de realimentación hace que las configuraciones en lazo cerrado del amplificador operacional sean mayores en número y más variadas en comportamiento que las configuraciones en lazo abierto, por lo cual el uso del amplificador operacional es más común en configuraciones de lazo cerrado. Además de la mayor cantidad de configuraciones, otra ventaja de la realimentación es que la ganancia del circuito de amplificación puede ser controlada, lo que permite trabajar con diferencias mayores de voltaje entre la terminal inversora y la

no inversora, antes de saturar el amplificador. Una ventaja más del uso de un lazo de realimentación es un comportamiento más lineal a la salida del amplificador, aumentando la impedancia de entrada y disminuyendo la de salida. Otra característica interesante de un lazo de realimentación es que hace al circuito poco sensitivo a variaciones en la ganancia propia del amplificador operacional; es decir, supongamos que debido a una variación en la temperatura cambia la ganancia del amplificador operacional, pero si se tiene un circuito con realimentación, la ganancia del circuito no cambiará a menos que los componentes conectados en el lazo de realimentación presenten variación en su comportamiento o características.

En las siguientes secciones se tratan las configuraciones más comunes de lazo cerrado del amplificador operacional, donde se explica su funcionamiento y se exemplifica su uso, relacionándolos con los sensores y actuadores que se presentan en capítulos posteriores.

## Seguidores

En la figura 2.18 se observa la configuración básica del amplificador operacional con realimentación, la cual también se conoce como **amplificador de ganancia unitaria** o **seguidor**; esto se debe a que si un amplificador operacional se conecta de esta forma, el voltaje de salida resulta igual al voltaje de entrada, de ahí el nombre de seguidor. De manera inicial, sería fácil poner en entredicho la funcionalidad práctica de un circuito amplificador que *no amplifica la señal de entrada!* Sin embargo, los seguidores de voltaje son muy utilizados ya que, aunque no amplifican la señal, la elevada impedancia de entrada del amplificador operacional anula los efectos de carga,<sup>3</sup> además de aislar la señal de salida respecto a la de entrada, lo que convierte a los circuitos seguidores en un elemento útil para una primera etapa de acondicionamiento.

Para modelar el comportamiento del circuito seguidor y de los circuitos que se presentan más adelante, es necesario desarrollar una ecuación que relacione el voltaje de entrada con el de salida; para la obtención de estos modelos matemáticos recurrimos a las características ideales de un amplificador operacional y a las técnicas básicas de análisis de circuitos, como las leyes de Kirchhoff.

Considérese el circuito de la figura 2.19, donde un voltaje  $V_i$  es aplicado por la terminal no inversora del amplificador operacional; en este caso, de acuerdo con las características ideales del amplificador operacional, debe existir un  $V_i$  de igual magnitud en la terminal inversora. Dado que la impedancia de entrada del amplificador operacional se considera infinita, no circula corriente a través de ninguna de las dos terminales de entrada; asimismo, dado que en la conexión de realimentación entre la terminal inversora y la salida del amplificador no existe ningún elemento pasivo, se considera que ambas terminales son un mismo nodo; por consiguiente, el voltaje  $V_o$  es igual al voltaje en la terminal inversora, que a su vez es igual al voltaje  $V_i$  aplicado en la entrada no inversora, con lo que obtenemos la relación entre la entrada y la salida como:

$$V_i = V_o \quad (2.12)$$

Reacomodando términos tenemos:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 \quad (2.13)$$

<sup>3</sup> Los efectos de carga son variaciones en el voltaje de un circuito; cuando la carga conectada a este cambia, por lo regular estos efectos se pueden observar como caídas de voltaje. df6336058adf5053813dd00258e6f84c ebrary

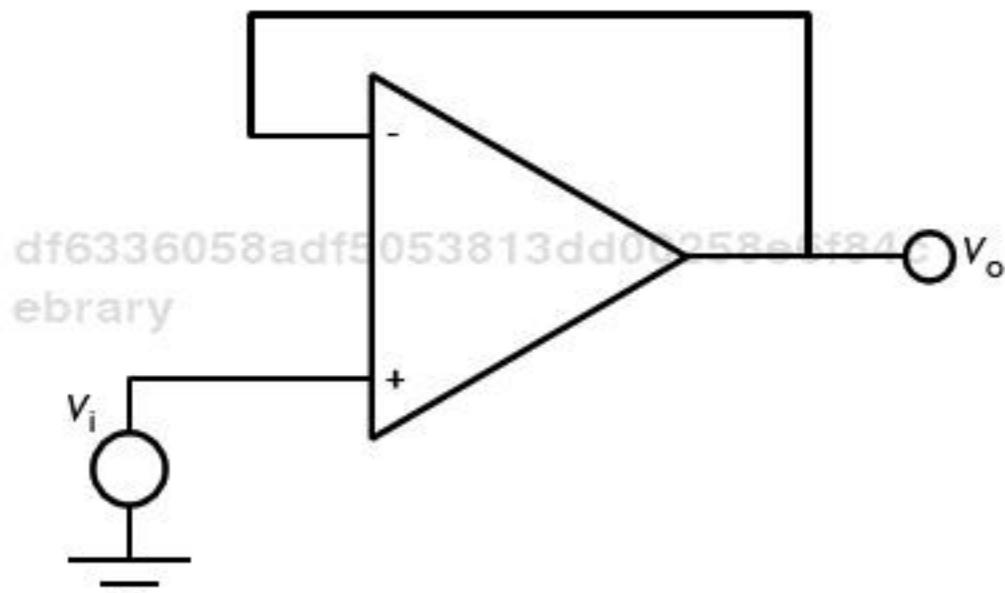


Figura 2.19 Seguidor de voltaje no inversor.

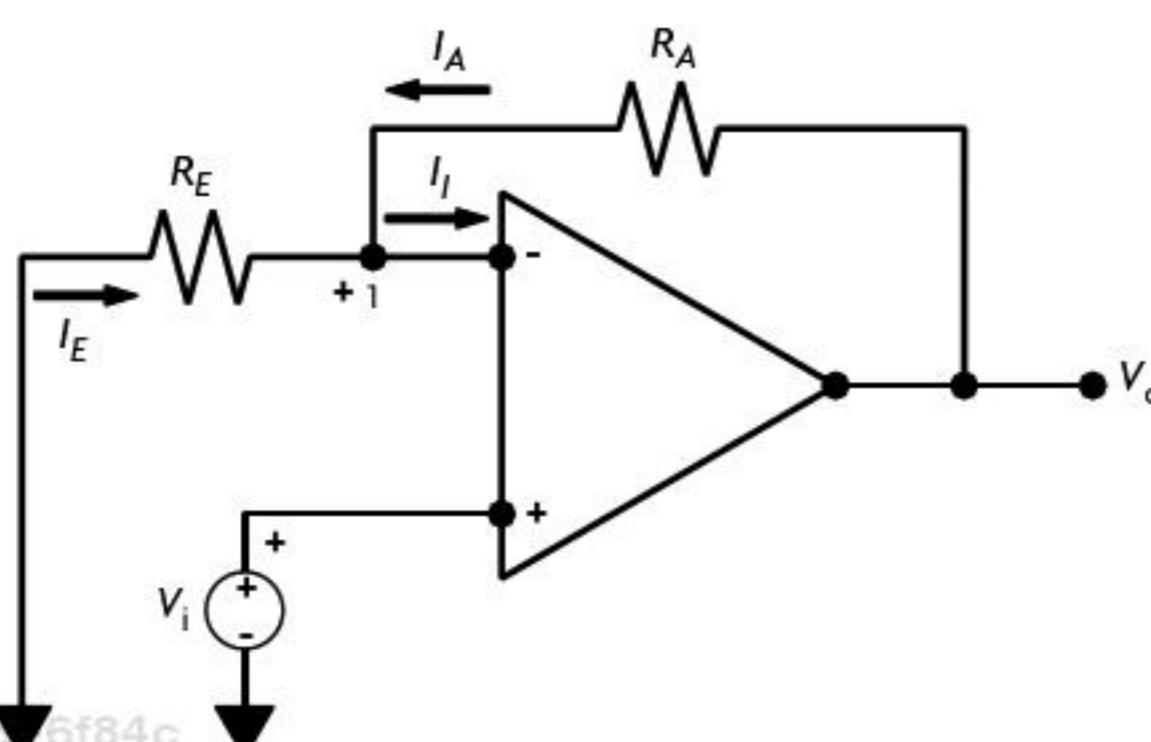
La ecuación 2.12 es la expresión que buscamos, aquella que relaciona el voltaje de salida y el de entrada; en este caso, como se puede observar, esa relación es igual a 1, de donde se da el nombre de amplificador de ganancia unitaria.

En el caso de que la fuente de voltaje se conectara en la terminal inversora, el resultado sería la inversión del voltaje, aunque la ganancia unitaria se mantendría.

### Inversores y no-inversores

Una vez analizada la configuración más sencilla de conexión de un amplificador operacional con re-alimentación, ya podemos analizar los circuitos que incluyan otros componentes en el lazo de realimentación. De este modo, empezamos con el circuito amplificador no inversor (véase figura 2.20). En el caso de este circuito, una fuente de voltaje se conecta a la terminal no inversora, por lo que esta terminal tendrá un voltaje  $V_i$ ; ahora bien, considerando un amplificador operacional ideal, también se tendrá un voltaje  $V_i$  en la terminal inversora, teniendo así un voltaje  $V_i$  en el nodo 1. Si consideramos únicamente el lazo formado por  $V_o$ ,  $R_A$ , nodo 1,  $R_E$  y la referencia a tierra, es posible encontrar un circuito que ya se ha analizado, un divisor de voltaje, del cual se sabe que:

$$V_i = V_o \frac{R_E}{R_E + R_A} \quad (2.14)$$



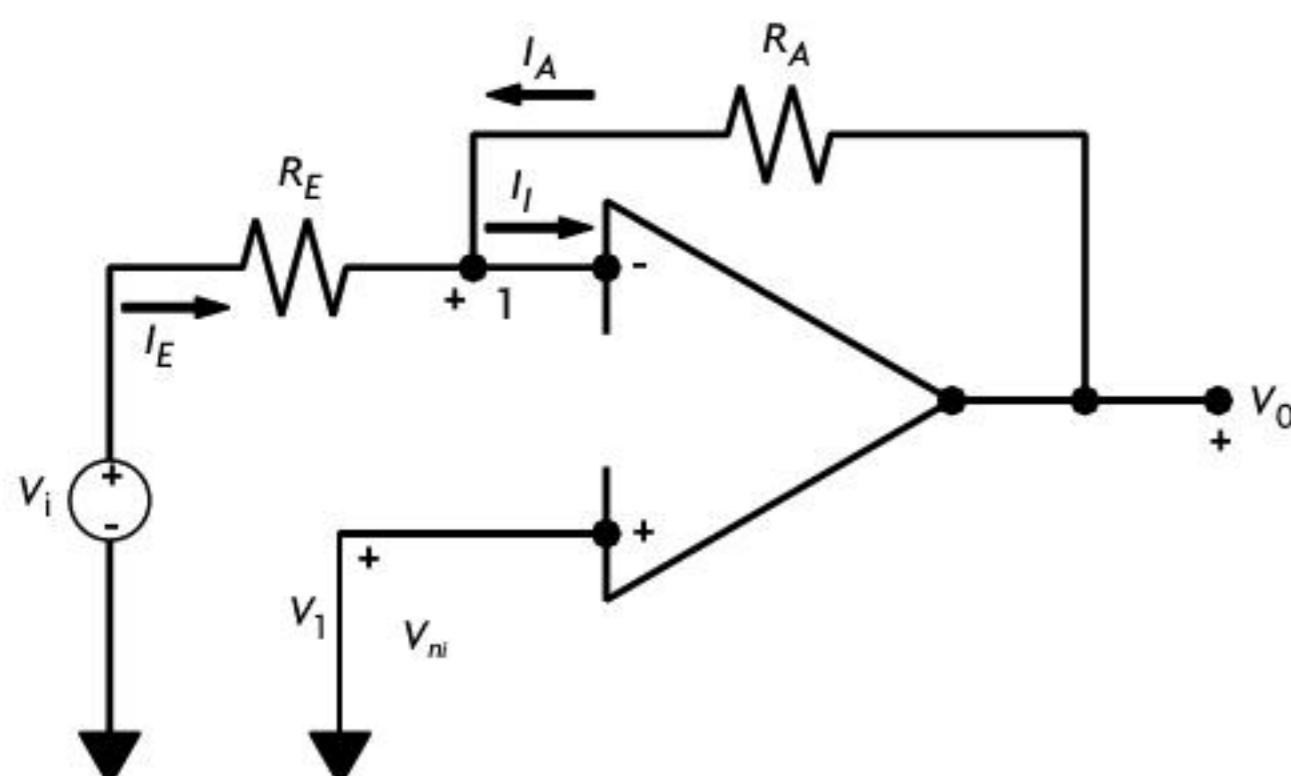
**Figura 2.20** Circuito amplificador no inversor.

Al reescribir la ecuación para encontrar la relación entre el voltaje de salida y el de entrada se obtiene:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_E + R_A}{R_E} = 1 + \frac{R_A}{R_E} \quad (2.15)$$

La ecuación 2.15 da la ganancia del circuito amplificador no inversor, la cual puede ser manipulada al variar los valores de las resistencias  $R_A$  y  $R_E$ , y se dice que es la ganancia, ya que si se despeja  $V_o$  de la ecuación 2.15 se encuentra que dicho voltaje no es más que el voltaje de la fuente de alimentación multiplicado por  $1 + \frac{R_A}{R_E}$ .

En la figura 2.21 se muestra un amplificador inversor, el cual es similar al amplificador no inversor, excepto por la terminal a la que se conecta la fuente de voltaje; el amplificador inversor se conecta en la terminal inversora, dejando la terminal no inversora conectada a la referencia a tierra. Para obtener



**Figura 2.21** Circuito amplificador inversor.

la ganancia del amplificador inversor se realiza un análisis del circuito valiéndonos de la ley de nodos de Kirchhoff aplicada al nodo 1 de la figura 2.21, con lo que se obtiene:

$$I_I = I_E + I_A \quad (2.16)$$

Recuérdese que si consideramos nuestro amplificador operacional como uno ideal, las corrientes de entrada en las terminales inversora y no inversora son nulas; por tanto, si se utiliza esta suposición, la ecuación 2.16 resulta:

$$I_E + I_A = 0 \quad (2.17)$$

donde  $I_E$  e  $I_A$  son:

$$I_E = \frac{V_i - V_1}{R_E} \quad (2.18)$$

$$I_A = \frac{V_o - V_1}{R_A} \quad (2.19)$$

Las corrientes  $I_E$  e  $I_A$  dependen solo de los voltajes  $V_i$  y  $V_o$ , respectivamente, dado que al estar la terminal no inversora conectada a la referencia a tierra, el voltaje en la terminal inversora se asume también como 0 debido al modelo de amplificador ideal; por tanto,  $V_1$  se considera 0 para el análisis del circuito, obteniendo:

$$I_E = \frac{V_i}{R_E} \quad (2.20)$$

$$I_A = \frac{V_o}{R_A} \quad (2.21)$$

Si sustituimos las ecuaciones 2.20 y 2.21 en la ecuación 2.17, entonces obtenemos:

$$\frac{V_i}{R_E} + \frac{V_o}{R_A} = 0 \quad (2.22)$$

Despejando  $\frac{V_o}{V_i}$  queda:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_A}{R_E} \quad (2.23)$$

La ecuación 2.23 define la ganancia del amplificador inversor, el cual, como se puede ver en dicha ecuación, cambia el signo del voltaje de entrada.

## Configuraciones en lazo abierto

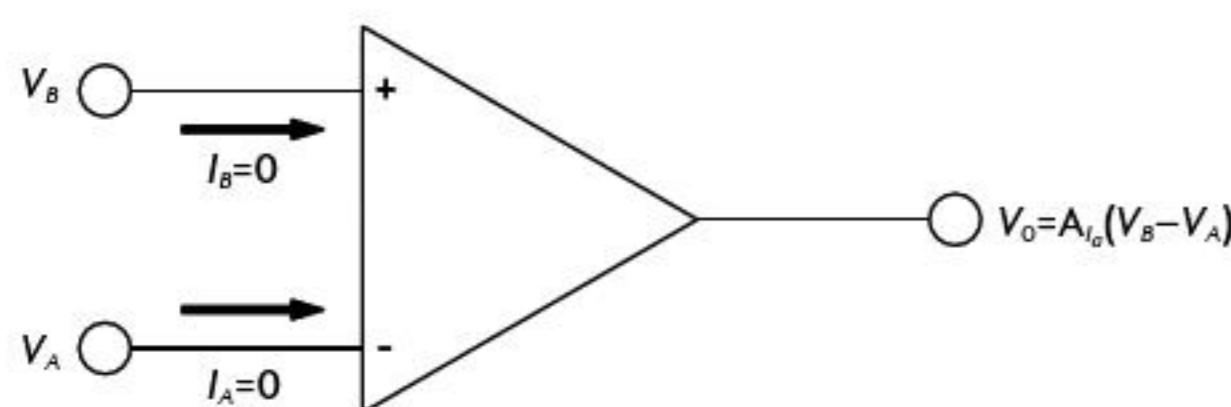
Como ya se dijo, el amplificador operacional también puede conectarse en configuraciones de lazo abierto, las cuales se utilizan sobre todo como comparadores de voltajes.

Es posible distinguir tres configuraciones en lazo abierto: el amplificador inversor, el amplificador no inversor y el amplificador diferencial. El funcionamiento de las tres configuraciones es similar, y para describirlo consideraremos al amplificador diferencial de lazo abierto de la figura 2.22.

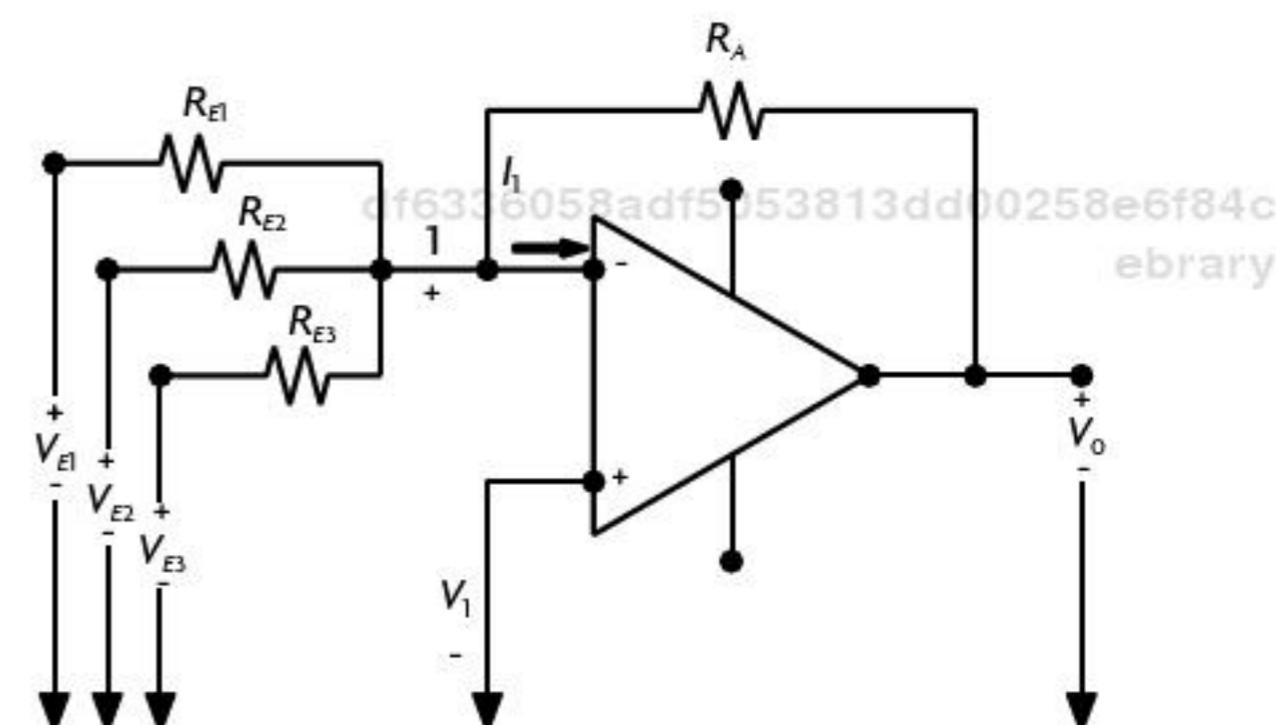
Para ello, se aplican dos voltajes distintos  $V_A$  y  $V_B$  en las terminales de entrada; cuando estos sean iguales, el voltaje de salida será 0 volts, y cuando exista una diferencia cualquiera entre los voltajes de las terminales de entrada, el amplificador se saturará (debido a que la ganancia del circuito es la ganancia propia del amplificador operacional, la cual de manera ideal es infinita).

Los amplificadores inversor y no inversor de lazo abierto se comportan de la misma forma que el amplificador diferencial, la diferencia radica en que en el amplificador inversor se aplica un voltaje en la terminal inversora y la no inversora se conecta a tierra; de manera análoga, en el amplificador no inversor el voltaje se aplica a la terminal no inversora y la inversora se conecta a la referencia a tierra. De tal forma que un amplificador diferencial compara dos voltajes, permitiéndonos saber cuándo se modifica uno u otro, mientras que los amplificadores inversor y no inversor nos permiten saber cuándo un voltaje cambia su valor respecto a 0.

En la figura 2.22 se muestra la ecuación de salida del amplificador diferencial en lazo abierto, donde  $A_{la}$  es la ganancia del amplificador y  $V_0$  el voltaje de salida.



**Figura 2.22** Amplificador diferencial de lazo abierto.



**Figura 2.23** Circuito amplificador sumador.

## Sumadores

Considérese el circuito de la figura 2.23, como se puede ver es un circuito amplificador inversor con múltiples entradas conectadas a un mismo nodo; si aplicamos una vez más la ley de nodos de Kirchhoff, obtenemos:

$$\frac{V_1 - V_{E1}}{R_{E1}} + \frac{V_1 - V_{E2}}{R_{E2}} + \frac{V_1 - V_{E3}}{R_{E3}} + \frac{V_1 - V_0}{R_A} + I_I = 0 \quad (2.24)$$

Si las tres resistencias de entrada se asumen de igual magnitud ( $R_E$ ), la ecuación 2.24 se simplifica y obtenemos:

$$V_0 = \frac{R_A}{R_E} (V_{E1} + V_{E2} + V_{E3}) \quad (2.25)$$

De la ecuación 2.25 se observa el porqué este amplificador recibe el nombre de amplificador sumador. Es importante considerar el hecho de que si las resistencias de entrada no son exactamente iguales, los voltajes de entrada tendrán diferentes factores de escala; la precisión en el valor de las resistencias de entrada es, pues, muy relevante si se requiere una suma en la que todas las señales de entrada tengan el mismo peso sobre el resultado final.

## Diferenciales

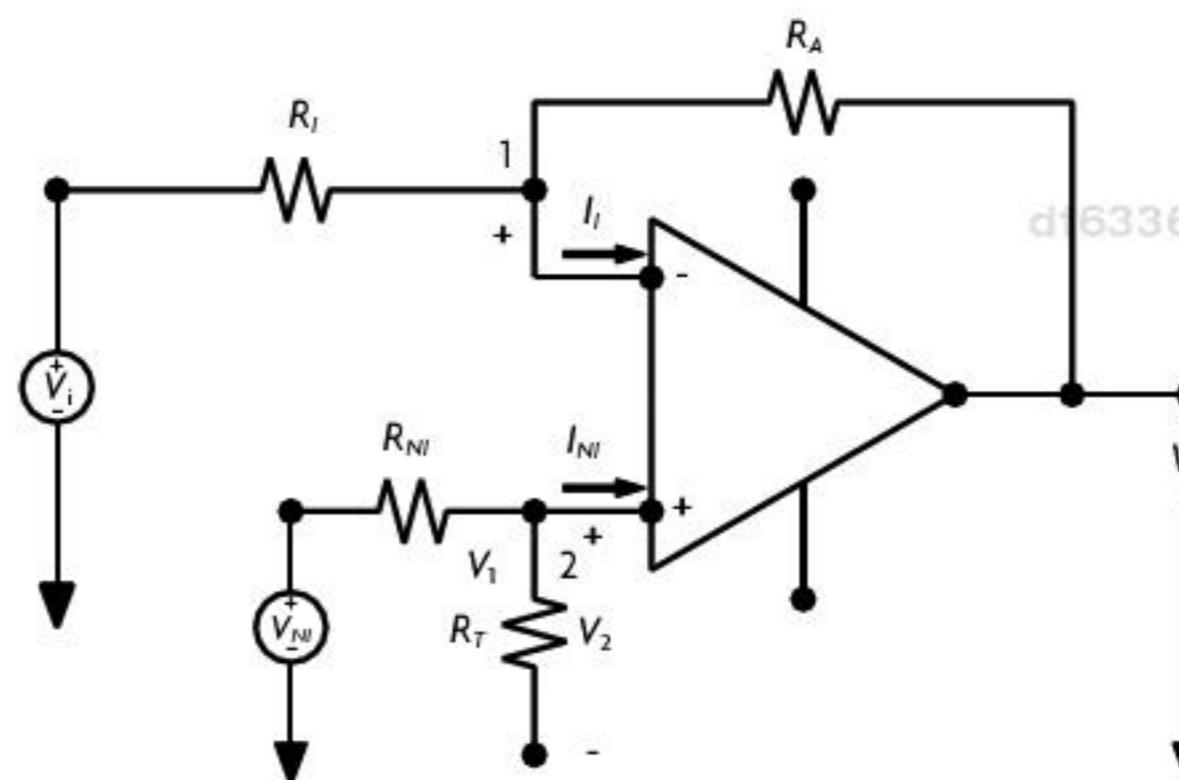
Ahora se analiza el comportamiento del circuito de la figura 2.24, que es un circuito amplificador diferencial. Al igual que el amplificador diferencial en lazo abierto, a la salida de este circuito se obtiene la diferencia entre los voltajes aplicados tanto a la terminal inversora como a la no inversora, con la única diferencia de que ahora es posible controlar la ganancia del amplificador para evitar la saturación.

Para obtener la ecuación que define la salida del circuito diferencial con realimentación, primero obtenemos la ecuación para el nodo 1:

$$\frac{V_1 - V_i}{R_i} + \frac{V_1 - V_o}{R_A} + I_i = 0 \quad (2.26)$$

Ahora, calculamos el voltaje en el nodo 2, el cual está dado por:

$$V_2 = \frac{R_T}{R_{NI} + R_T} V_{NI} \quad (2.27)$$



**Figura 2.24** Circuito amplificador diferencial.

Asumiendo un amplificador ideal, sabemos que  $I_i = I_{NI}$  y que  $V_1 = V_2$ , de tal forma que podemos sustituir la ecuación 2.27 en la ecuación 2.26 para obtener el voltaje a la salida:

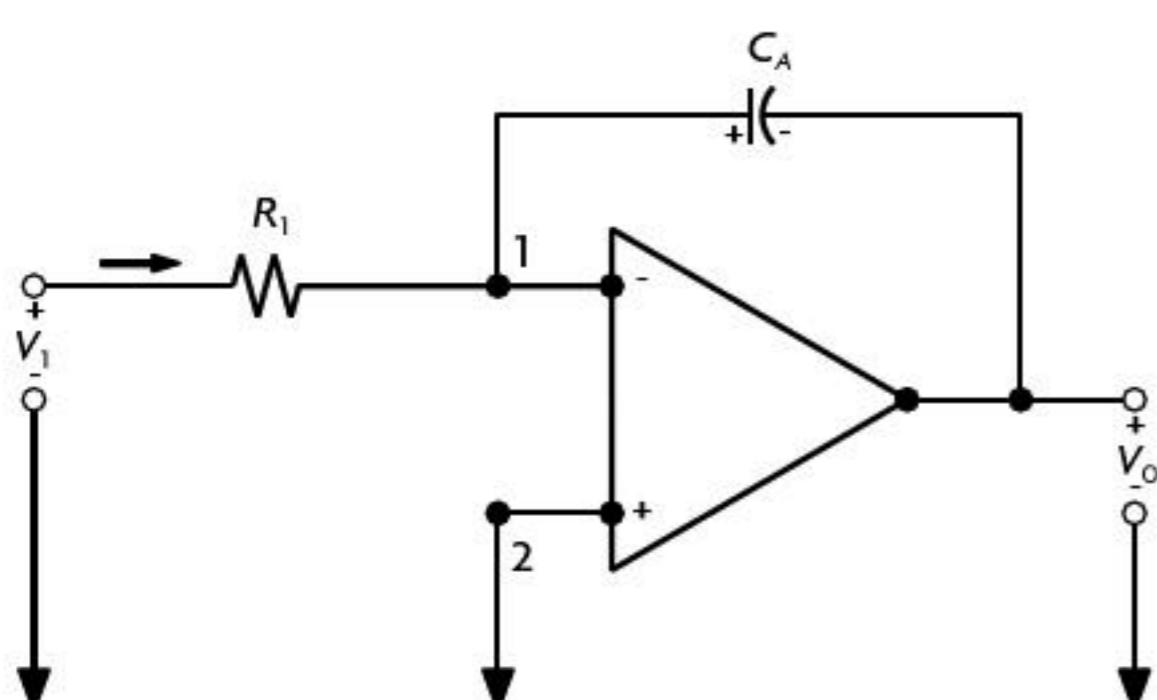
$$V_o = \frac{R_T(R_i + R_A)}{R_i(R_{NI} + R_T)} V_{NI} - \frac{R_A}{R_i} V_i \quad (2.28)$$

En el caso de que  $R_i = R_{NI}$  y  $R_A = R_T$ , entonces se puede utilizar la ecuación simplificada:

$$V_o = \frac{R_A}{R_i} (V_{NI} - V_i) \quad (2.29)$$

## Integrales

Hasta el momento hemos analizado circuitos amplificadores que solo incluyen resistencias, ahora vamos a ver qué comportamiento tienen los circuitos que incluyen capacitores, ya sea a la entrada o en el lazo de realimentación. Empezamos por el circuito de la figura 2.25, el cual tiene un capacitor conectado en el lazo de realimentación; dado el circuito (y la consideración de un amplificador operacional ideal), sabemos que el voltaje en los nodos 1 y 2 es cero, y dado que no fluye corriente alguna a través de la entrada inversora, la corriente  $I_i$ , que circula por  $R_i$ , es la misma que circula por  $C_A$ , con lo que podemos calcular  $V_o$ , como se muestra a continuación:



**Figura 2.25** Circuito amplificador integrador.

$$I_I = \frac{V_I}{R_I} \quad (2.30)$$

$$V_0 = -V_{CA} \quad (2.31)$$

donde el voltaje en  $C_A$  es:

$$V_{CA} = \frac{1}{C_A} \int_0^t I_I(t) dt \quad (2.32)$$

Sustituyendo la ecuación 2.30 en la ecuación 2.32, y con el resultado de dicha sustitución en la ecuación 2.31, obtenemos el valor de  $V_0$  como:

$$V_0 = \frac{1}{R_I C_A} \int_0^t V_I(t) dt \quad (2.33)$$

Donde  $V_0$  es la integral del voltaje aplicado a la terminal inversora escalada por un factor en el cual intervienen los valores nominales de la resistencia y el capacitor. El circuito que se acaba de analizar es mejor conocido como amplificador integrador.

## Derivadores

Como se ha visto, la inclusión de un capacitor en un circuito amplificador nos permite hacer operaciones más complejas con las señales de entrada, gracias al comportamiento de la corriente y el voltaje en un capacitor. Ahora, si se intercambian posiciones entre el capacitor y la resistencia de la figura 2.25 se obtiene un circuito amplificador derivador (véase figura 2.26), el cual se puede analizar del mismo modo que el amplificador inversor. Primero, recuérdese que la corriente a través de un capacitor es:

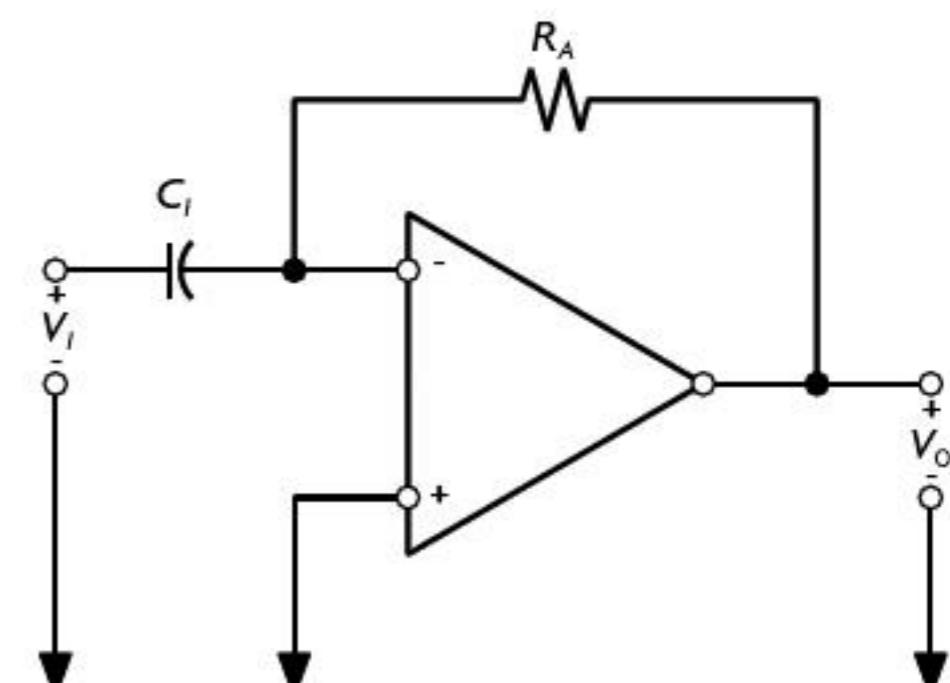
$$I_A = C_I \frac{dV_I(t)}{dt} \quad (2.34)$$

Así, el voltaje a la salida del amplificador derivador es:

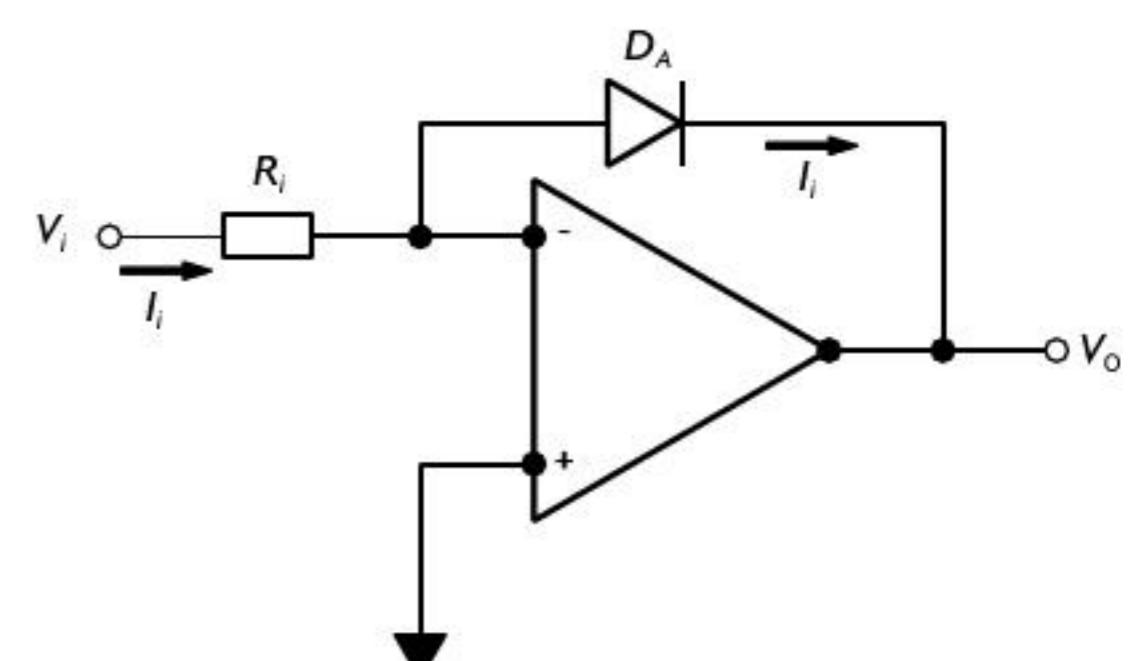
$$V_0 = R_A C_I \frac{dV_I(t)}{dt} \quad (2.35)$$

## Logarítmicos

Como su nombre lo indica, los **circuitos de amplificación logarítmicos** tienen un comportamiento no lineal que se basa en la curva V-I de una unión PN; es decir, se añade un diodo al circuito, ya sea a la entrada o en lazo de realimentación. Primero, se analiza el circuito con un diodo en el lazo de realimentación (véase figura 2.27), de la misma forma en que se analiza el circuito integrador, donde el voltaje del capacitor resultó ser equivalente al voltaje a la salida. De este modo es posible conocer el voltaje a la salida para el circuito de amplificación logarítmico si se conoce el voltaje de polarización del diodo.



**Figura 2.26** Circuito amplificador derivador.



**Figura 2.27** Circuito amplificador logarítmico.

De la ecuación Shockley (2.36) se conoce la corriente que circula a través del diodo con base en el voltaje de polarización:

$$I_{DA} = I_S \left( e^{V_{DA}/V_T} - 1 \right) \quad (2.36)$$

donde:

$I_{DA}$ : corriente en el diodo

$I_S$ : corriente de saturación en inversa

$V_{DA}$ : voltaje de polarización del diodo

$V_T$ : voltaje térmico

De este modo, el voltaje térmico es:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.37)$$

donde:

$k$ : constante de Boltzmann

$T$ : temperatura de operación en grados Kelvin

$q$ : carga del electrón

Como lo que nos interesa conocer es el voltaje de polarización del diodo, debemos despejar este de la ecuación de Shockley (considerando que  $e^{V_{DA}/V_T} \gg 1$ ); para eso, se pasa la corriente de saturación del lado izquierdo de la ecuación y se aplica un logaritmo natural, con lo que se obtiene:

$$\ln \frac{I_{DA}}{I_s} = \frac{V_{DA}}{V_T} \quad (2.38)$$

Una vez que se sabe que la corriente que circula a través del diodo es la misma que circula a través de la resistencia, si se despeja de la ecuación 2.38 se puede conocer el voltaje de polarización del diodo.

$$V_{DA} = V_T \ln \frac{V_1}{I_s R_I} \quad (2.39)$$

El voltaje de polarización del diodo también es el voltaje de salida del circuito.

### Antilogarítmicos

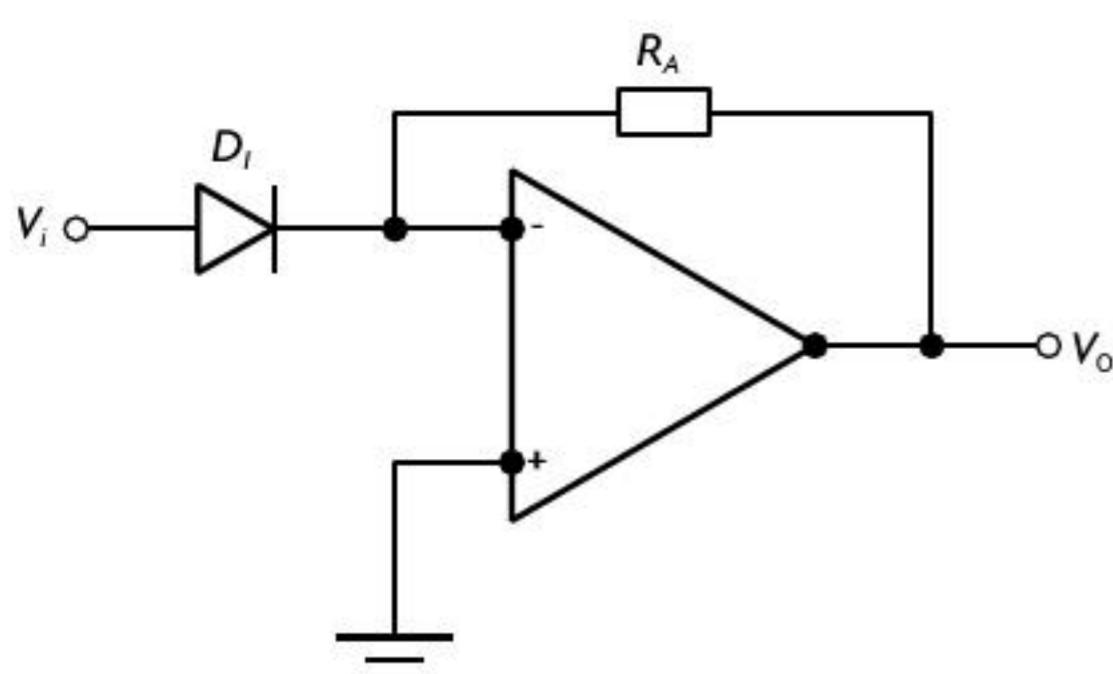
Para obtener un circuito amplificador antilogarítmico se deben intercambiar de posición la resistencia y el diodo del circuito amplificador logarítmico (véase figura 2.28), y para conocer su salida se puede llevar a cabo un análisis similar al realizado en el amplificador derivador.

Como se sabe, la corriente en el diodo está dada por la ecuación Shockley, además de que esta es la misma corriente que circulará por la resistencia; si se considera  $e^{V_{DA}/V_T} \gg 1$ , el voltaje a la salida será:

$$V_0 = -I_S (e^{V_{DA}/V_T}) R_A \quad (2.40)$$

Los amplificadores logarítmicos y antilogarítmicos permiten crear varias configuraciones de circuitos amplificadores más; así, basándose en las leyes de los logaritmos es posible construir circuitos multiplicadores, divisores, potenciadores o radicadores.

Figura 2.28 Circuito amplificador antilogarítmico.



## De instrumentación

Un amplificador operacional de instrumentación es un circuito diseñado para aplicaciones donde se requiere medir cambios pequeños de voltaje en presencia de ruido. Algunos casos típicos de aplicación de un amplificador de instrumentación pueden ser la medición del voltaje de salida de un circuito de puente o la obtención de señales mioeléctricas.<sup>4</sup>

Un amplificador de instrumentación se puede adquirir como un circuito integrado, como el AD620 (véase figura 2.29), o se puede construir con un arreglo de circuitos amplificadores no inversores y diferenciales.

A diferencia de un amplificador operacional, el comportamiento de un amplificador de instrumentación no puede ser reconfigurado al conectarle resistencias, capacitores o diodos. El único cambio posible sobre un amplificador de instrumentación es la variación de su ganancia, la cual se limita a un rango específico.

Un amplificador de instrumentación posee dos entradas diferenciales y una sola salida; sus impedancias de entrada son del orden de  $10^9 \Omega$  y su ganancia puede ser variada por una resistencia externa o una señal aplicada en un pin del circuito integrado entre valores que típicamente van de 1 a 1 000. El voltaje de salida de un amplificador de instrumentación está referenciado a un voltaje, denominado voltaje de referencia, el cual puede ser la referencia a tierra o cualquier otro voltaje dentro del rango operativo del amplificador.

Otra característica importante de un amplificador de instrumentación es el rechazo en modo común (CMR, por sus siglas en inglés), el cual debe ser alto para evitar que señales indeseadas afecten la medición. Por último, un amplificador de instrumentación tiene que ser capaz de amplificar señales del orden de  $\mu\text{V}$  (véase la figura 2.30).

## Aplicaciones de los circuitos amplificadores en los sistemas de medición

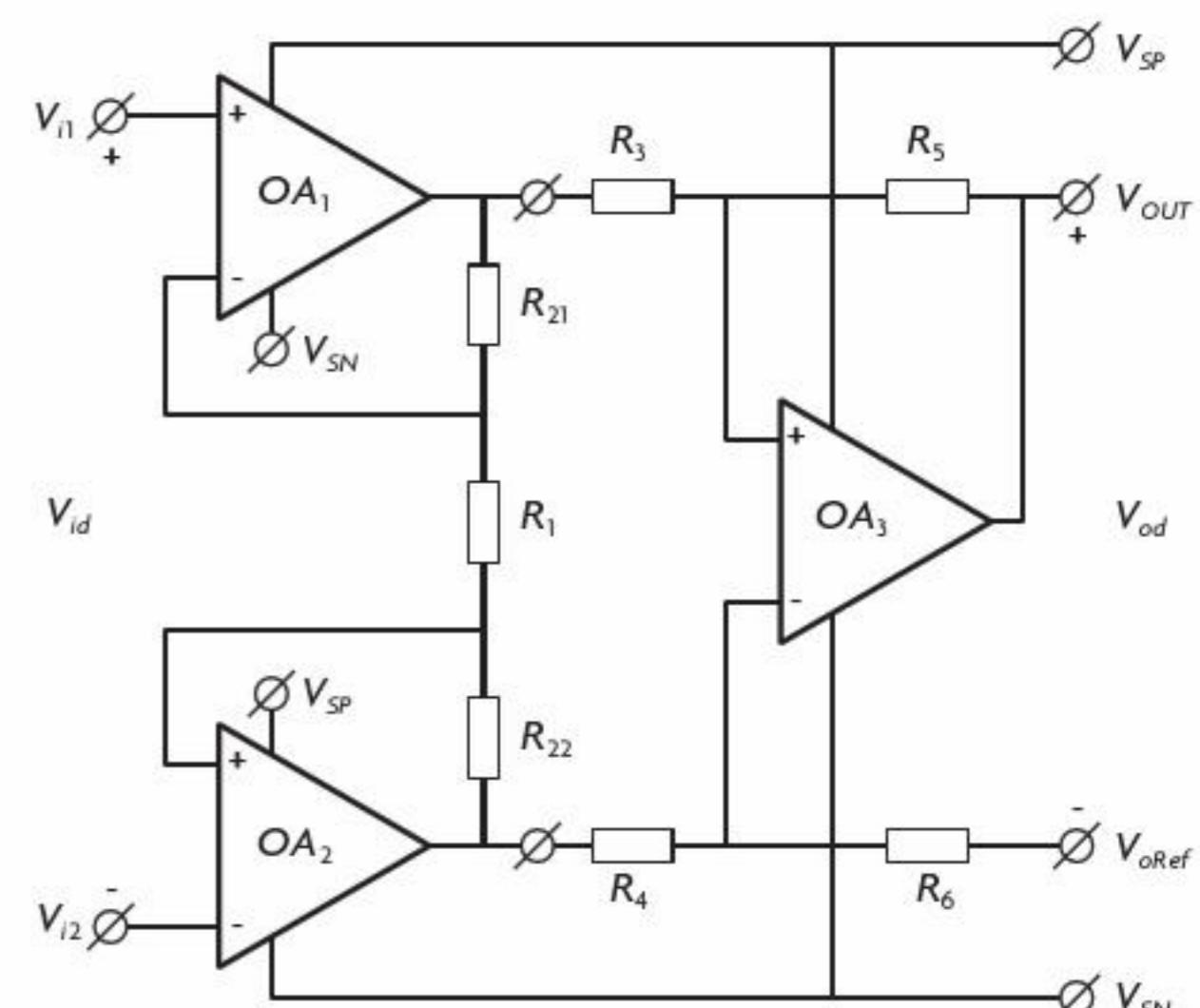
Las aplicaciones de los circuitos amplificadores son variadas; van desde la linealización de puentes resistivos (véase figura 2.31) o la comparación de señales para cerrar un lazo de control hasta ser bloques base para la construcción de otros circuitos de acondicionamiento, como convertidores o filtros.

Los circuitos de linealización de puentes resistivos son muy útiles y populares para la medición con galgas o celdas de carga, ya que además de dar una salida lineal y amplificada de la señal del sensor, la baja impedancia de salida del amplificador operacional evita efectos de carga al conectar el puente a un circuito de procesamiento.

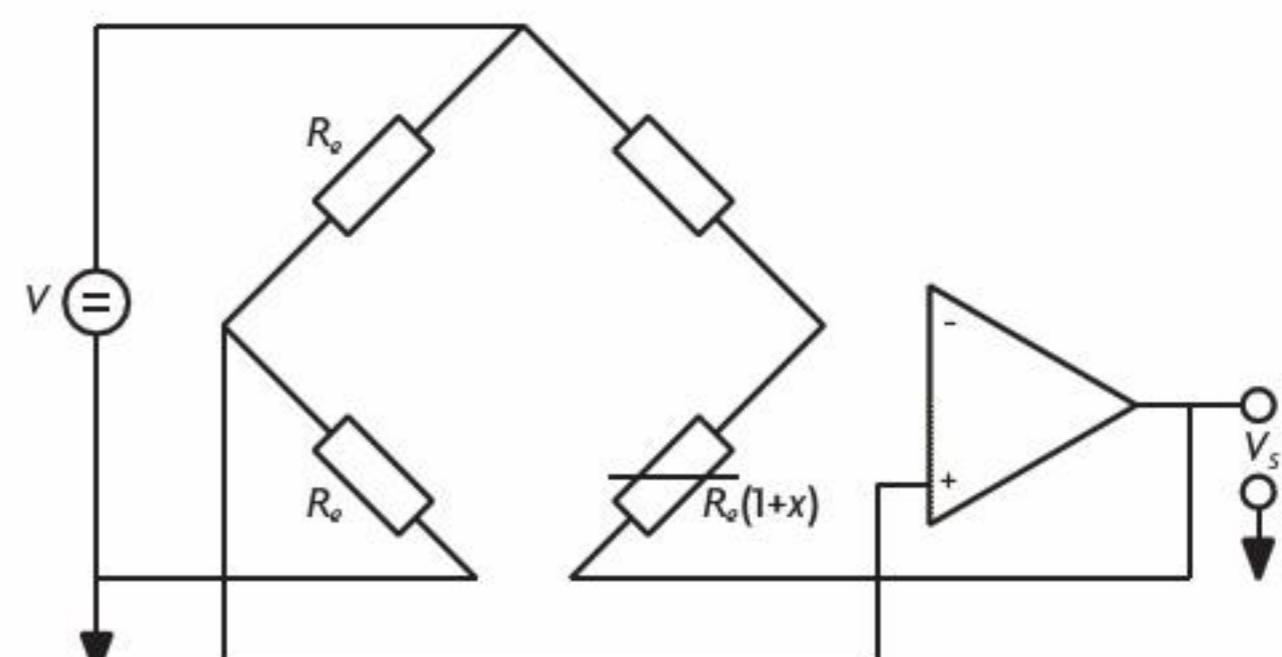
Otra área de aplicación es para la lectura de sensores de alta impedancia, como los fotodioides, piezoelectricos o detectores de humo, cuyas impedancias, por lo común, son del orden de los  $M\Omega$ . En la figura 2.32 se muestra un circuito



**Figura 2.29** Amplificador de instrumentación AD620.

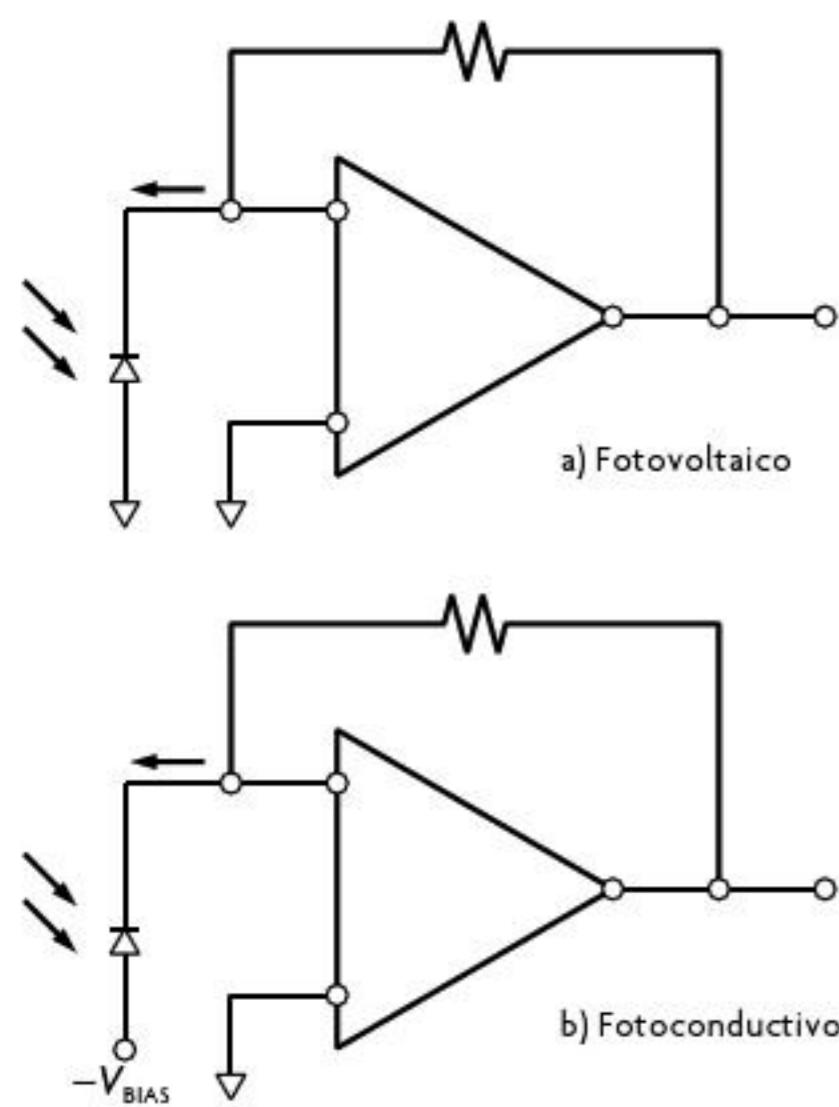


**Figura 2.30** Circuito amplificador de instrumentación.



**Figura 2.31** Circuito linealizador de un elemento variable.

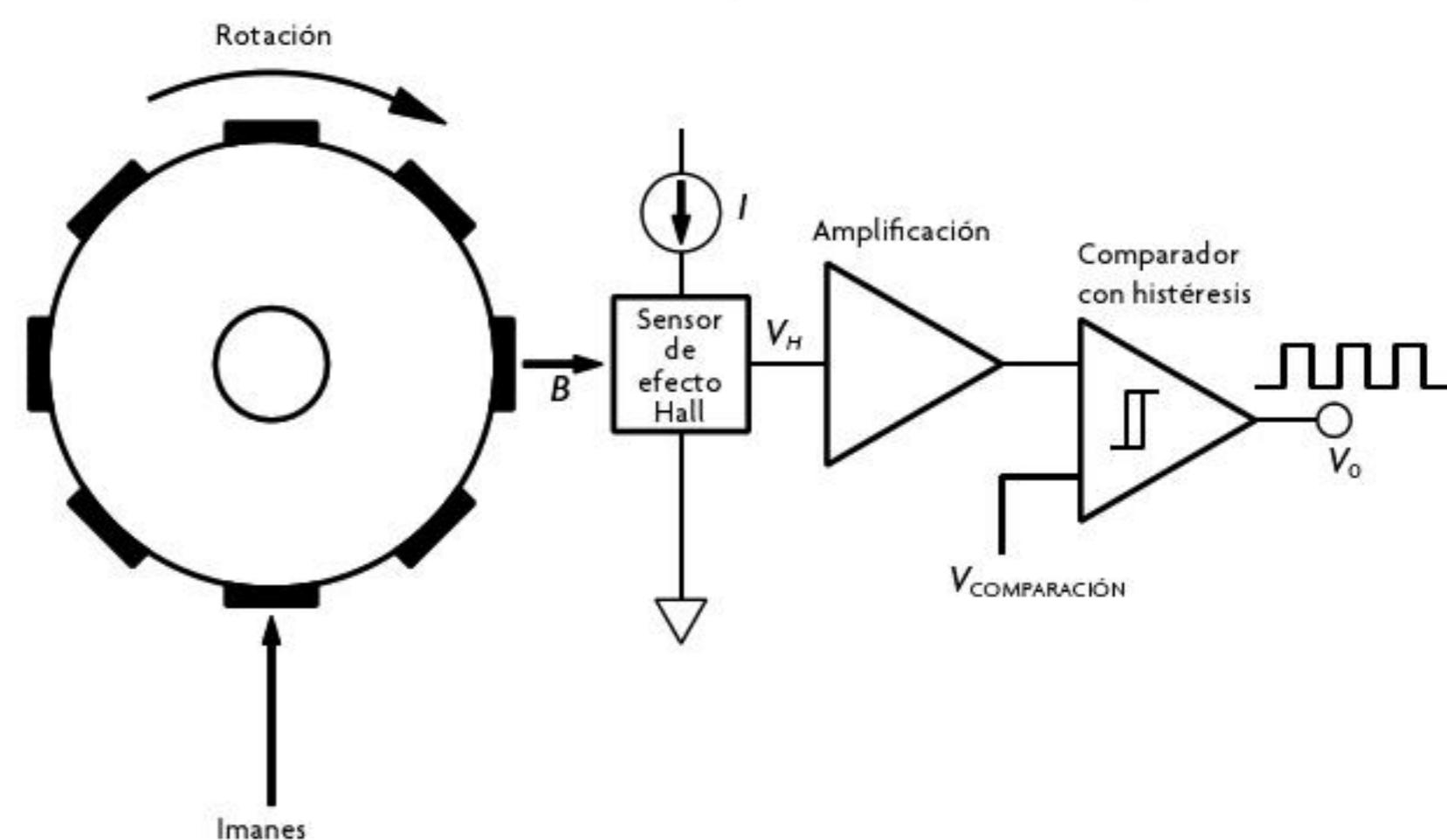
<sup>4</sup> Señales eléctricas producidas por los músculos esqueléticos.



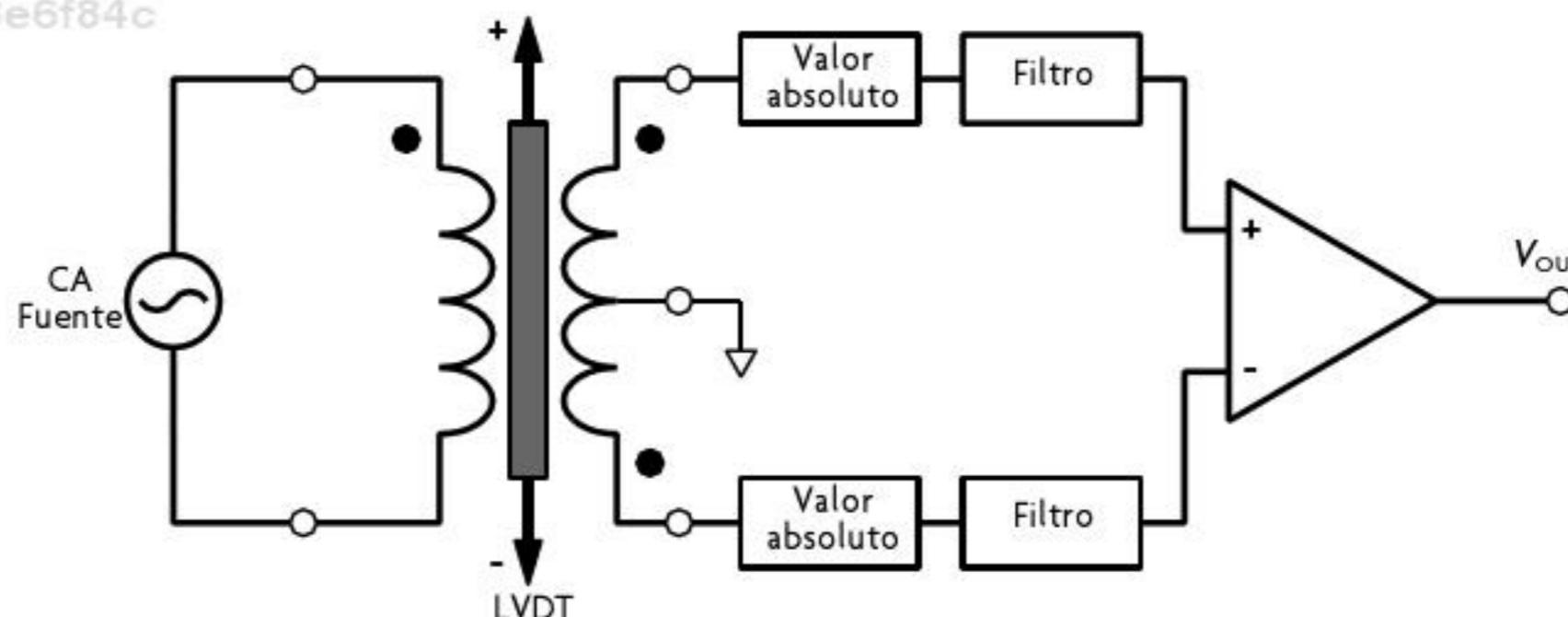
**Figura 2.32** Circuitos de amplificación de la señal de un fotodiodo.

que se puede usar para la lectura de la señal de un fotodiodo; además, en esta también se observan los dos tipos de operación de un fotodiodo: a) fotovoltaica, que favorece la linealidad de la salida, y b) fotoconductiva, que favorece la velocidad de comutación. Dado que, sin importar el modo de operación, lo que se registra en el fotodiodo es un cambio pequeño de corriente debido a la iluminación, el circuito usado en ambos casos es un circuito conocido como convertidor corriente-voltaje (véase la sección Convertidores corriente-voltaje y voltaje-corriente), el cual permite leer a la salida del amplificador un voltaje equivalente a la corriente de entrada, que además está escalado para facilitar su interpretación.

También es posible encontrar aplicaciones de los circuitos de amplificación en medición de posición, ya sea lineal (LVDT) o angular (encoder), como los que se muestran en las figuras 2.33 y 2.34; en ambos casos, lo que se trata de amplificar son los valores de salida, para que estos resulten legibles con facilidad.



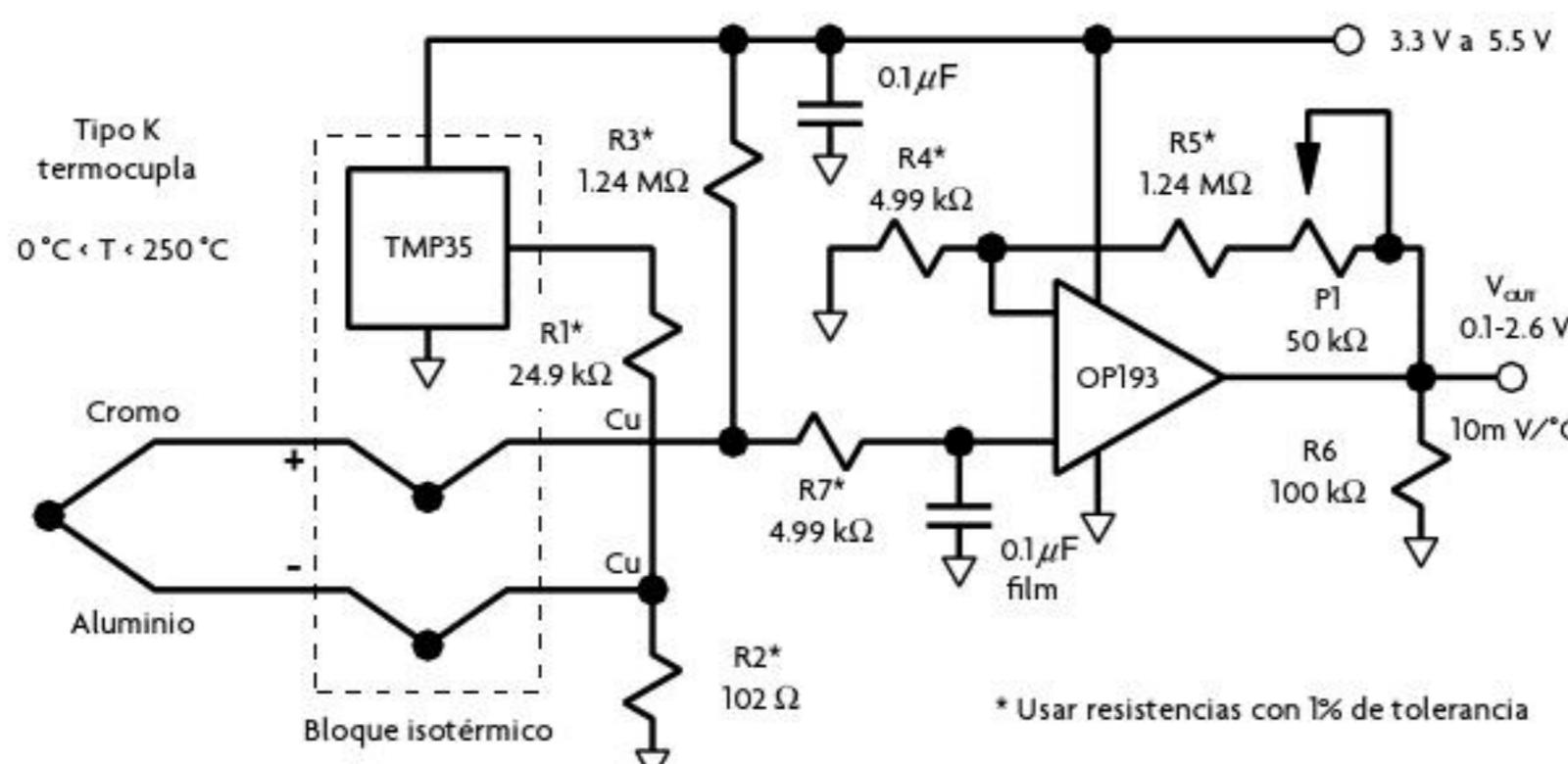
**Figura 2.33** Circuito de acondicionamiento para encoder magnético.



**Figura 2.34** Circuito de acondicionamiento para LVDT.

Otro ejemplo representativo de aplicación de circuitos de amplificación en sistemas de detección es en el uso de termocuplas, donde el empleo de un amplificador ayuda a hacer la compensación de la unión fría (véase figura 2.35).

En las secciones siguientes se revisan los circuitos de conversión y filtrado, en los cuales se vuelve a hacer latente la aplicación de los circuitos de amplificación que hasta el momento se han expuesto.



**Figura 2.35** Circuito de acondicionamiento para una termocupla.

## 2.5 Circuitos convertidores

Un circuito convertidor es aquel que nos permite tomar un tipo de señal de entrada y transformarlo de manera que se obtenga un tipo diferente de señal a la salida. Los convertidores son circuitos de uso frecuente en sistemas de medición, dado que muchas veces resulta necesario convertir la señal de salida de un sensor para que esta pueda ser interpretada por el sistema de procesamiento de la información. A continuación se analizan algunos de los circuitos convertidores más comunes.

## Convertidor analógico-digital (ADC)

Los convertidores analógicos-digitales (ADC, por sus siglas en inglés) son circuitos que se utilizan para acoplar señales analógicas con circuitos digitales, como microcontroladores. La señal analógica que será convertida puede ser un voltaje o una corriente, según sea necesario. Durante la conversión analógica-digital se pueden distinguir tres procesos principales:

1. La transición de tiempo continuo a tiempo discreto (muestreo de la señal).
  2. La cuantización de la amplitud de la señal.
  3. La correlación entre cantidades respecto a una referencia.

En los sistemas de sensado, los convertidores analógicos-digitales juegan un papel importante, ya que son el nexo entre las señales de salida de diversos sensores y los elementos digitales de procesamiento de la información. Cuando se requiere utilizar un ADC para el acondicionamiento de una señal, es importante considerar la velocidad de la señal a tratar y la precisión con que se desea convertir, además de las frecuencias a las que se desea trabajar; en otras palabras, se debe conocer la velocidad de muestreo, la resolución y el ancho de banda necesarios para el correcto tratamiento de la señal.

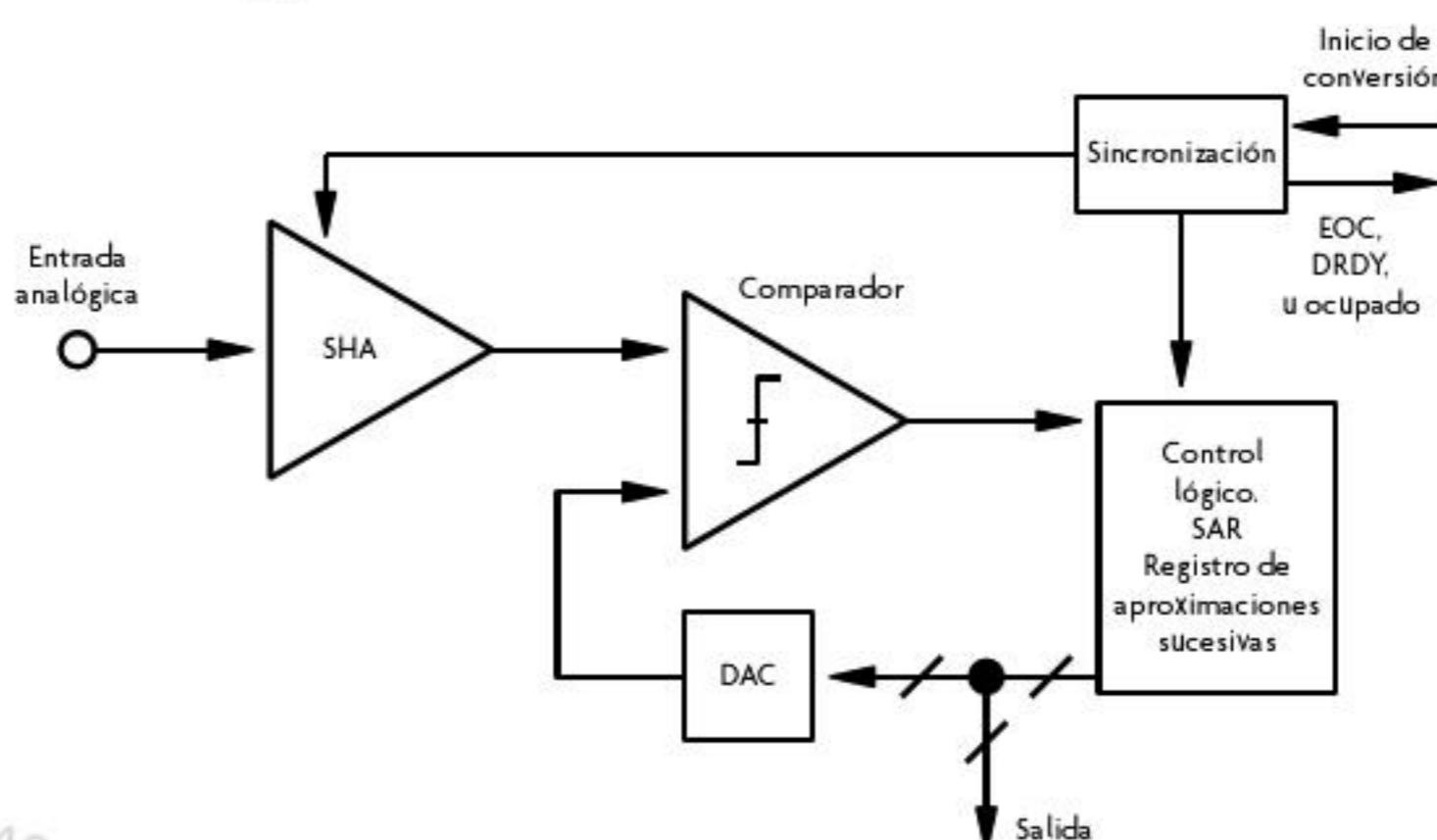
Dados los diferentes requerimientos de operación que pueden ser solicitados de un ADC, existen distintas arquitecturas de este. Para elegir una arquitectura determinada, los requerimientos principales son la velocidad de muestreo deseada, la cual, según el teorema fundamental del muestreo, debe ser el doble de la máxima frecuencia en la señal a convertir, y la resolución, la cual está determinada por el número de bits del convertidor. Algunas arquitecturas alcanzan altas velocidades de operación; valiéndose del paralelismo, dichas arquitecturas pueden convertir señales del orden de los cientos de MHz. Otras arquitecturas pueden ser usadas para altas resoluciones (16 bits o más), con frecuencias máximas de operación del orden de las decenas de KHz.

Enseguida se revisan las distintas arquitecturas del ADC. Un buen ejemplo para empezar a comprender el funcionamiento de las diferentes arquitecturas del ADC puede ser el circuito amplificador diferencial de lazo abierto (véase figura 2.22), también conocido como comparador, el cual puede ser considerado un convertidor analógico digital de 1 bit, ya que por las terminales de entrada del amplificador operacional pueden existir señales analógicas, que cuando son diferentes en magnitud

provocan la saturación del amplificador. Si una de las señales de entrada se hace una referencia, entonces el voltaje de salida tendrá solo dos valores posibles: cuando la entrada es mayor y cuando es menor a la referencia; es decir, la señal de entrada se convierte en un dato digital. Aunque un convertidor de un bit no resulte de mucha utilidad, los comparadores son utilizados como elementos base en todas las arquitecturas de ADC, cada una se analiza a continuación.

### ADC de aproximaciones sucesivas

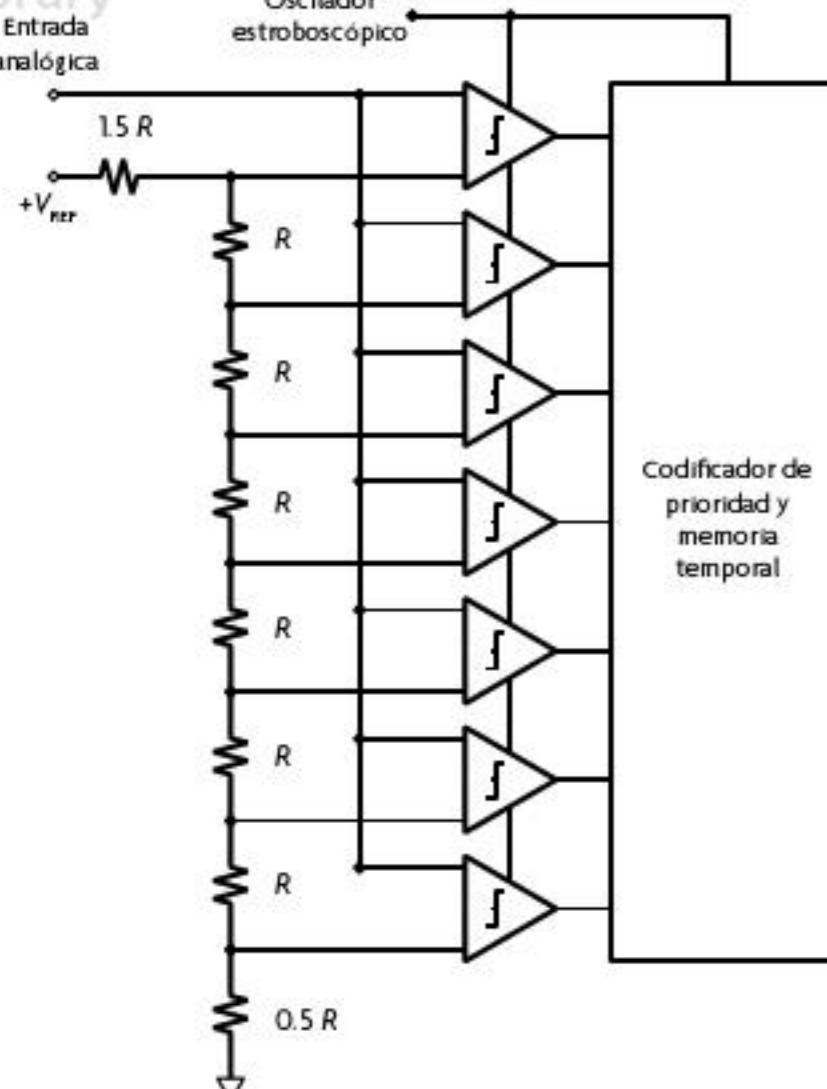
Este tipo de ADC constituye una arquitectura muy popular, dado que permite velocidades de muestreo relativamente altas (del orden de MHz) sin ser muy compleja; la arquitectura básica de este se muestra en la figura 2.36. El proceso de conversión empieza cuando se detecta la señal de inicio de conversión, lo que provoca que el bloque SHA (Sample&Hold, muestreo y espera) entre en modo de espera y que todos los bits del registro de aproximación sucesiva (SAR) se lleven a cero, excepto el bit más significativo. Luego, el dato en el SAR es convertido a una señal analógica equivalente si se compara respecto a la señal de entrada; si la señal de entrada es mayor que el dato almacenado en el SAR, el bit más significativo se mantiene en 1, de lo contrario pasaría a 0; una vez definido el estado del bit más significativo, el segundo bit más significativo se lleva a 1 y se vuelve a llevar a cabo una comparación de señales; este proceso se sigue hasta que todos los bits del SAR quedan definidos y las señales son equivalentes. Esta arquitectura es muy utilizada para aplicaciones que requieren de una velocidad de muestreo y precisión medios.



**Figura 2.36** ADC de aproximaciones sucesivas.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary



**Figura 2.37** ADC paralelo de 3 bits.

### ADC flash o paralelo

Es la arquitectura que ofrece las mayores velocidades de conversión. Un ADC paralelo de  $N$  bits utiliza un arreglo de  $2^N$  resistencias y  $2^N - 1$  comparadores. Dado el arreglo, cada comparador tiene un voltaje de referencia (establecido por un divisor de voltaje) que es mayor al comparador ubicado por debajo de este en el arreglo. De este modo, para una señal dada, todos los comparadores funcionan al mismo tiempo; así, cuando el valor de la señal de entrada es mayor a su voltaje de referencia dará un uno a la salida, y de lo contrario dará un cero. Cuando se tiene la salida de todos los comparadores se utiliza un decodificador, el cual da un solo dato binario de  $N$  bits a la salida en lugar de  $2^N - 1$  salidas (véase figura 2.37).

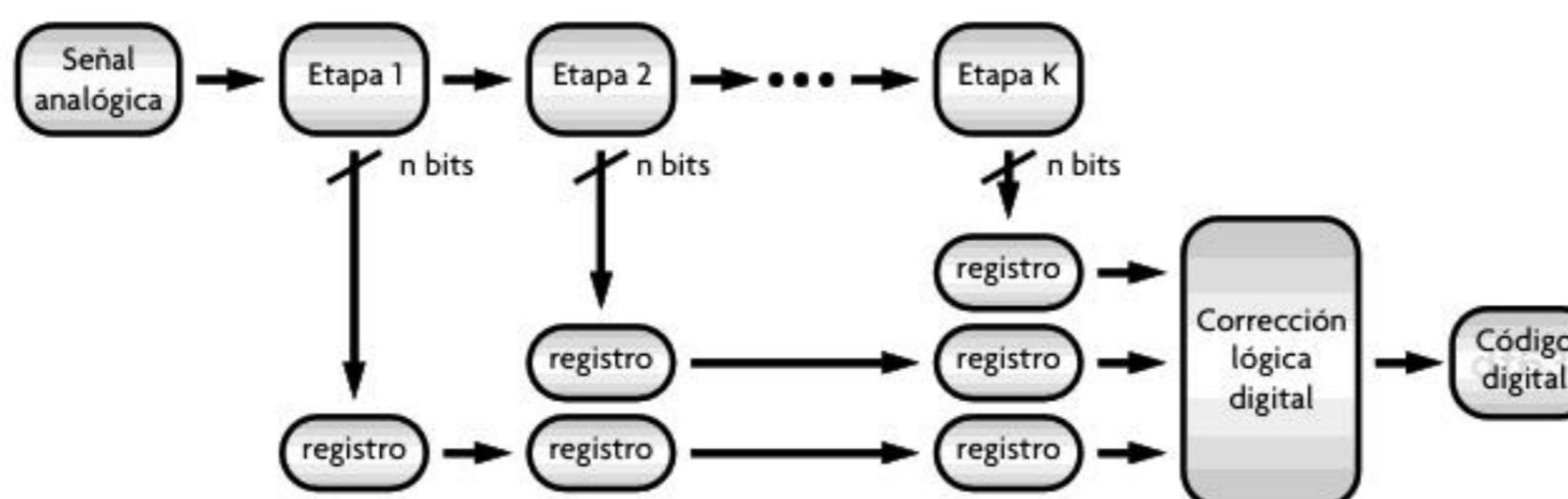
### ADC semiparalelo o de etapas

Es la arquitectura más veloz para resoluciones de 16 bits. En esta arquitectura el proceso de conversión se divide en varias etapas, duran-

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

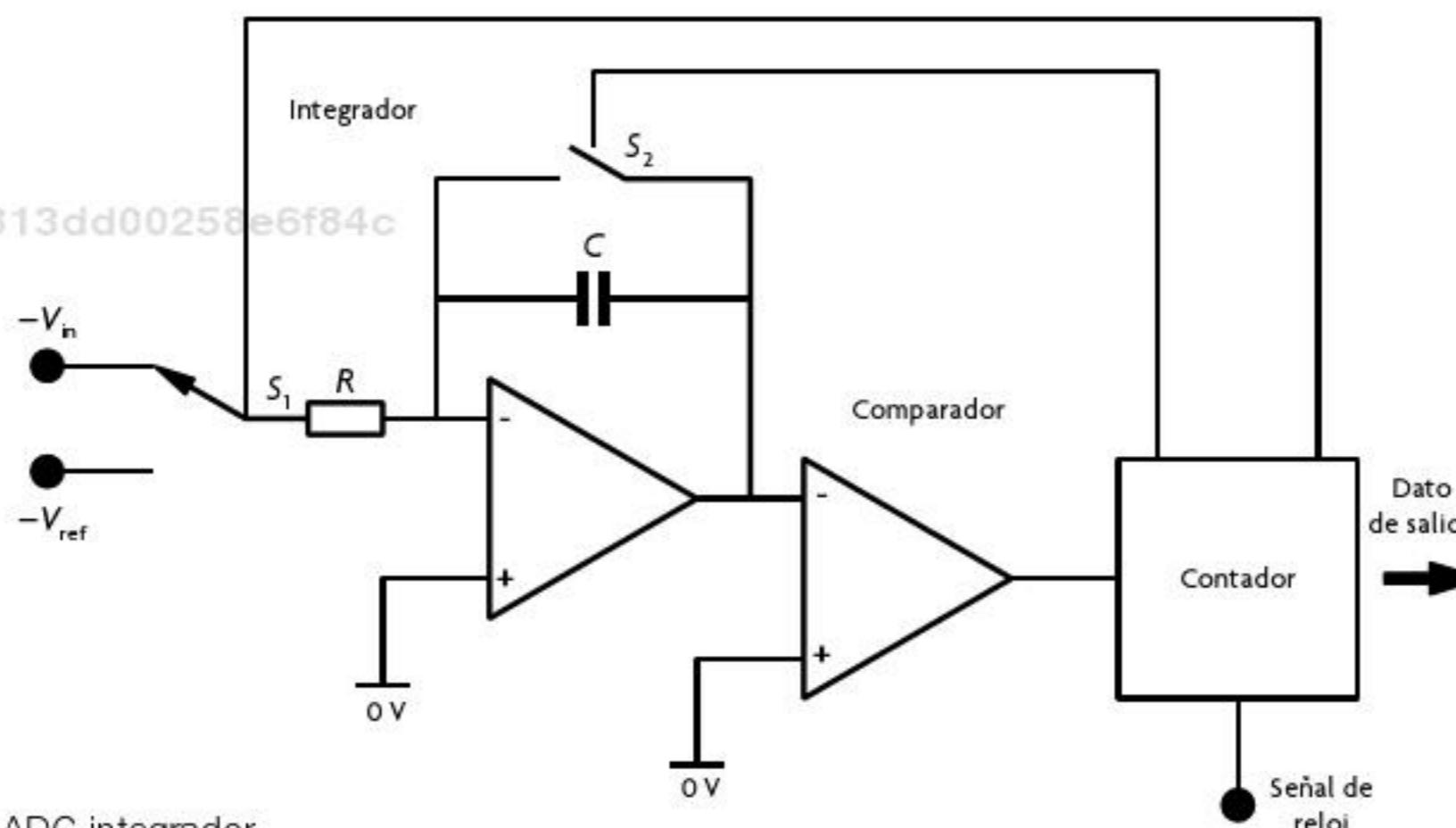
te las cuales se lleva a cabo una conversión parcial y los bits convertidos son rotados hacia abajo y almacenados en un registro. El proceso de conversión en cada etapa incluye un SHA, el cual toma la señal analógica y la manda a un ADC flash, cuya salida se conecta a un DAC, y la salida del DAC es restada de la señal original almacenada en el SHA, para producir una señal residual, la cual es amplificada después para que esta varie en escala completa en la siguiente etapa. Cuando la señal ha pasado por todas las etapas, se hace una corrección digital y, por último, se obtiene el dato digital (véase figura 2.38).



**Figura 2.38** Canal ADC.

### ADC integrador o de rampa

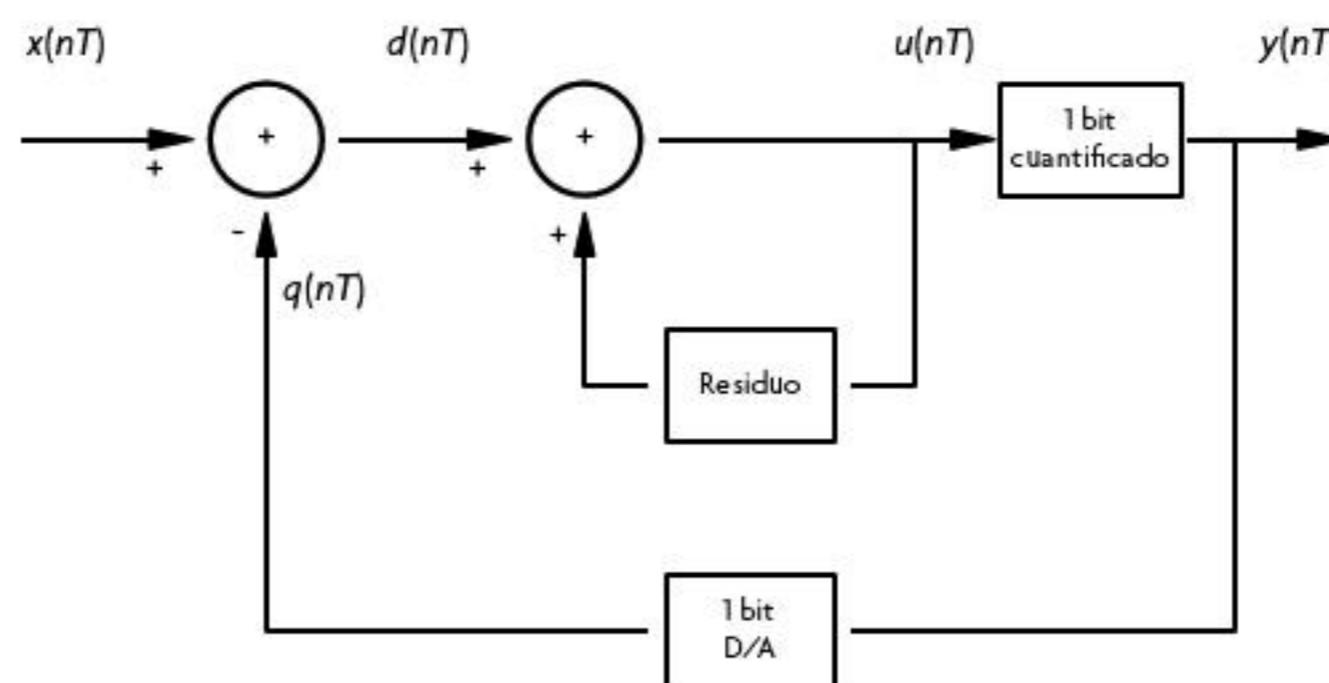
Los ADC basados en esta arquitectura se utilizan en aplicaciones de alta precisión a bajas frecuencias. La conversión de datos en esta arquitectura se lleva a cabo en dos etapas; en la primera, la señal a convertir se hace la entrada al integrador durante un tiempo fijo, mientras que en la segunda se lleva a cabo durante un periodo variable proporcional al valor de la señal de entrada. La distinción de los voltajes de entrada se logra con el contador, el cual es puesto en cero al inicio de la conversión e inicia su conteo en la segunda etapa de la conversión, y continúa contando hasta que el voltaje del comparador alcanza un valor en alto; así, el valor de la cuenta es el valor convertido (véase figura 2.39).



**Figura 2.39** ADC integrador.

### ADC Sigma-Delta

La estructura de un convertidor Sigma-Delta de primer orden se muestra en la figura 2.40. Para realizar la conversión en esta arquitectura, primero se muestrea la señal de entrada y después se sustrae una señal de realimentación de un DAC de un bit de la señal de entrada y el residual es acumulado por un integrador; la salida del integrador se cuantifica para generar una señal de un bit. Esta señal digital de salida determina, entonces, el signo de la señal de realimentación, la cual se vuelve a restar de la señal de entrada para obtener un nuevo bit de salida, hasta obtener el dato digital final.

**Figura 2.40** ADC Sigma-Delta.

### Convertidor digital-analógico (DAC)

Por su parte, la conversión digital-analógica consiste en reconstruir una señal analógica a partir de datos binarios. La señal del convertidor digital-analógico (DAC, por sus siglas en inglés) no es exactamente la misma que la señal analógica original, dado que existen pérdidas de información al desconocer los valores entre dos datos contiguos, además de que la señal reconstruida se desfasa respecto a la señal original.

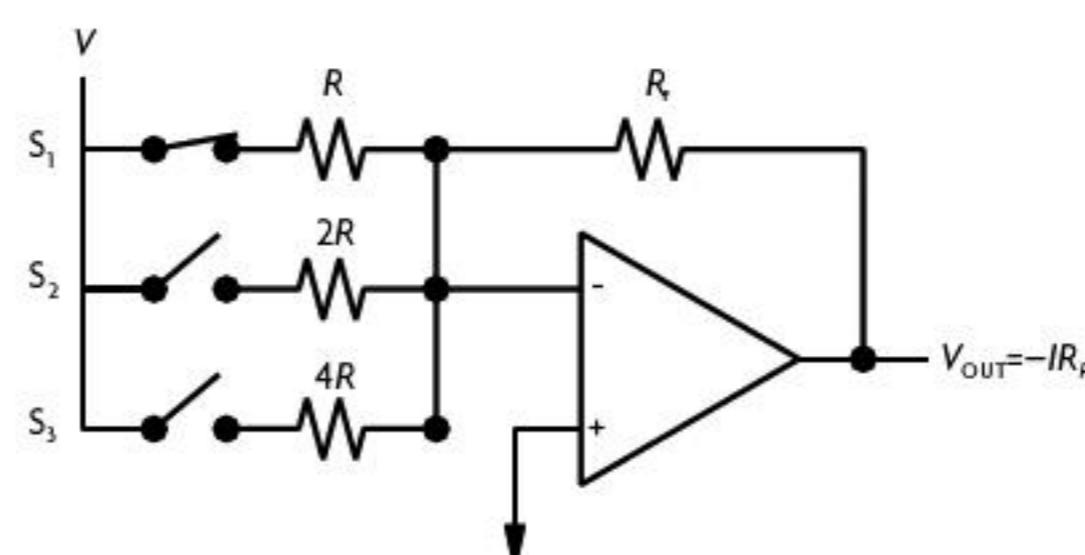
Los procesos clave que se llevan a cabo en una conversión digital-analógica son:

- 1.** Almacenar la señal.
- 2.** Restituir la amplitud de la señal.
- 3.** Establecer una correlación entre cantidades respecto a una referencia.

Los convertidores digitales-analógicos sirven como punto de interacción entre los sistemas digitales y elementos tales como los actuadores finales de un sistema. En la selección de un DAC se deben considerar los mismos requerimientos mencionados para el caso de los ADC. Además, de manera análoga a los ADC, existen diferentes arquitecturas de DAC, algunas de las cuales se presentan a continuación.

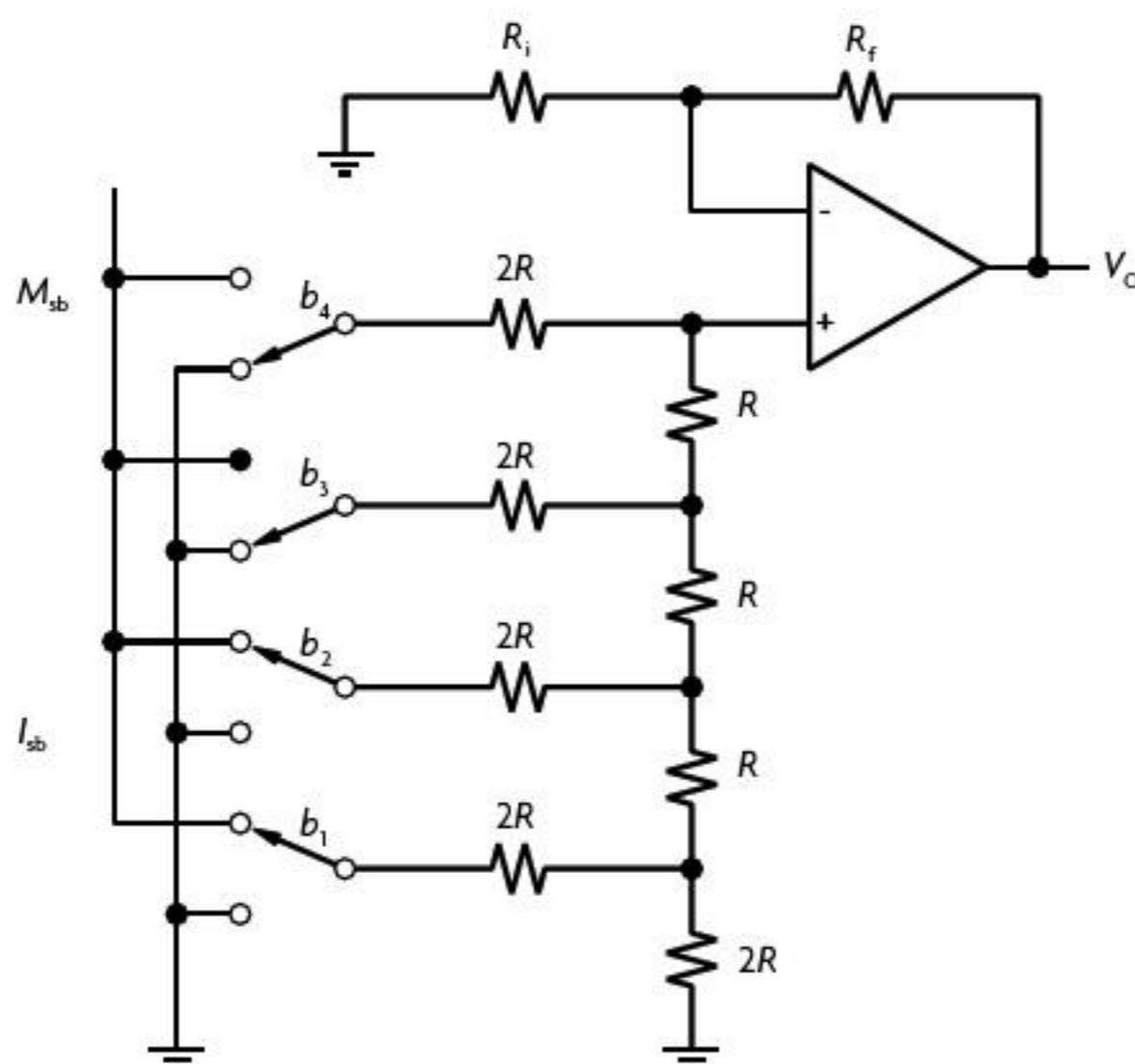
#### DAC de resistencias ponderadas

Dado que cada bit del dato digital tiene un valor relativo dependiendo su posición, se utiliza un arreglo de resistencias, las cuales, dados sus valores, establecen distintos factores de escala para los datos binarios. Estos voltajes escalados son sumados después con un circuito amplificador cuya salida será la señal analógica (véase figura 2.41).

**Figura 2.41** DAC de resistencias ponderadas.

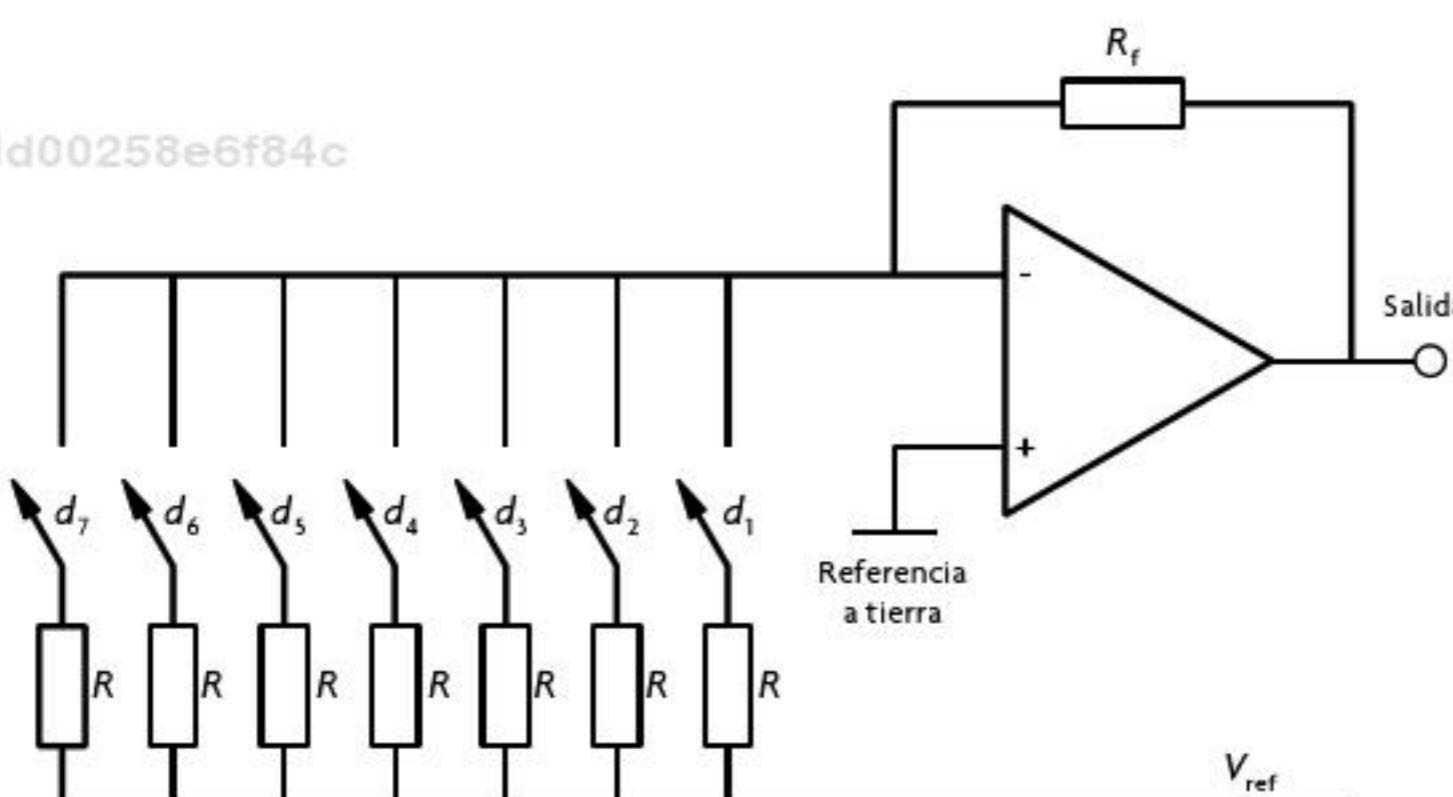
#### DAC R-2R

Esta arquitectura es similar a la de resistencias ponderadas, con la única diferencia que en esta se utilizan resistencias de solo dos valores y se incluyen interruptores, los cuales varían según el dato binario; si el dato es un 1, entonces el interruptor permite el paso de corriente por la rama respectiva sumando así un voltaje a la salida (véase figura 2.42).

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary**Figura 2.42** DAC R-2R.

### DAC termómetro

Esta arquitectura de denomina así debido a que el código de bits "activos" se lee de manera análoga a un termómetro de mercurio. Cuando el valor de las entradas digitales cambia de un valor bajo a uno alto, o viceversa, se pueden producir problemas debidos al cambio de estado en los interruptores del circuito (véase figura 2.43), que no necesariamente ocurrirán en el mismo instante; para evitar estos problemas se implementa el tipo de codificación de termómetro, donde los valores van aumentando de manera gradual bit a bit. Una desventaja de este tipo de arquitectura es la necesidad de tener un bit por cada valor que se quiera representar; así, si se requieren nueve valores distintos a la salida será necesario colocar nueve resistencias con sus respectivos interruptores.

**Figura 2.43** DAC termómetro.

### DAC Sigma-Delta

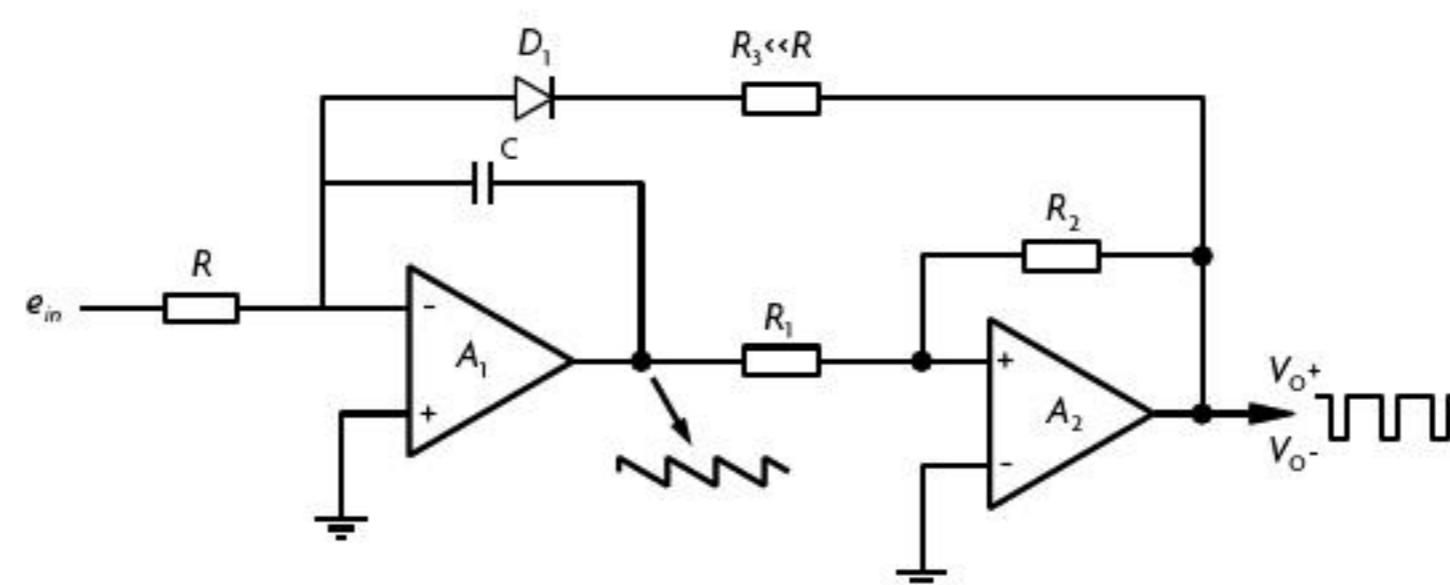
El funcionamiento de esta arquitectura es similar a la de los ADC Sigma-Delta, con la única diferencia de que en estos la modulación se hace de manera digital.

Un sistema de sensado y actuación suele utilizar tanto ADC como DAC para lograr la correcta comunicación de las señales entre sus distintos elementos; además, como ya se dijo, ambos son de suma importancia para obtener sistemas de sensado y actuación efectivos.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## Convertidores frecuencia-voltaje y voltaje-frecuencia

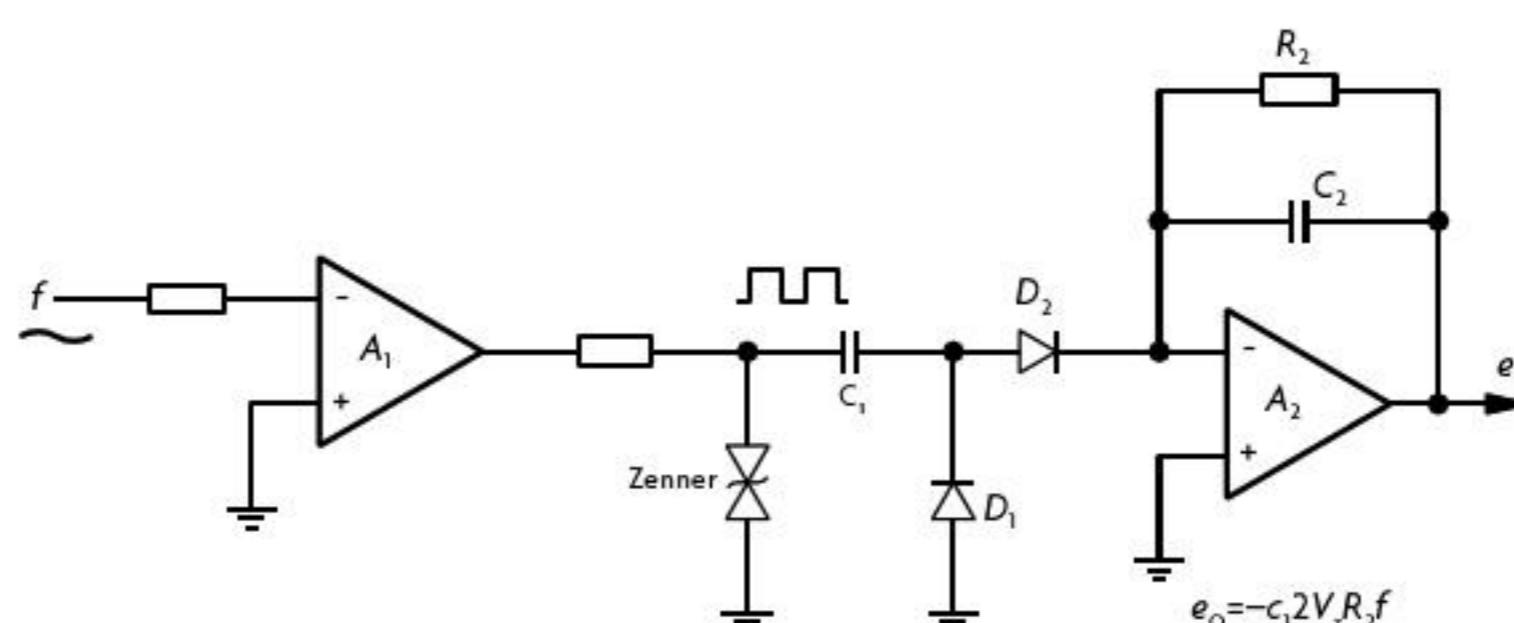
Los convertidores de voltaje a frecuencia producen una señal periódica con una frecuencia proporcional a un voltaje de control, pudiendo producir señales cuadradas, triangulares o sinusoidales a la salida. Los convertidores de frecuencia a voltaje suelen usarse en forma de circuitos integrados comerciales; sin embargo, también pueden ser construidos con elementos discretos, como el circuito de la figura 2.44, donde la señal de entrada es integrada y después pasada por un comparador. Con mayor detalle, se puede decir que lo que sucede durante la operación del circuito es que al tiempo que el voltaje de salida del comparador se eleva, el diodo se polariza en inversa y el voltaje a la salida del integrador empieza a decaer con lentitud. Cuando el voltaje de salida del integrador alcanza un nivel mínimo, el comparador cambia su salida a un valor  $V_o^-$ , por lo cual el diodo se polariza en directa y se registra una elevación súbita del voltaje de salida del integrador. Entonces, si se hace que el tiempo de caída del voltaje de salida del integrador sea muy grande respecto al tiempo de bajada, la frecuencia en los cambios a la salida del comparador serán proporcionales al voltaje de entrada (dado que los tiempos de subida y caída de voltaje en el integrador dependen de los tiempos de carga y descarga del capacitor) y estarán relacionados por la ecuación 2.41.



**Figura 2.44** Convertidor voltaje-frecuencia.

$$f \cong \frac{R_2}{R_1(V_o^+ - V_o^-)CR} V_{in} \quad (2.41)$$

Los circuitos de conversión de frecuencia-voltaje primero convierten la señal de entrada en un tren de pulsos de amplitud constante; el pulso es diferenciado, rectificado y promediado a fin de obtener un valor de voltaje a la salida, relacionado con la frecuencia de la señal de entrada. Al igual que los convertidores de voltaje-frecuencia, los convertidores de frecuencia-voltaje pueden utilizarse en forma de un circuito integrado o ser construidos con elementos discretos. Un circuito simple de conversión de frecuencia-voltaje se muestra en la figura 2.45.



**Figura 2.45** Convertidor de frecuencia-voltaje.

El primer amplificador es simplemente un comparador en lazo abierto, el cual produce un tren de pulsos de amplitud constante a la misma frecuencia que la señal de entrada; cada vez que existe un pulso en alto, una determinada cantidad de carga es transferida a través de  $D_2$  hacia la entrada

inversora del segundo amplificador, entonces esos pulsos de carga son promediados por el circuito RC, formado por  $R_2$  y  $C_2$ , de tal forma que se tiene una corriente promedio a través de  $R_2$ , obteniendo así un voltaje de salida proporcional a la frecuencia de entrada (ecuación 2.42).

$$V_o \cong 2V_z C_1 f R \quad (2.42)$$

Este tipo de circuitos convertidores encuentran algunas aplicaciones dentro de los sistemas de sensado, como encoders, o para excitar algún sensor a una frecuencia determinada para su óptimo funcionamiento.

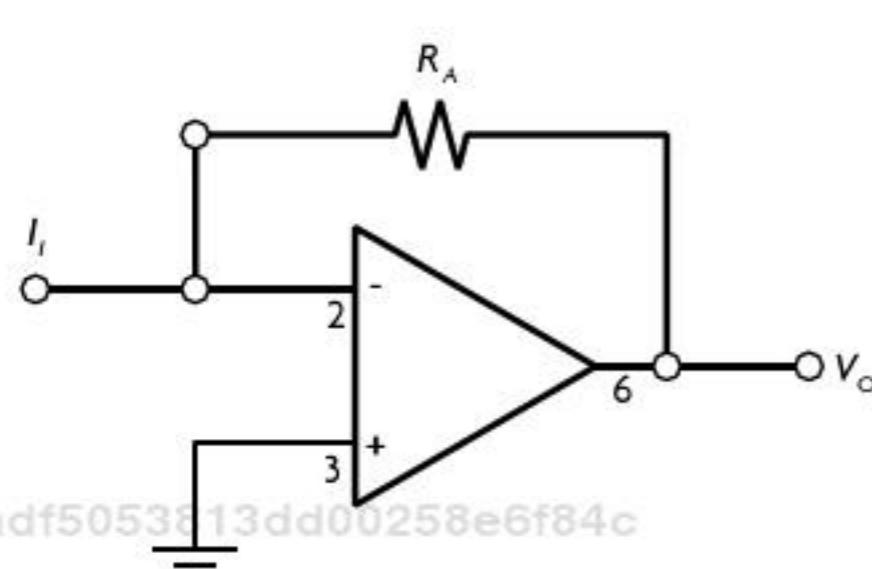
### Convertidores corriente-voltaje y voltaje-corriente

Los convertidores de corriente-voltaje y voltaje-corriente son circuitos que emplean amplificadores operacionales y, además, se valen de la ley de Ohm para obtener una lectura proporcional de corriente o voltaje.

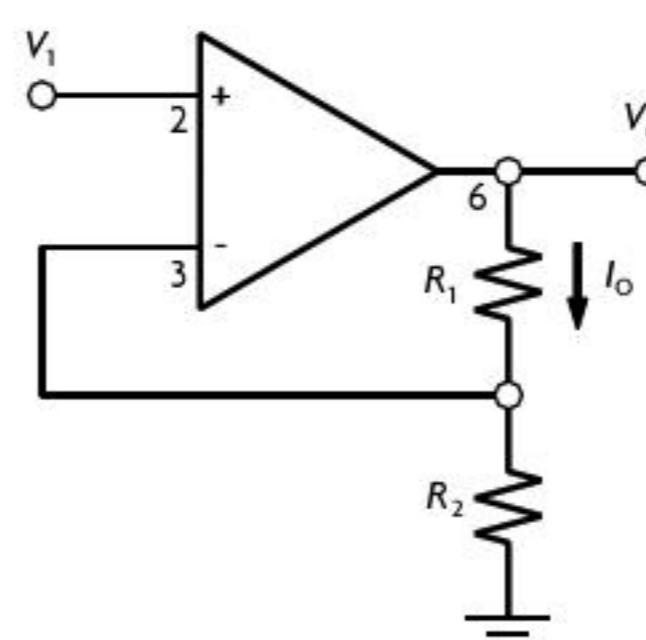
Los convertidores de corriente-voltaje son circuitos para convertir señales de corriente pequeña ( $> 0,01 \mu\text{A}$ ) a un voltaje proporcional, el cual se mide con mayor facilidad. En la figura 2.46 se observa un circuito convertidor de corriente a voltaje, cuyo voltaje de salida está dado por:

$$V_o = -I_i R_A \quad (2.43)$$

Por otra parte, los convertidores de voltaje a corriente sirven para leer un voltaje de entrada en forma de una corriente proporcional. En la figura 2.47 se muestra un circuito conversor de voltaje a corriente.



**Figura 2.46** Circuito convertidor de corriente a voltaje.



**Figura 2.47** Circuito convertidor de voltaje a corriente.

La corriente  $I_o$  que se tendrá a la salida del circuito puede calcularse tomando en cuenta las características de un amplificador operacional ideal, de las cuales se sabe que el voltaje en la terminal no inversora será igual al de la inversora, teniendo así el voltaje  $V_i$  en el nodo, ubicado entre las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ ; de este modo, la corriente de salida puede calcularse como:

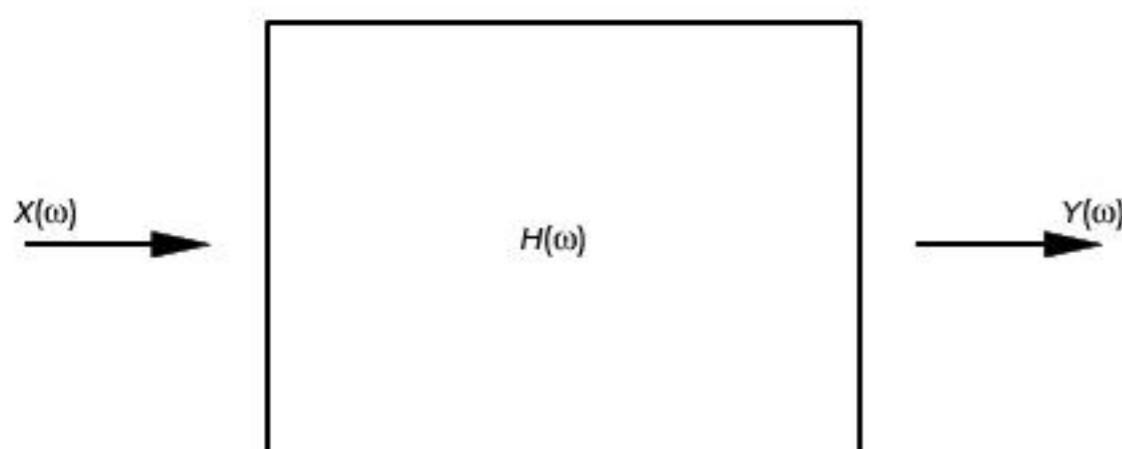
$$I_o = \frac{V_i}{R_2} \quad (2.44)$$

Algunas de las aplicaciones de estos circuitos en los sistemas de sensado son:

- Para la lectura de sensores basados en el efecto fotoeléctrico, para convertir la corriente generada por un fotodetector en una señal de voltaje para una amplificación adicional.
- Como una fuente de voltaje controlada por corriente.
- Para medición de corrientes. Si hay necesidad de medir una corriente, se puede conectar un convertidor de corriente a voltaje y luego un voltímetro.

## 2.6 Filtros

La respuesta de un circuito de filtrado depende de los elementos que lo compongan, tal como se ha visto con las distintas configuraciones de circuitos amplificadores, y de cómo estén interconectados. Ahora bien, de la teoría de análisis de circuitos eléctricos sabemos que la impedancia de los elementos pasivos como capacitores e inductores depende de la frecuencia de la fuente de excitación del circuito. A continuación se ve cómo una selección adecuada de los valores y las conexiones entre estos elementos nos ayudan a construir circuitos que permitan el paso selectivo de señales, también conocidos como filtros.



**Figura 2.48** Modelo de bloque de un filtro.

Los filtros son circuitos caracterizados por una entrada y una salida, de forma que en esta última solo aparece parte de las componentes de frecuencia de la señal de entrada; es decir, es un circuito eléctrico que se utiliza para eliminar una componente frecuencial de una señal a partir de una determinada frecuencia, a la que se le denomina **frecuencia de corte del filtro**. Por tanto, son circuitos que se pueden caracterizar por su función de transferencia  $H(\omega)$ , la cual toma un valor de uno, cuando el valor de la frecuencia se desea a la salida, y de cero, cuando se quiere rechazar dicha componente de frecuencia (véase figura 2.48).

Los filtros se clasifican de acuerdo con dos criterios: 1) las componentes que lo constituyen y 2) su respuesta en frecuencia.

Según sus componentes se clasifican como:

- **Pasivos.** Utilizan solo componentes pasivas, como resistencias, capacitores e inductores. Presentan la desventaja de no poder amplificar la señal de salida, lo cual es deseable en muchas aplicaciones.
- **Activos.** Se construyen con resistencias, capacitores y amplificadores operacionales. Presentan las ventajas de poder amplificar las señales de salida, además de que pueden prescindir de los inductores para lograr resultados análogos a los filtros pasivos, lo cual se traduce en un diseño más compacto.
- **De capacidades conmutadas.** Estos utilizan capacitores de conmutación en lugar de resistencias; los valores de resistencia deseados se consiguen variando la frecuencia de conmutación de los capacitores.
- **Digitales.** Realizan la función del filtro a través de algoritmos numéricos.

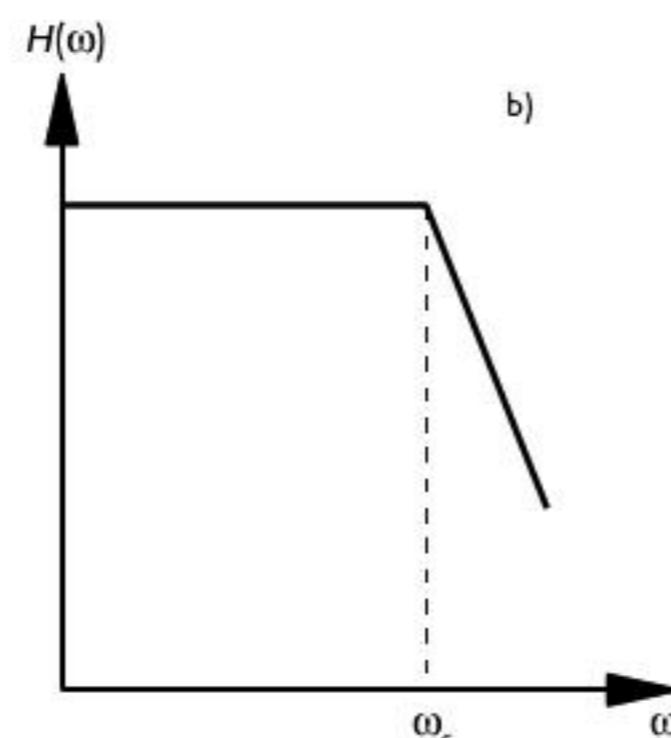
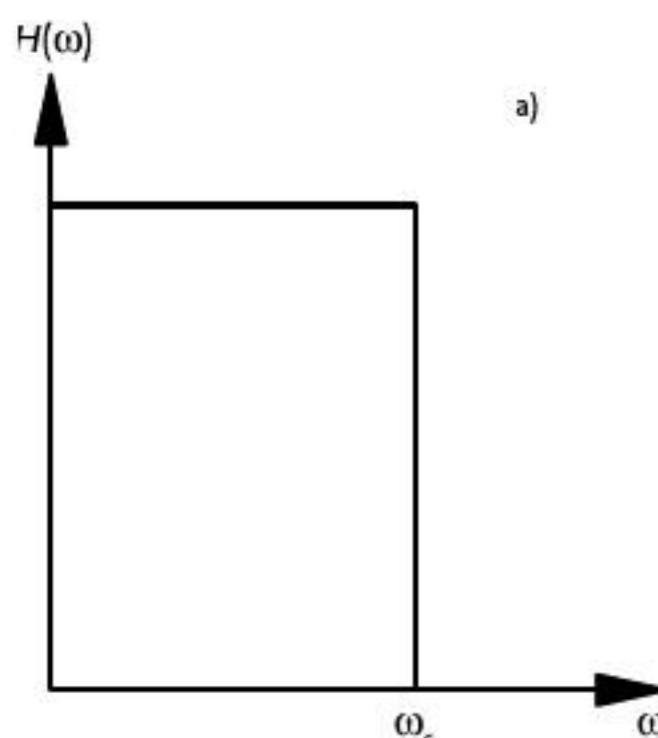
Según su respuesta en frecuencia, se pueden distinguir cuatro tipos básicos de filtros:

- Filtro pasa bajas
- Filtro pasa altas
- Filtro pasa banda
- Filtro rechaza banda

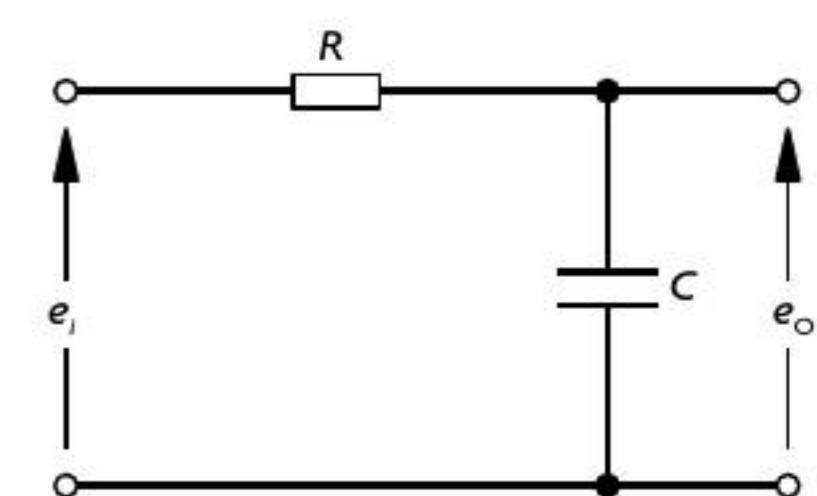
Los circuitos de filtrado tienen aplicaciones importantes dentro de las conversiones analógicas-digitales y digitales-analógicas; además, en sistemas de detección sirven para eliminar señales ambientales no deseadas que pueden afectar las mediciones. A continuación se describe de forma breve el funcionamiento de los filtros según su respuesta en frecuencia, donde se presentan los circuitos de filtrado tanto pasivos como activos.

### Filtro pasa bajas

Hasta el momento solo se ha hecho referencia al rechazo o eliminación de componentes de frecuencia de una señal; sin embargo, en sentido estricto, lo que en realidad sucede es que el filtro atenúa las frecuencias no deseadas. Lo anterior se debe al comportamiento de las componentes utilizadas



**Figura 2.49** Función característica de un filtro: a) ideal y b) real.



**Figura 2.50** Filtro pasa bajas pasivo de primer orden.

para su construcción (capacitores e inductores), las cuales tienen un cierto tiempo de carga y descarga asociado. En la figura 2.49 a) se muestra la función característica ideal de un filtro de paso bajo, mientras en la figura 2.49 b) se presenta la función característica real de un filtro de paso bajo. Es claro, entonces, que las frecuencias mayores a la  $\omega_c$  no serán llevadas completamente a cero, sino que serán atenuadas por un determinado factor de escala.

Con base en lo expuesto antes, un filtro pasa bajas es aquel que no atenúa las frecuencias inferiores a la frecuencia de corte y, en cambio, sí atenúa las frecuencias superiores a la frecuencia de corte del filtro. Un circuito pasa bajas pasivo puede ser el que se muestra en la figura 2.50; para saberlo, se analiza cómo se comporta este circuito en frecuencia. Para ello, se inicia con la suposición de una frecuencia cero; en este caso, la impedancia del capacitor sería infinita, asemejando un circuito abierto, haciendo que el voltaje de entrada sea igual al de salida. Si ahora se comienza a aumentar la frecuencia, la impedancia del capacitor irá disminuyendo y se tendrá un circuito divisor de voltaje entre la resistencia y el capacitor, obteniendo a la salida un voltaje menor al de la entrada. Por último, si se considera una frecuencia infinita, la impedancia del capacitor sería igual a cero, comportándose como un corto circuito, lo cual implicaría tener un voltaje nulo a la salida.

Del análisis anterior se obtiene, entonces, que el circuito de la figura 2.50 es un filtro de paso bajo, el cual deja pasar las señales de baja frecuencia; sin embargo, como ya se dijo antes, no se obtiene un corte abrupto, como en la función característica ideal; por tanto, es importante definir cómo se debe calcular la frecuencia de corte del circuito real para tener el comportamiento deseado.

Se suele definir a la frecuencia de corte como aquella frecuencia para la cual el módulo de la función de transferencia se escala por un factor de  $1/\sqrt{2}$ , teniendo así como banda de paso el rango de frecuencias para las cuales la señal de salida es aproximadamente 70% de la amplitud de la señal de entrada.

Ahora bien, con base en las consideraciones anteriores, es posible calcular la frecuencia de corte del filtro RC de paso bajo. Si se sabe que el módulo de la función de transferencia del filtro RC es:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\omega_c^2 + \frac{1}{R^2}}} \quad (2.45)$$

Además, si se desea que la banda de paso sea aquella en la que las señales de salida se escalan con un factor máximo de  $1/\sqrt{2}$ ; es decir:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} H_{max} \quad (2.46)$$

donde la  $H_{mx} = 1$  para nuestro caso.

Así, tenemos:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} H_{mx} = \frac{1}{\sqrt{\omega_c^2 + \frac{1}{RC}^2}} \quad (2.47)$$

Si despejamos  $\omega_c$  de la ecuación anterior obtenemos:

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (2.48)$$

Esta es la frecuencia de corte para el filtro pasa bajas RC, también conocido como filtro RC de primer orden, dado el comportamiento de su función característica. También es posible construir filtros de orden superior, los cuales tienen una función característica más cercana a la ideal; sin embargo, estos no se presentan en este texto.

Una vez conocida la frecuencia de corte deseada, es posible calcular los valores de resistencia y capacitancia necesarios para la implementación física del filtro.

Antes, realizamos el análisis de un filtro pasivo. Ahora, veamos el circuito de la figura 2.51, que es un filtro pasa bajas activo, e intentemos analizar qué sucede con el voltaje de salida del circuito según se varíe la frecuencia de la señal de entrada. A frecuencias bajas, la impedancia del capacitor será muy grande y este se comportará como un circuito abierto; por tanto, el circuito funcionará como un amplificador inversor con ganancia  $-R_A/R_I$ . Cuando las frecuencias

sean muy grandes, la impedancia del capacitor tenderá a cero y se comportará como un corto circuito, llevando la salida del amplificador a operacional a tierra.

La frecuencia de corte para este filtro activo puede calcularse de forma similar al filtro pasivo; así,

al saber que su función de transferencia es  $\frac{R_A \parallel \frac{1}{sC}}{R_I}$  se obtiene la siguiente expresión:

$$\omega_c = \frac{1}{R_A C} \quad (2.49)$$

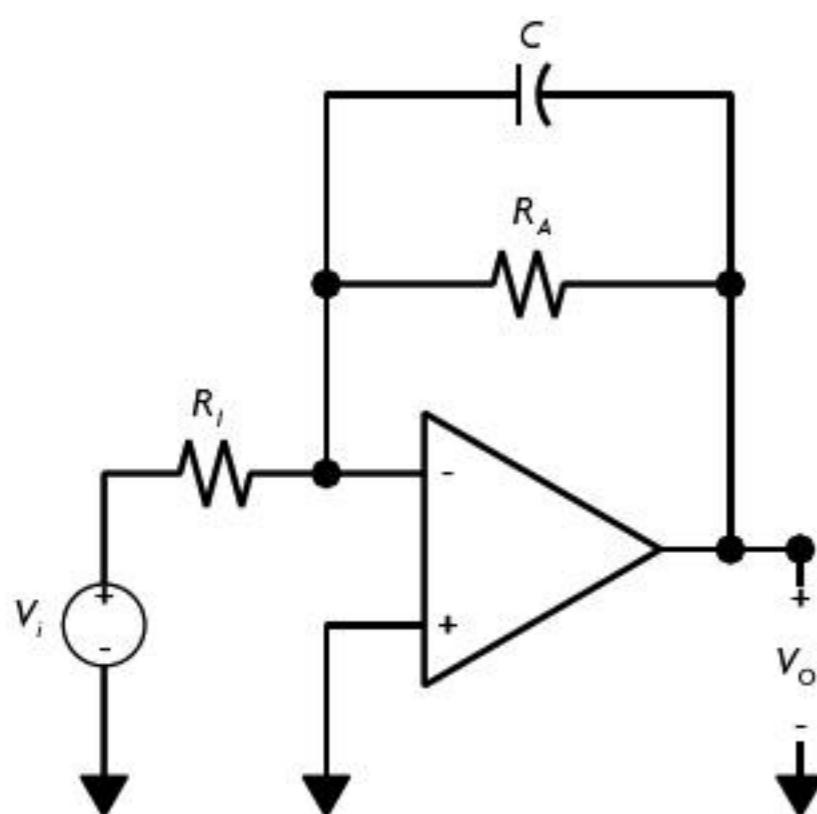
De manera análoga al filtro pasivo, este filtro es de primer orden, dada su función característica; sin embargo, es posible tener un filtro activo de orden superior si se colocan dos secciones RC en el circuito.

Aunque el comportamiento descrito para ambos filtros es igual, incluso la expresión que define a las frecuencias de corte resulta muy parecida, es importante tener en cuenta que el filtro activo permite variar la ganancia de la banda de paso de manera independiente.

### Filtro pasa altas

Los filtros pasa altas pueden verse como aquellos cuya función sería la operación complementaria de los filtros pasa bajas, ya que estos permiten el paso de las frecuencias mayores a la frecuencia de corte y atenúan las frecuencias menores.

El filtro de la figura 2.52 puede ser un filtro de paso alto pasivo. Si llevamos a cabo el mismo análisis planteado para el filtro pasa bajas, nos podemos dar cuenta que en efecto la acción es la complementaria, y cuando las frecuencias sean bajas, el capacitor se comportará como circuito abierto y existirá voltaje a la salida; por el contrario, cuando las frecuencias sean altas, se comportará como un corto circuito y el voltaje de salida será igual al de entrada.



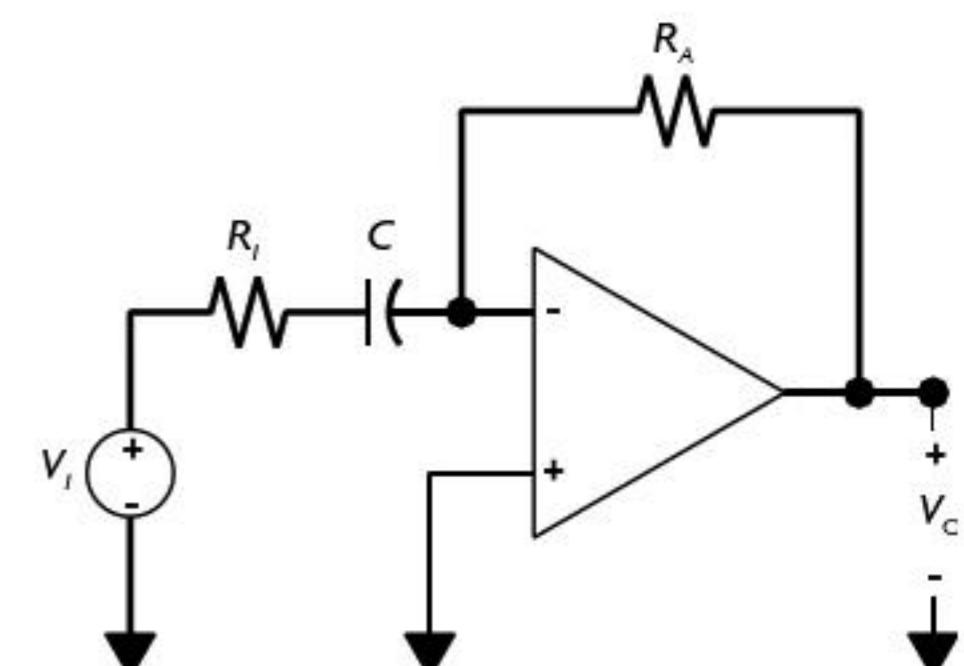
**Figura 2.51** Filtro activo pasa bajas de primer orden.

La frecuencia de corte de este filtro será la misma definida por la ecuación 2.48.

El filtro activo pasa bajas de la figura 2.53 impide el paso de las señales de baja frecuencia, ya que el capacitor conectado a la terminal inversora se comporta como circuito abierto, mientras que a altas frecuencias el capacitor se presenta como un circuito abierto, permitiendo el paso de las señales, comportándose como un amplificador inversor. La frecuencia de corte para este circuito es:

$$\omega_c = \frac{1}{R_i C} \quad (2.50)$$

De la misma forma que con los filtros pasa bajas, es posible construir filtros pasa altas de orden superior.



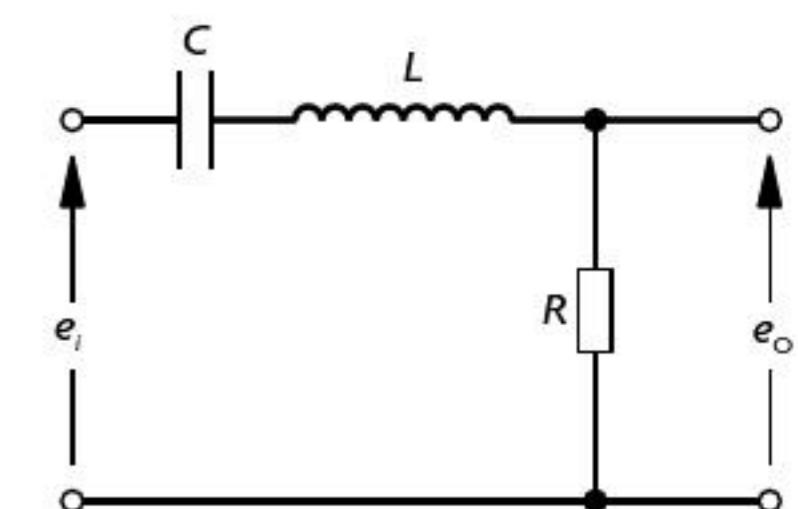
**Figura 2.53** Filtro pasa altas de primer orden.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

### Filtro pasa banda

Considérese el circuito de la figura 2.54. Ahora supóngase una señal de entrada de frecuencia cero; el capacitor se comportará como un circuito abierto e impedirá que exista un flujo de corriente hacia la resistencia y, por tanto, el voltaje a la salida será cero. Por otro lado, si la frecuencia de la señal de entrada fuera infinita, el inductor sería el que se comportaría como circuito abierto, teniendo, una vez más, un voltaje cero a la salida. Ahora, piénsese qué sucede en las frecuencias intermedias; tanto el capacitor como el inductor tendrán un valor definido y finito de impedancia, teniendo así un divisor de voltaje donde ahora sí existirá una caída de voltaje sobre la resistencia. Un punto importante a resaltar en este análisis cualitativo del circuito RLC es el momento en que la impedancia del capacitor y la del inductor sean iguales. Si recordamos que la impedancia de un capacitor tiene signo negativo, entonces la impedancia del capacitor se cancelará con la del inductor, resultando en una señal de salida igual a la de la entrada; a la frecuencia a la cual se da este fenómeno se le conoce como frecuencia central del filtro.

Como ya se pudo haber inferido de la figura 2.54, el circuito que se muestra en dicha figura es un filtro de paso de banda, el cual permite el paso de las frecuencias dentro de un rango determinado por una frecuencia mínima y una máxima. Por tanto, además de una frecuencia central, un filtro pasa banda tiene dos frecuencias de corte, las cuales definen la banda de paso; ambas frecuencias de corte se calculan usando la misma consideración del factor de escala  $1/\sqrt{2}$ , aplicado al módulo de la función de transferencia del circuito que se usó en los filtros pasa bajas y pasa altas. Así, si el módulo de la función de transferencia del circuito es:



**Figura 2.54** Filtro pasa banda pasivo de segundo orden.

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega(R/L)}{\sqrt{[(1/LC) - \omega^2]^2 + [\omega(R/L)]^2}} \quad (2.51)$$

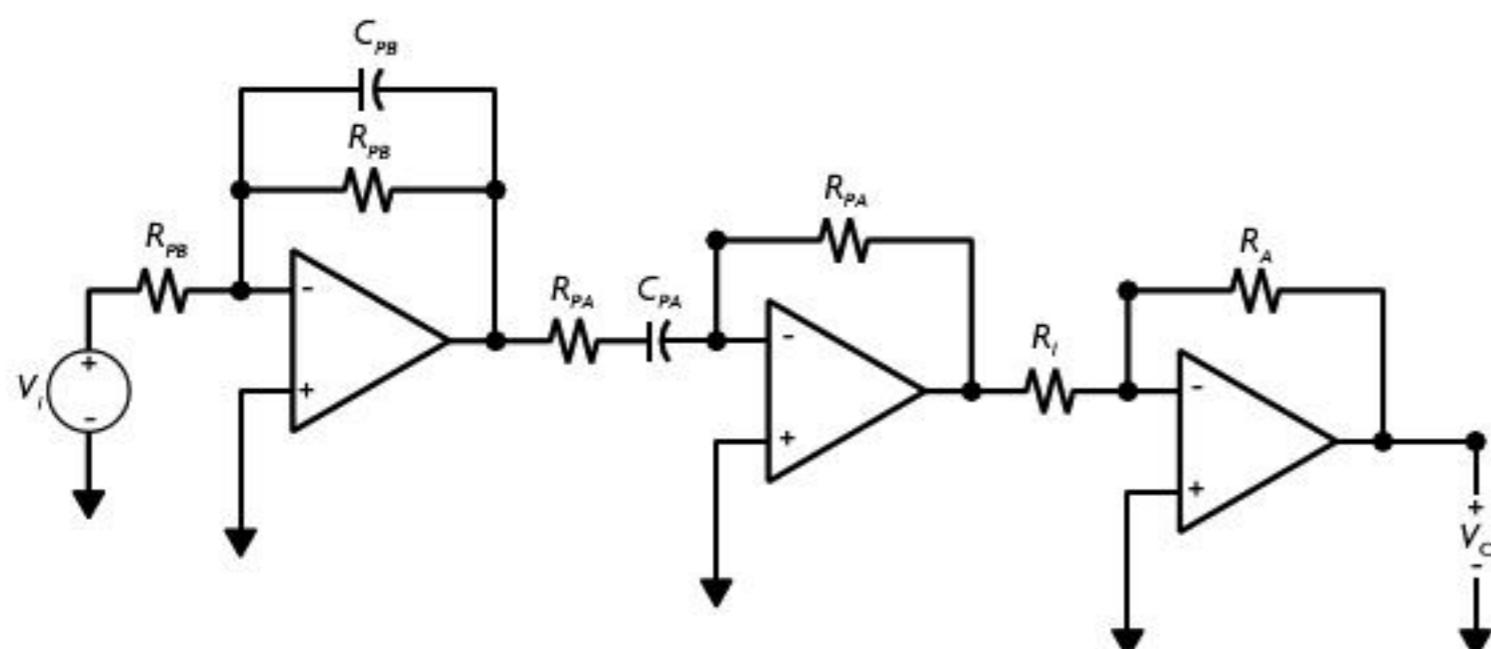
las frecuencias de corte serían:

$$\omega_{c1} = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \left(\frac{1}{LC}\right)} \quad (2.52)$$

$$\omega_{c2} = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \left(\frac{1}{LC}\right)} \quad (2.53)$$

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Con las dos frecuencias de corte conocidas es posible calcular el ancho de banda del filtro, el cual es el rango de las frecuencias que pasan el filtro. Por último, la frecuencia central del filtro está dada por:



**Figura 2.55** Filtro pasa banda activo de cascada.

$$\omega_{cr} = \sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)} \quad (2.54)$$

El filtro activo pasa banda de la figura 2.55 funciona de manera similar a la descrita para el filtro pasivo. Como se puede apreciar, el filtro pasa banda está compuesto por un filtro pasa bajas y uno pasa altas conectados en serie y una etapa final de amplificación.

Las frecuencias de corte para este filtro activo son:

$$\omega_{c1} = \frac{1}{R_{PB}C_{PB}} \quad (2.55)$$

$$\omega_{c2} = \frac{1}{R_{PA}C_{PA}} \quad (2.56)$$

### Filtro rechaza banda

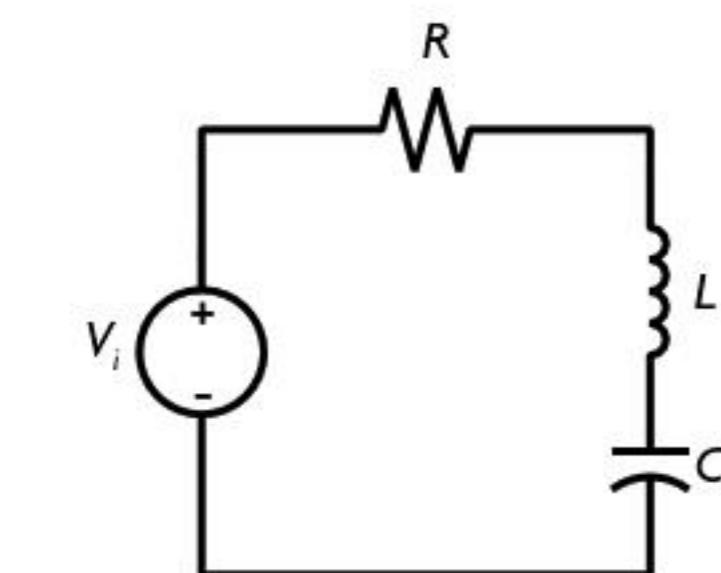
El circuito de la figura 2.56 es un filtro rechaza banda pasivo. Aunque este circuito utiliza los mismos componentes que el filtro pasa banda pasivo, la diferencia radica en que en este el voltaje de salida se mide sobre el par capacitor-inductor. Una vez más, piénsese en el comportamiento del circuito cuando la frecuencia de la señal de entrada es cero; cuando es así, el capacitor se comporta como un circuito abierto y el inductor como un corto circuito. Pero cuando la corriente tiende a ser infinita, el capacitor y el inductor cambian de papeles, de tal forma que en cualquiera de los dos casos el voltaje se mide sobre un circuito abierto, lo cual implica que el voltaje de salida será igual al de entrada. En frecuencias intermedias, el voltaje de salida se atenuará y en la frecuencia central la salida será nula.

Las frecuencias de corte del circuito rechaza banda son iguales a las del circuito pasa banda pasivo.

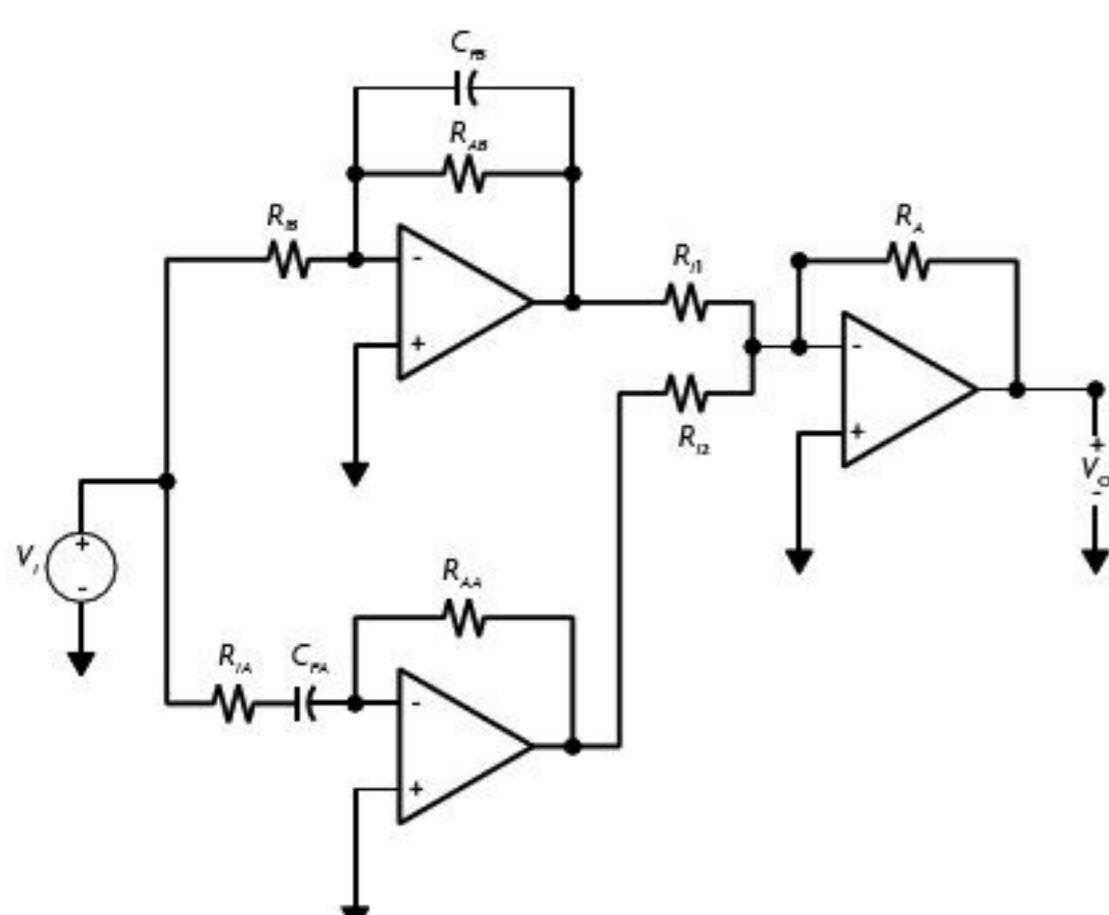
El filtro activo paralelo de la figura 2.57 tiene un comportamiento igual al del filtro rechaza banda pasivo y sus frecuencias de corte son iguales a las del filtro pasa banda activo en cascada.

## 2.7 Puentes, amplificadores y convertidores de alterna

En distintas aplicaciones dentro de los sistemas de actuación y sensorado es necesario el manejo de señales de corriente alterna y corriente continua en un mismo sistema. Para eso existen circuitos que nos permiten hacer el manejo de dichas señales, tales como puentes, amplificadores y convertidores. En esta última parte del capítulo se presentan algunos acondicionamientos que permiten el manejo de señales de alterna.



**Figura 2.56** Filtro rechaza banda pasivo de segundo orden.



**Figura 2.57** Filtro rechaza banda activo paralelo.

## Convertidores de corriente alterna-corriente directa (CA-CD)

Los **convertidores de CA-CD** sirven para la obtención de una fuente de corriente directa, partiendo de una fuente de alterna. Un convertidor de CA-CD parte de la rectificación de la onda, para lo cual se vale de un circuito rectificador, el cual puede ser un puente de diodos (véase figura 2.58) cuya salida es una señal como la que se muestra en la figura 2.59.

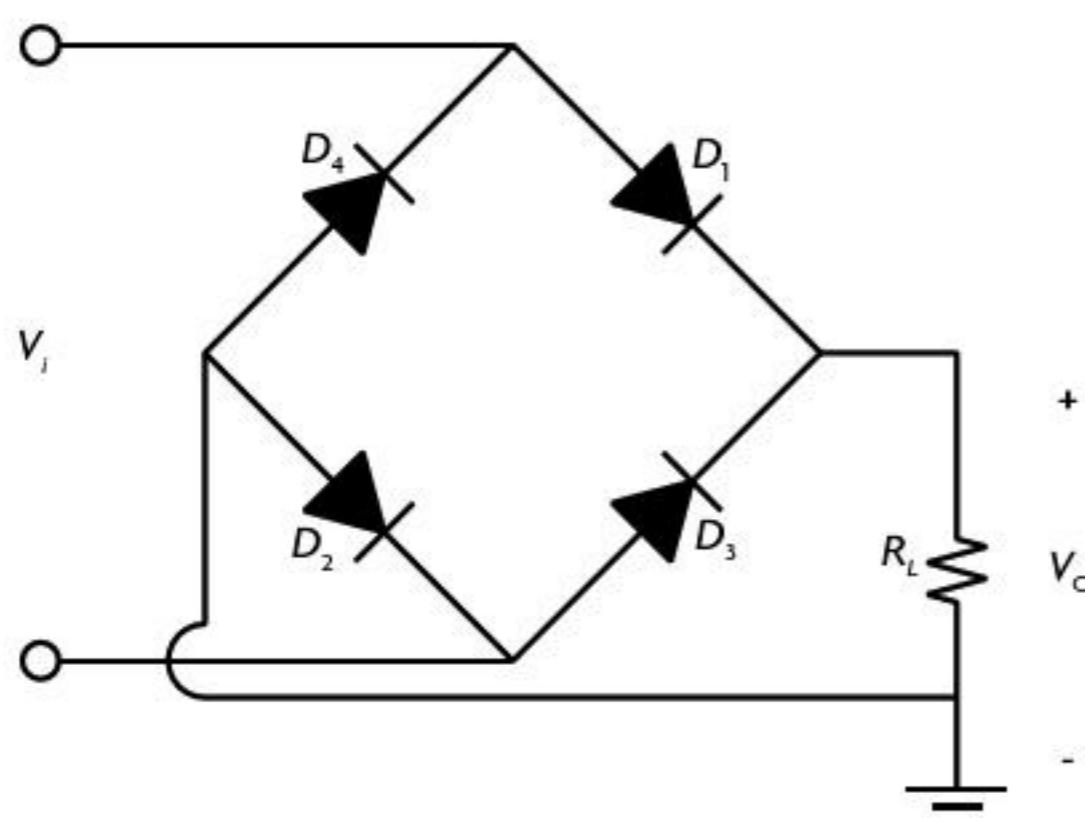


Figura 2.58 Rectificador de onda completa.

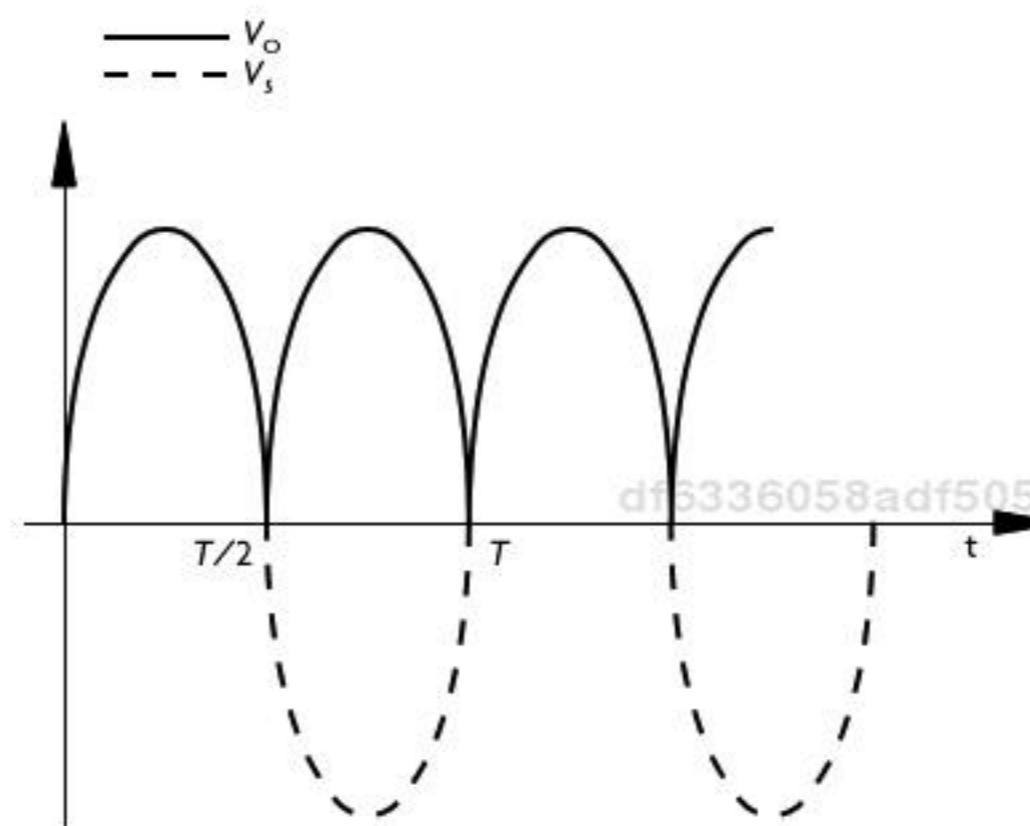


Figura 2.59 Salida del rectificador.

Si a la salida del rectificador se coloca un capacitor en paralelo, se puede obtener una señal casi continua. En aplicaciones prácticas, se comienza por atenuar la magnitud de la señal de alterna (por lo común de 120 V) usando un transformador, y además se suele agregar un regulador de voltaje para mantener una señal de salida sin variaciones. El circuito que se muestra en la figura 2.60 es un convertidor de CA-CD que omite estos dos últimos elementos.

## Convertidores de corriente directa-corriente alterna (CD-CA)

Los **convertidores de CD-CA** se utilizan como drivers de motores y fuentes de corriente alterna, las cuales tienen como objetivo producir una señal de corriente alterna cuya magnitud y frecuencia puedan ser controladas. Existen diversos circuitos convertidores de CD-CA; las configuraciones más comunes son:

- Push-Pull
- De medio puente
- De puente completo
- Trifásico

De manera general, sin importar la configuración que se utilice, los circuitos llevan a la señal de CD a una de CA utilizando dispositivos de activación-desactivación controlada, por lo común transistores. En la figura 2.61 se muestra un convertidor de medio puente, cuyo funcionamiento se describe a continuación. Primero, cuando el transistor  $Q_1$  está activo durante un tiempo  $T/2$ , el voltaje instantáneo de salida es de  $V_s/2$ , después se desactiva  $Q_1$  y se activa  $Q_2$ , lo cual produce un voltaje a la salida de  $-V_s/2$ .

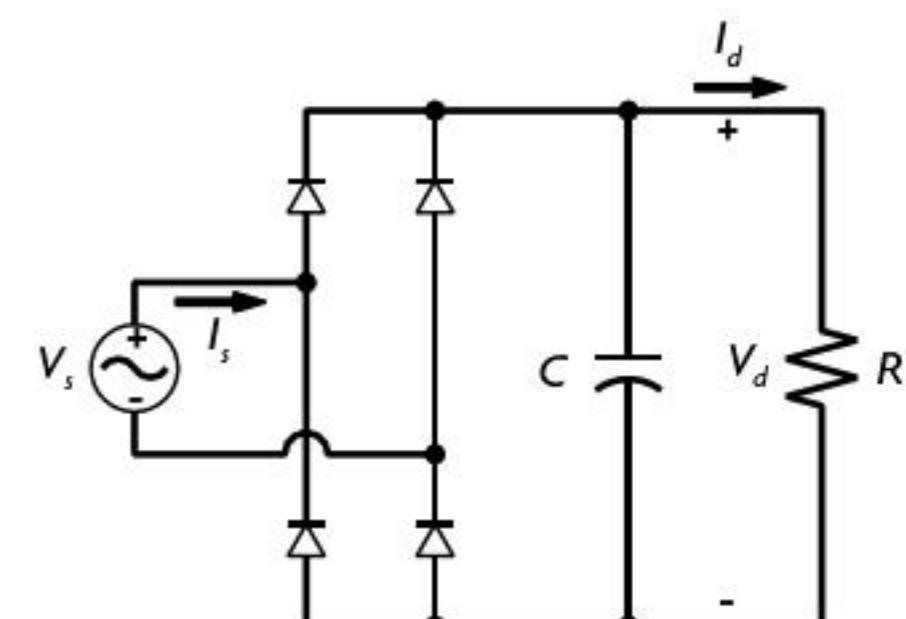


Figura 2.60 Convertidor de CA-CD.

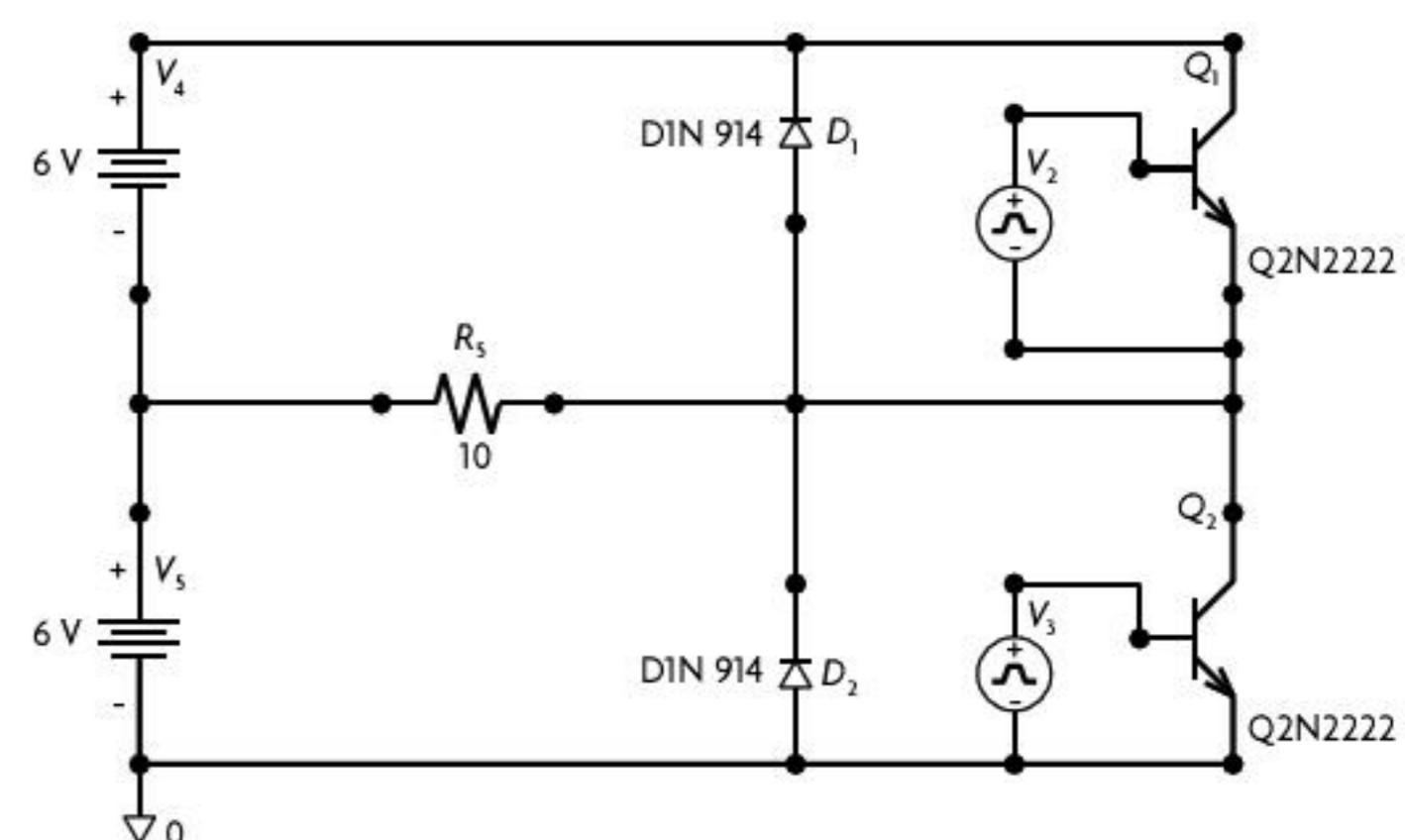
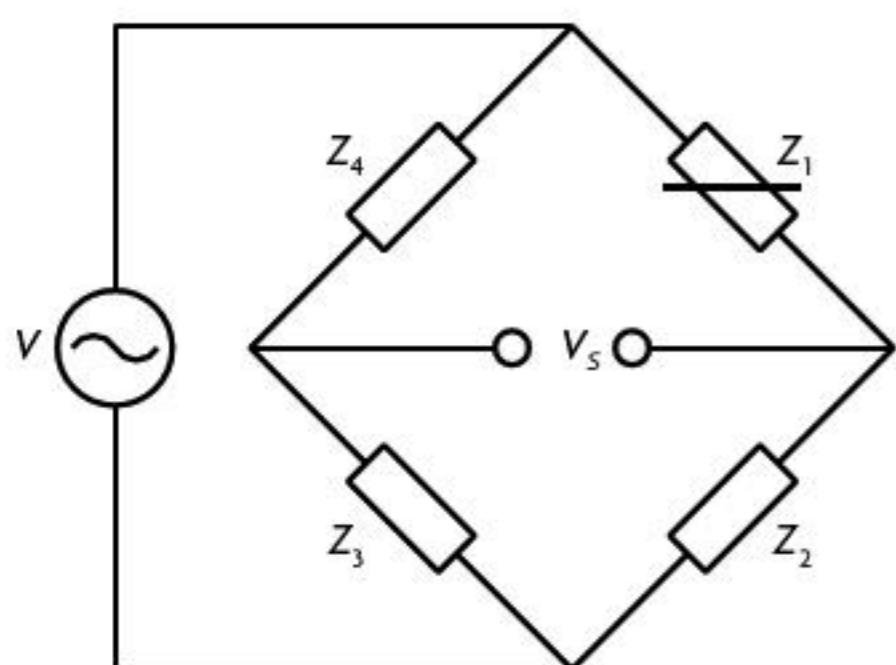


Figura 2.61 Convertidor de medio puente.

**Figura 2.62** Puente de alterna.

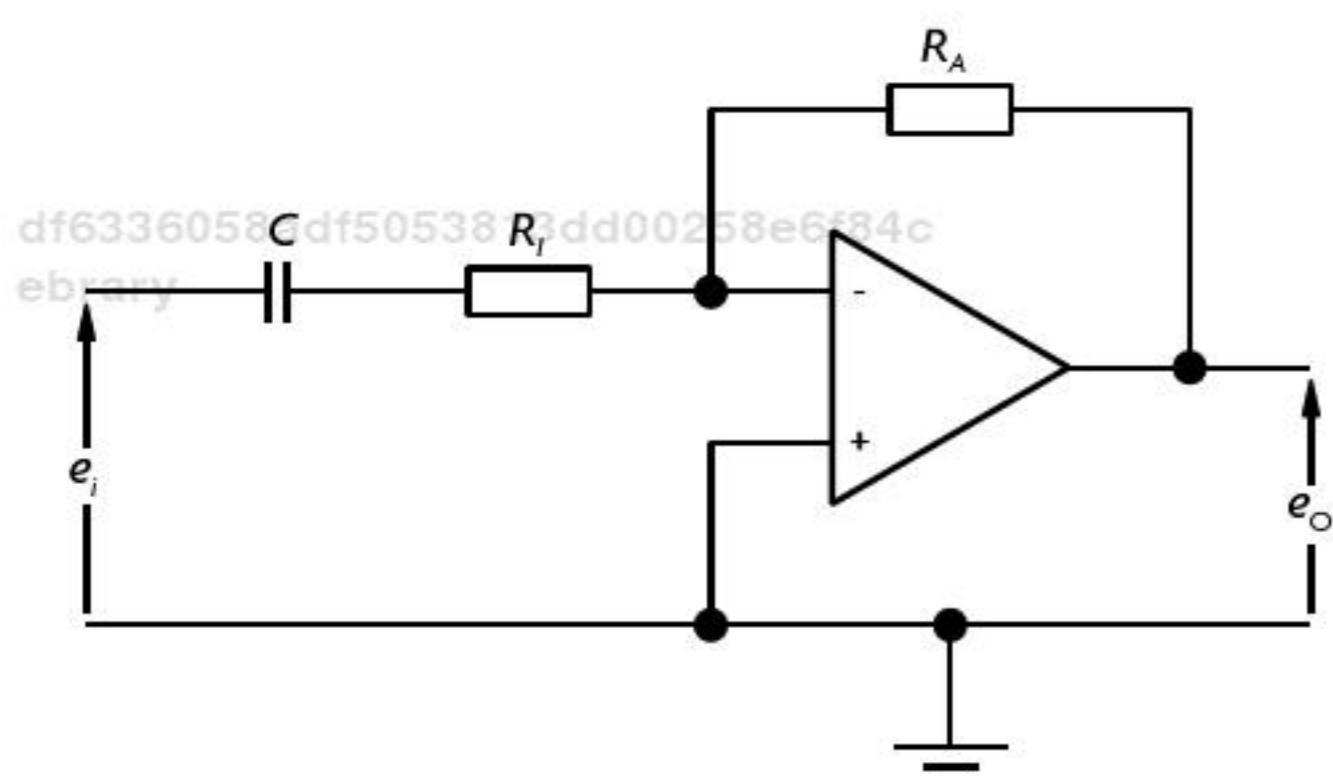
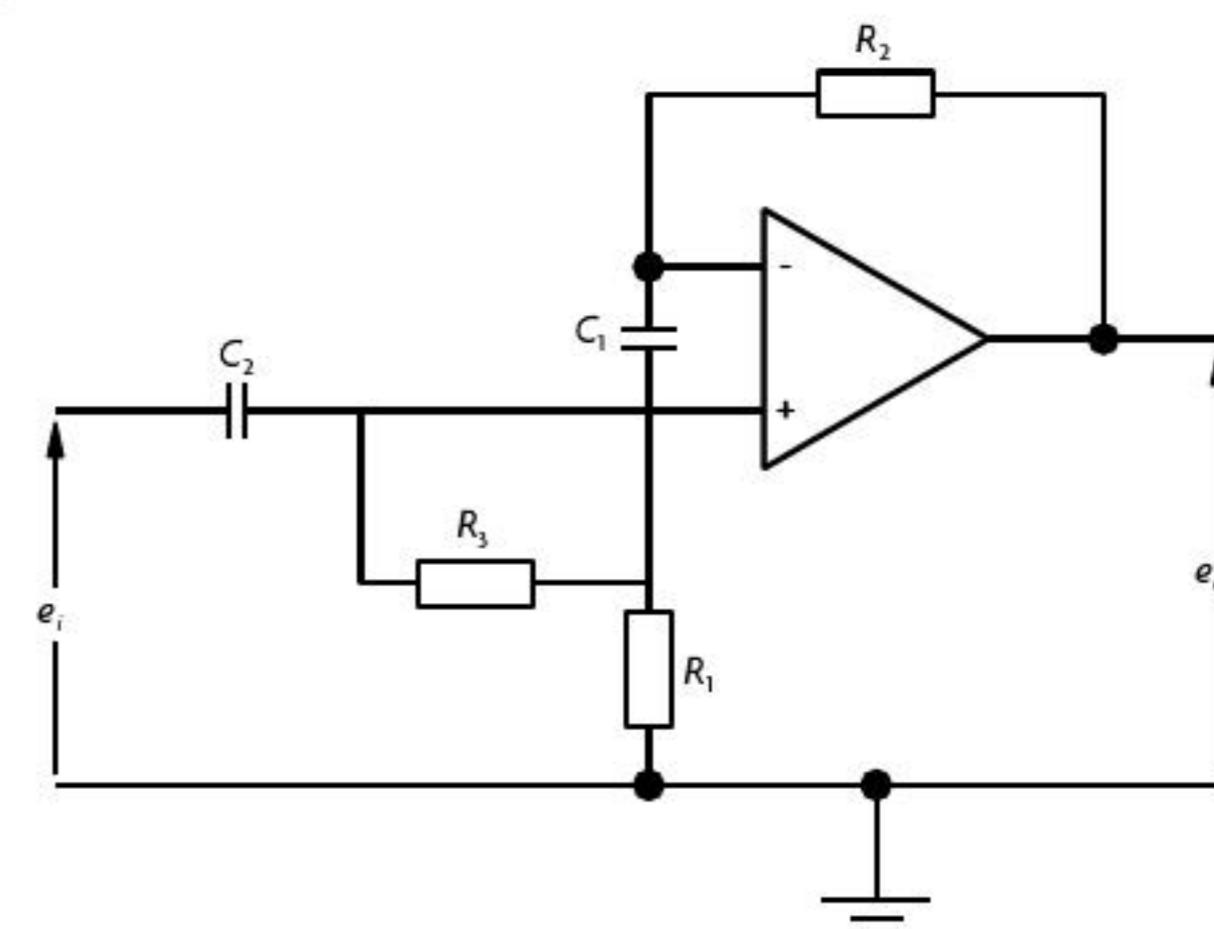
### Puentes y amplificadores de alterna

Los **puentes de alterna** son circuitos que sirven para el acondicionamiento de la señal de sensores de reactancia variable como puede ser un LVDT, donde los elementos variables son cargas inductivas y no resistivas, como en un puente de Wheatstone. El nombre de puentes de alterna proviene del hecho de que el puente se excita con una señal de tensión o corriente alterna dado las cargas inductivas conectadas en este.

En la figura 2.62 se muestra un puente de alterna, donde cada elemento es representado por su impedancia equivalente y se tiene solo un elemento variable ( $Z_1$ ), el cual correspondería al sensor que se desea leer, y el resto de los elementos serían resistencias fijas. Si el sensor que se desea leer es uno de tipo diferencial, entonces dos de las ramas del puente serán cargas inductivas y en las otras dos ramas se colocan resistencias.

Para obtener la lectura de la salida de un puente de alterna es necesario el uso de un amplificador de alterna, que no es más que un circuito de amplificación como los que ya se analizaron antes, pero que tiene una señal de alterna como entrada. Las configuraciones utilizadas para los amplificadores de alterna suelen ser la de amplificador inversor (véase figura 2.63) y el no inversor, ya que para realizar la lectura de la salida del puente de alterna se requiere leer solo uno de los brazos centrales, pues el otro queda referenciado a tierra. En los amplificadores de alterna, la ganancia sigue siendo la misma tanto para el amplificador inversor ( $R_A/R_I$ ) como para el no inversor ( $1 + (R_A/R_I)$ ).

Al utilizar amplificadores operacionales del mismo tipo que se emplean en CD, con señales en CA, no se mantienen todas las características de operación del operacional; una de las características que varía y puede influir de manera importante en la medición es la impedancia de entrada, la cual se ve reducida. Para evitar este inconveniente se suelen usar configuraciones que ayuden a mantener una alta impedancia de entrada en el amplificador operacional, pero que siguen siendo amplificadores inversores y no inversores (véase figura 2.64).

**Figura 2.63** Amplificador inversor de alterna.**Figura 2.64** Amplificador de alterna de alta impedancia de entrada.

## Ejercicios propuestos

- 2.1** Encuentre la corriente que circula por la resistencia de  $6\ \Omega$  en la figura 2.65.

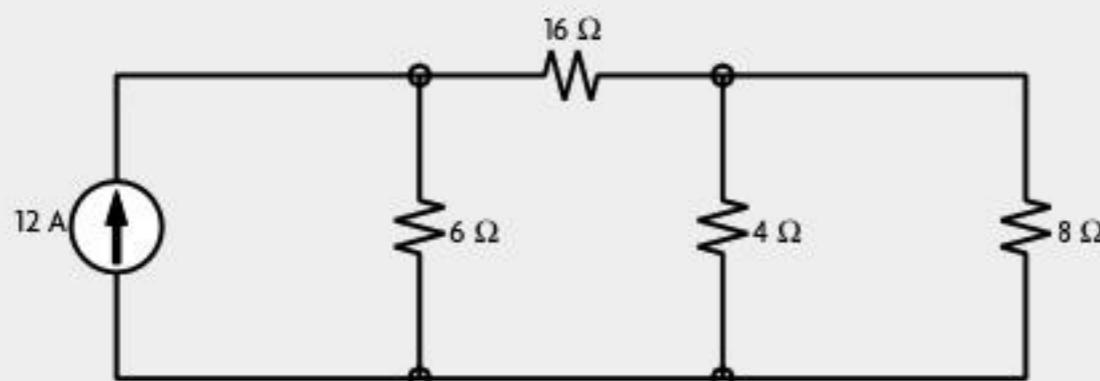


Figura 2.65

- 2.2** Calcule el voltaje de la resistencia de  $4\ \Omega$  en el circuito de la figura 2.65.

- 2.3** En la figura 2.65 sustituya la resistencia de  $8\ \Omega$  por una de valor desconocido  $R$  y encuentre el valor que debe tener la nueva resistencia  $R$  para que fluya una corriente de 2 A por la resistencia de  $6\ \Omega$ .

- 2.4** Calcule el voltaje entre las terminales A y B de la figura 2.66 usando divisores de voltaje.

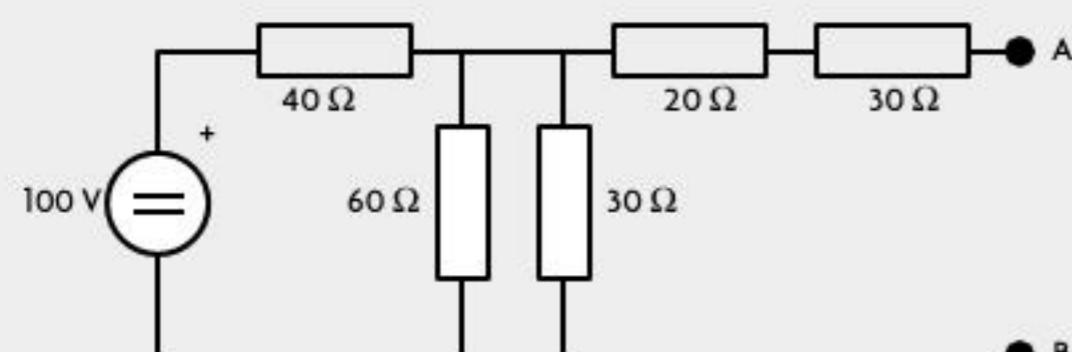


Figura 2.66

- 2.5** Calcule el voltaje entre las terminales A y B de la figura 2.67 usando divisores de voltaje.

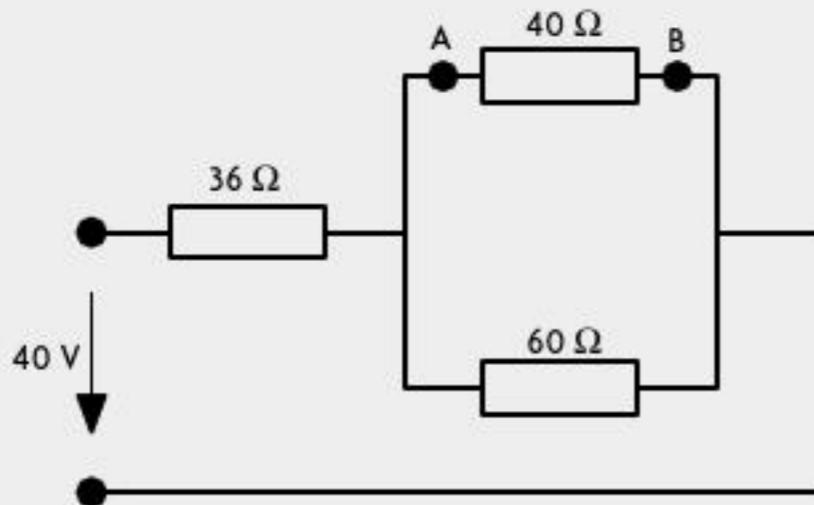


Figura 2.67

- 2.6** El puente de Wheatstone de la figura 2.68 está balanceado cuando los valores de  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  son  $100\ \Omega$ ,  $350\ \Omega$  y  $80\ \Omega$ , respectivamente. ¿Cuál es el valor de  $R_1$ ? Considere  $V_B = 3.5\text{ V}$ .

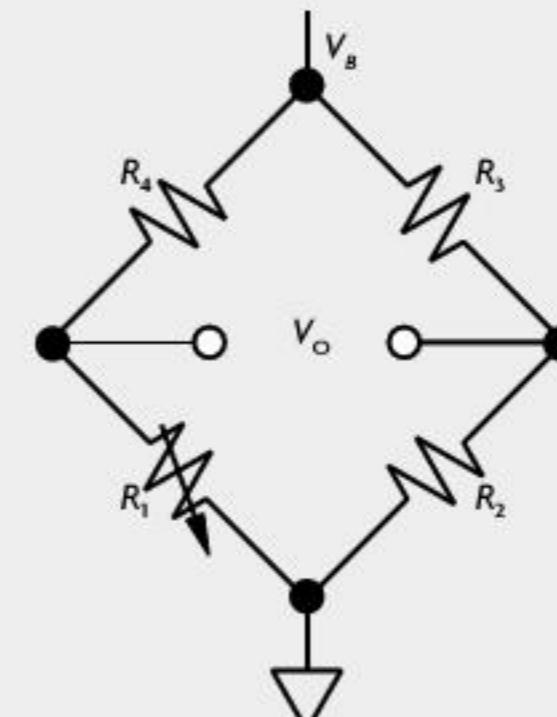


Figura 2.68

- 2.7** Considere el circuito de la figura 2.68 con valores de  $1000\ \Omega$ ,  $330\ \Omega$ ,  $800\ \Omega$  y  $500\ \Omega$ , para  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ , respectivamente, si  $V_B = 12\text{ V}$ . ¿Cuál es el valor de  $V_o$ ?

- 2.8** Calcule el voltaje de salida de los circuitos de amplificación de la figura 2.69.

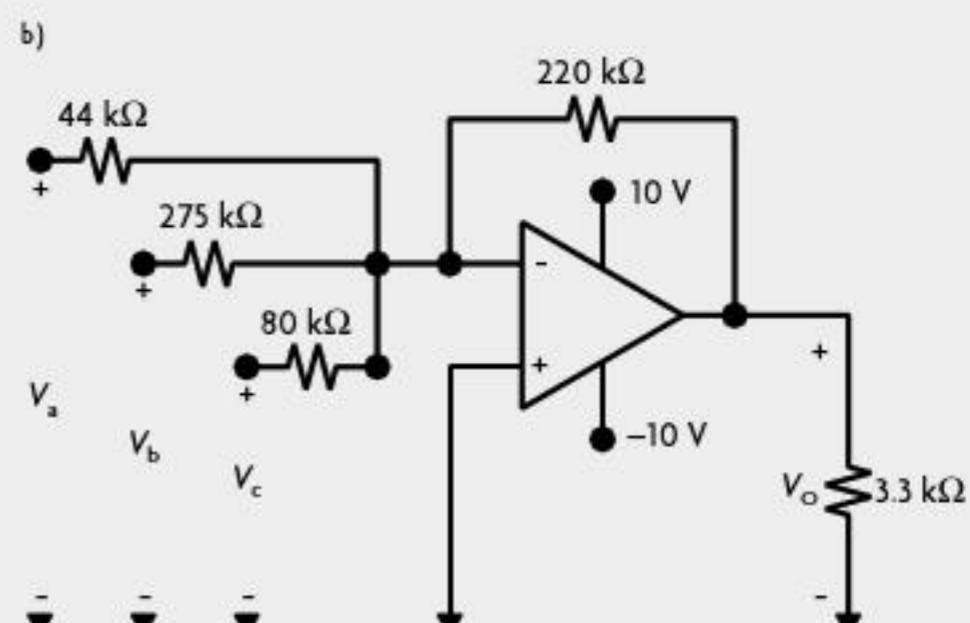
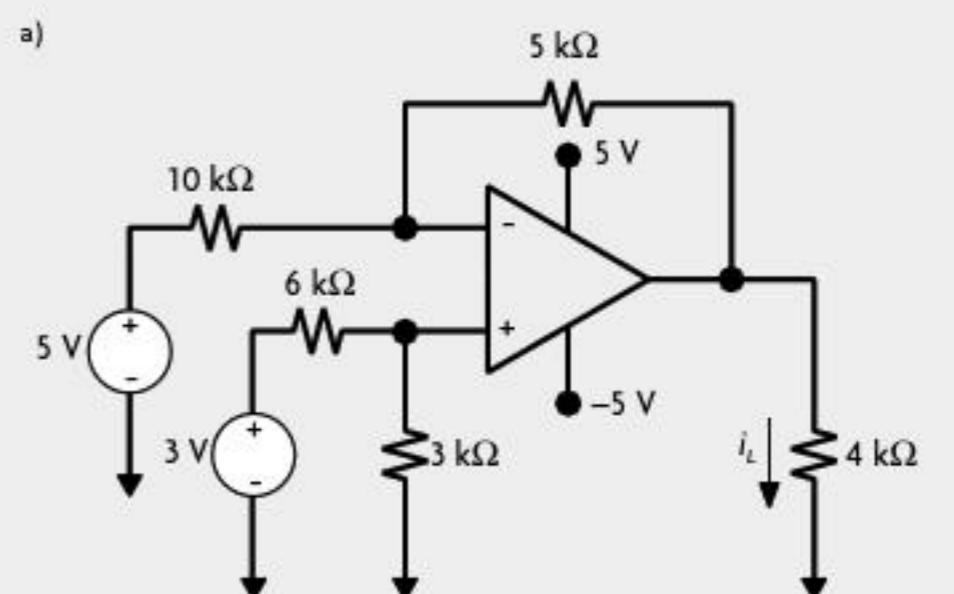


Figura 2.69

**2.9** Determine el voltaje de salida de los circuitos de la figura 2.70.

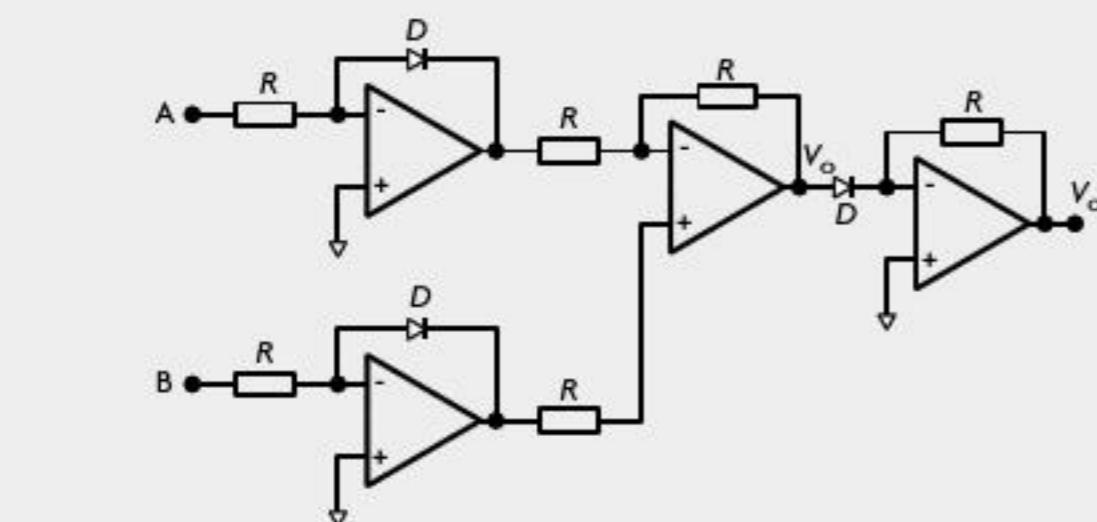
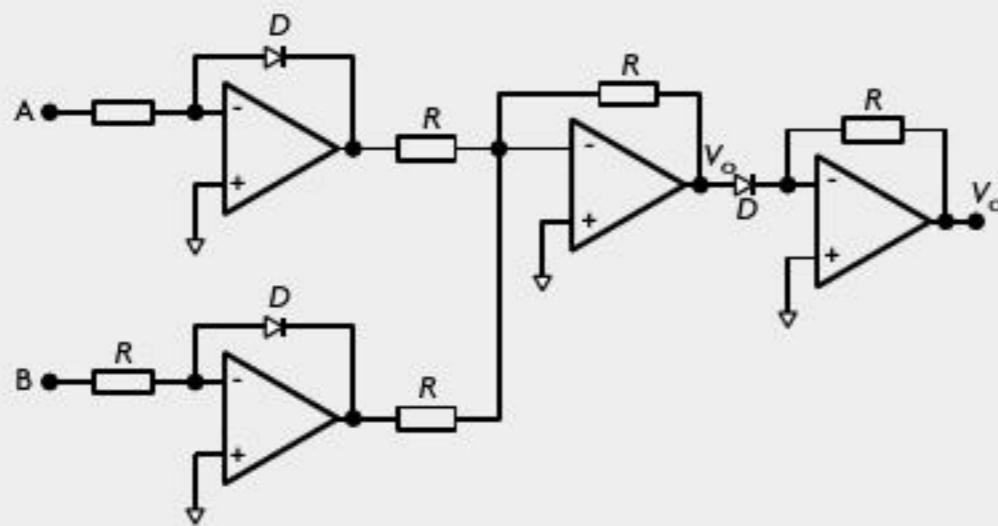


Figura 2.70

**2.10** Determine el voltaje de salida de los circuitos de la figura 2.71.

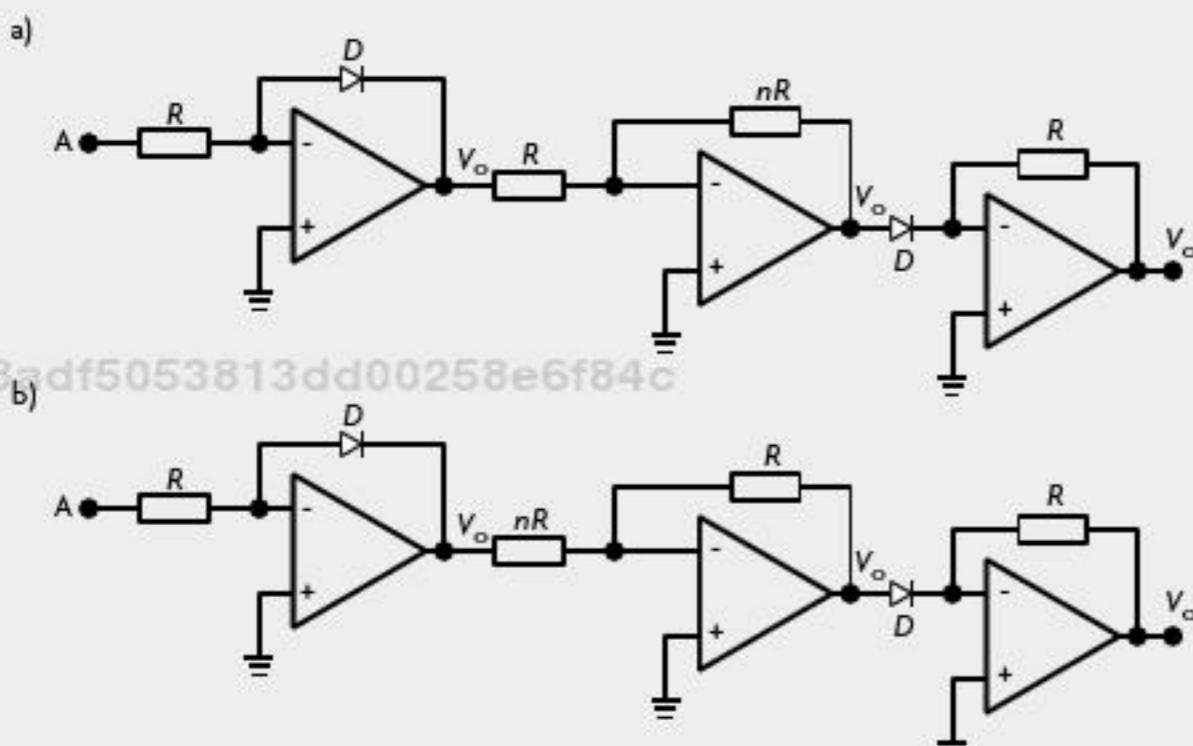


Figura 2.71

**2.11** Realice un análisis que demuestre que el circuito de la figura 2.72 es un filtro pasa bajas.

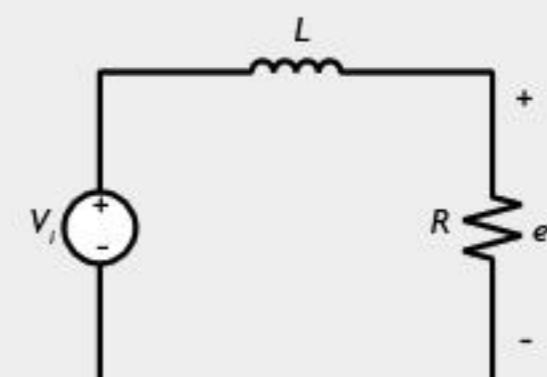


Figura 2.72

**2.12** Realice un análisis que demuestre que el circuito de la figura 2.73 es un filtro pasa altas.

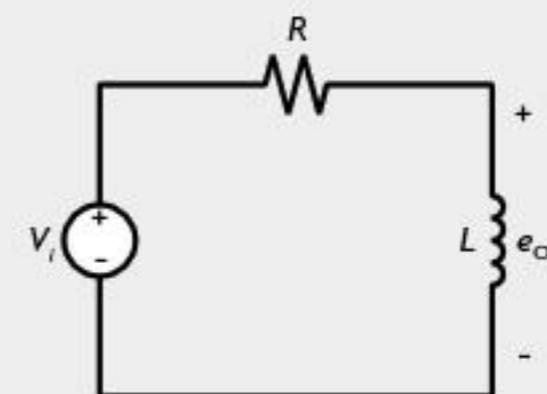


Figura 2.73

**2.13** Realice un análisis que demuestre que el circuito de la figura 2.74 es un filtro rechaza banda.

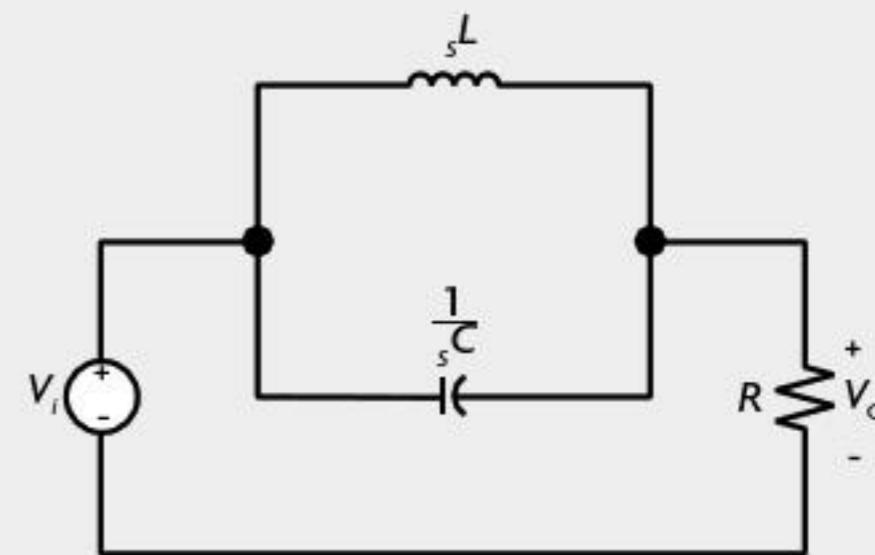


Figura 2.74

**2.14** Calcule las frecuencias de corte y la frecuencia central del filtro pasa banda que se muestra en la figura 2.54, si  $C = 50$ ,  $nFL = 10 \text{ mH}$  y  $R = 50 \text{ k}\Omega$ .

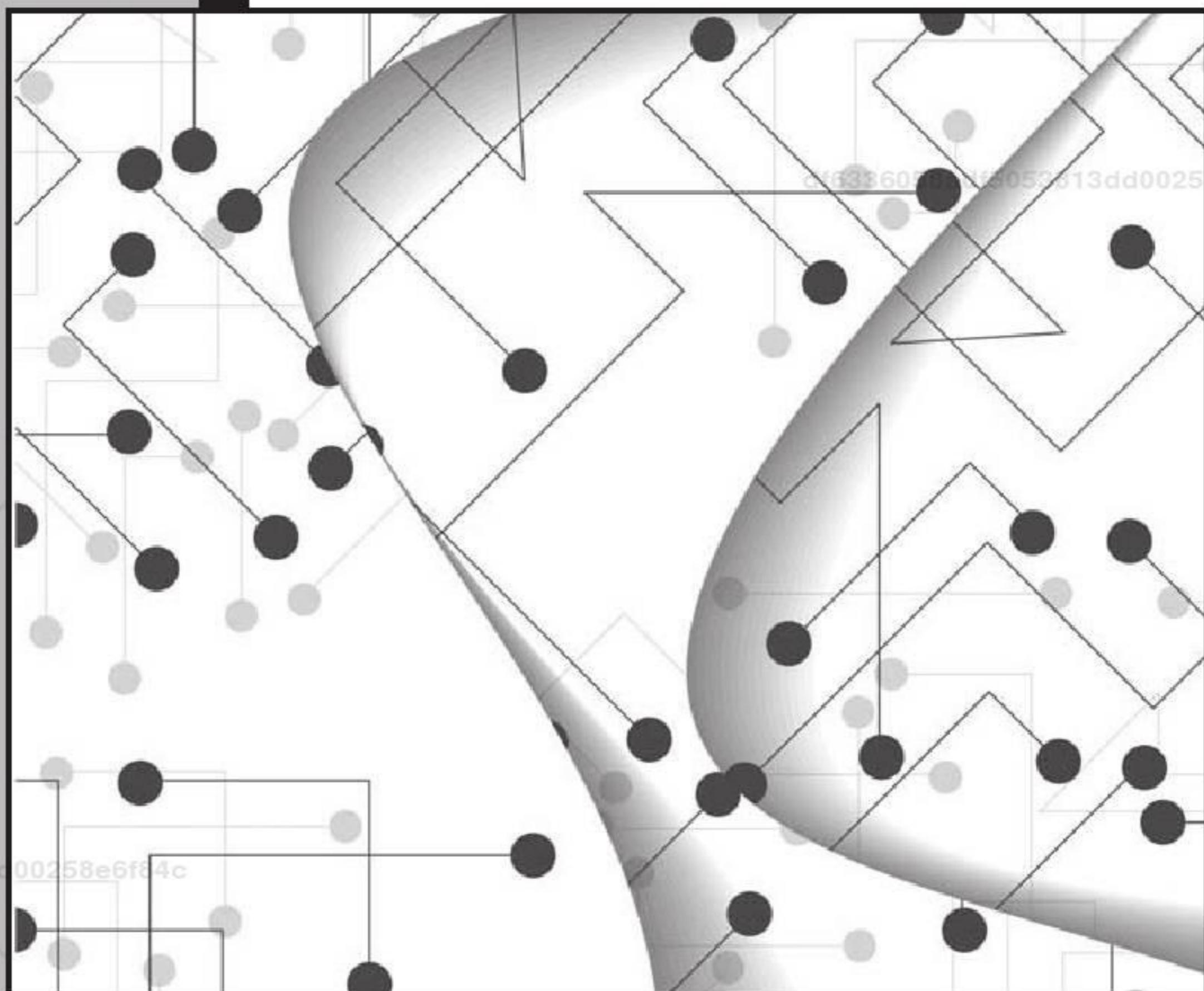
**2.15** Calcule la frecuencia de corte del circuito  $R_C$  de la figura 2.51, si  $R_A = 20 \text{ k}\Omega$  y  $C = 150 \text{ nF}$ , y la ganancia del mismo si  $R_A = 5 \text{ k}\Omega$ .



Descarga en tu  
computadora

# 3I

## Sensores de velocidad, posición y aceleración



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

#### Objetivo general

#### Objetivos particulares

- ▶ Para el estudio de este capítulo es necesario tener conocimientos elementales de electrónica y del principio de transducción, así como estar familiarizado con el uso del lenguaje de programación y la interfaz de Arduino®.
- ▶ Conocer los sensores de posición, velocidad y aceleración utilizados para la medición de distintas variables físicas, así como sus aplicaciones más comunes.
- ▶
  - Distinguir cuáles sensores se utilizan para cada una de las variables físicas tratadas en este capítulo.
  - Identificar cuál es el tipo de sensor más conveniente cuando se trata de medir posición, velocidad o aceleración.
  - Implementar distintos tipos de sensores para medición de posición.
  - Implementar distintos tipos de sensores para medición de velocidad.
  - Implementar distintos tipos de sensores para medición de aceleración.

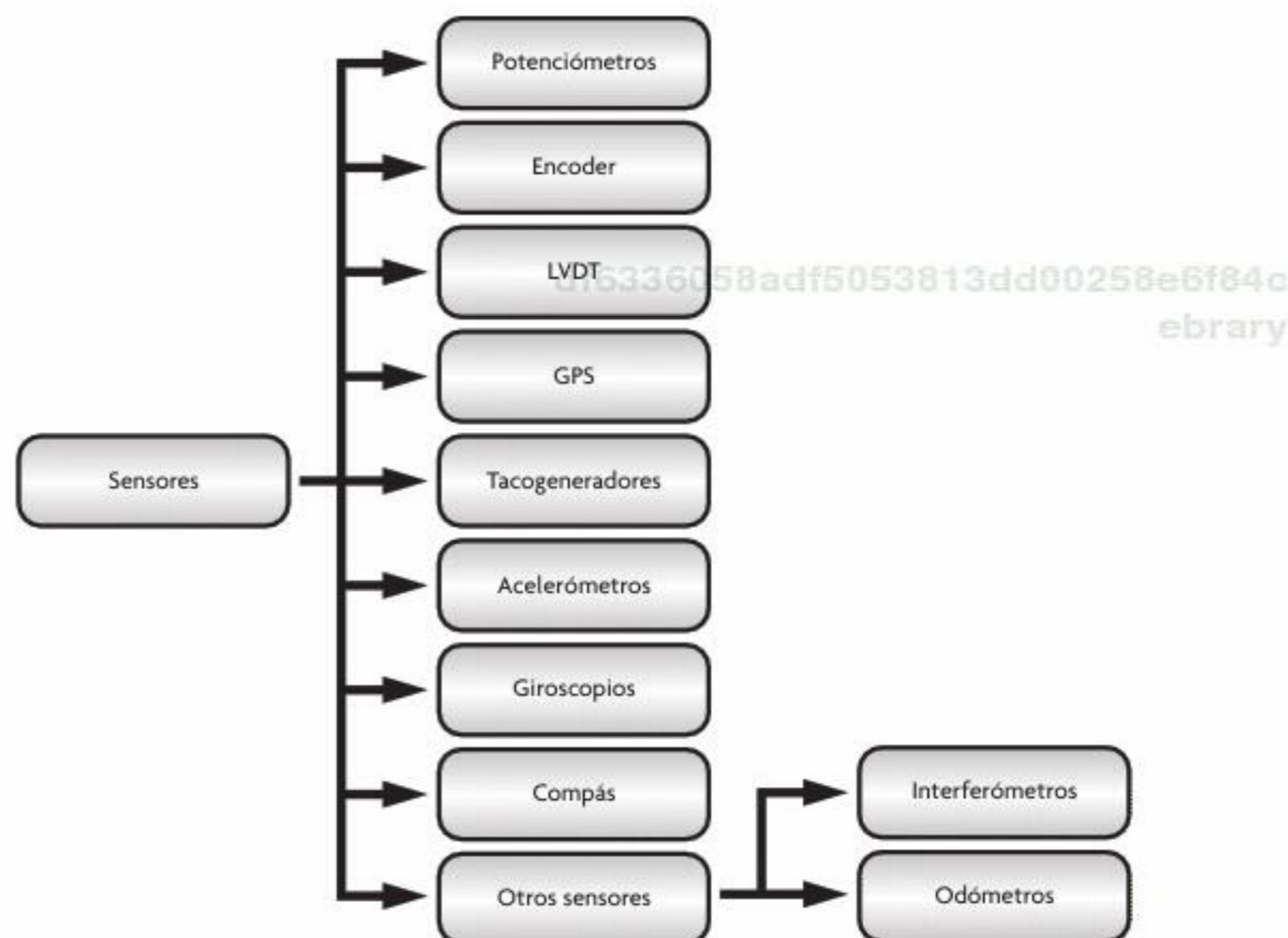
## Introducción

Para la medición de variables físicas, como velocidad, posición o aceleración, siempre se debe tener en cuenta si el comportamiento de dicha variable es rotacional o traslacional. Se dice que una variable física tiene un comportamiento rotacional cuando esta se puede describir en términos de un ángulo, mientras que una variable física traslacional se caracteriza por presentar solo movimiento rectilíneo (véase la figura 3.1).

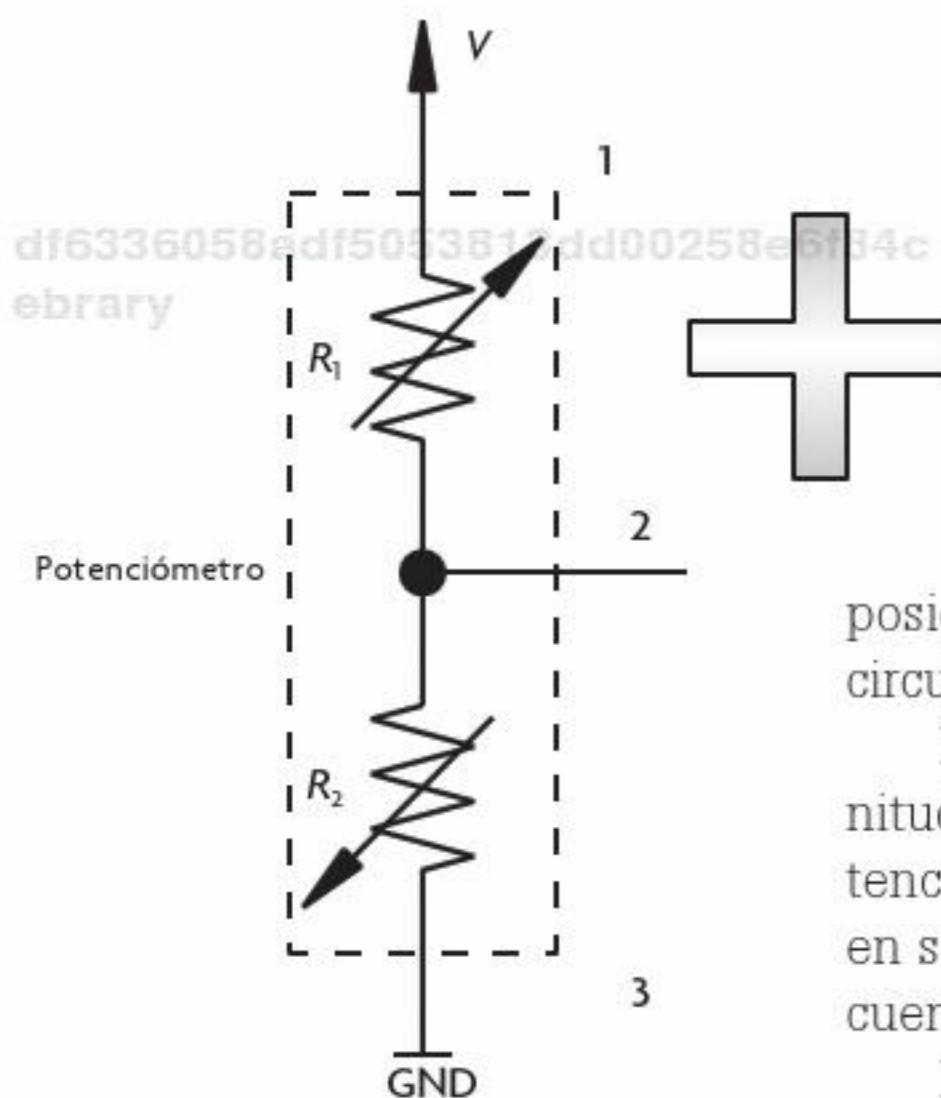
Los sensores más utilizados para sensar este tipo de variables físicas se relacionan en el esquema de la figura 3.2.



**Figura 3.1** Movimiento rectilíneo y movimiento angular.



**Figura 3.2** Sensores más utilizados para sensar posición, velocidad o aceleración.



**Figura 3.3**  
Circuito equivalente  
potenciómetro.

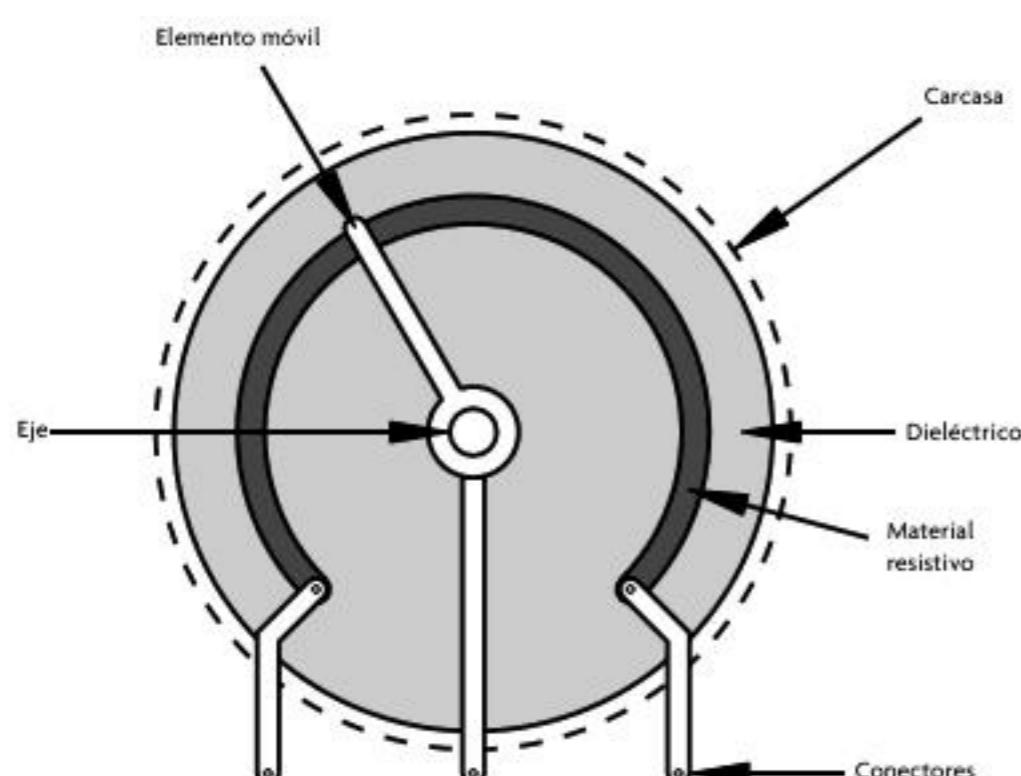
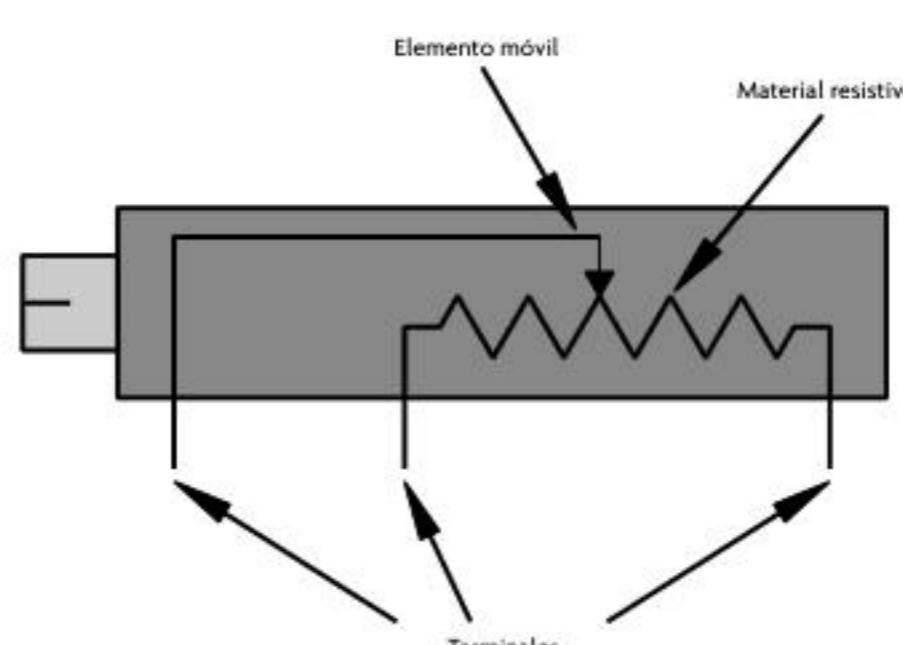
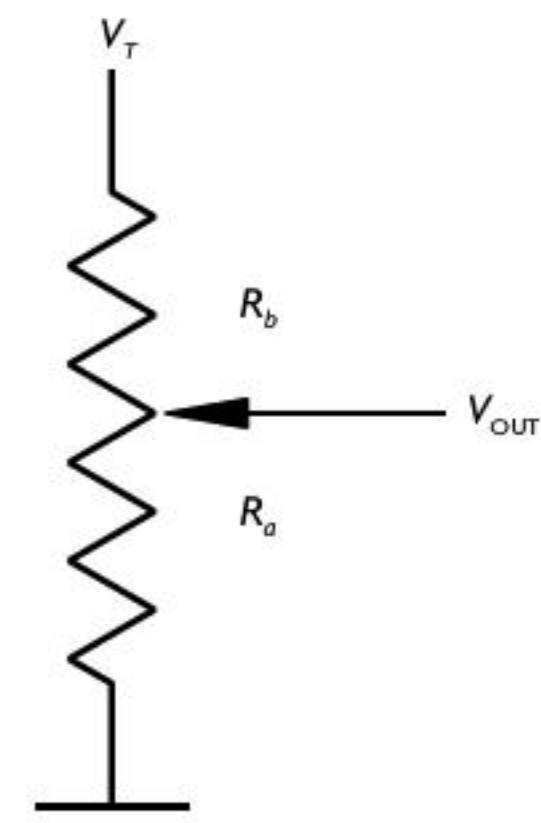
### 3.1 Potenciómetros

Un potenciómetro es un transductor entre la posición de un objeto, ya sea lineal o angular, y un cambio de resistencia. Este tipo de elementos resistentes se utiliza normalmente con un voltaje en CC. Constan de tres terminales, una en cada extremo del material, y una tercera terminal que recorre el cuerpo del elemento resistivo, de tal manera que la resistencia entre la terminal móvil y cada una de las terminales fijas varía cuando el elemento móvil cambia de posición; así, cuando una resistencia disminuye, la otra necesariamente aumenta. El circuito equivalente se puede observar en la figura 3.3.

En el potenciómetro, si el elemento móvil se desplaza en sentido positivo, la magnitud de la resistencia entre el nodo 1 y el nodo 2 disminuye, al tiempo que la resistencia entre el nodo 2 y 3 aumenta. Por el contrario, si el elemento móvil se desplaza en sentido opuesto, la resistencia entre el nodo 1 y el nodo 2 aumenta; como consecuencia, la resistencia entre el nodo 2 y 3 disminuye.

Las arquitecturas básicas para un potenciómetro se muestran en las figuras 3.4 y 3.5. En el caso de la figura 3.4 se trata de un potenciómetro rotacional; este tipo de presentación es la más usual, aunque existen otras más compactas y de mayor precisión, conocidas como trimpot. Por su parte, en la figura 3.5 se observa un potenciómetro de movimiento lineal.

Ya sea que se trate de un potenciómetro de movimiento lineal o de uno rotacional, para determinar en dónde se encuentra el elemento móvil se hace uso de un divisor de voltaje. La forma de repre-

**Figura 3.4** Potenciómetro rotacional.**Figura 3.5** Potenciómetro de movimiento lineal.**Figura 3.6** Símbolo de un potenciómetro.

sentar un potenciómetro en un circuito eléctrico es mediante el uso de un solo símbolo de resistencia y su indicador móvil (véase figura 3.6).

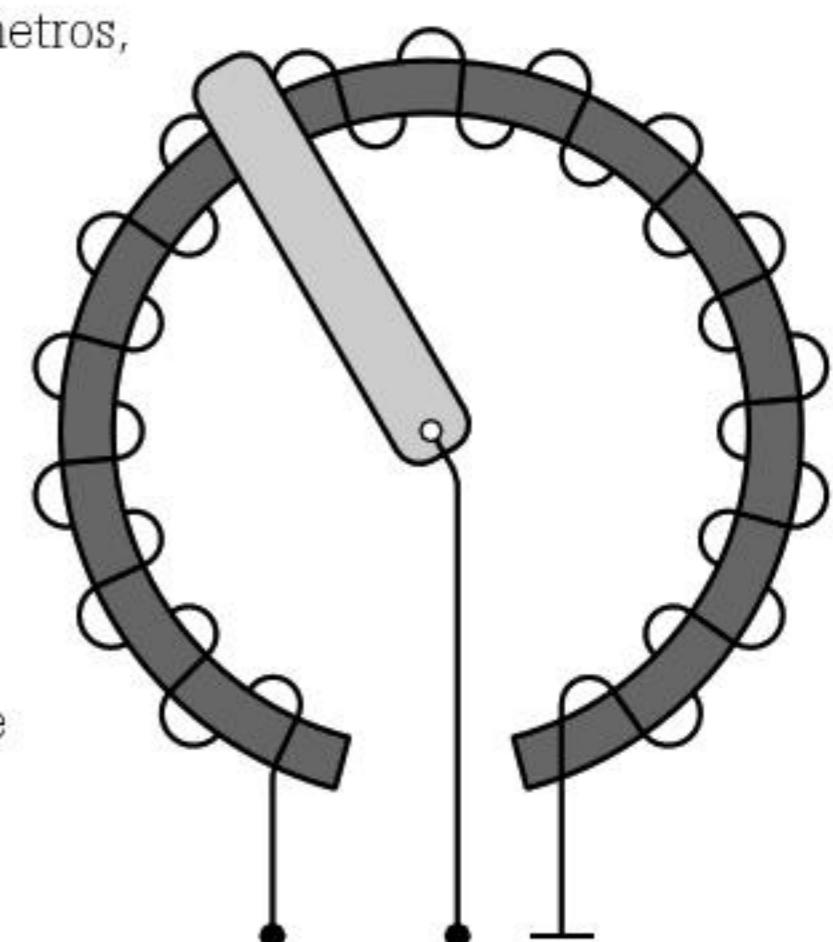
Para lograr una correlación entre el voltaje de salida y la posición de un determinado objeto, suele ser común acoplar mecánicamente el elemento móvil del potenciómetro al objeto; así, cuando el elemento móvil del potenciómetro se encuentre en uno de los extremos, el voltaje a la salida será máximo, de otra manera cuando el elemento móvil esté en la parte proximal, el voltaje a la salida será mínimo. Esta correlación se puede calcular usando la siguiente fórmula:

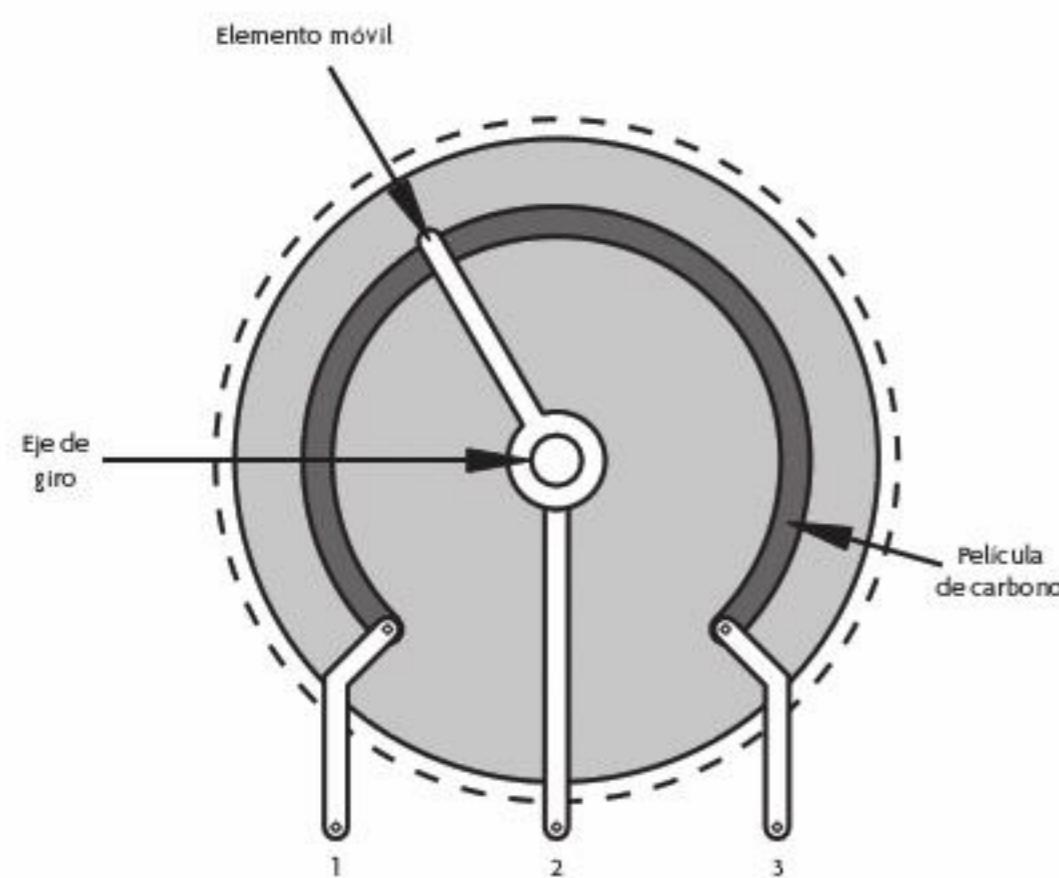
$$V_{\text{out}} = \frac{R_a}{R_b + R_a} V_t$$

donde la resistencia  $R_a$  estará dada entre el nodo de referencia a tierra y el nodo de  $V_{\text{out}}$ , mientras que la resistencia  $R_b$  estará dada entre el nodo de  $V_t$  y el nodo de  $V_{\text{out}}$ . Al momento de utilizar este tipo de instrumentación para determinar la posición de un objeto, se debe tener en cuenta cuáles son las características del potenciómetro, ya que para estas aplicaciones lo más recomendable es utilizar un potenciómetro cuyo cambio a la salida sea lineal. Cabe hacer la distinción aquí que cuando se habla de linealidad en el comportamiento del sensor se hace referencia a que la entrada sea linealmente proporcional a la salida y no al tipo de movimiento que presenta el elemento móvil. Qué tan lineal será el comportamiento de cada potenciómetro dependerá, en mayor medida, del tipo de material con el que esté constituido.

Algunas configuraciones comúnmente utilizadas en la fabricación de potenciómetros, ya sean rotacionales o lineales, se presentan a continuación.

- **Potenciómetros de bobina.** Se fabrican con una bobina alrededor de un material dieléctrico. En general, el alambre que forma la bobina está aislado eléctricamente y el deslizador pasa a lo largo de la bobina, de tal manera que existe una zona en la que el deslizador y la bobina están en contacto, ya que, con antelación, el aislante se elimina solo del camino recorrido por el deslizador. Este tipo de implementación presenta varias desventajas, como una baja resolución, ya que el mínimo intervalo de resistencia constituye la distancia entre una vuelta y otra de la bobina; así, por ejemplo, si la bobina está compuesta por  $n$  vueltas, la resolución que tendrá el sensor será de  $(1/n)\%$  (véase figura 3.7).
- **Películas de carbono.** Este tipo de potenciómetros son fabricados con una mezcla de carbono y arcilla, y se colocan sobre un elemento no conductor, llamado sustrato. La mezcla entre el carbono y la arcilla proporciona la resistencia por la cual pasará el deslizador. Debido a que este

**Figura 3.7** Potenciómetro de bobina.



**Figura 3.8** Potenciómetro de película de carbono.

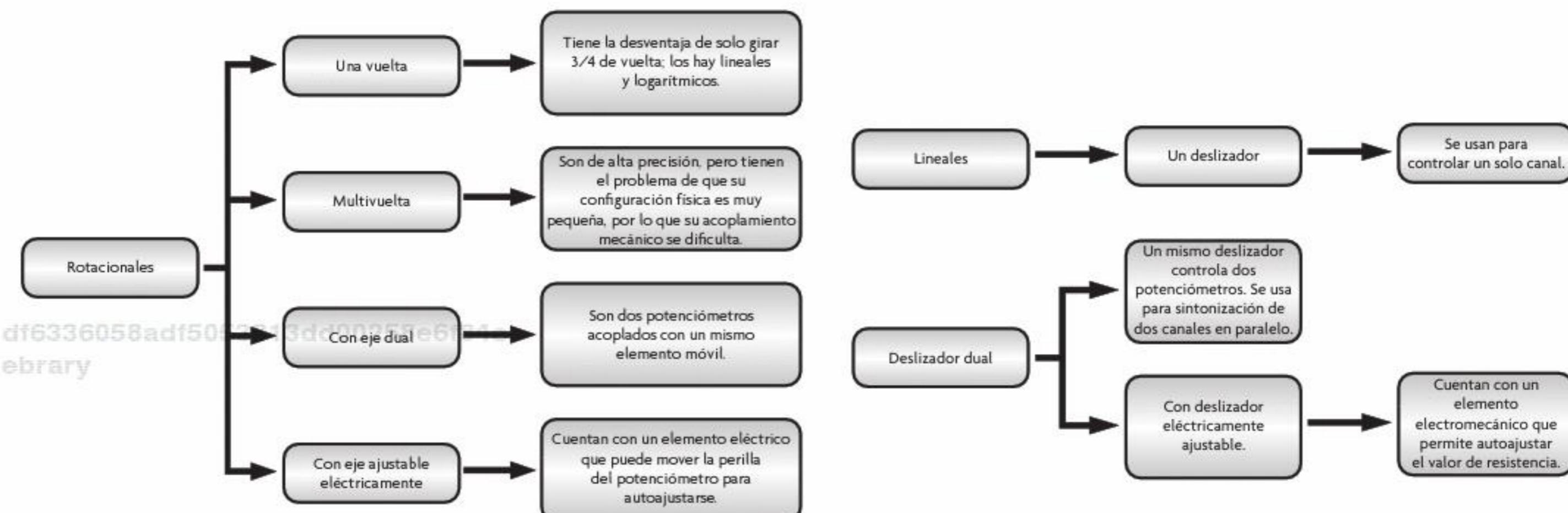
constituye un camino continuo, la resolución del sensor mejora, dado que la superficie del elemento resistivo es más suave al contacto e induce un menor ruido mecánico al elemento móvil, en comparación con el potenciómetro de bobina (véase figura 3.8).

- **Elementos plásticos conductores.** La fabricación de este tipo de potenciómetro consiste en mezclar carbono, como en el caso del potenciómetro de película de carbono, pero esta vez con una película conductora, la cual tiene la ventaja de ser mucho más suave al contacto con el deslizador, comparada con la película de carbono; sin embargo, su desempeño en altas temperaturas es peor que el potenciómetro de película de carbono.

- **Películas metálicas.** Este tipo de potenciómetro se obtiene al depositar una aleación metálica sobre un cerámico; tiene la ventaja de ser más duradero.

- **Cermet.** Su nombre proviene de la abreviatura en inglés de "metal cerámico", debido a que, en su mayoría, está compuesto de una mezcla de cerámicos y partículas metálicas. Esta mezcla se coloca sobre un sustrato cerámico y es calentada hasta que se incorpora. El cermet tiene la durabilidad de un elemento metálico y una baja dependencia de la temperatura, además de que posee todas las propiedades resistivas de un material cerámico.

De acuerdo con su desempeño y el tipo de movimiento del deslizador, los potenciómetros suelen clasificarse como se muestra en los esquemas de las figuras 3.9 y 3.10.



**Figura 3.9** Sensores de resistivos de posición angular.

**Figura 3.10** Sensores resistivos de posición lineal.

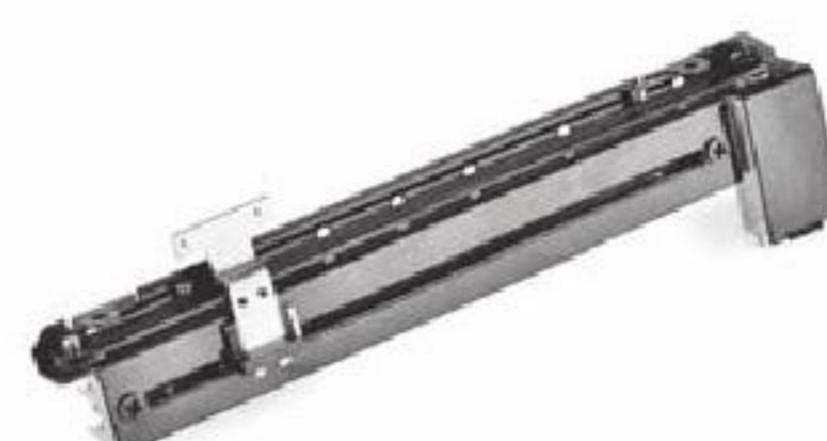
A continuación se muestran algunos ejemplos de este tipo de potenciómetros.



**Figura 3.11** Potenciómetro lineal dual.



**Figura 3.12** Potenciómetro rotatorio dual.



**Figura 3.13** Potenciómetro lineal con deslizador eléctricamente ajustable.

## Ejercicio de aplicación

### Lectura de un potenciómetro logarítmico y un potenciómetro lineal

#### Potenciómetros lineal y logarítmico

##### Objetivo

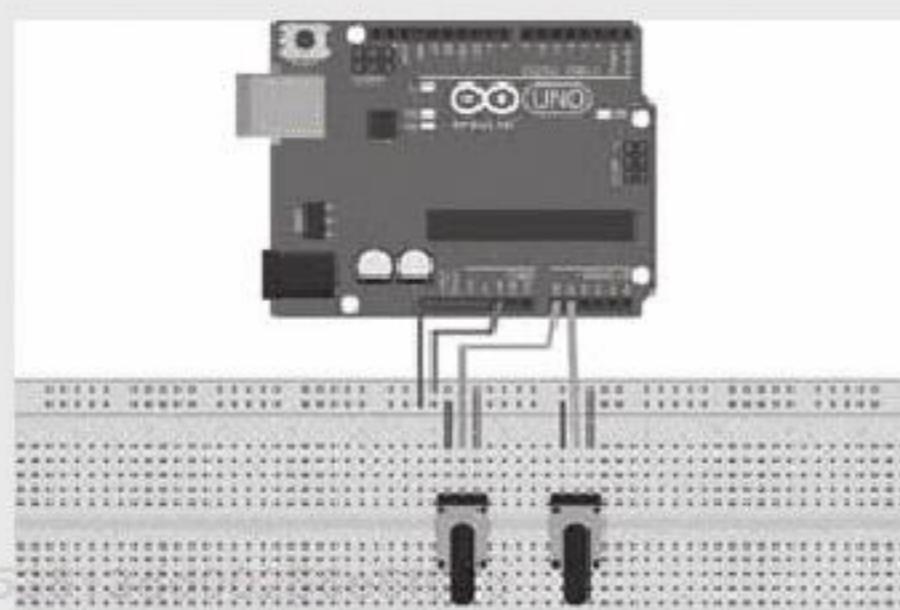
Medir y observar (en el monitor serial) los cambios de un divisor de tensión al rotar la perilla de un potenciómetro lineal y de uno logarítmico, a través del ADC que incorpora Arduino Uno®.

##### Material

- Arduino IDE 1.0.5®
- Arduino Uno®
- 1 potenciómetro lineal de 10 k
- 1 potenciómetro logarítmico de 10 k
- 5 cm de alambre 24 AWG
- 4 cables Dupont® macho-macho
- 1 Protoboard®
- Resistencia de 2.2 k (opcional)

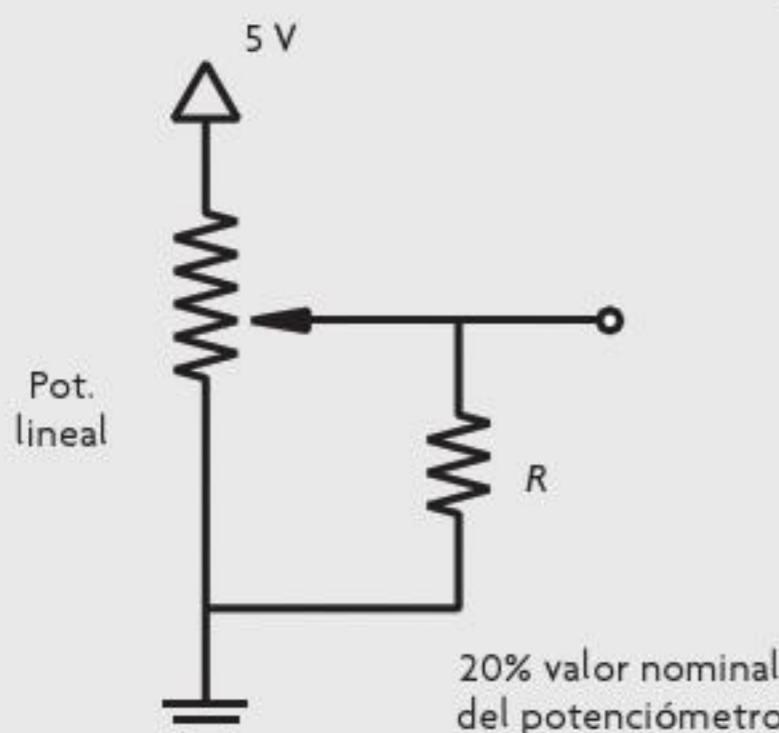
##### Desarrollo

1. Armar el diagrama como se muestra a continuación.



**Figura 3.14** Diagrama de conexión.

2. Si no se cuenta con un potenciómetro logarítmico, es posible simularlo utilizando un potenciómetro lineal y conectando una resistencia, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.15** Circuito para simular potenciómetro logarítmico.

3. Analizar e implementar el siguiente programa en Arduino Uno®.

```
/*
LECTURA DE UN POTENCIOMETRO
Este programa realiza la lectura de la posición
de dos potenciómetros (uno lineal y uno
logarítmico por medio de dos de los canales
analógicos disponibles en Arduino Uno
*/
// Pines de entrada
int inputPot1 = A0; // Pin de lectura
    Potenciometro 1 - Lineal
int inputPot2 = A1; // Pin de lectura
    Potenciometro 2 - Logaritmico

// Variables
int valuePot1 = 0; // Almacena posicion
    Potenciometro 1
int valuePot2 = 0; // Almacena posicion
    Potenciometro 2

void setup(){
    Serial.begin(9600); // Configura e inicia
    comunicacion serie a 9600 Baudios
}

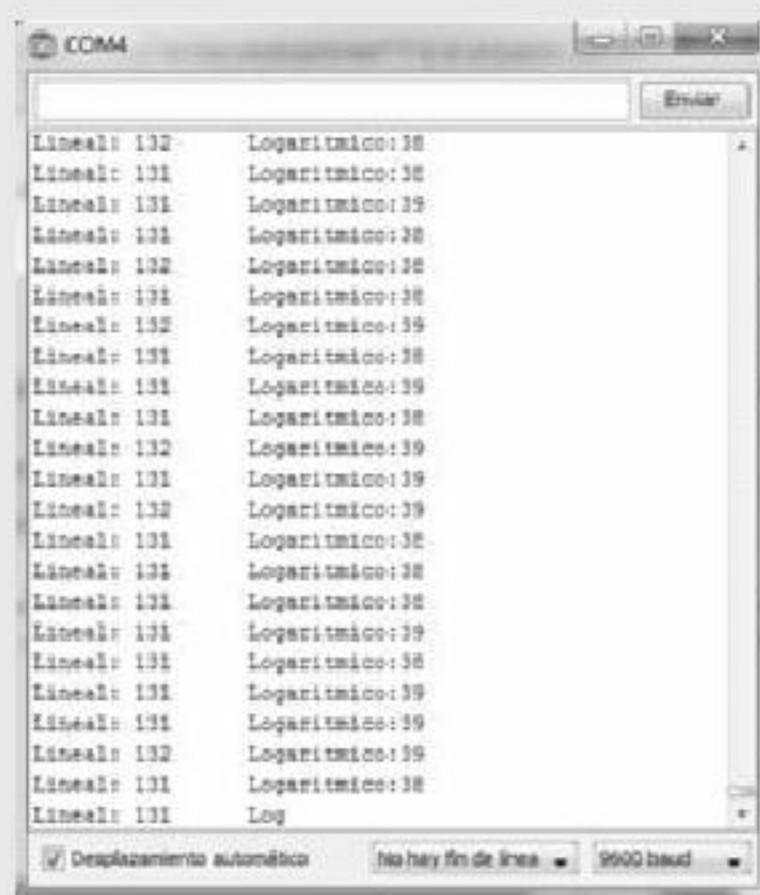
void loop(){
    // Lectura analogica y conversión a digital
    valuePot1 = analogRead(inputPot1);
        // Lee Potenciometro 1
    valuePot2 = analogRead(inputPot2);
        // Lee Potenciometro 2

    // Envio de datos por puerto serie
    Serial.print("Lineal: ");
    Serial.print(valuePot1);
        // Envía posicion de Pot1
    Serial.print("\t Logaritmico: ");
    Serial.println(valuePot2);
        // Envía posicion de Pot2
}
}
```

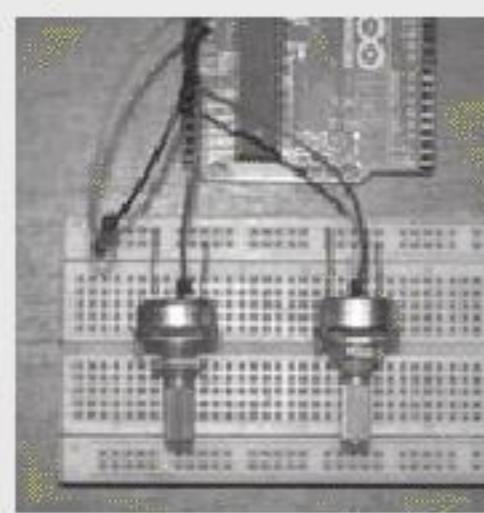
4. Probar el circuito rotando en la misma proporción ambos potenciómetros; los valores obtenidos por el ADC deberán ser diferentes para mismas posiciones de los potenciómetros, debido a su configuración lineal o logarítmica.

A continuación se muestran algunas imágenes del funcionamiento al finalizar la práctica. En todo momento, los potenciómetros se rotaron en la misma proporción; en el monitor serial se pueden observar los cambios.

a)

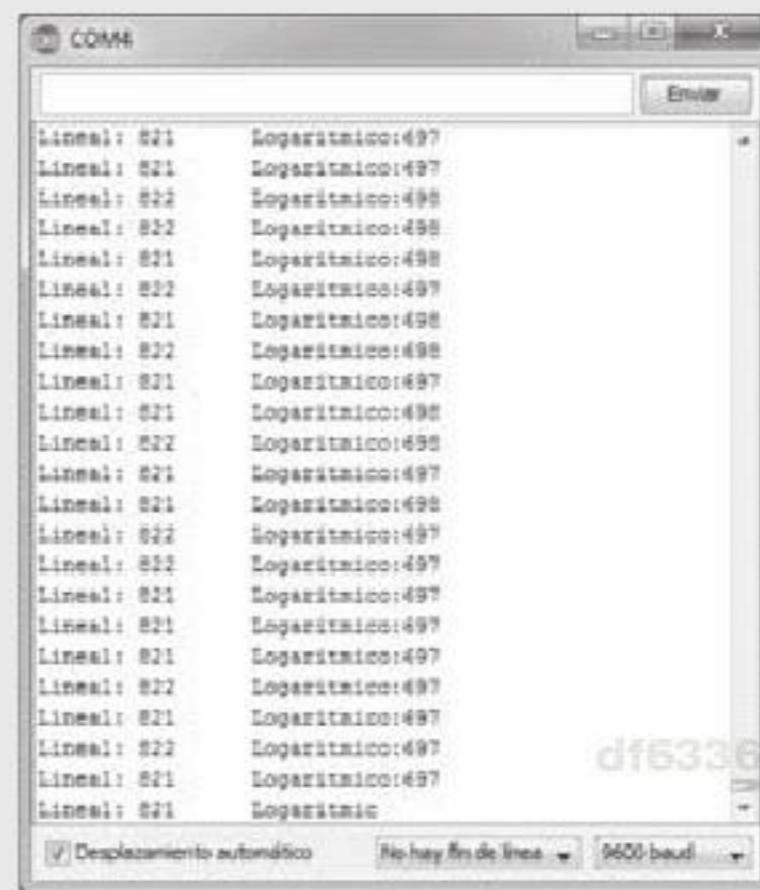


b)

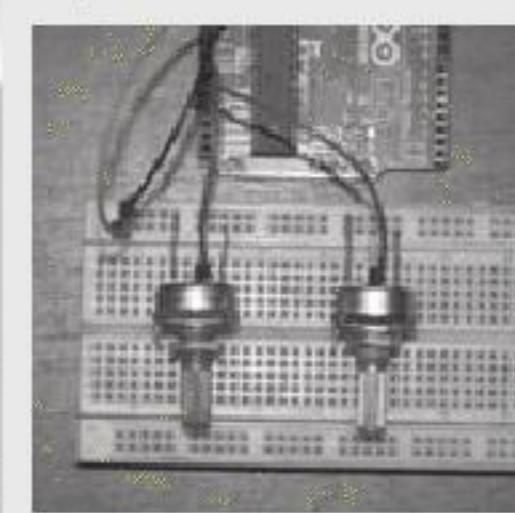


**Figura 3.16** a) Potenciómetro lineal. b) Potenciómetro logarítmico.

a)

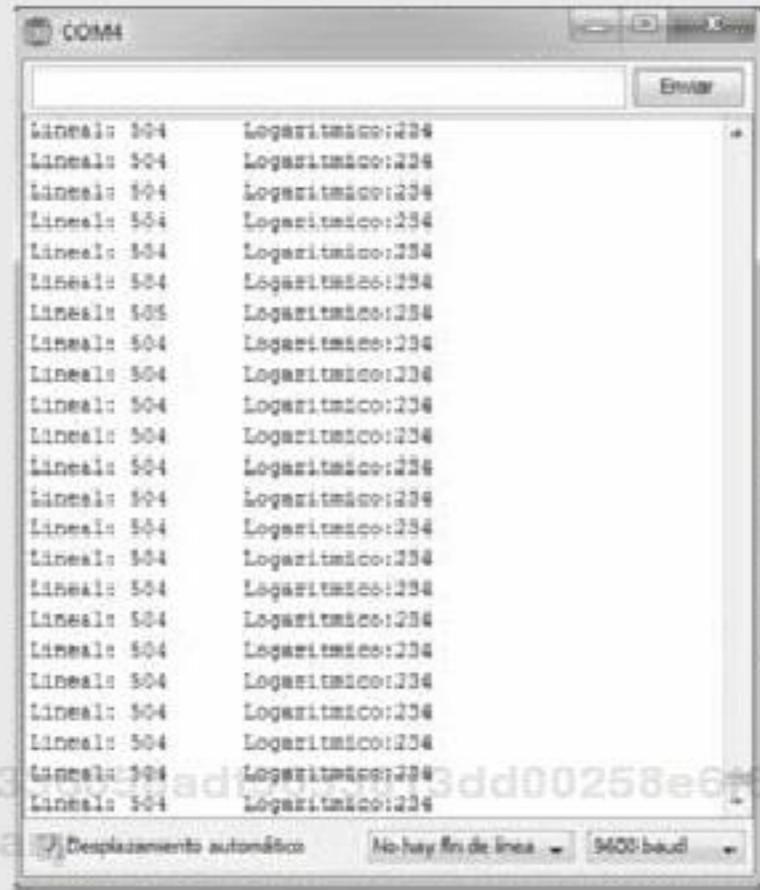


b)

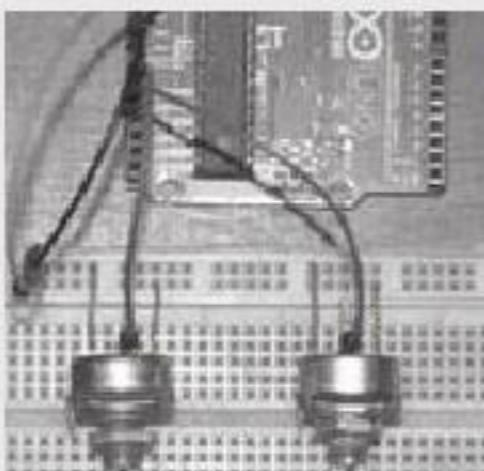


**Figura 3.18** a) Potenciómetro lineal. b) Potenciómetro logarítmico.

a)

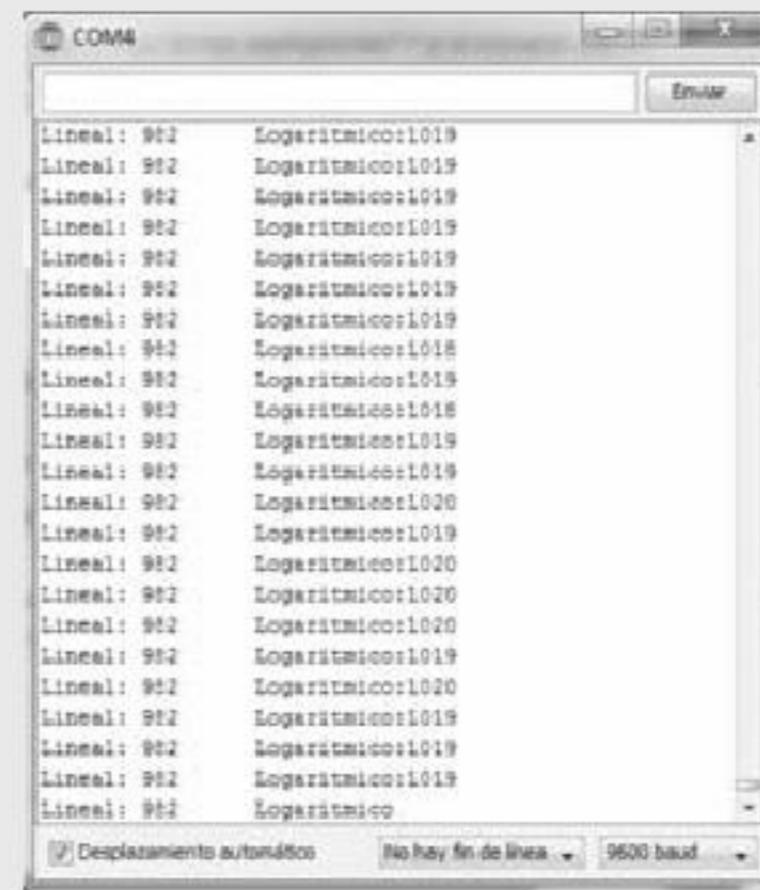


b)

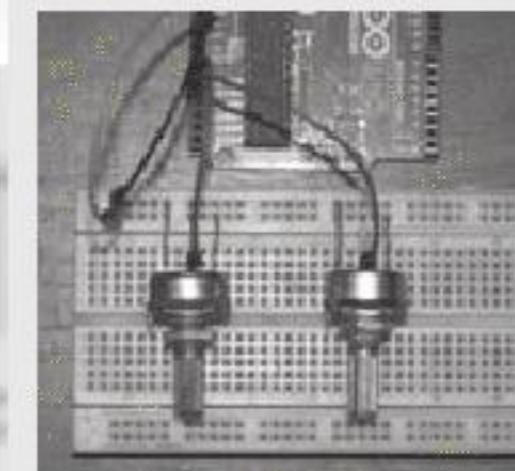


**Figura 3.17** a) Potenciómetro lineal. b) Potenciómetro logarítmico.

a)



b)



**Figura 3.19** a) Potenciómetro lineal. b) Potenciómetro logarítmico.

## 3.2 Encoder

Los elementos sensores más utilizados para la medición de sistemas rotacionales son los encoders, también conocidos como *tacómetros* o *codificadores de posición*. Un encoder es un elemento capaz de convertir el movimiento, ya sea rotacional o lineal, a una señal digital equivalente.

Hoy día, existen múltiples formas de implementar un encoder. En un principio, los encoders estaban compuestos por un elemento mecánico, tipo cepillo, el cual pasaba a través de un patrón metálico, cerrando un contacto entre el patrón metálico y el elemento mecánico; por tanto, la frecuencia con la que se realizaba este contacto determinaba la velocidad angular del eje al que estaba acoplado el cepillo metálico. En la actualidad, los encoders son, en su gran mayoría, ópticos o magnéticos, ya que los encoders mecánicos se consideran obsoletos debido a que son muy susceptibles a fallas por desalineación mecánica, además de tener un tiempo de vida más corto comparado con los encoders ópticos o magnéticos.

## Encoders ópticos

Por lo común, un encoder óptico se compone de un par de dispositivos optoelectrónicos, uno de los cuales constituye el emisor o fuente de luz y el otro es el receptor; de manera general, se utiliza un par fotodiodo y fototransistor. Entre el fotodiodo y el fototransistor del encoder óptico se coloca un disco ranurado, acoplado mecánicamente al eje, compuesto por  $n$  ranuras transparentes. De esta manera, cuando el disco gira a través del par emisor/receptor se produce una señal alterna entre el receptor y el emisor, la frecuencia registrada por esta señal determina la velocidad del eje; así, a mayor frecuencia de la señal a la salida, mayor la velocidad del eje (véase figura 3.20).

La resolución presente en este tipo de encoders ópticos puede ser calculada a través de la ecuación:

$$R_{es} = \frac{\pi D}{2a_r}$$

donde:

$R_{es}$ : resolución

$D$ : diámetro del disco

$a_r$ : ancho de cada ranura

Cuando se desea **determinar la posición de un eje** usando este tipo de sensor, suelen presentarse algunos inconvenientes, ya que una pequeña interferencia en el sistema provoca una gran falla en la determinación de la posición, además de que también presentan dificultad para determinar el sentido de avance. Para ello, se emplean configuraciones *incrementales* o *absolutas*.

## Encoders incrementales

Para esta configuración se requieren al menos dos pares de emisor/receptor, los cuales deberán estar desfasados un cierto número de ranuras más un cuarto de ranura; así, cuando el eje comienza a girar en sentido horario, la señal generada por el primer par receptor/emisor estará adelantada un cuarto con respecto a la señal del segundo par receptor/emisor; por el contrario, cuando el eje gira en sentido antihorario, la señal del segundo par receptor/emisor estará adelantada con respecto a la primera tres cuartos (véase figura 3.21).

En este tipo de encoders se suele incluir una ranura adicional para indicar el momento cuando el eje ha dado una vuelta completa, con el fin de auxiliar la búsqueda de una posición inicial, en caso de que exista una falta de alimentación del sistema electrónico; asimismo, también permite determinar cuántos pulsos se generan antes de dar una vuelta completa; de esta manera es posible determinar la velocidad angular del eje, su posición y su sentido de giro.

## Encoders absolutos

En los encoders absolutos, el disco tiene varias bandas dispuestas de forma concéntrica, codificadas en código Gray; en este caso, a cada banda le corresponde un par receptor/emisor. De acuerdo con la

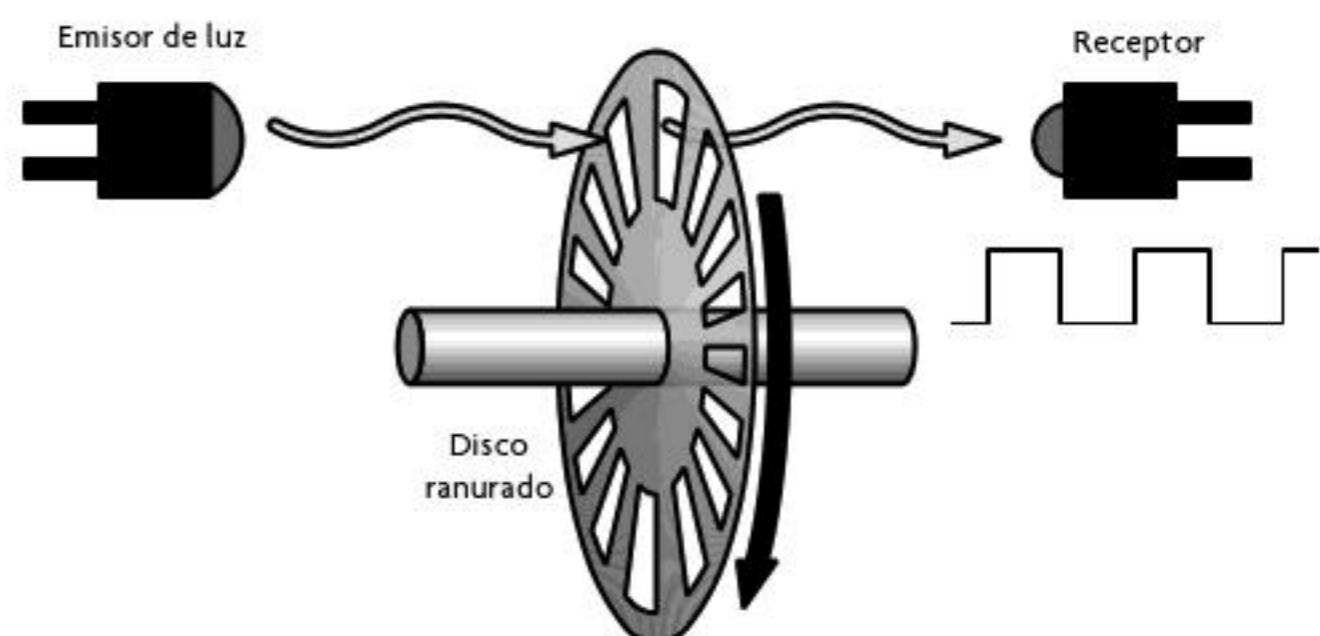


Figura 3.20 Encoder óptico.

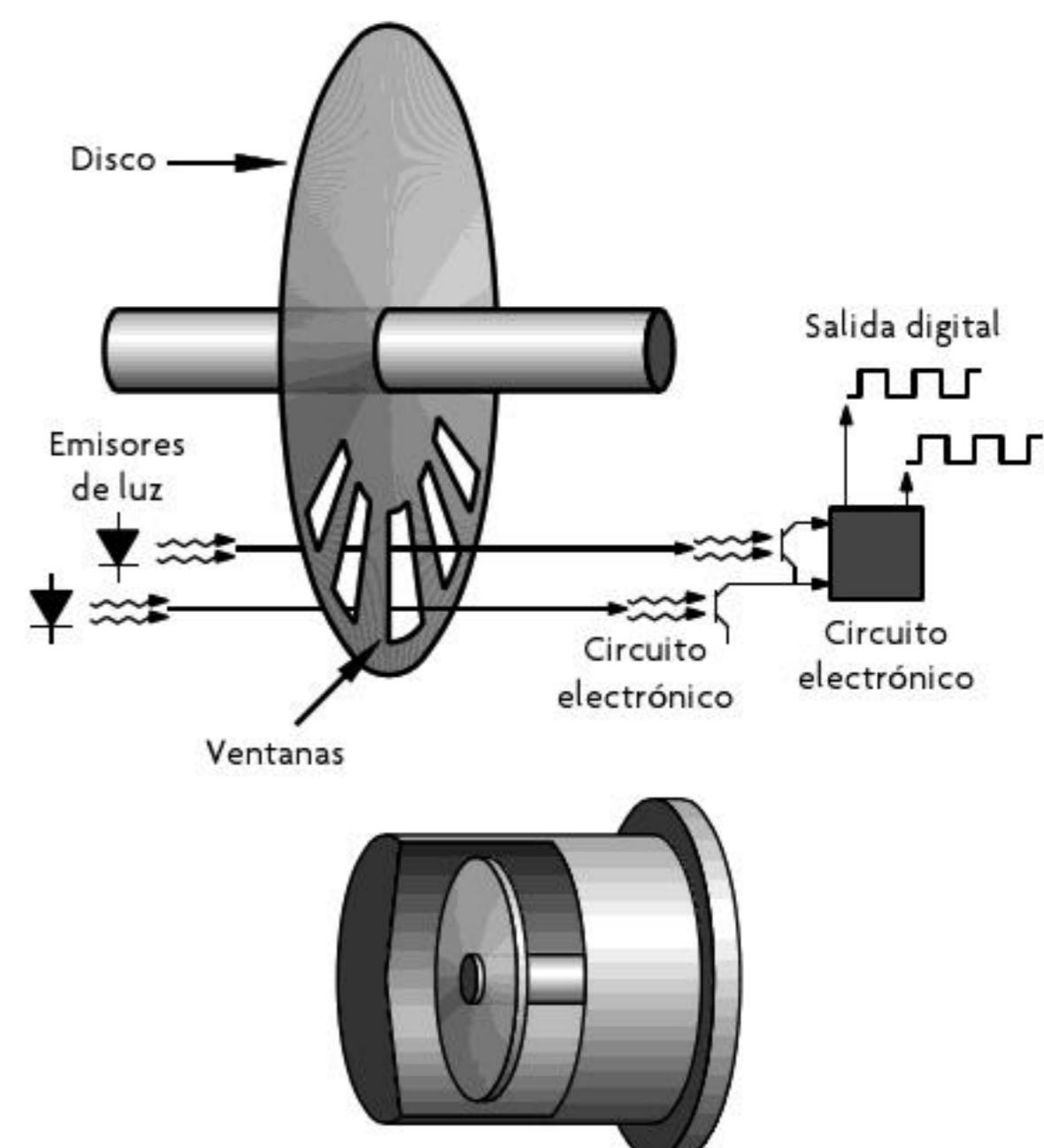
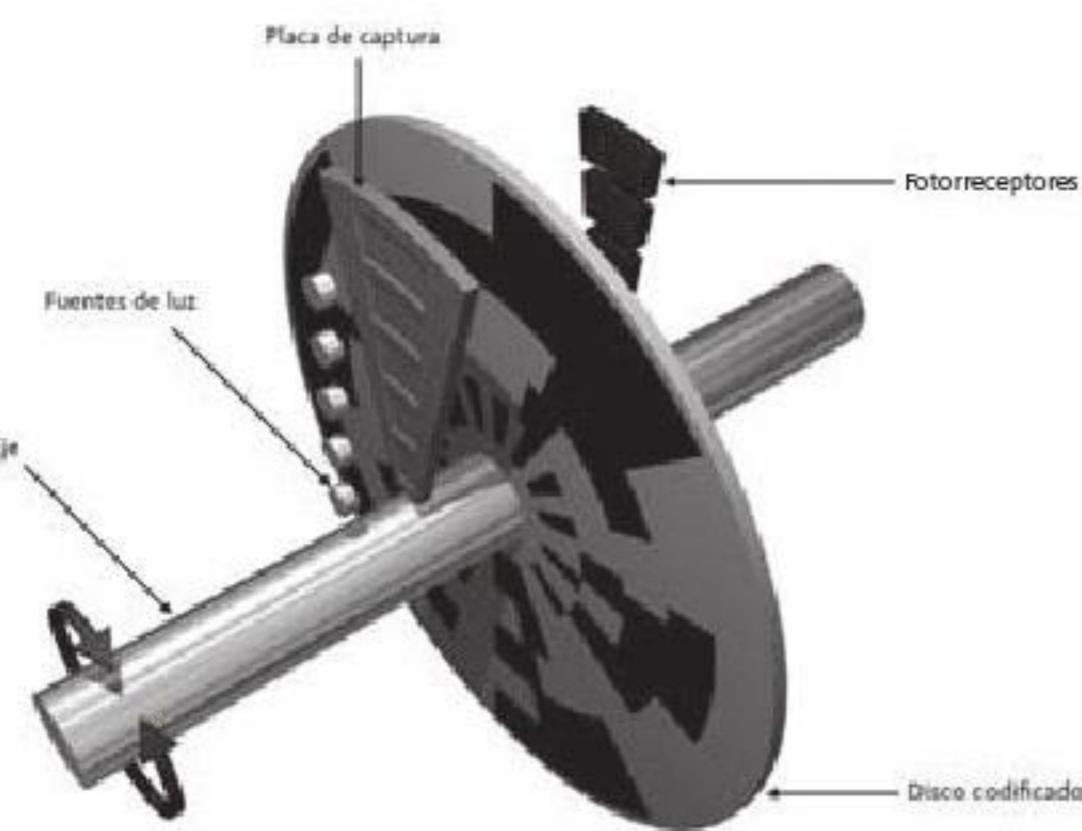


Figura 3.21 Encoder incremental.



**Figura 3.22** Encoder absoluto.

posición que tenga el disco en ese instante, los pares receptor/emisor estarán frente a un sector opaco o transparente, lo que dará un código a la salida; así, la forma que tenga este código determinará la posición del disco [véase figura 3.22].

Es importante destacar que este tipo de encoder no utiliza el sistema binario para codificar las diferentes posiciones que toma el sistema, ya que este tiene el inconveniente de que los cambios entre una posición y otra no son

graduales; por ejemplo, considérese que el encoder se encuentra en la posición 0111 y luego en la posición 1000; como se puede observar, todos los bits cambiaron. En sistemas de ingeniería, con el fin de verificar que el sensor se encuentra trabajando apropiadamente, se suele monitorear el cambio de estado de los sensores, pero los incrementos en el sistema binario son más difíciles de monitorear comparados con los incrementos en la codificación Gray, en este tipo de encriptación se tiene la ventaja de que solo uno de sus bits cambia de estado entre incremento e incremento, como se observa en la tabla 3.1.

La principal ventaja de este tipo de encoder es que al tener la codificación de la señal directamente en el disco, la posición del eje difícilmente se perderá si es que existe una ausencia de alimentación. Por su parte, algunas de sus desventajas de este encoder es su baja resolución, además de su dificultad de lectura, ya que en general contiene dos o más líneas de lectura, comparados con los encoders incrementales.

Decimal	Binario	Gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

**Tabla 3.1**

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

## Ejemplo

### Encoder absoluto

Supóngase que se desea desarrollar un encoder absoluto con 10 posiciones/giro, para evitar errores, debido a la comutación de bits, al verificar que solo un bit cambia de estado a la vez, de la tabla siguiente se observa que existe un error cuando el disco cambia de la posición 9 a la posición 0.

Posición	Código Gray
0	0000
1	0001
2	0011
3	0010
4	0110
5	0111
6	0101
7	0100
8	1100
9	1101
0	0000

**Tabla 3.2**

### Solución

Para resolver este problema, primero se debe cambiar el código correspondiente a las posiciones de la tabla; a este tipo de ajuste se le conoce como código Gray quebrado, o con exceso  $N$ .

Ahora bien, el cálculo del número  $N_{\text{Gray}}$  se efectúa según la siguiente fórmula:

$$N_{\text{Gray}} = \frac{2^n - IMP}{2}$$

donde:

$IMP$  = número de posiciones/giro (solo pares)

$2^n$  = número de posiciones múltiplo potencia de 2, inmediatamente superior a  $IMP$ .

Por ejemplo, con  $IMP$  igual a 12, 10 o 8,  $2^n = 16$ , con  $IMP$  igual 6,  $2^n = 8$ .

El código Gray de la posición 10 (que corresponde a 9, ya que se cuenta a partir de la posición 0) es 9 en decimal.

$$N = \frac{2^4 - 10}{2} = 3$$

Eliminando al 9, con el valor de  $N$  se obtiene el valor de posición real, que es:

$$9 - 3 = 6$$

Así se recorren las posiciones de la tabla tres lugares. De este modo, el código que correspondía a la posición 9 ahora será de la posición 6, la posición 8 ahora será la posición 5, la nueva posición 9 corresponderá al valor en código Gray del número 12 decimal y la nueva posición 8 corresponderá al valor en código Gray del número 11 decimal, con lo cual la tabla de transiciones queda de la siguiente manera:

Posición	Código Gray anterior	Código Gray nuevo
0	0000	0010
1	0001	0110
2	0011	0111
3	0010	0101
4	0110	0100
5	0111	1100
6	0101	1101
7	0100	1111
8	1100	1110
9	1101	1010
0	0000	0010

Tabla 3.3

Por ejemplo, si se deseara hacer un encoder absoluto con 6 posiciones/giro, el valor de  $N$  se calcularía como:

$$N = \frac{2^3 - 6}{2} = 1$$

y la tabla de transición quedaría como:

Posición	Código Gray anterior	Código Gray nuevo
0	0000	0001
1	0001	0011
2	0011	0010
3	0010	0110
4	0110	0111
5	0111	0101
0	0001	0001

Tabla 3.4

## Ejercicio de aplicación

### Implementación de un encoder incremental usando un sensor óptico

#### Objetivo

Medir y observar (en el monitor serial) la velocidad angular medida en RPM de un actuador eléctrico por medio de un encoder incremental, un sensor óptico y un Arduino Uno®.

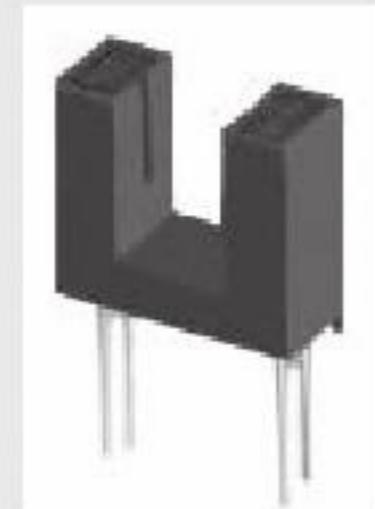
#### Material

- Arduino Uno®
- Un optointerruptor ITR8102
- Una resistencia de 330 Ω

- Una resistencia de 10 kΩ
- Disco con ranuras que permitan el paso de la luz infrarroja
- Cables de conexión

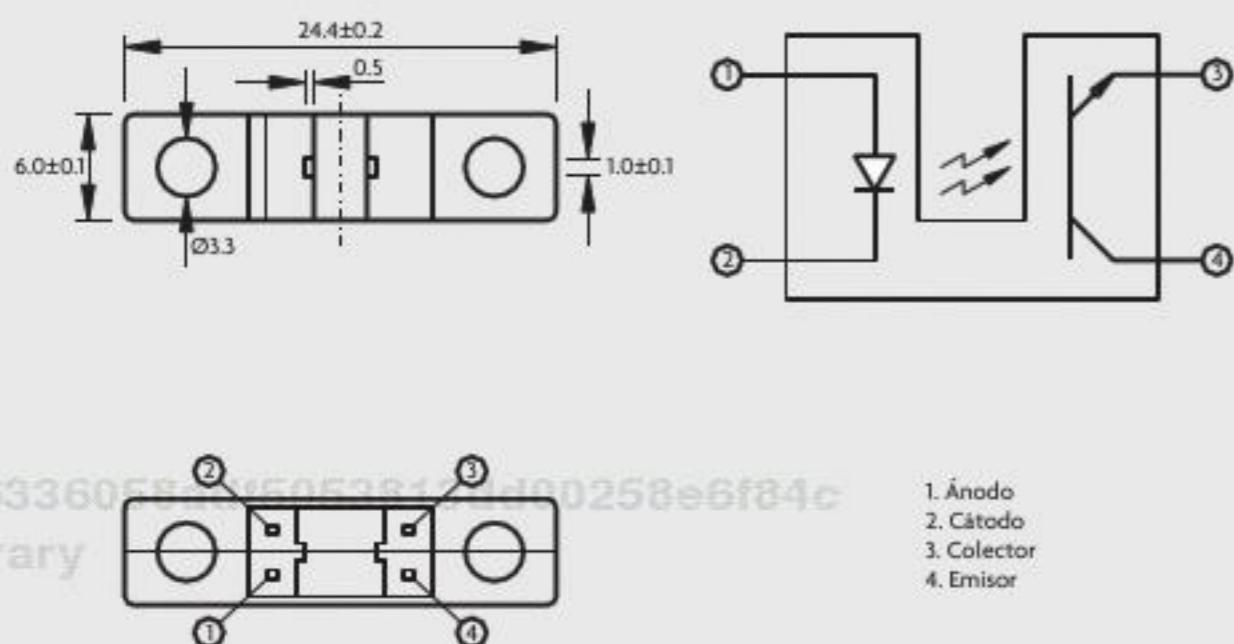
#### Desarrollo

1. El componente ITR8120 es un optointerruptor con un led LED infrarrojo y un fototransistor NPN empaquetados en un estuche plástico negro; el LED y el fototransistor están separados por una pequeña distancia aproximada de 3 mm; la recepción del fototransistor se puede impedir al interponer algún objeto que no permita el paso de la luz infrarroja emitida desde el LED.

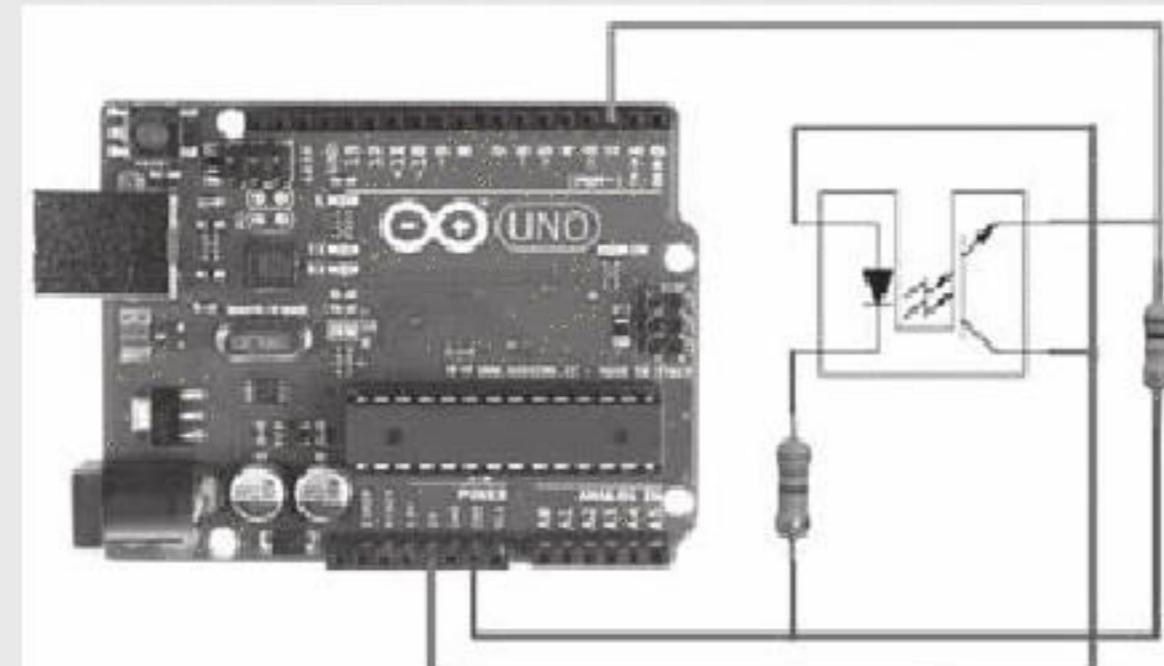


**Figura 3.23** Optointerruptor ITR8120.

2. Se identifican los pines del sensor optointerruptor como se muestra en la figura 3.23.
3. Polarizar el LED infrarrojo conectándolo en serie con la resistencia de 330 ohms a la alimentación de 5 V.
4. Conectar el fototransistor con una carga en el emisor de  $10\text{ k}\Omega$  a tierra y conectar el colector a la alimentación de 5 V; el colector se conectaría al pin 2 del Arduino®.
5. El encoder se implementa midiendo el voltaje en el pin del emisor del fototransistor, con lo cual se cuentan cuántas veces pasan las ranuras entre el optointerruptor. Cuando hay un voltaje alto se debe a que no hay una ranura que obstruya entre el LED y el fototransistor; por el contrario, cuando se lee un voltaje bajo es porque se permite la polarización del fototransistor.



**Figura 3.24** Diagrama optointerruptor.



**Figura 3.25** Conexión del optointerruptor.

6. Utilizando la interrupción externa 0 del Arduino® se hace la lectura del sensor óptico.

La variable *cont* almacena el número de veces que se ha pasado sobre una ranura; por tanto, al hacer la operación *cont/n* se obtiene directamente el número de vueltas que se han dado desde que se reinicia el Arduino®.

La función *sensorA*, que corresponde a la interrupción externa 0, es llamada cada que existe un cambio en el pin 2; si se trata de un flanco de subida, las variables *cont* y *cont2* incrementan su valor en uno. La variable *cont2* almacena el número de veces que la ranura del disco pasa entre el optointerruptor durante el retardo dado. La velocidad angular se calcula con  $\text{cont2} * 60000 / (n * \text{retardo})$  y los datos son desplegados en intervalos de un segundo.

```
df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary
const int retardo=1000; //Retardo que se hace entre cada calculo de velocidad angular (1 segundo)
const int n=8; //Número de ranuras en el disco
const int ledA=13; //Led que indica el estado del sensor
int sensor=0; //Aquí se almacena el estado del sensor
long int cont=0; //Se almacena el numero de veces que se ha pasado por una ranura
long int cont2=0; //Con este contador se calcula la velocidad angular
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Se inicia la comunicación serial
  pinMode(2, INPUT); //El pin 2 se configura como entrada
  pinMode(ledA, OUTPUT);
  attachInterrupt(0, sensorA, CHANGE); //Se habilita la interrupcion externa 0 que esta en el pin 2 del Arduino Uno
  //cada que haya una interrupcion se lleva a cabo la funcion sensorA()
}

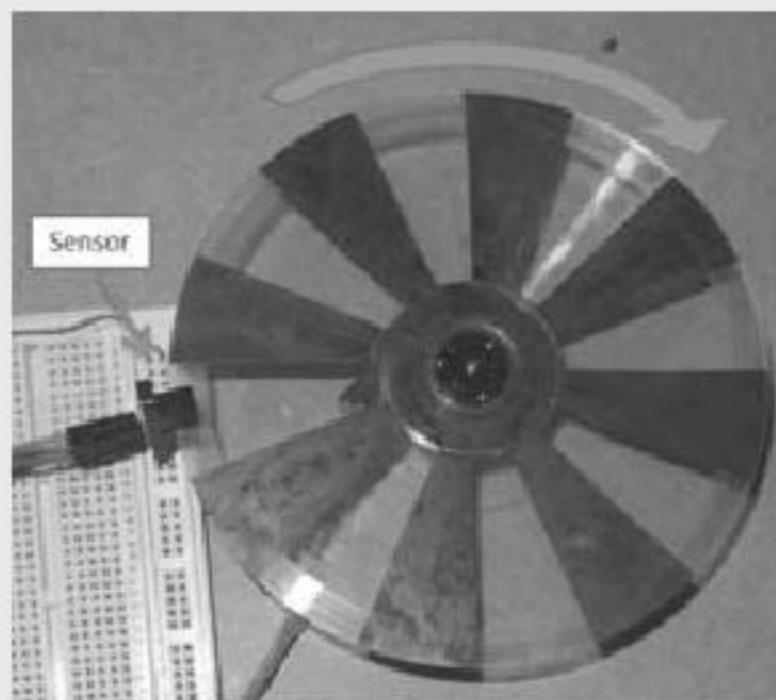
void loop()
{
  Serial.print("Vueltas totales=");
  Serial.println(cont/n); //Se imprime en el monitor serial el numero de vueltas completas que ha dado
  Serial.print("Velocidad en RPM=");
  Serial.println(cont2*60000/(n*retardo)); //Se imprime la velocidad angular en RPM
  Serial.println();
  cont2=0; //Este contador se reinicia para calcular la siguiente velocidad angular
  delay(retardo); //Retardo entre cada calculo e impresion de resultados
}

//Funcion llamada cada que el pin 2 tiene algun cambio en su estado
void sensorA(){
  sensor=digitalRead(2); // Se lee el pin 2
```

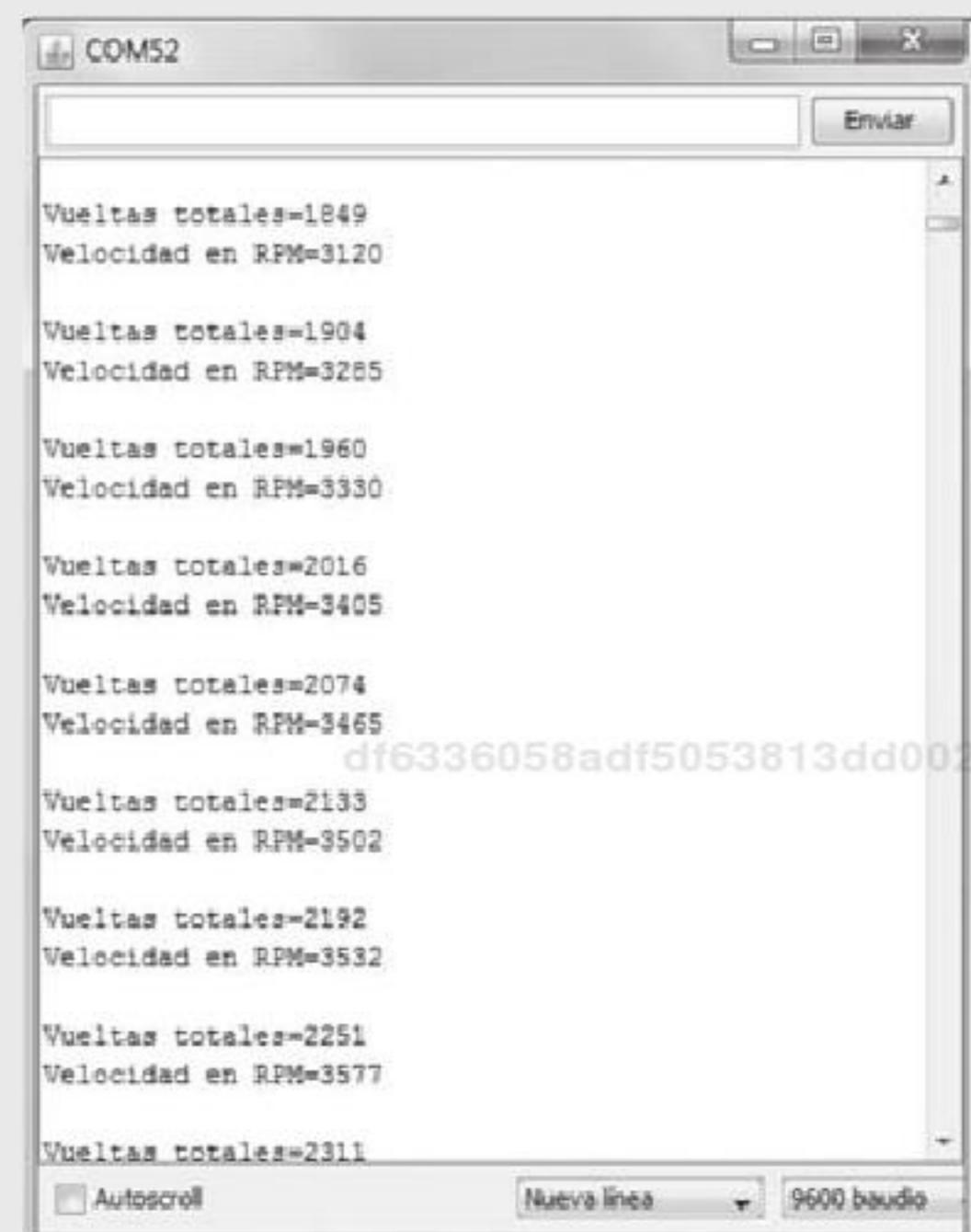
```

if (sensor ==1){ //Hubo un flanco de subida
//digitalWrite(ledA,HIGH); //El led del pin 13
se enciende
cont=cont+1; //Los contadores incrementan en uno
cont2=cont2+1;
}
else //Hubo un flanco de bajada
digitalWrite(ledA,LOW); //El led del pin 13 se
apaga
}

```



**Figura 3.26** Implementación del encoder óptico.



## Ejercicio de aplicación

### Potenciómetro táctil

#### Objetivo

Medir la posición angular sobre algún punto de una resistencia circular empleando el Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor Touch resistivo circular
- Caimanes
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

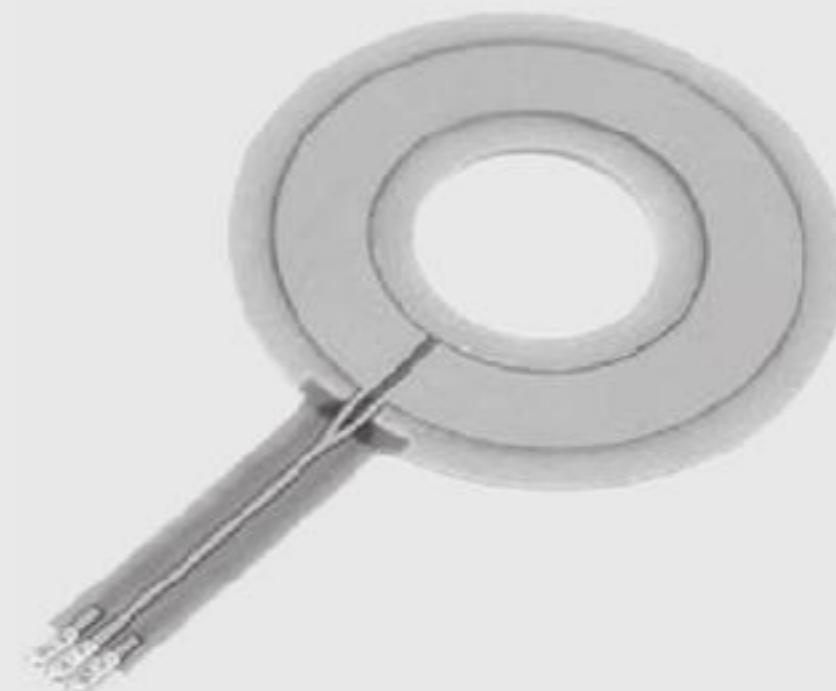
##### Descripción del sensor potenciómetro circular

Este es un sensor de tipo touch resistivo, cuya resistencia depende de la posición en la que presionemos con cualquier objeto sobre su superficie, como un dedo, una pluma, etcétera. El circuito equivalente del sensor consiste en un divisor de tensión.

Su funcionamiento se asemeja mucho al de un potenciómetro cualquiera que varía la resistencia en sus terminales dependiendo la posición de una flecha o cursor metálico; para este sensor cualquier objeto desempeña este papel.

La resistencia nominal entre sus dos terminales más extre-  
mores es de  $10\text{ k}\Omega$ . Su terminal intermedia entrega la tensión  
de salida del sensor.

El rango efectivo del sensor está entre 0 y 353 grados.

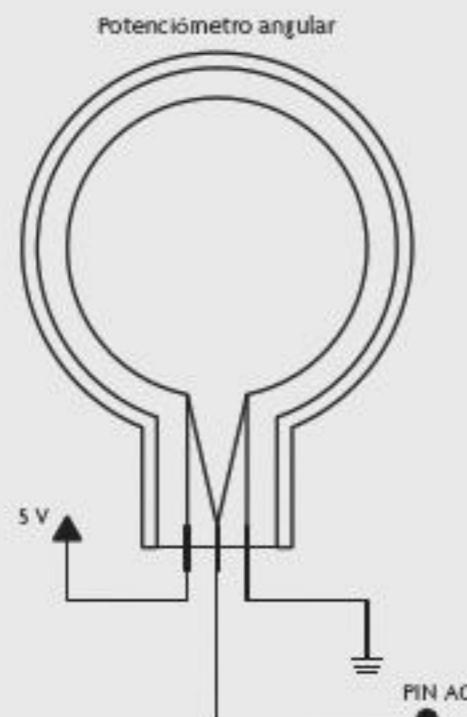


**Figura 3.27** Potenciómetro circular.

#### Construcción del circuito

La conexión de este sensor es muy sencilla, se alimentan sus dos terminales extremas a **VCC** y **GND** de una fuente de ali-  
mentación. La forma en la que estas se conecten definirá el  
sentido de la lectura. Es decir, si se presiona sobre la posición  
de  $0^\circ$  a la salida, podríamos recibir VCC o GND; ambos mo-  
dos son complementarios.

La terminal de en medio se conecta a cualquiera de las terminales del Arduino® capaces de realizar la conversión analógica-digital (ADC) para su posterior procesamiento.



**Figura 3.28** Diagrama de conexión para potenciómetro circular.

## Código

### Descripción del programa

El siguiente programa:

- Realiza la lectura y conversión analógico-digital ADC de la lectura del sensor con una resolución de 10 bits.
- Promedia 15 lecturas para reducir el ruido de la señal.
- Convierte la lectura ADC del sensor a una posición angular en grados de 0° a 353°, utilizando la función map(). Las lecturas analógicas que equivalen a las posiciones angulares dentro de los parámetros de la función map() se obtienen de manera experimental.
- Por último, imprime en el monitor serie la posición sobre el sensor.

```
*****Sensor Resistivo Circular*****
/*
 *Este sensor resistivo varia su resistencia
 dependiendo la posicion en *
 *la que se presione.
 */
/*Mediante el Arduino vamos a obtener la
 posicion en grados del lugar
 *donde se presione sobre el sensor. Vamos a
 promediar algunos de los
 */valores analogicamente leidos debido a
 *posibles fluctuaciones en la
 */lectura
*****



//Variables empleadas
int cirRes = 0, readRes, count;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Iniciamos la comunicacion
  serie a 9600 baudios
}
```

```
voidloop()
{
  count++; //Contador del numero de
  valores promediados
  readRes = analogRead(A0); //Lectura del sensor
  cirRes = cirRes + readRes; //Sumamos los
  valores de la lectura a
  //promediar

  if (count == 15) //Cuando se junten 15
  valores, estos se promedian
  {
    count = 0; //Reiniciamos el contador
    cirRes = cirRes / 15; //Obtenemos el
    promedio de 15 valores
    cirRes = map(cirRes, 1880, 1020, 0, 353);
    //Conversion de la lectura
    //analogica a grados. Con algunas mediciones 880
    lectura -> 0 ° y
    //1020 lectura -> 353°. El sensor tiene una
    cobertura de 0° a 353°
    if (cirRes < 0) //Cuando no usamos el sensor,
    la lectura sera
    //negativa y por ende se considera fuera de
    rango
    {
      Serial.println("Fuera de rango");
    }
    else
    {
      Serial.println(cirRes); //Imprimimos el
      angulo de posicion
    }
    cirRes = 0; //Limpiamos la
    variable
  }

  delay(10); //Controlamos la velocidad del
  programa
}
```

## Pruebas

### Posición = 90°

a)





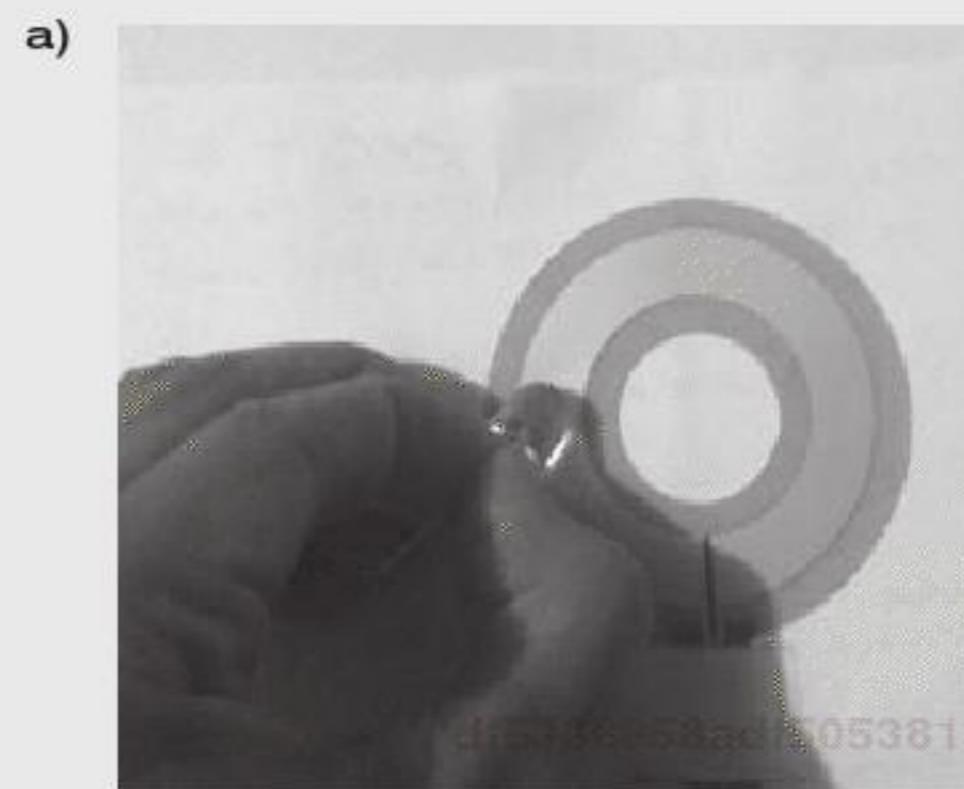
**Figura 3.29** a) Objeto colocado en una posición de 90° aproximadamente. b) La lectura, a pesar de ser un poco errática, también ronda los 90°.



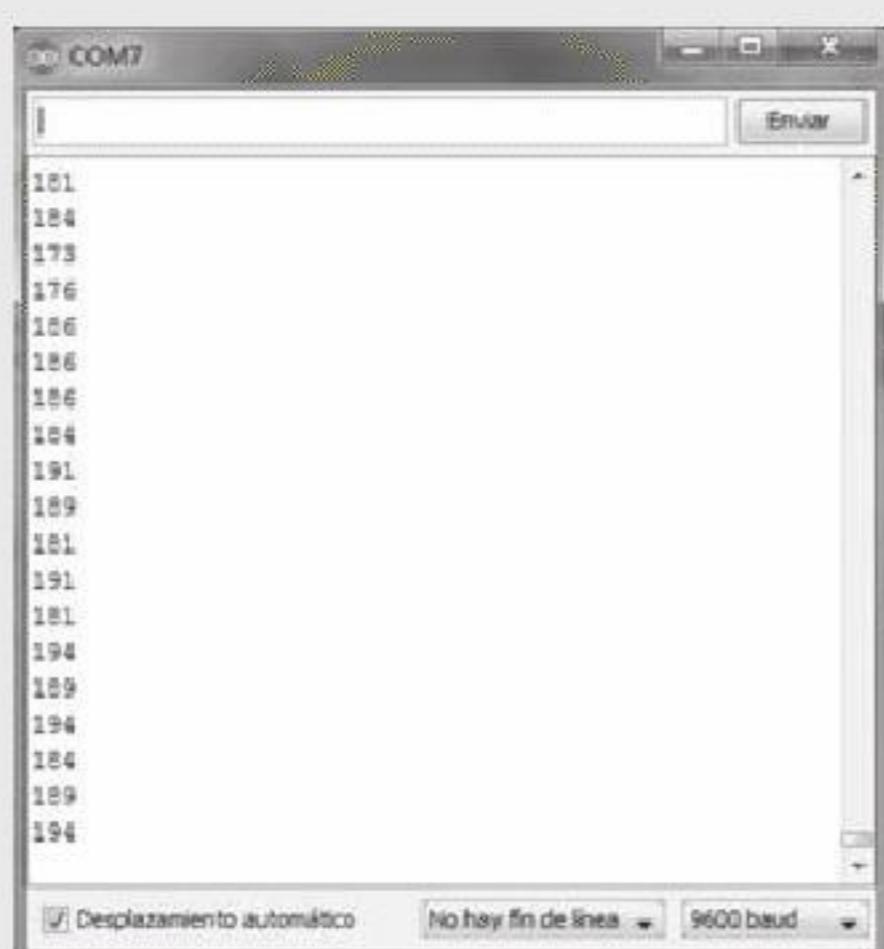
df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

**Figura 3.30** a) Objeto colocado en una posición de 180° aproximadamente. b) La lectura, a pesar de ser un poco errática, también ronda los 180°.

**Posición = 270°**



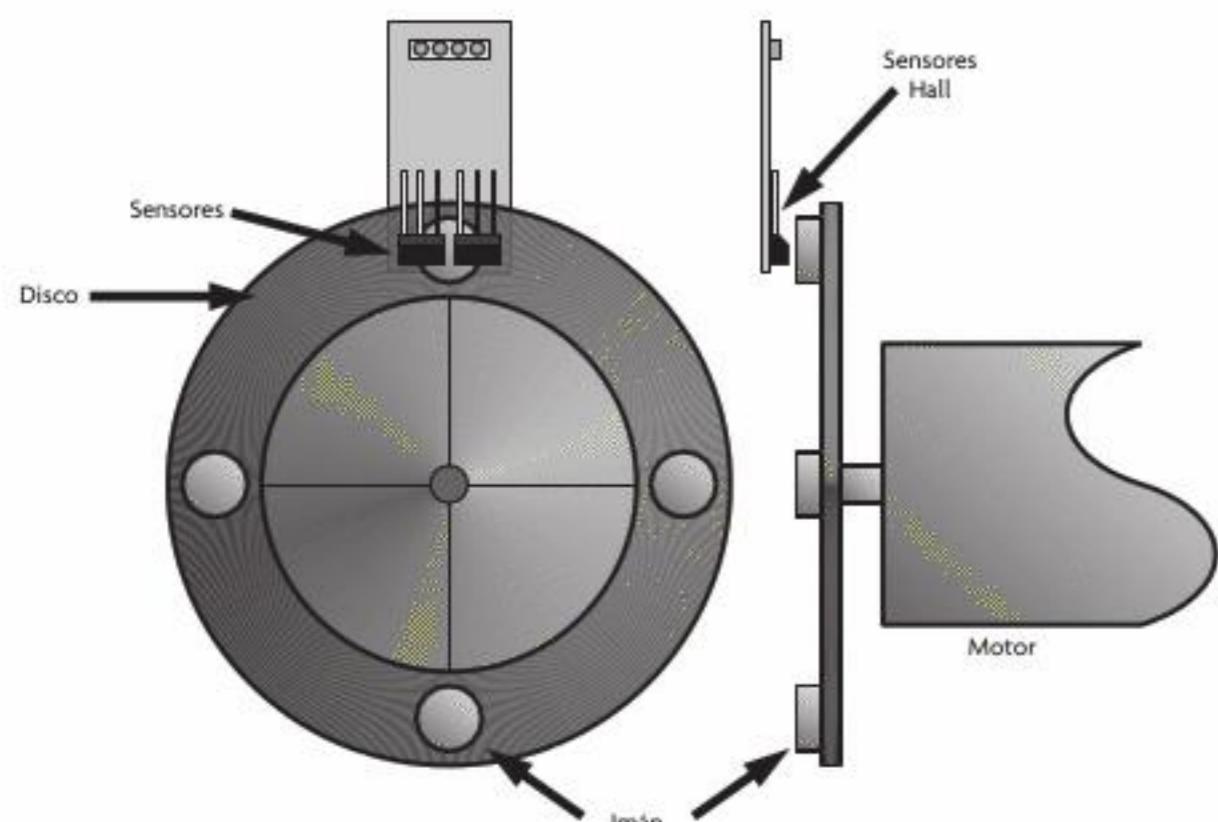
**Figura 3.31** a) Objeto colocado en una posición de 270° aproximadamente. b) La lectura también se aproxima mucho a 270°.



**Figura 3.30** a) Objeto colocado en una posición de 180° aproximadamente. b) La lectura, a pesar de ser un poco errática, también ronda los 180°.

## Encoders magnéticos

Los encoders magnéticos, al igual que los encoders ópticos, tienen su principal campo de aplicación en la determinación de velocidad o posición de un sistema rotacional, ya que este tipo de encoder correlaciona el cambio de posición o velocidad con una señal digital.



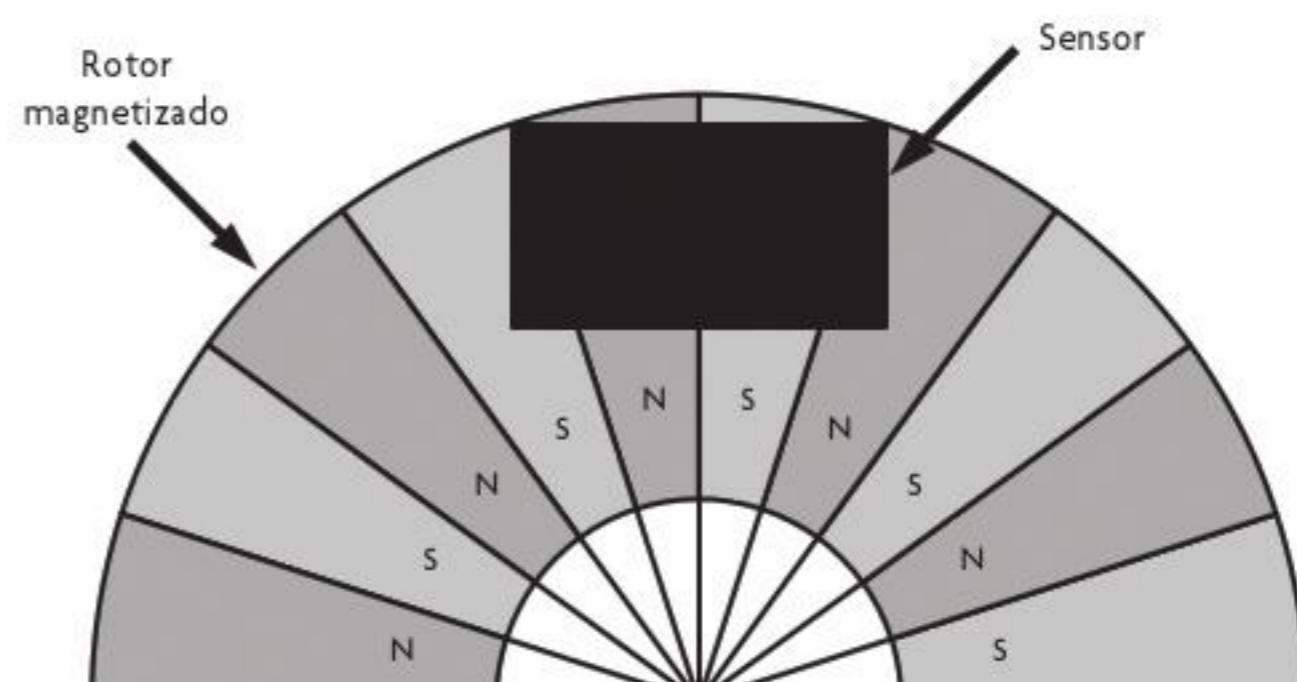
**Figura 3.32** Encoder magnético con imán móvil.

registra un cambio de estado, permitiendo generar la señal digital que describe el estado del eje o motor (véase figura 3.33).

Este tipo de encoders son difíciles de implementar, comparados con los encoders ópticos, ya que el sensor de efecto Hall es muy sensible al ruido magnético, lo cual dificulta su implementación en sistemas en donde se desea medir la velocidad angular de un motor. Existen sistemas embebidos que contienen un disco magnetizado aislado con respecto al sistema que compone al motor, con el objetivo de disminuir el acoplamiento magnético entre el devanado del motor y el disco magnético (véase figura 3.34).



**Figura 3.33** Encoder magnético, en configuración de imán fijo.



**Figura 3.34** Disco magnetizado.

Cabe aclarar que tanto los encoders ópticos como los magnéticos tienen aplicaciones en determinación de posición lineal. Pero su uso es mucho más extenso en aplicaciones para sistemas rotacionales. En ambos casos, el principio de funcionamiento es el mismo, solo que en vez de auxiliarse de un disco acoplado al eje móvil, estos se valen de un elemento lineal en donde se coloca el patrón de ranuras opacas o transparentes, lo que de manera equivalente corresponde a una serie de imanes permanentes y sensores de efecto Hall (véase figura 3.35).

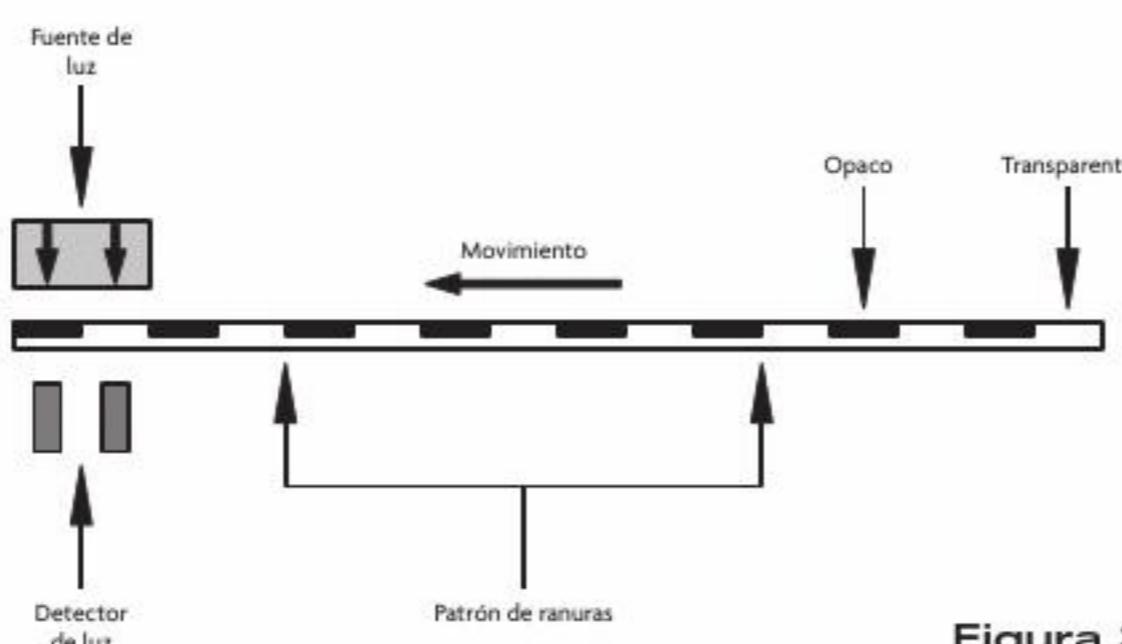


Figura 3.35 Encoder lineal.

## Ejercicio de aplicación

### Implementación de un encoder usando un sensor de efecto Hall

#### Material

- Sensor de efecto Hall U1881KUA®
- Arduino Uno®
- Una resistencia de  $10\text{ k}\Omega$
- Dos imanes
- Un motor

#### Desarrollo

1. El circuito integrado que se utiliza es un sensor de efecto Hall bipolar, el cual, al medir una densidad de flujo magnético de polaridad positiva, provoca que tenga a su salida un voltaje alto y se mantenga en este estado hasta que se le exponga una densidad de sentido opuesto, como se aprecia en la curva de histéresis de la figura 3.36.

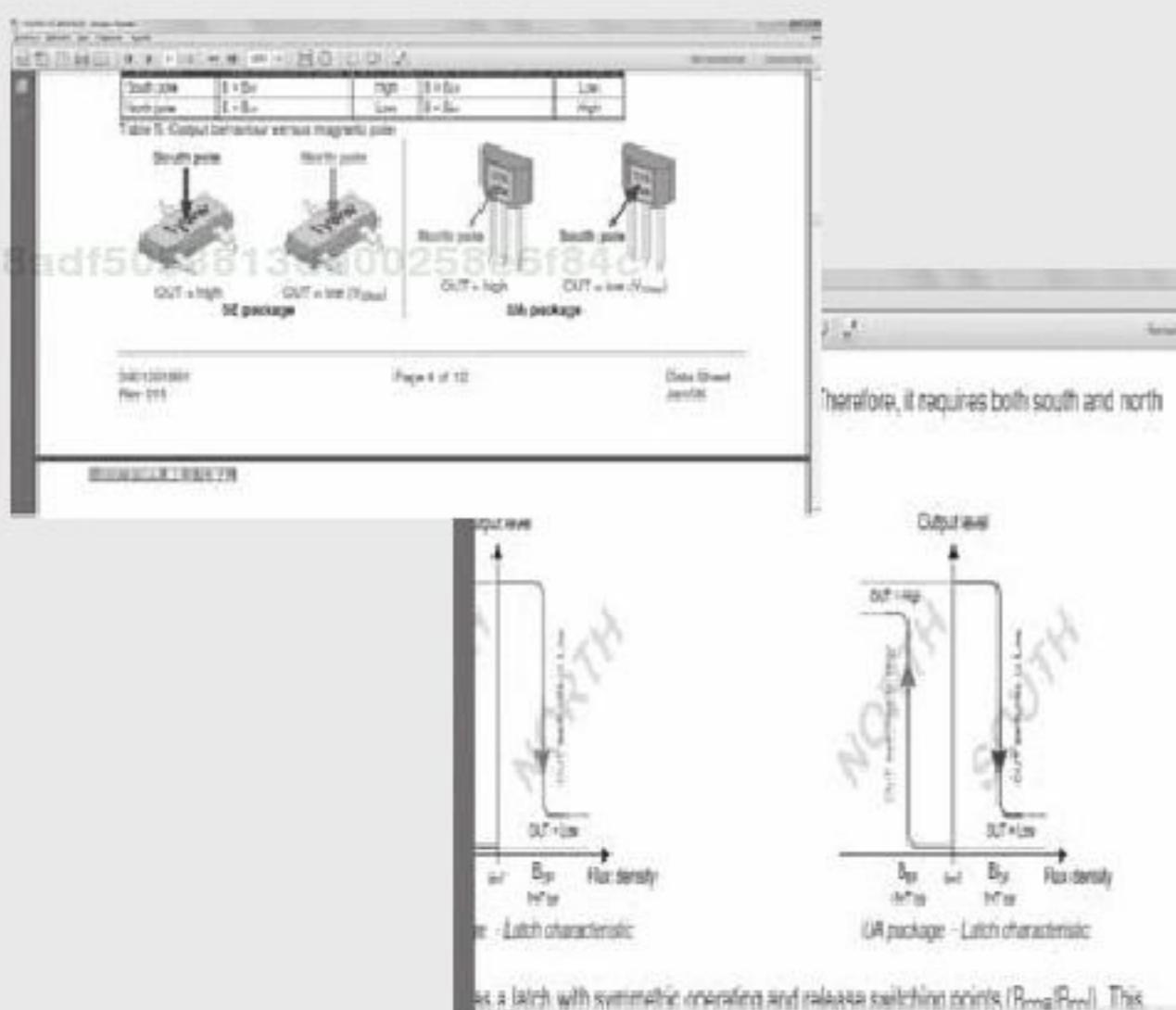


Figura 3.36 Curva de histéresis.

2. Se identifican los pines del sensor de efecto Hall, como se muestra en la figura 3.37.
3. Se implementa un encoder con dos imanes que se sujetan a un disco acoplado a un motor, de tal forma que cuando

este gire se haga pasar a los imanes cerca del sensor, de tal modo que se exponga primero el polo norte del imán al sensor, ocasionando que su salida se encuentre en voltaje alto, y cuando continúe girando, el polo sur provoque que la salida del sensor esté en voltaje bajo. Así se tendrá un pulso cuadrado cada que un imán pase cerca del sensor.

4. Se utilizará una entrada por interrupción de la tarjeta de desarrollo Arduino®, donde se leerán los cambios de estado en este pin; con ayuda de contadores se calculará la velocidad angular en revoluciones por minuto y el número de vueltas que ha dado el motor.



Figura 3.37 Sensor de efecto Hall.

Los pines que deberán conectarse son los siguientes:

- VDD deberá ir a la alimentación de 5 V.
- GND deberá conectarse a la tierra común del Arduino®.
- OUT, debido a que la salida del sensor está configurada en colector abierto, se deberá conectar una resistencia de pull up con un valor de  $10\text{ K}\Omega$  a la alimentación de 5 V. Este pin también es conectado al pin 2 de la tarjeta Arduino®.

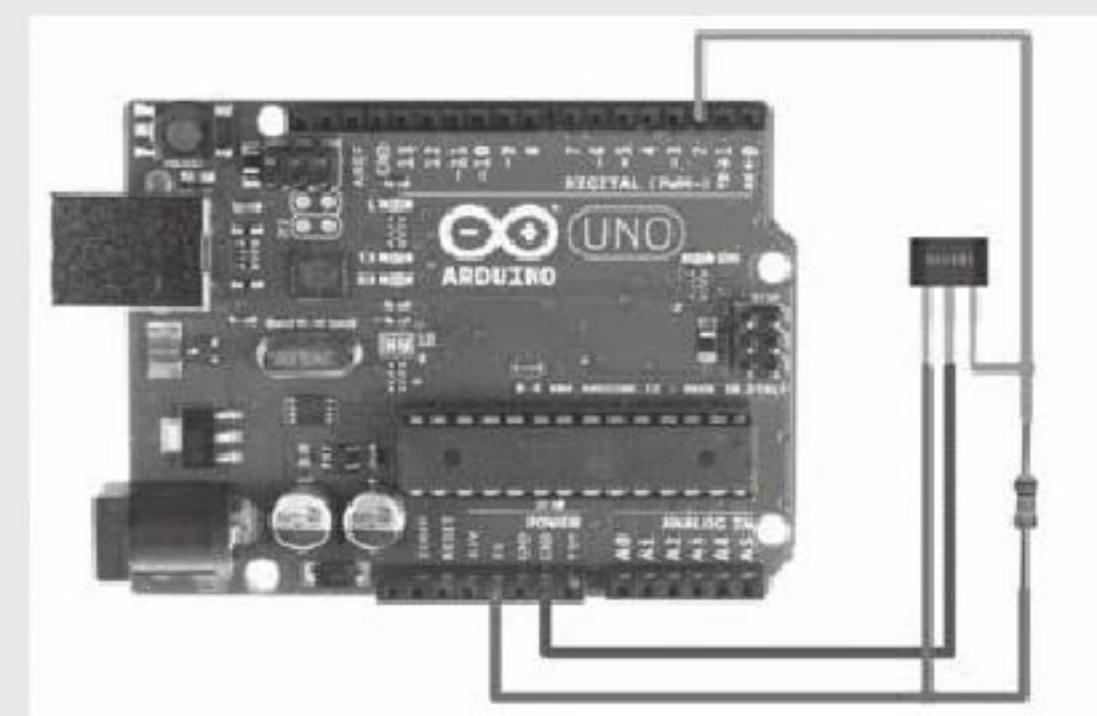


Figura 3.38 Conexión del sensor de efecto Hall.

El programa funciona como se indica a continuación:

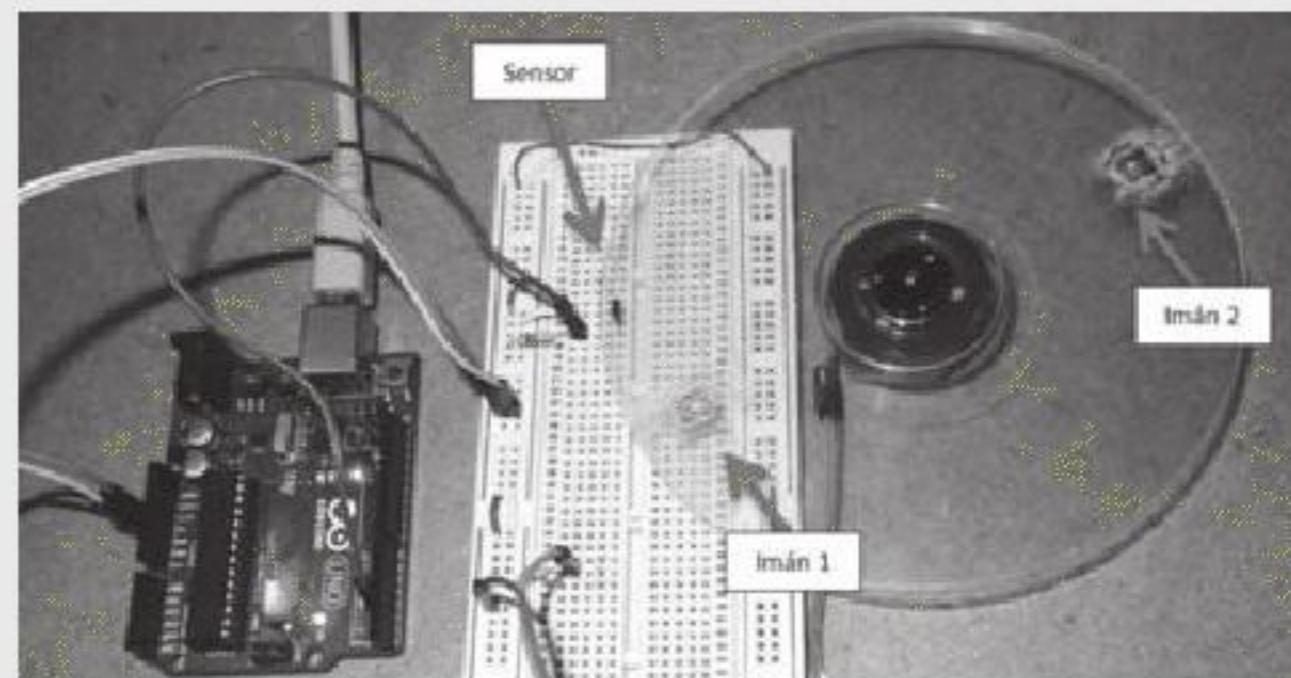
- Existe un retardo entre cada cálculo e impresión de velocidad angular y número de vueltas realizadas.
- Se aprovecha la interrupción externa 0 del Arduino® para poder hacer lectura de los cambios que presenta el sensor mientras ocurre el retardo.
- La variable *cont* almacena el número de veces que se ha pasado sobre un imán; por tanto, al hacer la operación *cont/n* se obtiene en forma directa el número de vueltas que se han dado desde que se reinicia el Arduino®.
- La función *sensorA* es llamada cada que existe un cambio en el pin 2; si se trata de un flanco de subida, las variables *cont* y *cont2* incrementan su valor en uno.
- La variable *cont2* almacena el número de veces que el sensor pasa sobre algún imán durante el retardo dado. Se reinicia después que se imprimen los resultados; en este caso, en intervalos de un segundo debido al uso de un retraso de 1000 ms.
- La velocidad angular se calcula como *cont2\*60000/(n\*retardo)*.

```
const int retardo=1000; //Retardo que se hace
entre cada calculo de velocidad angular (1
segundo)
const int n=2; //Numero de imanes en el disco
const int ledA=13; //LED que indica el estado del
sensor
int sensor=0; //Aqui se almacena el estado del
sensor
long int cont=0; //Se almacena el numero de veces
que se ha pasado por una ranura
long int cont2=0; //Con este contador se calcula
la velocidad angular
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Se inicia la comunicacion
  serial
  pinMode(2, INPUT); //El pin 2 se configura como
  entrada
  pinMode(ledA, OUTPUT);
  attachInterrupt(0, sensorA, CHANGE); //Se
  habilita la interrupcion externa 0 que esta en
  el pin 2 del Arduino Uno
  //cada que haya una interrupcion se llevara a
  cabo la funcion sensorA()
}

void loop(){
  Serial.print("Vueltas totales=");
  Serial.println(cont/n); //Se imprime en el
  monitor serial el numero de vueltas completas
  que ha dado
  Serial.print("Velocidad en RPM=");
  Serial.println(cont2*60000/(n*retardo)); //Se
  imprime la velocidad angular en RPM
  Serial.println();
  cont2=0; //Este contador se reinicia para
  calcular la siguiente velocidad angular
```

```
delay(retardo); //Retardo entre cada calculo e
impresion de resultados
}

//Funcion llamada cada que el pin 2 tiene algun
cambio en su estado
void sensorA(){
  sensor=digitalRead(2); // Se lee el pin 2
  if (sensor ==1){ //Hubo un flanco de subida
    digitalWrite(ledA,HIGH); //El LED del pin 13 se
    enciende
    cont=cont+1; //Los contadores incrementan en uno
    cont2=cont2+1;
  }
  else //Hubo un flanco de bajada
  digitalWrite(ledA,LOW); //El LED del pin 13 se
  apaga
}
```



**Figura 3.39** Encoder de efecto Hall.



**Figura 3.40**

### 3.3 Tacogeneradores

Un **tacogenerador** es un dispositivo que sirve como **transductor entre la velocidad de un eje y un voltaje proporcional**. La principal diferencia de este tipo de sensor con los encoders radica en su principio de funcionamiento, ya que este se basa en el principio de transducción de reluctancia variable, además de que un tacogenerador entrega una salida de voltaje analógica, a diferencia de los encoders, que entregan una salida digital.

En el caso de los tacogeneradores se aprovecha el hecho de que la magnitud de voltaje inducido en una bobina depende de la velocidad de rotación que tenga un elemento ferromagnético dentro de un campo magnético. Por tanto, un tacogenerador requiere de un imán que se encarga de generar un campo magnético fijo, mientras una rueda dentada acoplada al eje mecánico (del que se desea medir su velocidad) gira en medio del campo magnético, produciendo una corriente proporcional al giro del motor, la cual circula a través de la bobina, donde acoplada a esta se tendrán unas escobillas; así, la salida final del sensor se obtiene al medir la variación de voltaje presente en las escobillas (véase figura 3.41).

En este caso, cuando la rueda dentada gira se induce un voltaje en la bobina, el cual está dado por la ley de Faraday:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

donde:

$V$ : voltaje inducido

$N$ : número de vueltas en la bobina

$\frac{d\Phi}{dt}$ : cambio de flujo magnético

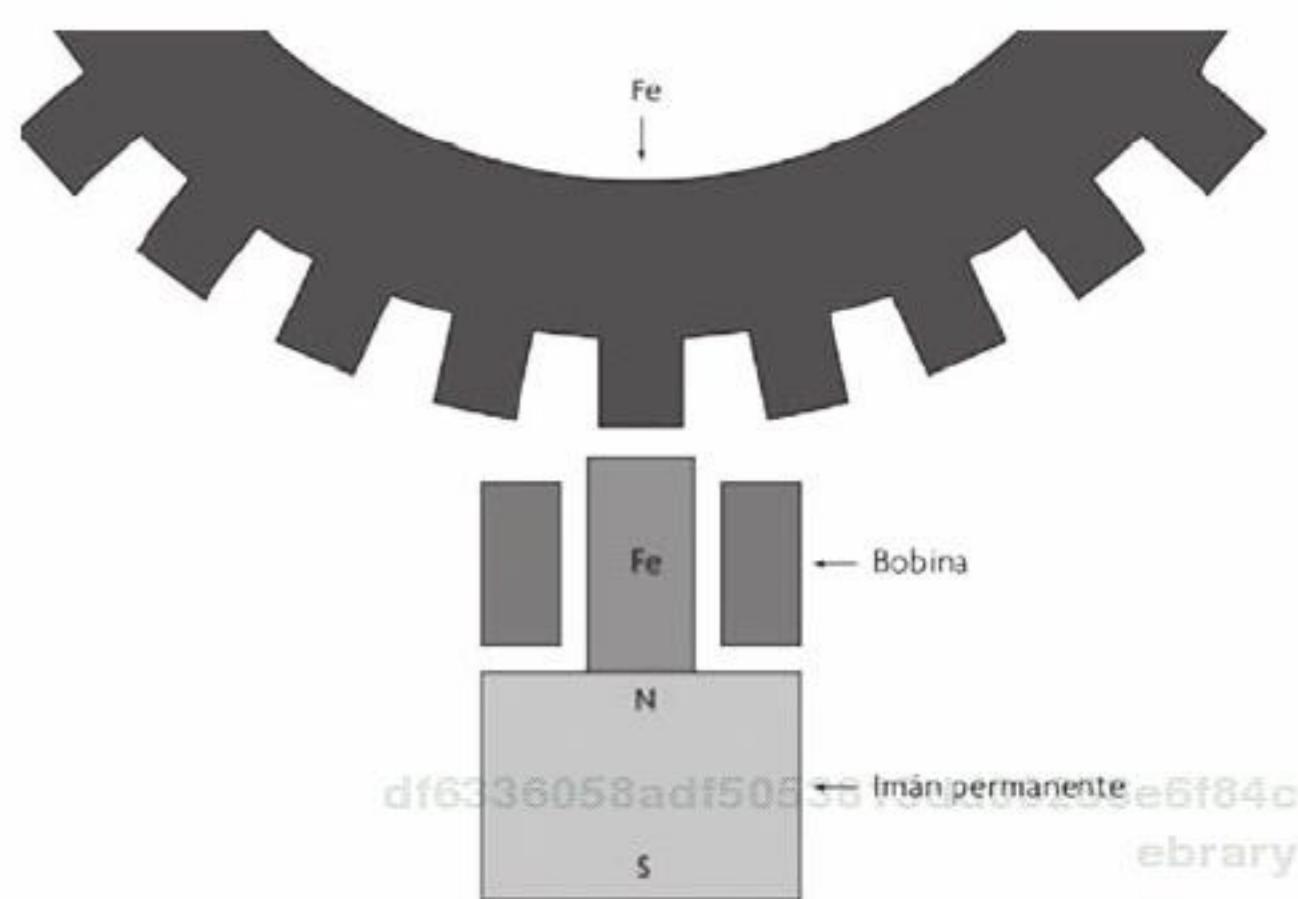


Figura 3.41 Arquitectura usada en tacogeneradores.

En los tacogeneradores, la salida del sensor tiene una naturaleza alterna; así, esta señal alterna será máxima cuando la reluctancia<sup>1</sup> entre la bobina y la rueda dentada sea mínima, lo cual ocurre cuando un diente de la rueda está frente a la bobina, y disminuirá cuando el diente de la rueda se aleja de la bobina, ya que aumenta la reluctancia del circuito.

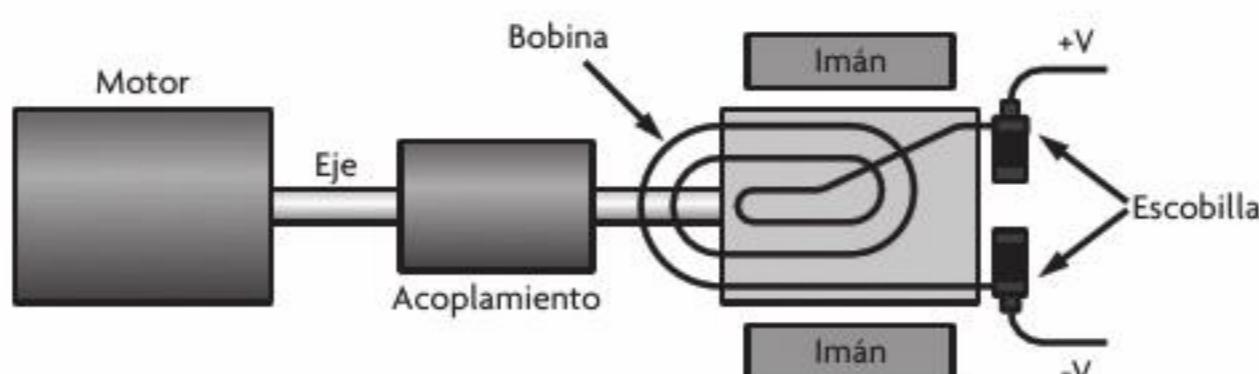


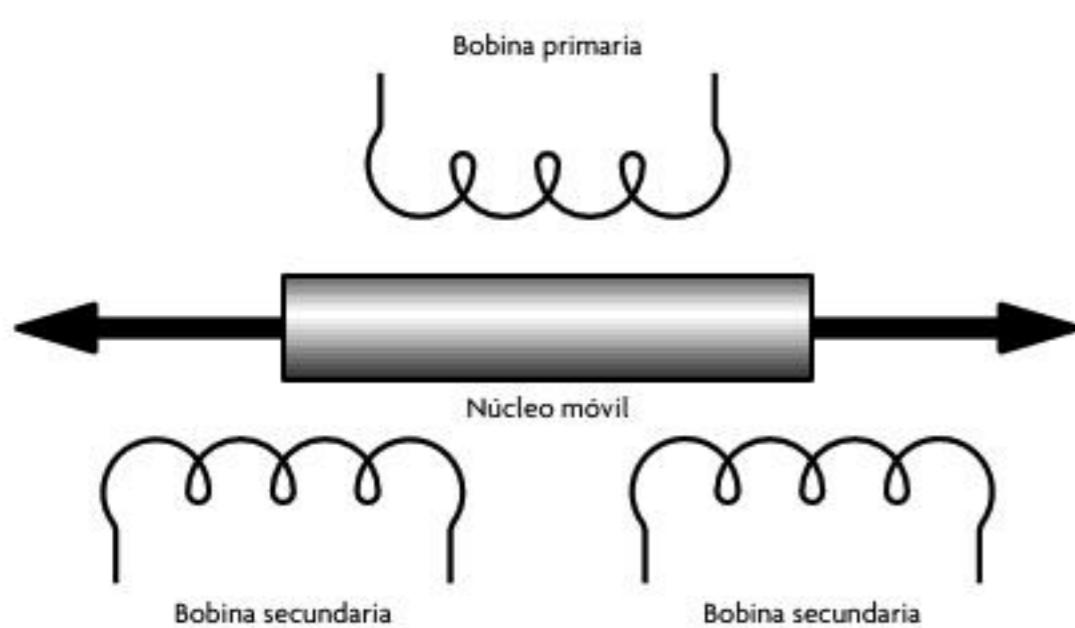
Figura 3.42 Tacogenerador.

Dado que el voltaje presente es proporcional a la velocidad angular del sistema, esta puede obtenerse de la amplitud o de la frecuencia de la señal de voltaje. En general, es preferible hacerlo de la frecuencia, debido a que esta se encuentra menos alterada por el ruido y la interferencia.

<sup>1</sup> Resistencia que ofrece un circuito al flujo magnético.

Es importante aclarar que una gran desventaja de este tipo de sensores es que son sumamente susceptibles a las vibraciones presentes en el sistema a medir, además de que tienen muy baja resolución a bajas velocidades de giro. Resulta importante mencionar que este tipo de sensores requiere que las escobillas sean cambiadas cada cierto número de ciclos, como parte de su mantenimiento.

### 3.4 Transformador diferencial de variación lineal (LVDT)



Un **LVDT** (por sus siglas en inglés: Linear Variable Differential Transformer) es un transformador diferencial de variación lineal basado en el principio de transducción de inductancia variable. Estos sensores están diseñados para **medir desplazamiento lineal** y tienen la ventaja de una resolución infinita, además de que son sensores sumamente confiables y robustos. Para su funcionamiento, estos se auxilian de una serie de bobinas, generalmente tres: una primaria y dos secundarias, además de que cuentan con un núcleo permeable que se encarga de relacionar el movimiento lineal con una variación en la inductancia de las bobinas (véase figura 3.43).

Los LVDT requieren de un voltaje de alimentación en CA, aunque algunos fabricantes ya ofrecen presentaciones con los circuitos de acondicionamiento necesarios para su operación en CD incluidos, por

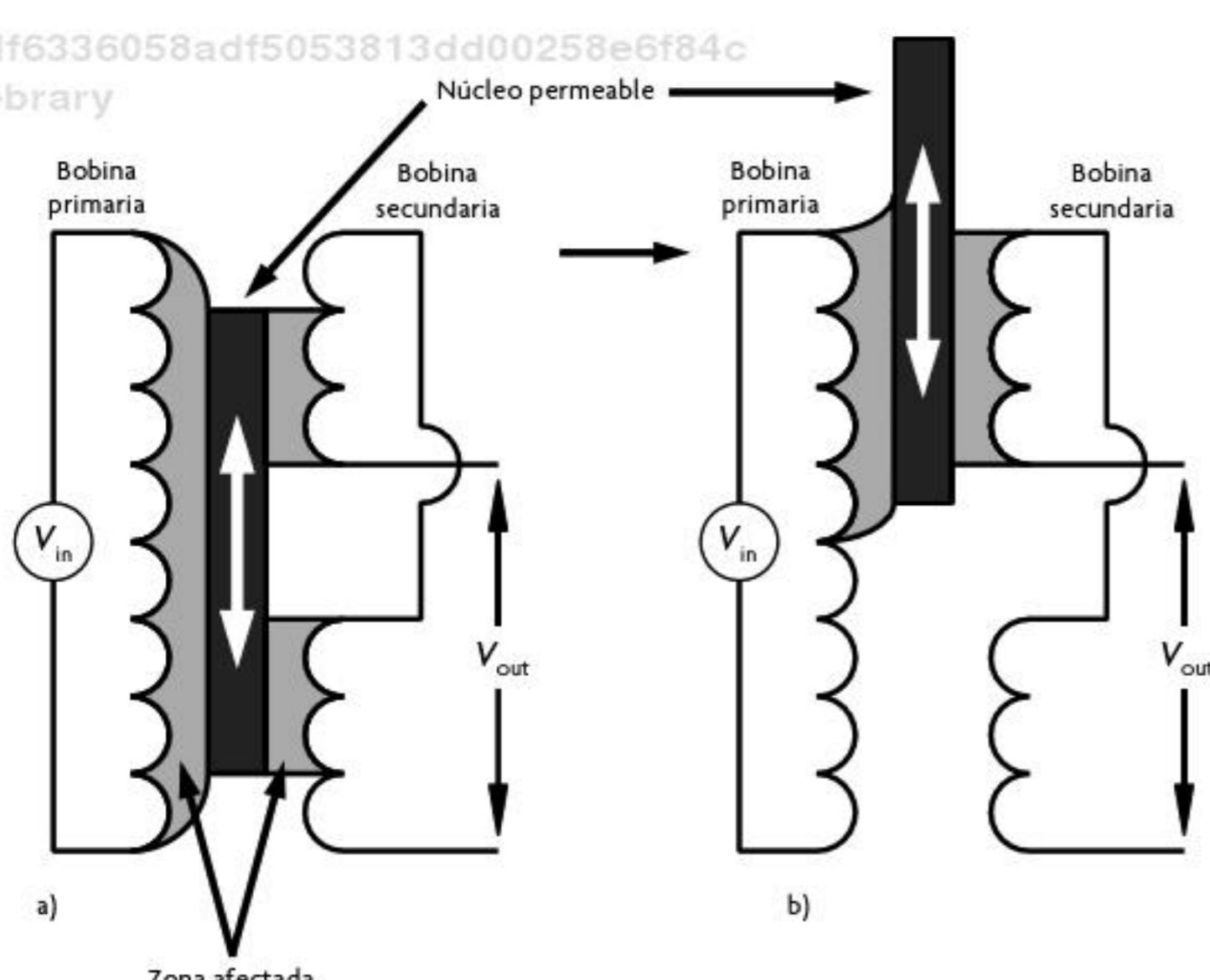
lo que el usuario solo debe alimentar el sensor con una fuente de voltaje en CD y la salida del sensor también será en CD; de manera convencional, también se implementan circuitos acondicionadores para relacionar el desplazamiento lineal con un voltaje o una corriente.

El principio de funcionamiento de un LVDT se puede resumir de la siguiente manera: 1) La bobina primaria es alimentada con un voltaje en CA ( $V_{in}$ ); por inducción, este voltaje estará presente en las dos bobinas secundarias. 2) Las bobinas secundarias se conectan de tal forma que la salida del dispositivo será la diferencia entre los voltajes presentes en cada una ( $V_{out}$ ) así, cuando el núcleo se encuentra en la posición central entre las bobinas secundarias y la bobina primaria, el voltaje a la salida será cero (véase figura 3.44 a). 3) Si el núcleo se desplaza en sentido positivo, el voltaje presente en una de las bobinas se incrementará, mientras que en la otra disminuirá (véase figura 3.44 b);

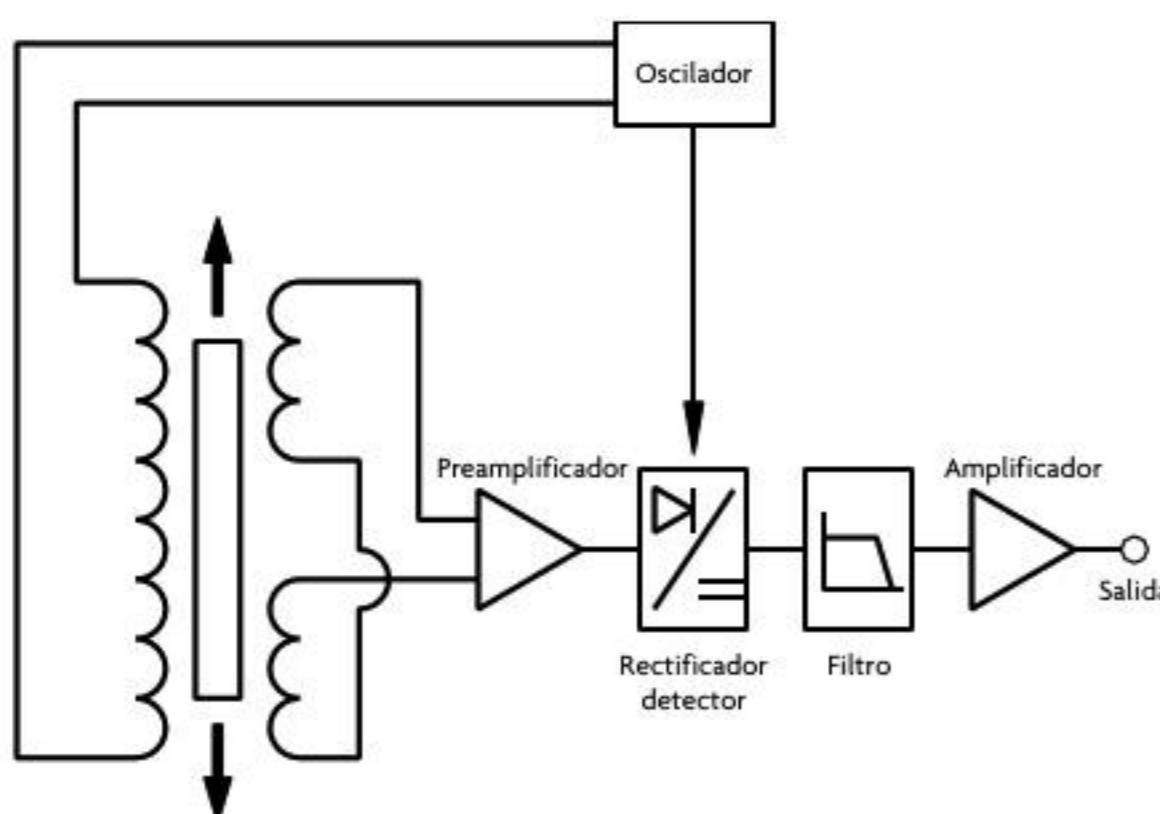
este mismo fenómeno ocurre en sentido opuesto, de tal manera que la señal generada a la salida es proporcional al desplazamiento del núcleo.

Las principales desventajas que presenta este tipo de sensor es su dificultad de fabricación; la primera desventaja se debe a que las tres bobinas, la primaria y las dos secundarias, deben estar envueltas por una cuarta bobina para evitar el ruido, la cual debe estar construida de un material con una baja dependencia a la temperatura; en este caso, algunos materiales comúnmente usados son plásticos con fibra de vidrio, como el *Ryton*, el *Torlon* o vidrio llenos con nylon; la segunda desventaja es que el núcleo requiere largas estructuras magnéticas, ya que el material del núcleo es un componente cilíndrico o tubular hecho de alguna aleación de níquel-hierro, el cual es recocido con la finalidad de uniformizar la permeabilidad a lo largo de toda la estructura. Además, para su correcto funcionamiento se requieren osciladores en el orden de los kHz, fuentes de voltaje

**Figura 3.43** Arquitectura general de un LVDT.



**Figura 3.44** Ejemplo de LVDT.



**Figura 3.45** Circuito de acondicionamiento para un LVDT.

con frecuencias de operación de 60 Hz, moduladores de fase, rectificadores, filtros, y amplificadores en CD y en CA. En general, este tipo de sensores tienen un alto costo comparado con otros sensores de posición (véase figura 3.45).

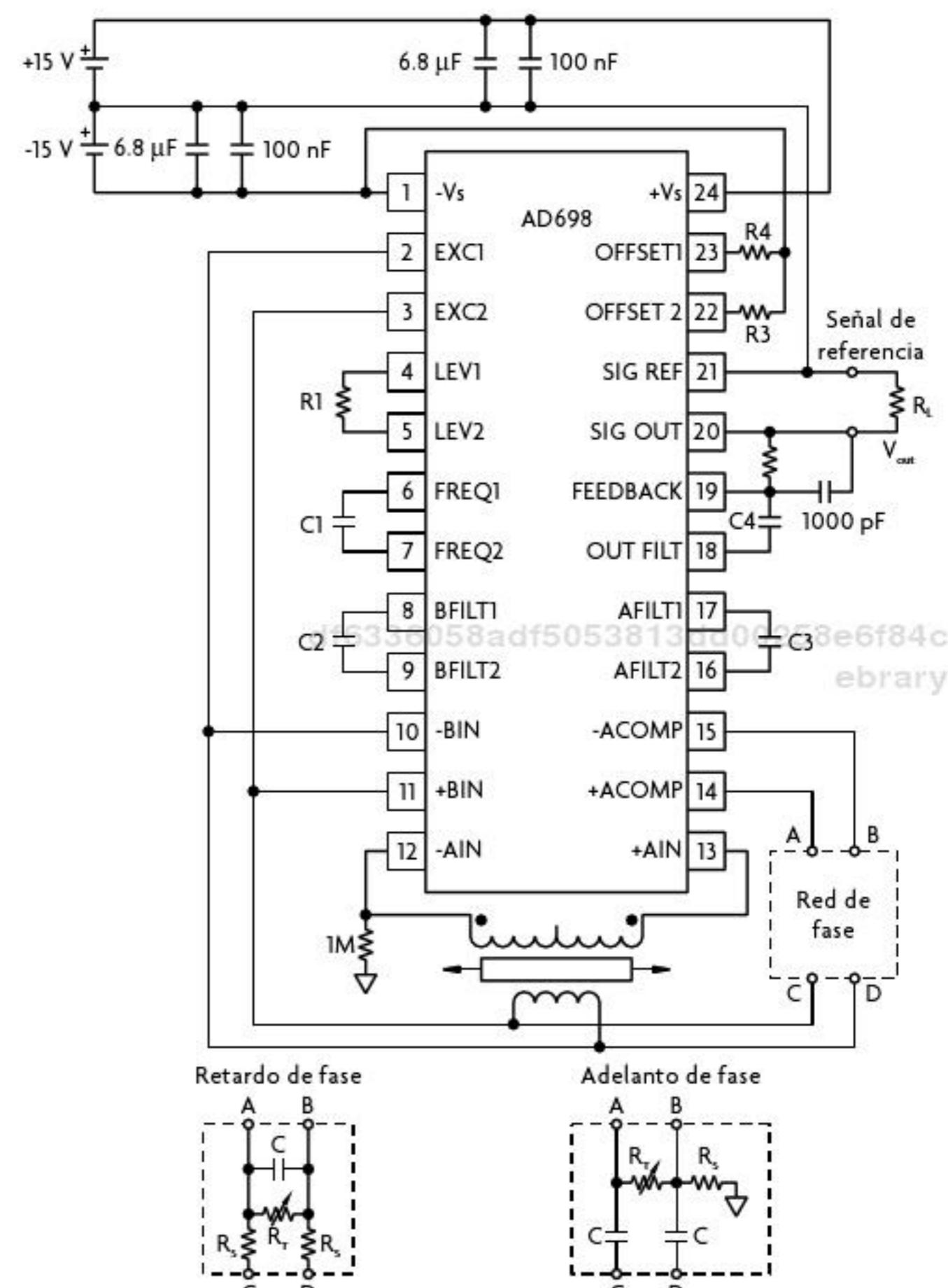
Asimismo, el cálculo de la salida de voltaje para este tipo de sensores es relativamente más complejo comparado con otros, ya que se requiere conocer el número de vueltas en cada devanado, la permeabilidad relativa y las características de la armadura que rodea a todo el sistema. Existen circuitos acondicionadores embebidos que integran todos los elementos necesarios para acondicionar la señal; la principal ventaja de estos es que ya no se requiere conocer las características mencionadas, ni tampoco es necesaria una fuente de alimentación en CA, ya que su salida está dada en CD.

Un circuito integrado que realiza esta función es el AD698, de AnalogDevices® (véase figura 3.46). Este circuito integra de manera monolítica todos los subsistemas necesarios para que un LVDT sea usado como transductor de posición a voltaje.

Como se puede observar en la figura, algunos elementos aún deben ser calculados, dependiendo de las características de voltaje a la salida y de las particularidades del mismo LVDT.

### 3.5 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Un GPS (por sus siglas en inglés: Global Positioning System) es un sistema de posicionamiento global, a través del cual es posible obtener información muy diversa acerca del objeto que porta la antena (por ejemplo, su altitud, latitud y longitud, su velocidad, la hora UTC<sup>2</sup> a la que está siendo tomada la lectura, la fecha, el número de satélites disponibles para la lectura, etcétera). El GPS fue creado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos de América en 1970, aunque en un principio no estuvo disponible para todo el público, sino hasta 1995, año en que empezó su comercialización. Este sistema es operado por una serie de satélites llamado *constelación*.



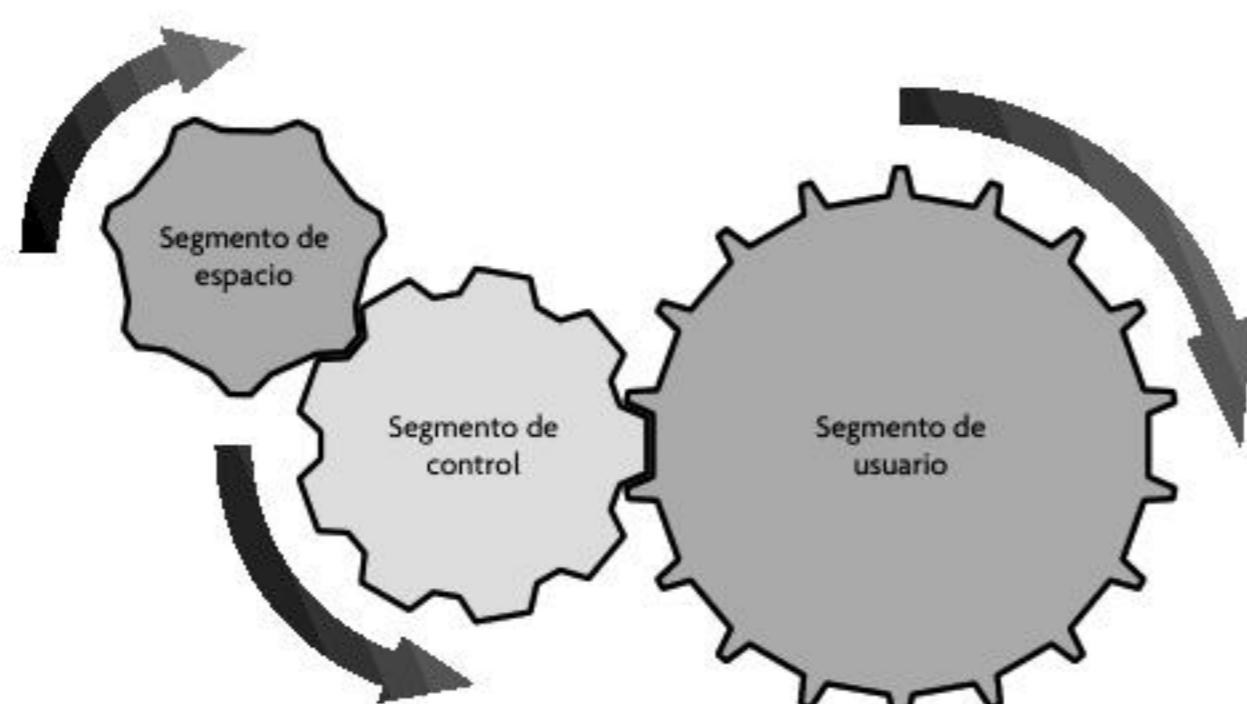
**Figura 3.46** Circuito básico basado en el AD698 para su uso con un LVDT.

<sup>2</sup> Coordinated Universal Time es el tiempo de la zona horaria de referencia, respecto a la cual se calculan todas las demás zonas horarias del mundo.

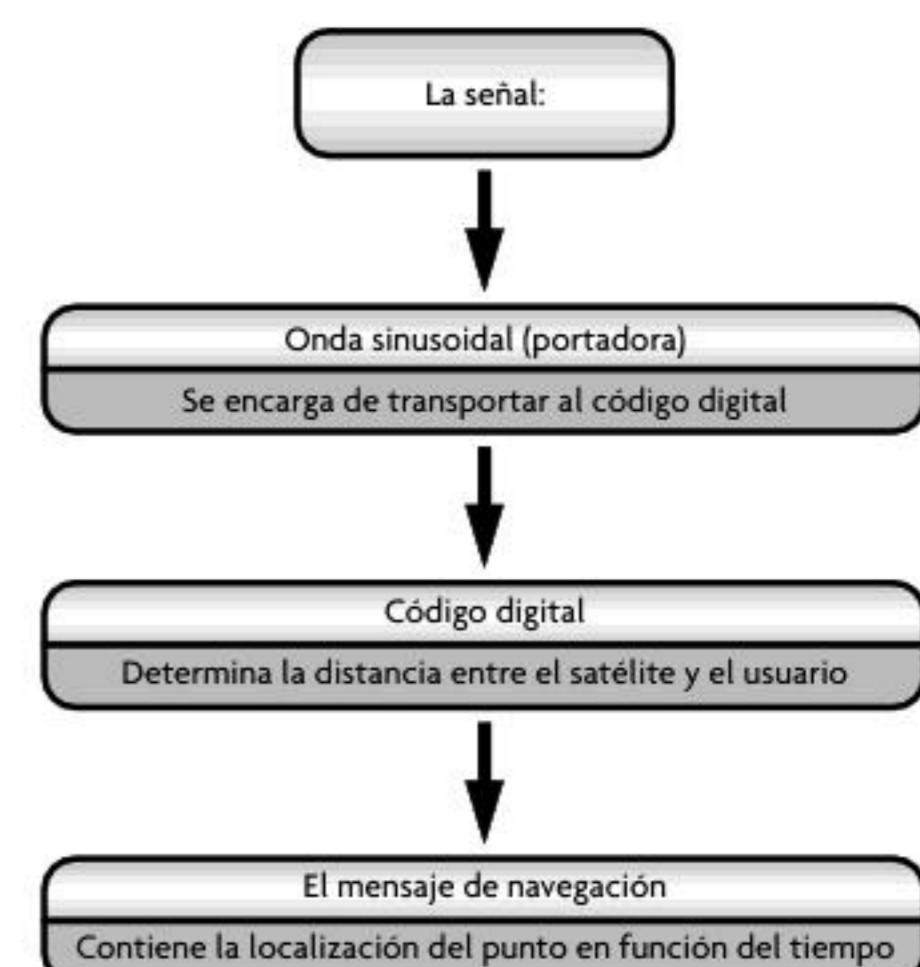
Para su operación, el sistema GPS está dividido en tres segmentos:

- El **segmento de espacio** está compuesto por la constelación; en sus inicios, el sistema contaba con 24 satélites, número que se ha incrementado al paso del tiempo, con el fin de mejorar la señal recibida por el GPS.
- El **segmento de control** está compuesto por las oficinas alrededor del mundo encargadas de dar seguimiento y mantenimiento al sistema. Su matriz se encuentra en Colorado, Estados Unidos de América.
- El **segmento de usuario** se refiere a cualquier receptor GPS que sea capaz de recibir la señal (véase figura 3.47).

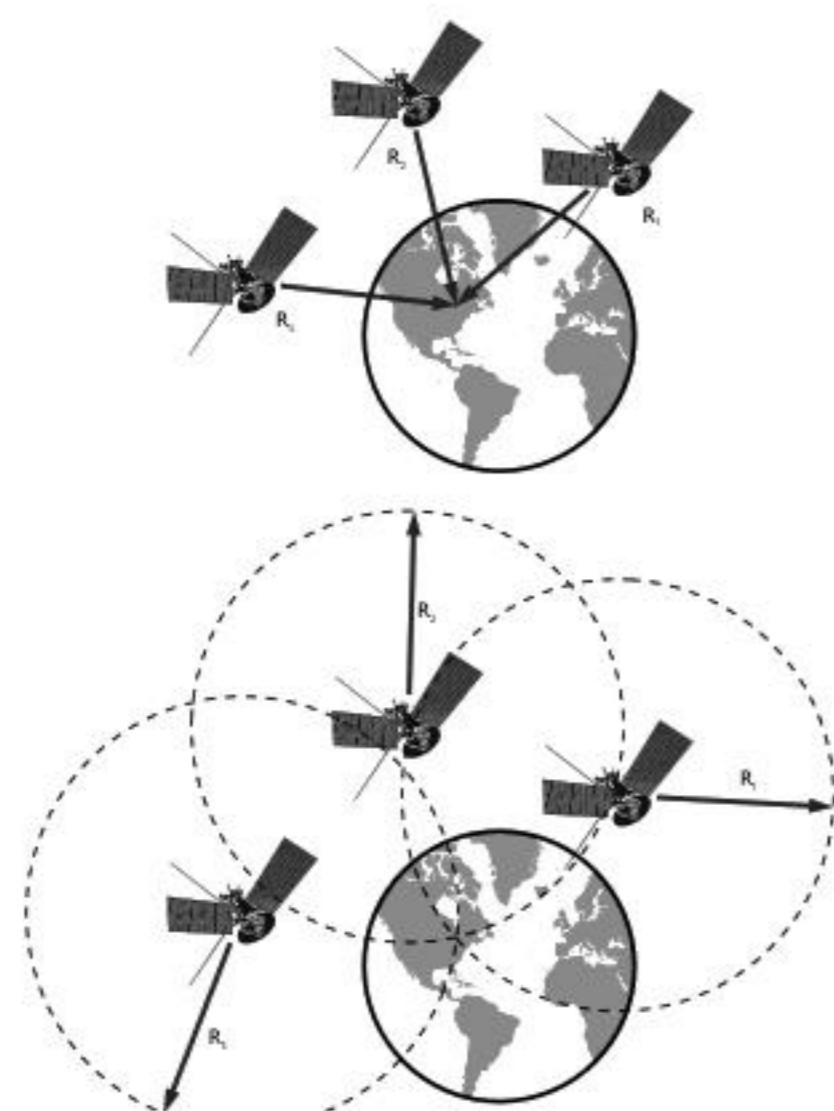
En términos generales, su funcionamiento puede resumirse de la siguiente manera: 1) el segmento de control se encarga de procesar la señal enviada por el segmento de espacio; 2) la señal se recibe en forma de una onda sinusoidal portadora, en donde está contenida la información; 3) posteriormente, esta señal procesada se envía al segmento de usuario, quien deberá recibir la información haciendo uso de un protocolo de comunicación (véase figura 3.48).



**Figura 3.47** Segmentos del sistema GPS.



**Figura 3.48** Contenido de una señal GPS.



**Figura 3.49** Triangulación.

La forma en que el sistema GPS ubica a un usuario es a través de la triangulación, la cual se realiza mediante el uso de tres satélites, donde cada uno de estos determina a qué distancia se encuentra el usuario y traza un círculo con ese valor de radio; el punto en donde se intersecan esos tres radios constituye el punto en donde está ubicado el usuario (véase figura 3.49).

La calidad de la triangulación determina qué tanto error existe en la ubicación de un usuario; en el caso de las aplicaciones militares y topográficas esta triangulación tiene un error del orden de centímetros, lo que significa que el código de ubicación que se recibe garantiza que el objeto se encuentra en un radio cercano a un centímetro alrededor del punto dado. En tanto, para el caso de las triangulaciones para el público en general, se considera que estas tienen un error mayor a un metro; por esta razón, este tipo de sensores de posición son recomendados para su uso en espacios abiertos grandes, donde el error permisible sea mayor.

El segmento de control determina la frecuencia a la cual se envía la señal digital que contiene la información. Con el fin de evitar que el público en general tenga acceso a los códigos de ubicación con precisión militar, la señal del público en general viaja a una frecuencia distinta y la información está encriptada; esto es, las antenas de uso comercial captan los códigos de ubicación a una frecuencia de 1 575.42 MHz, frecuencia que es distinta para el caso de aplicaciones militares. Para fines prácticos de uso de los GPS, la mayoría de los fabricantes incorpora una señal, llamada FIX, la cual consiste en un pulso alto o bajo de un pin de salida del sensor. El pin FIX emite una señal en alto cuando la antena de GPS no esté recibiendo señal, y una vez que el GPS ha encendido correctamente el pin de FIX tendrá una señal en bajo. La forma en que se lee la información de un GPS comercial depende del tipo de protocolo a usar; hoy día, los protocolos disponibles para las lecturas son RTCM SC-104, RINEX, NGS-SP3 y NMEA, de los cuales el más utilizado es el NMEA, ya que este tipo de protocolo se utiliza a una velocidad de lectura de 9600 bps y constituye un código que se lee por enunciado, en donde cada carácter tiene un significado.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

## Las cadenas NMEA

Una cadena NMEA tiene una configuración específica, donde la posición de sus elementos determina qué significado tiene cada elemento.

Un enunciado NMEA tiene la configuración básica que se muestra en la figura 3.50.



**Figura 3.50** Secuencia de parámetros en un enunciado NMEA.

- El inicio de trama será: \$
- Identificador de código para GPS: GP
- El tipo de enunciado será:
  - GGA: contiene la hora, posición y si la información es fidedigna.
  - GSA: modo de operación del GPS, satélites usados para la medición, el valor DOP.<sup>3</sup>
  - GSV: número de satélites a la vista para la lectura y su número de identificación, elevación, azimut y valor SNR.<sup>4</sup>
  - RMC: hora, fecha, posición, curso y velocidad.
  - VTG: curso y velocidad relativa a la Tierra.
- La información dependerá de qué tipo de enunciado a identificar se tenga (siempre estará separada por comas).
- Check sum: un número que caracteriza a cada trama.

## Ejemplo

### Ejemplo de lectura de una cadena NMEA

Un código NMEA tiene la siguiente forma:

\$GPGGA,064951.000,2407.1256,N,12116.4438,E,1,8,  
0.95,39.9,M,17.8,M,\*65

Para realizar su lectura es preciso consultar la hoja de datos de la antena; por ejemplo, en este caso la información está distribuida de la siguiente forma:

<sup>3</sup> El error final de posición que tiene la configuración espacial de los satélites y el usuario.

<sup>4</sup> Razón de ruido en la señal.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

Elemento	Ejemplo	Significado
Inicio de trama y tipo de enunciado	\$GPGGA	Encabezado del protocolo
Separador de caracteres	,	Separa la información
Hora	064951.000	hhmmss.sss h: hora m: minuto s: segundo
Latitud	2407.1256	ggmm.mmmm g: grados m: minutos
Indicador N/S	N	N: norte S: sur
Longitud	12116.4438	gggmm.mmmm g: grados m: minutos
Indicador E/O	E	E: este W: oeste
Indicador de posición (Fix)	1	0: posición no disponible 1: posición disponible 2: posición diferencial
Satélites usados	8	Puede ir de 0 a 14
HDOP	0.95	Precisión de disolución horizontal
Altitud MSL	39.9	Altitud con respecto al nivel del mar
Unidades	m	Unidades empleadas para la medición de altitud MSL
Separación geoidal	17.8	
Unidades	m	Unidades empleadas para la medición de separación geoidal
Check sum	*65	Número característico de la cadena

Tabla 3.5

ebrary

No obstante todas sus bondades, este tipo de sensores de posicionamiento tiene una gran desventaja, y es que su funcionamiento en espacios cerrados es limitado, mientras que en espacios abiertos se debe procurar evitar la presencia de edificios cercanos, árboles o cualquier obstáculo que entorpezca la recepción de la señal. Cuando se inicializa un GPS, siempre debe tomarse en cuenta el tiempo que le toma a este captar la información, ya que en algunos casos si la señal no es muy intensa puede tardar varios minutos, además de que una vez que ha captado la señal no se garantiza que el GPS no la vuelva a perder.

En el caso de los GPS existe una gran diferencia entre captar la señal cuando el sensor está en inicio *frio*, *templado* o *caliente*. Se dice que está en inicio frío cuando debe adquirir toda la información necesaria para determinar su posición actual, como los satélites que tiene a la vista, el almanaque (información específica sobre los satélites) y la hora UTC. Por su parte, se dice que cuando está en inicio templado significa que el GPS aún tiene almacenada en la memoria flash la información sobre su última posición, pero debe refrescar los datos del almanaque; por último, cuando se dice que el sensor está en inicio caliente, se debe a que este recuerda su última posición y es capaz de obtener la siguiente posición, sin refrescar los datos del almanaque. Dependiendo de la calidad de la antena, el inicio frío puede tardar desde algunos segundos hasta varios minutos. Algunos fabricantes

incluyen en el PCB del sensor una terminal llamada  $V_{BAT}$ , la cual sirve para mantener alimentado al sensor todo el tiempo, de tal manera que cuando se requiera accesar a la información la señal esté siempre disponible.

## Ejercicio de aplicación

### Implementación de un GPS (Global Positioning System)

#### Objetivo

Obtener la hora y fecha GMT, las coordenadas de la posición actual de latitud y longitud y la velocidad de desplazamiento en km/h de un GPS a través de un Arduino®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Adafruit Ultimate GPS Breakout®
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### • Descripción del GPS

Adafruit Ultimate GPS Breakout es un dispositivo GPS capaz de detectar su posición con una precisión de hasta 1.8 m, y si se encuentra en movimiento, puede medir su velocidad con una exactitud de hasta 0.1 m/s (0.36 km/h).

Consta de 66 canales; es decir, puede conectarse hasta con 66 satélites al mismo tiempo, lo que le permite detectar su posición con rapidez.

Puede alimentarse de una fuente de entre 3 y 5.5 V. Además, tiene una velocidad de actualización de datos de 1 a 10 Hz.

La disposición de pines para este modelo de GPS (véase figura 3.51) es la siguiente:

- **3.3 V:** Tensión de alimentación de 3.3 V.
- **EN (Enable):** Permite apagar y encender el módulo, para tener un mayor ahorro de energía.
- **$V_{BAT}$ :** Batería opcional CR1220. Permite que el RTC (reloj en tiempo real, por sus siglas en inglés) siempre esté en funcionamiento permitiendo un warmstart (esto es, cuando el GPS recuerda la última posición calculada y la hora GMT, pero no el número de satélites disponibles).
- **FIX:** El LED acoplado al módulo GPS parpadea cada segundo mientras está en búsqueda de satélites. Pero cuando encuentra los suficientes satélites para determinar su posición, el LED parpadea cada 15 segundos, como ahorro de energía. Esta misma señal que controla al LED está disponible en el PIN FIX.
- **TX:** Envía toda la información respecto a posición, hora, fecha, etcétera, de acuerdo con el protocolo NMEA. La transmisión se da a una velocidad de 9600 baudios.

- **RX:** Pueden configurarse algunos parámetros del GPS como la velocidad de actualización de datos, el tipo de inicio, etcétera, a través de los comandos PMTK.
- **GND:** Tensión de referencia del módulo GPS.
- **VIN:** Tensión de alimentación de 3–5 V.
- **PPS (Pulse Per Second):** Este módulo GPS ofrece una señal de salida precisa de un pulso por segundo, que solo funciona cuando se ha calculado en forma correcta la posición del GPS. Es una señal útil para sincronización.

El Arduino® puede trabajar con los dos tipos de alimentación (3.3 y 5 V), por lo que es indiferente el hecho de cuál de los dos se utilice.



Figura 3.51 Adafruit Ultimate GPS Breakout®.

#### Construcción del circuito

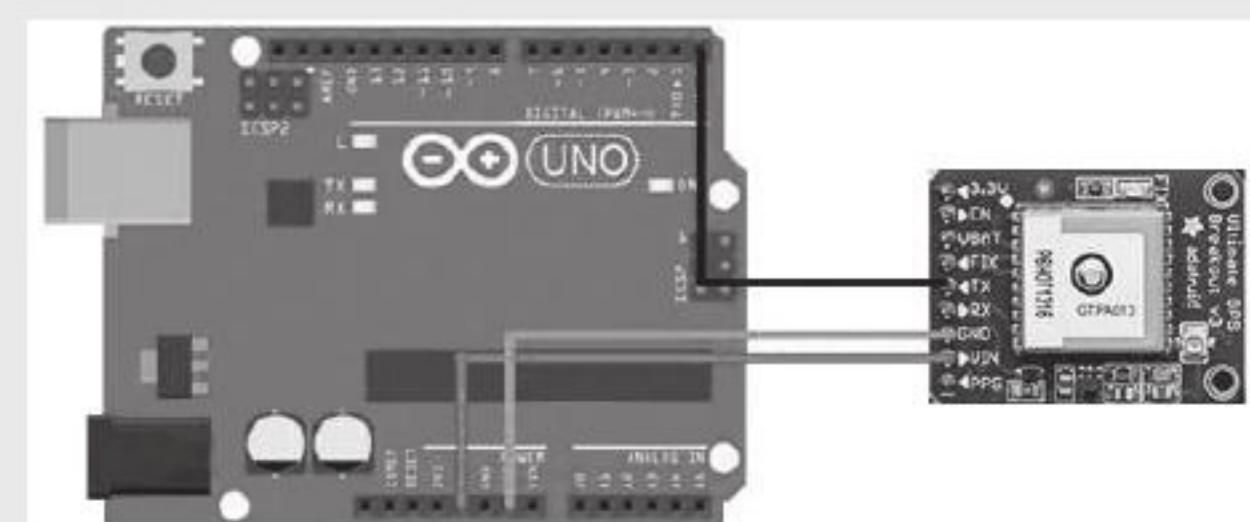
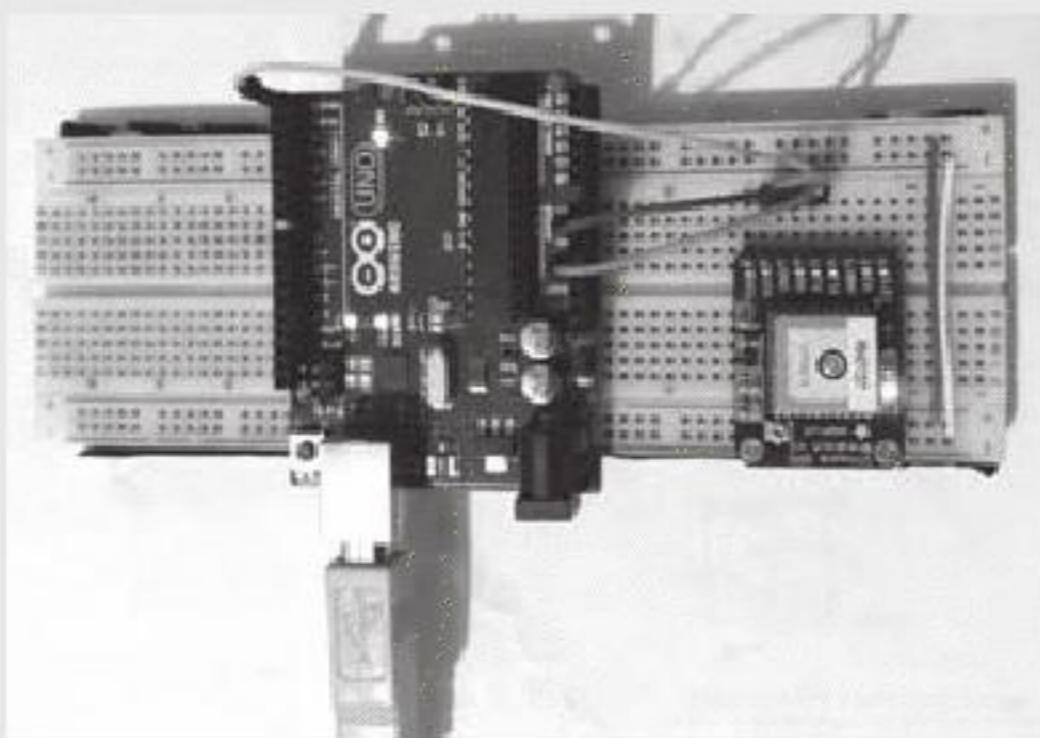


Figura 3.52 Diagrama de conexión entre el GPS y Arduino Uno®.

La figura 3.52 muestra el diagrama de conexión entre el Arduino UNO® y el módulo de GPS. El circuito es muy sencillo. Solo se alimenta al sensor por cualquiera de sus dos pines disponibles (3.3 V o VIN) y se conecta el transmisor del GPS al receptor del Arduino®.

En la figura 3.53 se aprecia el circuito montado físicamente.



**Figura 3.53** Circuito GPS montado físicamente.

## Código

### Descripción del programa

El siguiente programa obtiene posición, hora, fecha y velocidad actual del GPS.

Para ello, se busca la cadena \$GPRMC, que contiene toda esta información. Una vez hecho esto y posicionados en esta cadena, se extrae cada uno de los datos, dependiendo entre qué comas se encuentren.

La hora y fecha que ofrece el GPS están en formato GMT; es decir, corresponden al meridiano de Greenwich. Dependiendo dónde nos localicemos, podemos ajustar la hora GMT a la local; sin embargo, debemos considerar si en la región existe algún programa de horario de verano o similar.

Respecto a la velocidad del GPS, el protocolo NMEA la establece en nudos. Sabiendo que 1 nudo equivale a 1.852 km/h, podemos hacer la conversión pertinente a km/h.

```
***** GPS *****
/*
**El GPS es un dispositivo que mediante la
  triangulación satelital
**puede calcular su posición con una gran
  precisión.
*/
/**En el Arduino obtendremos y procesaremos la
  cadena del GPS, para
**poder determinar la
**posición (latitud y longitud), la hora GMT,
  la fecha y la velocidad.
*/
/**Para más detalle consulte el protocolo NMEA
*****
```

//Definimos las variables utilizadas en el
 programa
char findString, rmc[100], data, hora[11],
 lat[10], lon[11];
char vel[6], fecha[7], senLN, senLT;

```
int contComa = 0, cH = 0, cLT = 0, cLN = 0, cVel
  = 0, cFecha = 0;
float gLat, sLat, gLon, sLon, convVel;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Comunicación serie a
  9600 baudios (Velocidad del GPS GTPA013)
}

void loop()
{
  stringRMC(); //Función para tomar la cadena
  GPRMC -> hora, latitud,
  //longitud, velocidad y fecha
//Contadores para tomar cada uno de los datos
  útiles de la cadena
  cH = 0;
  cLT = 0;
  cLN = 0;
  cVel = 0;
  cFecha = 0;
  contComa = 0;

  while(true)
  {
    if (Serial.available() > 0) //Si recibimos
    algun valor del GPS
    {

      data = Serial.read(); //Leemos el carácter
      if (data == '<, >') //Detectamos las comas
      para saber que //tipo de datos se toma (hora,
      fecha, etc.)
      contComa++; //Contamos el
      numero de comas
      elseif (contComa == 1) //Después de una
      coma en la cadena se //encuentra la HORA GMT
      {
        hora[cH] = data; //Almacenamos
        la hora en un vector
        cH++;
      }
      elseif (contComa == 3) //Después de la
      tercer coma se encuentra //la LATITUD
      {
        lat[cLT] = data; //Almacenamos
        la latitud en un vector
        cLT++;
      }
      elseif (contComa == 4) //Después de la
      cuarta coma se encuentra //el sentido de la
      LATITUD (N->norte, S->sul)
        senLT = data;
      elseif (contComa == 5) //La quinta coma
      indica la LONGITUD
      {
        lon[cLN] = data; //Almacenamos la
        longitud en un vector
        cLN++;
      }
    }
  }
}
```

```

        elseif (contComa == 6) //La sexta coma
        indica el sentido de la //LONGITUD (W->oeste,
        E->este)
        senLN = data;
        elseif (contComa == 7) //La septima coma
        indica la VELOCIDAD en //nudos a la que se
        desplaza el GPS.
        {
            vel[cVel] = data;           //Almacenamos la
            velocidad en un vector
            cVel++;
        }
        elseif (contComa == 9) //Despues de la
        novena coma leemos la //FECHA
        {
            fecha[cFecha] = data;    //Almacenamos la
            fecha en un vector
            cFecha++;
        }
        if (data == <*>) //Cuando leamos el
        caracter <*> //finalizamos la lectura, pues
        indica el fin de la cadena GPRMC
        break;
    }

//Hora GMT -> Formato HH:MM:SS.SS
Serial.print("Hora: ");
//Hora
Serial.print(hora[0]);
Serial.print(hora[1]);
Serial.print(":");
//Minutos
Serial.print(hora[2]);
Serial.print(hora[3]);
Serial.print(":");
//Segundos
Serial.print(hora[4]);
Serial.println(hora[5]);

//Latitud ->Formato GG°MM'SS"
Serial.print("Latitud: ");
//Obtencion de los segundos
gLat = atof(lat);
sLat = (gLat - floor(gLat))*60;
//Grados
Serial.print(lat[0]);
Serial.print(lat[1]);
Serial.print(" ");
//Minutos
Serial.print(lat[2]);
Serial.print(lat[3]);
Serial.print("''");
//Segundos
Serial.print(sLat);
Serial.print("'''");
//Sentido
Serial.println(senLT);

//Longitud ->Formato GG°MM>SS»
Serial.print("Longitud: ");
//Obtencion de los segundos

```

```

gLon = atof(lon);
sLon = (gLon - floor(gLon))*60;
//Grados
Serial.print(lon[0]);
Serial.print(lon[1]);
Serial.print(lon[2]);
Serial.print(" ");
//Minutos
Serial.print(lon[3]);
Serial.print(lon[4]);
Serial.print("''");
//Segundos
Serial.print(sLon);
Serial.print("'''");
//Sentido
Serial.println(senLN);
//Velocidad en km/h
Serial.print("Velocidad: ");
//Conversion de nudos a km/h, 1 nudo = 1.852
km/h
convVel = atof(vel) * 1.852;
//Velocidad en nudos
Serial.print(convVel);
Serial.println(" km/h");

//Fecha -> DD/MM/AA
Serial.print("Fecha: ");
Serial.print(fecha[0]);
Serial.print(fecha[1]);
Serial.print("/");
Serial.print(fecha[2]);
Serial.print(fecha[3]);
Serial.print("/");
Serial.print(fecha[4]);
Serial.print(fecha[5]);
Serial.println("");
}

//Funcion que detecta la cadena $GPRMC
void stringRMC()
{
    while(true)
    {
        if (Serial.available() > 0) //Mientras
        tengamos datos por leer
        {
            findString = Serial.read(); //Leemos el
            GPS
            if (findString == <R>) //Si el caracter
            leido es la letra //>R> continuamos la lectura
            {
                while (Serial.available() == 0); //
                Si recibimos un caracter y //es la letra 'M'
                continuamos la lectura
                findString = Serial.read();
                if (findString == <M>)
                {
                    while (Serial.available() == 0); //
                    Si recibimos un caracter y //es la letra 'C'
                    continuamos leyendo

```

```
        findString = Serial.read(); //si no
es asi seguiremos //verificando al GPS hasta
cumplir esta ultima condicion
        if (findString == 'C')
            break;
    }
}
}
}
```

## Pruebas

Se recomienda que la lectura del GPS se realice en espacios abiertos, para localizar con más facilidad a los satélites y conocer rápido la posición.

En la figura 3.54 se aprecia la lectura de la cadena \$GPRMC con toda la información requerida; en esta pueden observarse algunas variaciones en la velocidad que se deben a que el GPS está en reposo y no se verá un valor adecuado hasta que este se ponga en movimiento.

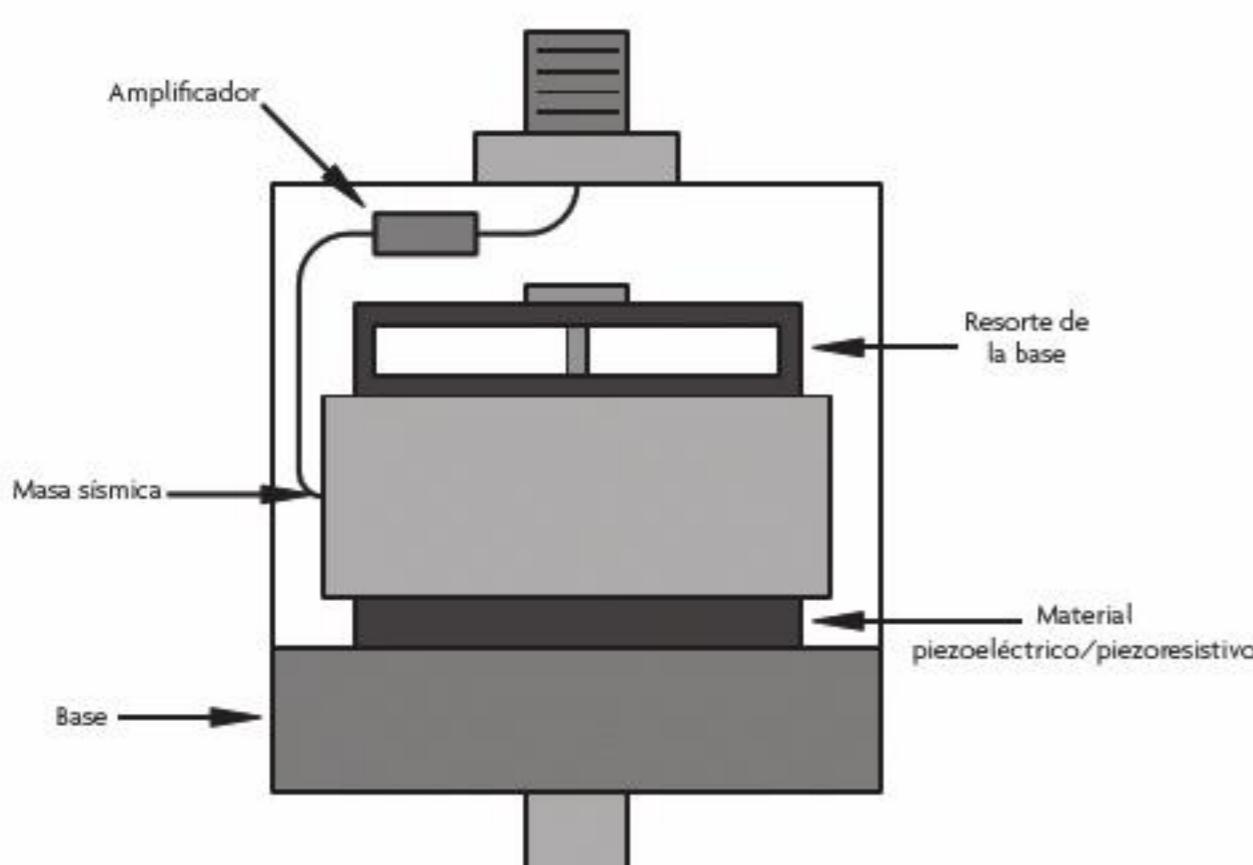


**Figura 3.54** Información sobre la hora y fecha GMT, la posición en latitud y longitud, así como la velocidad de movimiento del GPS.

### 3.6 Acelerómetros

Este tipo de sensores es ampliamente utilizado para determinar tanto la inclinación de un objeto como su vibración, cuando se utiliza en configuración estática. Para el caso de aplicaciones dinámicas, estos sensores se usan para determinar la aceleración translacional en un sistema de ingeniería; por ejemplo, en la industria automotriz son utilizados para determinar en qué momento se deben activar las bolsas de aire debido a una fuerte desaceleración. Este tipo de sensores pueden estar basados en el principio de transducción piezoresistivo, piezoeléctrico o capacitivo; sin importar qué tipo de principio de transducción se utilice, el sensor tendrá una salida lineal, esto quiere decir que al impulso o inclinación que reciban a la entrada, se observará una respuesta proporcional a la salida, siguiendo la segunda ley de Newton y la Ley de Hook.

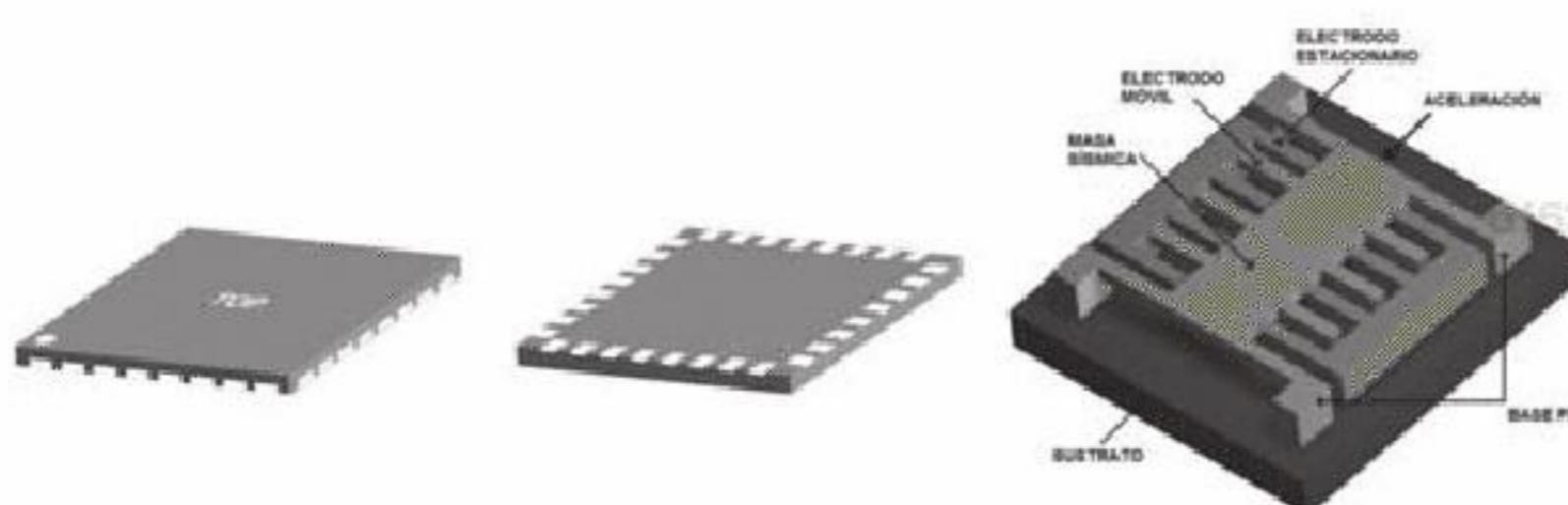
Un acelerómetro consiste en una masa móvil que al percibir aceleración externa genera un desplazamiento proporcional al cociente entre la fuerza aplicada y su rigidez asociada.



**Figura 3.55** Acelerómetro industrial.

Un acelerómetro con elementos piezoeléctricos o piezoresistivos en general se utiliza en maquinaria pesada con el fin de determinar la vibración de la misma. Este tipo de acelerómetros utilizan la configuración base que se muestra en la figura 3.55. En esta configuración, el material piezoeléctrico generará un voltaje dependiendo si es comprimido por la masa móvil o si es liberado de dicha compresión debido a la vibración de la máquina; el circuito amplificador se encargará de acondicionar la señal para su posterior interpretación. Cuando en la fabricación de estos se utiliza material piezoresistivo, la resistividad del material cambiará cuando vibre sobre él la masa; esta variación de resistividad se ve reflejada en un cambio en el voltaje o la corriente del circuito, que de igual forma es interpretada por el circuito amplificador (para mayor detalle sobre estos principios de transducción consulte el capítulo uno, en Principio de transducción piezoeléctrico y Principio de transducción piezoresistivo).

Para el caso de los acelerómetros capacitivos, comercialmente estos se encuentran fabricados con tecnología MEMS. Este tipo de microsistemas tiene una presentación mucho más conveniente, ya que no requieren de un circuito amplificador adicional o de un montaje tan especializado. De igual forma, estos también tienen una masa móvil, solo que en esta se trata de un electrodo móvil que forma parte de un capacitor. Mientras el otro electrodo se mantiene fijo, cuando el sensor es excitado por una aceleración externa, la masa móvil se aproxima o se aleja, de tal forma que el cambio de capacitancia será la correlación entre la aceleración y el cambio de alguna variable eléctrica en el circuito de lectura (para mayor detalle sobre estos principios de transducción consulte el capítulo uno, en la sección Principio de transducción capacitivo). Por fortuna, este tipo de sensores tiene una salida lista para su lectura.

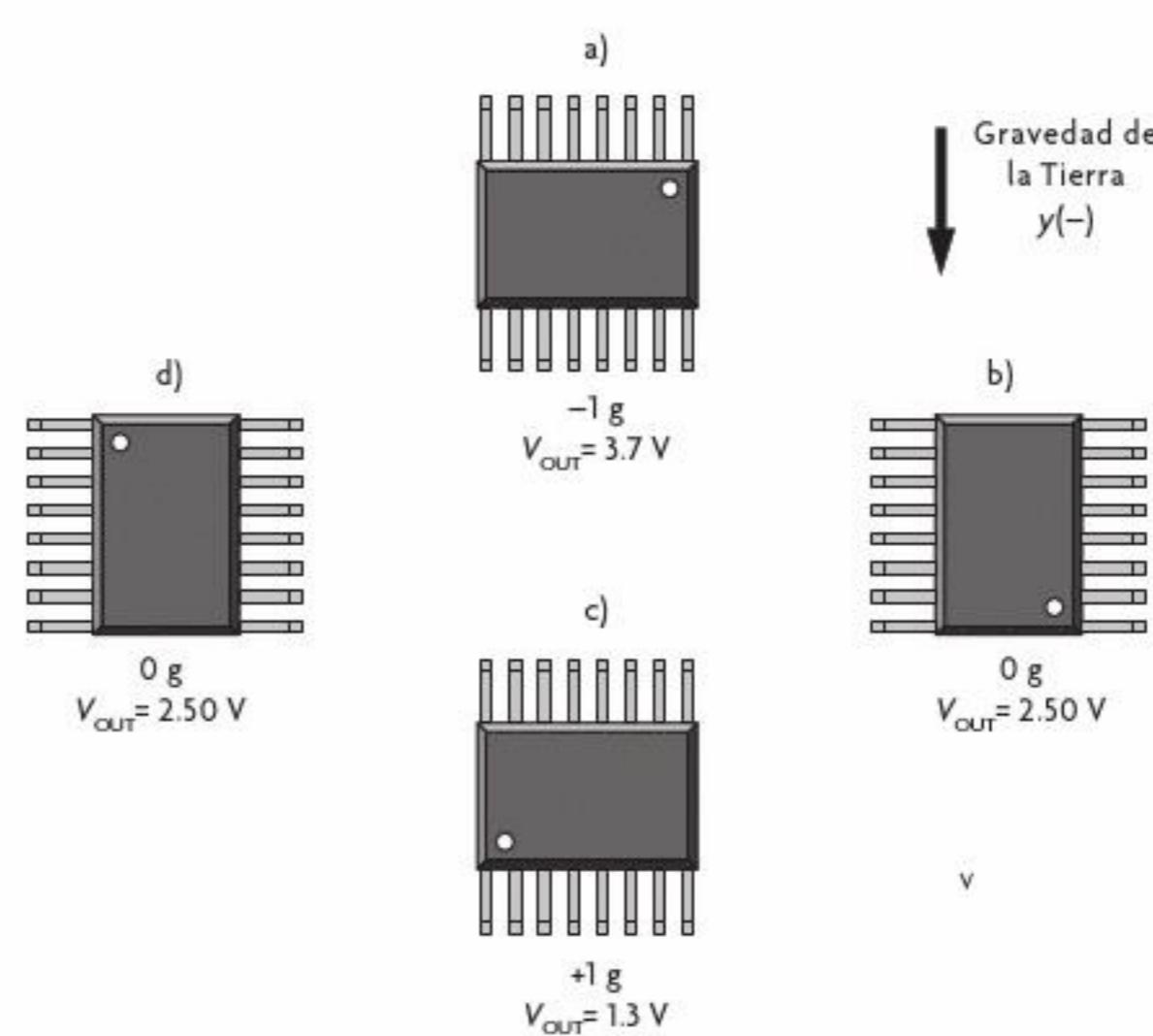


**Figura 3.56** Acelerómetro capacitivo.

Los acelerómetros capacitivos han ido desplazando, poco a poco, a los acelerómetros piezoelectrinos y piezoresistivos, por su facilidad de montaje en un sistema y su baja dependencia a la temperatura. Los acelerómetros capacitivos se encuentran en dos presentaciones: analógicos y digitales. Cuando el sensor es analógico, generalmente tiene una salida de voltaje; esto quiere decir que por cada  $G^5$  aplicada, el sensor incrementará  $X$  volts a la salida; por el contrario, cuando el sensor es digital, se observa un incremento o una disminución en el valor digital entregado por el sensor. Las formas de medición de inclinación y aceleración dinámica que se muestran a continuación están basadas en el uso de acelerómetros capacitivos MEMS.

### Inclinómetro usando sensores MEMS capacitivos

Esta configuración de acelerómetro es ampliamente usada en los controles de los videojuegos actuales o para controlar el posicionamiento de un sistema de manera intuitiva. La inclinación del sistema se mide a partir de relacionar la aceleración debida a la gravedad de la Tierra y el desplazamiento de la masa móvil. Por ejemplo, considérese la figura 3.57; si se dispone un acelerómetro en la posición (A), debido a que la aceleración de la gravedad está en el eje  $y(-)$ , el sensor tendrá un voltaje a la salida de +3.7 V; para el caso en que el sensor se encuentre en la posición (C), este tendrá un valor de 1.3 V, de tal manera que cuando el sensor se encuentre



**Figura 3.57** Acelerómetro en configuración estática.

<sup>5</sup> Una G es una variable adimensional que indica cuántas veces ha sido aplicada la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

en la posición intermedia entre  $-G$  y  $G$ , también tendrá un valor de voltaje intermedio. Este cambio de voltaje se logra inclinando el sensor alrededor del eje  $y$ . Si el sensor es digital, lo que se verá a la salida en lugar de un voltaje será un valor digital; por ejemplo, cuando el acelerómetro esté en la posición de  $-G$  entregará un valor digital de  $-16$ , y cuando el sensor se encuentre en la posición de  $G$  entregará un valor digital de  $16$ . Los voltajes negativos a la salida de este tipo de sensores no son muy comunes, ya que difícilmente un sensor MEMS requiere alimentación negativa, aunque los valores digitales negativos sí son comunes, ya que estos se generan de manera virtual, no debido a la presencia de voltajes negativos.

Si el sensor tiene la capacidad de medir aceleración en los tres ejes ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), este principio se cumplirá alrededor de cada uno de los ejes. Las desventajas de usar este tipo de sensores de aceleración radican en que, en ocasiones, los sensores se encuentran *desbalanceados*, debido básicamente a problemas tecnológicos durante su fabricación. Por ejemplo, considérese un acelerómetro digital que en la posición de  $-G$  en el eje  $y$  tiene una salida digital  $200$ , mientras que en la posición  $G$  tiene una salida digital  $230$ ; esta desproporción se deberá compensar mediante el sistema de lectura que se esté utilizando.

### Medición de aceleración dinámica

La medición de aceleración dinámica con un sensor de este tipo es muy simple, y solo se debe establecer una relación entre la salida que tiene el sensor cuando se le está aplicando una aceleración conocida y establecer una regla de tres. Por ejemplo, supóngase que coloca el sensor en la posición de  $G$ , y se sabe que el valor entregado por el sensor será el debido a la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) por lo que la aceleración presente en el sistema se puede calcular por medio de la siguiente ecuación, donde el resultado estará dado en unidades de  $\text{m/s}^2$ :

$$a = \frac{9.81 \times x_{\text{actual}}}{x_G}$$

donde:

$x_{\text{actual}}$ : valor actual del sensor, que puede estar dado en volts o en digital

$x_G$ : el valor que entrega el sensor en la posición de  $G$

Para determinar el valor de la aceleración de manera dinámica, solo basta con leer continuamente el valor que entrega el sensor y sustituirlo en la fórmula. Cabe aclarar que si se sustituye el valor de  $x_G$  en volts, el valor de  $x_{\text{actual}}$  también deberá estar en volts; por el contrario, si se sustituye el valor de  $x_G$  en digital, el valor también deberá estar en digital.

La principal dificultad que presenta este tipo de sensado es el ruido presente debido a la vibración del sistema; por tanto, para explicar este fenómeno se deberá introducir un concepto llamado *sensitividad*<sup>6</sup> cruzada, la cual constituye la respuesta que presenta el sensor a cambios debidos a variables que no necesariamente son la variable física para el que es selectivo; por ejemplo, para el caso en que con un acelerómetro de tres ejes se desea tomar la lectura del cambio de aceleración solo en el eje  $x$ , en ocasiones el movimiento relativo en los otros dos ejes provoca que exista un cambio en la lectura del eje  $x$ , lo que representa ruido para el sistema. En general, se considera que un sensor inercial con baja sensitividad cruzada es un sensor con mejor desempeño.

<sup>6</sup> Se dice que un sensor es sensitivo al medio, no sensible.

## Ejercicio de aplicación

### Inclinómetro usando un acelerómetro

#### Acelerómetro-Inclinómetro

##### Objetivo

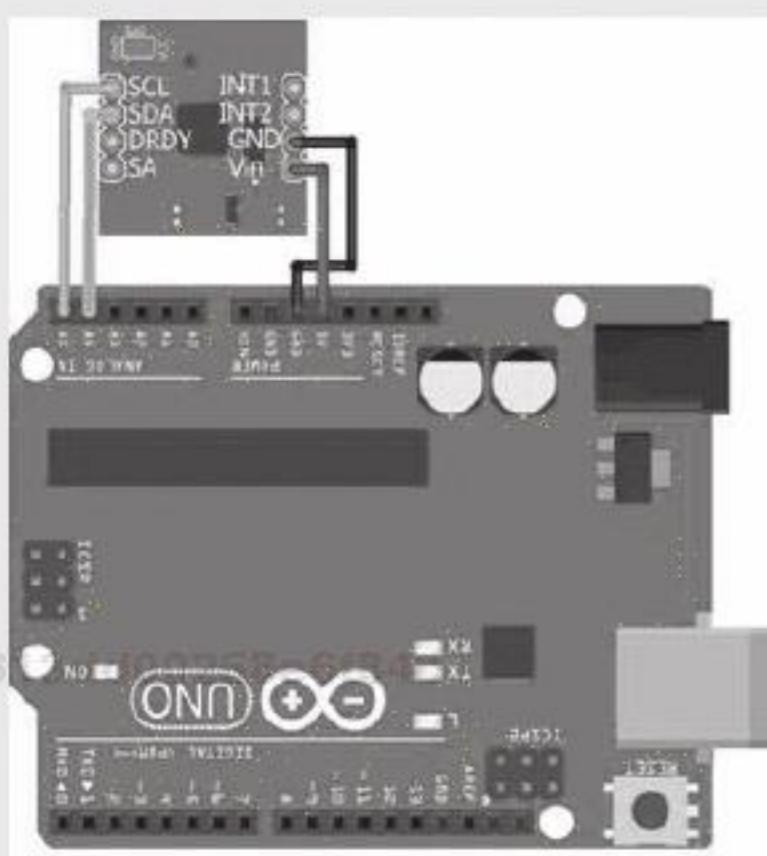
Medir la inclinación de superficies con un acelerómetro en grados a través de Arduino® y mostrando la información obtenida en el monitor serial.

##### Material

- Arduino IDE 1.0.5® (software)
- Arduino Uno Rev 3.0®
- Sparkfun LSM303DLH BreakoutBoard® (acelerómetro y magnetómetro)
- 4 cables Dupont® macho-hembra

##### Desarrollo

1. Conectar el sensor LSM303DLH al Arduino Uno® como se indica en la figura 3.58. Se recomienda usar cables largos para poder mover con facilidad el acelerómetro al hacer las pruebas.



**Figura 3.58** Sensor conectado al Arduino Uno®.

2. Analizar e implementar el siguiente código.

```
/*
ACELEROMETRO - INCLINOMETRO
```

Este ejemplo obtiene la inclinación en grados de un acelerómetro LSM303, este dispositivo se comunica por medio de I2C, lee las componentes de la gravedad en los 3 ejes del acelerómetro y calcula el angulo con funciones trigonometricas.

- La dirección del esclavo es de 7 bits.
- El LSB en el byte que contiene la dirección del esclavo indica escritura o lectura, es puesto en '0' o '1' automáticamente por las instrucciones correspondientes.

- Es necesario poner en '1' el ultimo bit de dirección de los registros al leer o escribir para escritura o lectura continua (autoincremento de dirección).
- El dispositivo se debe mantener estatico, para que solo actue la gravedad.

Para mas informacion del LSM303:  
<https://www.sparkfun.com/products/10888>

A4 (SDA), A5 (SCL)

\*/

```
// Bibliotecas
#include <Wire.h> // Biblioteca para I2C
#include <math.h> // Biblioteca con
operaciones matematicas

// ACELEROMETRO
#define LSM303DLH_A 0x18 // Direccion del
acelerometro (Fabricante)

// Registros a utilizar
#define CTRL_REG1_A 0x20 // Registros de
configuracion
#define CTRL_REG2_A 0x21
#define CTRL_REG4_A 0x23

#define OUT_X_L_A 0x28 // Registros de
lecturas
#define OUT_X_H_A 0x29
#define OUT_Y_L_A 0x2A
#define OUT_Y_H_A 0x2B
#define OUT_Z_L_A 0x2C
#define OUT_Z_H_A 0x2D

// Variables
int xl,xh,yl,yh,zl,zh; // Lecturas de
aceleraciones
double acc_x,acc_y,acc_z; // Aceleracion en
cada eje
int ang_xz,ang_yz; // Angulos en planos XZ y
YZ

// Constantes
constint rad2deg = 57;

void setup(){
    // Comunicaciones
    Serial.begin(9600); // Comunicacion serie a
9600 baudios
    Wire.begin(); // Comunicacion I2C

    // Configuracion Acelerometro
    Wire.beginTransmission(LSM303DLH_A);
    Wire.write( (1 << 7) | CTRL_REG1_A); // 
Registro inicial a escribir y
        // multiple escritura
```

```

Wire.write(0x37); // REG1 - Modo normal;
400Hz; X,Y,Z habilitados
Wire.write(0x00); // REG2 - No Reboot;
Filtro en corto
Wire.write(CTRL_REG4_A); // Nueva dirección
a escribir
Wire.write(0x80); // REG4 -
Bloqueoactualización; L endian; +-2g; Self
test
// disabled
Wire.endTransmission();
}

void loop (){

// Lectura de las 6 direcciones de datos
Wire.beginTransmission(LSM303DLH_A);
Wire.write( (1 << 7) | OUT_X_L_A); //
Registro inicial a leer, y
// autoincremento
Wire.endTransmission();

Wire.requestFrom(LSM303DLH_A, 6); // 6 bytes
a leer
xl = Wire.read();
xh = Wire.read();
yl = Wire.read();
yh = Wire.read();
zl = Wire.read();
zh = Wire.read();

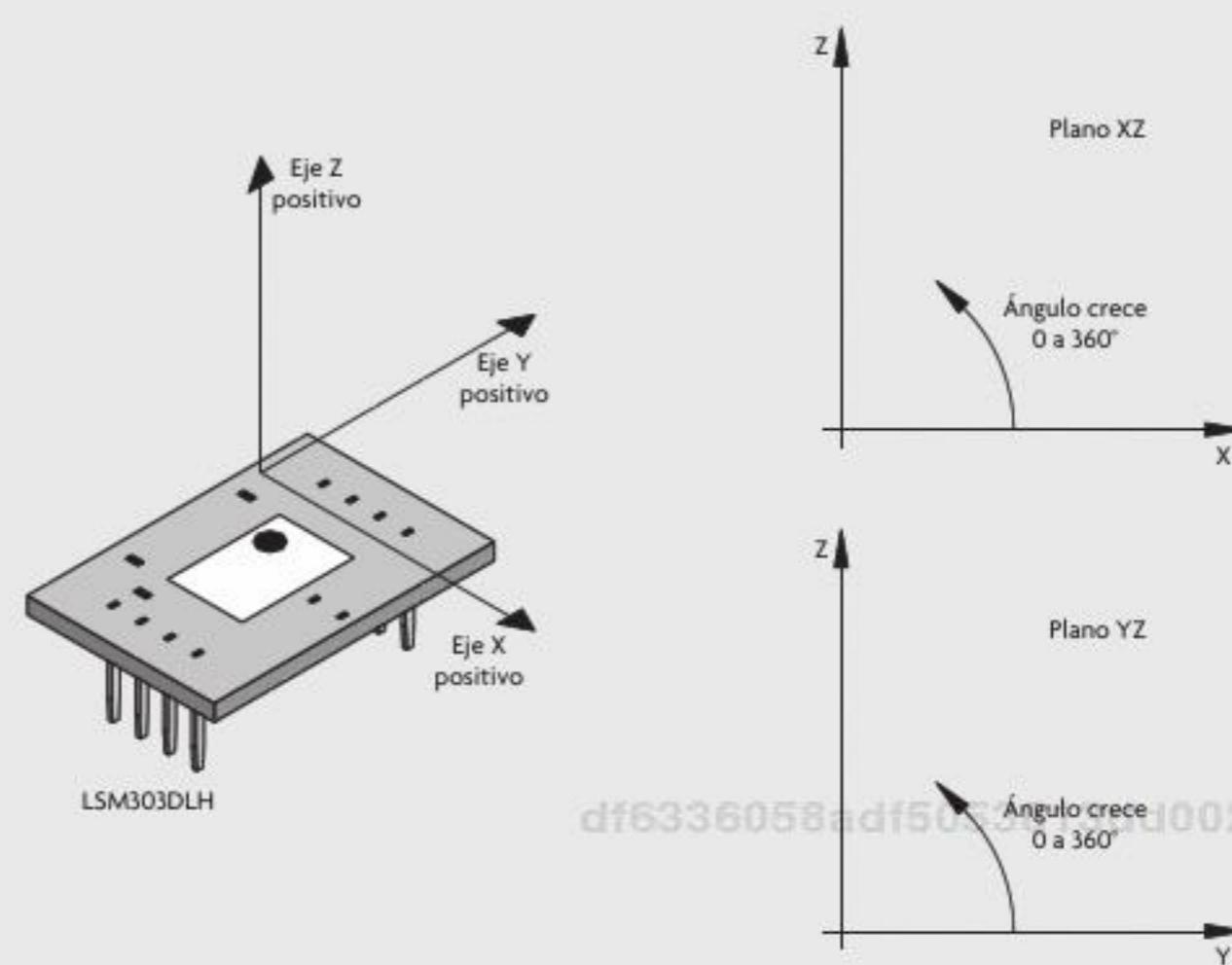
// Unión de bytes altos y bajos
acc_x = (long) (xh<< 8) | xl;
acc_y = (long) (yh<< 8) | yl;
acc_z = (long) (zh<< 8) | zl;

// Cálculo de ángulos
ang_xz = atan2(acc_x, acc_z) * rad2deg;
ang_yz = atan2(acc_y, acc_z) * rad2deg;
if(ang_xz< 0) ang_xz += 360;
if(ang_yz< 0) ang_yz += 360;

Serial.print("Ang_xz: ");
Serial.print(ang_xz);
Serial.print("\t Ang_yz: ");
Serial.println(ang_yz);
delay(200);
}

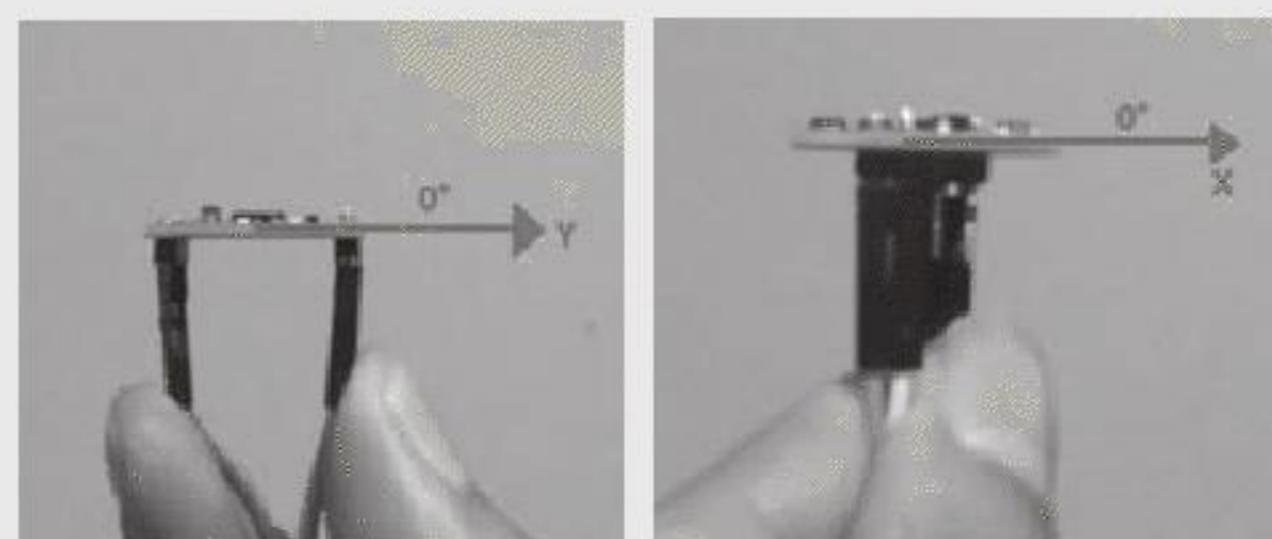
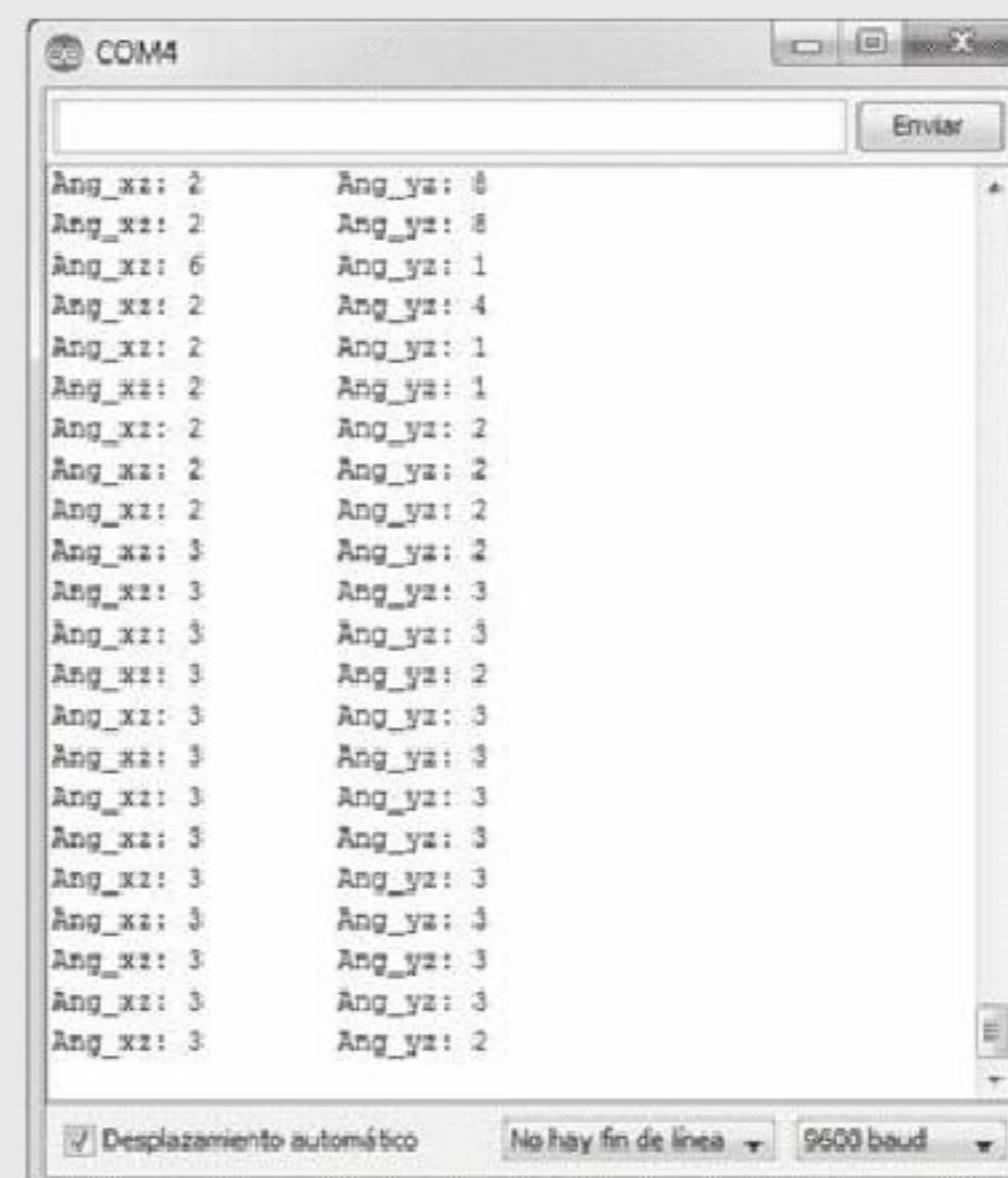
```

- 3.** Probar el programa y el funcionamiento del sensor. El programa se basa en la medición de la aceleración estática (gravedad) que siempre apunta hacia abajo; sabiendo esto y conociendo las componentes de dicha gravedad en cada eje del acelerómetro, se procede a calcular la inclinación, por lo que se debe conocer el sentido positivo de cada eje para saber a partir de dónde se mide cada ángulo. La figura siguiente muestra la referencia de los ángulos en ambos planos.



**Figura 3.59** Referencia al medir la inclinación en cada plano.

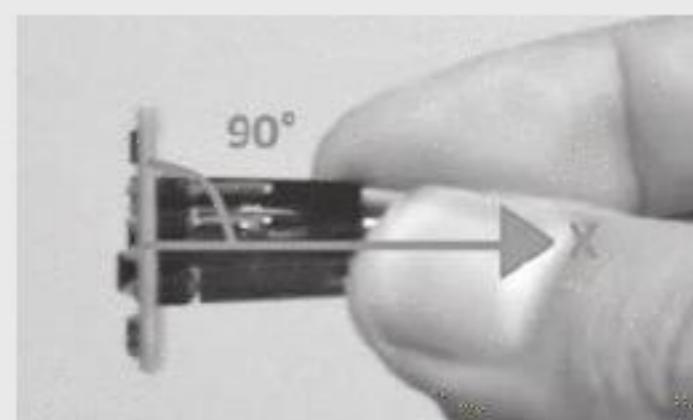
- 4.** A continuación se muestran imágenes de la práctica finalizada.



**Figura 3.60** Medición de la inclinación, acelerómetro totalmente horizontal.

```
COM4
Ang_xz: 90 Ang_yz: 102
Ang_xz: 90 Ang_yz: 103
Ang_xz: 91 Ang_yz: 104
Ang_xz: 90 Ang_yz: 104
Ang_xz: 90 Ang_yz: 105
Ang_xz: 91 Ang_yz: 105
Ang_xz: 90 Ang_yz: 103
Ang_xz: 91 Ang_yz: 104
Ang_xz: 91 Ang_yz: 104
Ang_xz: 91 Ang_yz: 106
Ang_xz: 91 Ang_yz: 106
Ang_xz: 91 Ang_yz: 106
Ang_xz: 91 Ang_yz: 106
Ang_xz: 91 Ang_yz: 107
Ang_xz: 91 Ang_yz: 107
Ang_xz: 91 Ang_yz: 110
Ang_xz: 91 Ang_yz: 109
Ang_xz: 91 Ang_yz: 111
Ang_xz: 91 Ang_yz: 108
Ang_xz: 91 Ang_yz: 107
Ang_xz: 91 Ang_yz: 105
```

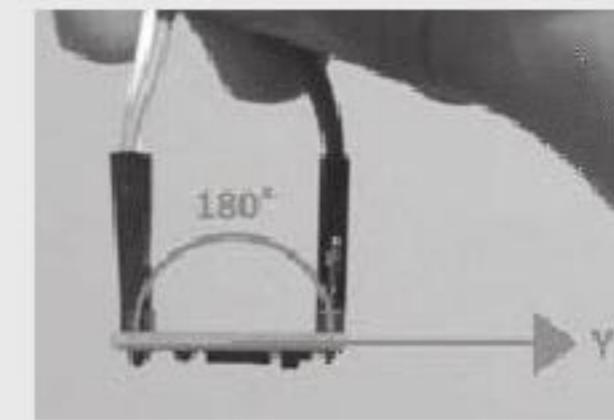
Desplazamiento automático    No hay fin de linea    9600 baud



**Figura 3.61** Medición de la inclinación a  $90^\circ$  en el plano XZ.

```
COM4
Ang_xz: 186 Ang_yz: 179
Ang_xz: 186 Ang_yz: 180
Ang_xz: 186 Ang_yz: 179
Ang_xz: 185 Ang_yz: 179
```

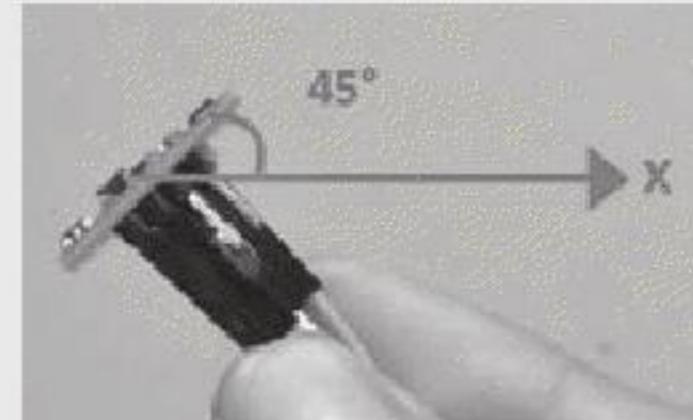
Desplazamiento automático    No hay fin de linea    9600 baud



**Figura 3.63** Medición de la inclinación a  $180^\circ$  en el plano YZ.

```
COM4
Ang_xz: 45 Ang_yz: 4
Ang_xz: 45 Ang_yz: 5
Ang_xz: 45 Ang_yz: 4
Ang_xz: 45 Ang_yz: 4
Ang_xz: 45 Ang_yz: 5
Ang_xz: 45 Ang_yz: 5
Ang_xz: 45 Ang_yz: 4
```

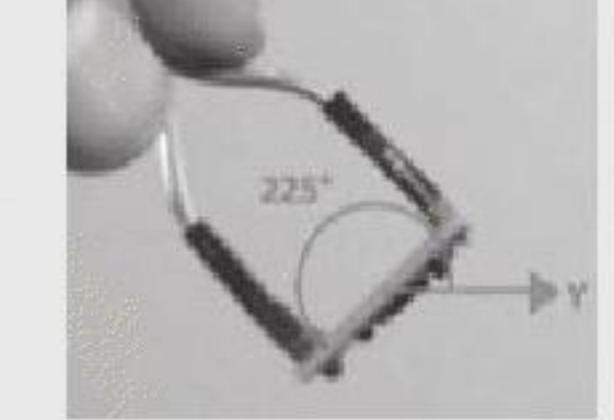
Desplazamiento automático    No hay fin de linea    9600 baud



**Figura 3.62** Medición de la inclinación a  $45^\circ$  en el plano XZ.

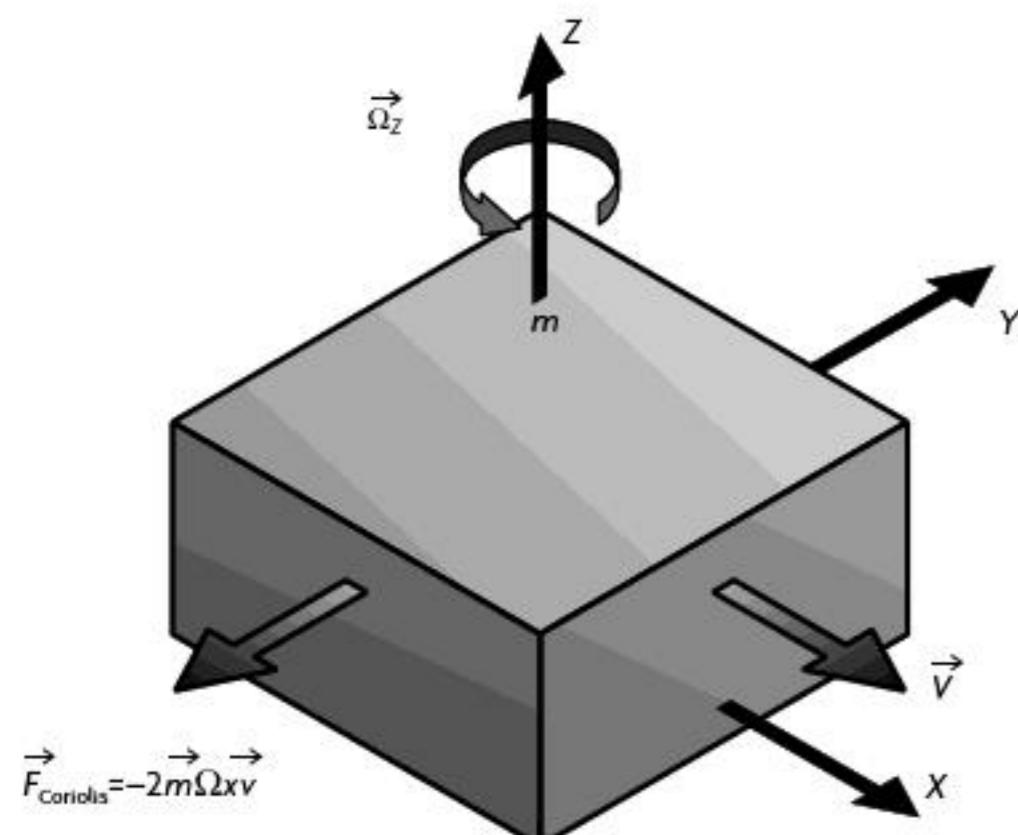
```
COM4
Ang_xz: 187 Ang_yz: 226
Ang_xz: 186 Ang_yz: 226
```

Desplazamiento automático    No hay fin de linea    9600 baud



**Figura 3.64** Medición de la inclinación a  $225^\circ$  en el plano YZ.

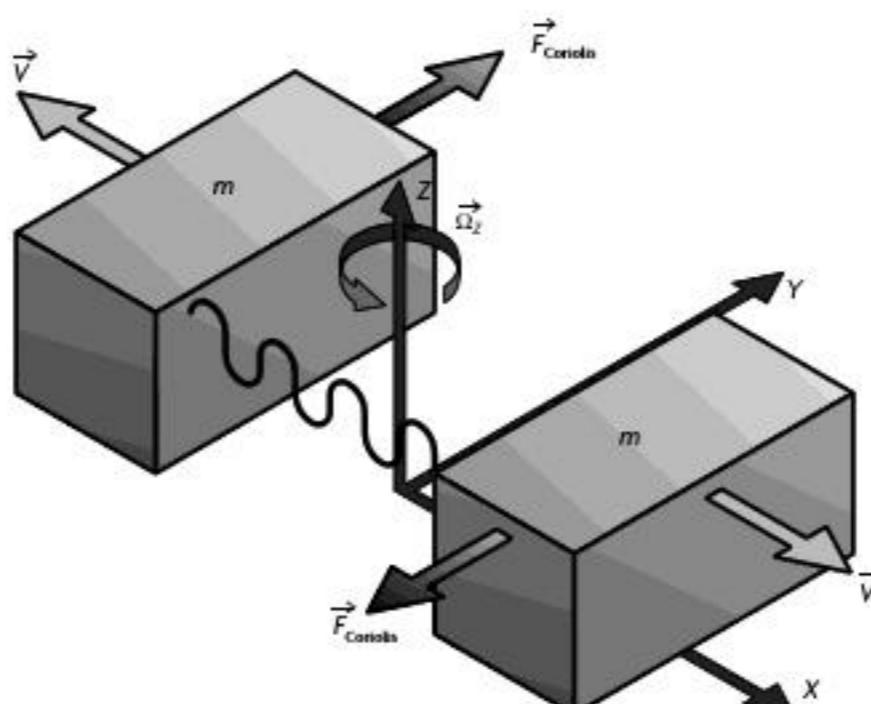
### 3.7 Giroscopios



**Figura 3.65** Representación de la fuerza de Coriolis.

diano un principio de transducción piezoresistivo y en un cambio en voltaje mediante un transductor piezoeléctrico.

La arquitectura que más se utiliza para este tipo de sensores es un par de masas con movimiento lineal de vaivén en sintonía. Esta arquitectura es muy utilizada debido a su gran facilidad para ser integrada en sistemas con principio de transducción de capacitancia variable. De igual forma que los acelerómetros con principio de transducción de capacitancia variable, las masas móviles constituyen los electrodos de los capacitores, la variación de desplazamiento y, por tanto, de capacitancia, lo cual se logra debido a que la fuerza de Coriolis presente en cada masa empujará a cada una en direcciones opuestas, gracias a que la dirección de su velocidad es opuesta. Esta variación de capacitancia será proporcional a la velocidad angular aplicada al chip.



**Figura 3.66** Arquitectura de un giroscopio de estado sólido.

Los giroscopios, como casi todos los sensores MEMS, también son calibrados por el fabricante antes de ser encapsulados; de esa manera, en la hoja de datos del sensor aparecerá un valor de voltaje en estado de reposo y una sensitividad. Una gran desventaja de este tipo de sensores es que el proceso de encapsulado genera esfuerzos residuales en las microestructuras, cambiando ligeramente las propiedades de salida en estado de reposo y sensitividad. Para aplicaciones en donde solo se desea conocer el sentido de giro o no se requiere de mayor precisión en la medida de velocidad angular, las desviaciones debido a los esfuerzos residuales no son importantes; pero para casos en los que la precisión es muy importante, se deberá calibrar el sensor determinando nuevamente el valor (ya sea de voltaje o digital) en estado de reposo y determinar la sensitividad del sensor.

Teóricamente, un giroscopio no debe presentar sensitividad ante un movimiento con aceleración lineal ni a un movimiento rotacional para el que no fue diseñado; por ejemplo, suponga que se monta

Los giroscopios son un tipo de sensor inercial que permite relacionar la **rotación relativa con un voltaje**. Estos sensores, a pesar de ser excitados por una fuerza inercial, aprovechan los efectos de las fuerzas de Coriolis presentes en un movimiento rotacional. Un giroscopio de estado sólido (sensor MEMS) está formado por un cuerpo que presenta simetría en su rotación; en este caso, supóngase que la masa ( $m$ ) se desplaza dentro del chip a una velocidad  $\vec{V}$ ; cuando al chip se le aplica un momento de fuerza, este girará a una velocidad angular  $\vec{\Omega}$ . Esta combinación de movimientos rotacional y lineal genera la llamada *fuerza de Coriolis*, que será perpendicular al eje de movimiento lineal inicial (véase figura 3.65).

En un giroscopio de estado sólido, en general se utiliza el desplazamiento en la masa móvil provocado por el efecto de la fuerza de Coriolis, para convertirlo en variación de capacitancia mediante un principio de transducción capacitativo, en un cambio de resistencia mediante un principio de transducción piezoresistivo y en un cambio en voltaje mediante un transductor piezoeléctrico.

un giroscopio dual en un plataforma giratoria, con el fin de medir la velocidad de balanceo de la plataforma, pero esta, a su vez, también presenta movimientos de cabeceo y aceleración lineal; en este caso, si el giroscopio presenta cambio a la salida debido a estos dos últimos movimientos, se dice que el sensor tiene una alta sensitividad cruzada. Al igual que los acelerómetros, un sensor MEMS giroscopio es mejor en la medida que su sensitividad cruzada es menor.

Debido a que estos sensores tienen un comportamiento lineal a la salida (ya sea un voltaje analógico o un valor digital), para obtener un valor de velocidad angular es necesario usar la siguiente ecuación:

$$\omega = S (V_{\text{actual}} - V_{\text{en reposo}})$$

donde:

$\omega$ : velocidad angular [grados por segundo (dps) o radianes por segundo (rps)]

$S$ : sensitividad  $\left[ \frac{\text{dps}}{\text{mV}} \right]$  o  $\left[ \frac{\text{dps}}{\text{valor digital}} \right]$

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

$V_{\text{actual}}$ : valor actual [mV o valor digital]

$V_{\text{en reposo}}$ : valor en reposo [mV o valor digital]

En particular, para este tipo de sensores que utilizan el principio de capacitancia diferencial la temperatura será un factor poco influyente, a diferencia de los sensores piezoelectricos o piezoresistivos.

## Ejercicio de aplicación

### Uso de un giroscopio para cálculo de ángulos de giro

#### Giroscopio – Medición de ángulos

##### Objetivo

Medir el ángulo al que se gira el giroscopio en dos ejes, observando la información en el monitor serial.

##### Material

- Arduino IDE 1.0.5®
- Arduino Uno®
- LPR503AL (Giroscopio)®
- Trimpot multivuelta de 10 k
- 4 cables Dupont®
- 10 cm de alambre 24AWG
- Protoboard

##### Desarrollo

1. Armar el circuito de la figura 3.67. El trimpot debe conectarse como divisor de tensión y ajustarse hasta una tensión de 1.23 V en su terminal y conectar a  $V_{\text{ref}}$  del giroscopio. Para tener un intervalo más grande de medición, se deben utilizar las salidas no amplificadas de X y Z.

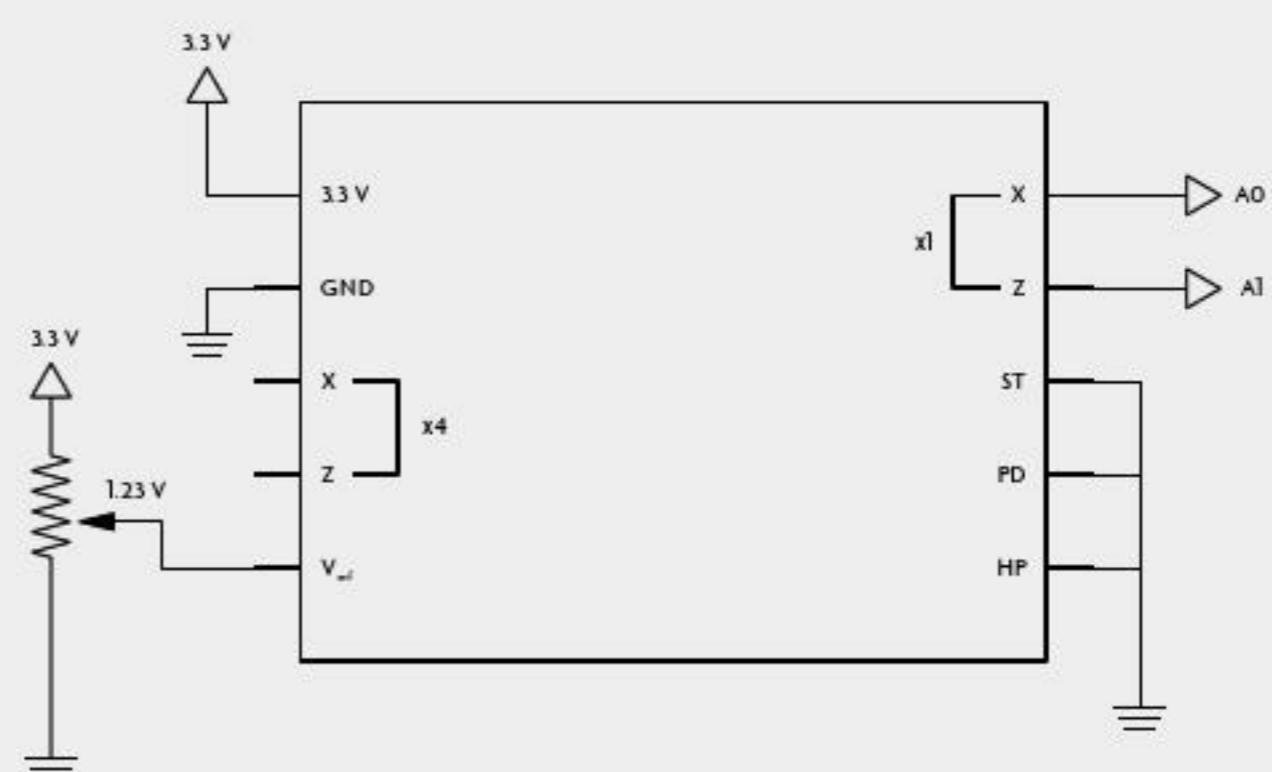


Figura 3.67 Diagrama de conexión.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

**2. Analizar e implementar el siguiente código en Arduino Uno®.**

```

/*
GIROSCOPIO-Medición de angulo
Este ejemplo utiliza la señal leida de un
giroscopio, la integra numericamente y determina
el angulo que se movio.

Debido a la naturaleza de las mediciones
hechas por el giroscopio este programa se ve
afectado altamente por el efecto conocido como
"deriva". Para una mejor medicion del angulo
se debe emplear el giroscopio, un acelerometro
y aplicar filtros (kalman, complementario,
etc.)

*/
// Pines
const int pinX = A0; // Pin eje X
const int pinZ = A1; // Pin eje Z

// Variables
double x, z; // Velocidad en eje X y Z
double angulo_x, angulo_z; // Angulos en eje X y
z

// Miden el tiempo(necesario al integrar)
unsigned long tiempoAnterior;
unsigned long ahora;
unsigned long transcurrido;

// Constantes
const double muestro = 10; // Tiempo de
muestro en ms
const double dt = muestro/1000; // Calculo de
dt
const double factor = 0.407 * dt; // Factor
para conversion a °/s
    // (experimental) y dt
df6336058adf5053813dd00258e6f84c
ebraryvoid setup(){
    analogReference(EXTERNAL); // Referencia
externa (3.3V)
    Serial.begin(115200); // Comunicacion serie a
115200 baudios
    tiempoAnterior = 0; // Tiempo en
cero.
}

void loop(){
    // Lectura analogica y compensacion
    x = analogRead(pinX) - 386;
    z = analogRead(pinZ) - 386;

    // Tiempo actual
    ahora = millis();

    transcurrido = ahora - tiempoAnterior; // Tiempo desde el ultimo loop

```

```

    // Solo ejecuta el codigo siguiente cada
    «muestreo» ms
    // para tener una dt definida y constante.
    if (transcurrido >= muestro){

        tiempoAnterior = ahora; // Actualizacion
        de variable

        // Se integran los datos obtenidos
        x *= (factor);
        z *= (factor);

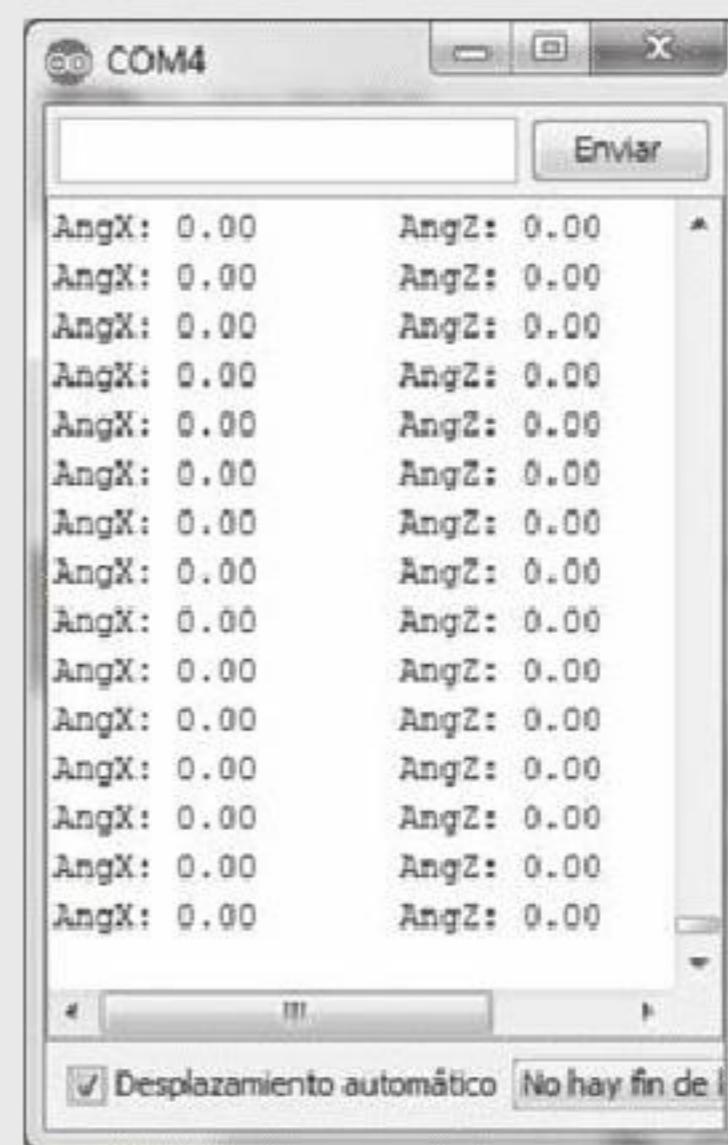
        // Evitar rebotes en lo posible
        if ( abs(x) > 0.08 + 0.03 ){
            angulo_x = angulo_x + x;
        }
        if ( abs(z) > 0.08 + 0.03 ){
            angulo_z = angulo_z + z;
        }

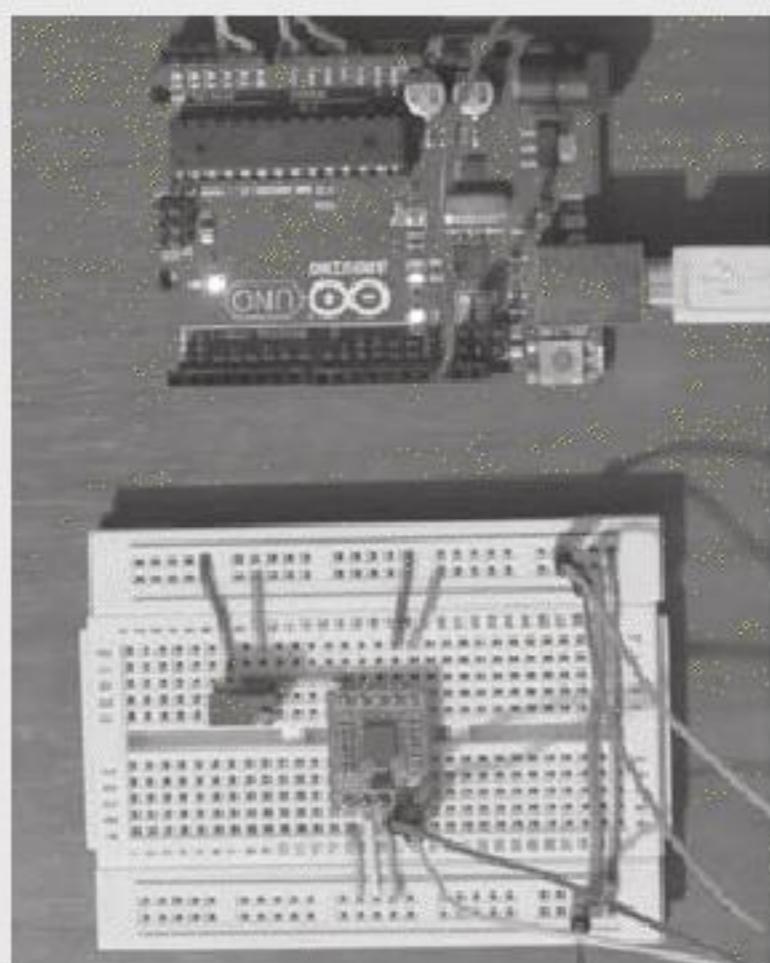
        // Envia por el puerto serie
        Serial.print("AngX: ");
        Serial.print(angulo_x); // En grados
        Serial.print("\t AngZ: ");
        Serial.println(angulo_z); // En grados
    }
}

```

Comprobar el funcionamiento del sensor y del código. Para las pruebas se recomienda hacerlo sobre una superficie plana. El sensor es muy sensible a cambios bruscos de velocidad y vibraciones pequeñas, por lo que se recomienda moverlo despacio y con sumo cuidado.

A continuación se muestran algunas figuras de la práctica finalizada. Primero, se observa en reposo, justo después de iniciar el programa; luego, se gira 90° en el eje X, regresa a 0° en X y se mueve a 90° en Z, donde se observa el efecto de la deriva en este programa.





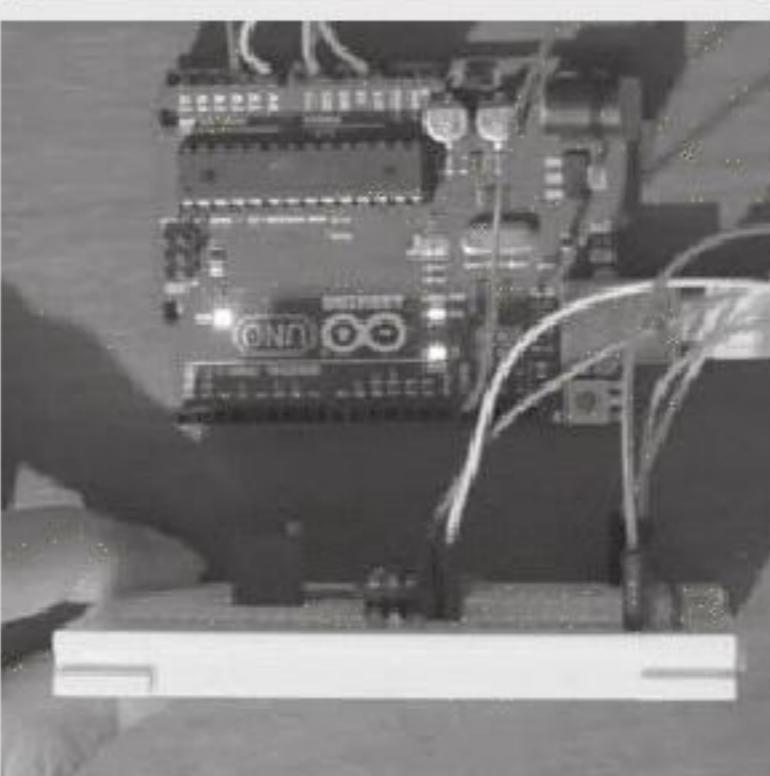
**Figura 3.68** En reposo,  $X = 0^\circ Z = 0^\circ$ .

```
COM4
Enviar
AngX: 2.37 AngZ: 93.92
```

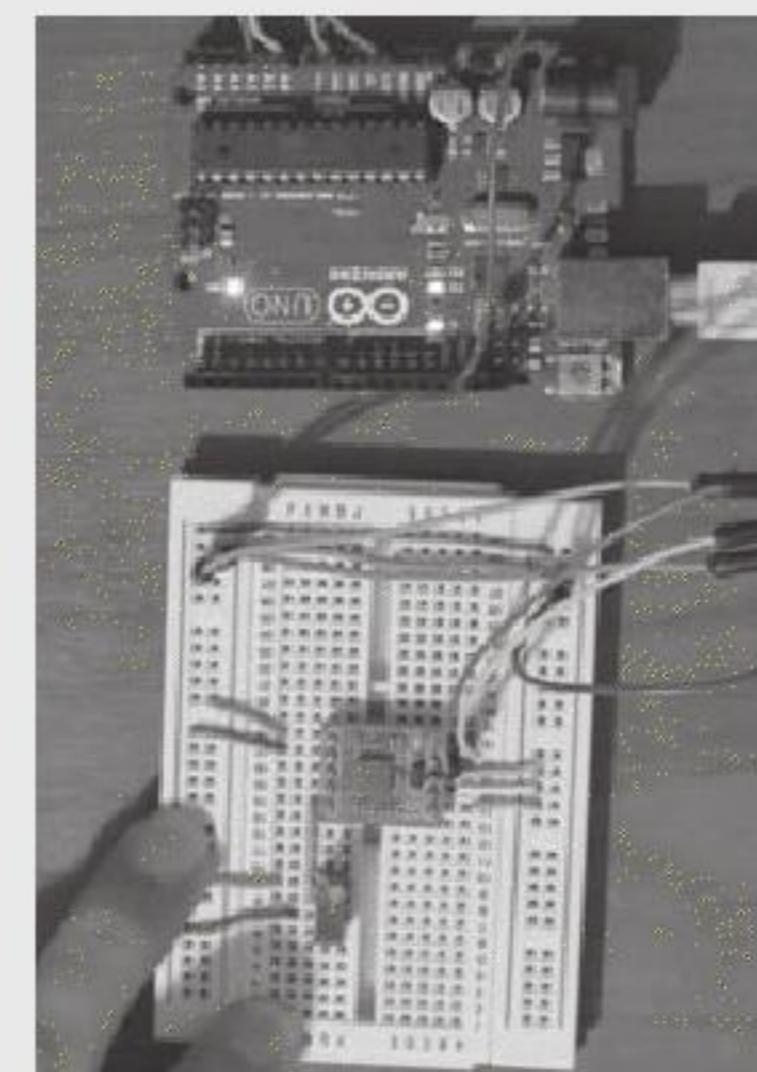
Desplazamiento automático No hay fin de l

```
COM4
Enviar
AngX: 86.44 AngZ: 6.06
```

Desplazamiento automático No hay fin de l



**Figura 3.69**  $X = 90^\circ Z = 0^\circ$ .



**Figura 3.70**  $X = 0^\circ Z = 90^\circ$ .

### 3.8 Compás (magnetómetros)

Los sensores compás que se tratan en este capítulo son aquellos sensores de estado sólido que se encuentran disponibles en el mercado. Un sensor compás está compuesto de un magnetómetro y un acelerómetro dispuestos en un solo chip. En la mayoría de los casos, este tipo de sensor entrega los valores de aceleración y campo magnético percibidos de manera digital (en la mayoría de los casos, el protocolo I<sup>2</sup>C es el más utilizado).<sup>7</sup> En esta ocasión, solo se analiza el sensor magnetómetro y sus características, debido a que el uso de otros acelerómetros ya ha sido tratado en secciones anteriores de este mismo capítulo.

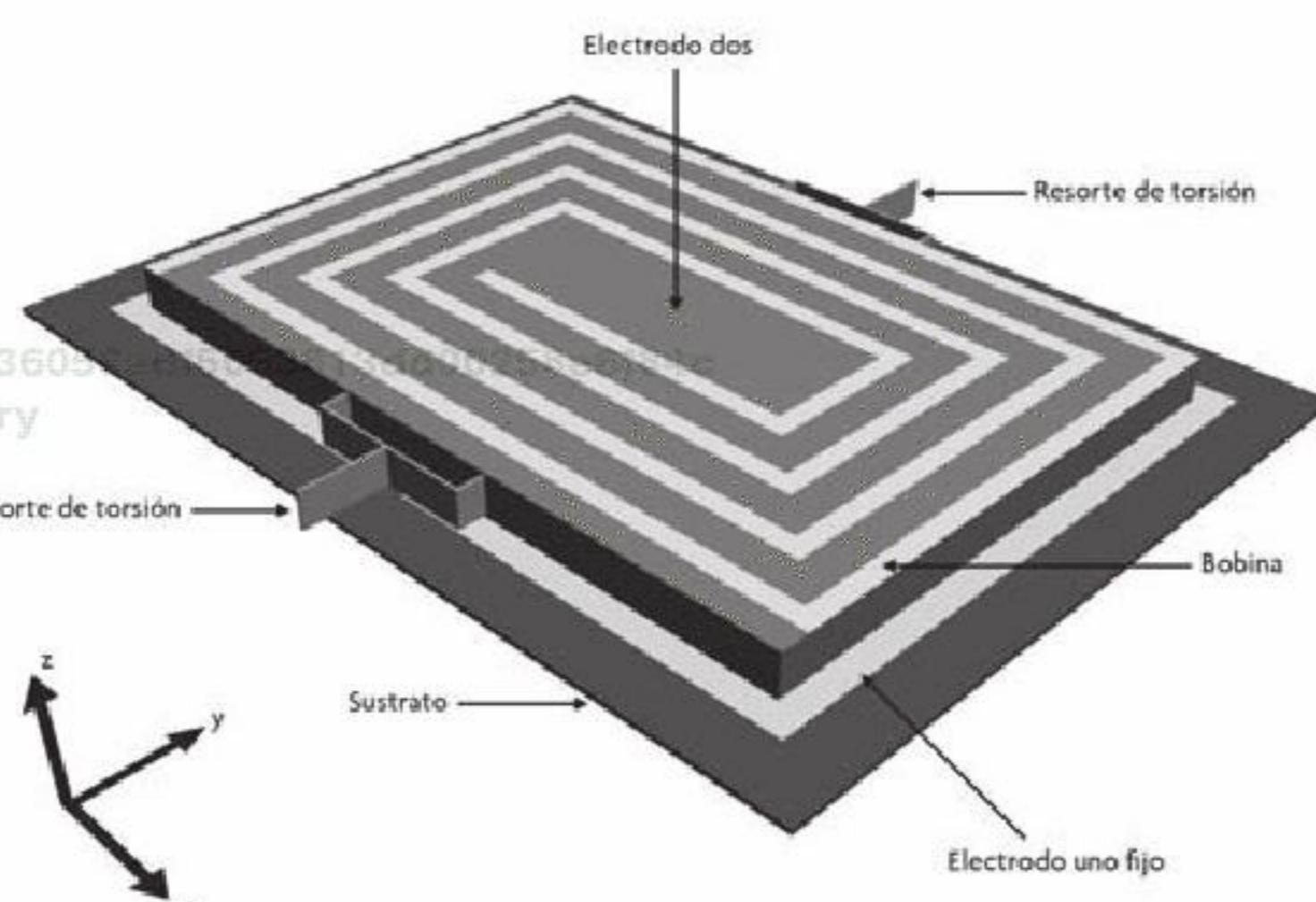
Un magnetómetro es un dispositivo que se encarga de cuantificar la intensidad y la dirección de un campo magnético; en el caso de los sistemas de navegación, los magnetómetros miden la intensidad de campo magnético de la Tierra, si es que a su alrededor no se encuentran un fuente de campo mucho mayor.

Este tipo de sensores se utiliza, por lo común, como auxiliares en sistemas de navegación, ya que permiten implementar, de manera muy fácil, una brújula electrónica. El principio de transducción de este tipo de sensores es muy variado y depende en gran medida del tipo de tecnología que utiliza el fabricante; por ejemplo, algunos sensores se basan en el efecto Hall, algunos otros usan la fuerza de Lorenz o el principio piezoresistivo.

En la figura 3.71 se muestra la arquitectura base para el diseño de un magnetómetro basado en el principio de transducción de la fuerza de Lorenz; en este caso, la bobina que forma parte del electrodo dos es sensible a la dirección que tenga en ese momento el campo magnético sensado, por su parte, la fuerza de Lorenz ejercida sobre la bobina se ve reflejada en un movimiento del electrodo dos (véase la sección que trata el tema de la fuerza de Lorenz); dicho movimiento se ve limitado por los resortes de torsión que lo sostienen. Por último, este movimiento se convierte en un cambio de capacitancia cuando la posición relativa del electrodo dos con respecto al electrodo uno varía. Dicho cambio

de capacitancia será procesado por un circuito de lectura altamente especializado embebido en el mismo chip. Posteriormente, el usuario tendrá acceso a la información del campo magnético por medio de la lectura de los valores digitales entregados por el circuito de acondicionamiento del chip

Estos sensores tienen la desventaja de ser sumamente susceptibles a campos magnéticos generados por los mismos circuitos de lectura o por la presencia de algún aparato electrónico que se encuentre a su alrededor. Por tanto, para su uso en sistemas que cuenten con elementos de actuación, como motores o sistemas RF, estos deberán estar debidamente aislados, para que su funcionamiento sea apropiado.



**Figura 3.71** Arquitectura base de un magnetómetro.

<sup>7</sup> Por sus siglas en inglés: Inter-Integrated Circuits. Este permite hacer la lectura de  $n$  sensores a través del uso de solo dos buses de datos, donde SDA será el bus por donde viajan los datos y SCL será el bus por donde viaja la señal de sincronización.

## Ejercicio de aplicación

### Implementación de una brújula digital usando un magnetómetro con protocolo I2C

#### Magnetómetro LSM303DLH Brújula de tres ejes

##### Objetivo

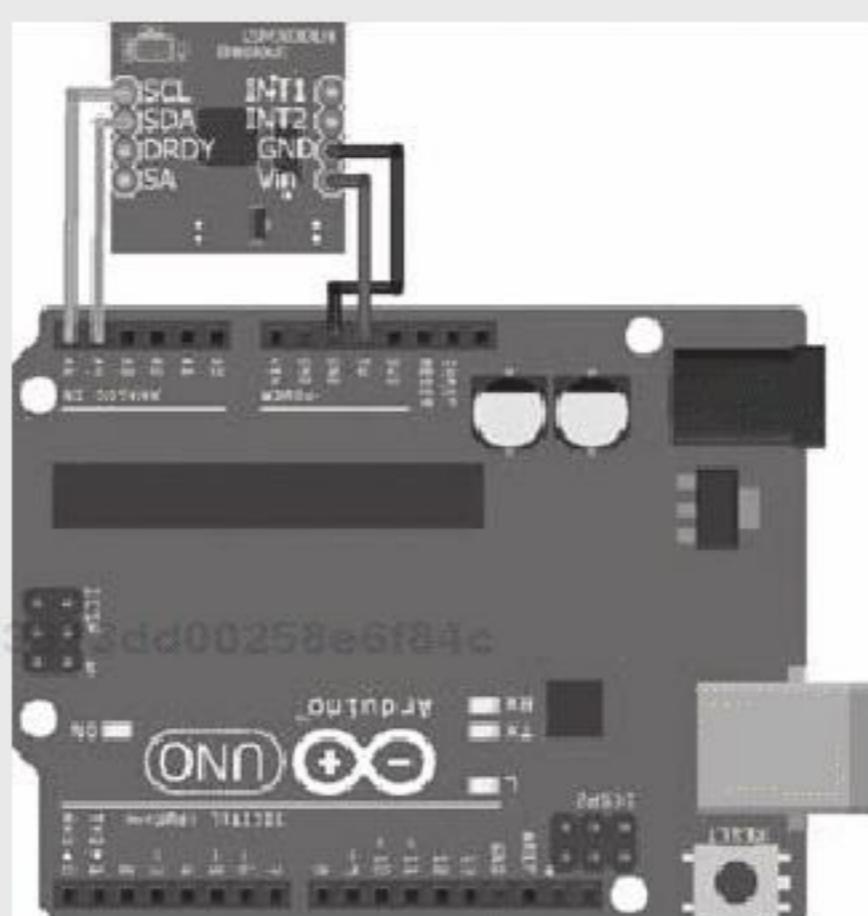
Ubicar el norte magnético utilizando un magnetómetro y Arduino Uno®, y mostrando la orientación en grados.

##### Material

- Arduino IDE 1.0.5® (Software)
- Arduino Uno Rev 3.0®
- Sparkfun LSM303DLH Breakout Board (acelerómetro y magnetómetro)
- 4 cables Dupont® macho-hembra

##### Desarrollo

1. Conectar el sensor LSM303DLH al Arduino Uno® como se indica en la figura 3.72. Se recomienda usar cables largos para poder mover con facilidad el acelerómetro al hacer las pruebas.



**Figura 3.72** Sensor conectado al Arduino Uno®.

2. Analizar e implementar el siguiente código.

```
/*
MAGNETOMETRO - Brujula de tres ejes

Este ejemplo lee un magnetometro LSM303DLH
a traves de su interface I2C, con algunas
operaciones matematicas encuentra la orientacion
respecto al norte magnetico terrestre

- La direccion del esclavo es de 7 bits.
- El LSB en el byte que contiene
  la direccion del esclavo indica escritura
  o lectura, es puesto en <0> o <1>
```

automaticamente por las instrucciones correspondientes.

- La dirección en los registros se autoincrementa automáticamente en el Magnetómetro después de cada lectura o escritura
- Se debe leer los 6 registros de salida, de lo contrario los datos no se actualizan.

La brujula es de 3 ejes

- norte\_xy mantener eje Z positivo hacia arriba, se mide eje x
- norte\_xz mantener eje Y positivo hacia arriba, se mide eje z
- norte\_yz mantener eje X positivo hacia arriba, se mide eje z

Debido a la declinación magnética correspondiente a cada lugar en la Tierra, las lecturas pueden variar.

Para mayor información sobre LSM303, consultar <https://www.sparkfun.com/products/10888>

```
A4 (SDA), A5 (SCL)
*/
// MAGNETOMETRO
#define LSM303DLH_M 0x1E
// (0x3C >> 1) // Dirección del magnetómetro
(fabricante)

// Registros a usar del magnetómetro
#define CRA_REG_M 0x00
// Registros de configuración.
#define CRB_REG_M 0x01
#define MR_REG_M 0x02

#define OUT_X_H_M 0x03
// Registros de lecturas de datos.
#define OUT_X_L_M 0x04
#define OUT_Z_H_M 0x05
#define OUT_Z_L_M 0x06
#define OUT_Y_H_M 0x07
#define OUT_Y_L_M 0x08

// Bibliotecas
#include <Wire.h> // Biblioteca de
comunicación I2C.
#include <math.h> // Biblioteca de
operaciones matemáticas.

// Variables
int xh, xl, yh, yl, zh, zl; // Datos individuales
leídos
double mag_x, mag_y, mag_z; // Componentes del
campo magnético
int norte_xy, norte_xz, norte_yz; // Indica a
cuantos grados se encuentra del
// norte.
```

```

// Constantes
constdouble rad2deg = 57.29577951; // Conversion radianes a grados.

void setup() {
    // Comunicaciones
    Serial.begin(9600); // Comunicacion serie a 9600 Baudios.
    Wire.begin(); // Comunicacion I2C.

    // Configuracion inicial Magnetometro
    Wire.beginTransmission(LSM303DLH_M); // Enviar a magnetometro
    Wire.write(CRA_REG_M); // Direccion inicial de escritura.
    Wire.write(0x18); // CRA - 75Hz output rate; medicion normal.
    Wire.write(0x20); // CRB - +- 1.3 gauss.
    Wire.write(0x00); // MR - Conversion continua.
    Wire.endTransmission(); // Termina escritura.
}

void loop() {
    Wire.beginTransmission(LSM303DLH_M); // Enviar a magnetometro.
    Wire.write(OUT_X_H_M); // Proxima direccion a leer.
    Wire.endTransmission();

    // Lectura de los datos
    Wire.requestFrom(LSM303DLH_M, 6); // Recibir de magnetometro 6 bytes.
    xh=Wire.read(); // Registro a leer OUT_X_H_M se autoincrementa.
    xl=Wire.read();
    zh=Wire.read();
    zl=Wire.read();
    yh=Wire.read();
    yl=Wire.read();
}

```

```

// Union de bytes
mag_x=(long) (xh<< 8) | xl; // Unir bytes altos y bajos.
mag_y=(long) (yh<< 8) | yl;
mag_z=(long) (zh<< 8) | zl;

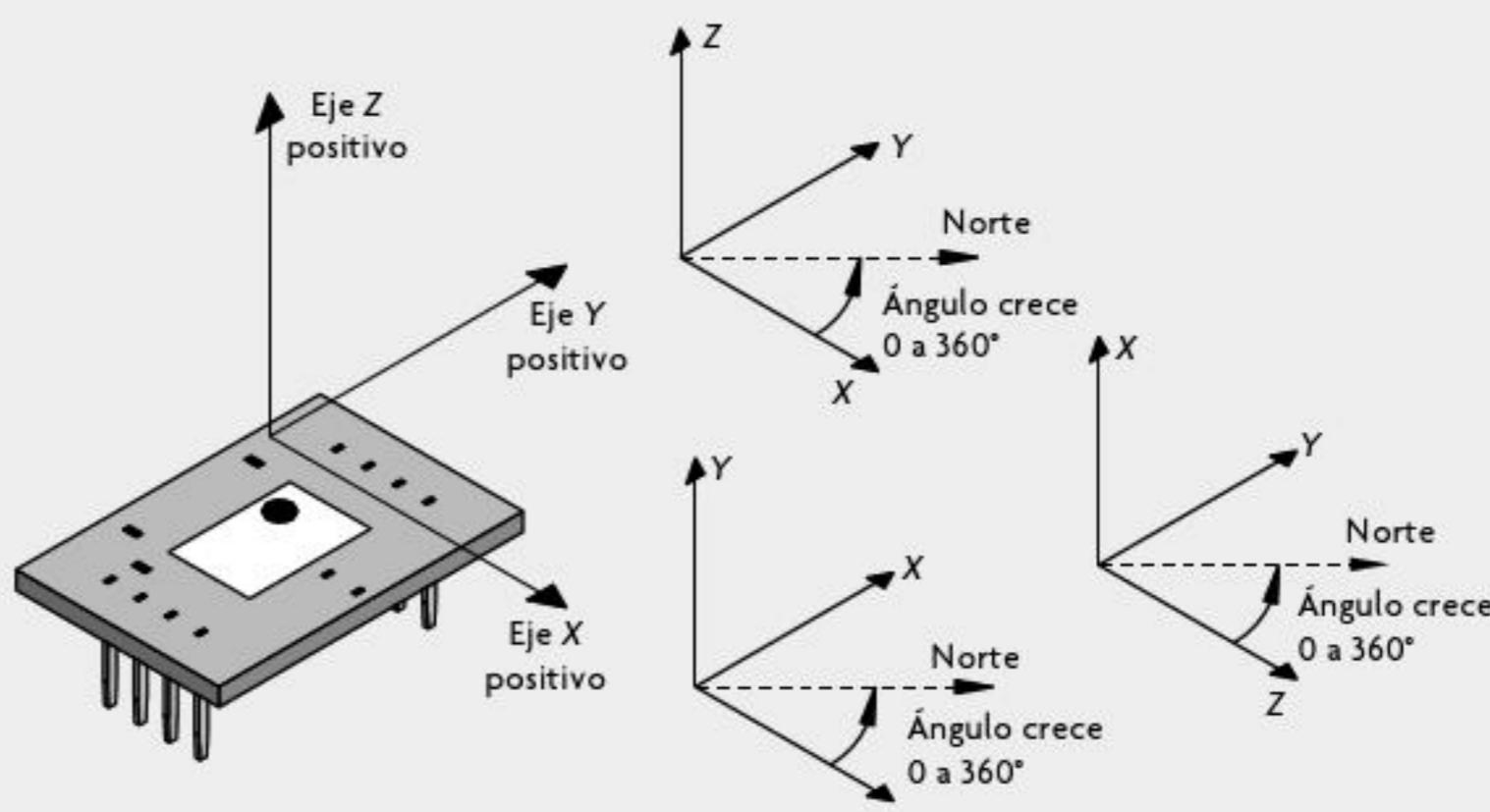
// A cuantos grados esta del norte?
norte_xy = atan2(mag_y,mag_x) * rad2deg ; // Calculo y conversion a grados.
norte_xz = atan2(mag_x,mag_z) * rad2deg ;
norte_yz = atan2(mag_y,mag_z) * rad2deg ;

// Ajuste para mostrar datos de 0° a 360°
if (norte_xy< 0){
    norte_xy += 360;
}
if (norte_xz< 0){
    norte_xz += 360;
}
if (norte_yz< 0){
    norte_yz += 360;
}

// Envia datos por el puerto serie
Serial.print("Norte_xy: ");
Serial.print(norte_xy); // En grados
Serial.print("\t Norte_xz: ");
Serial.print(norte_xz); // En grados
Serial.print("\t Norte_yz: ");
Serial.println(norte_yz); // En grados
delay(300);
}

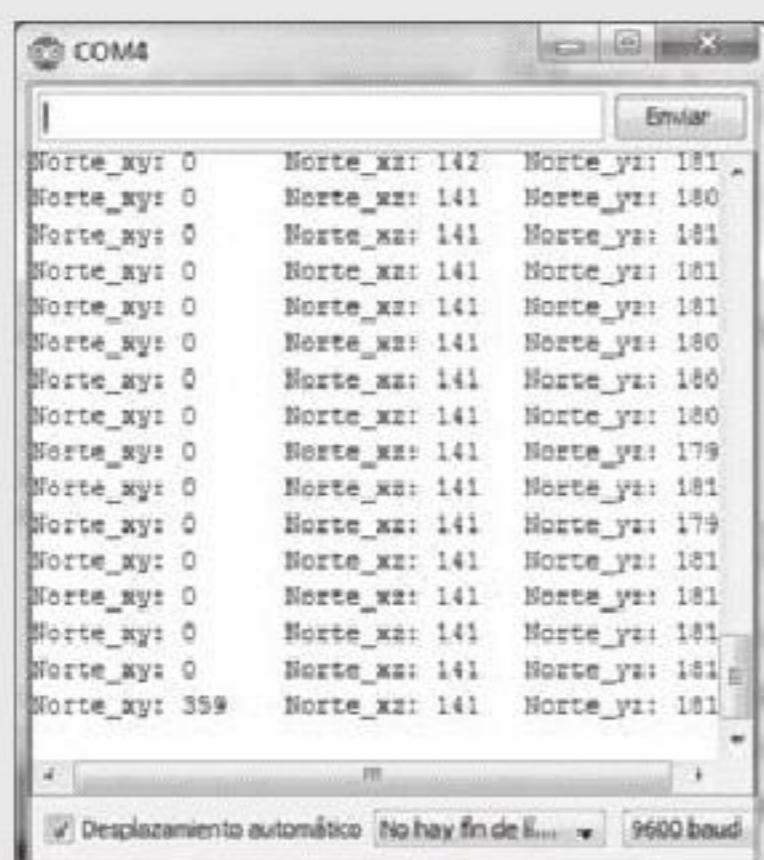
```

- 3.** Comprobar el funcionamiento del circuito y el magnetómetro. Para ello se recomienda estar alejado de fuentes de radiación que puedan alterar la lectura del campo magnético. Este código puede dar una orientación respecto al norte solo cuando el magnetómetro se encuentra en tres posiciones distintas: eje Z positivo apuntando hacia arriba, eje X positivo apuntando hacia arriba y eje Y positivo apuntando hacia arriba; en otra posición, la lectura puede ser errónea. La siguiente imagen muestra cómo se miden los ángulos de orientación en cada posición.

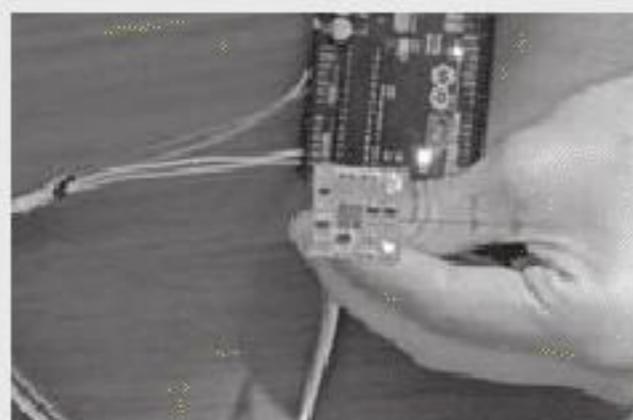


**Figura 3.73** Referencia al orientarse en las tres posiciones diferentes.

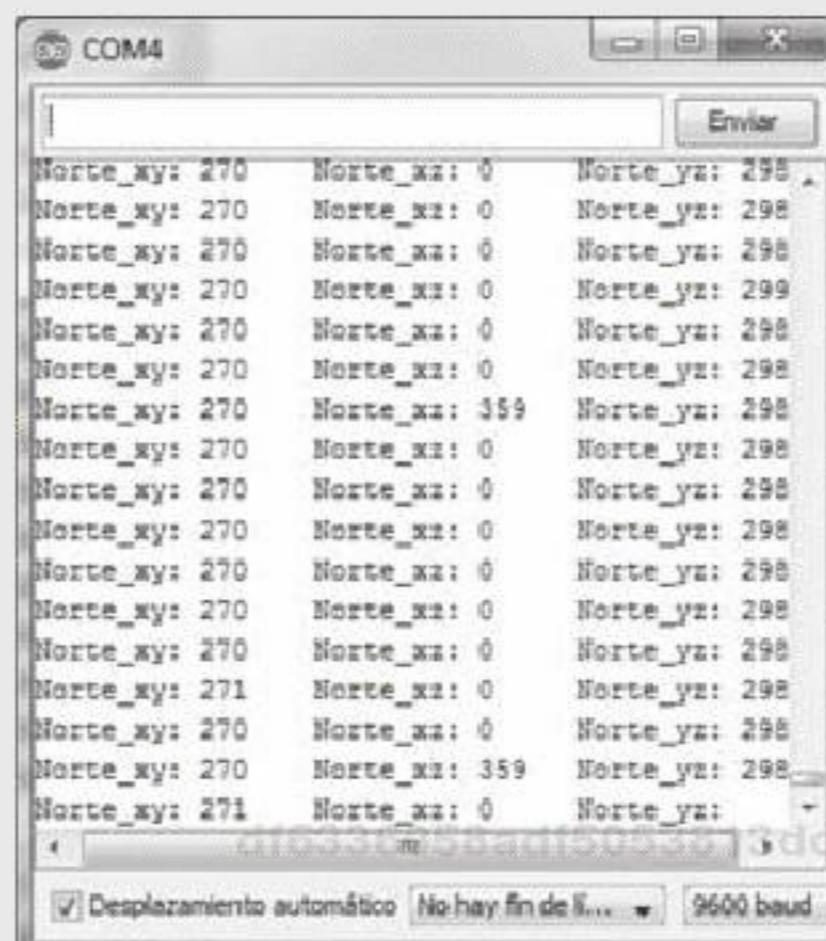
4. A continuación se muestran algunas imágenes del funcionamiento de la práctica al terminar.



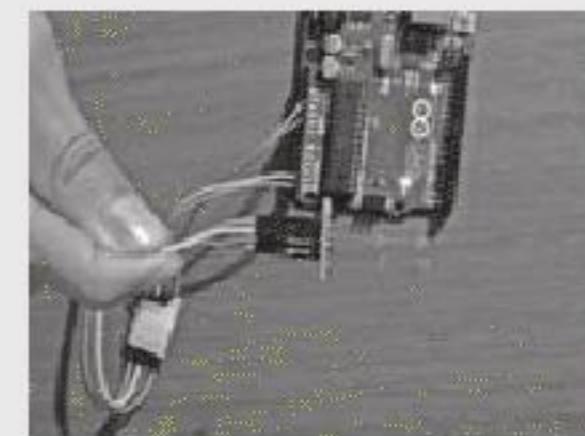
```
Norte_xy: 0 Norte_xz: 142 Norte_yz: 181
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 180
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 181
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 181
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 181
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 180
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 179
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 181
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 179
Norte_xy: 0 Norte_xz: 141 Norte_yz: 181
Norte_xy: 359 Norte_xz: 141 Norte_yz: 181
```



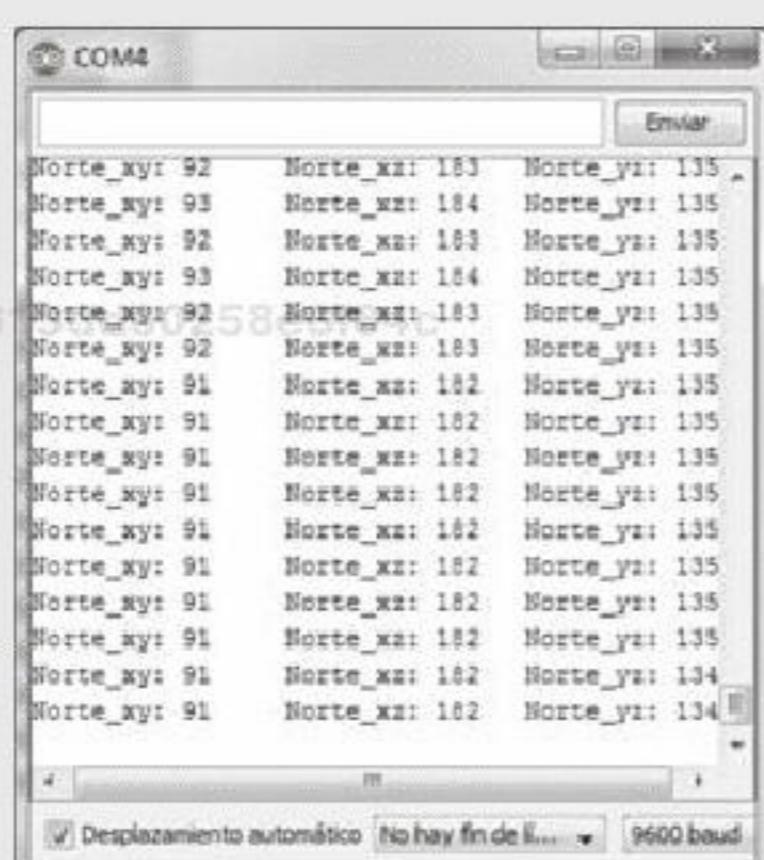
**Figura 3.74** Plano XY, eje Z sale de la página; el eje X alineado con el norte Norte\_yx = 0°.



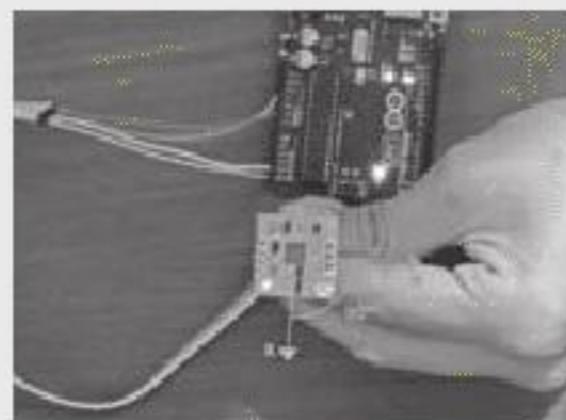
```
Norte_xy: 270 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
Norte_xy: 270 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
Norte_xy: 270 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
Norte_xy: 270 Norte_xz: 0 Norte_yz: 299
Norte_xy: 270 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
Norte_xy: 270 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
Norte_xy: 270 Norte_xz: 359 Norte_yz: 298
Norte_xy: 270 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
Norte_xy: 271 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
Norte_xy: 270 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
Norte_xy: 270 Norte_xz: 359 Norte_yz: 298
Norte_xy: 271 Norte_xz: 0 Norte_yz: 298
```



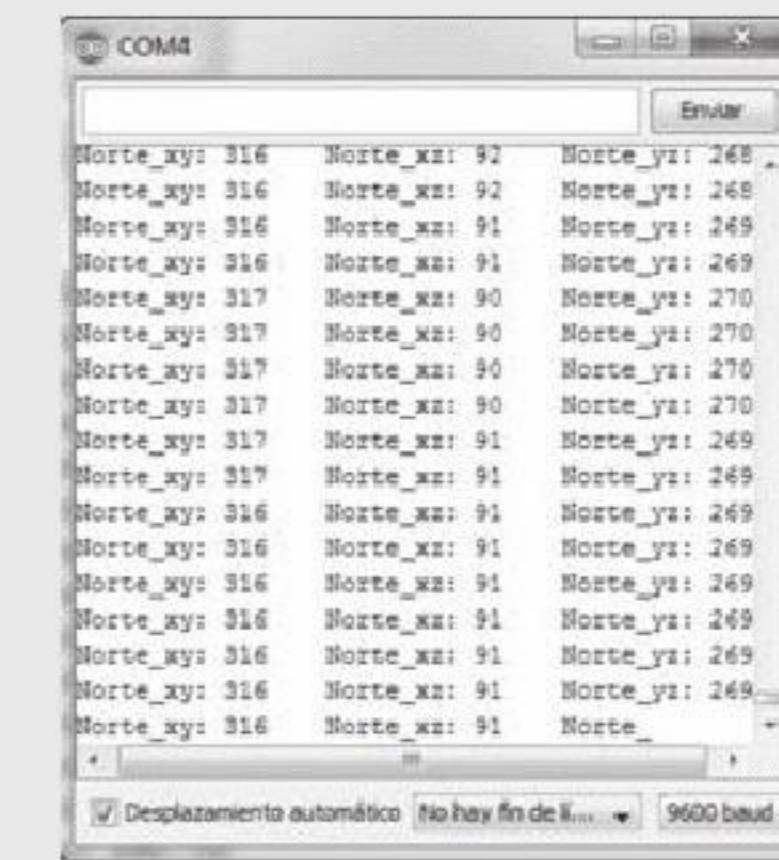
**Figura 3.76** Plano XZ, eje Y sale de la página; el eje Z alineado con el norte Norte\_zx = 0°.



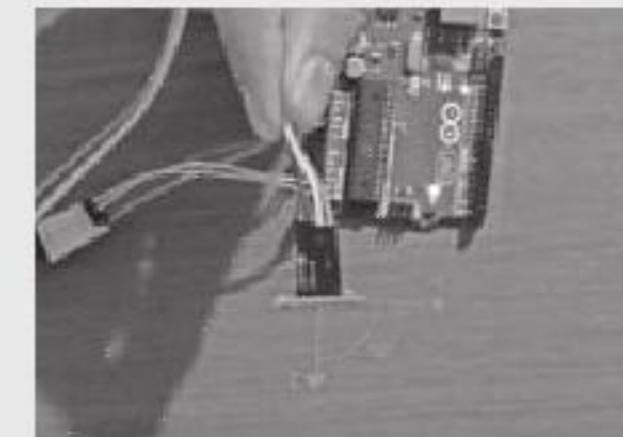
```
Norte_xy: 92 Norte_xz: 183 Norte_yz: 135
Norte_xy: 93 Norte_xz: 184 Norte_yz: 135
Norte_xy: 92 Norte_xz: 183 Norte_yz: 135
Norte_xy: 93 Norte_xz: 184 Norte_yz: 135
Norte_xy: 92 Norte_xz: 183 Norte_yz: 135
Norte_xy: 92 Norte_xz: 183 Norte_yz: 135
Norte_xy: 91 Norte_xz: 182 Norte_yz: 134
```



**Figura 3.75** Plano XY, eje Z sale de la página; el eje X a 90° del norte, Norte\_yx = 90°.



```
Norte_xy: 316 Norte_xz: 92 Norte_yz: 268
Norte_xy: 316 Norte_xz: 92 Norte_yz: 268
Norte_xy: 316 Norte_xz: 91 Norte_yz: 269
Norte_xy: 316 Norte_xz: 91 Norte_yz: 269
Norte_xy: 317 Norte_xz: 90 Norte_yz: 270
Norte_xy: 317 Norte_xz: 91 Norte_yz: 269
Norte_xy: 317 Norte_xz: 91 Norte_yz: 269
Norte_xy: 316 Norte_xz: 91 Norte_yz: 269
```



**Figura 3.77** Plano XZ, eje Y sale de la página; el eje Z a 90° del norte, Norte\_zx = 90°.

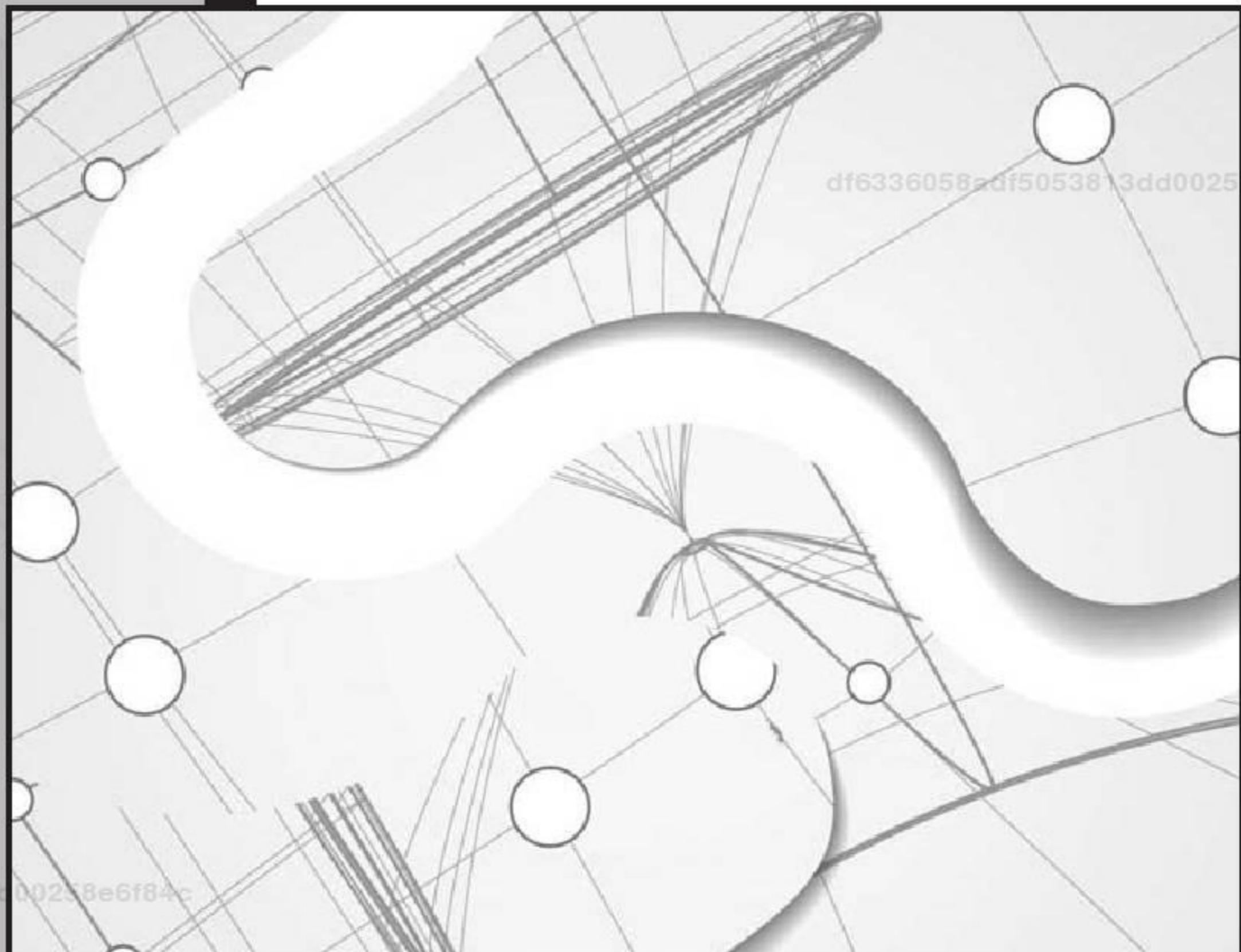




df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# 4

## Sensores de color, luz y visión



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

#### Objetivo general

#### Objetivos particulares

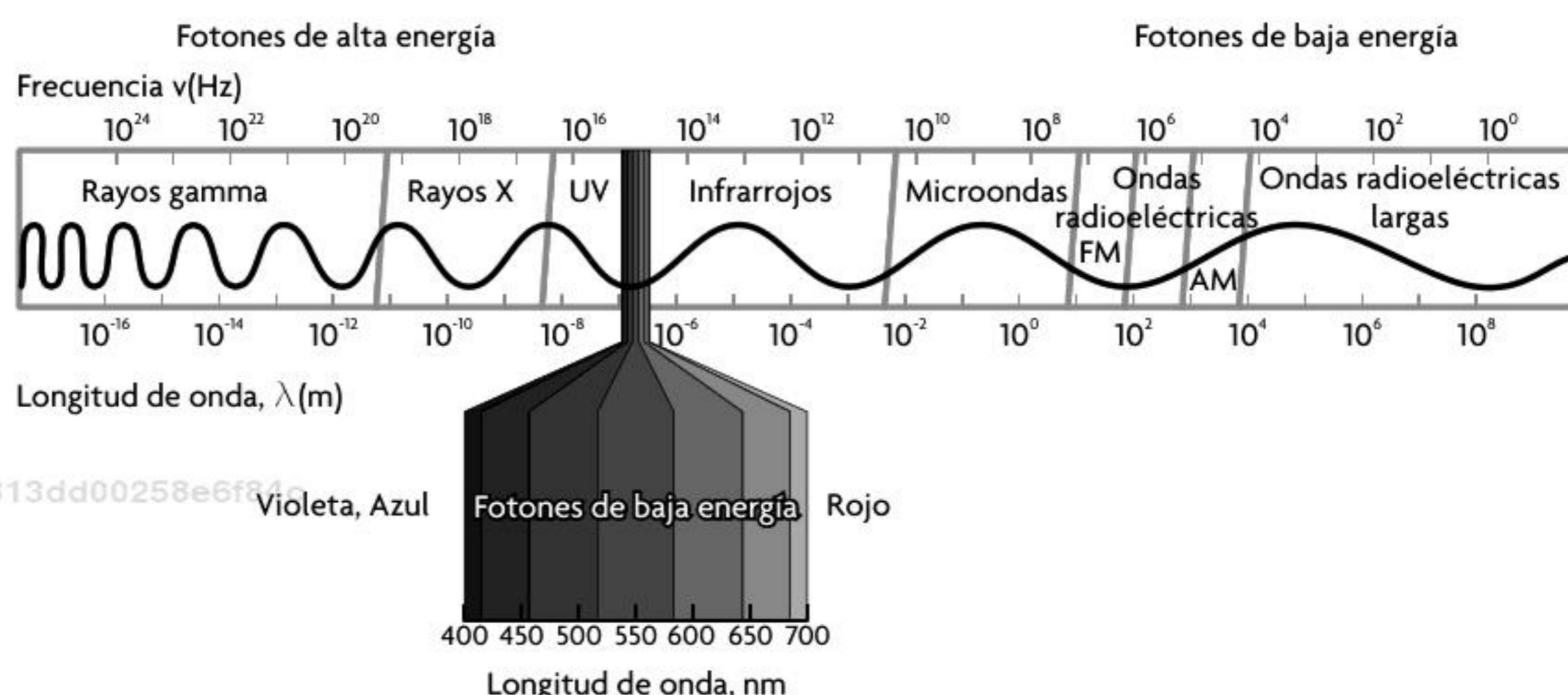
- ▶ Para el estudio de este capítulo se recomienda tener conocimientos del principio de transducción fotoeléctrico, tratado en el capítulo 1, además de estar familiarizado con el lenguaje de programación y la interfaz de Arduino®.
- ▶ Conocer los principios de los sensores de transducción fotoeléctrico y distinguir algunas configuraciones de este tipo de sensores, con el fin de aprender a operarlos en diferentes regímenes, para su aplicación en sistemas de ingeniería.
- ▶
  - Conocer y analizar distintos sensores que funcionan con el principio de transducción fotoeléctrico.
  - Identificar diferentes modos de operación de los dispositivos fotosensibles.
  - Identificar diferentes aplicaciones en ingeniería con el uso de un mismo dispositivo.
  - Identificar las similitudes y diferencias entre un sensor de luz, un sensor de color y un sensor de visión.
  - Implementar códigos en Arduino® para sensores de color, luz y visión.

## Generalidades

En este capítulo se estudian todos aquellos sensores que se utilizan para medir variables físicas mediante el uso de la luz. Por esta razón, el capítulo inicia con la definición de qué es la luz y de cómo esta se transforma en otro tipo de energía.

La luz es muy eficiente cuando se trata de medir distancia, temperatura, composición química, intensidad de color, etcétera. La luz está compuesta por un elemento llamado *fotón*, que es un tipo de partícula elemental, nombrado en un principio por Albert Einstein como "cuanto de luz". Por tanto, el término fotón es muy usado para hablar de una partícula de luz o un "cuanto de energía electromagnética".

La energía presente en la luz tiene una naturaleza compleja, ya que se dice que tiene dualidad onda-partícula; este comportamiento de la luz es explicado por la física cuántica, la cual establece que un fotón, a pesar de ser una entidad de masa nula, tiene comportamiento corpuscular,<sup>1</sup> por ejemplo cuando un fotón colisiona con otro fotón, como sucede en el caso del análisis del fenómeno fotoeléctrico. Cuando se considera un haz de fotones es posible observar un comportamiento ondulatorio, que se manifiesta ya no como un corpúsculo, sino como una onda electromagnética, ya que es posible observar que esta se difracta, se polariza o produce interferencia. El término luz se usa, de manera general, para referirse al espectro electromagnético, que es una representación de cuánta energía contiene una onda electromagnética que depende de su longitud de onda; esto es, un fotón de onda corta posee mayor energía en comparación con un fotón de onda larga.



**Figura 4.1** Espectro electromagnético.

Cuando se habla de sistemas de medición de variables físicas, se considera a la luz como un haz, y se ignoran todas sus características de onda y sus características descritas por la mecánica cuántica, ello para facilitar al lector familiarizarse con los principios de funcionamiento de los dispositivos optoelectrónicos. En algunos casos, durante todo el capítulo, se ahonda en dichas características, con el objetivo de aclarar conceptos de relevancia. Para cada dispositivo optoelectrónico en particular se debe considerar si la fuente de luz es externa o independiente del sistema, o si por el contrario la fuente de luz está embebida en el sistema de medición. En la figura 4.2 se muestra una rápida clasificación de sensores de color, luz y visión.

<sup>1</sup> Se dice que un elemento tiene características corpusculares cuando dicho elemento se puede considerar una partícula elemental que compone a un objeto, como células, moléculas, etcétera.

<b>Sensores de calor</b>	Sensores de luz	Fotorresistencias Fototransistores Fotodiodos
	Sensores de color	Basados en filtros Basados en fuentes fijas de luz
	Sensores de visión	CCD CMOS

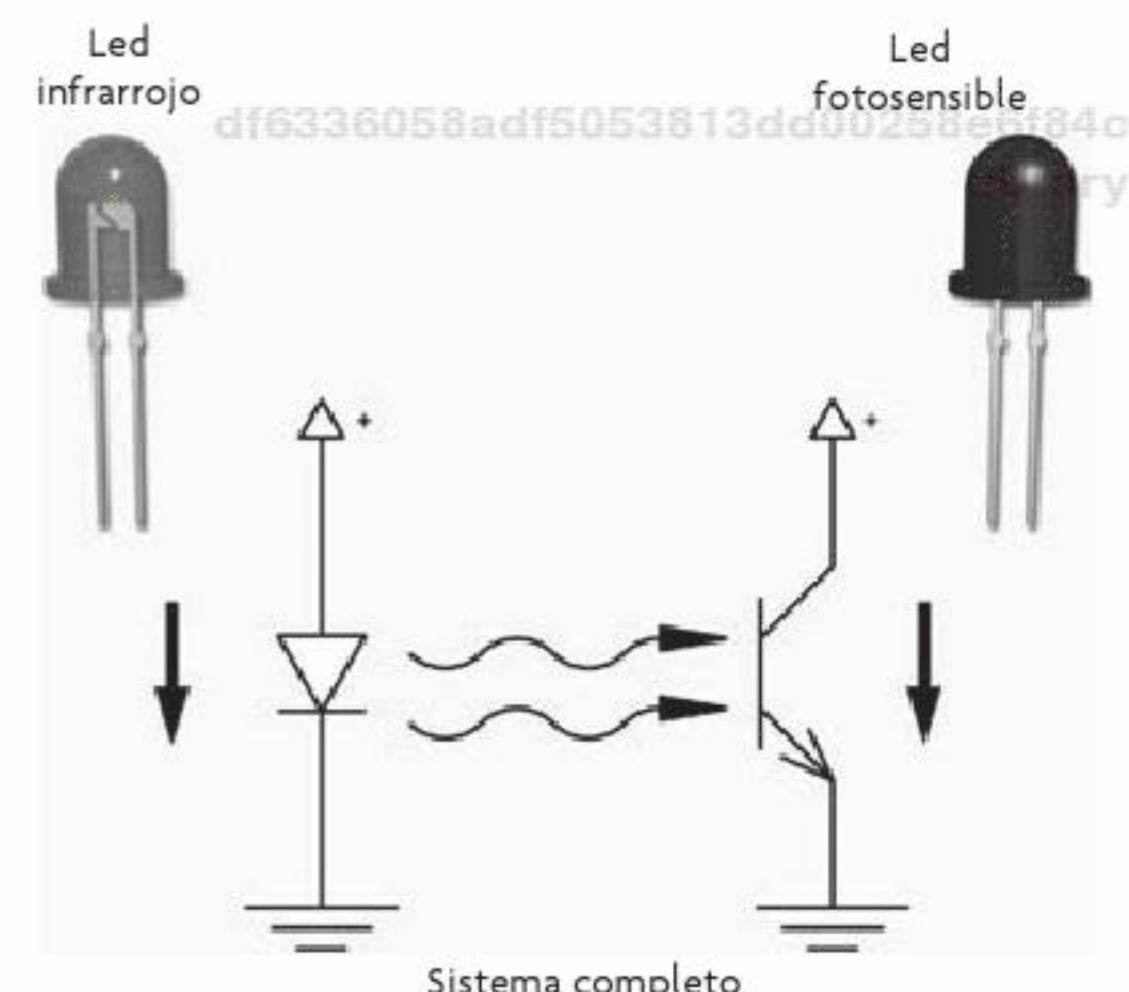
**Figura 4.2** Clasificación general de los sensores de luz, color y visión.

## 4.1 Sensores infrarrojos, el fotodiodo y el fototransistor

Este sistema de medición es muy utilizado con los llamados encoders, en los que el emisor de luz infrarroja y el elemento fotosensible (ya sea fotodiodo o fototransistor) se encargan de detectar el cambio de posición de un disco ranurado en secciones opacas y transparentes; asimismo, también son muy utilizados en sensores de presencia, como auxiliares de contadores en líneas de producción, cronómetros, etcétera.

El esquema básico para este tipo de sensores de presencia o distancia es la arquitectura que se muestra en la figura 4.3.

El LED infrarrojo (IRLED, diodo emisor de luz infrarroja) es el elemento emisor de luz en el sistema (espectro infrarrojo); el tipo de luz que emite este elemento se encuentra fuera del espectro visible para el ojo humano, por lo que para observar si el LED está o no encendido es necesario auxiliarse de un aparato electrónico, como una cámara (véase figura 4.4).



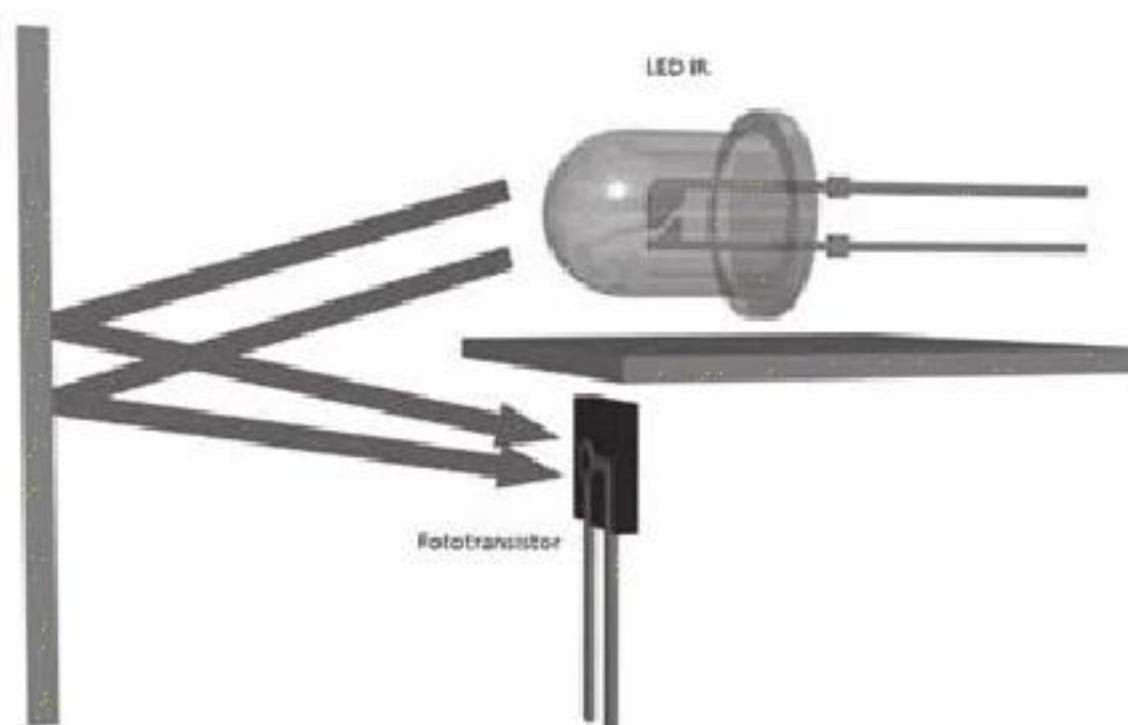
**Figura 4.3** Arquitectura del esquema básico para sensores de presencia o distancia.



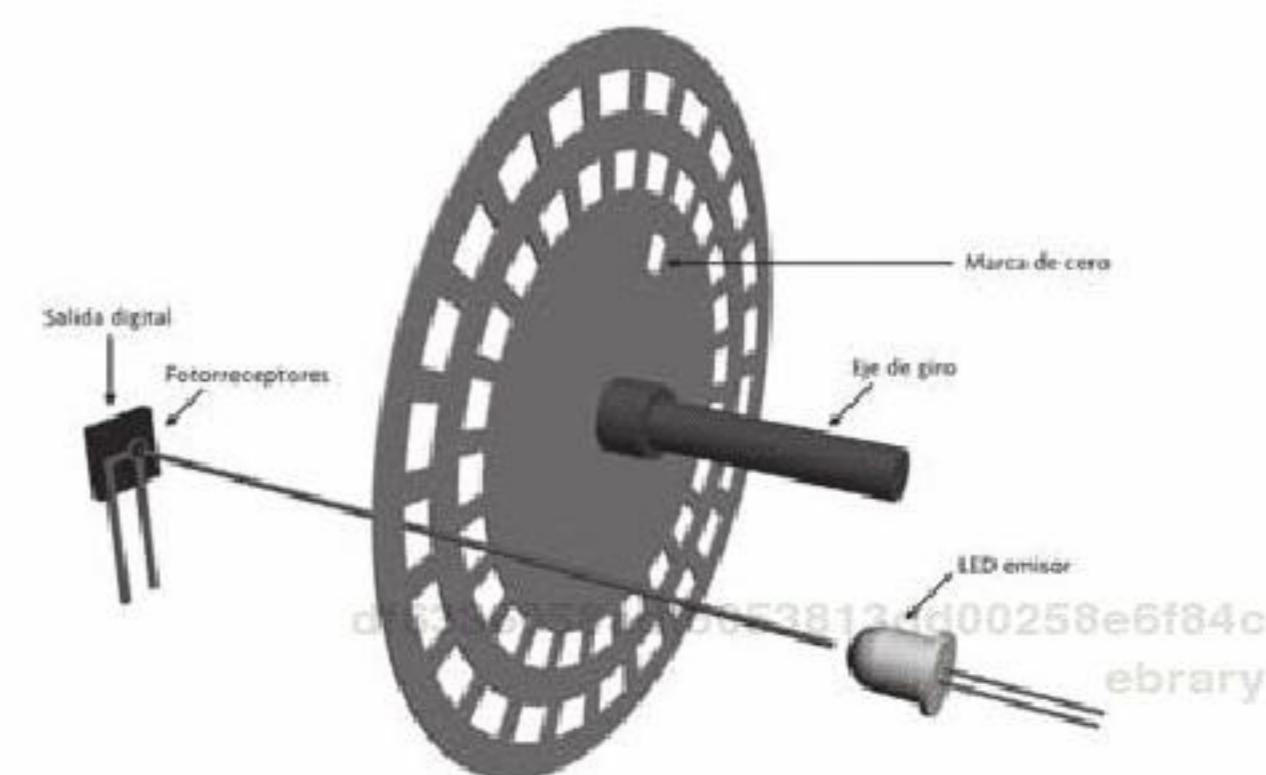
**Figura 4.4** LED infrarrojo visto con la ayuda de una cámara.

Como cualquier diodo emisor de luz (LED), el LED infrarrojo cuenta con un ánodo y un cátodo. En este caso, cuando el diodo se polariza en directa, esto es, cuando el voltaje positivo se encuentra aplicado en el ánodo y la referencia a tierra en el cátodo, este dispositivo emite la luz infrarroja, que es la fuente intrínseca del sistema de medida. Existen diferentes configuraciones para aprovechar esta luz emitida por el IRLED; así, este puede aprovecharse para medir la presencia de un

objeto (un objeto reflectante, ranuras opacas o transparentes en encoders ópticos), la distancia de un objeto reflectante, la intensidad de color en ciertas configuraciones (para esto es necesario calibrar el sistema), etcétera.

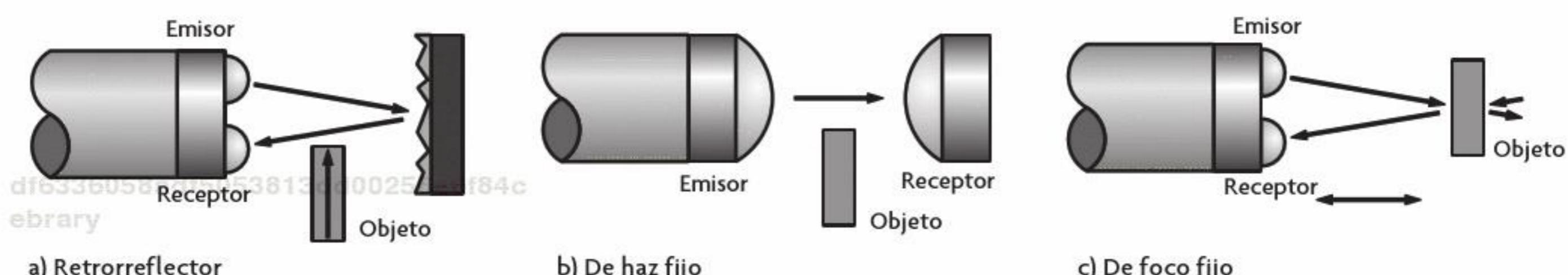


**Figura 4.5** IRLED como detector de presencia o distancia.



**Figura 4.6** IRLED como parte de un encoder.

Las diferentes configuraciones del IRLED se ilustran en la figura 4.7; en el inciso a) se muestra la configuración de retroreflector, donde el objeto refleja el haz de la fuente de luz produciendo un cambio de intensidad en la señal que genera el receptor; de esta forma se detecta la presencia de un objeto. Esta configuración se caracteriza por tener un objeto auxiliar donde se refleja la fuente de luz. En b) se muestra la configuración de haz fijo, en general utilizada en encoders y detectores de presencia. En c) se muestra la configuración de foco fijo, en la que la intensidad de la señal registrada en el receptor depende de la proximidad del objeto al emisor; esta configuración se utiliza para medidores de distancia.



**Figura 4.7** Configuraciones para el par emisor-receptor.

Ahora que ya se cuenta con la fuente de luz (IRLED), se debe utilizar un elemento fotosensible, fotodiódos o fototransistores, para detectar la presencia o ausencia del haz de luz que emite el IRLED.

### Fototransistores

Un fototransistor **es el transductor entre la luz y una señal eléctrica que indica la presencia o ausencia de dicho haz**. En configuraciones más especializadas, la señal eléctrica emitida por dicho sensor indica la distancia entre el emisor de luz y cierto objeto, cambios en la superficie reflectante del mismo o el color de dicha superficie. Un fototransistor convierte la energía contenida en un fotón en portadores de carga, de tal manera que por cada fotón percibido se genera un par electrón-hueco, agregando a este efecto una ganancia en corriente de la misma manera que en un transistor común. Al conectar una fuente de voltaje en el circuito base-emisor-colector se busca que la unión base-emisor sea polarizada en inversa, con la finalidad de que, al percibir una fuente de luz en la base, se genere una **corriente fotoinducida** (véase figura 4.8).

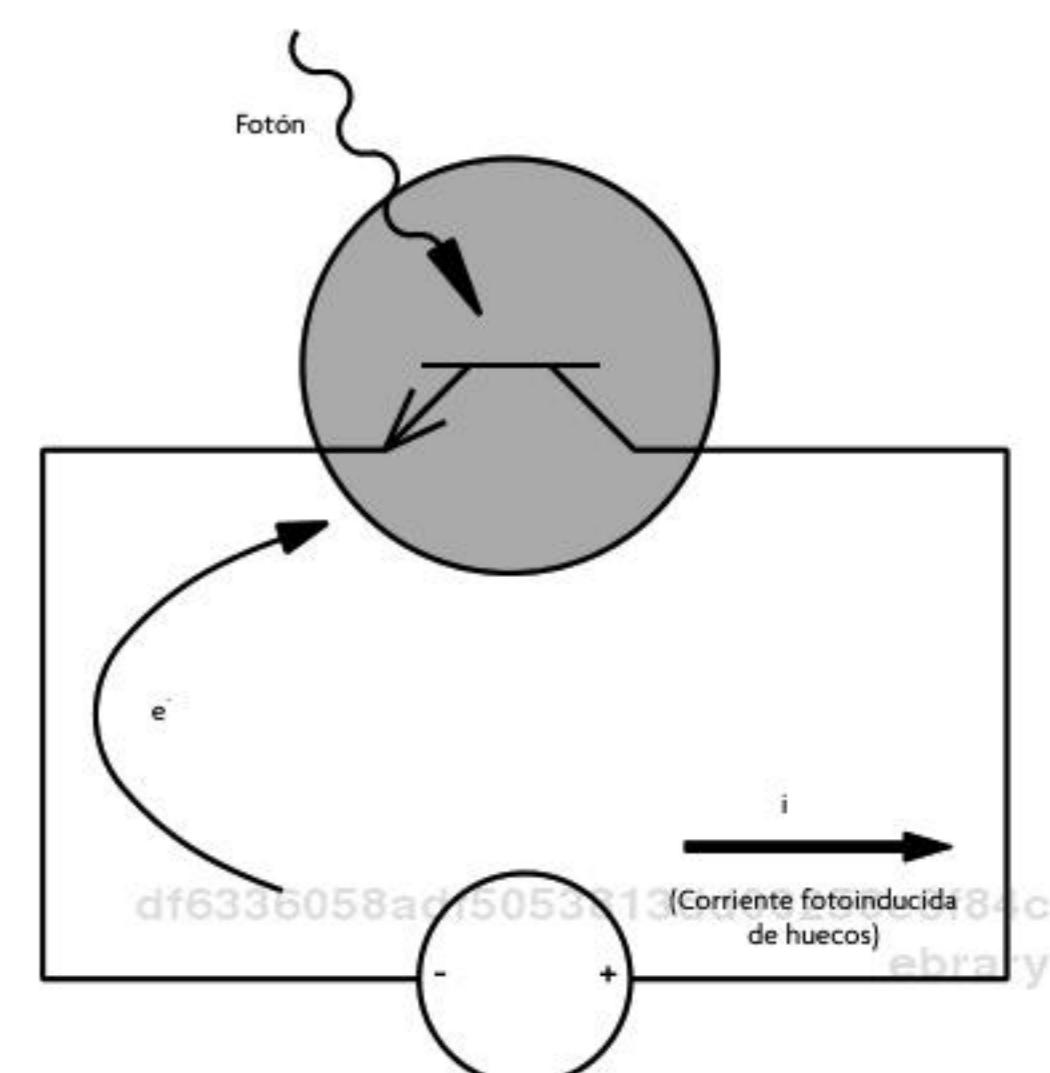
df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

La principal diferencia entre un fototransistor y un transistor común radica en su forma de generar la corriente eléctrica que circula a través de estos. En el caso del transistor común, la terminal de la base debe ser polarizada, con el fin de generar una corriente eléctrica que circule a través del transistor, mientras que el fototransistor suele carecer de una terminal de base y se aprovecha el efecto fotoeléctrico para generar los portadores de carga que circulan a través de este. En general, en un fototransistor el área destinada para la **"base"** es mucho mayor que en un transistor común, debido a que la generación de portadores mayoritarios (que en este caso son los encargados de generar la corriente eléctrica) es mucho menor en el efecto fotoeléctrico que si contara con una fuente de voltaje, como es el caso de un transistor con una terminal de base polarizada (véase figura 4.9).

En general, este dispositivo cuenta con dos terminales: el emisor y el colector, debido que en estos la base ha sido sustituida por un elemento fotosensible, en el cual se presenta el **efecto fotoeléctrico**; asimismo, también existen dispositivos que cuentan con una tercera terminal correspondiente a la base, aunque estos son menos comunes, la cual solo se usa para establecer un punto de operación (al establecer un voltaje en la base) en el transistor, a partir del cual se presenta un incremento o un decremento de voltaje, dependiendo de la intensidad de luz presente en el elemento fotosensible. Cuando el dispositivo tiene solo dos terminales, el punto de operación del transistor se establece de manera embebida en el encapsulado; en este caso dichas terminales corresponden al emisor y al colector.

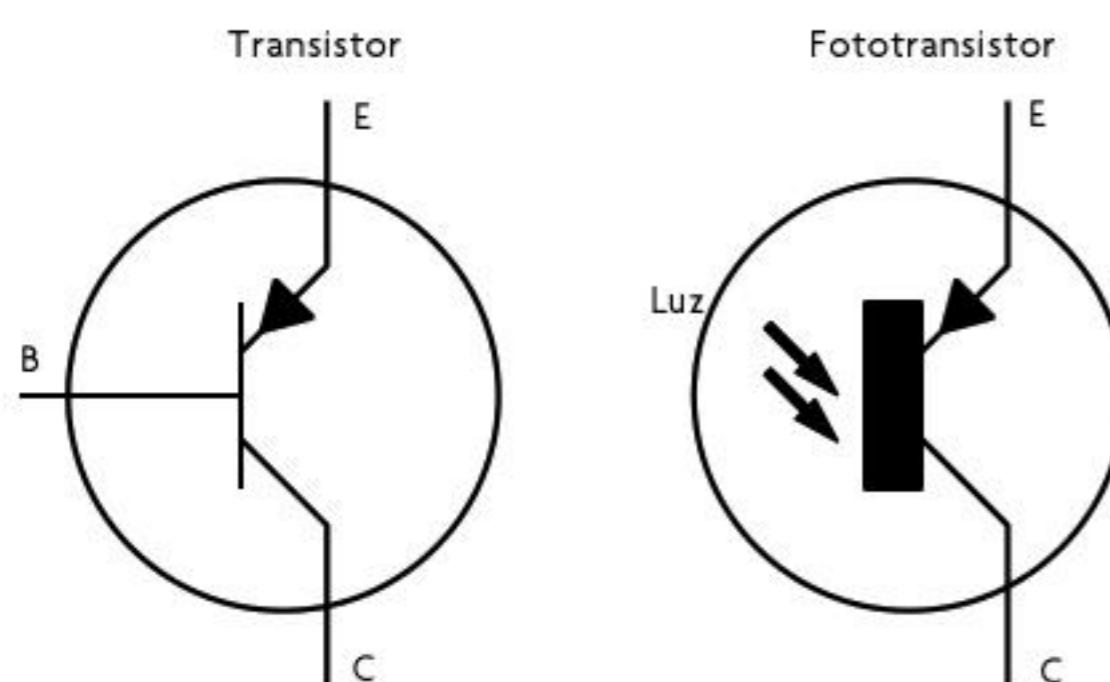
La irradiación<sup>2</sup> que perciba el elemento fotosensible determinará la intensidad de corriente entre el colector y el emisor del fototransistor; en un transistor común esto equivale a cambiar el punto de operación del transistor, ya que se estará cambiando de una curva de salida a otra (se llama curva de salida a la gráfica que relaciona el voltaje colector-emisor y la corriente del colector), dependiendo de la intensidad de la luz que perciba el sistema (véase figura 4.10).

Existe una pequeña cantidad de corriente eléctrica que fluye por el transistor cuando no hay luz presente. Esta corriente se conoce como **corriente de oscuridad** y es generada por un bajo número de portadores que son injectados al emisor debido a los efectos de amplificación propios del transistor.

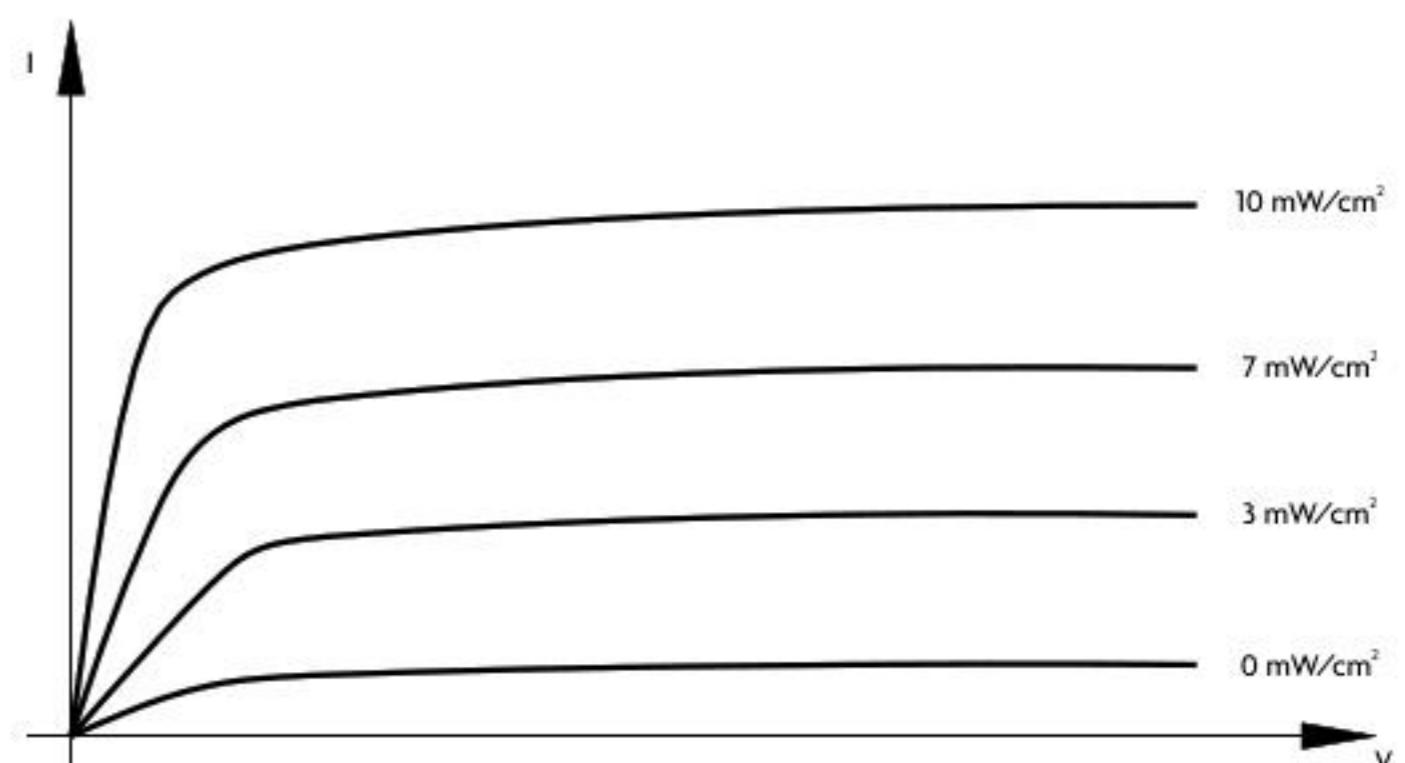


**Figura 4.8** Fototransistor.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary



**Figura 4.9** Símbolo eléctrico del transistor (izquierda), símbolo eléctrico del fototransistor (derecha).



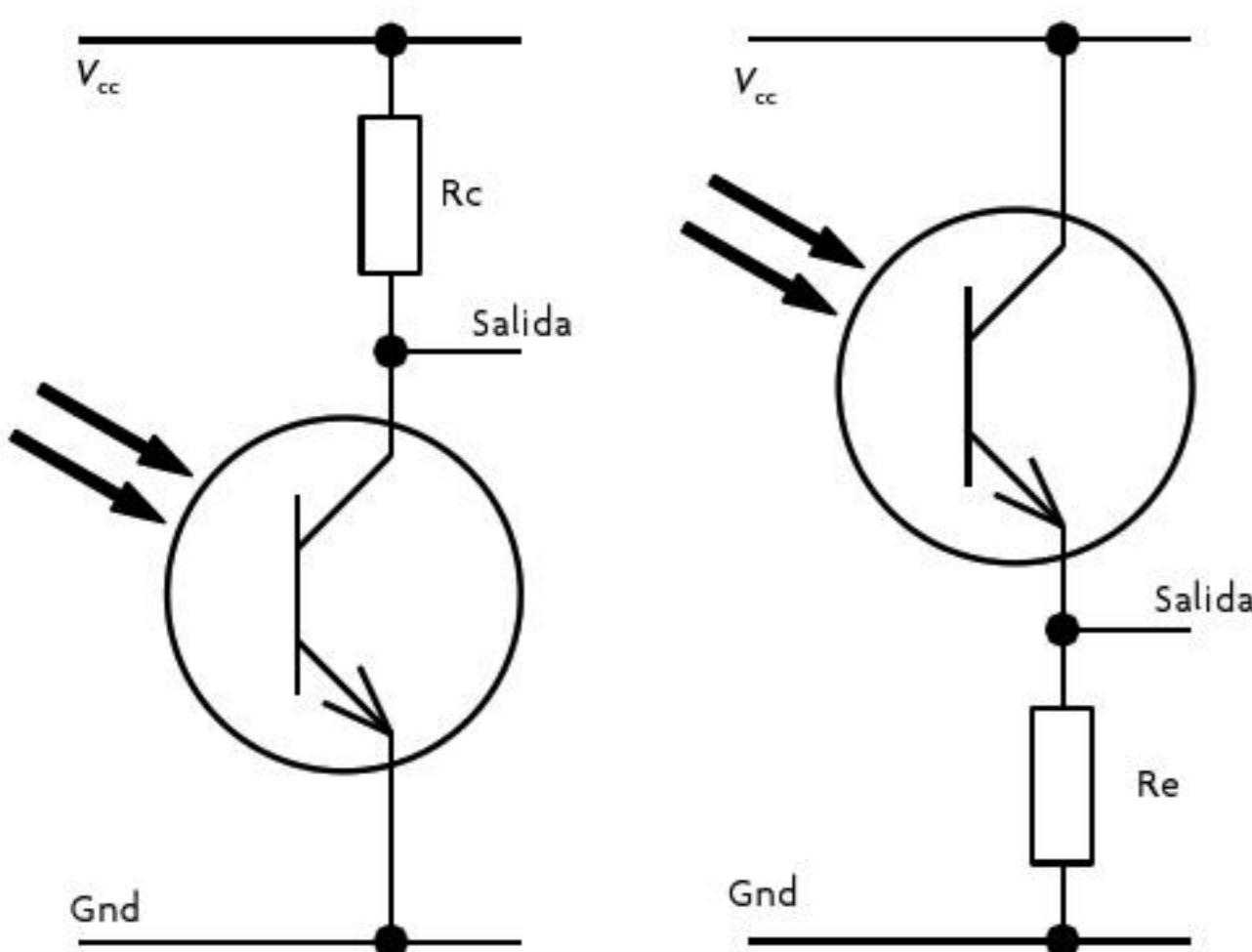
**Figura 4.10** Curva de salida de un fototransistor.

<sup>2</sup> Se refiere a la intensidad de los rayos de luz que emite un objeto; esta puede medirse en  $\text{mW}/\text{cm}^2$ . df5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Un fototransistor tiene la desventaja de presentar un bajo desempeño a altas frecuencias, debido a que tiene un ancho de banda limitado a causa de los efectos capacitivos presentes en la estructura, pues, como se dijo antes, al requerir una gran área para maximizar el efecto fotoeléctrico, las capacitancias parásitas también se incrementan en mayor medida; para el caso de un transistor con homounión,<sup>3</sup> el ancho de banda está alrededor de los 250 KHz, mientras que en un fototransistor de heterounión<sup>4</sup> el ancho de banda llega a ser de 1 GHz.

### Configuraciones para un fototransistor

Un fototransistor se puede utilizar en una gran variedad de configuraciones con la finalidad de detectar la luz emitida por el IRLED. Las configuraciones típicas para este tipo de dispositivos, al igual que en el caso de un transistor común, son de *emisor común* o de *colector común*. La configuración de base común no es muy usada debido a que, como ya se dijo, no todos los fototransistores cuentan con dicha terminal para su conexión.



**Figura 4.11** Configuración de emisor común.

**Figura 4.12** Configuración de colector común.

### Configuración de emisor común

La configuración de emisor común (véase figura 4.11) consiste en generar un cambio en la señal eléctrica de estado alto a estado bajo; este cambio se logra mediante la conexión de la terminal del colector a la fuente de voltaje, a través de una resistencia de carga, y la terminal de emisor es conectada a referencia a tierra. El voltaje de salida se mide en el colector. Este circuito básico tiene la función de actuar como un amplificador, ya que amplifica la corriente generada en la base debido a la presencia de luz.

### Configuración de colector común

Esta configuración también se conoce como seguidor emisor y funciona de forma opuesta a la configuración de emisor común, ya que cambia el estado de la señal de estado bajo a estado alto en presencia de luz en la base. La conexión consiste en colocar el emisor con referencia a tierra por medio de una resistencia de carga, mientras que el colector está conectado a una fuente de voltaje positiva; el voltaje de salida se mide en el emisor (véase figura 4.12).

### Operación del circuito: modo *switch* y modo activo

La operación del fototransistor tiene dos grandes ramas; se puede utilizar como tipo *switch* o en modo activo. La configuración en modo de *switch* es ampliamente utilizada para detectar la presencia de un objeto o en encoders. Esta forma de operación consiste en llevar a corte o a saturación el transistor, con lo que se genera una señal digital que determina la presencia o ausencia del objeto, o las rendijas opacas o transparentes del encoder. Para lograr esta señal, la fuente de luz debe estar presente, a fin de lograr la saturación del transistor, o estar obstruida por completo para llevar el transistor a corte. Por otra parte, la configuración en modo activo, también conocida como *configuración lineal*,<sup>5</sup> consiste en medir el cambio de voltaje correspondiente a la intensidad de luz percibida por el ele-

<sup>3</sup> Una homounión es la interfaz entre dos capas semiconductoras que tienen la misma banda prohibida; en general se presenta en interfaces del mismo semiconductor que tienen distintos niveles de dopaje.

<sup>4</sup> Una heterounión es una unión formada entre dos semiconductores diferentes (que tienen una banda prohibida diferente) o una unión entre un metal y un semiconductor.

<sup>5</sup> Esta configuración se llama lineal, ya que el transistor presenta cierta proporcionalidad entre la luz que percibe el elemento fotosensible y la corriente presente en el circuito, a pesar de que esta relación no es estrictamente lineal.

mento fotosensible. Debido a que en este tipo de configuraciones la base no está disponible para su conexión, el modo de operación del fototransistor es manipulado cambiando el valor de la resistencia de carga. Para determinar en qué modo se desea utilizar al transistor, se debe elegir una entre las dos condiciones siguientes:

$$\begin{array}{lll} \text{Modo activo: } & V_{cc} & > R_L \times I_C \\ \text{Modo switch: } & V_{cc} & < R_L \times I_C \end{array}$$

donde:

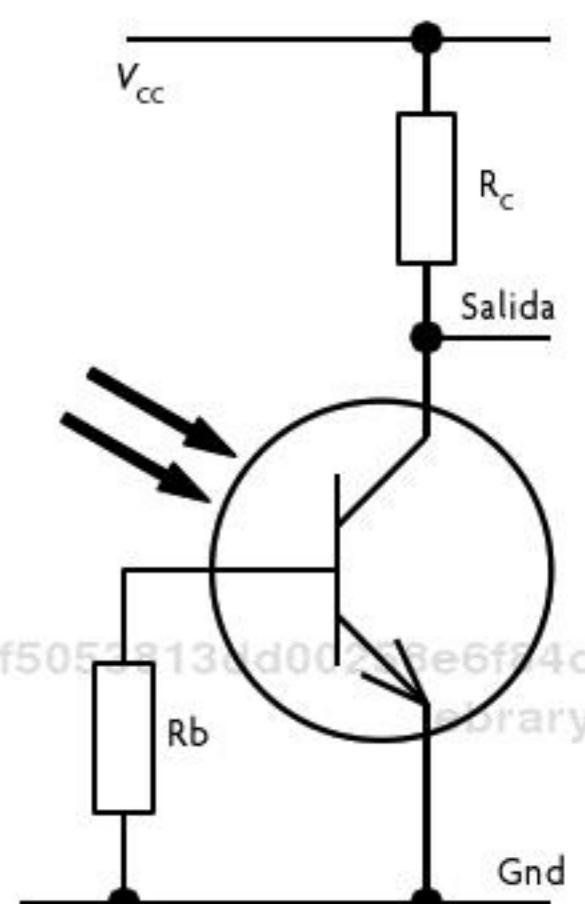
$R_L$ : resistencia de carga

$I_C$ : corriente de colector

$V_{cc}$ : voltaje de alimentación

### Fototransistores con terminal de base

El uso de la terminal de base es conveniente en aplicaciones en donde se desea incrementar o disminuir el nivel de luz permisible, para provocar un cambio de estado en el fototransistor. Si se tienen valores altos de  $R_b$ , se incrementa el nivel de luz necesario para provocar un cambio de estado; esto mejora en gran medida la calidad de la señal digital generada por el circuito (véase figura 4.13).



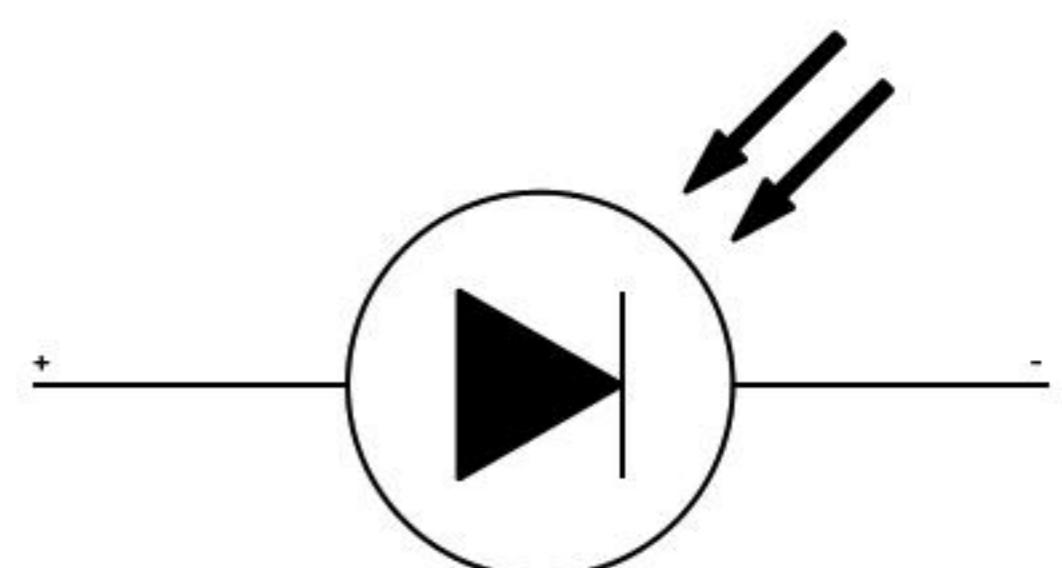
**Figura 4.13** Fototransistor con conexión de base disponible.

### Fotodiodos

Al igual que un fototransistor, un **fotodiodo** es un dispositivo óptico semiconductor cuya principal característica es generar pares electrón-hueco a partir de la energía presente en un fotón percibido. El símbolo eléctrico utilizado para identificar a un fotodiodo se muestra en la figura 4.14.

Para explicar el principio de funcionamiento de un fotodiodo, considere una unión **pn** (la de un diodo común). Si la unión está polarizada en directa, es decir si el lado **p**<sup>6</sup> se conecta a la terminal positiva de la fuente de voltaje y el lado **n**<sup>7</sup> se conecta a la terminal negativa del voltaje, una corriente circulará a través del diodo; cuando el diodo se expone a la luz, entonces su corriente tendrá un incremento despreciable con respecto a la corriente que circula por la unión debido a la fuente de voltaje y se comportará como un diodo común.

Ahora, considere que el diodo es polarizado en inversa; la **corriente de oscuridad** del diodo será muy pequeña. Cuando en este se presente el fenómeno fotoeléctrico (es decir, que debido a la presencia de fotones se generen pares electrón-hueco), la corriente se incrementa de manera notable; esto se debe a que los electrones generados por el efecto fotoeléctrico estarán fluyendo en dirección a la terminal positiva de la fuente de voltaje, con lo que se genera un flujo de corriente de huecos<sup>8</sup> ( $i_p$ ) en dirección a la terminal negativa de la fuente de voltaje (véase figura 4.15).

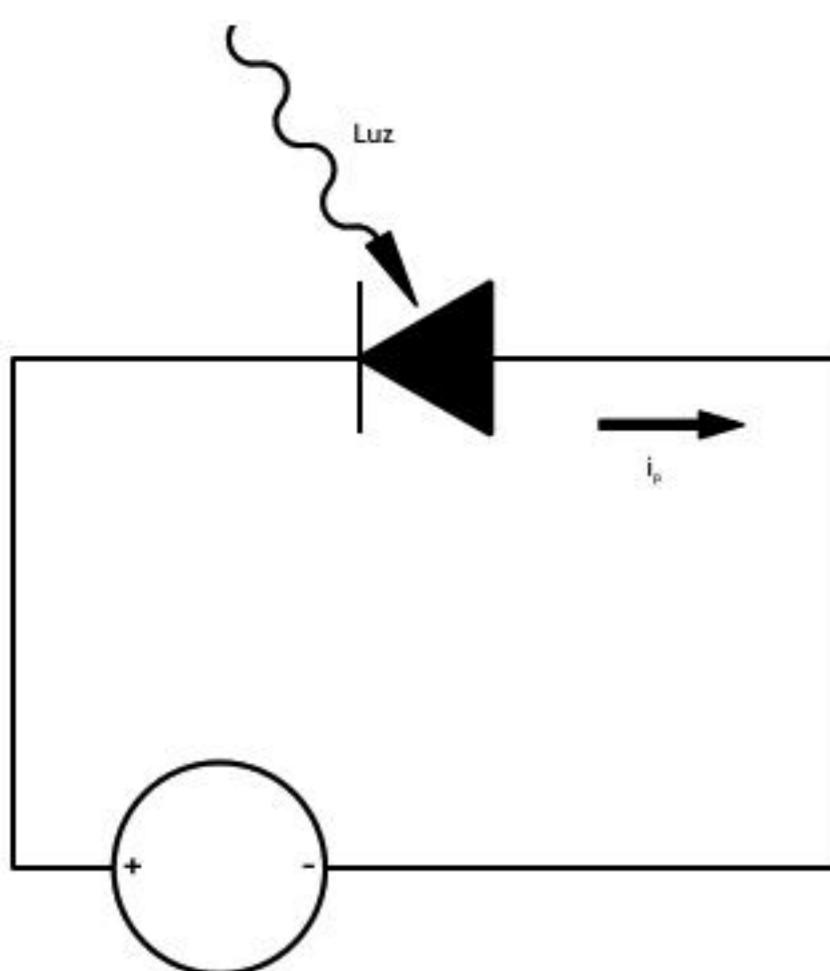


**Figura 4.14** Símbolo eléctrico de un fotodiodo.

<sup>6</sup> Se llama semiconductores de tipo P a los semiconductores contaminados con impurezas aceptoras; dichas impurezas generan portadores mayoritarios llamados huecos. Los huecos, comparados con los electrones, tienen polaridad positiva.

<sup>7</sup> Los semiconductores tipo N son aquellos a los que se les agregan impurezas donadoras, generando electrones como portadores mayoritarios; de esta forma este material contiene un mayor número de electrones libres comparados con los huecos libres, por lo que se considera que el material tiene polaridad negativa.

<sup>8</sup> La corriente que fluye en un semiconductor intrínseco consiste en corriente de ambos, electrones y huecos. Cuando se habla de corriente de huecos, esta se refiere a la corriente convencional que fluye de la terminal negativa de la fuente en dirección a la terminal positiva. Es decir, los electrones que han sido liberados de sus posiciones en la red dentro de la banda de conducción se pueden mover a través del material.



**Figura 4.15** Fotodiodo.

### Tipos de fotodiodos

Con base en el tipo de tecnología que se utilice y las características de la unión entre tipos de semiconductores, los fotodiodos pueden clasificarse en:

#### Fotodiodo PN

Este fotodiodo fue el primer tipo utilizado. Sin embargo, debido a su bajo rendimiento, ha sido sustituido por dispositivos que tienen el mismo principio de funcionamiento, pero con mejores características eléctricas.

#### Fotodiodo PIN

Este tipo de fotodiodo es uno de los más utilizados. El término PIN se deriva del tipo de unión que presenta, ya que se trata de material **P**, una región semiconductor intrínseca (se le llama semiconductor intrínseco al semiconductor puro, ya que no contiene impurezas donadoras ni aceptoras) **I** y de un material **N**. Tiene la característica de generar pares electrón-hueco de manera más eficiente que una unión PN convencional, además de tener bajos valores de capacitancia parásita, lo que lo hace más eficiente cuando se trabaja a altas frecuencias.

#### Fotodiodo de avalancha

Este tipo de fotodiodo tiene sus principales aplicaciones cuando se tiene un ambiente con baja irradación, ya que tiene un alto valor de ganancia en corriente. La principal desventaja de este fotodiodo es que debido a su alta ganancia de corriente, los niveles de ruido también se ven incrementados.

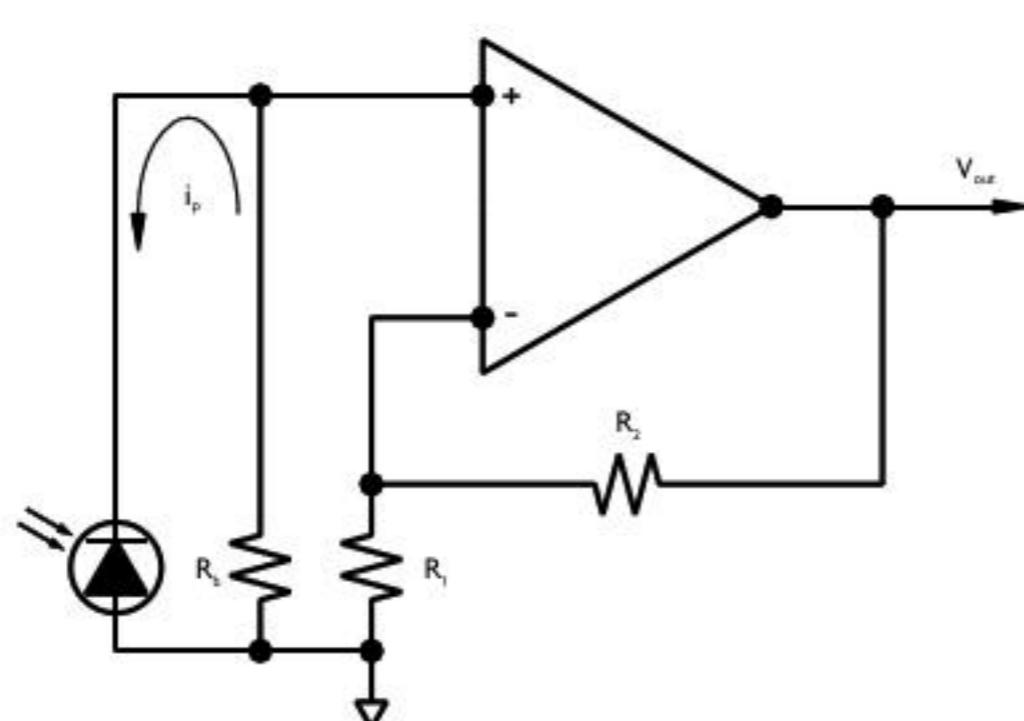
#### Fotodiodo Schottky

Este tipo de fotodiodo está basado en el principio de funcionamiento de un diodo Schottky convencional; presenta muy bajos valores de capacitancia parásita, lo que lo hace ideal para aplicaciones en alta frecuencia.

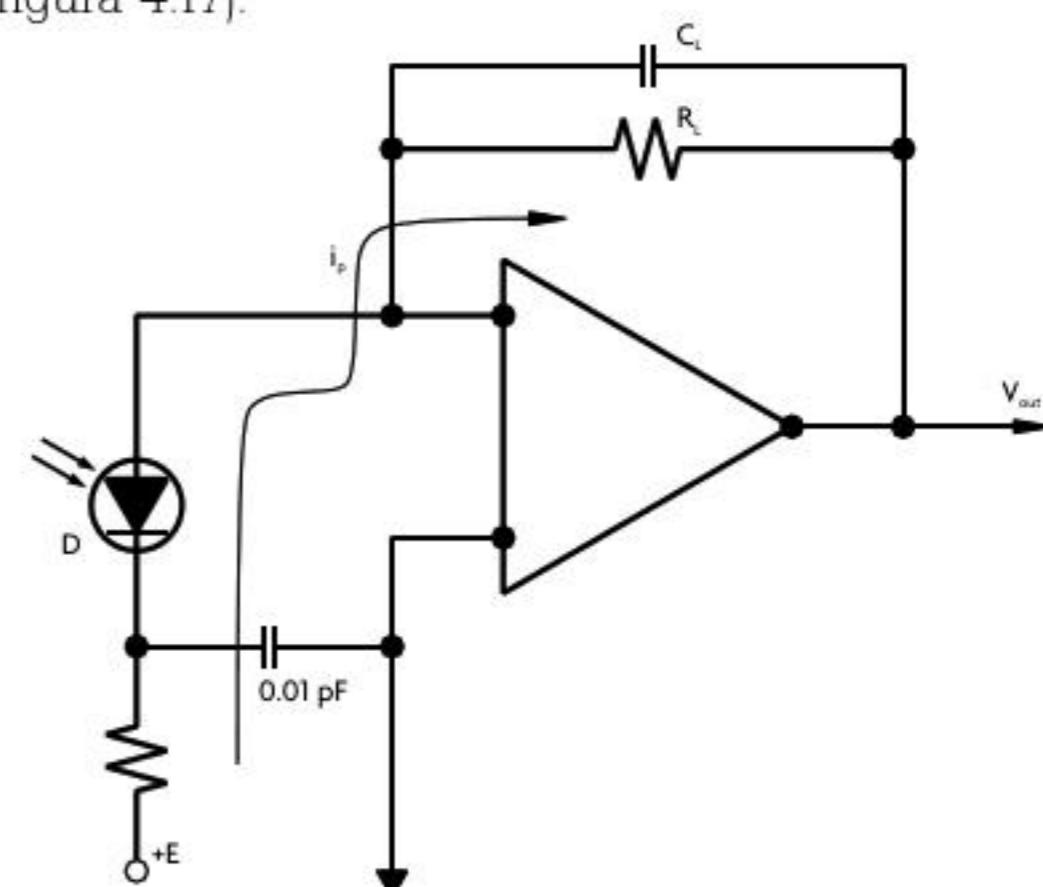
### Modos de operación de fotodiodo

Un fotodiodo puede operarse de dos formas: en 1) **modo fotovoltaico** y en 2) **modo fotoconductivo**. El modo fotovoltaico (véase figura 4.16) consiste en operar al fotodiodo como una fuente de corriente; en este modo se utiliza una carga resistiva para determinar el voltaje presente. En general, este arreglo se utiliza en conjunto con un amplificador operacional en modo no inversor.

En el modo fotoconductivo se requiere aplicar un voltaje en inversa en el fotodiodo; de igual manera, esta configuración se acompaña de un circuito de acondicionamiento de señal, la unión de estos elementos es llamado convertidor luz-voltaje (véase figura 4.17).



**Figura 4.16** Fotodiodo en configuración fotovoltaica.

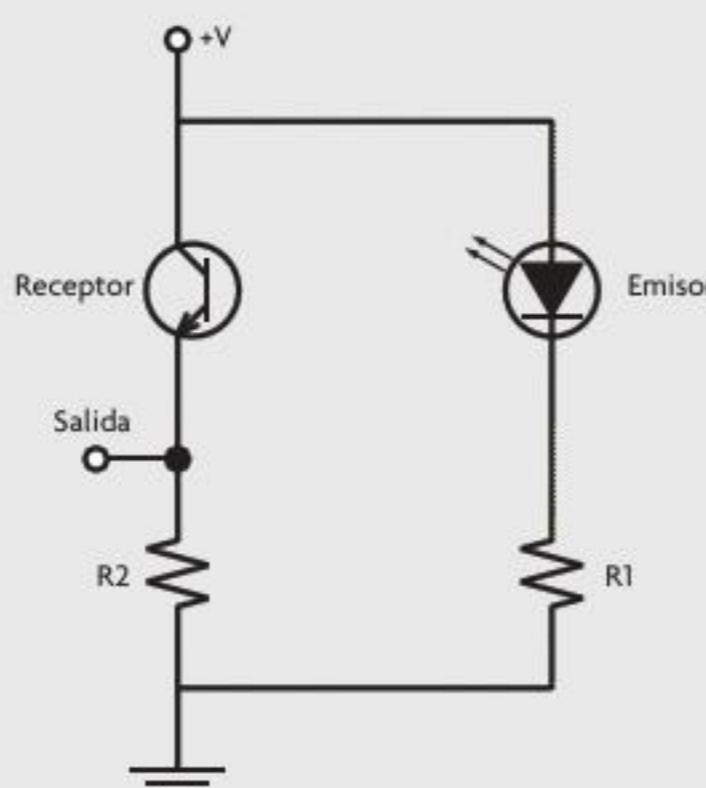


**Figura 4.17** Convertidor luz-voltaje.

## Ejercicio de aplicación

### Par emisor/receptor en modo switch, sensor de presencia

Una vez que se ha hablado de la fuente de luz y de los tipos de elementos fotosensibles, podemos decir que para relacionar el cambio de irradiación con un voltaje a la salida se utiliza un arreglo resistivo como parte del par emisor/receptor.



**Figura 4.18** Circuito típico para sensor de presencia.

#### Objetivo

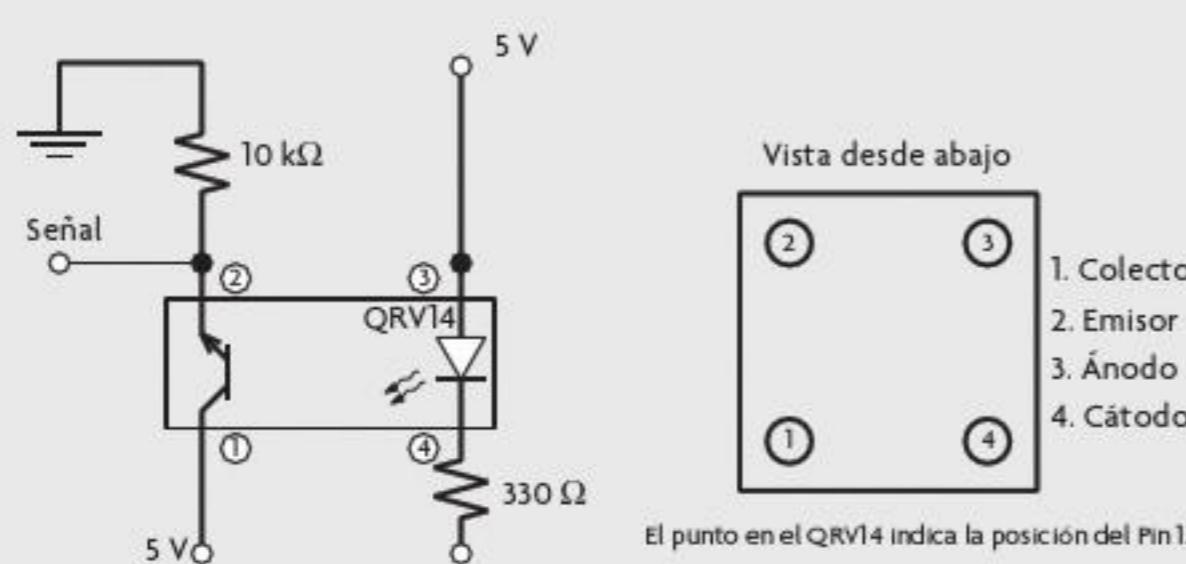
Detectar la presencia de un objeto frente a un QRD1114 y mostrar la información en el monitor serial.

#### Material

- Arduino IDE 1.0.5®
- Arduino Uno R3®
- 1 QRD1114
- 1 resistencia 330 Ω
- 1 resistencia 10k Ω
- 5 cm de alambre 24 AWG
- 3 cables macho-macho Dupont®
- Protoboard

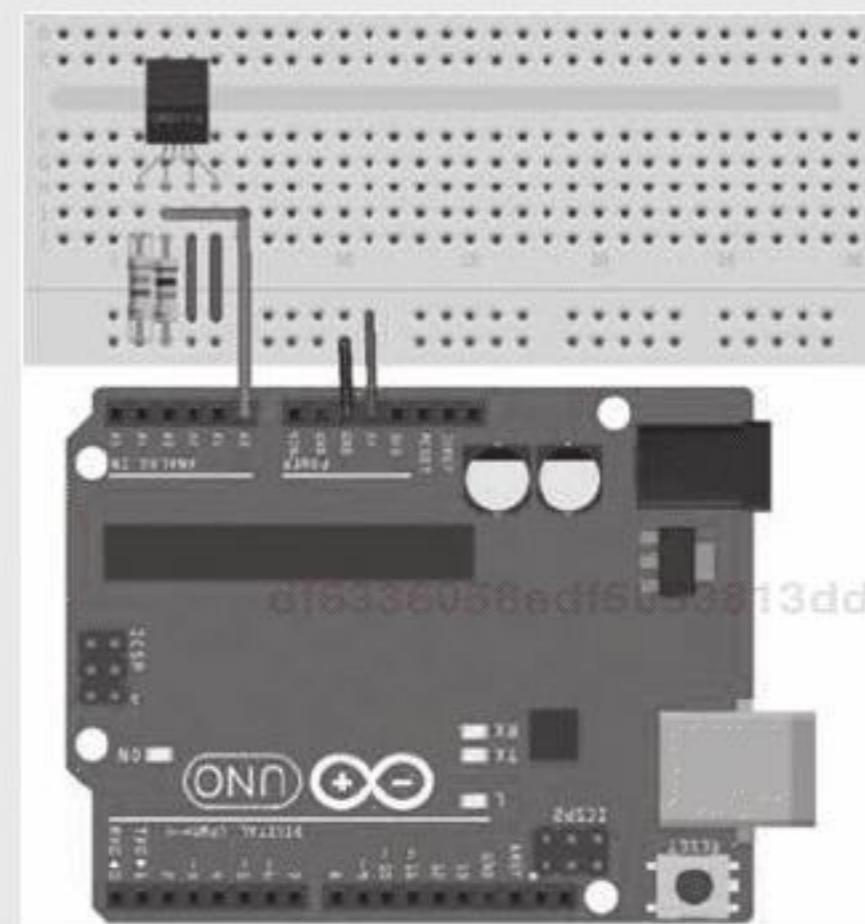
#### Desarrollo

1. Armar el circuito como se indica en el diagrama de la figura 4.19. La señal se conecta al pin A0 del Arduino Uno®.



**Figura 4.19** Diagrama de conexiones.

2. El circuito armado debe ser similar al que se muestra en la figura 4.20.



**Figura 4.20** Circuito armado.

3. Analizar e implementar el siguiente código en el Arduino Uno®.

```
/*
FOTOTRANSISTOR QRD1114 SENSOR DE PRESENCIA

Este ejemplo utiliza un QRD1114 para detectar
un objeto cercano al dispositivo. Se indica
a través del monitor serial si se detectó un
objeto. Se revisa el sensor cada segundo. La
sensibilidad puede ser modificada con constante
"umbral".*/

// Pines
constint QRD1114 = A0; // Señal del QRD1114.

// Variables
inttension; // Señal digitalizada.

// Constantes
constint umbral = 500; // Umbral de
detección. (Sensibilidad)

voidsetup() {
    Serial.begin(9600); // Comunicación serie
    a 9600 baudios.
}

voidloop() {
    tension = analogRead(QRD1114); // Lee la
    señal del QRD1114.

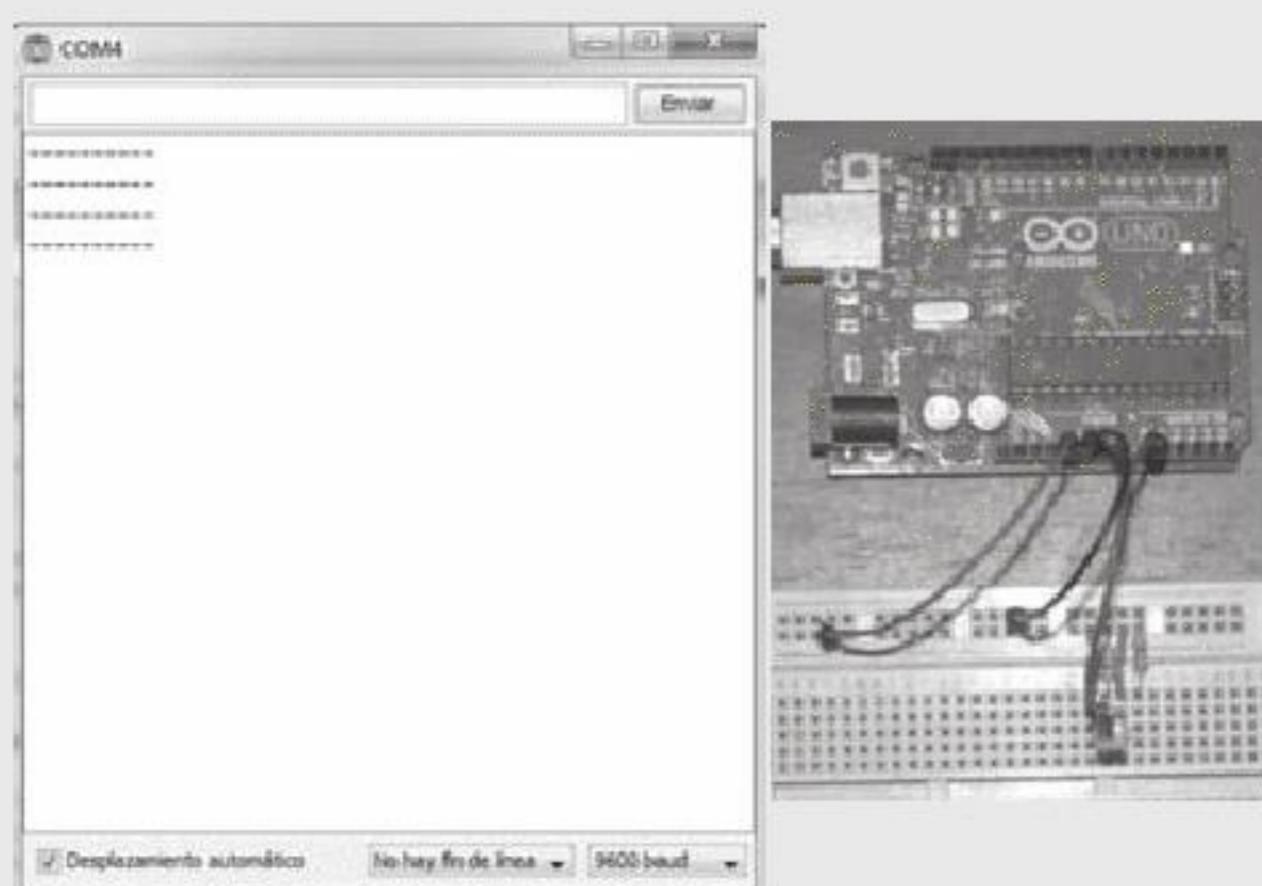
    // Si la señal es mayor al umbral se
    detectó un objeto.
    if ( tension> umbral) Serial.
    println("Detectado!");
}
```

```

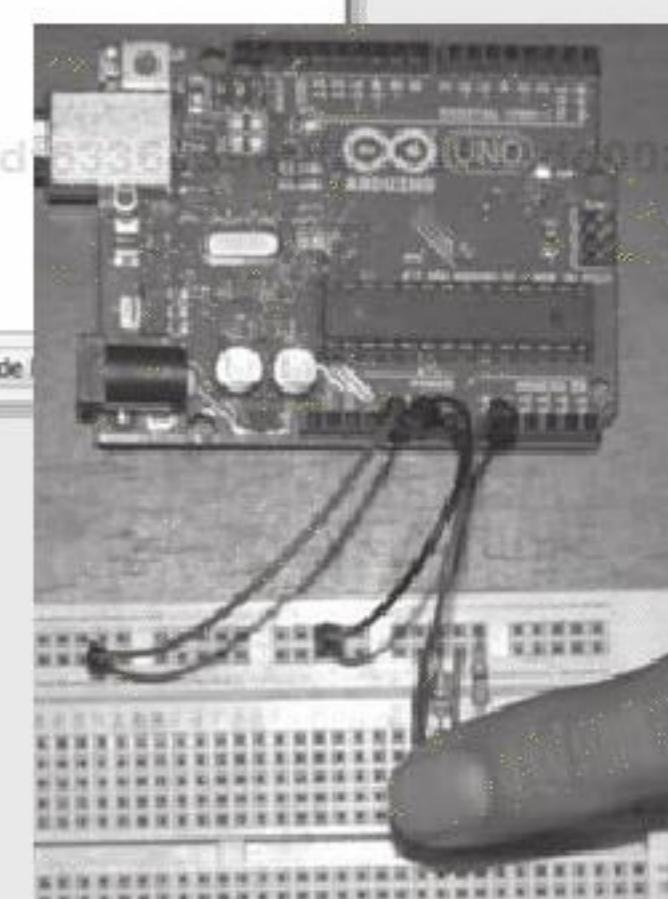
elseSerial.println("-----");
delay(1000); // Revisa QRD1114 cada
segundo.
}

```

4. Comprobar el funcionamiento del circuito armado en protoboard y el programa cargado en Arduino Uno® colocando un objeto sobre el QRD1114 y verificando en el monitor serial la respuesta.
5. A continuación se muestran imágenes de la práctica finalizada.



**Figura 4.21** Respuesta del circuito al no detectar objeto.



**Figura 4.22** Respuesta del circuito al detectar un objeto (el dedo).

## Ejercicio de aplicación

### Medidor de distancia, sensor Sharp

#### Sensor de distancia óptico

##### Objetivo

Medir la distancia en centímetros a un objeto mediante el sensor Sharp 2Y0A02® con el uso de un Arduino Uno®.

##### Material

- Arduino Uno®
- Sensor de distancia óptico Sharp 2Y0A02®
- Conector JST de 3 vías

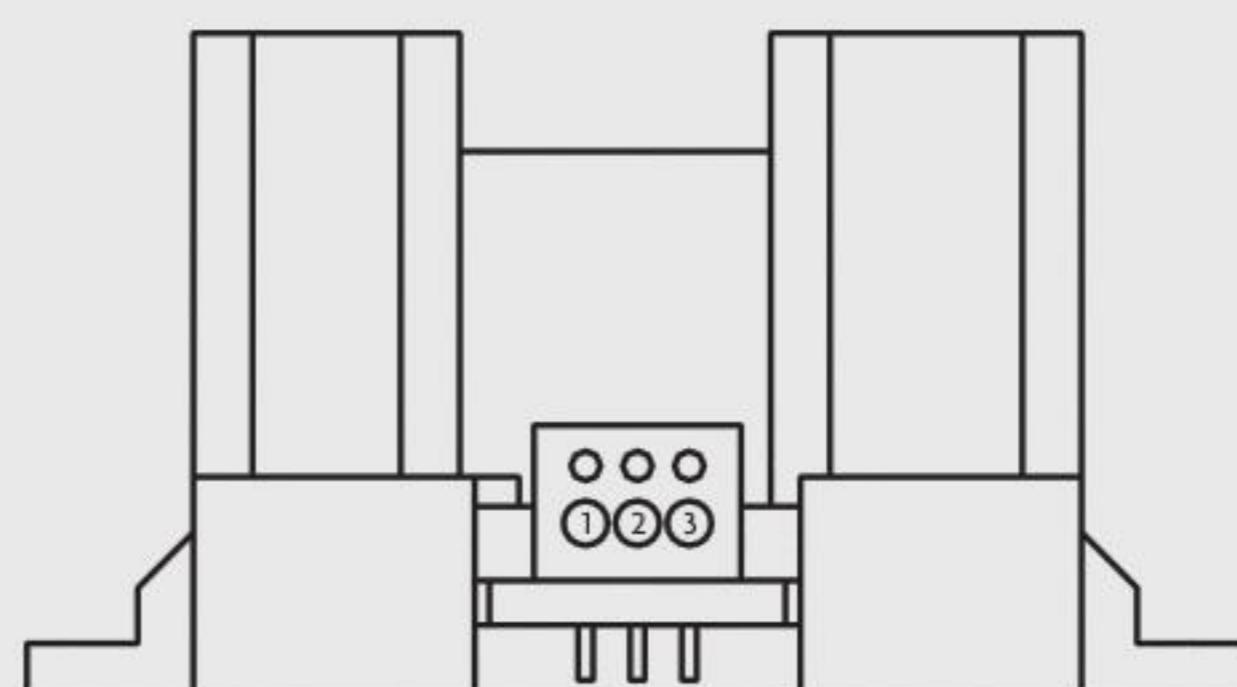
##### Desarrollo

###### Descripción del sensor Sharp 2Y0A02®

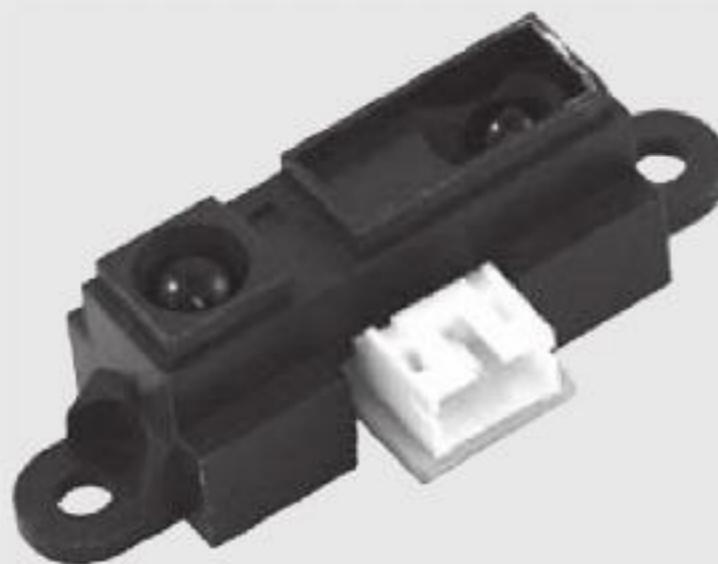
Sharp 2Y0A02® es un sensor de distancia óptico con un rango óptimo de 20 a 150 cm. La señal del sensor es analógica y tiene un comportamiento no lineal; esto es, a mayor distancia del objeto, menor tensión de lectura. En la figura 4.23 se aprecia la curva del sensor obtenida de la hoja de datos.

La disposición de sus terminales es la siguiente:

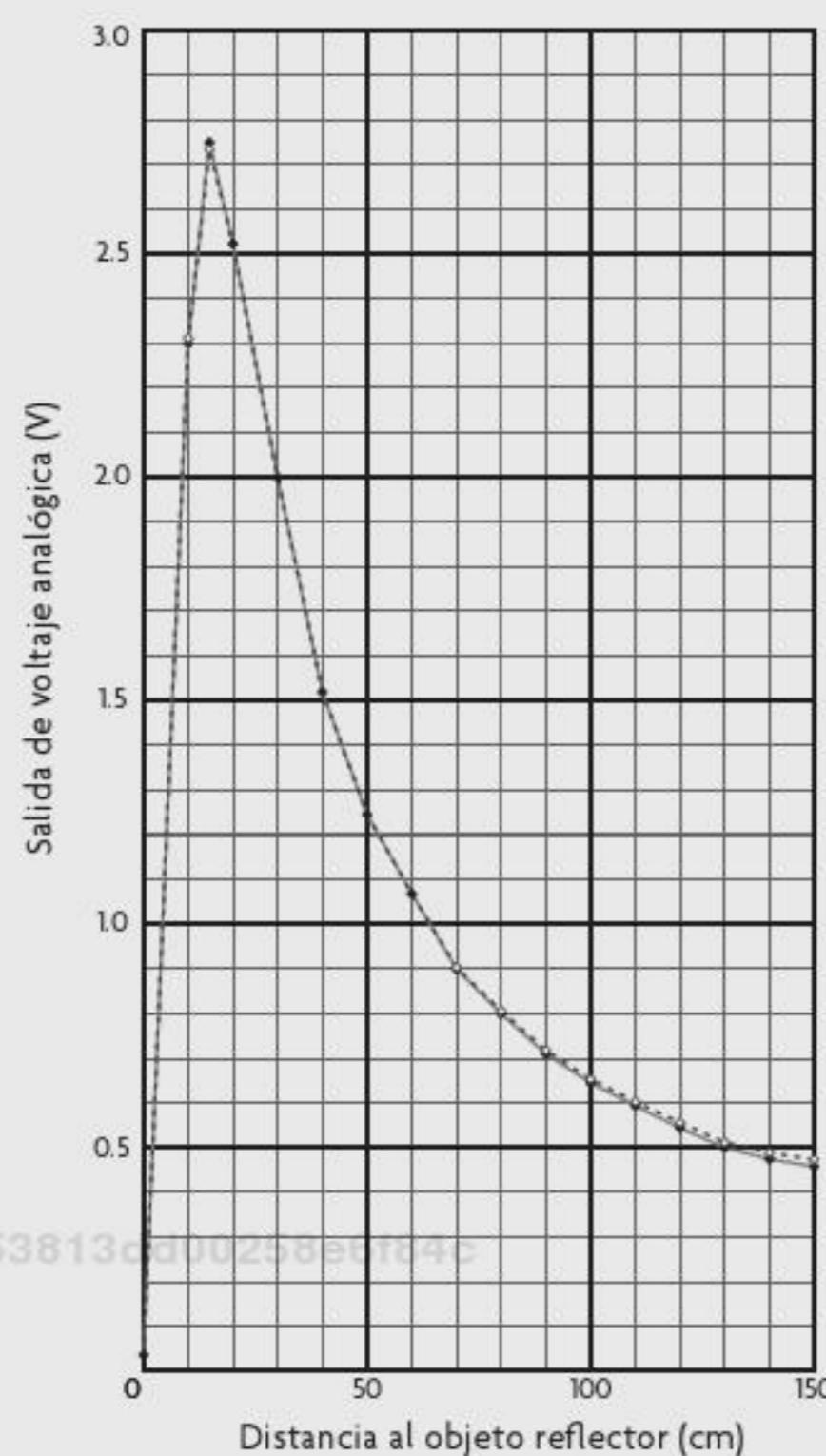
- **PIN 1.** Señal de salida analógica. A 150 cm = 0.4 V, utilizando un objeto con una reflectividad de 90 por ciento.
- **PIN 2.** Tensión de referencia (GND).
- **PIN 3.** Tensión de alimentación. Entre 4.5 y 5.5 V.



**Figura 4.23** Terminales del sensor Sharp 2Y0A02®.

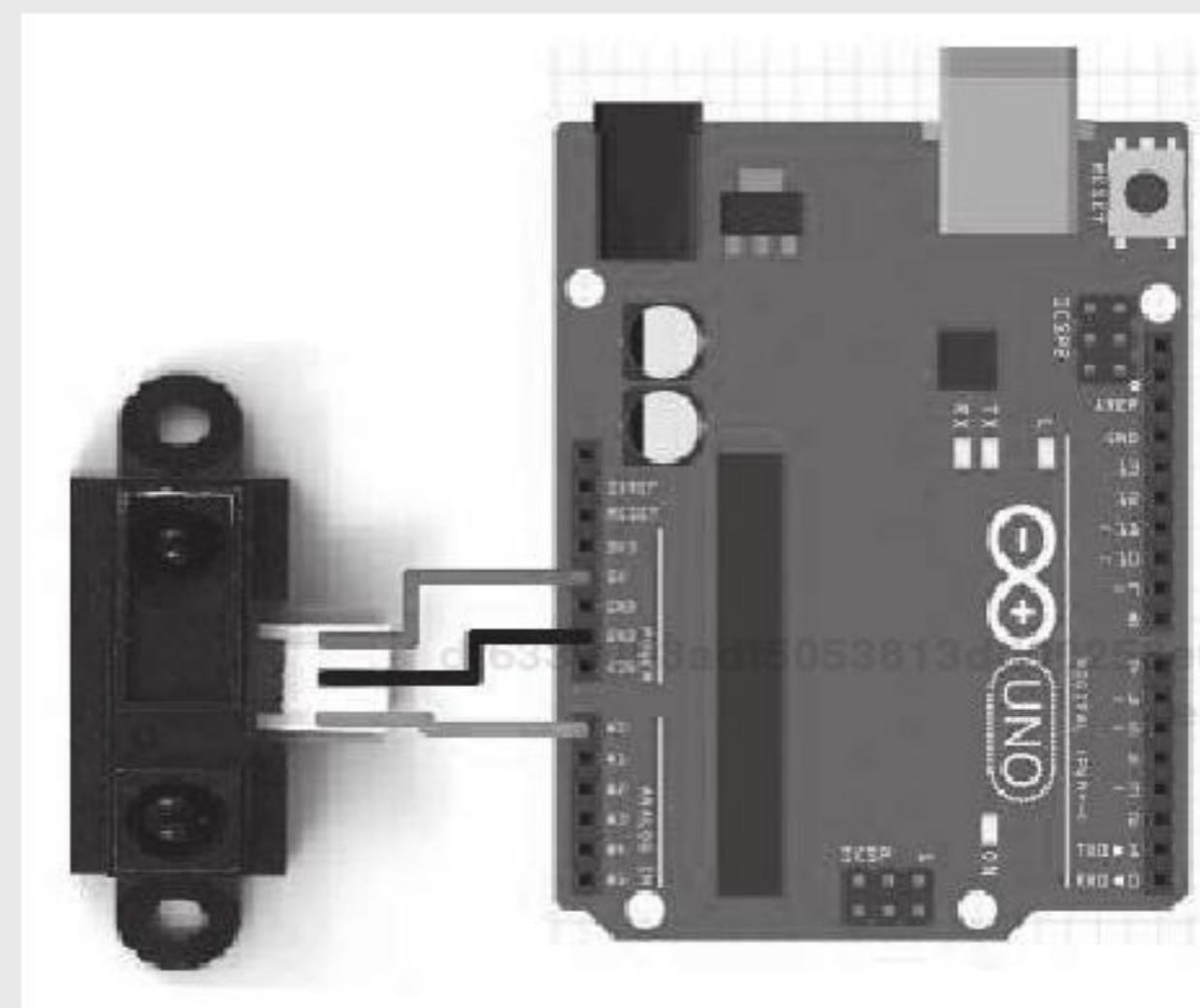


**Figura 4.24** Sensor Sharp 2Y0A02®.



**Figura 4.25** Curva distancia vs. Tensión del sensor Sharp 2Y0A02®.

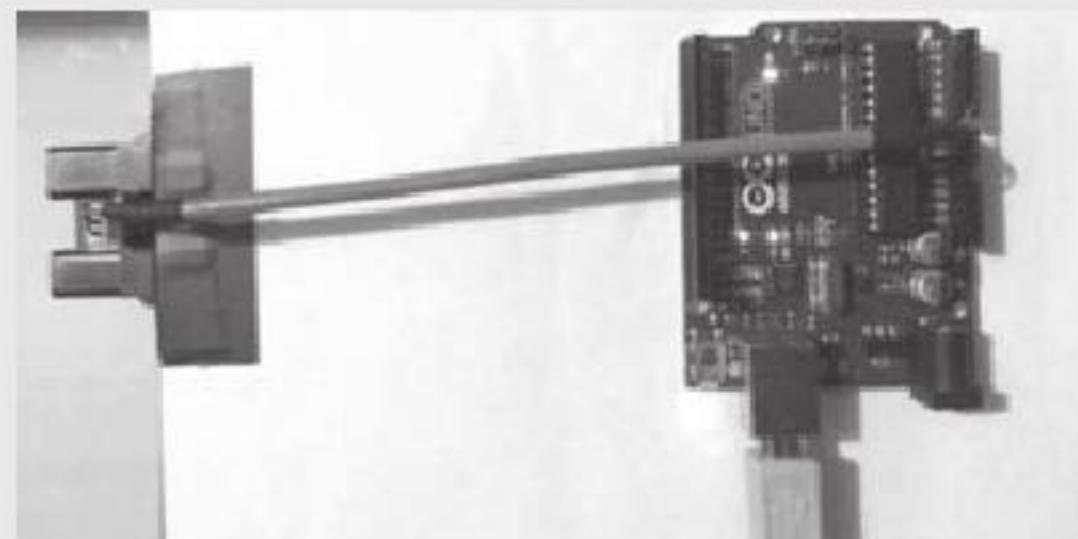
### Construcción del circuito



**Figura 4.26** Diagrama de conexión entre el sensor Sharp 2Y0A02® y el Arduino®.

La figura 4.26 muestra la forma de conexión entre el sensor y el Arduino®. La señal de salida se conecta al PIN analógico A0 del Arduino®, donde se realizará la conversión analógico-digital y el cálculo de la distancia en centímetros.

La figura 4.27 muestra el circuito físicamente montado.

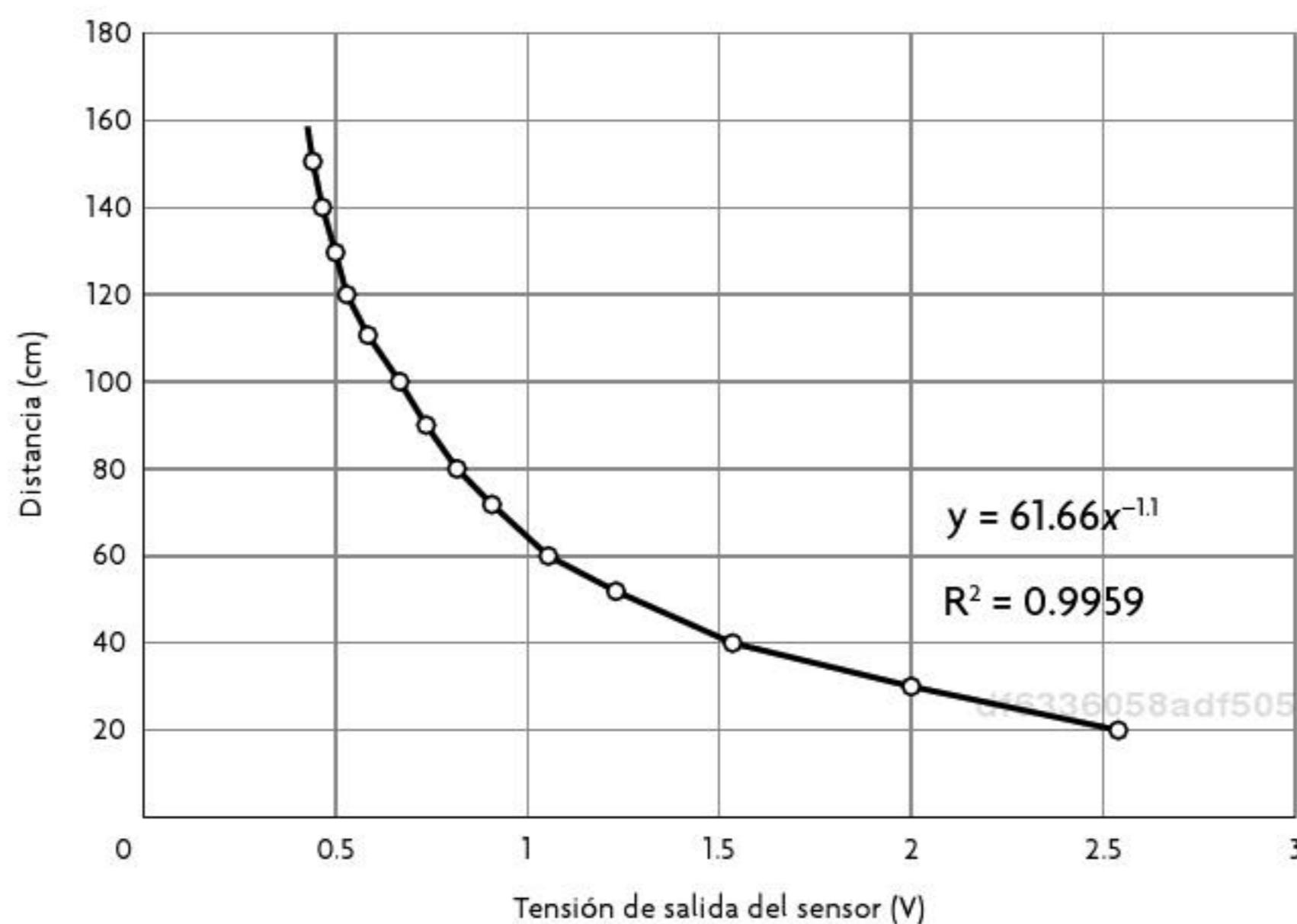


**Figura 4.27** Conexión entre el sensor y el Arduino®.

## 4.2 Ecuación de la curva distancia vs. tensión

La ecuación que caracteriza a la curva de la figura 4.25 se obtiene mediante una regresión no lineal. Para eso, con el uso de Excel se elabora una tabla con base en algunos puntos de la curva; después, se grafican y se aplica la regresión no lineal que nos ofrece una mayor correlación. Así, mediante una regresión polinómica con un coeficiente de determinación múltiple de 0.9959 (casi perfecto), la ecuación que describe al sensor es:

$$\text{Distancia} = 61.66 \times (\text{Tensión de salida del sensor})^{-1.1}$$



**Figura 4.28** Curva distancia vs. Tensión; sensor Sharp 2Y0A02®.

## Código

### Descripción del programa

El siguiente programa realiza la conversión analógico-digital de la señal del sensor y después efectúa el cálculo de la distancia mediante la ecuación de la curva tensión vs. distancia del Sharp 2Y0A02®.

```
*****Sensor optico medidor de distancia*****
/*
**SHARP 2AY0A02 es un sensor optico que mide la distancia a un objeto *
**dentro de un rango de 20 a 150 cm. La salida del sensor es una señal *
**analogica no lineal con respecto a la distancia del objeto. *
*/
*****El siguiente programa hace la lectura analogica del sensor y a partir*
//de una regresion no lineal de la curva distancia vs tension *
//caracteristica del sensor, se hara la conversion a centimetros. *
*****



//Declaramos las variables empleadas.
int readSensor;
float analogVol, dist;

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Iniciamos la comunicacion serie a 9600 baudios.
}

void loop()
{
    readSensor = analogRead(A0); //Lectura analogica del sensor.
    analogVol = 0.00488*readSensor; //Conversion a volts. La resolucion
        //del ADC del Arduino
        //es de 10 bits o 5V/1024 =
        //0.00488V/unidad.
    dist = 61.66*pow(analogVol, -1.1); //La ecuacion caracteristica del
    //sensor (obtenida a partir de la regresion no lineal de la curva) es:
    //Distancia = 61.66 (Tension de salida del sensor)^-1.1
```

```

Serial.print("Distancia: "); //Se imprime el valor de la distancia
    //del sensor al objeto.
Serial.print(dist);
Serial.println(" cm");
delay(15); //Regulamos la velocidad del programa.
}

```

### 4.3 LDR o fotorresistencias

Un sensor LDR (por sus siglas en inglés *Light Dependent Resistor*), por lo común llamado fotorresistencia, es un elemento resistivo cuya característica principal es que la magnitud de su resistencia,  $R_p$ , es una función de la luz incidente. Una fotorresistencia es un **transductor entre la luz incidente en este y la resistencia eléctrica** que presenta a la salida. Son sensores muy utilizados para controles de iluminación en sistemas de alumbrado, ya sea doméstico o público, como sensores auxiliares en sistemas fotográficos y pantallas, así como sensores de presencia, forma e incluso en configuraciones especiales, como sensores de color.

Este tipo de sensores son fabricados con materiales semiconductores sobre sustratos cerámicos. Al igual que todos los semiconductores, los materiales con los que están fabricadas las fotorresistencias presentan distintos mecanismos de excitación; por ejemplo, un semiconductor no solo genera pares electrón-hueco al ser conectado en un circuito cerrado que contiene una batería, sino que además estos pueden ser activados térmicamente o por medio de una radiación óptica. En un semiconductor, la cantidad de pares electrón-hueco libres para la conducción determina la conductividad de dicho material y, por tanto, varía la resistividad del mismo. Una fotorresistencia se basa en este último principio físico: al incidir una fuente de luz sobre el semiconductor, el número de pares electrón-hueco libres para la conducción aumenta, por lo que la resistividad del material se ve disminuida; si esta resistencia variable se conecta a una batería con un valor determinado, se tiene como resultado un cambio en la corriente eléctrica del circuito. Debido a que la variable física que suele medirse con este tipo de sensores es la radiación, se buscan materiales semiconductores que presenten comportamientos apropiados a temperatura ambiente, con el fin de reducir el ruido inducido en la señal debido a mecanismos de activación térmicos. Entre los semiconductores más utilizados para este tipo de sensores se encuentran el sulfuro de cadmio ( $\text{CdS}$ ) y el seleniuro de cadmio ( $\text{CdSe}$ ) (véase figura 4.29).

La principal diferencia de este tipo de sensor con el fotodiodo y el fototransistor es que no se genera una corriente fotoinducida, sino que se aprovecha el principio de variación de resistencia, derivado del cambio de conductividad en el material. En condiciones de baja iluminación, la resistencia del LDR es alta. A mayor iluminación, menor será la resistencia eléctrica que presenta, gracias al efecto **fotoeléctrico**; esto se puede explicar de la siguiente manera: por cada fotón incidente en el semiconductor, un *cuanto de energía*<sup>9</sup> es absorbido al liberar portadores que incrementan la facilidad del semiconductor para dejar pasar la corriente eléctrica. La sensitividad de una fotorresistencia está dada como la razón entre el número de electrones generados por cada fotón incidente:

$$b = \frac{\tau_n}{t_i}$$

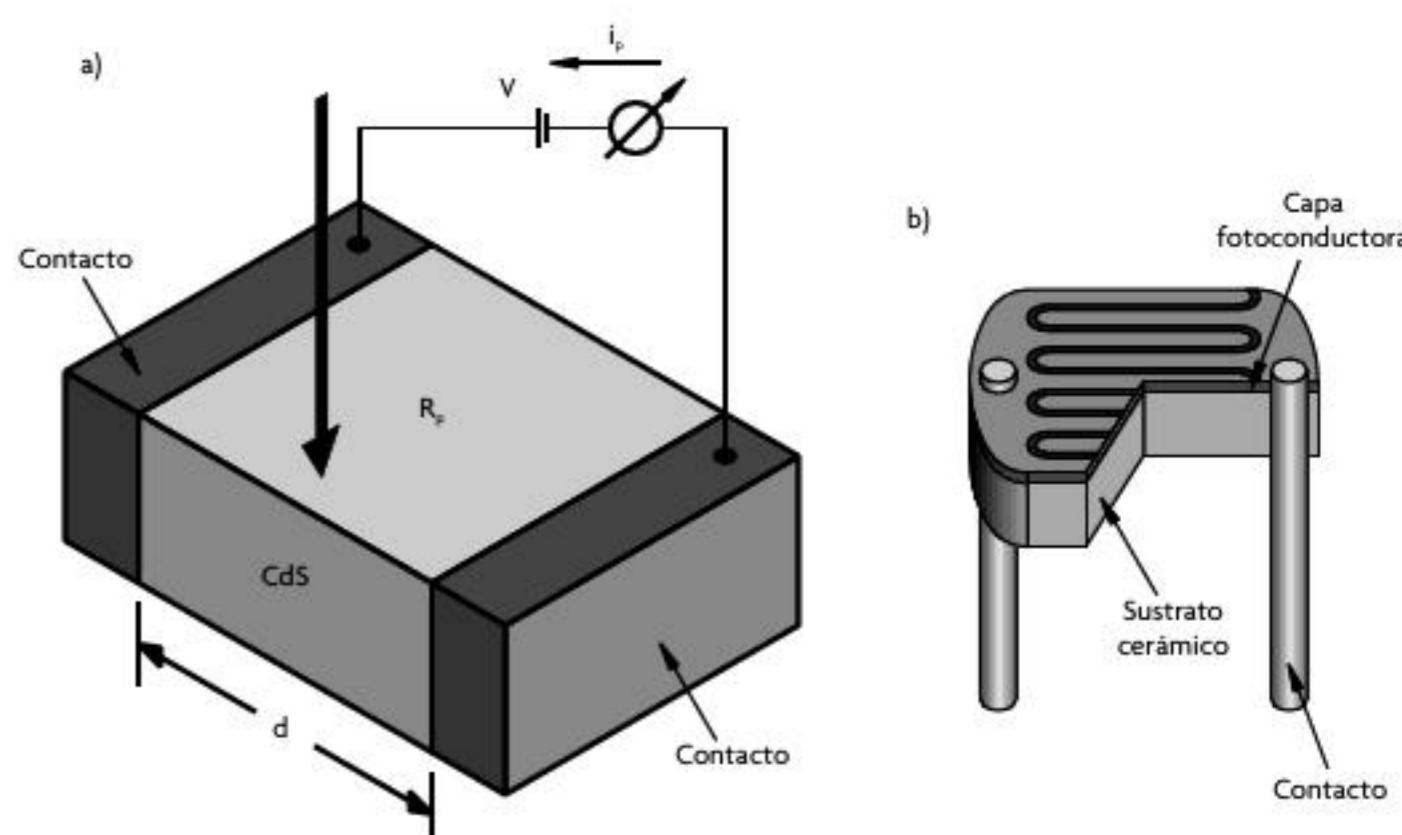


Figura 4.29 a) Estructura de una fotorresistencia. b) Fotorresistencia encapsulada, (presentación típica en el mercado).

<sup>9</sup> Salto que experimenta la energía de un corpúsculo cuando absorbe o emite radiación. Es proporcional a la frecuencia de esta última.

donde:

$b$ : sensitividad

$\tau_n$ : electrones libres para la conducción

$t_t$ : tiempo de tránsito de un electrón entre cada contacto [s]

El tiempo de tránsito de un electrón, para el caso de material tipo  $n$  (considérese que los portadores mayoritarios son electrones, por lo que el efecto de los huecos puede ignorarse), puede calcularse por medio de la ecuación:

$$t_t = \frac{d^2}{V\mu_n}$$

donde:

$d$ : distancia entre contactos

$V$ : voltaje aplicado [v]

$\mu_n$ : movilidad de un electrón

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

De las ecuaciones anteriores es posible deducir que entre menor distancia exista entre contacto y contacto, mayor será la sensitividad del sensor, y dado que se busca que el valor de voltaje aplicado no sea muy alto con fines de compatibilidad con aplicaciones de electrónica convencional, la manera óptima para lograr mayor sensitividad es con la forma de serpentina del sensor, ya que la distancia ( $d$ ) entre contacto y contacto es solo el grosor de la capa conductora, por lo que al aumentar el ancho del sensor también aumenta el número de pares electrón-hueco que puede generar.

Algunos de los símbolos electrónicos más utilizados para representar una fotorresistencia dentro de un circuito se muestran en la figura 4.30.

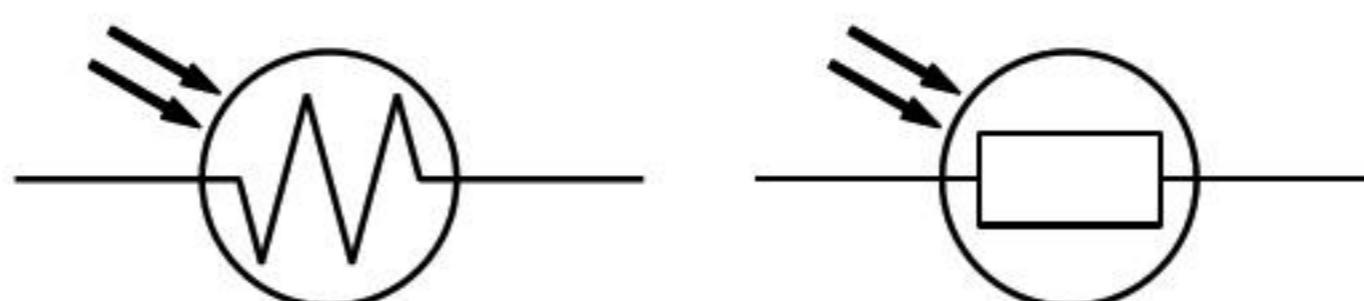


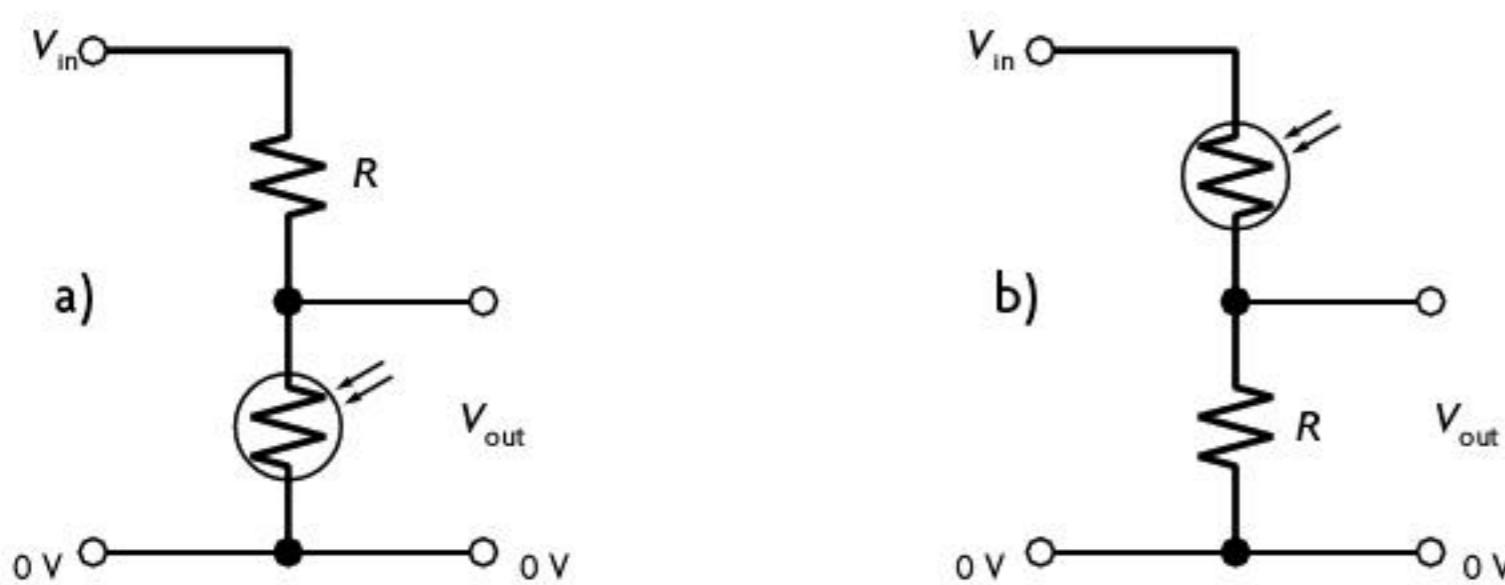
Figura 4.30 Símbolo electrónico de una fotorresistencia.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

Algunas de las principales desventajas de las fotorresistencias es que la relación entre la iluminación y el cambio de resistencia es altamente no lineal, presenta tiempos de subida (en ambiente iluminado) y tiempos de bajada (en ambiente no iluminado) distintos, además de que dichos tiempos dependen del nivel de iluminación.

Una de las configuraciones más comunes de las fotorresistencias es su uso dentro de un divisor de voltaje; en la figura 4.31 se muestran dos posibles conexiones.



En estos circuitos se muestra una fotorresistencia dispuesta de tal manera que forma un divisor de voltaje, con un voltaje de entrada,  $V_{in}$ , y una resistencia fija,  $R$ ; la diferencia entre estas configuraciones consiste en que para el caso del circuito a), cuando la luz incide sobre la fotorresistencia, el voltaje que cae sobre la resistencia fija se ve disminuido al aumentar el valor de  $V_{out}$ , mientras que para el circuito b), cuando se hace incidir luz sobre la fotorresistencia, el voltaje  $V_{out}$  se ve disminuido.

Figura 4.31 Divisor de voltaje usando una fotorresistencia.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## Ejercicio de aplicación

### Medidor de intensidad luminosa usando un LDR

#### Objetivo

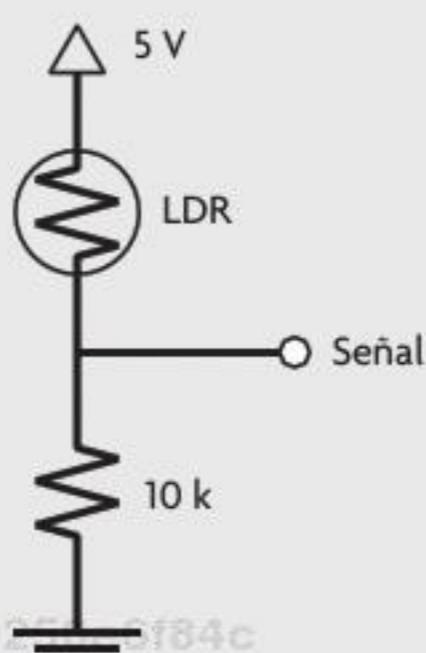
Medir la intensidad luminosa en unidades lux (lx) usando un LDR (Light Dependent Resistor) y observar el resultado en el monitor serial.

#### Material

- Arduino IDE 1.0.5®
- Arduino Uno R3®
- 1 LDR de 2 MΩ
- 1 Resistencia de 10 kΩ
- 3 cables macho-macho Dupont®
- 5 cm de cable 24 AWG
- Protoboard

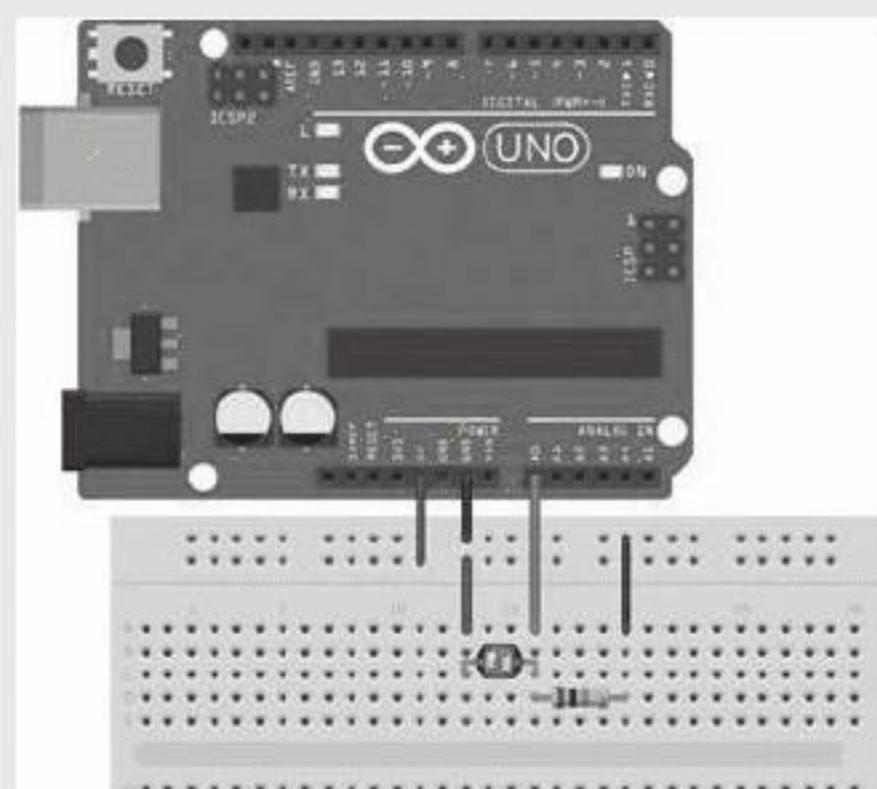
#### Desarrollo

1. Armar el circuito como se indica en el diagrama. La señal se conecta al pin A0 del Arduino Uno®.



**Figura 4.32** Diagrama.

2. El circuito armado debe ser similar al que se muestra en la figura 4.33.



**Figura 4.33** Circuito armado.

3. Analizar e implementar el siguiente código en el Arduino Uno®.

```
/*
INTENSIDAD LUMINOSA LDR

Este ejemplo utiliza un LDR para medir la
intensidad de la luz que incide sobre ella.
Usando la curva de la respuesta de la LDR a
la luz, se obtiene una ecuación con la que se
calcula su intensidad en lux (lx).

La medición se realiza usando un divisor de
voltaje con el LDR y una R conocida (10k ohms
en este ejemplo). El cambio de resistencia
provoca una variación en el divisor de voltaje.
Se calcula la resistencia del LDR y después la
intensidad.

Para más información, consultar:
http://www1.futureelectronics.com/doc/Lumex/
OED-PCC-9P5-1L.pdf

*/
// Biblioteca
#include<math.h> // Biblioteca con funciones
matemáticas.

// Pines
const int LDR = A0; // Pin sensor del LDR.

// Variables
int tension; // Señal del LDR.
float valorLDR; // Resistencia aproximada
del LDR.
float lux; // Intensidad de luz.

// Constantes
const float R = 10; // Valor de la resistencia
en serie en kilos.

void setup(){
    Serial.begin(9600); // Comunicación serie
    a 9600 baudios.
}

void loop(){
    tension = analogRead(LDR); // Lectura de
    la señal.
    valorLDR = ( (1023 * R) / tension) - R; ////
    Encuentra resistencia de LDR.
    lux = 800.69 * pow(valorLDR, -1.283); ////
    Calcula intensidad luminosa en lx

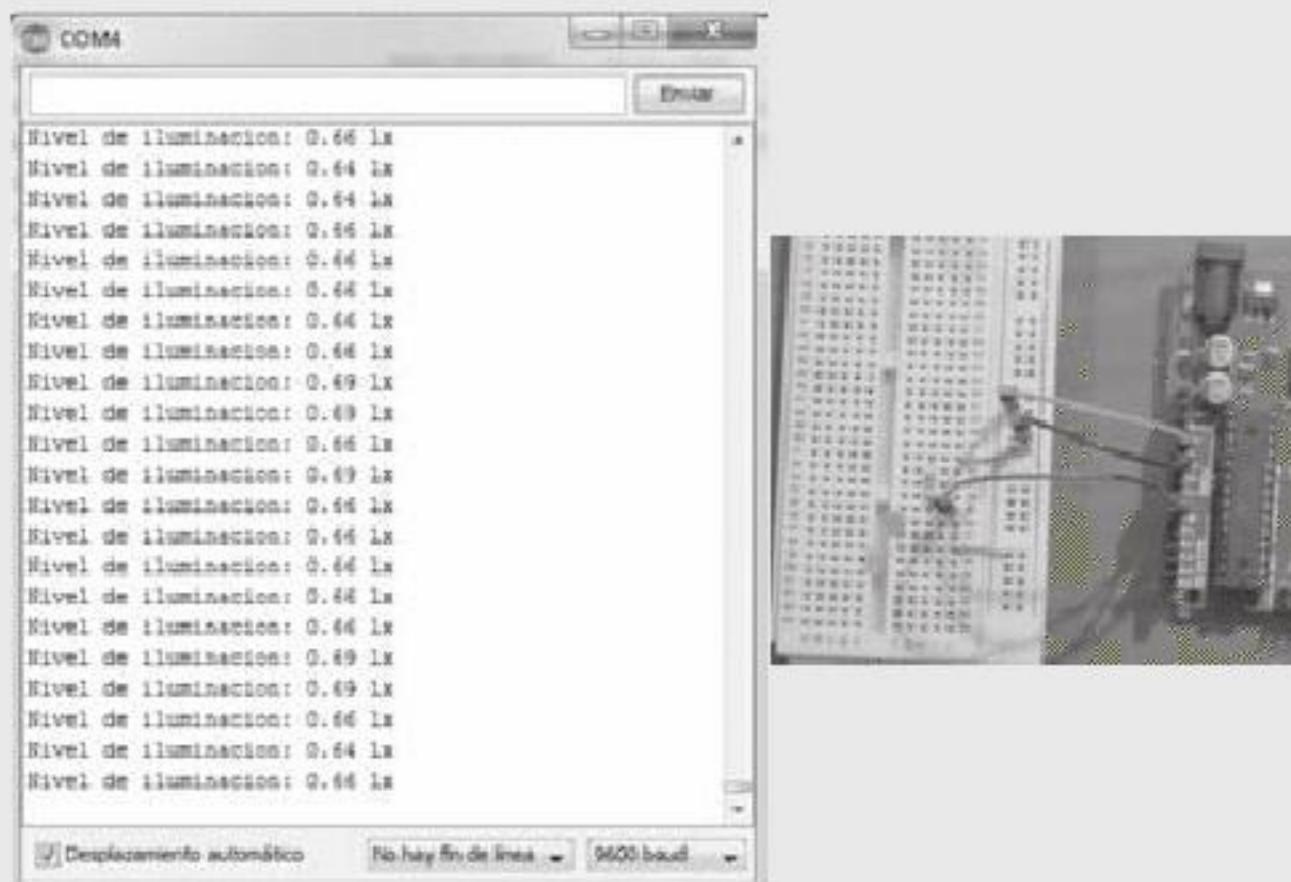
    // Envía información por serie al monitor
    serial
    Serial.print("Nivel de iluminación: ");
    Serial.print(lux);
}
```

```

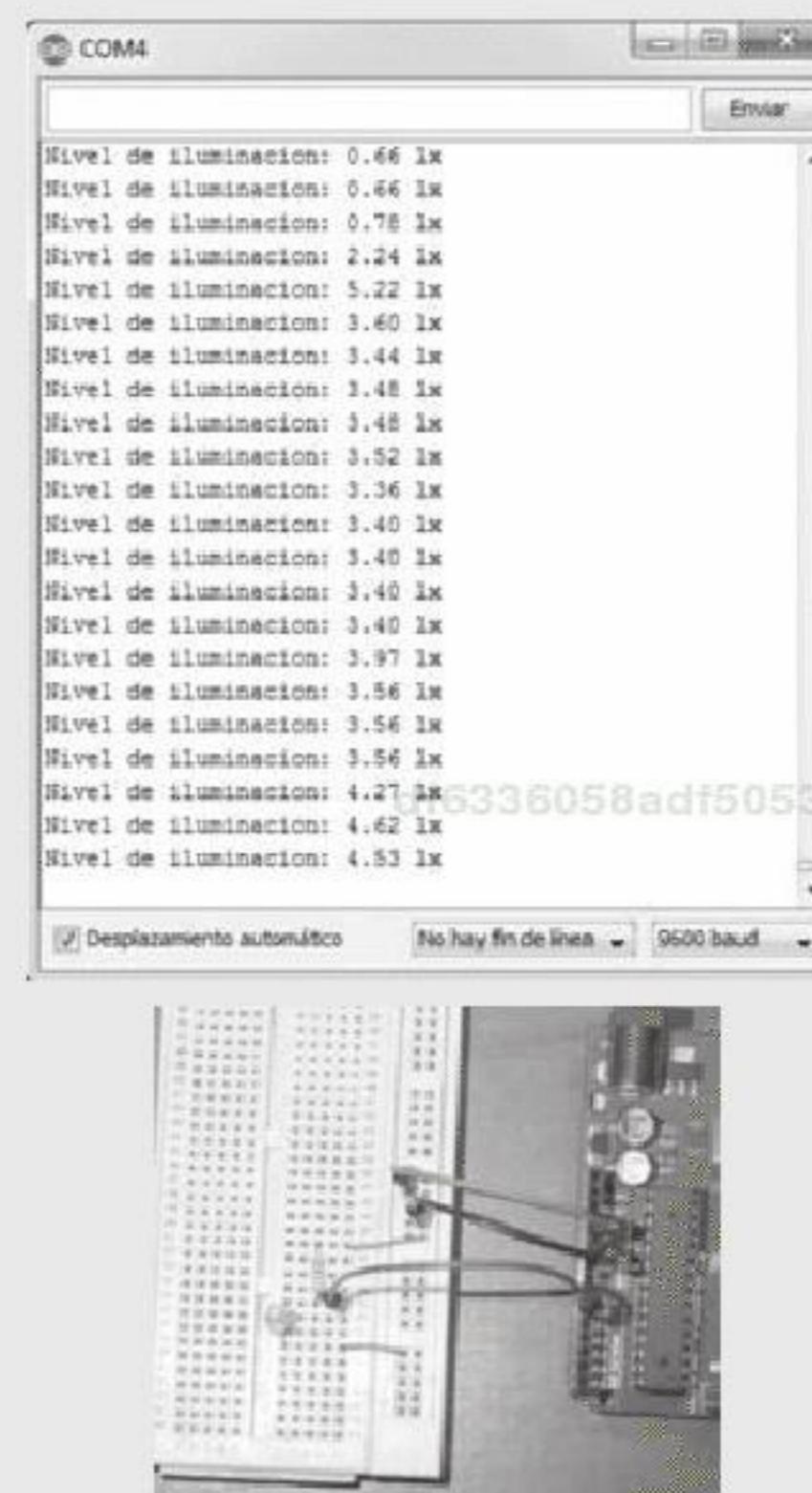
Serial.println(" lx");
delay(500); // Se mide cada 0.5 s
}

```

4. Comprobar el funcionamiento del circuito. Mediante el uso de una lámpara, hacer incidir luz en el LDR a diferentes intensidades y corroborar los cambios en el monitor serial de Arduino IDE®.
5. A continuación se muestran las imágenes con los resultados de la práctica finalizada.



**Figura 4.34** Medición de la intensidad luminosa con iluminación pobre al LDR.



**Figura 4.35** Medición de la intensidad luminosa aplicando luz variable al LDR.

## 4.4 Sensores de color

La mayoría de las personas ve los objetos en colores. Pero, ¿qué es el color? La Real Academia Española define al color como: *Sensación producida por los rayos luminosos que impresionan los órganos visuales y que depende de la longitud de onda*. El ojo humano es capaz de absorber determinadas longitudes de onda y rechazar otras que no está capacitado biológicamente para recibir. La longitud de onda reflejada en la superficie de un objeto es captada por el ojo e interpretada como un color determinado.

El color de un objeto es producto de la capacidad del material del cual está hecho para absorber la luz. Por ejemplo, un objeto que es por completo negro<sup>10</sup> debe tener la capacidad de absorber todas las longitudes de onda del espectro visible; por tanto, un objeto así no podría ser percibido por el ojo humano. Por otro lado, si el objeto tiene un color particular, este corresponde a la composición de colores correspondientes a las ondas reflejadas en dicho color. Por ejemplo, si observamos un objeto azul, se puede decir que este absorbe todas las longitudes de onda del espectro visible, excepto la longitud de onda que corresponde al color azul, ya que esta es reflejada y percibida por la retina (véase figura 4.39).

<sup>10</sup> En este caso se habla de objetos negros desde el punto de vista de la física; los objetos negros convencionales, como una llanta, se consideran objetos opacos. Debido a que los objetos opacos reflejan una fracción de la luz que incide sobre ellos, nuestros ojos pueden percibirlos.

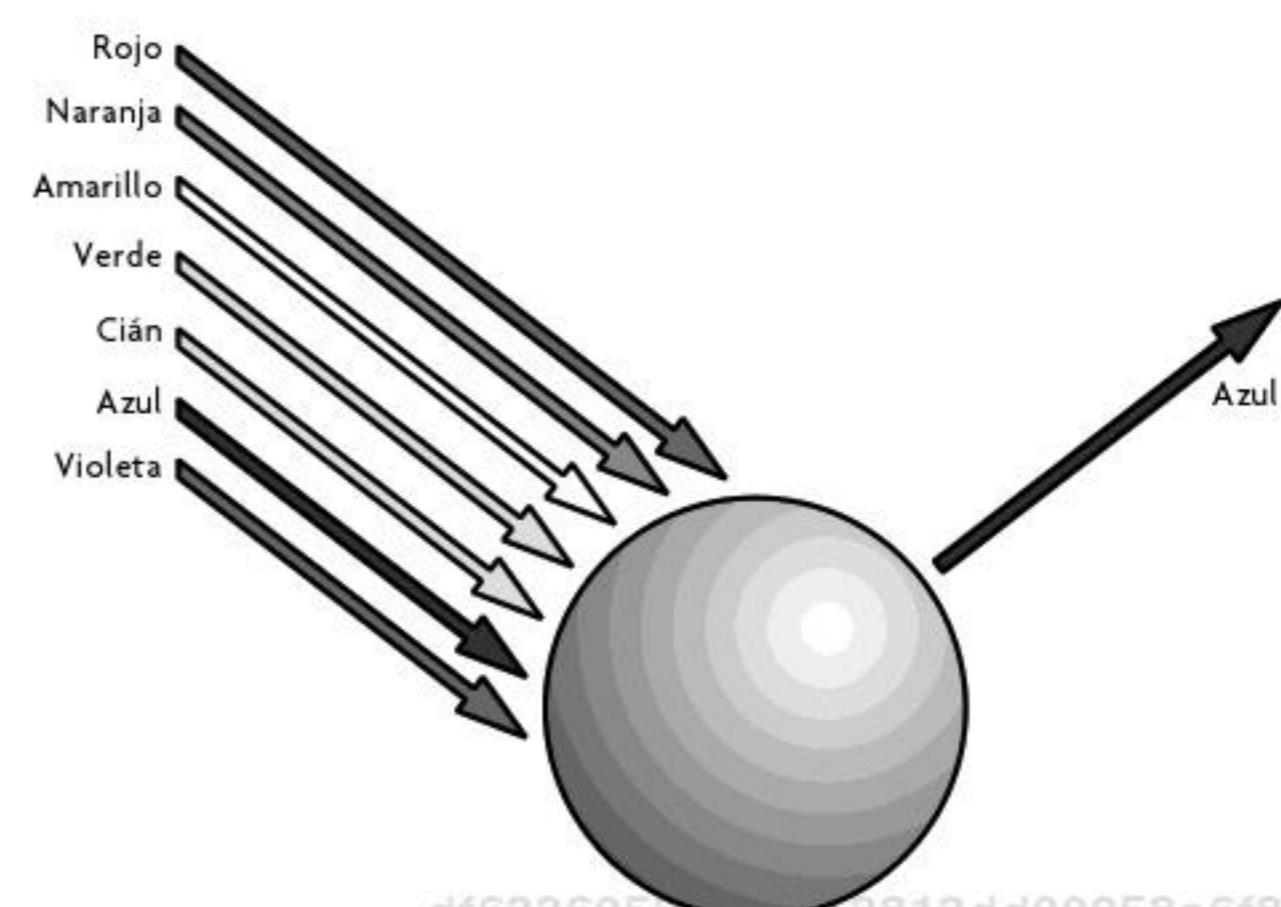
Los sensores de color tienen aplicaciones muy comunes en el ámbito de ajuste de color en impresiones, sistemas de control basados en el color de los objetos, juguetes y videojuegos, entre otros. Estos sensores tienen dos vertientes básicas: una basada en el uso de filtros de color y la otra en la irradiación de luz y cómo esta se refleja en el objeto a detectar. Ambas manejan componentes de color básicos; en este caso, rojo, verde y azul, conocido como componente RGB o espacio de color RGB (por sus siglas en inglés Red-Green-Blue).

### Sensores de color basados en filtros

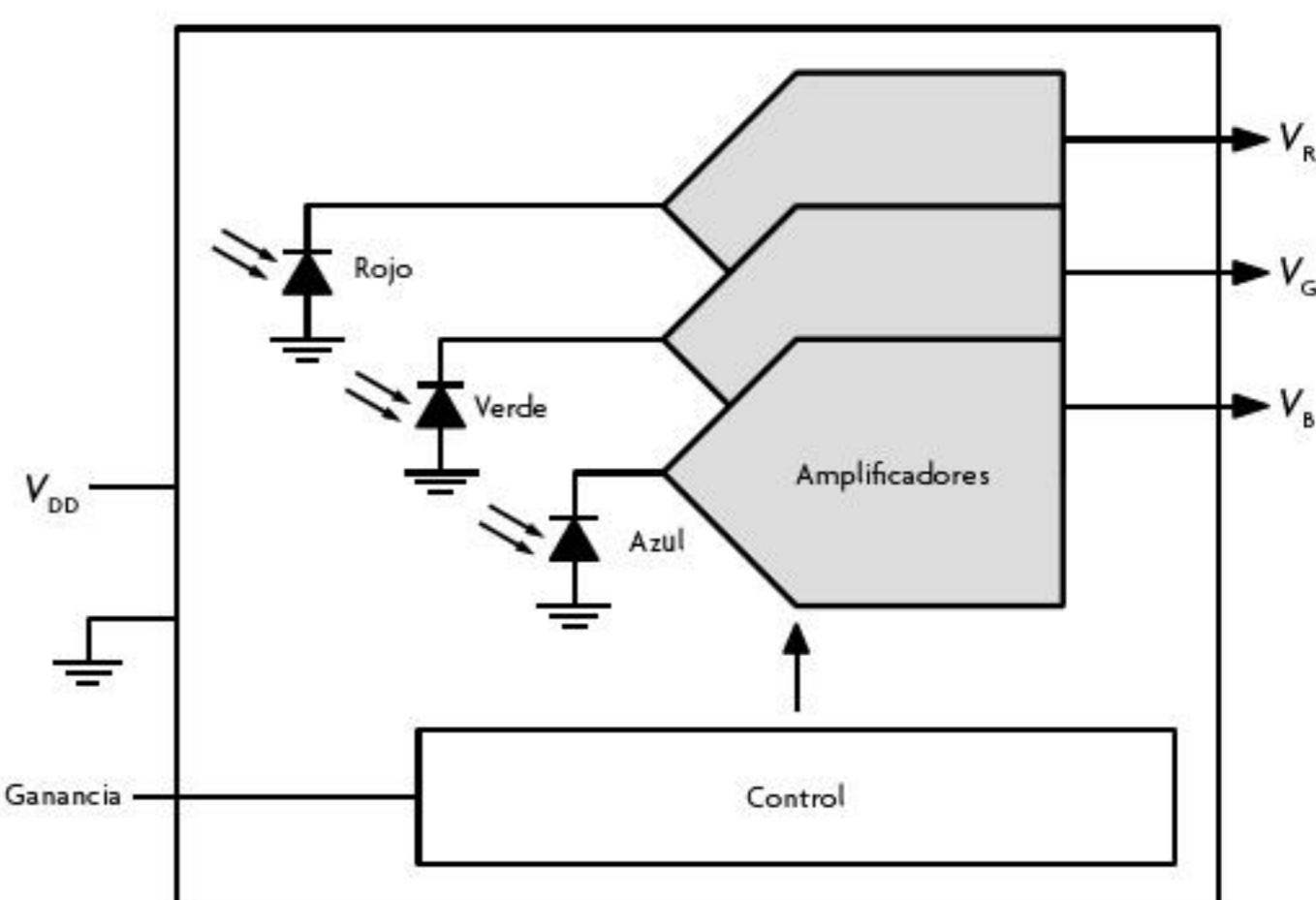
Este tipo de sensores proporciona una salida en voltaje directamente proporcional a la irradiación, al ser lineales por completo. Consiste en un grupo de tres fotodiodos, cada uno con un filtro de color: rojo, verde y azul. La salida de cada canal corresponde a la irradiación en cada uno de los fotodiodos. En general, incluyen un pin adicional que permite ajustar la ganancia en los amplificadores para cambiar la sensitividad del sensor (véase figura 4.37).

En este tipo de sensores, la fuente de luz es independiente del sensor; esto significa que no cuenta con una fuente de luz intrínseca. La cantidad de luz presente en el sistema es una característica del ambiente; por esa razón la mayoría de los fabricantes incluyen el pin de ganancia, para ajustar o calibrar el sensor dependiendo de la luz presente. Una vez que el sensor se encuentre calibrado, la salida es leída mediante los voltajes correspondientes a los pines de salida. Por ejemplo, si delante del sensor se coloca un objeto de color azul, el voltaje presente en el pin  $V_B$  será mayor que el voltaje en los pines  $V_R$  y  $V_G$ . Por el contrario, si se coloca un objeto de color rojo, el pin correspondiente a  $V_R$  tendrá un voltaje mayor que los otros dos. Ahora bien, si un objeto con un color distinto a los primarios se coloca frente al sensor, se tendrá un voltaje en cada uno de los pines de salida ( $V_R$ ,  $V_G$ ,  $V_B$ ), en donde el voltaje mayor corresponderá al color con el que tenga mayor similitud.

Los filtros de color se basan en la idea de que un elemento de un color determinado absorberá todas las longitudes de onda, excepto aquella que corresponde al color del objeto. Así, al colocar una película transparente roja sobre el elemento fotosensible, este solo detecta el color rojo, ya que la película o filtro de color se encarga de absorber el resto de los componentes de color y solo refleja las correspondientes al rojo, ya que de otra manera el elemento fotosensible estaría estimulado por todos los colores presentes en la luz blanca.<sup>11</sup> Debido a que en la naturaleza percibimos los colores en distintas tonalidades e intensidades, los filtros de color también permiten la emisión de distintas tonalidades; por ejemplo, un filtro rojo deja pasar los colores correspondientes al mismo rojo y colores similares, como el naranja; un filtro verde deja pasar el verde y colores similares, como el amarillo; un filtro azul deja pasar colores correspondiente a la gama de azules, entre los cuales se encuentra el color cian (véase figura 4.38).

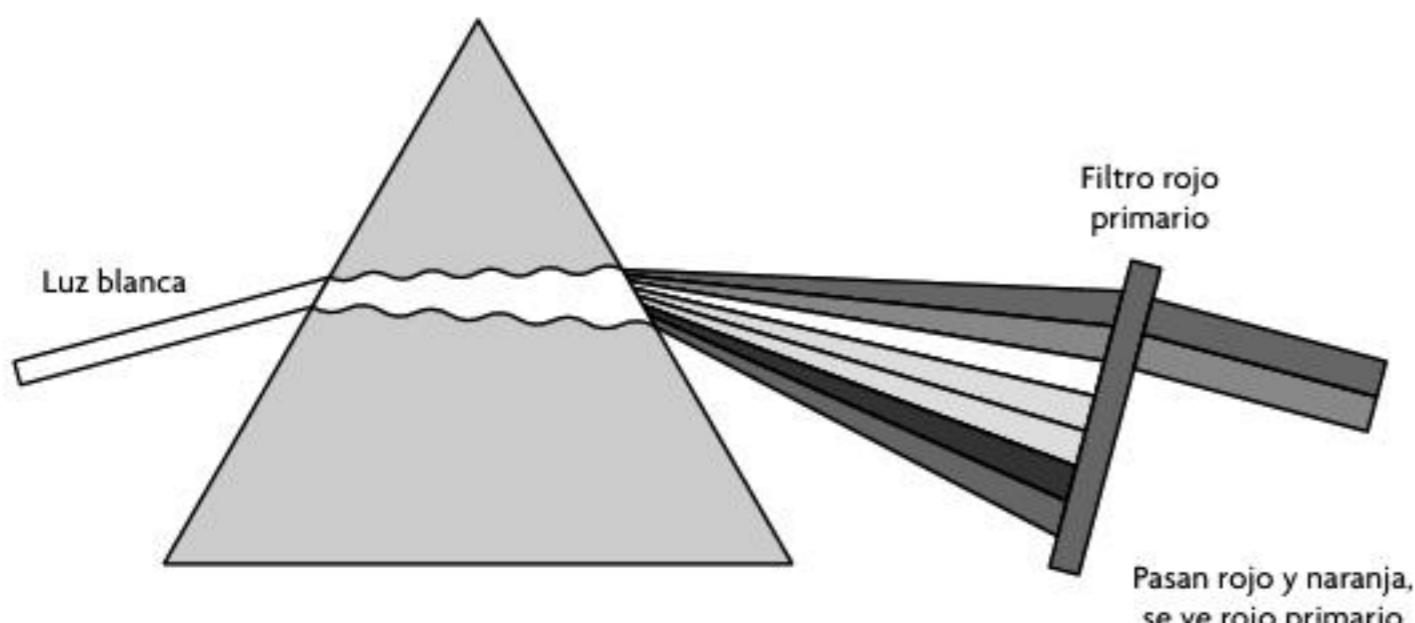
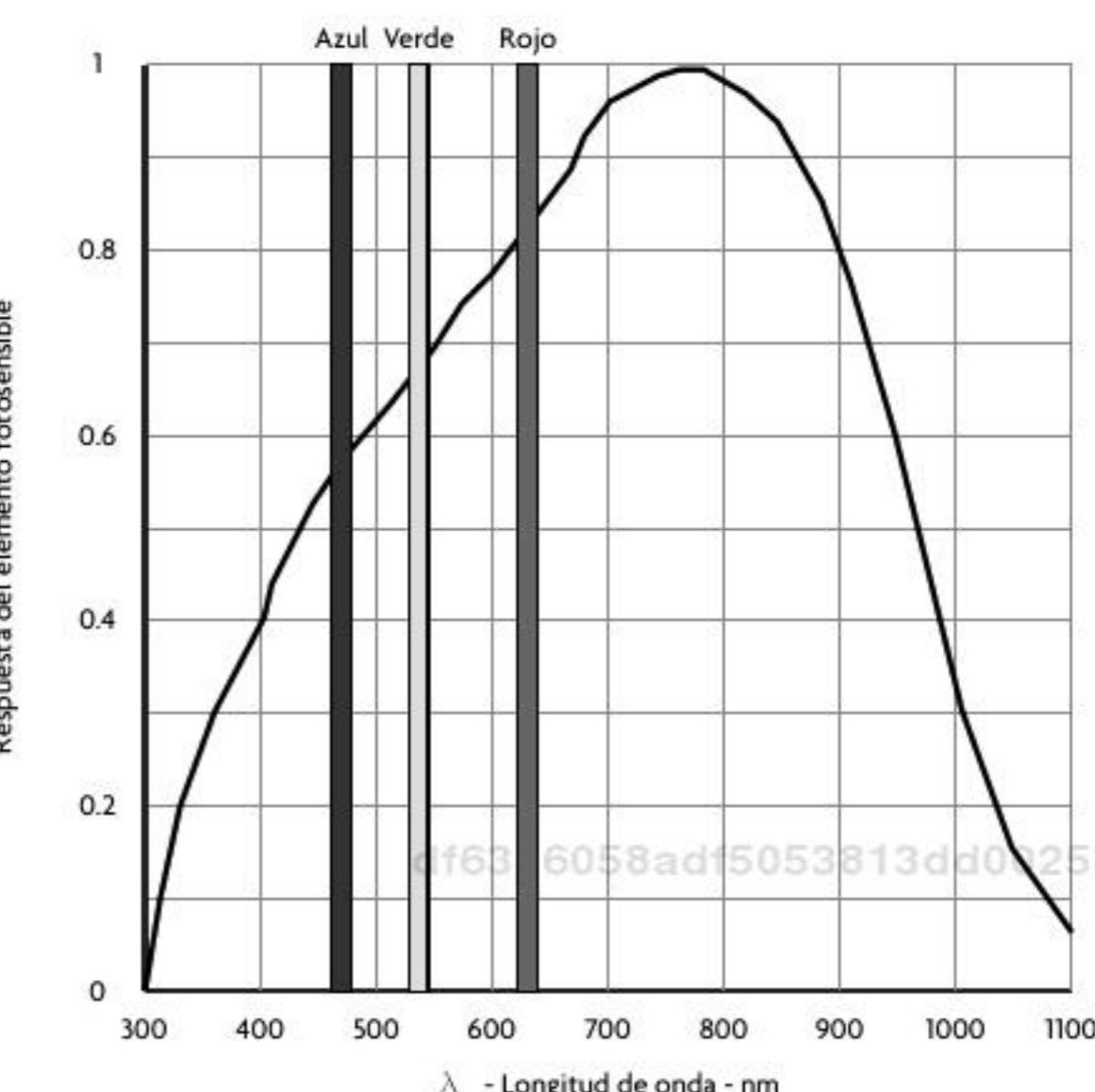


**Figura 4.36** Absorción-reflexión de un objeto azul.



**Figura 4.37** Sensor de color basado en el uso de filtros.

<sup>11</sup> La luz blanca se considera como la fracción del espectro electromagnético que corresponde a la luz visible. df6336058adf5053813dd00258e6f84c ebrary

**Figura 4.38** Filtro de color.**Figura 4.39** Respuesta ante el color del elemento fotosensible.

## Sensores de color basados en la irradiación de una fuente de color fija

Estos sensores se distinguen de los sensores basados en filtros de color en que la fuente de luz forma parte del sensor. Este tipo de sensores se basa en la siguiente idea: si se hace incidir una fuente de luz roja sobre una manzana roja, esta irradiará la luz de una forma mucho más intensa que si esta misma fuente de luz se hace incidir sobre una manzana verde, debido a que su superficie es del mismo color que la fuente de luz.

Estos sensores cuentan con una fuente de luz roja, una verde y una azul, compactadas en un LED RGB o tres LED por separado (rojo, verde y azul); el objeto es colocado frente al sensor y este emite la fuente de luz, una a la vez. Los sensores tienen un elemento fotosensible que mide la intensidad de la luz reflejada por el objeto; así, si se coloca un objeto verde frente al sensor, al incidir la luz roja o la luz azul, la medición registrará un valor bajo de irradiación, mientras que al incidir la luz verde el valor de irradiación será alto, determinando de esta forma que el objeto es de color verde.

Para eliminar ruido de la luz ambiental, se suele tomar una medición con fuente de "luz negra" y otra medición con fuente de "luz blanca"; estas mediciones sirven para calibrar el sensor. La medición con fuente de luz negra corresponde al valor más bajo que es capaz de percibir el sensor, mientras que la medición con luz blanca corresponde al mayor estímulo que es capaz de percibir el sensor. Otra importante variable es el tipo de encapsulado que tiene el sensor, debido a que al tener carcasa más o menos brillantes, la luz se reflejará de forma distinta. Una desventaja de este tipo de sensores es que cuentan con un solo elemento fotosensible, y este debe ser calibrado para cada emisión de color, debido a que cada color primario excita de manera distinta al sensor (véase figura 4.42).

Para lograr una medición con la menor cantidad de ruido es recomendable obtener el valor de componente de color de manera porcentual como sigue:

$$P_R = 100(M_R - N_R) / (B_R - N_R)$$

$$P_G = 100(M_G - N_G) / (B_G - N_G)$$

$$P_B = 100(M_B - N_B) / (B_B - N_B)$$

donde:

$P_R, P_G, P_B$ : porcentaje de rojo, verde o azul, respectivamente.

$M_R, M_G, M_B$ : medición sin corrección de rojo, verde o azul, respectivamente.

$N_R, N_G, N_B$ : medición con fuente de "luz negra" para el rojo, verde o azul, respectivamente.

$B_R, B_G, B_B$ : medición con fuente de "luz blanca" para el rojo, verde o azul, respectivamente.

## Ejercicio de aplicación

### Uso de un sensor de color en RGB

#### Objetivo

Obtener el porcentaje de color de un objeto en componentes RGB.

#### Material

- Sensor de color HDJD-S822-QR999®
- Arduino Uno®
- 12 cables de conexión

#### Desarrollo

El sensor está compuesto por un arreglo de fotodiodos y filtros para los colores rojo, verde y azul; por tanto, este convierte la luz a voltaje hacia salidas analógicas denotadas como  $V_R, V_G, V_A$ .

La detección de color se realiza al hacer la lectura de las tres salidas analógicas del sensor; la ganancia se configura tanto para el color rojo como para el verde y el azul, colocando sus selectores en '00'.

El sensor dispuesto en la placa tiene la configuración que se muestra en la figura 4.40.

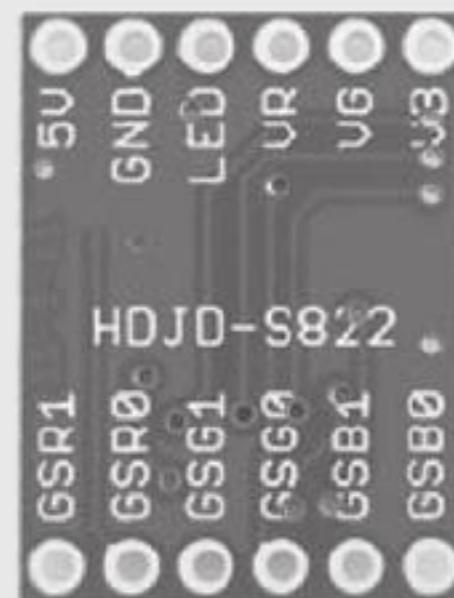


Figura 4.40 Sensor de color HDJD-S822.

Con base en los datos de la tabla 4.1 para la configuración de ganancia '00' en los tres colores, se hace la conversión del voltaje medido a su equivalencia en irradiancia; por ejemplo, para el color rojo, su irradiación detectada en  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  sería equivalente a:

$$I_R = 1000 \times (V_R / 2.73)$$

Debido a que el voltaje será medido por los convertidores analógicos digitales de la tarjeta Arduino®, es necesario hacer la igualdad en su valor analógico considerando que el ADC es de 10 bits:

$$V_B = \text{ADC}_B \times \left( \frac{5}{1023} \right)$$

Por tanto, la irradiancia quedaría como:

$$I_B = \text{ADC}_B \times \frac{1000(5)}{1023(2.73)} [\mu\text{W} / \text{cm}^2]$$

Los pines que deberán conectarse son los siguientes:

- 5 V: deberá ir a la alimentación de 5 V
- GND: deberá conectarse a la tierra común del Arduino®
- LED: Al pin 13 del Arduino®
- VR: A la entrada analógica A0 del Arduino®
- VG: A la entrada analógica A0 del Arduino®
- VB: A la entrada analógica A0 del Arduino®
- GSB0: Al pin 7 del Arduino®
- GSB1: Al pin 8 del Arduino®
- GSG0: Al pin 9 del Arduino®
- GSG1: Al pin 10 del Arduino®
- GSR0: Al pin 11 del Arduino®
- GSR1: Al pin 12 del Arduino®

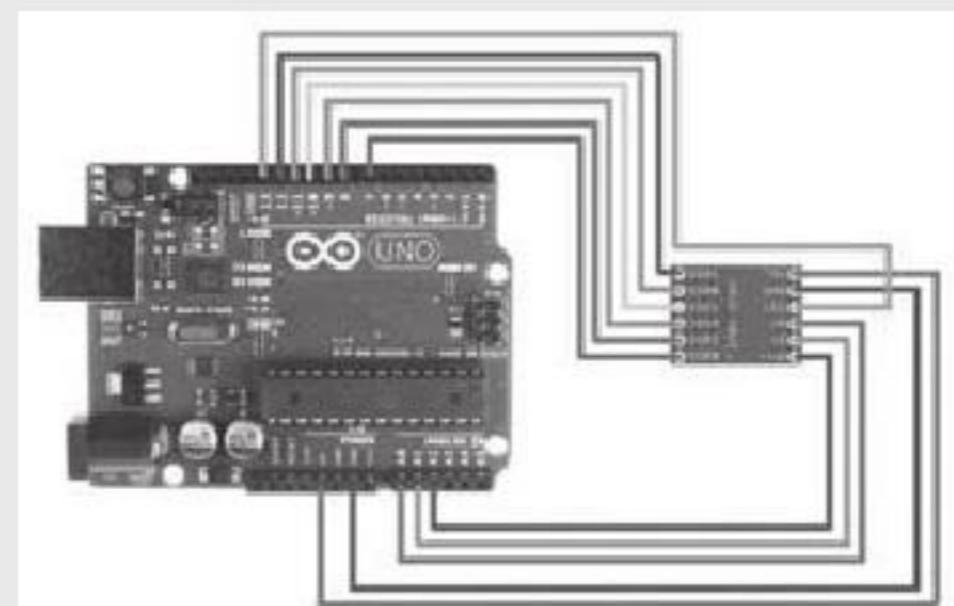


Figura 4.41 Conexión con Arduino®.

Parámetro	Símbolo	Componente de color	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Respuesta a la irradiancia	Re	Azul		1.54		
		Verde		2.05		
		Rojo		2.73		

Tabla 4.1 Equivalencia irradiancia-voltaje

```
//Código

const int ledPin = 13;
const int GSR1 = 12;
const int GSR0 = 11;
const int GSG1 = 10;
const int GSG0 = 9;
const int GSB1 = 8;
const int GSBO = 7;

int redPin = A0;
int greenPin = A1;
int bluePin = A2;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

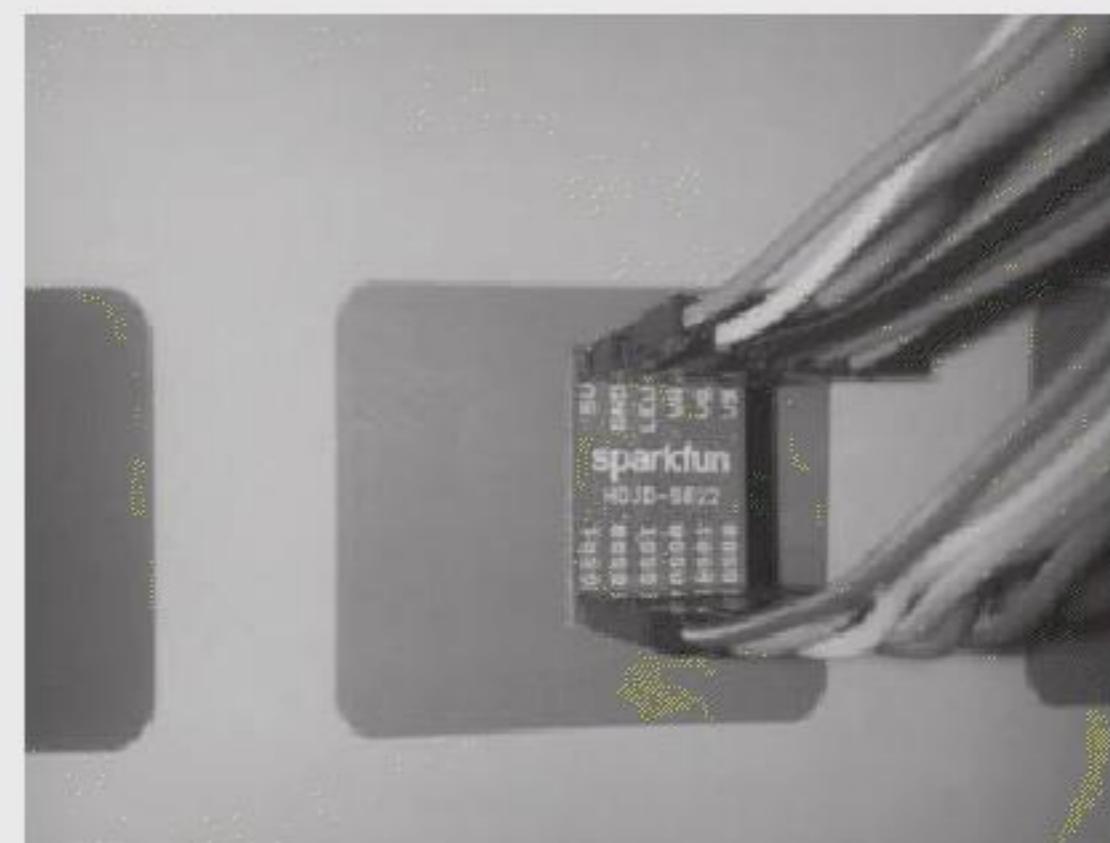
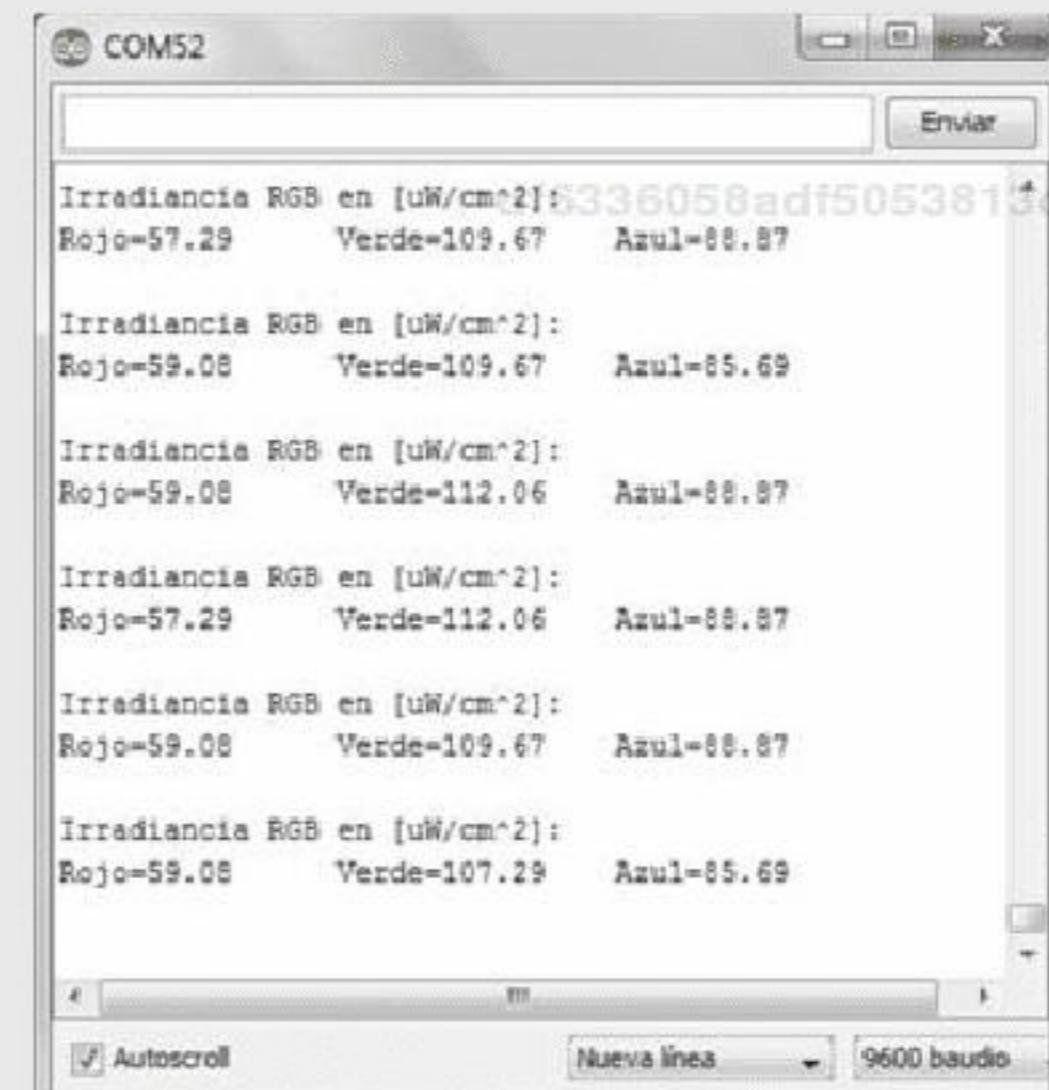
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(GSR1, OUTPUT);
  pinMode(GSR0, OUTPUT);
  pinMode(GSG1, OUTPUT);
  pinMode(GSG0, OUTPUT);
  pinMode(GSB1, OUTPUT);
  pinMode(GSBO, OUTPUT);

  // Se enciende el LED
  digitalWrite(ledPin, HIGH);

  // Se configura la ganancia de cada sensor
  digitalWrite(GSR1, LOW);
  digitalWrite(GSR0, LOW);
  digitalWrite(GSG1, LOW);
  digitalWrite(GSG0, LOW);
  digitalWrite(GSB1, LOW);
  digitalWrite(GSBO, LOW);
}

void loop()
{
  float r, g, b;
  //Se hace la lectura para el color rojo, verde y
  azul,
  //la lectura del ADC se escala al valor de
  irradiancia
  //basandose en la ganancia configurada
  r = (float)analogRead(redPin)*5*1000/
  (1023*2.73);
  g = (float)analogRead(greenPin)*5*1000/
  (1023*2.05);
  b = (float)analogRead(bluePin)*5*1000/
  (1023*1.54);
}
```

```
//Los datos se imprimen en el monitor serial
Serial.println("Irradiancia RGB en [uW/cm^2]:");
Serial.print("Rojo=");
Serial.print(r);
Serial.print("\tVerde=");
Serial.print(g);
Serial.print("\tAzul=");
Serial.println(b);
Serial.println();
delay(500);
}
```



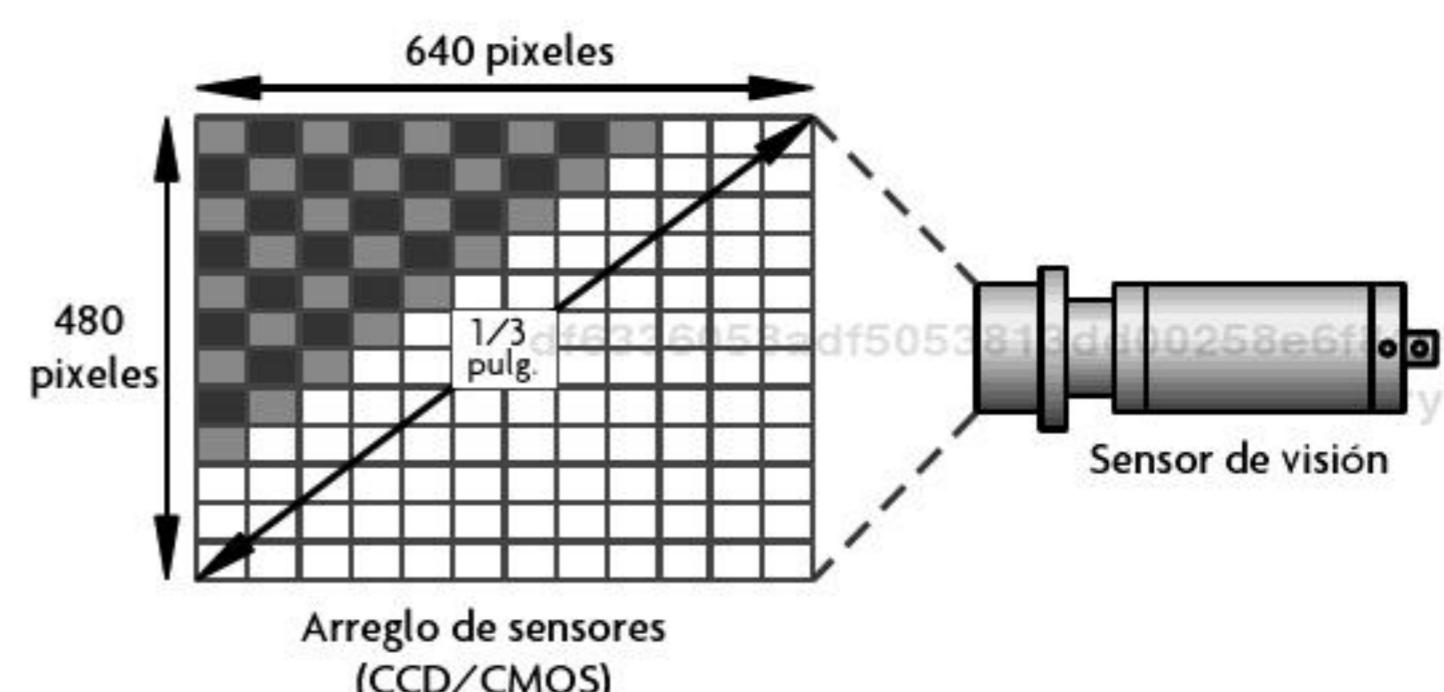
**Figura 4.42** Medición de color verde.

## 4.5 Sensores de visión

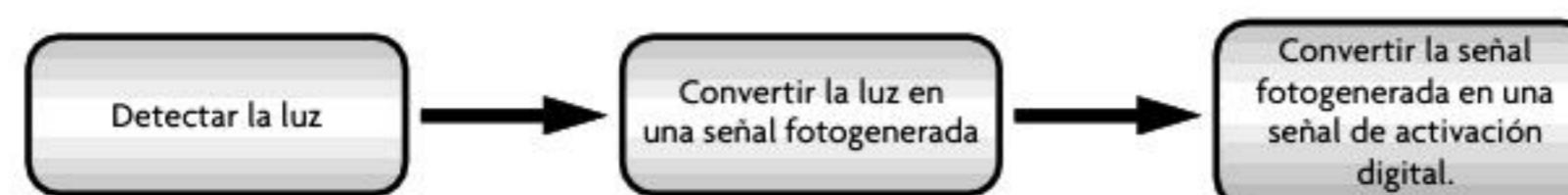
Los sensores de visión, también llamados *chips de visión*, son sensores avanzados (en general cámaras) encargados de obtener información del medio a través de la captura de imágenes o video, para su posterior procesamiento; por ejemplo, segmentación de algún color en específico, obtención de bordes, determinar la trayectoria de un objeto, reconocimiento facial, entre otros. Sus aplicaciones más comunes se encuentran en dispositivos como teléfonos móviles, automóviles, cámaras digitales, sistemas de seguridad, robótica auxiliada por visión artificial, etcétera.

Un sensor de visión es considerado un sensor inteligente, ya que está compuesto por una pluralidad de sensores, unidades encargadas de procesar la información que entrega esta pluralidad de sensores y convertirla en una serie de imágenes entendibles para el usuario. Estas imágenes pueden darse en color, en escala de grises, en monocromático, etcétera (véase figura 4.43). Además, estos cuentan con un protocolo específico de comunicación, como SPI, Serial, USB, entre muchos otros. Todas estas características dependen de la marca y el modelo del sensor de visión. No obstante, lo que tienen en común todos los sensores de visión es que forman imágenes, las cuales están compuestas por elementos llamados pixeles; a su vez, cada pixel es obtenido por una celda unitaria. A últimas fechas, estas celdas unitarias están conformadas por **sensores de estado sólido** basados en tecnología CMOS (*Complementary metal–oxide–semiconductor*), pues antes las celdas unitarias estaban integradas por sensores CCD (*charge coupled device*). Hoy día, los sensores CMOS han desplazado a la tecnología basada en sensores CCD debido a su facilidad de fabricación, ya que los sensores CMOS son compatibles con procesos de fabricación estándar, mientras que los sensores CCD requieren de un proceso tecnológico muy específico para su fabricación, lo que los hace más caros comparados con la tecnología CMOS. Otra gran ventaja de la tecnología CMOS es su facilidad para interactuar con señales digitales y analógicas en el mismo sustrato; esta ventaja no se presenta en los sensores CCD. Además, los sensores CMOS tienen un menor consumo de potencia. Otra gran ventaja es que, debido a que los sensores CMOS están fabricados dentro del mismo sustrato (es decir, dentro del mismo chip), los niveles de ruido en la electrónica asociada con su lectura son menores comparados con los sensores CCD. Debido a que los sensores con tecnología CMOS cuentan con circuitos que permiten hacer la lectura de los pixeles en paralelo, es decir, es posible realizar la lectura de más de un pixel a la vez, los tiempos de procesamiento son menores.

Sin importar qué tipo de sensor se utilice, ambos deben convertir la luz en carga eléctrica para su posterior procesamiento. Cada sensor de estado sólido tiene tres tareas básicas (véase figura 4.44).

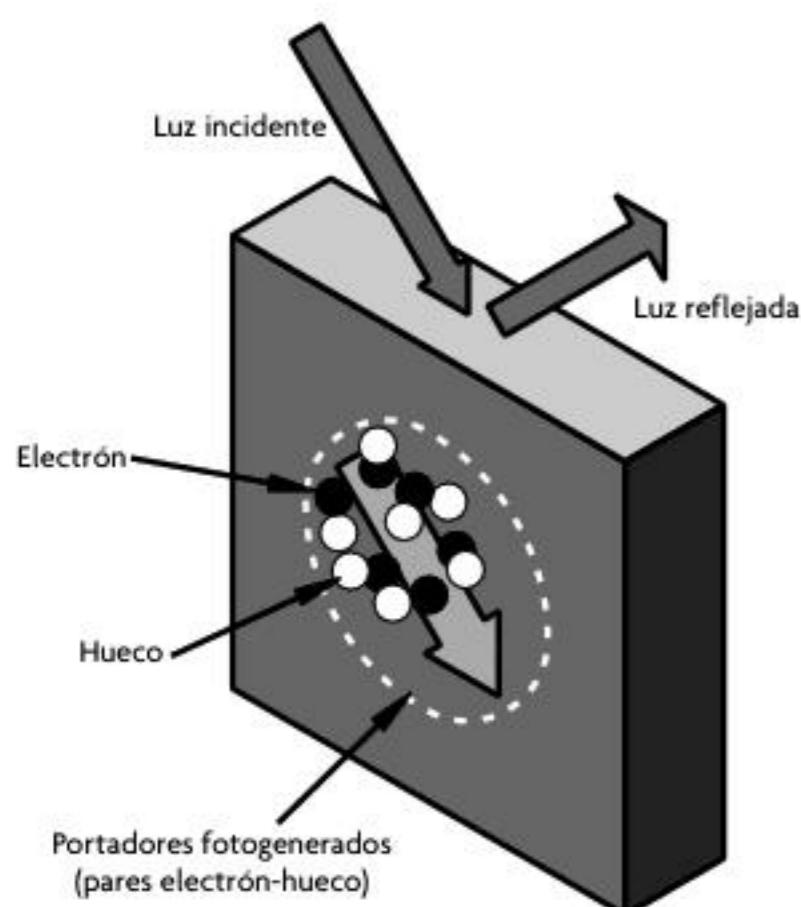


**Figura 4.43** Sensor de visión.



**Figura 4.44** Tareas realizadas por un sensor de visión.

Un chip de visión está conformado por un arreglo bidimensional de sensores de estado sólido que se encargan de obtener la luz del exterior, una línea de control de acceso vertical y una línea de acceso horizontal, para determinar qué pixel fue activado. Este arreglo bidimensional de sensores de estado sólido representa los pixeles en la cámara, donde cada pixel está formado por un elemento fotosensible y un circuito de lectura de la señal de salida que se encarga de leer el valor de un pixel XY específico.



**Figura 4.45** Pares electrón-hueco fotogenerados.

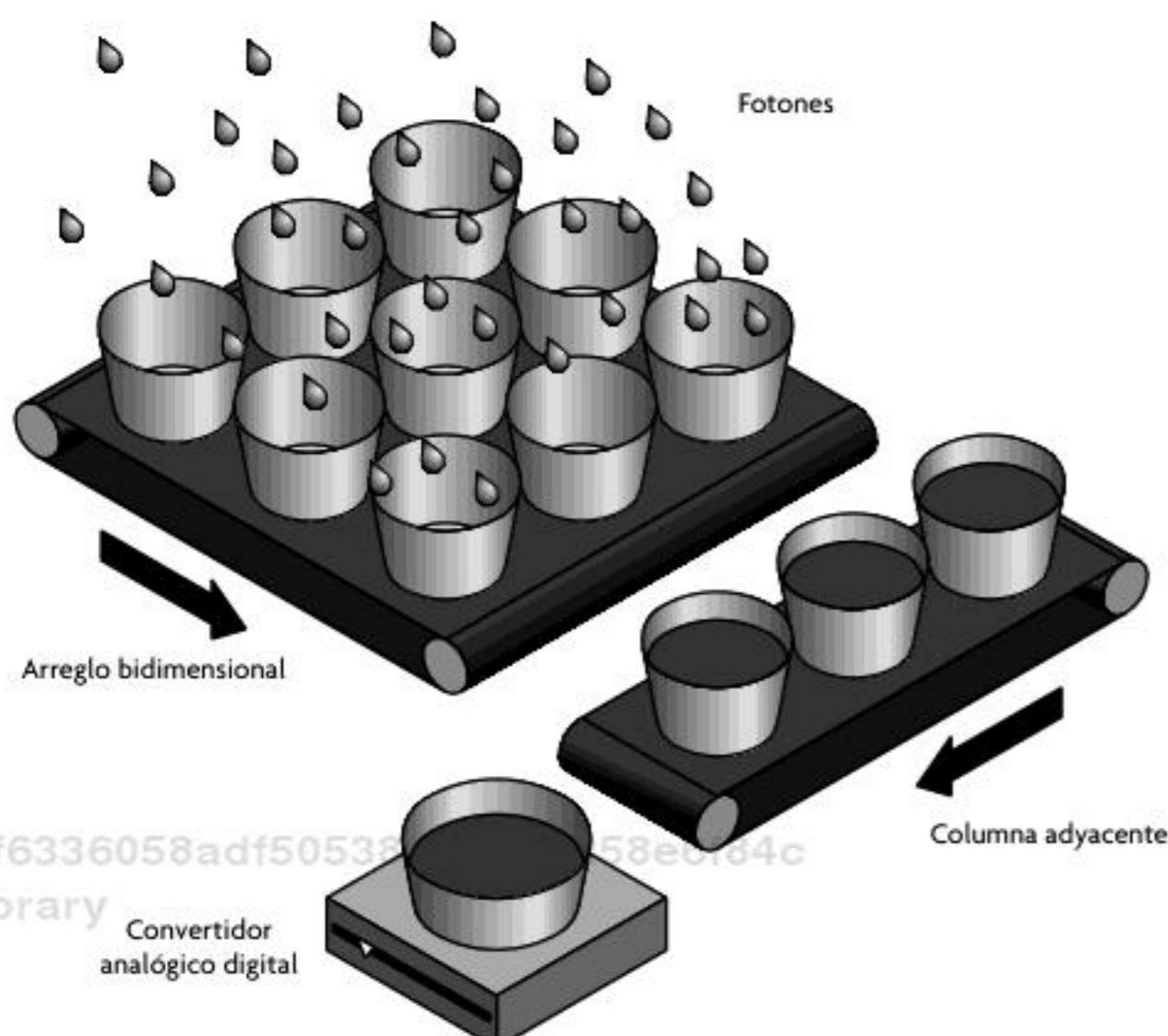
Cada vez que los sensores están expuestos a la luz, esta es captada y convertida por medio del efecto fotoeléctrico. Los portadores fotogenerados son creados, como ya se mencionó, en secciones anteriores; la luz proveniente del exterior es captada y convertida en pares electrón-hueco que se encargan de generar una señal eléctrica en el semiconductor que compone al elemento fotosensible. La calidad de la imagen generada por el sensor de visión depende de cómo actúa el efecto fotoeléctrico en esta, ya que estos elementos representan el corazón de la cámara (véase figura 4.45).

### Sensores CCD

Estos sensores fueron inventados en 1969 por Willard S. Boyle y George E. Smith, pero no fue sino hasta el año 2009 que los científicos recibieron el premio Nobel por la invención de este dispositivo. En un sensor CCD, la carga eléctrica generada debido al efecto fotoeléctrico es transferida por un número limitado de nodos, para después ser convertida en voltaje; luego, por medio de un convertidor analógico digital, este voltaje es convertido en un valor digital que representa la intensidad de la luz capturada.

Se dice que un sensor CCD tiene una alta **eficiencia cuántica** (QE); esto quiere decir que un alto porcentaje de los fotones incidentes son detectados (en ocasiones hasta 80%). Otra ventaja de este tipo de sensores es que son altamente lineales, lo que quiere decir que la cantidad de luz percibida es proporcional a la señal emitida.

Considérese un arreglo bidimensional de sensores CCD; cada vez que estos son expuestos a la luz (es decir, cada vez que se abre el obturador de la cámara para capturar una imagen), el efecto fotoeléctrico se encarga de generar portadores (pares electrón-hueco) proporcionales a la cantidad de luz presente. Para formar la imagen digital, los portadores generados en cada uno de los pixeles deben ser transferidos; la carga de los portadores es transferida de manera sincrona como sigue: la carga presente en las columnas del arreglo bidimensional es transferida, columna a columna, a una columna adyacente (véase figura 4.46) que se encarga de transferir la carga, un pixel a la vez, a un convertidor analógico digital; la cantidad de carga transferida en cada instante representa un valor digital para la reconstrucción de la imagen.



**Figura 4.46** Arreglo de sensores CCD.

### Sensores CMOS

Al igual que los sensores CCD, este tipo de sensores se encarga de convertir la luz en una señal eléctrica; la diferencia está en que, como su nombre lo indica, son fabricados usando tecnología CMOS, que es uno de los procesos de fabricación de circuitos integrados más usados hoy día. Para conformar un chip de visión se genera un arreglo bidimensional de sensores CMOS, que representan los pixeles en la cámara; aquí cada pixel está formado por un elemento fotosensible, en general un fototransistor, y una serie de transistores CMOS o amplificadores operacionales CMOS, los cuales se encargan de acondicionar la lectura del elemento fotosensible para su posterior lectura a través de las líneas de control. El circuito de lectura de la señal de salida se encarga de leer el valor de un pixel XY específico. Dado que cada pixel incluye su propia circuitería de amplificación y acondicionamiento, se suele decir que se trata de un "pixel activo" (véase figura 4.47).

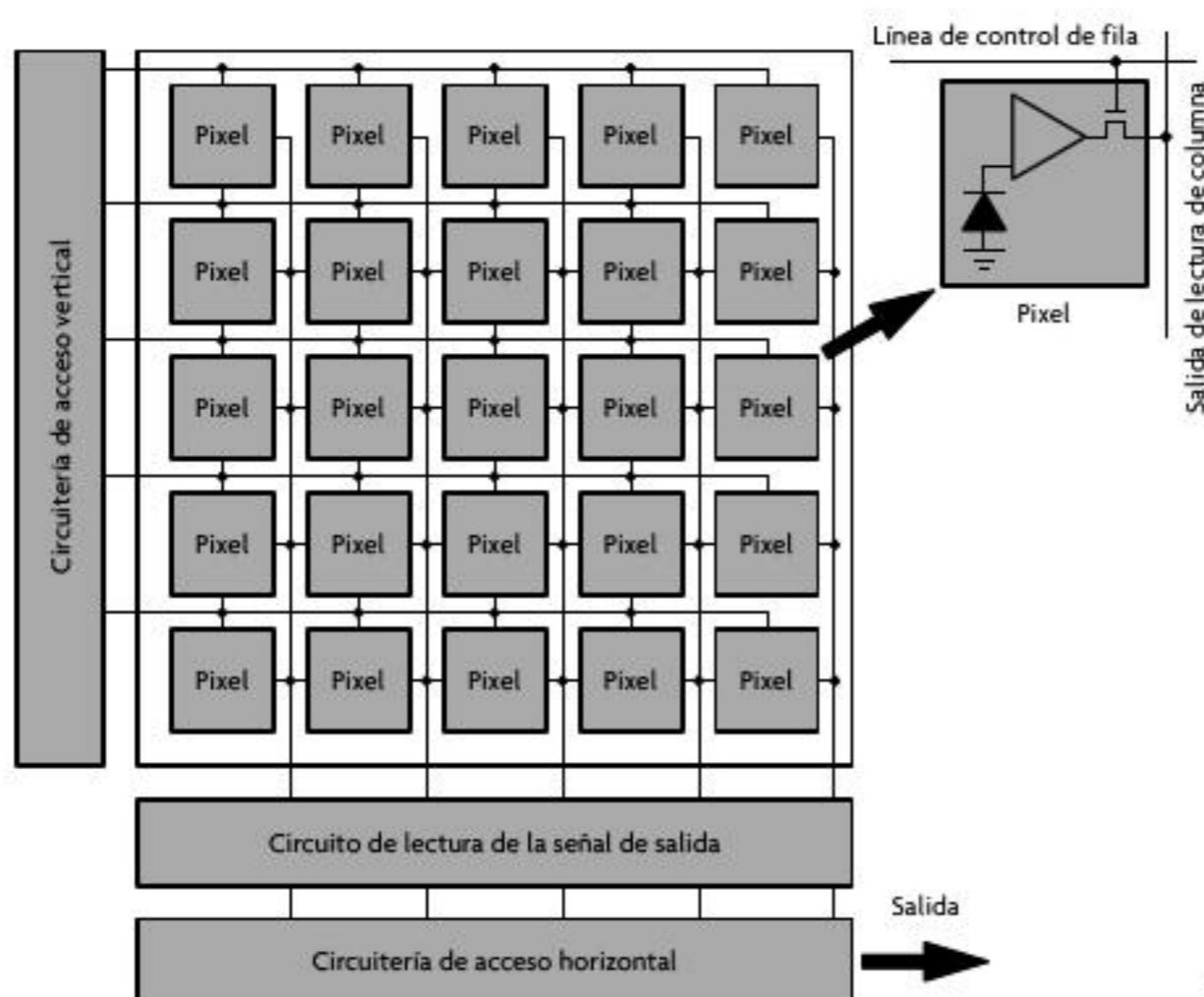


Figura 4.47 Chip de visión.

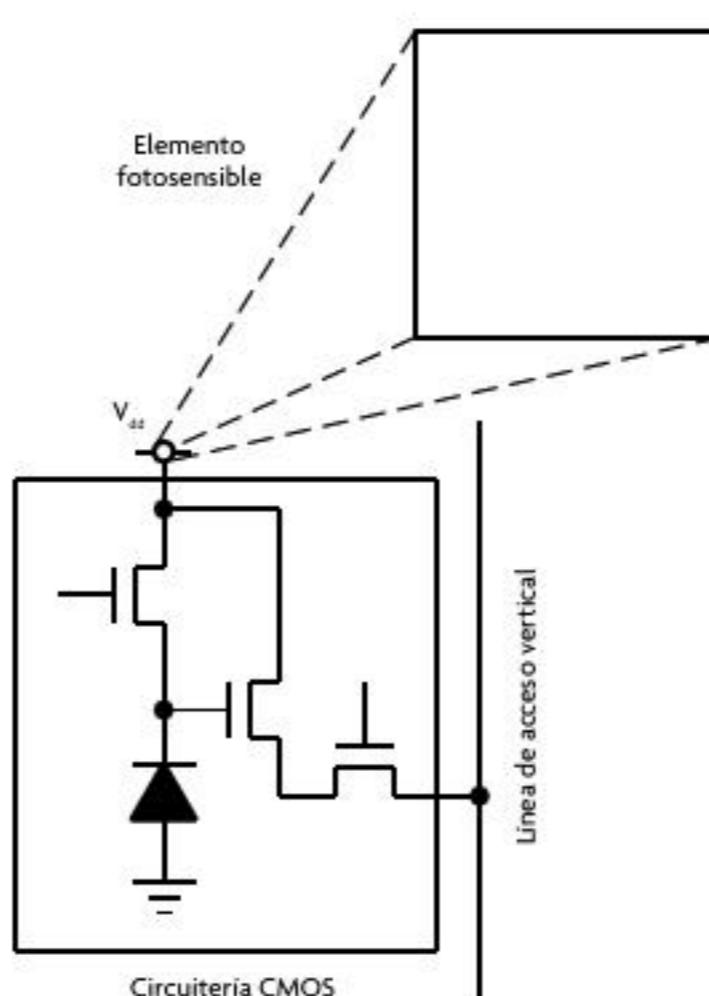


Figura 4.48 Pixel en un sensor CMOS.

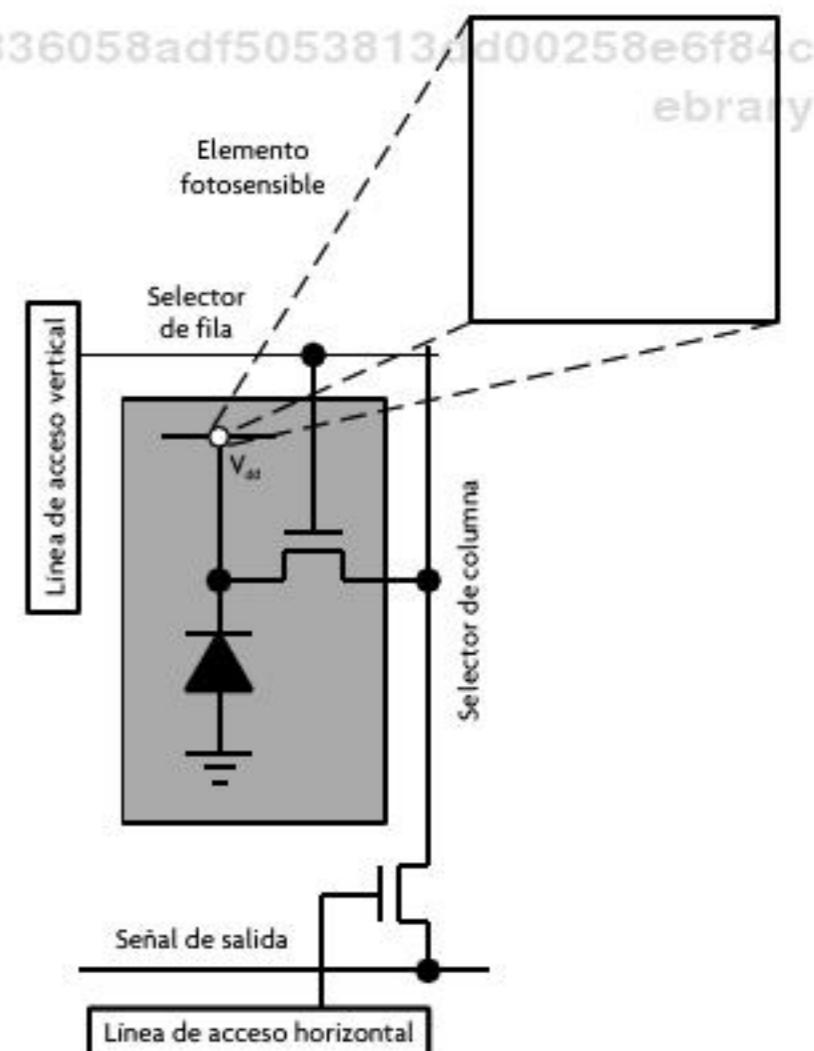


Figura 4.49 Pixel para un sensor CMOS, con líneas de acceso vertical y acceso horizontal.

## Ejercicio de aplicación

### Uso de una cámara digital con Arduino® (cámara serie Adafruit vc0706®)

#### Objetivo

Tomar fotografías con una resolución de  $640 \times 480$  a través de la cámara serie Adafruit VC0706® y almacenarlas en una memoria SD con el uso de Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Memoria SD de 4 GB Clase 4
- Cámara serie Adafruit VC0706®
- 1 Resistencia de  $10\text{ k}\Omega$ , 4 de  $1\text{ k}\Omega$ , 4 de  $2.2\text{ k}\Omega$  y 2 de  $330\text{ }\Omega$
- 1 Push-Button
- 1 LED RGB

En sensores CMOS, el elemento fotosensible puede configurarse de tres maneras distintas: usando fototransistores, fotodiodos o fotocompuertas. Los fototransistores y los fotodiodos ya fueron abordados en secciones anteriores.

Ahora bien, las fotocompuertas se pueden implementar igual que un capacitor; esto es, cuando se les aplica un voltaje de polarización, los portadores generados por el efecto fotoeléctrico son almacenados en la fotocompuerta para después ser transformados en una señal eléctrica que representa el valor del pixel en la imagen digital. Algunas de las configuraciones típicas para implementar pixeles en tecnología CMOS se muestran en las figuras 4.48 y 4.49.

- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

#### Descripción cámara Adafruit VC0706®

La cámara Adafruit VC0706® (véase figura 4.53) toma fotos a color (es sensible a luz infrarroja) con una resolución de  $640 \times 480$ , aunque es configurable a resoluciones inferiores de  $320 \times 240$  y  $160 \times 120$ . Se comunica con otros dispositivos a través del protocolo de comunicación serie a 38 400 baudios; aunque puede modificarse, no es recomendable. El enfoque de la cámara puede ajustarse mediante el alejamiento o el acercamiento del objetivo, para lo cual debe aflojarse el tornillo de la cámara.

Cuenta con salida de video para TV en formato NTSC.

Entre las principales características de esta cámara destacan:

- **Tamaño del módulo:** 32 mm × 32 mm
- **Sensor de imagen:** CMOS ¼ pulg
- **Pixeles sensor CMOS:** 0.3 M
- **Tamaño del pixel:** 5.6 mu × 5.6 mu
- **Formato de salida:** JPEG/M-JPEG
- **Balance de blancos:** Automático
- **Exposición:** Automático
- **Obturador:** Automático
- **Velocidad de cuadros:** A 640 × 480 son 30 fps
- **Angulo de visión:** 60°
- **Distancia de monitoreo:** 10 metros a 15 metros máximo
- **Velocidad en baudios:** 38400 baudios
- **Comunicación:** 3.3 V TTL

La descripción de sus pines es la siguiente:

- **+5 V:** Tensión de alimentación a 5 V
- **GND:** Tensión de referencia del circuito y la comunicación serie
- **RX:** Receptor serie a 3.3 V
- **TX:** Transmisor serie a 3.3 V
- **GND:** Tensión de referencia para la señal de video
- **CVBS:** Salida de video para TV formato NTSC



Figura 4.50 Cámara Adafruit VC0706®.

#### Descripción memoria SD

Una memoria SD es un formato de dispositivo inventado por Panasonic® que almacena grandes cantidades de información en un pequeño espacio. Existen múltiples versiones de este formato: SD, MiniSD y MicroSD.

Este tipo de memoria utiliza el sistema de comunicación serie SPI. La velocidad de transferencia de datos mínima está dada por la clase de la memoria:

- **Clase 2.** 2 MB/s
- **Clase 4.** 4 MB/s
- **Clase 6.** 6 MB/s
- **Clase 10.** 10 MB/s
- **UHS Clase 1.** 10 MB/s
- **UHS Clase 3.** 30 MB/s

La descripción de sus pines es la siguiente (véase figura 4.51):

- **DAT3/CS.** Terminal DAT3 del protocolo de comunicación BUS SD / Chip Select del protocolo SPI.
- **MOSI (Master Output Slave Input).** Entrada de datos a la memoria para el protocolo SPI.
- **Vss.** Tensión de referencia (GND).
- **Vcc.** Tensión de alimentación a 3.3 V.
- **SCLK.** Señal de reloj para protocolo SPI; esta señal viene del maestro.
- **Vss.** Tensión de referencia (GND).
- **DAT0/MISO (Master Input Slave Output).** Terminal DAT0 del protocolo BUS SD / Salida de datos protocolo SPI.
- **DAT1.** Terminal DAT1 protocolo BUS SD.
- **DAT2.** Terminal DAT2 protocolo BUS SD.

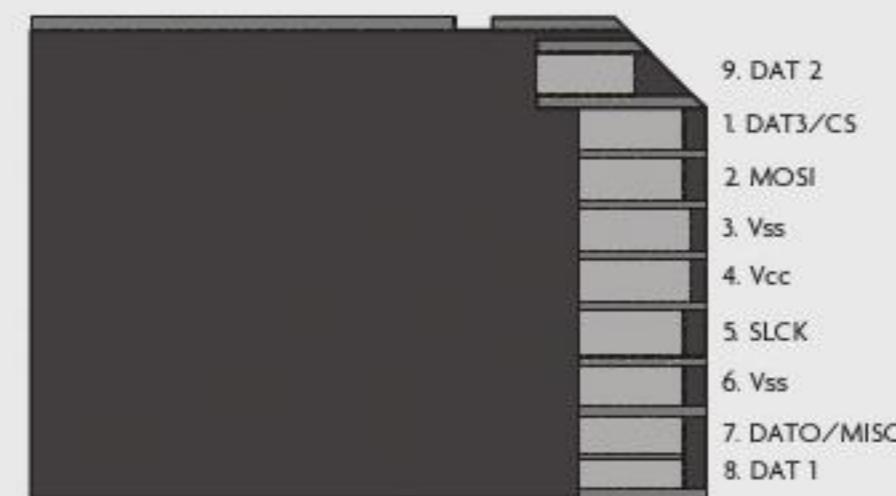


Figura 4.51 Pines de la SD.

#### Construcción del circuito

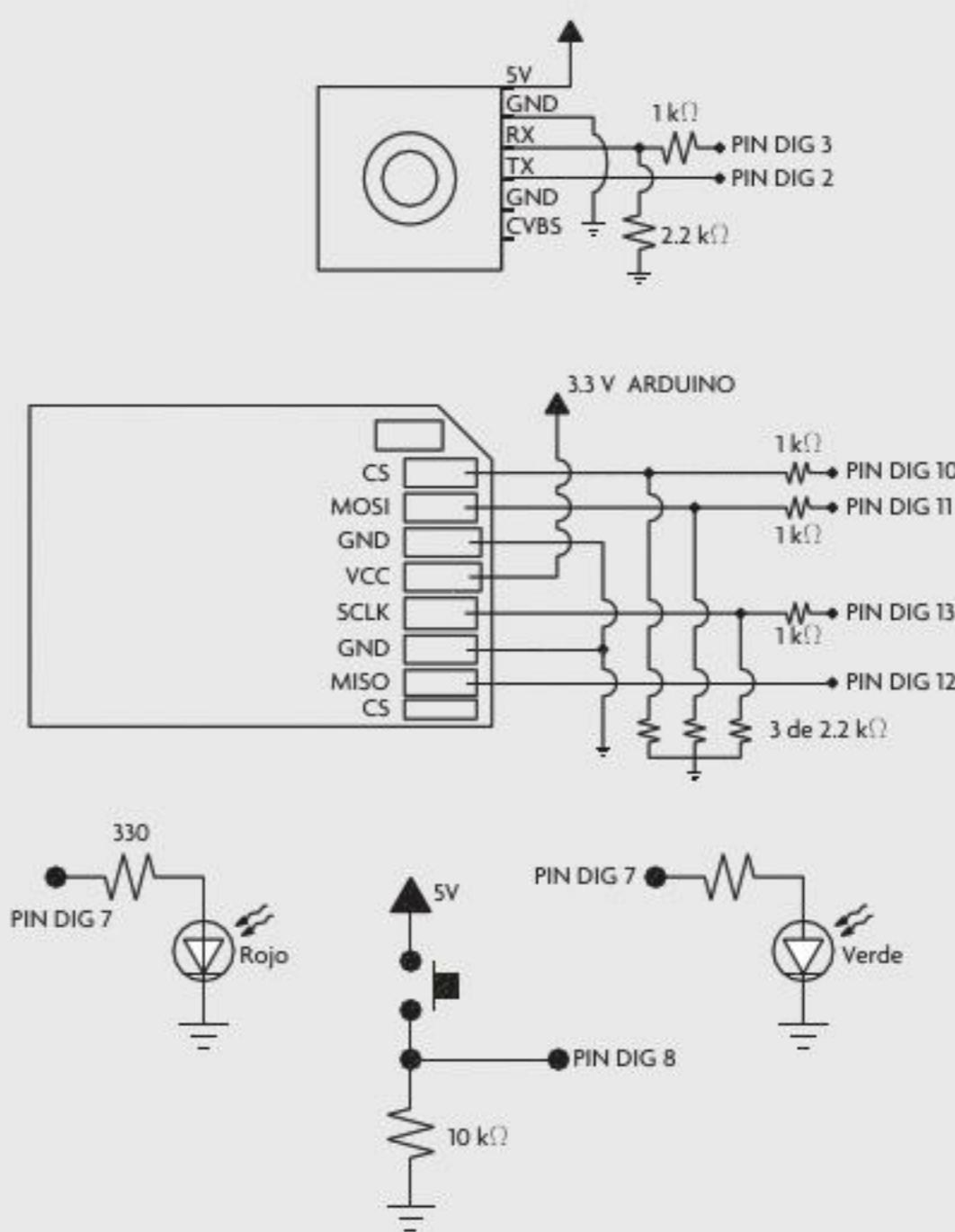


Figura 4.52 Diagrama para el circuito de la cámara Adafruit VC0706® con Arduino®.

### Módulo de la cámara Adafruit VC0706®

La conexión entre la cámara y el Arduino® (véase figura 4.53) prácticamente es directa; sin embargo, dado que la tensión de la comunicación serie con la cámara es de 3.3 V (0V es '0' lógico y 3.3 V es '1' lógico) y Arduino® trabaja con niveles lógicos de 5 V (0 V es '0' lógico y 5 V es '1' lógico), se debe bajar la tensión de la señal del Arduino® a la cámara (RX). Para ello se construye un pequeño divisor de tensión (véase ecuación 4.1) que ajusta la tensión a los 3.3 V para evitar problemas de funcionamiento. No se requiere de un divisor para el TX, pues a pesar que la tensión de salida de este es de 3.3 V, Arduino® alcanza a registrar esta tensión como un '1' lógico.

$$V_{out} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \times V_{cc}$$

$$(4.1)$$

$$V_{out} = \left( \frac{2.2 \Omega}{1k\Omega + 2.2 k\Omega} \right) \times 5 V = 3.43 V \approx 3.3 V$$

### Módulo memoria SD

La memoria SD se comunica con el Arduino® a través del protocolo SPI. Para su conexión (véase figura 4.56), todas las señales de entrada a la memoria SD (MOSI, SCLK y CS) deben pasar a través del divisor de tensión (véase ecuación 4.1), pues la tarjeta SD trabaja con niveles lógicos de 3.3 V (su tensión de alimentación también es de 3.3 V). La señal de salida MISO no requiere el divisor por la misma razón del TX de la cámara.

Los pines de conexión con el Arduino® están definidos por la librería SD.h, a excepción del CS, que debe ser definido.

### LEDs y Push-Button

Los LED indican el estado de la cámara; así, el verde indica "disponible para tomar una foto" y el rojo representa que el programa está ocupado tomando y almacenando la foto en la tarjeta SD (todos los LED se conectan a sus respectivas resistencias limitadoras de corriente).

El push-button habilita para la captura y almacenamiento de la imagen. Este utiliza una resistencia de pull-down.

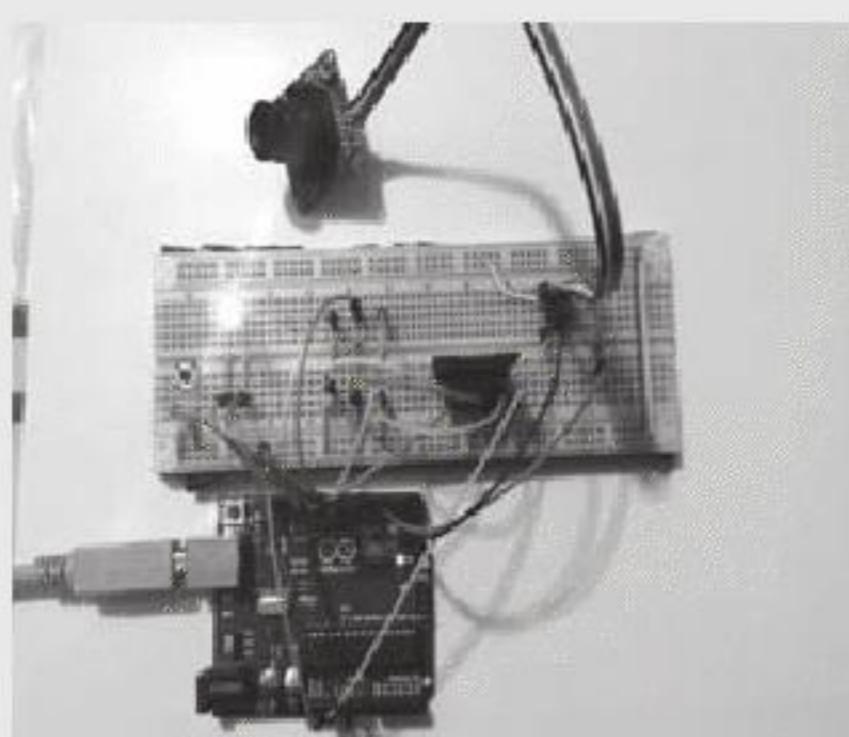


Figura 4.53 Circuito montado físicamente.

En la figura 4.56 se muestra el armado físico del circuito que se representa en la figura 4.54.

### Código

#### Descripción del programa

El siguiente programa captura una foto al accionar el disparador (Push-Button); posteriormente, la imagen se almacena en la memoria SD. Durante la función `setup()`, se inician la memoria SD y la cámara. En la función `loop()` solo se espera a que se presione el disparador.

Por su parte, la función `takephoto()` define la resolución de la imagen, toma la foto y la transfiere a la memoria SD. La transferencia a la SD es lenta y depende del tamaño del buffer (establecida en 32 bytes). El tamaño del buffer podía incrementarse para agilizar la transferencia, pero no es recomendable porque puede provocar problemas de funcionamiento.

```
*****Camara Serie Adafruit VC0706*****
/*
**La camara Adafruit VC0706 permite tomar
  fotografias con una resolucion
  **de 640x480 a color (ajustable para 320x240
    y 160x120). Se comunica
  **con otros dispositivos a traves del protocolo
    de comunicaciones serie
  **a 38400 baudios.
*/
/**En el siguiente programa se desarrolla una
  pequeña camara, que captura
  una foto (a 640x480)
  y la almacena en una memoria SD cada que se
  **presiona un boton.
*/
/**NOTA. La libreria Adafruit_VC0706 es
  desarrollada por Adafruit y pue-
  **de descargarse gratuitamente desde la
    siguiente pagina:
  **https://github.com/adafruit/Adafruit-VC0706-Serial-Camera- */
/**Library
**El siguiente programa esta basado en parte
  en el programa de ejemplo *
/**"Snapshot".
*****
```

```
#include <Adafruit_VC0706.h> //Libreria que
  permite el control de la
  //camara Adafruit VC0706
#include <SD.h> //Libreria para el manejo de una
  memoria
  //SD. La libreria soporta
  //sistema de
  archivos FAT16 y FAT32.
#include <SoftwareSerial.h> //Libreria que
  habilita la comunicacion
```

```

//serie en pines distintos al 1 y 0 digitales.

#define CS 10           //Definimos el PIN
DIG 10 con el Chip
//Select de la comunicacion SPI con la memoria
SD

#define ocupado 7      //Los pines
digitales 6 y 7 definiran el
//estado de la camara para
#define disponible 6   //tomar una foto
#define foto 8          //Entrada para la
señal del push-button que //le indica que debe
tomarse una foto.

//Los pines de comunicacion serie con la camara
son:
//TX -> PIN DIG 2; RX -> PIN DIG 3

SoftwareSerial cameraPIN = SoftwareSerial(2, 3);
Adafruit_VC0706 camera = Adafruit_
VC0706(&cameraPIN);

File archivoFoto; //Objeto tipo File para el
manejo con archivos
uint8_t *arrayBytes;    //Buffer que se envia
de la camara a la SD. Los
//datos que se transfieren
//de la camara a la SD
es por paquetes.
uint16_t sizeImage;    //Tamaño de la imagen
int numBytes; //Tamaño del buffer
char nombreArchivo[13] = "FOTO0000.JPG"; //
Nombre del archivo

void setup()
{
  pinMode(CS, OUTPUT); //Se definen como salida
  los pines CS, ocupado y //disponible
  pinMode(ocupado, OUTPUT);
  pinMode(disponible, OUTPUT);
  pinMode(foto, INPUT); //Se define como entrada
  el PIN para la captura
//de una foto
  Serial.begin(9600);

  //Se verifica la conexion con la memoria SD
  if(!SD.begin(CS))
  {
    Serial.println("Fallo conexion con tarjeta
SD!");
    return;
  }
  Serial.println("Conexion con tarjeta SD
exitosa!");

  //Verificacion de la conexion con la camara
  if(!camera.begin())
  {
    Serial.println("Fallo conexion con
camara!");
    return;
  }
}

```

```

Serial.println("Conexion con camara
exitosa!");

}

void loop()
{
  digitalWrite(disponible, HIGH); //Inicialmente
  la camara se
  //encuentra disponible
  digitalWrite(ocupado, LOW); //para la captura
  de una foto.
  if(digitalRead(8) == HIGH) //En caso de
  presionar el push-
  //button (disparador):
  {
    digitalWrite(disponible, LOW); //Se inicia
    la funcion que captura
    //y guarda la imagen en la
    memoria
    //SD.
    takephoto();
  }

  //Captura de una foto
  void takephoto()
  {
    digitalWrite(ocupado, HIGH); //Se indica por
    medio de un LED que la
    //camara esta ocupada

    camera.setImageSize(VC0706_640x480); //Se
    indica la resolucion de la
    //imagen en 640x480.

    //Se toma la fotografia y se verifica si se
    tomo correctamente.
    if(camera.takePicture())
      Serial.println("Foto capturada!!!");
    else
      Serial.println("Fallo captura de
fotografia");

    //Nombre de la imagen
    //Con el siguiente algoritmo se pueden
    almacenar 10000 imagenes con
    //nombres distintos (FOTO0000.JPG - FOTO9999.
    //JPG). Si se excede este
    //limite, las siguientes imagenes se
    sobrescribiran en la ultima (
    //FOTO9999.JPG).
    for (int i = 0;i < 10000; i++)
    {
      nombreArchivo[4] = <0> + i / 1000;
      nombreArchivo[5] = '0' + (i / 100) % 10;
      nombreArchivo[6] = <0> + (i / 10) % 10;
      nombreArchivo[7] = <0> + i % 10;
      //Se verifica que exista una imagen con el mismo
      //nombre en la SD
      //para no sobrescribir (a menos que el limite se
      //sobreponga)
    }
}

```

```

if(!SD.exists(nombreArchivo))
    break;
}
//Se crea el archivo con el nombre anteriormente
definido. Si existe se sobrescribe, sino se
crea uno nuevo.
archivoFoto = SD.open(nombreArchivo,
FILE_WRITE);
//Se obtiene el tamaño en bytes de la imagen.
sizeImage = camera.frameLength();
//Se imprimen las características de la imagen
(nombre y tamaño en //bytes).
Serial.print("Nombre Archivo: ");
Serial.println(nombreArchivo);
Serial.print("Tamano: ");
Serial.print(sizeImage);
Serial.println(" bytes");

//Se almacena la imagen en la memoria SD. NOTA:
La imagen ya fue //capturada y guardada en
el chip de la cámara, aquí solamente se //
transfiere a la SD.
Serial.println("Espere... Almacenando en la
memoria");

while (sizeImage > 0) //Mientras no se halla
transferido
    //completamente la imagen.
{
    numBytes = min(32, sizeImage); //La
    velocidad de transferencia //depende del
    tamaño del buffer. Aquí se define de 32 bytes
    que es una //transferencia lenta. Puede
    incrementarse pero es posible que ocurran ////
    fallos durante la transferencia.
    arrayBytes = camera.readPicture(numBytes); //
    Se leen los 32 bytes de //la imagen y se
    asignan al buffer
    archivoFoto.write(arrayBytes, numBytes); //
    Se transfieren los 32 //bytes al archivo de
    imagen en la SD
    sizeImage -= numBytes; //Se restan
    los bytes que ya fueron //transferidos
}

archivoFoto.close(); //Se cierra el archivo
Serial.println("Listo!!!"); //Se indica que la
transferencia //terminó y se deshabilita
digitalWrite(ocupado, LOW); //el LED de
ocupado

//Un reset a la cámara para estar disponible a
una nueva captura
camera.reset();
}

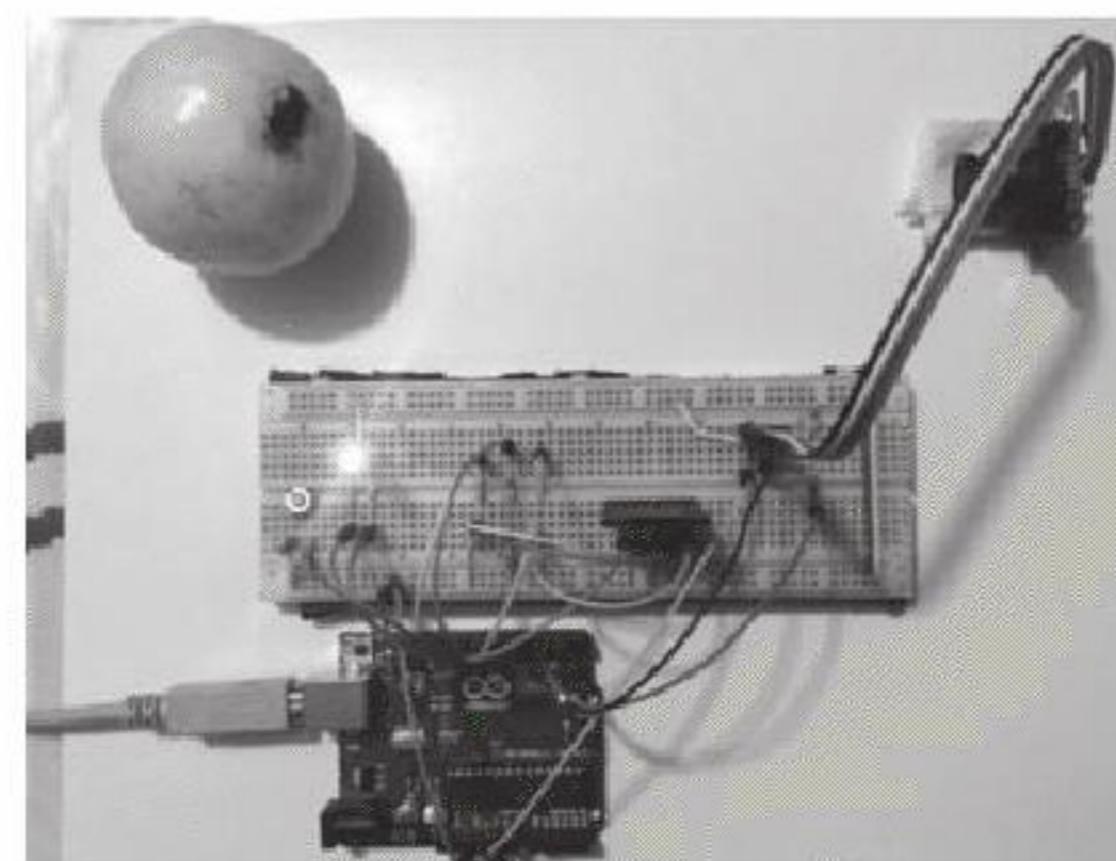
```

## Pruebas

Cuando se enciende el circuito, lo primero que se hace es verificar la conexión con la tarjeta SD y la cámara Adafruit VC0706® (véase figura 4.54).



**Figura 4.54** Al principio se verifica la conexión con la SD y la cámara.



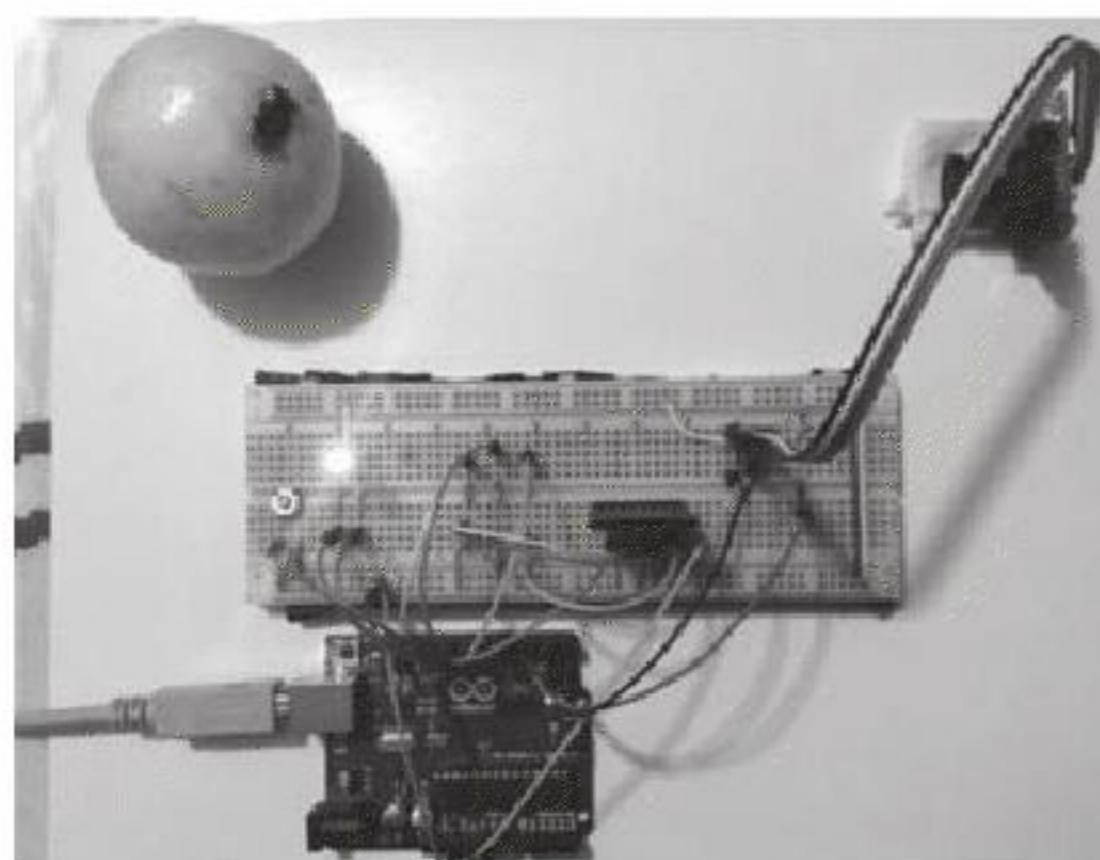
**Figura 4.55** La cámara está disponible para tomar una foto. Este estado se indica con la luz verde del LED RGB.

A continuación, la cámara está lista y disponible para capturar una fotografía. Este estado se indica con el color verde del LED RGB (véase figura 4.55).

Enseguida, cuando se acciona el disparador se toma una fotografía y se envía a la tarjeta SD. Es importante hacer notar que durante este proceso no pueden tomarse más fotos, por lo que LED RGB cambia a color rojo (véase figura 4.56).

En el monitor serie se muestran algunas características de la imagen, como su nombre y su tamaño en bytes (véase figura 4.57).

Por último, en la figura 4.58 se aprecia la foto que la cámara VC0706® tomó con una resolución de 640 × 480.



**Figura 4.56** Se toma una foto y se transfiere a una memoria SD. Este estado se indica con la luz roja del LED RGB.

```
COM7 df6336058adf5053813dd00258e6f84c ebrary
Conexión con tarjeta SD exitosa!
Conexión con cámara exitosa!
Foto capturada!!!
Nombre Archivo: FOTO0003.JPG
Tamaño: 49448 bytes
Espere... Almacenando en la memoria
Listo!!!
Foto capturada!!!
Nombre Archivo: FOTO0004.JPG
Tamaño: 48860 bytes
Espere... Almacenando en la memoria
Listo!!!
Foto capturada!!!
Nombre Archivo: FOTO0005.JPG
Tamaño: 47832 bytes
Espere... Almacenando en la memoria
Listo!!!
Foto capturada!!!
Nombre Archivo: FOTO0006.JPG
Tamaño: 47260 bytes
Espere... Almacenando en la memoria
Listo!!!

Desplazamiento automático No hay fin de linea 9600 baud
```

**Figura 4.57** En el monitor serie se muestra el nombre y tamaño en bytes de la imagen.



**Figura 4.58** Imagen capturada por la cámara Adafruit VC0706®, con una resolución de 640 × 480.

## Ejercicios propuestos

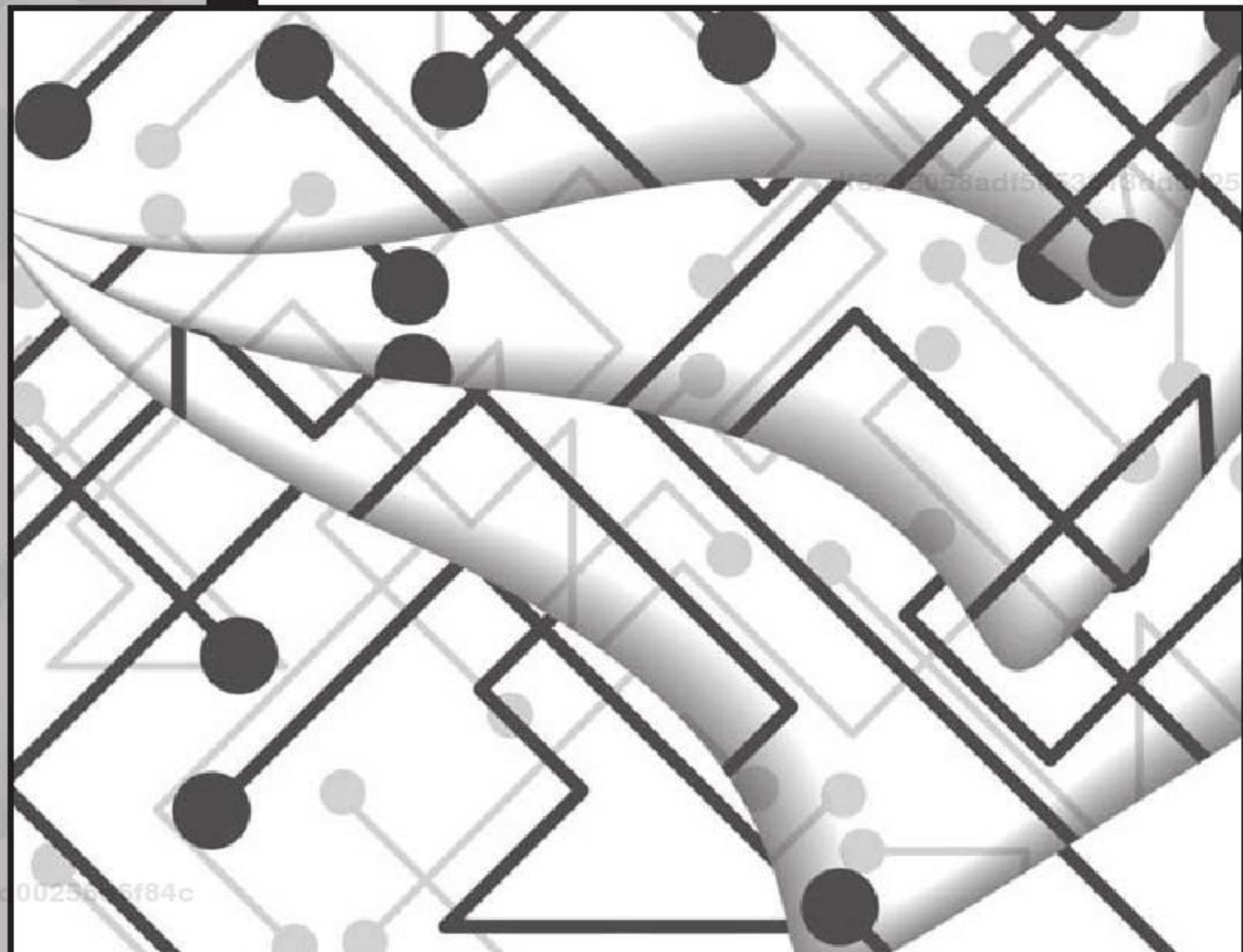
1. Con base en el ejercicio de la fotorresistencia, implemente un medidor de distancia caracterizando el sistema con la medición de irradiación.
2. Compare los resultados del ejercicio anterior con los resultados de la práctica del medidor de distancia usando el par emisor receptor.
3. Con el uso del sensor de color, implemente un sistema que prenda un LED rojo cuando detecte objetos rojos.



df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# 5

## Sensores de nivel y proximidad



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

### Objetivo general

### Objetivos particulares

Para el estudio de este capítulo es necesario tener conocimientos elementales acerca de los principios de transducción: piezoelectrónico, fotoeléctrico, resistivo, capacitivo e inductivo, así como conocer los aspectos básicos y el funcionamiento de los acondicionadores de señal para estos principios de transducción.

Conocer los distintos tipos de sensores de nivel y proximidad usados en sistemas de ingeniería e identificar los principios de transducción usados para la medición de proximidad o nivel.

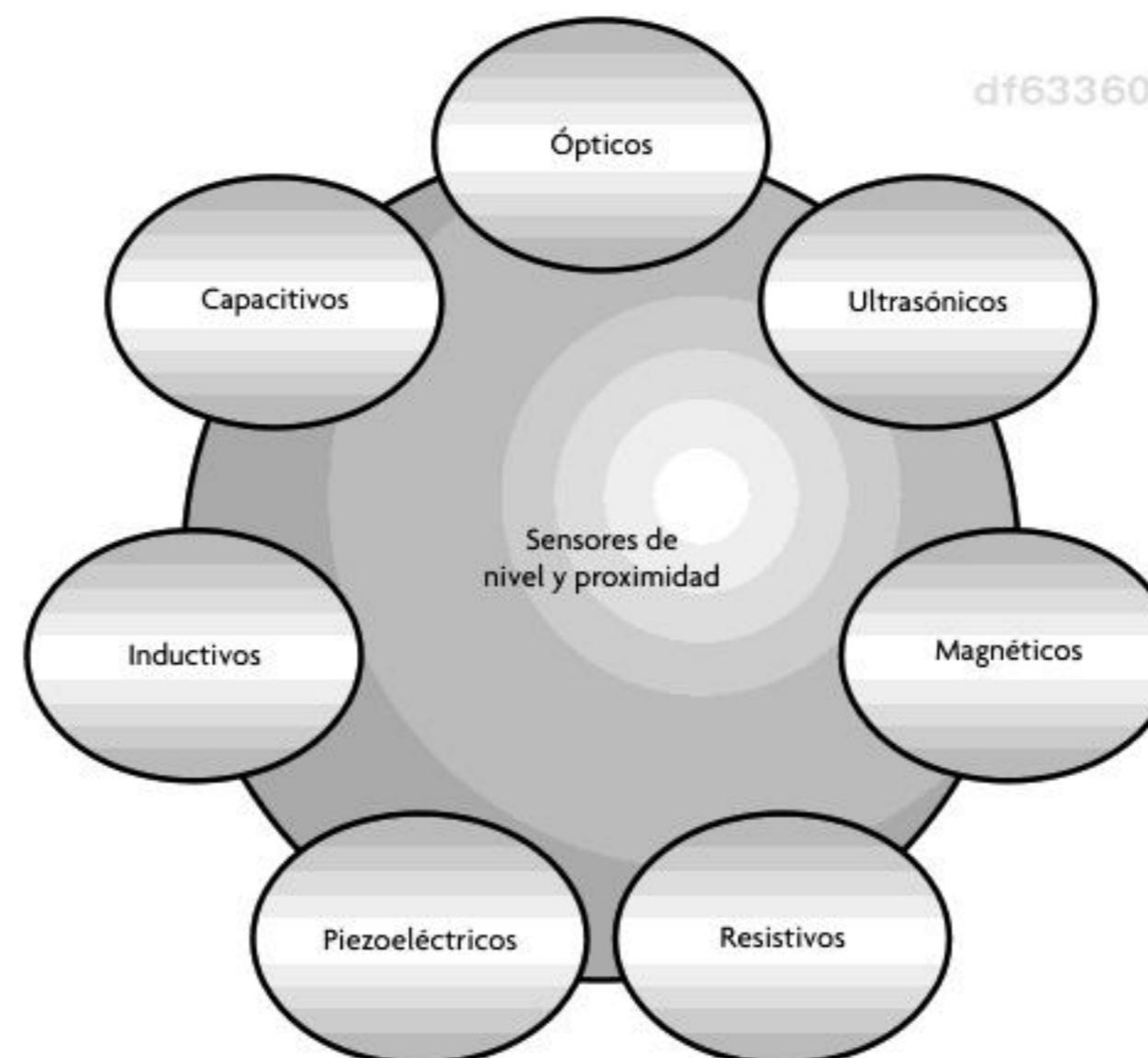
- Identificar la diferencia entre los sensores de nivel, los sensores de proximidad y los sensores de posición.
- Distinguir las diferentes configuraciones de sensores ultrasónicos para sensar nivel y proximidad.
- Distinguir las diferentes configuraciones de sensores ópticos para sensar proximidad.
- Distinguir las diferentes configuraciones de sensores capacitivos, ya sea para medición de proximidad, nivel o sensores de tacto.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## 5.1 Introducción

Los sensores de nivel y proximidad son muy usados en aplicaciones como envasado, sistemas de control para monitoreo de llenado, detección de obstáculos en sistemas inteligentes y en algunas configuraciones específicas en sistemas táctiles, para su aplicación en sistemas electrónicos, como teléfonos móviles, pantallas táctiles, etcétera.

Los sensores de nivel y proximidad muchas veces son confundidos con los sensores de posición (véase capítulo 3). No obstante, este tipo de sensores se limita a medir la proximidad de un objeto con respecto al sensor, sin importar su orientación o determinar si el objeto está cerca del sensor para ser detectado, además de determinar el nivel de un contenedor en determinado porcentaje. Al igual que muchos sensores, estos pueden clasificarse de acuerdo con el principio de operación que utilizan; en la figura 5.1 se muestra una clasificación de estos sensores.



**Figura 5.1** Clasificación de los sensores de nivel y proximidad.

## 5.2 Ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos son muy utilizados en sistemas de medición no invasivos para determinar la distancia del emisor a un objeto dado. Por ejemplo, en la mayoría de los vehículos se usan para avisar al conductor la proximidad de un objeto cuando maneja en reversa; otra aplicación es la medición de distancias, profundidades y alturas que cambian dinámicamente, etcétera. Un sensor ultrasónico también puede ser considerado un transceptor, debido a que no solo puede usarse como un transductor de entrada, sino también como uno de salida. Las principales ventajas de este tipo de sensado es que al ser una medición no invasiva, es decir, que no requiere contacto alguno para realizar la medida, la variedad de objetos que es posible medir es muy amplia. Debido a la naturaleza de la señal ultrasónica, es posible realizar mediciones en superficies variadas, líquidos y en ambientes hostiles. La señal ultrasónica se puede generar mediante diferentes técnicas, como electromagnéticas, ópticas, capacitivas y piezoelectricas; de todas, esta última es una de las más utilizadas debido a su alta efectividad en comparación con las anteriores.

Se dice que una onda sonora es ultrasónica cuando está por encima de la frecuencia audible para el oído humano; esto es, por encima de los 20 KHz aproximadamente. Un sensor ultrasónico se auxilia del efecto Doppler, ya que un elemento ultrasónico (considerado como emisor) emite una onda ultrasónica, la cual es absorbida en parte y reflejada en parte por el objeto a medir; así, a través de la medición de la atenuación de la onda percibida por el receptor, el tiempo que le toma a esta ser

percibida por el receptor, o por la presencia o ausencia de dicha onda en el emisor, es posible obtener características de la variable física que se desea determinar.

El efecto Doppler consiste en un cambio aparente de frecuencia de la onda sonora respecto al emisor cuando esta es reflejada en un objeto móvil (o partículas inmersas en un fluido). Este cambio de frecuencia resulta proporcional a la velocidad relativa del emisor reflector (véase figura 5.2). El cambio de frecuencia se puede calcular mediante de la ecuación:

$$f - 2f_e \frac{v}{v_s} \cos \theta = f_e - f_r$$

donde:

$f_e$ : frecuencia emitida

$f_r$ : frecuencia recibida

$\theta$ : ángulo entre la velocidad y la dirección de propagación

$v_s$ : velocidad del sonido

$v$ : velocidad del objeto o fluido

$f$ : diferencia de frecuencias

Si lo que se desea es conocer el tiempo que tarda la onda desde que sale del emisor hasta que llega al receptor, se debe usar la siguiente ecuación:

$$t = \frac{(d / \operatorname{sen} \theta)}{v_s + v \cos \theta}$$

donde:

$t$ : tiempo [s]

$d$ : distancia [m]

Si la posición de los sensores cambia, es decir, si ahora el emisor se considera receptor y el receptor emisor, se debe reemplazar el signo positivo del denominador por un signo negativo.

El corazón de un sensor ultrasónico es un material piezoelectrónico; recuérdese que la **piezoelectricidad** es la propiedad que presenta un material de generar un voltaje debido a una fuerza aplicada. Los materiales piezoelectricos son considerados un subconjunto de los materiales ferroeléctricos, cuya principal característica es que presentan una polarización eléctrica finita, incluso sin ninguna fuerza aplicada. La onda ultrasónica que emite el material piezoelectrónico se genera por medio de una excitación eléctrica al material (el efecto piezoelectrónico también se presenta de manera inversa; es decir, al aplicar un voltaje el material experimenta una deformación, y como resultado este emite una onda mecánica). Esta onda es emitida por todo el material, lo que significa que **no es puntual**. Por tanto, los sensores ultrasónicos cuyo elemento piezoelectrónico es de forma redonda se conocen como **transductores de fuente pistón**, debido a la geometría que presenta el campo sonoro que emite; de acuerdo con la figura 5.3, entre más claro sea el color del campo sonoro, este es más intenso.

El principio de funcionamiento de estos sensores consiste en la emisión de una onda de manera cíclica, la cual es de alta frecuencia y corta duración, además de que se propaga en el medio. Al encontrar un objeto a su paso, esta es reflejada

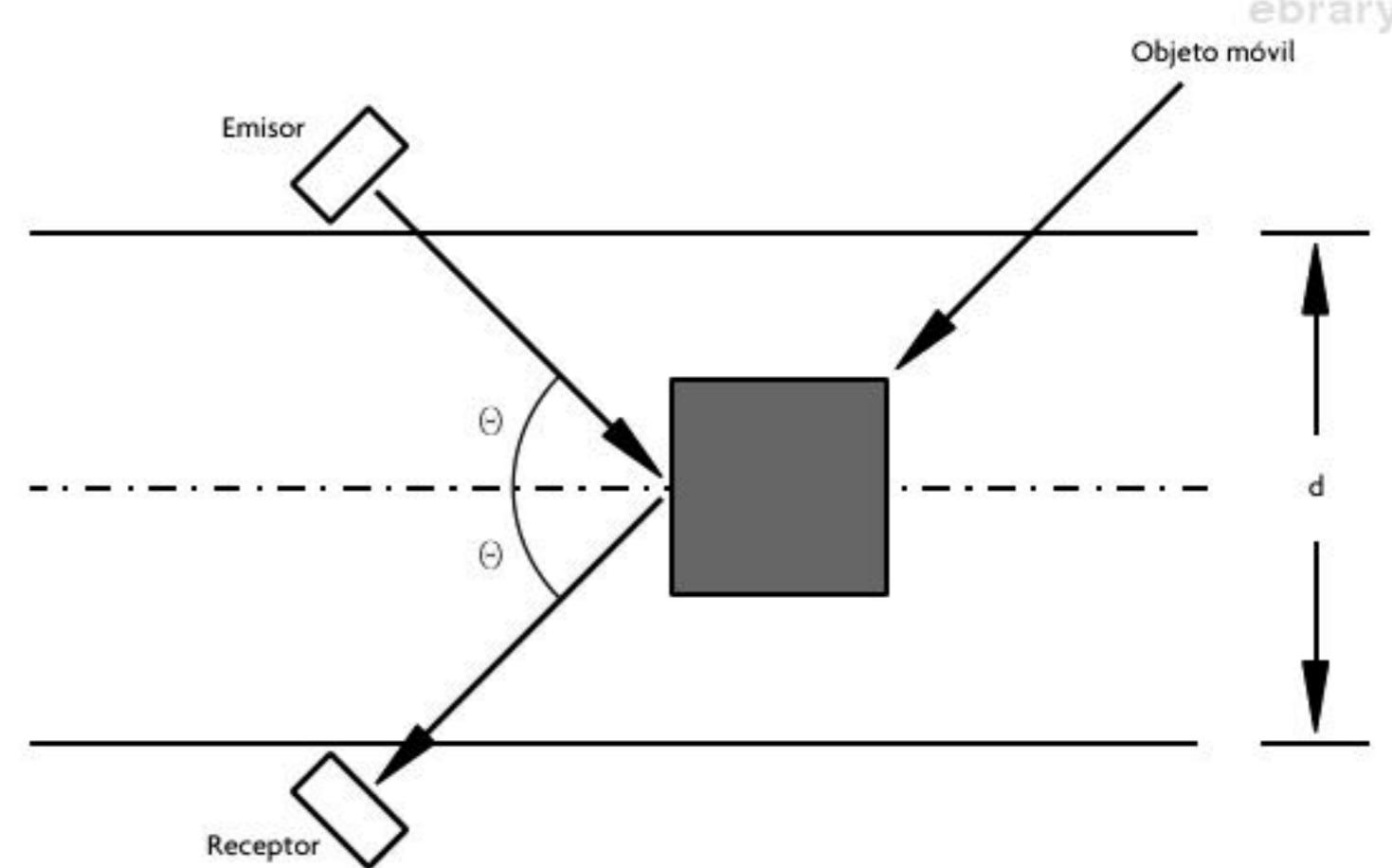


Figura 5.2 Efecto Doppler.

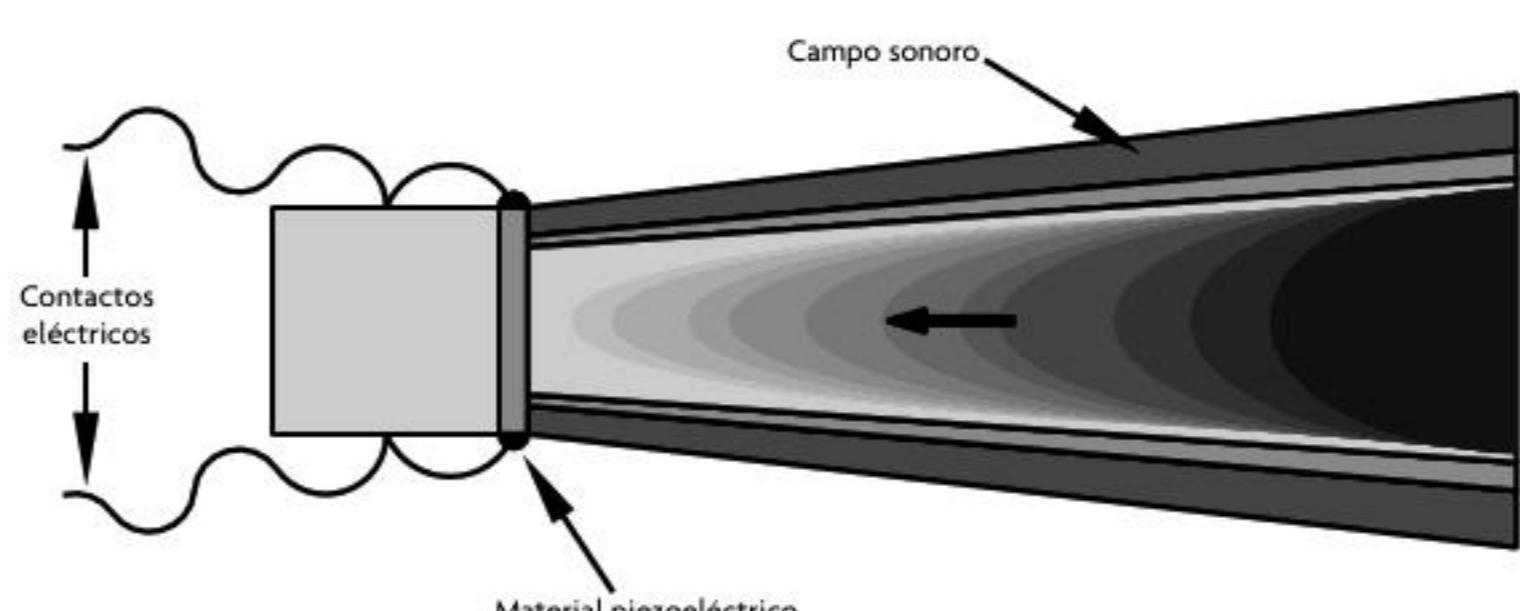
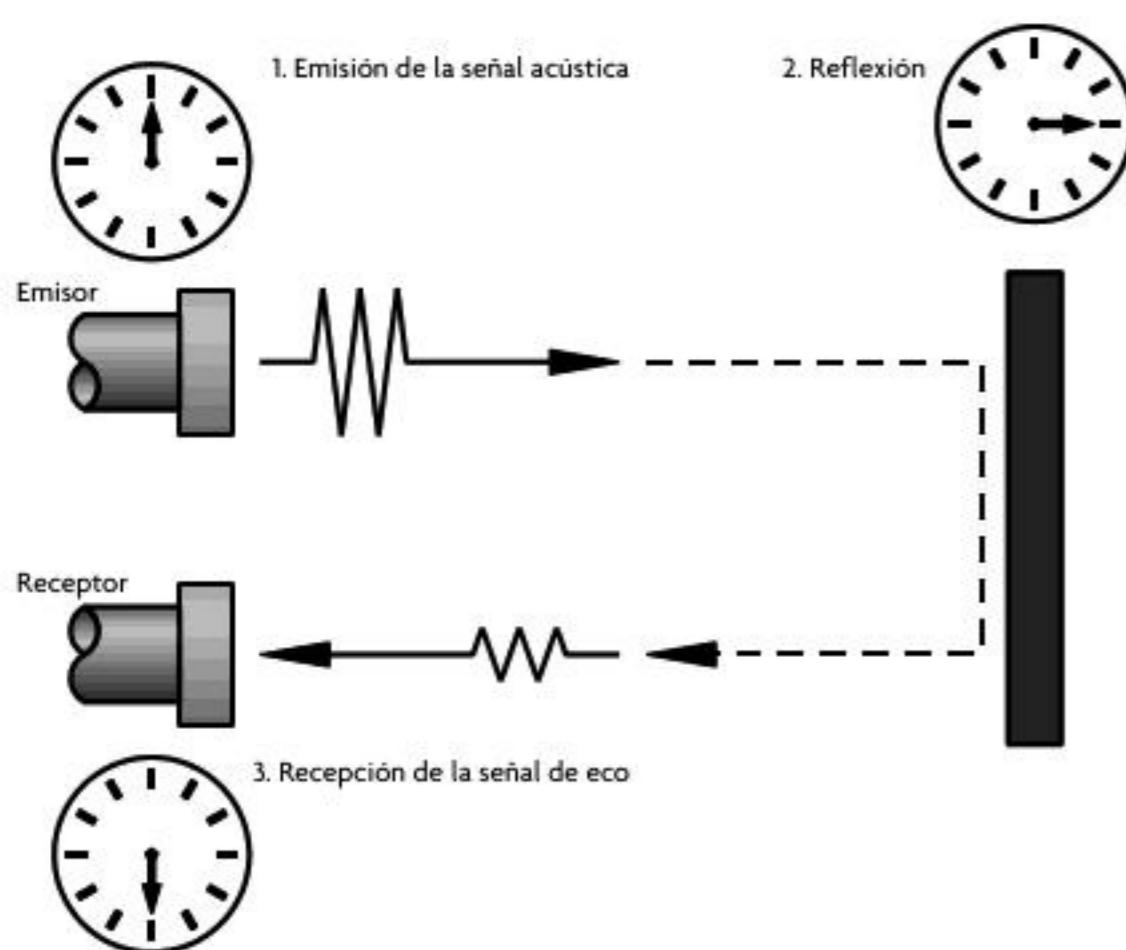


Figura 5.3 Emisor ultrasónico de pistón.

**Figura 5.4** Medición de un sensor ultrasónico.

la medición; por el contrario, si la medición se basa en la intensidad de la onda que es reflejada, el sistema es sensible al ruido de fondo. Una de las principales ventajas de este tipo de sensado es que todo material que refleje el sonido puede ser detectado, independientemente del color, la textura o el grosor del objeto. La desventaja es que debido a la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, esta depende de la temperatura del ambiente; ante esto, entonces se debe realizar una compensación mediante la siguiente ecuación:

$$v_s = v_{s0} \sqrt{1 + \frac{T}{273}}$$

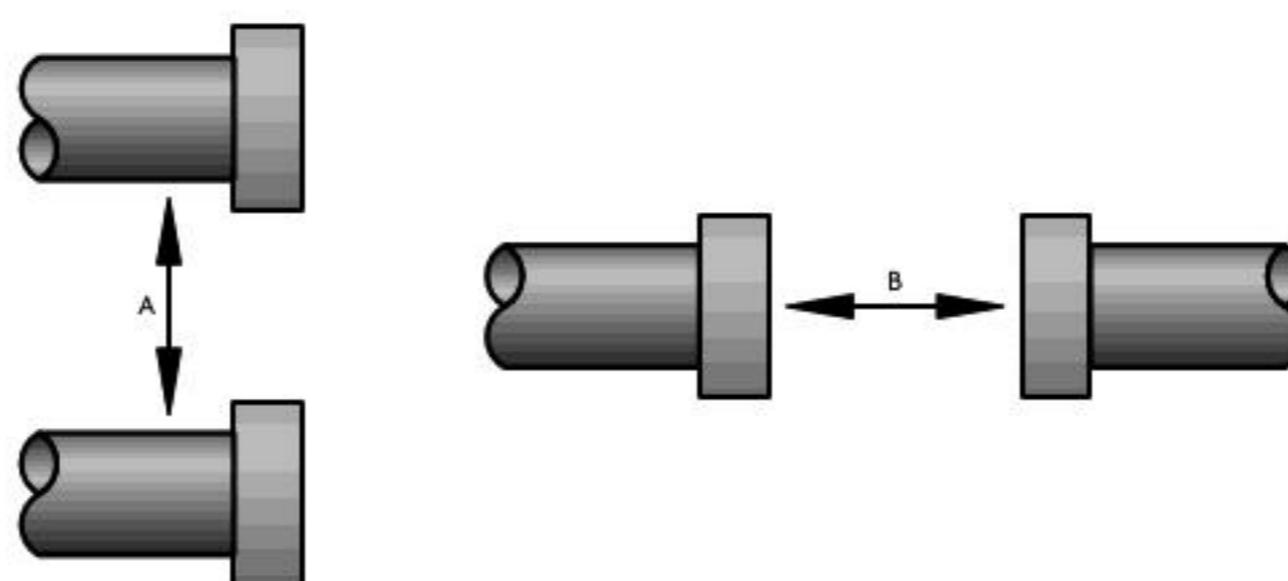
donde:

$v_s$ : velocidad del sonido  $\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

$v_{s0}$ : velocidad del sonido a  $0^\circ\text{C}$

$T$ : Temperatura [K]

Un sensor ultrasónico permite medir distancias de entre 20 mm hasta 10 m; no obstante, con un buen acondicionamiento de señal es posible obtener valores con hasta 1 mm de precisión. Para lograr una buena medición es importante tener en cuenta la forma en que se coloca tanto el emisor como el receptor, además de una compensación por la temperatura. Por ejemplo, este tipo de sensores se pueden colocar frente a frente o uno contiguo al otro.

**Figura 5.5** Configuraciones de sensores ultrasónicos. A) Contiguos. B) Frente a frente.

Cuando los sensores ultrasónicos se colocan, ya sea de manera contigua o frente a frente, se debe guardar una distancia mínima entre estos, dependiendo de la zona de operación del sensor (véase figura 5.6), con el fin de evitar interferencias, lo cual depende de la zona de detección (zona

y vuelve en forma de eco al receptor. El circuito de acondicionamiento tiene la tarea de determinar el periodo transcurrido entre la emisión de la señal acústica y la recepción del eco.

Con base en el montaje de la figura 5.4, a través de la siguiente ecuación es posible calcular el tiempo que tarda el receptor en percibir la señal reflejada en el objeto a medir:

$$d = \frac{1}{2} v_s t$$

donde:

$d$ : distancia del emisor-receptor al objeto [m]

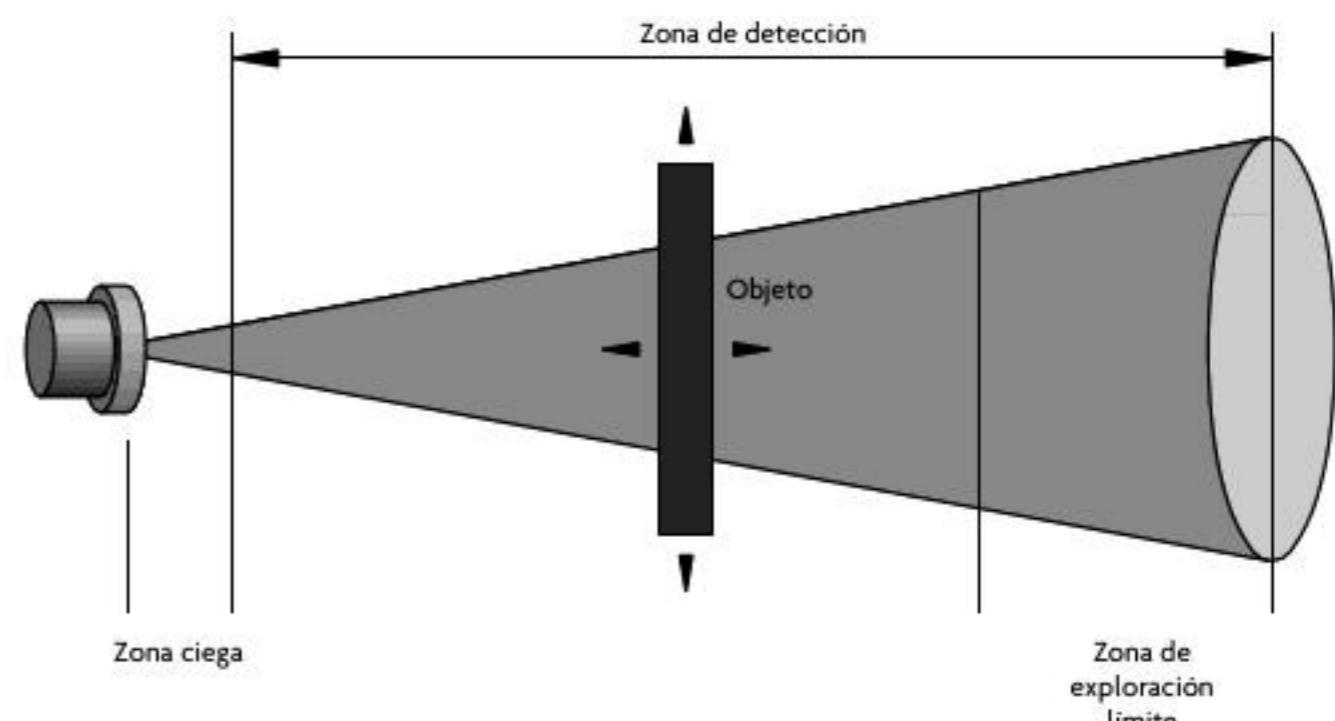
$v_s$ : velocidad del sonido

$t$ : tiempo transcurrido [s]

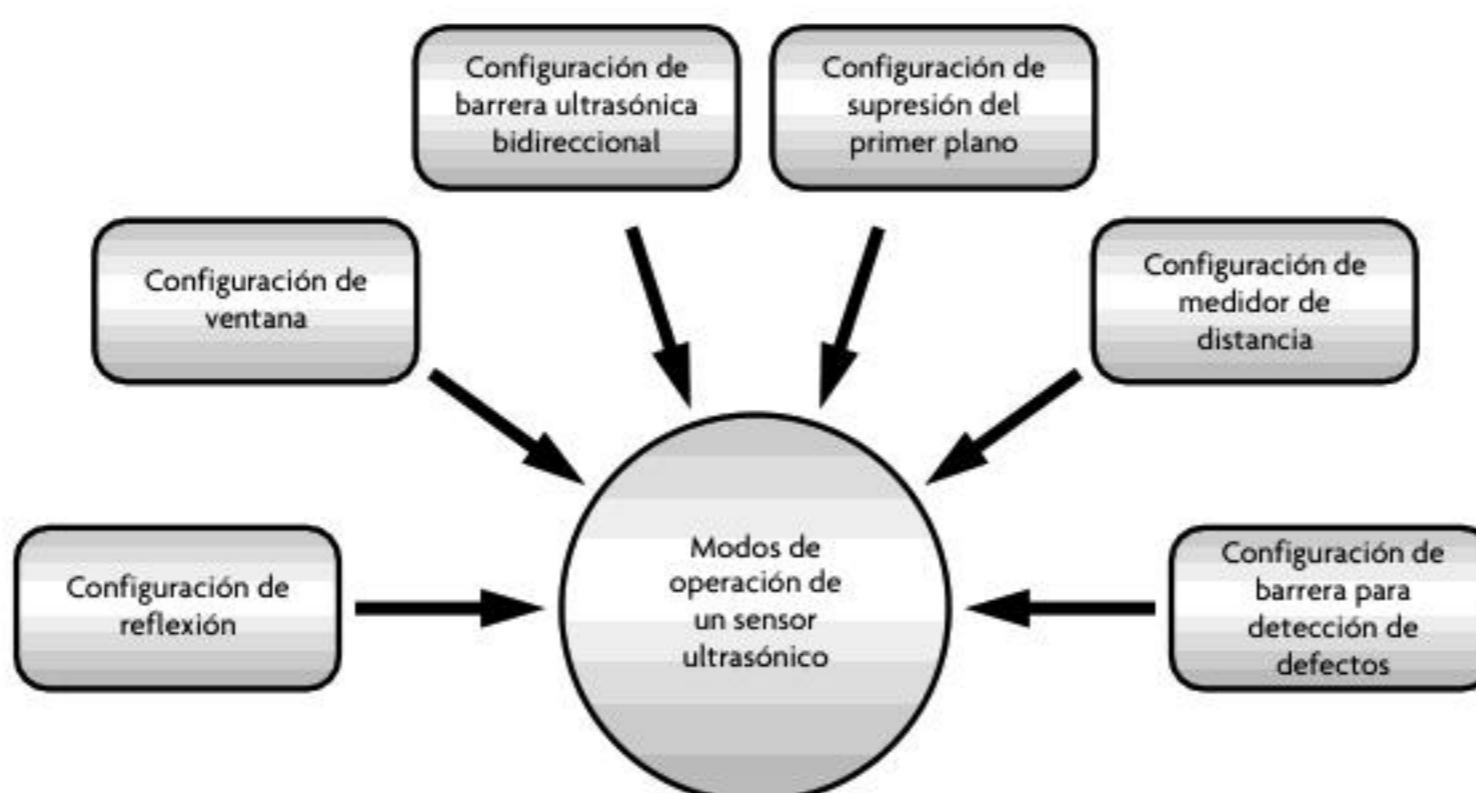
dentro de la cual es posible detectar un objeto), la zona ciega (zona en la cual un objeto no puede ser identificado y que se caracteriza por estar muy próxima al sensor), la zona de exploración funcional (zona dentro de la cual el sensor opera de manera típica) y la zona de exploración límite (zona en la cual es posible detectar solo objetos que presentan buenas propiedades acústicas).

### Modos de operación de un sensor ultrasónico

Un sensor ultrasónico puede usarse en distintos modos, de acuerdo con el tipo de medición que se desea obtener. En el diagrama de la figura 5.7 se listan los posibles modos de colocación.



**Figura 5.6** Zonas de detección del sensor.



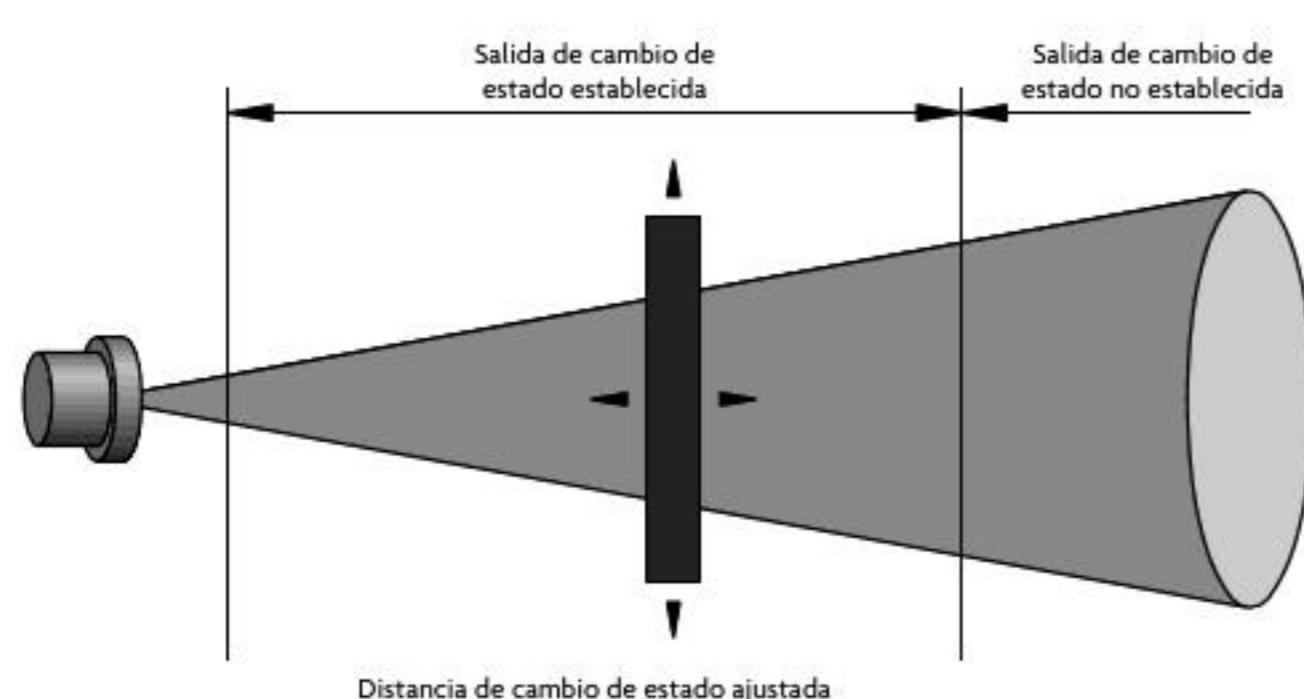
**Figura 5.7**

#### Configuración de reflexión

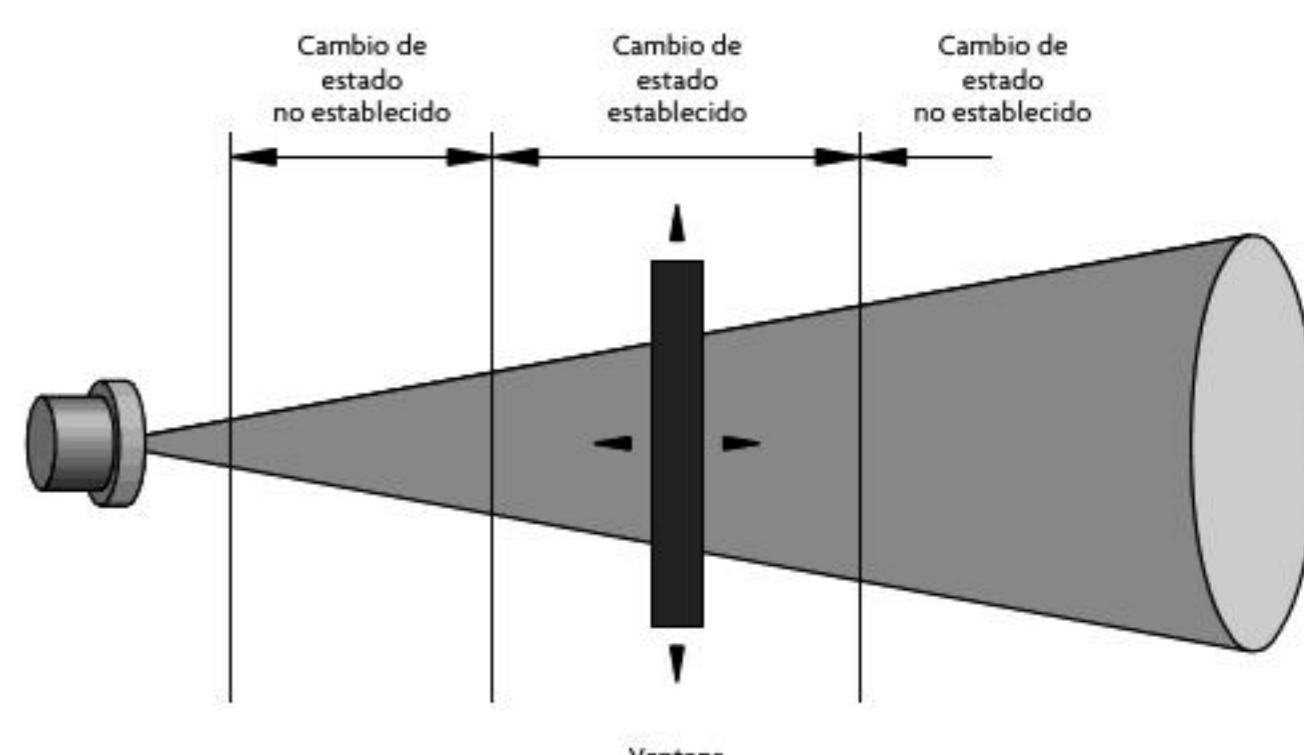
Este modo de operación se caracteriza por su similitud a un sensor de presencia convencional (óptico, magnético, etcétera). Este registra un cambio de estado cuando detecta un objeto dentro de un umbral (véase figura 5.8).

#### Configuración de ventana

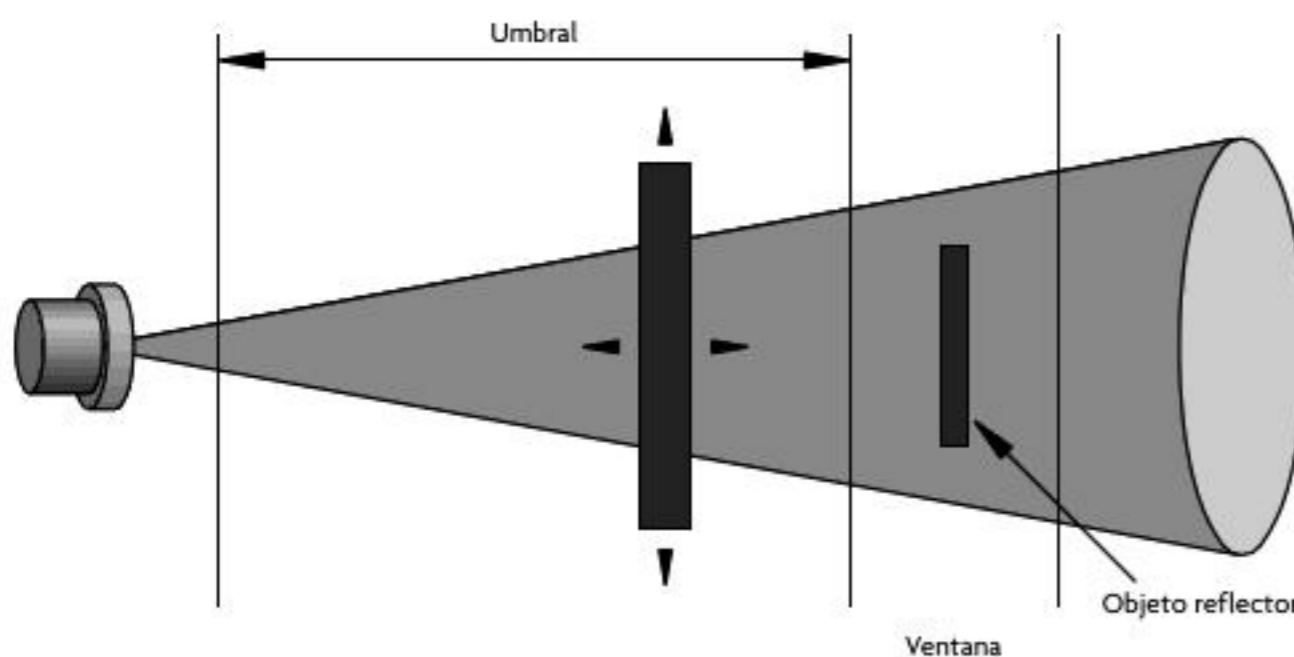
Esta configuración se caracteriza por tener un cambio de estado cuando el objeto se halla dentro de una ventana definida por dos límites (véase figura 5.9).



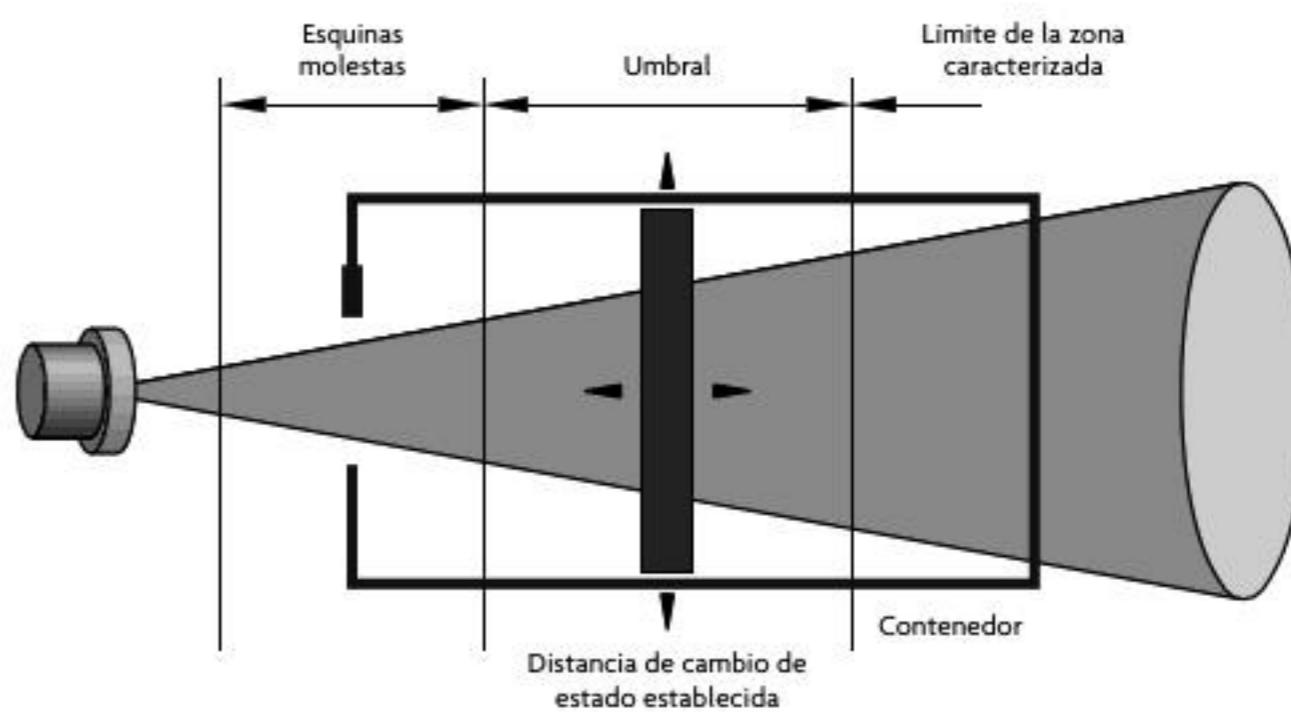
**Figura 5.8** Sensor ultrasónico en configuración de reflexión.



**Figura 5.9** Sensor ultrasónico en configuración de ventana.



**Figura 5.10** Sensor ultrasónico en configuración de barrera bidireccional.



**Figura 5.11** Sensor ultrasónico con configuración de supresión de primer plano.

### Configuración de barrera ultrasónica bidireccional

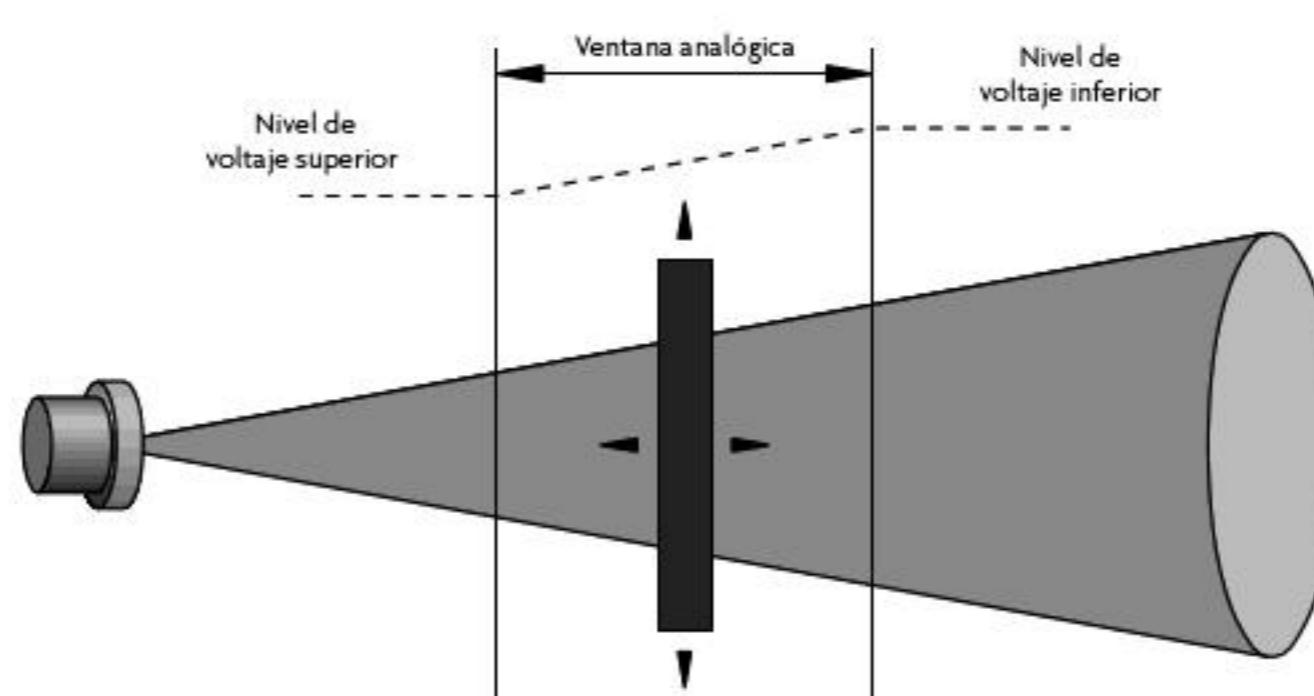
El principio de funcionamiento de esta configuración es muy similar a la de ventana; la diferencia radica en que se requiere de un objeto reflector, el cual debe estar dentro de la ventana. Así, al colocar el objeto que se desea detectar, este interrumpe la reflexión proveniente del reflector. Esta configuración se usa para objetos de difícil detección, como materiales espumosos o con superficies muy irregulares (véase figura 5.10).

### Configuración de supresión del primer plano

Esta configuración se basa, al igual que la de barrera ultrasónica bidireccional, en la configuración de ventana; la diferencia radica en que esta evita medir las esquinas indeseables de los recipientes. Por ejemplo, si se desea medir el nivel de líquido dentro de una botella, la medición podría ser afectada por la detección de la boca de la botella (véase figura 5.11).

### Configuración de medidor de distancia

Esta configuración se caracteriza por permitir medir la distancia del emisor a un objeto, líquido, etcétera. Para determinar las distancias se debe hacer una caracterización previa dentro de una ventana de trabajo, donde los límites de la ventana deben corresponder a un nivel de voltaje o corriente medidas en el receptor. En general, esta salida es analógica.



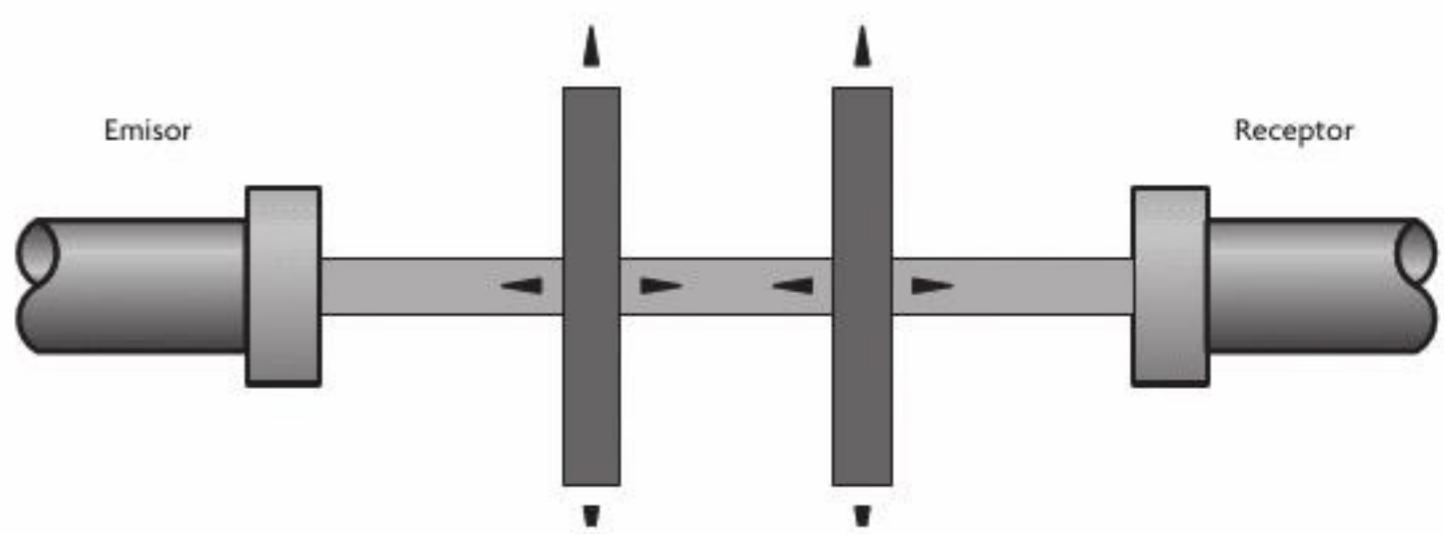
**Figura 5.12** Sensor ultrasónico con configuración de medidor de distancia.

### Configuración de barrera para detección de defectos

Esta configuración se caracteriza por la posición en la que se encuentran el emisor y el receptor, ya que, a diferencia de las anteriores configuraciones, estos se deben posicionar frente a frente (véase figura 5.13).

figura 5.13). Esta configuración solo sirve para detectar objetos delgados, como hojas, láminas o cartones (estos deben ser delgados y antivibratorios; además, no deben ser aislantes<sup>1</sup> ni absorbentes). Permite detectar cuántas hojas han sido colocadas o identificar si alguna tiene algún defecto.

**Figura 5.13** Sensor ultrasónico con configuración de barrera para detección de defectos.



## Ejercicio de aplicación

### Uso de un sensor ultrasónico como detector de presencia, en configuración de reflexión

#### Objetivo

Detectar objetos dentro de un rango de 2 centímetros a 3 metros a través del sensor GH-311 empleando el Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor ultrasónico GH-311
- Servomotor Power HD 3001 HB
- 1 resistencia de  $330\ \Omega$
- LED JUMBO color blanco
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del sensor GH-311

El GH-311 es un sensor ultrasónico capaz de detectar objetos en un rango desde 2 centímetros hasta 3 metros. El sensor consta de un transmisor TX que emite una señal ultrasónica a 40 kHz; si esta señal se refleja en alguna superficie u objeto dentro del rango señalado, será captada por su receptor RX.



**Figura 5.14** Sensor ultrasónico GH-311.

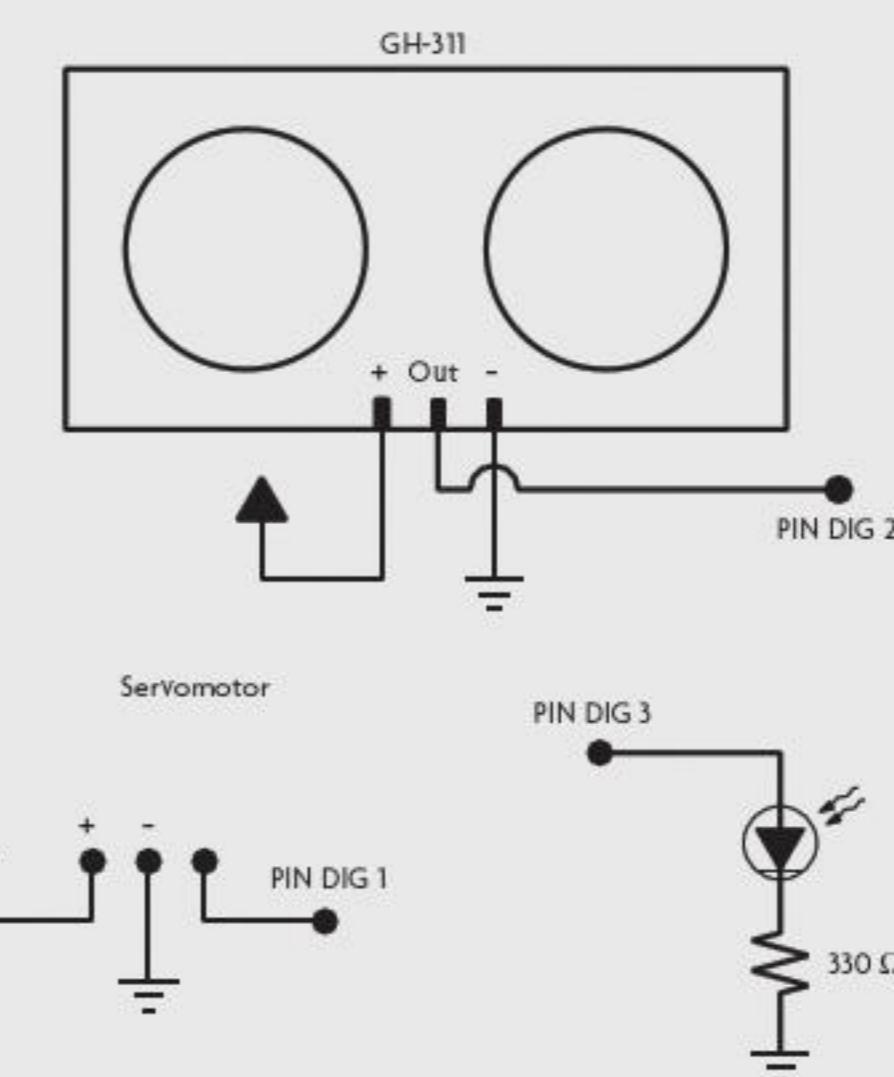
La descripción de los pines del sensor es la siguiente:

- **VCC.** Voltaje de alimentación del sensor de 5 V.
- **OUT.** Pin que indica la detección de algún objeto. Si es '1' lógico, un objeto se encuentra dentro del rango de detección del sensor. '0' lógico significa sin obstáculos.

#### Construcción del circuito

La práctica consiste en un sensor ultrasónico GH-311 montado sobre un servomotor. Durante la práctica, el servomotor gira despacio de derecha a izquierda y de izquierda a derecha, y el sensor busca objetos dentro de su rango en forma constante.

El sensor ultrasónico y el servomotor se conectan, de manera respectiva, en los pines digitales 2 y 9. Como alerta para indicar que algún objeto fue detectado, un LED con su resistencia limitadora de corriente se conecta al pin digital 3 del sensor. En la figura 5.15 se aprecia el diagrama del circuito.



**Figura 5.15** Diagrama del circuito detector ultrasónico.

<sup>1</sup> Se dice que un material es aislante cuando presenta características como alta rigidez, buena compactación y alta densidad.

## Código

### Descripción del programa

El siguiente programa tiene las características que se citan a continuación:

- Se configura la interrupción en el pin digital 2, llamando a la función `obstaculo()`, cuando la señal está en estado alto.
- Gira despacio al servomotor de izquierda a derecha y de derecha a izquierda. Recuérdese que su rango está comprendido entre 0 y 180 grados.
- Cuando ocurre la interrupción como resultado de la detección de un objeto, un LED parpadea durante tres segundos aproximadamente y el movimiento del servomotor se paraliza.

```
*****Detector ultrasonico de obstaculos*****
/*El GH-311 es un sensor ultrasonico que
detecta obstaculos en un rango
entre 2 cm y 3 m. La frecuencia ultrasonica
del sensor es de 40 kHz.
/*En el siguiente programa se controlara el
movimiento de un servomotor
/*de derecha a izquierda y viceversa. Sobre
dicho servomotor se monta
/*el sensor ultrasonico GH-311 que en todo
momento buscara objetos
/*dentro de su rango.
/*Se incluye la libreria para el control del
servomotor
#include <Servo.h>
//Se crea el objeto servomotor
Servo servomotor;
//Variables empleadas
int giro, count = 0;
boolean sentido = false;
```

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
void setup()
ebrary {

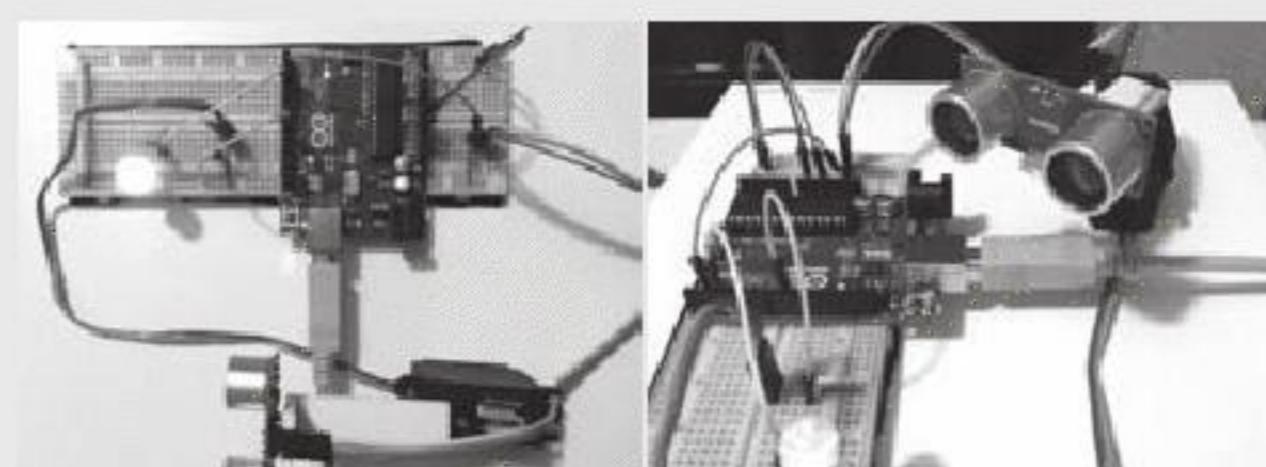
```
    servomotor.attach(9); //Se asigna el PIN
    DIG 9 como la salida del
    //control para el servomotor.
    pinMode(3, OUTPUT); //PIN DIG 3 para la
    alarma de deteccion de
    //algun objeto
    attachInterrupt(0, obstaculo, HIGH); //Se
    habilitan las interrupciones
    //cuando el PIN DIG 2 este en 'Alto' llamando
    a la funcion obstaculo().
}
void loop()
{
    //Giro horario del servomotor
    if (sentido == false) //Mientras sentido =
    false -> Giro horario
    {
        giro++; //El incremento del
        servomotor es de 1°
        if (giro == 180) //Cuando se completa la
        media vuelta se invierte el
```

```
        sentido = true; //sentido de giro.
    }
    //Giro antihorario del servomotor
    else//Mientras sentido = true -> Giro
    antihorario
    {
        giro--; //El incremento del
        servomotor es de 1°
        if (giro == 0) //Cuando se complete la
        media vuelta se invierte el
        sentido = false; //sentido de giro.
    }
    servomotor.write(giro); //Servomotor se
    coloca en la posicion <giro>
    delay(100); //Velocidad de giro del
    servomotor. Mientras mayor
    //sea el valor del retardo menor es la velocidad
    de giro. Se recomienda //una velocidad
    relativamente baja, para una mejor deteccion.
}

void obstaculo() //Si se detecta un objeto.
{
    while(count != 100) //Durante 100 ciclos el
    servo se detiene y se
    //indica la alarma con un LED
    {
        digitalWrite(3, HIGH); //Parpadeo del
        LED. Notese que no se
        delayMicroseconds(15000); //utiliza la
        funcion delay() pues presenta
        digitalWrite(3, LOW); //fallas en
        interrupciones en su lugar se
        delayMicroseconds(15000); //utiliza la
        funcion delayMicroseconds()
        count++; //Se incremente el contador.
    }
    count = 0; //Se reinicia el contador
}
```

### Pruebas

Detección de un objeto dentro del rango del sensor ultrasónico GH-311 (véase figura 5.16).



**Figura 5.16** Detección de un objeto; como alarma se enciende un LED.

Mientras no se detecte algún objeto, el servomotor gira y el LED se mantiene apagado.



En el circuito de conexión de la figura 5.18 los pines Trig y Echo se conectan a los pines digitales 12 y 13 del Arduino®, respectivamente, además de la alimentación a 5 V.

## Código

### Descripción del programa

- El siguiente programa tiene las características que se citan a continuación:
- Envía un pulso en alto al PIN Trig de sensor con una duración de 15  $\mu$ s, con lo que se inicia una medición del sensor.
- Espera hasta que los 8 pulsos a 40 kHz sean emitidos por el TX y el pulso Echo se coloque en alto.
- Se espera hasta que la señal pulso regrese a estado bajo y se cuenta el tiempo que la señal Echo estuvo en alto.
- Se calcula la distancia en centímetros con el uso la ecuación 5.1 y se imprime en el monitor serie.

```
*****Sensor de distancia ultrasonico*****
/*
**El HC SR04 es un sensor ultrasonico que es
  capaz de medir la
**distancia hacia algun obstaculo a traves
  del tiempo que tarda una señal
**en salir del TX y regresar al RX.
*/
/**En el siguiente programa se medira el tiempo
  que demora una señal del
**TX,luego de rebotar sobre algun obstaculo, en
  regresar al RX. Con
**este tiempo se realiza el calculo de la
  distancia entre el sensor
**y el objeto.
*****
```

```
#define echo 5 //Se define el PIN DIG 13 para
la señal que contiene el //tiempo de la RX a
la TX
#define trig 12 //El PIN DIG 12 corresponde a
una señal de salida para //activar el sensor y
tomar una lectura.
//Variables empleadas
unsigned long start, finish, time;
float dist;
void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
comunicacion serie a 9600 baudios
    pinMode(echo, INPUT); //Se declara como
entrada el PIN que recibe la
//señal del sensor
    pinMode(trig, OUTPUT); //Se declara como
salida el PIN que activa al
//sensor
}
void loop()
{
```

```
digitalWrite(trig, HIGH); //Se envia un pulso
en alto que activa el
//sensor.
delayMicroseconds(15); //Debe tener una
duracion de al menos 10 ms
digitalWrite(trig, LOW);

//Esperamos a que el sensor envie una señal
ultrasonica a 40 kHz y se
//comience el conteo del tiempo.
while(digitalRead(echo) == LOW)
;

start = micros(); //Se inicia el conteo del
tiempo en microsegundos.
//Por las caracteristicas del sensor (oscilador de
//16 MHz) el conteo se
hara en multiplos de 4.
while(digitalRead(echo) == HIGH) //Esperamos a
que el RX reciba la
//señal del TX
;

finish = micros(); //Terminamos el conteo

time = finish - start; //Se calcula el tiempo
transcurrido entre la
//transmision y la recepcion.
if (time > 25000) //Dadas las limitantes
del sensor si el tiempo
//es mayor de 25 ms puede tratarse de una
lectura
    time = 0; //erronea. Si el tiempo es de 38
ms se da por hecho que el
        //RX no recibio ninguna señal.

dist = 0.01715*time; //Se realiza el
calculo de la distancia. Si d = //v el*tiempo
considerando que la velocidad del sonido en el
aire es de //343 m/s:
//      d = 34300 cm/s * (tiempo*10^-6)s =
0.0343*time cm
//Esta distancia es la recorrida por la señal
del RX al cuerpo y del //cuerpo al TX, por lo
que es necesario dividirla entre 2, obteniendo
//asi:
//      d = 0.01715*time cm

Serial.print("Distancia: "); //Se imprime la
distancia al objeto en cm.
Serial.print(dist);
Serial.println(" cm");

delay(15); //Retardo por estabilidad. Tiempo
de espera para una nueva
//medicion
}
```

### Pruebas

**Distancia 1.** Un objeto se coloca a una distancia aproximada de 22 cm del sensor.

Al colocarse un objeto a una distancia de 22.8 cm (flexómetro), el sensor HC-SR04 lo ubica a 22.09 cm, que es un valor muy próximo al real.

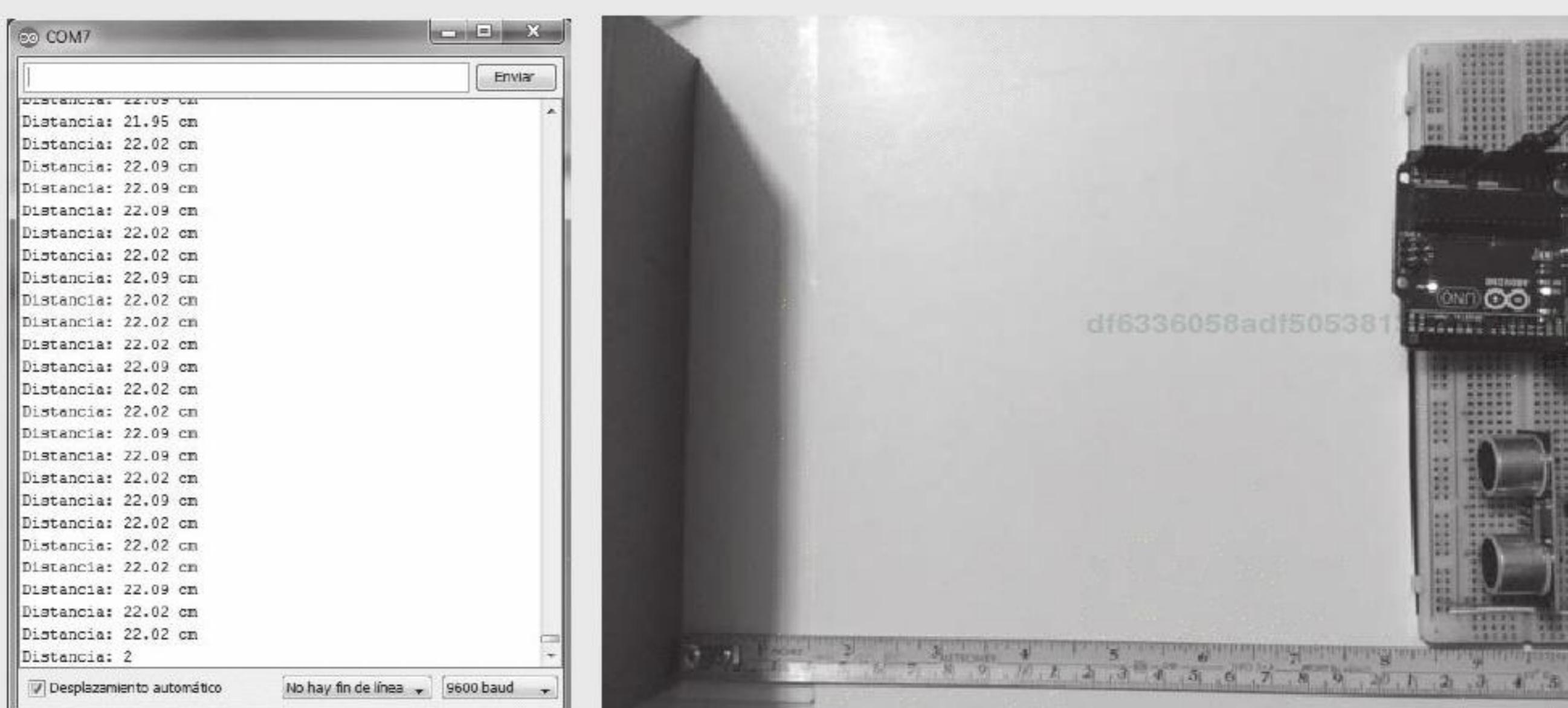


Figura 5.19 Medición distancia 1.

## 5.3 Resistivos

En el capítulo 3 se analizan los sensores resistivos para la medición de posición angular, mejor conocidos como potenciómetros; en este caso, debido a la configuración utilizada es un transductor **entre el cambio de resistencia y el nivel de llenado de un contenedor**. Los potenciómetros constan de tres terminales, una en cada extremo del material resistivo y una que recorre el cuerpo del elemento resistivo, de tal manera que la resistencia entre la terminal móvil y cada una de las terminales fijas varía cuando cambia de posición el elemento móvil. En este caso, el elemento móvil es un flotador que se sitúa dentro del contenedor. Así, cuando aumenta el nivel dentro del contenedor, el flotador obliga al elemento móvil a registrar un cambio en la resistencia; si una resistencia disminuye, la otra necesariamente aumentará. El circuito equivalente se muestra en la figura 5.20.

Si el elemento móvil se desplaza en sentido positivo, la magnitud de la resistencia entre el nodo 1 y el nodo 2 disminuye, por lo que la resistencia entre el nodo 2 y el nodo 3 aumenta. Por el contrario, si el elemento móvil se desplaza en sentido opuesto, la resistencia entre el nodo 1 y el nodo 2 aumenta, por lo que la resistencia entre el nodo 2 y el nodo 3 disminuye.

Para la aplicación de este tipo de sensores se suelen utilizar potenciómetros rotacionales, aunque también es posible desarrollar esta configuración con potenciómetros lineales. Una de las grandes

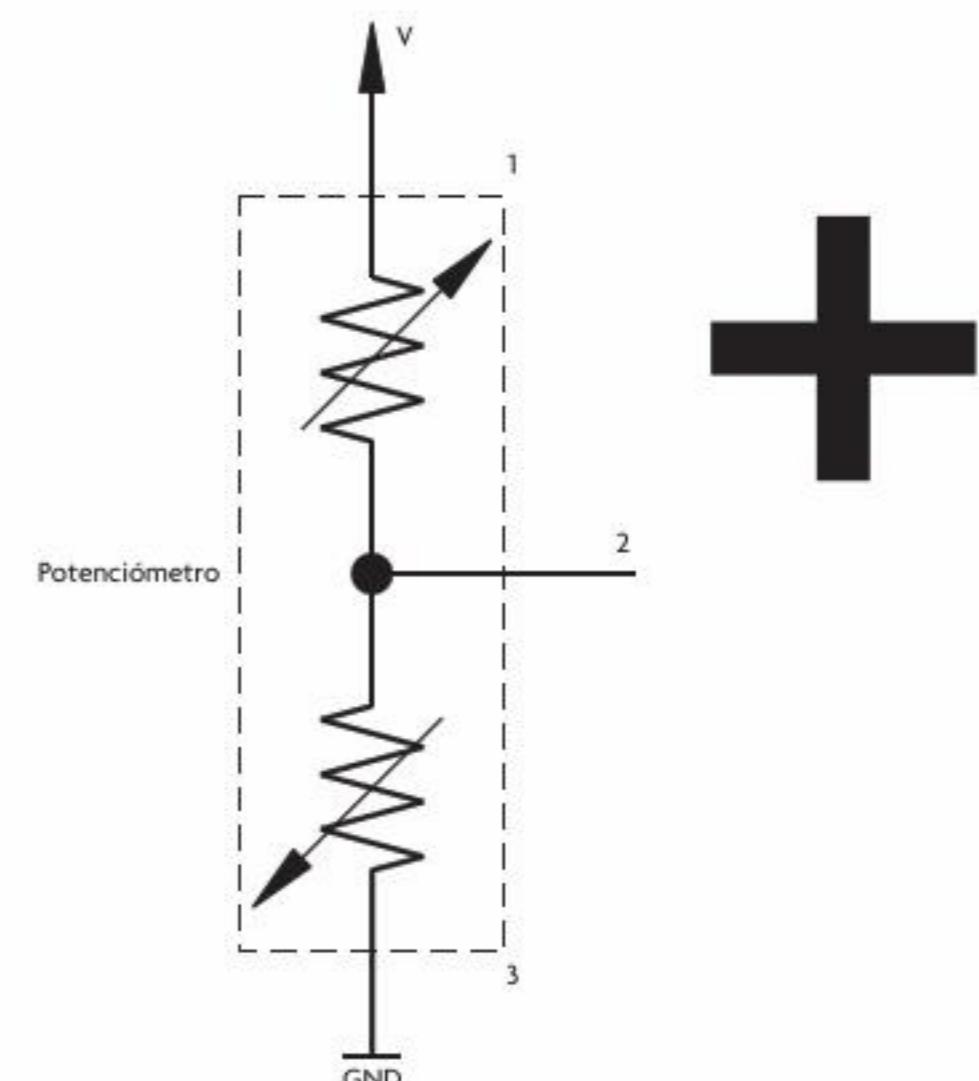
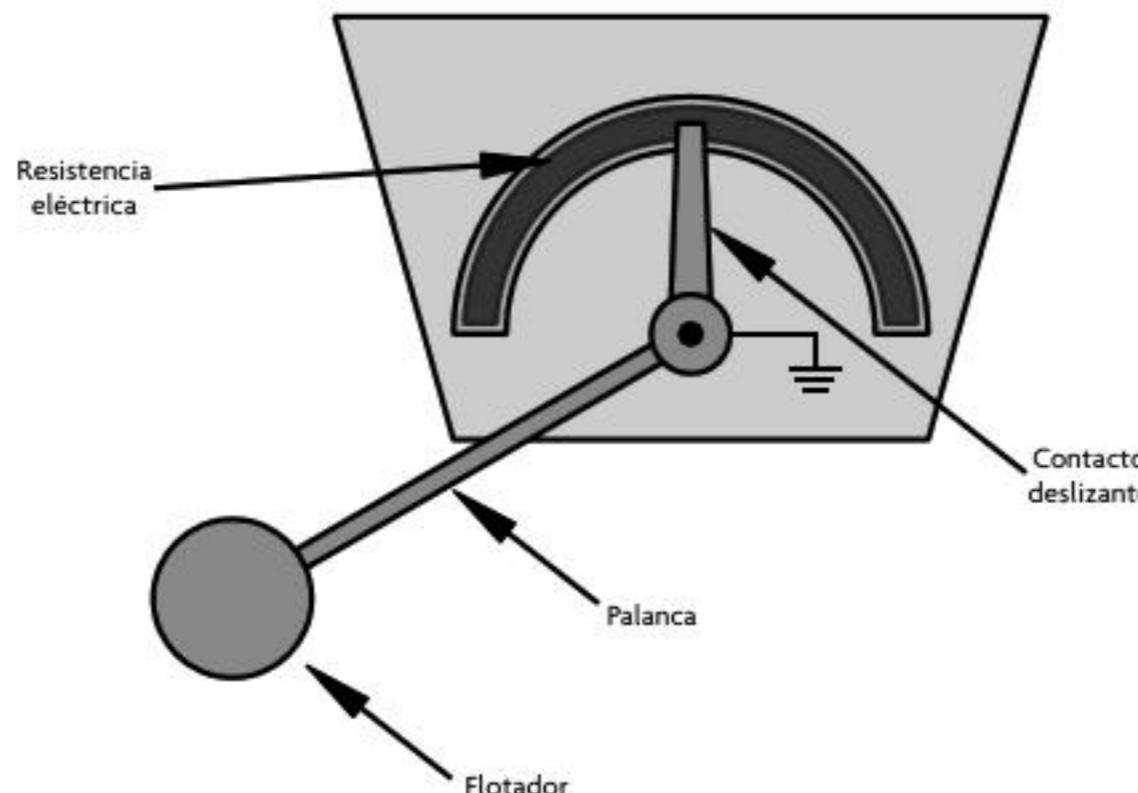


Figura 5.20 Circuito equivalente de un potenciómetro.

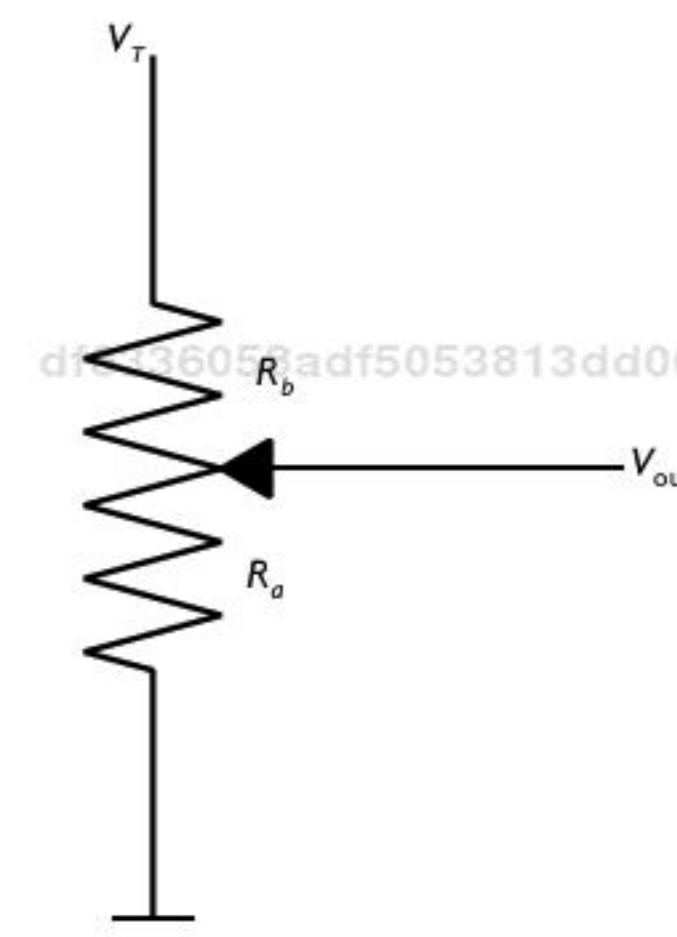
desventajas que presenta este tipo de sensado es que se requiere de contacto entre el flotador y el elemento que se está midiendo; asimismo, se necesita un cople mecánico entre el sensor y el flotador. Una ventaja es que la implementación de este tipo de detección es más barato en comparación con el resto de los sistemas para medición de nivel.

La arquitectura básica para un potenciómetro como medidor de nivel se muestra en la figura 5.21.

Para determinar en qué posición se encuentra el elemento móvil se utiliza un divisor de voltaje. La forma de representar un potenciómetro en un circuito eléctrico es mediante el uso de un solo símbolo de resistencia y el indicador móvil, como se muestra en la figura 5.22.



**Figura 5.21** Potenciómetro rotacional como medidor de nivel.



**Figura 5.22** Símbolo de un potenciómetro.

Para lograr una correlación entre el voltaje de salida y el nivel en el contenedor se emplea un divisor de voltaje:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_a}{R_b + R_a} V_T$$

La resistencia  $R_a$  está dada entre el nodo de referencia a tierra y el nodo de  $V_{\text{out}}$ ; por su parte, para el caso de la resistencia  $R_b$ , está dada entre el nodo de  $V_T$  y el nodo de  $V_{\text{out}}$ . Al momento de utilizar este tipo de instrumentación para determinar el nivel en el contenedor se debe tener en cuenta qué características tiene el potenciómetro, ya que para estas aplicaciones lo más recomendable es utilizar un potenciómetro cuyo cambio a la salida sea lineal.

## Ejercicio de aplicación

### Uso de un potenciómetro como medidor de nivel

#### Medidor de nivel con flotador

#### Objetivo

Medir el nivel de agua dentro de un recipiente a través de un flotador empleando el Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- 1 potenciómetro de 10 kΩ
- Flotador

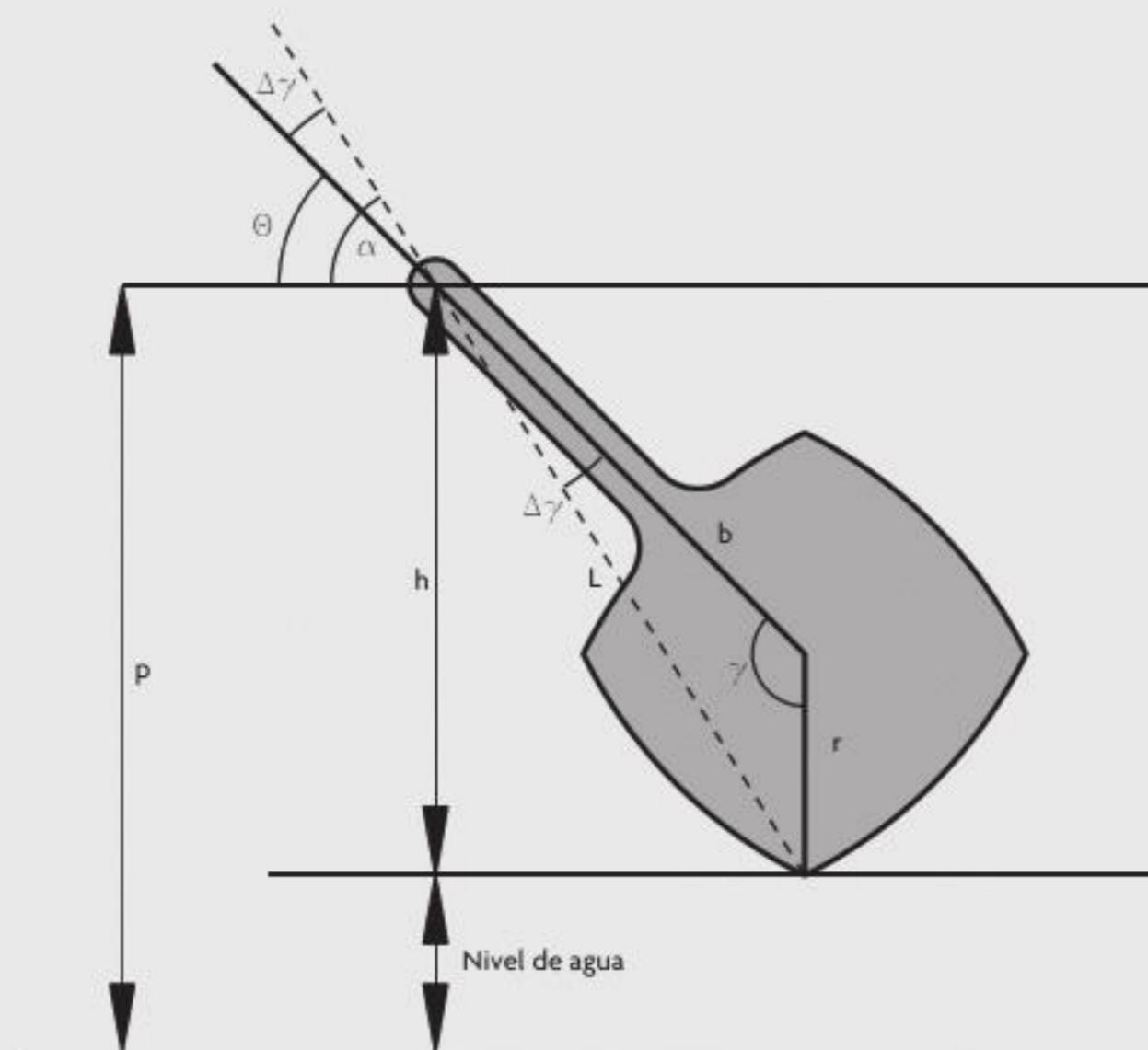
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

#### Descripción del potenciómetro

El potenciómetro es un dispositivo eléctrico que actúa como un divisor de voltaje o como resistencia variable (reóstato), según su conexión.

## Ecuaciones del mecanismo



**Figura 5.23** Mecanismo del flotador para medir el nivel del líquido.

Si el globo del flotador es significativamente grande con respecto a su brazo de palanca, como en este caso, debe considerarse su radio en el desarrollo de las ecuaciones.

El vector **L** que parte del origen al punto donde el agua hace contacto con el flotador forma un triángulo con su radio **r** y brazo de palanca **b**. Sabiendo que el ángulo  $\varphi$  entre **b** y **r** depende de la inclinación  $\theta$  del brazo del flotador, puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\varphi = \theta + 90^\circ$$

Con el que puede obtenerse la magnitud del vector  $\mathbf{L}$ , aplicando la ley de cosenos:

$$L = \sqrt{b^2 + r^2 - 2 \times b \times r \times \cos(\varphi)}$$

Para proyectar el vector  $\mathbf{L}$  sobre el eje  $y$  debe conocerse el ángulo opuesto al lado  $\mathbf{r}$ , llamado  $\Delta\phi$ , que se obtiene a partir de la ley de senos:

$$= \arcsen\left(r \times \frac{\sen}{\gamma}\right)$$

La inclinación total  $\alpha$  del vector  $\mathbf{L}$  está dada por:

$$\alpha \equiv \Delta\varphi + \theta$$

La altura sobre el eje y del flotador es:

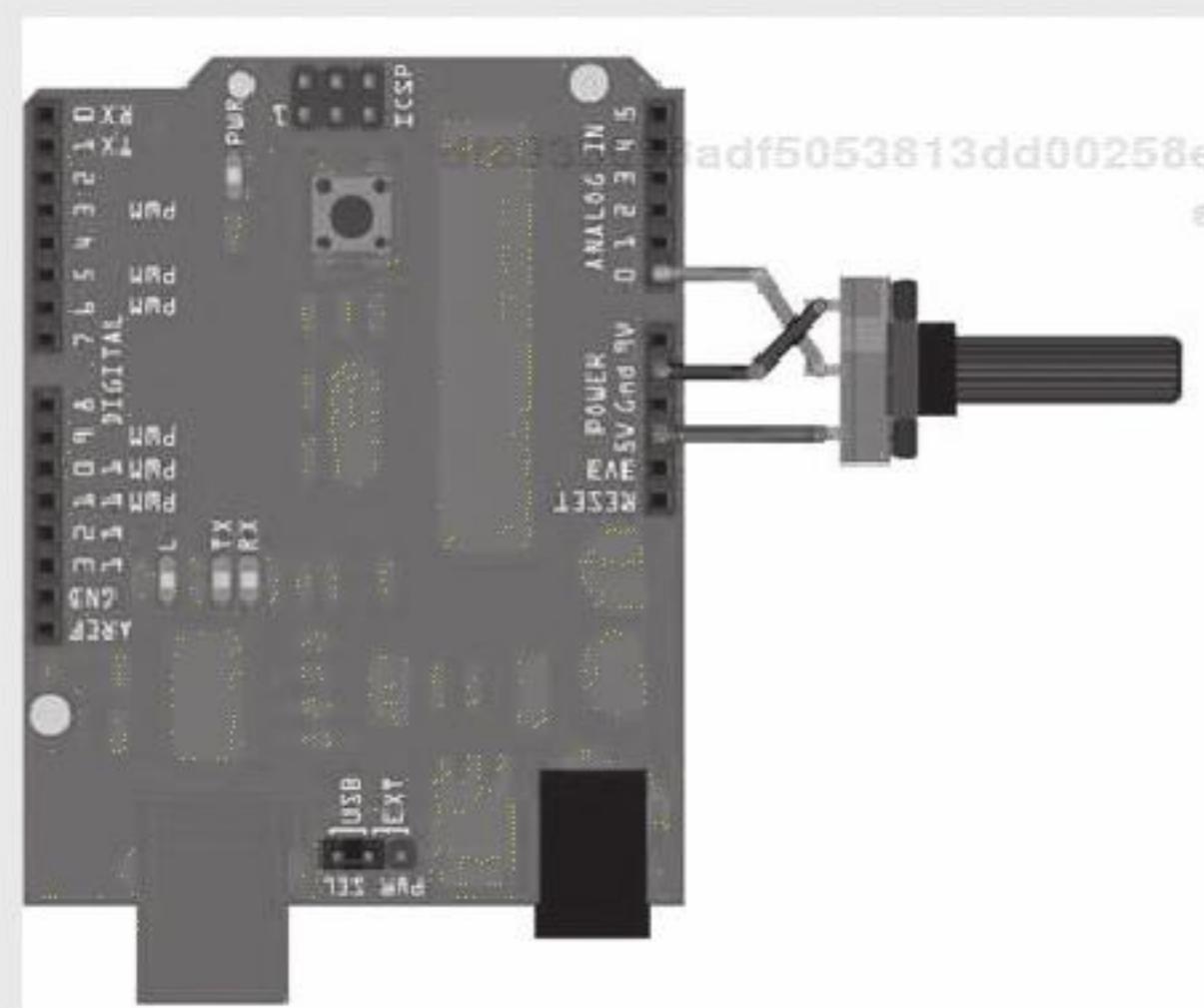
$$h = l \times \text{sen}(\alpha)$$

Si la profundidad total del recipiente es  $p$ , el nivel del agua está dado por:

$$\text{nivel del agua} = p - h$$

Para esta práctica, el flotador utilizado tiene un brazo de palanca  $b = 17.5$  cm y el radio del globo es  $r = 5$  cm. En la figura 5.24 se aprecia el modelo empleado.

## Construcción del circuito



**Figura 5.24** Circuito de conexión del potenciómetro.

La configuración de potenciómetro es como un divisor de voltaje. Para unir el potenciómetro con el flotador se utiliza un cople; el ensamble final se aprecia en la figura 5.25.



**Figura 5.25** Flotador acoplado al potenciómetro.

## Código

### Descripción del programa

El siguiente programa tiene las características que se citan a continuación:

- Realiza la lectura y conversión analógica-digital del voltaje de salida de la celda de carga y se almacena en un buffer con una capacidad de hasta 20 datos.
- Promedia los 20 datos de buffer para suprimir algunas variaciones en la lectura.
- Calcula el nivel del agua con el uso de las ecuaciones del mecanismo y lo imprime en el monitor serie.

```
/*Por medio de un flotador acoplado a un
potenciómetro puede calcularse
el nivel de agua en algun recipiente.
*/
/*El programa obtendra el promedio de 20 datos
para reducir el ruido de//la señal.
******/
```

//Se declaran las constantes en el programa

```
constfloat Pi = 3.1416; //Valor aproximado de
PI.
constfloat _recip = 16; //Altura del contenedor
de agua
constint sample = 20; //Numero de muestras a
promediar
```

//Se declaran las variables a emplear

```
int suma = 0, count = 0;
int buffer[sample], prom;
int readSensor;
int readPot;
```

```
float b = 17.5;//Distancia entre los centros de
potenciómetro y el //flotador.
float r = 5; //Radio de la esfera del flotador
float theta, phi, L;
float h, alpha, delta_phi, p;
```

```
void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
comunicacion serie a 9600 baudios
    for (int i = 0; i < sample; i++)//Se define en
ceros el vector que
//almacena los datos a promediar
    buffer[i] = 0;
}
```

```
void loop()
{
    suma = suma - buffer[count]; //Se resta el
valor anterior, donde se
```

```
//almacena uno nuevo
buffer[count] = analogRead(A0); //Se realiza
una lectura y se almacena
//en el buffer
suma += buffer[count];//Se suma al resto de
los valores para iniciar el
//calculo del promedio
count++; //Se incrementa el contador

readPot = suma / sample; //Calculo del
promedio

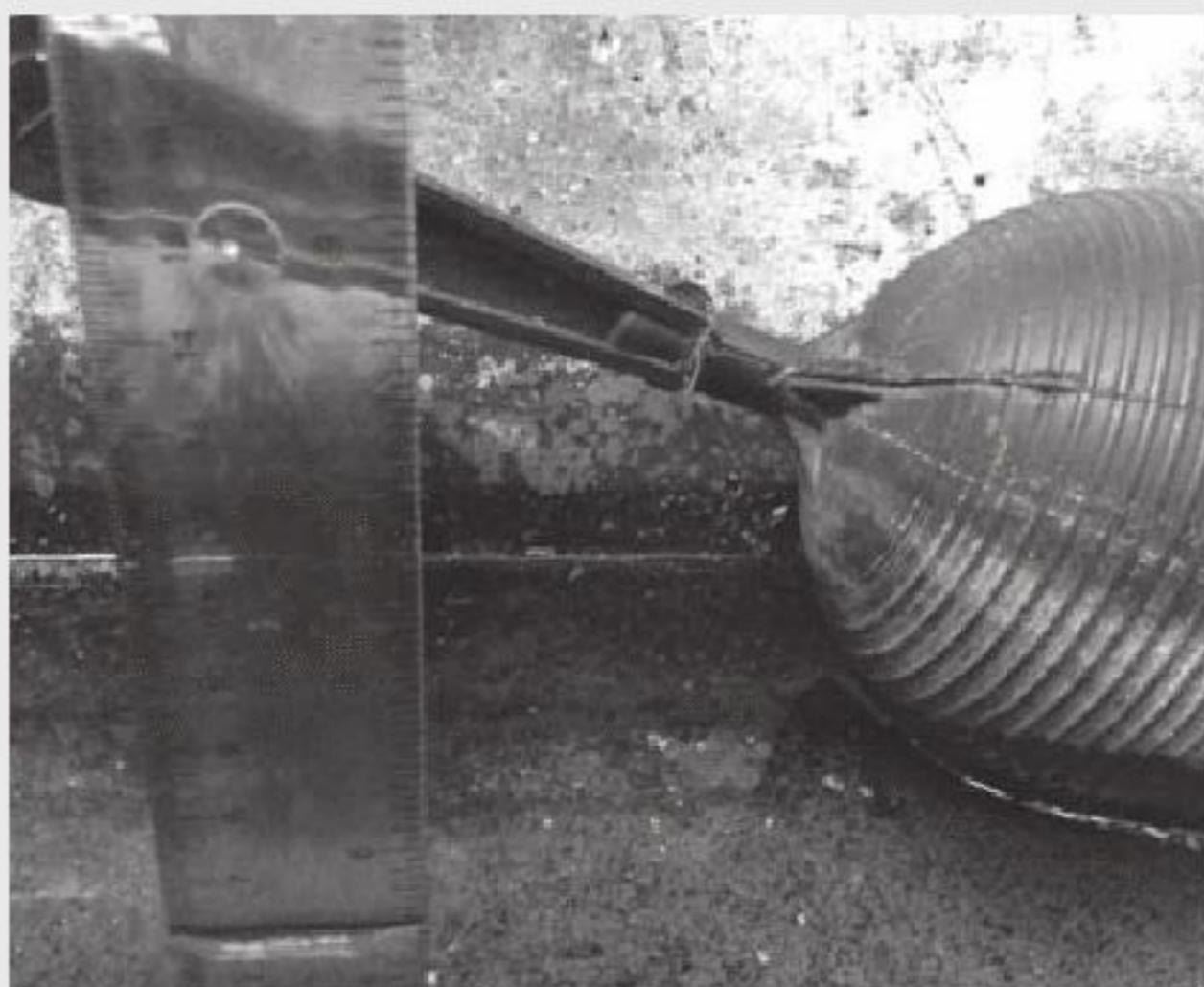
if (count >= sample) //Se reinicia el contador
cuando supera el tamaño
//del buffer
    count = 0;
    df6336058adf5053813dd00258e6f84c
ebrary
readPot = map(readPot, 880, 266, 90, 0);//
Conversion de la lectura ADC
//a grados. Las equivalencias entre la
posicion angular y la lectura
//ADC se realizan de forma experimental.
theta = Pi*readPot / 180; //Conversion de
grados a radianes

//El calculo de la altura sobre el eje Y puede
observarse en el
//desarrollo de este reporte.
phi = theta + Pi/2; //Calculo
angulo PHI
L = sqrt(b*b + r*r - 2*b*r*cos(phi)); //Calculo
longitud del vector L
delta_phi = asin(r*sin(phi)/L); //Angulo
DELTA PHI
alpha = delta_phi + theta; //Angulo
ALPHA
h = L*sin(alpha); //Proyeccion sobre el
eje Y del vector L
p = h_recip - h; //Calculo del nivel de
agua en el recipiente

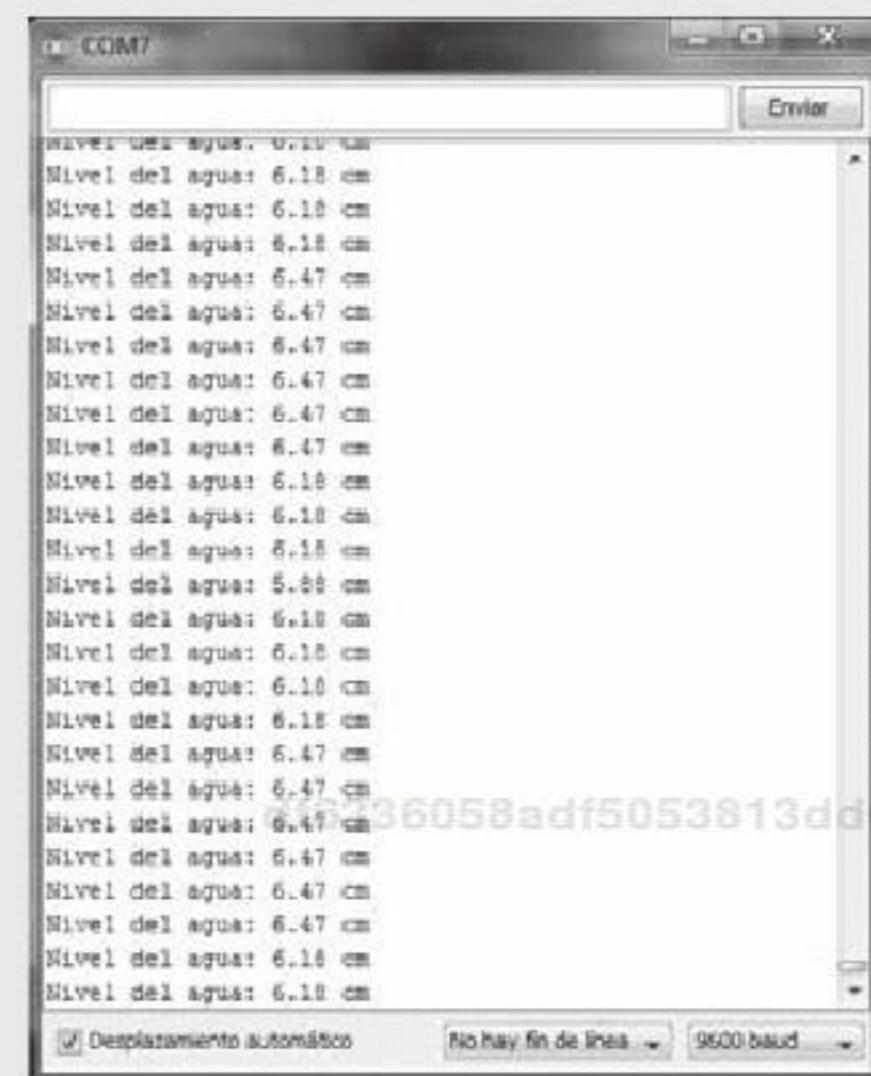
Serial.print("Nivel del agua: "); //Se
imprime el nivel de agua en el
Serial.print(p); ////
recipiente.
Serial.println(" cm");
delay(5); //Retardo por estabilidad
}
```

## Pruebas

Una vez instalado el flotador dentro de una pileta con una profundidad de 16 cm respecto al eje del flotador y variando la cantidad de agua que contiene, se obtienen los siguientes resultados.

**Nivel 1**

**Figura 5.26** Primera medición del nivel. Con la regla se registra una altura de 6.3 cm, mientras que el Arduino® registra una altura de 6.47 centímetros.



Para una primera medición colocamos una regla que mide el nivel del agua en 6.3 cm; en cambio, la lectura desde el potenciómetro es aproximadamente 6.47 cm, muy próxima a la estimada.

## 5.4 Ópticos

Los medidores de proximidad ópticos constan de dos elementos principales: 1) emisor de luz infrarroja y 2) elemento fotosensible, conocido como receptor (esta configuración se explica de manera más amplia en el capítulo 4); en general, los encapsulados están en un solo dispositivo, como se muestra en la figura 5.27.

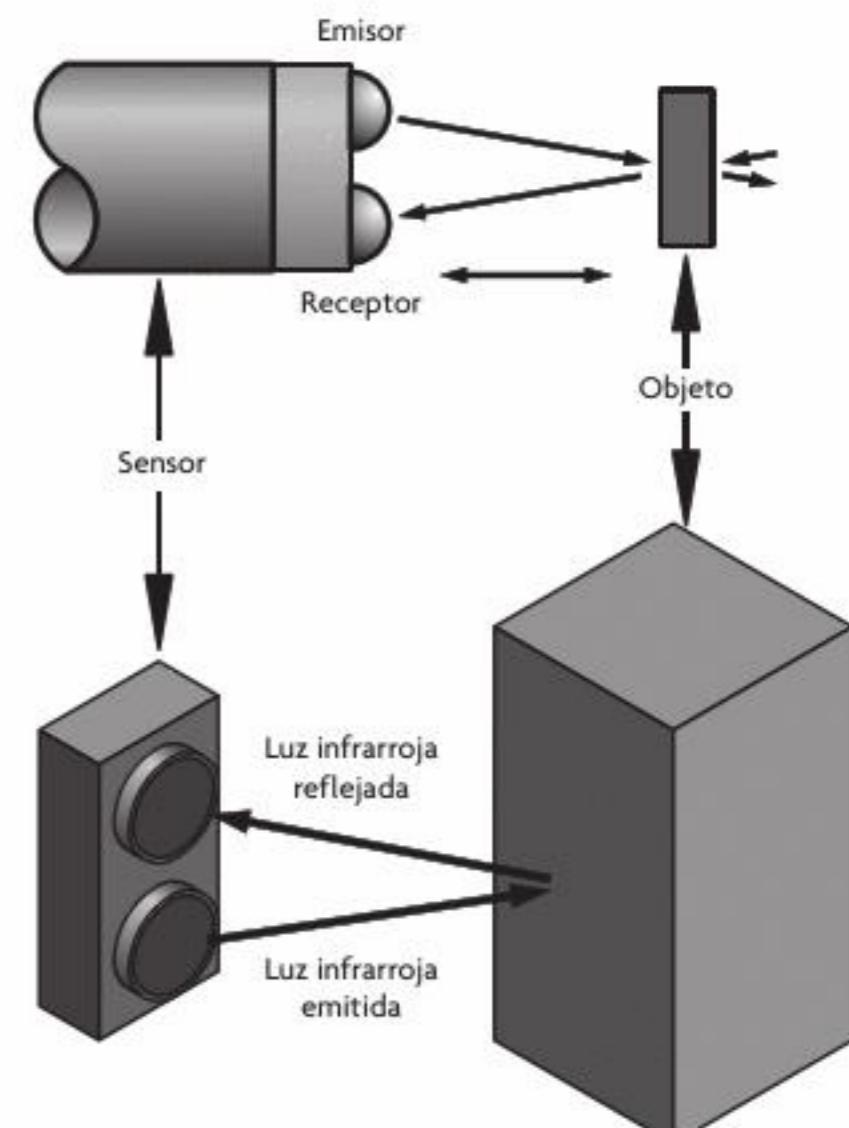
La configuración más utilizada para medir proximidad con este tipo de sensores se conoce como configuración de foco fijo, donde la intensidad de la señal registrada en el receptor depende de la proximidad del objeto al emisor. Esta configuración se utiliza para medidores de proximidad (véase figura 5.28).

El receptor es un elemento fotosensible, ya sea un fotodiodo o un fototransistor. Para este tipo de medidores lo más usual son los fototransistores conectados en modo activo. La configuración en modo activo, también conocida como *configuración lineal*,<sup>2</sup> consiste en medir el cambio de voltaje correspondiente a la intensidad de luz percibida por el elemento fotosensible. El modo de operación del fototransistor se manipula cambiando el valor de la resistencia de carga. En modo activo se debe cumplir con la siguiente condición:

$$\text{Modo activo: } V_{cc} > R_L \times I_C$$

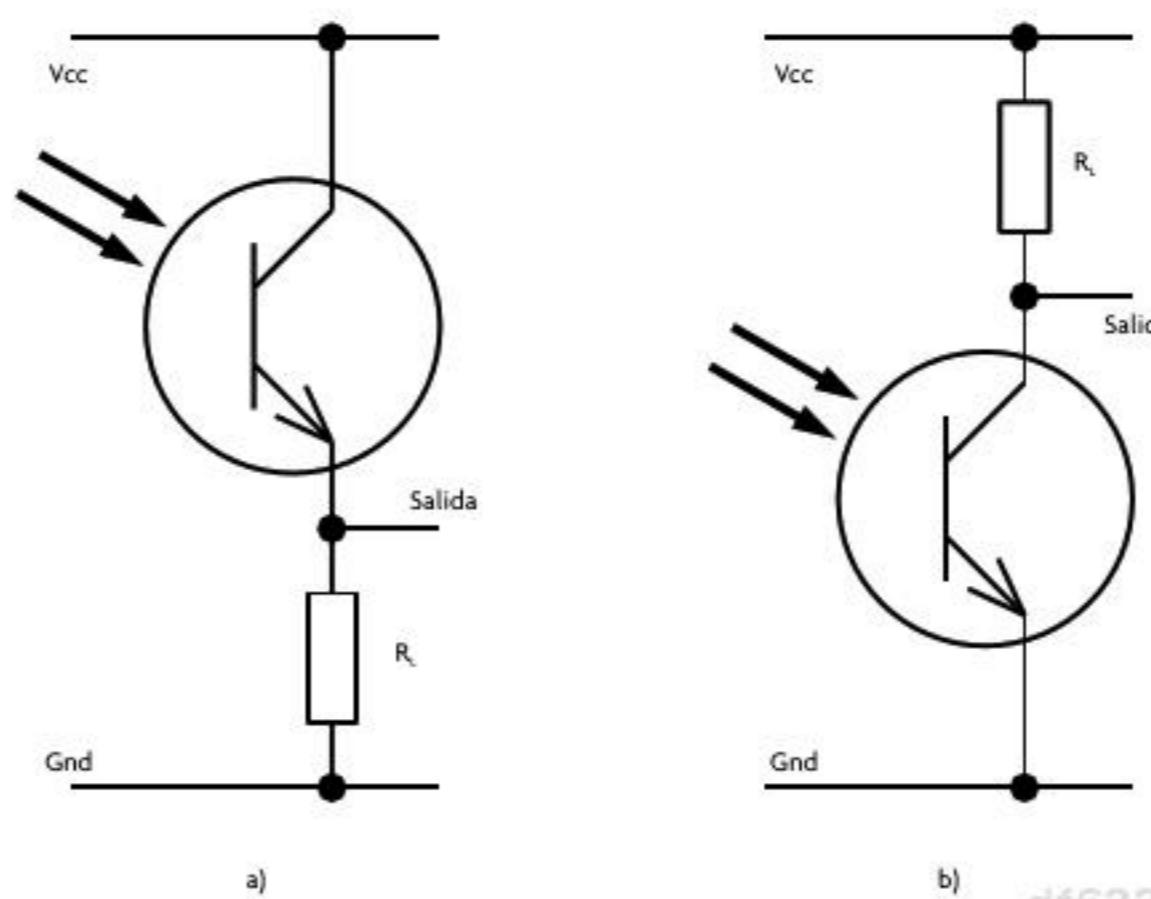


**Figura 5.27** Medidor de distancia Sharp®.



**Figura 5.28** Configuración de foco fijo, para el par emisor-receptor como medidor de proximidad.

<sup>2</sup> Esta configuración se llama lineal porque el transistor presenta cierta proporcionalidad entre la luz que percibe el elemento fotosensible y la corriente presente en el circuito, a pesar de que esta relación no es estrictamente lineal.

**Figura 5.29** Configuración para el fototransistor. a) Emisor común. b) Colector común.

donde:

$R_L$ : resistencia de carga

$I_C$ : corriente de colector

$V_{CC}$ : voltaje de alimentación

## 5.5 Capacitivos

El principio de transducción capacitivo tiene un amplio campo de aplicación para la detección de proximidad de un objeto. Al igual que los sensores inductivos y los sensores ultrasónicos, el principio de transducción no requiere de contacto con el objeto para determinar su proximidad; además, al igual que los sensores ultrasónicos, es posible detectar casi cualquier tipo de material, ya que es posible detectar objetos de materiales conductores y no conductores. En el caso de objetos no conductores, la distancia de detección depende del tamaño de este, así como de su valor de constante dieléctrica, mientras que para el caso de los objetos conductores los efectos de tamaño del objeto se ven minimizados, pudiendo ser detectados a distancias similares.

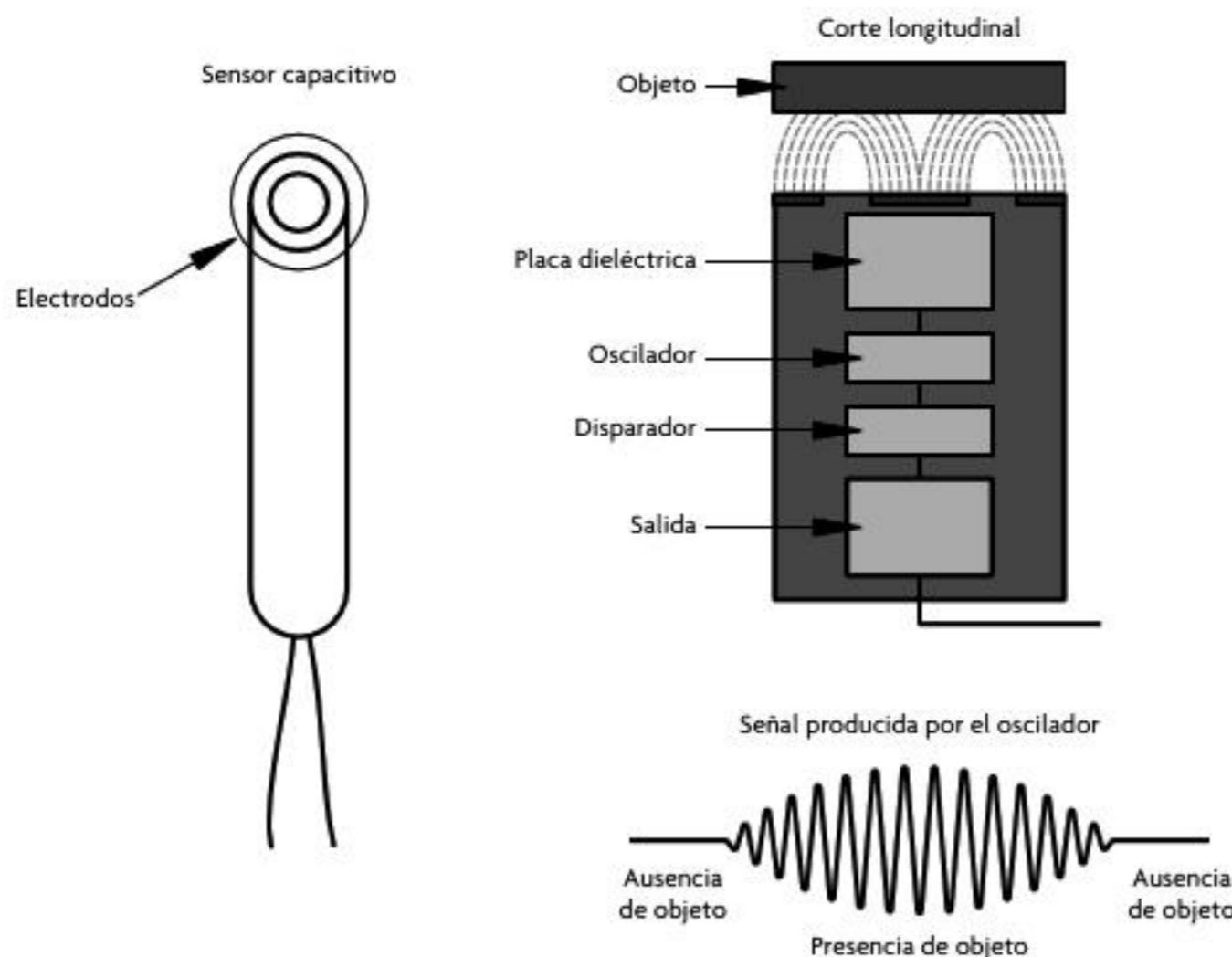
### Sensor capacitivo como sensor de nivel y proximidad

Estos sensores se caracterizan por generar un campo electrostático,<sup>3</sup> a diferencia de los sensores inductivos de proximidad que generan un campo electromagnético.<sup>4</sup> Un sensor de proximidad capacitivo está formado por dos electrodos en forma de discos concéntricos. Cuando un objeto se aproxima al sensor e interactúa con el campo electrostático formado entre estos, cambia la capacitancia equivalente del circuito. Este cambio de capacitancia produce un cambio de estado en el sensor, activando un circuito oscilador, el cual, a su vez, dispara el circuito activador, lo que produce a la salida un cambio de estado bajo a estado alto.

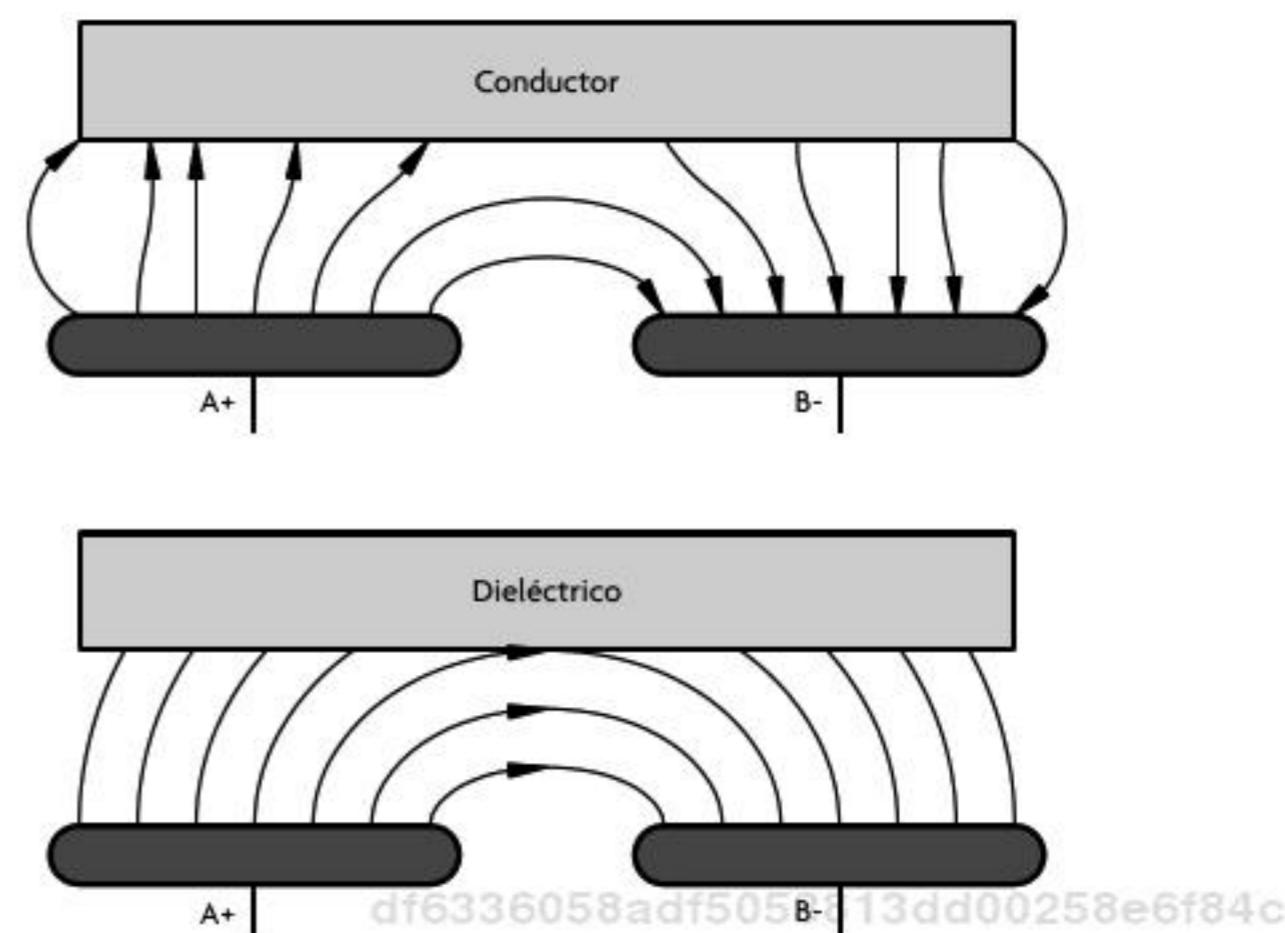
El campo electrostático producido por los electrodos es alterado de manera distinta si se approxima un conductor que si se approxima un material dieléctrico. En materiales dieléctricos, la detección es mucho más efectiva entre más grande sea la constante dieléctrica del material, ya que la capacitancia es directamente proporcional a esta.

<sup>3</sup> Un campo electrostático se puede describir como la influencia que una o más cargas ejercen sobre el espacio que las rodea.

<sup>4</sup> Un campo electromagnético es un campo físico que depende de la dirección de propagación y afecta a partículas cargadas eléctricamente.



**Figura 5.30** Sensor capacitivo de proximidad.



**Figura 5.31** Reacción del campo electrostático con diferentes materiales.

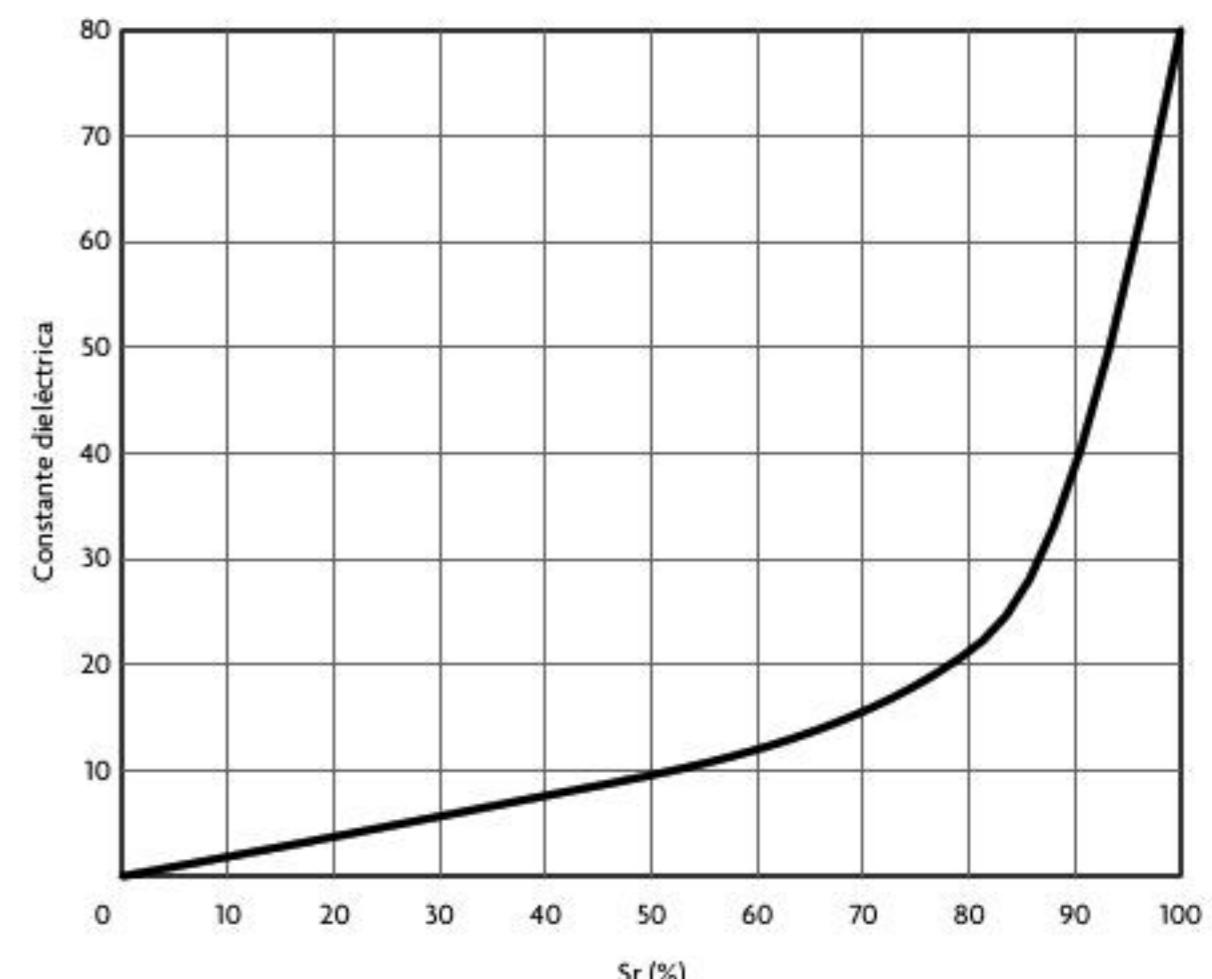
La figura 5.32 muestra la relación entre la constante dieléctrica de un objeto y la capacidad del sensor para detectarlo a una cierta distancia nominal de detección representada en porcentaje.

Por ejemplo, si un sensor capacitivo tiene una distancia nominal de detección de 40 mm y el objeto es de papel (con una constante dieléctrica de 2.3), la distancia efectiva de detección será de aproximadamente 10%, equivalente a 4 milímetros.

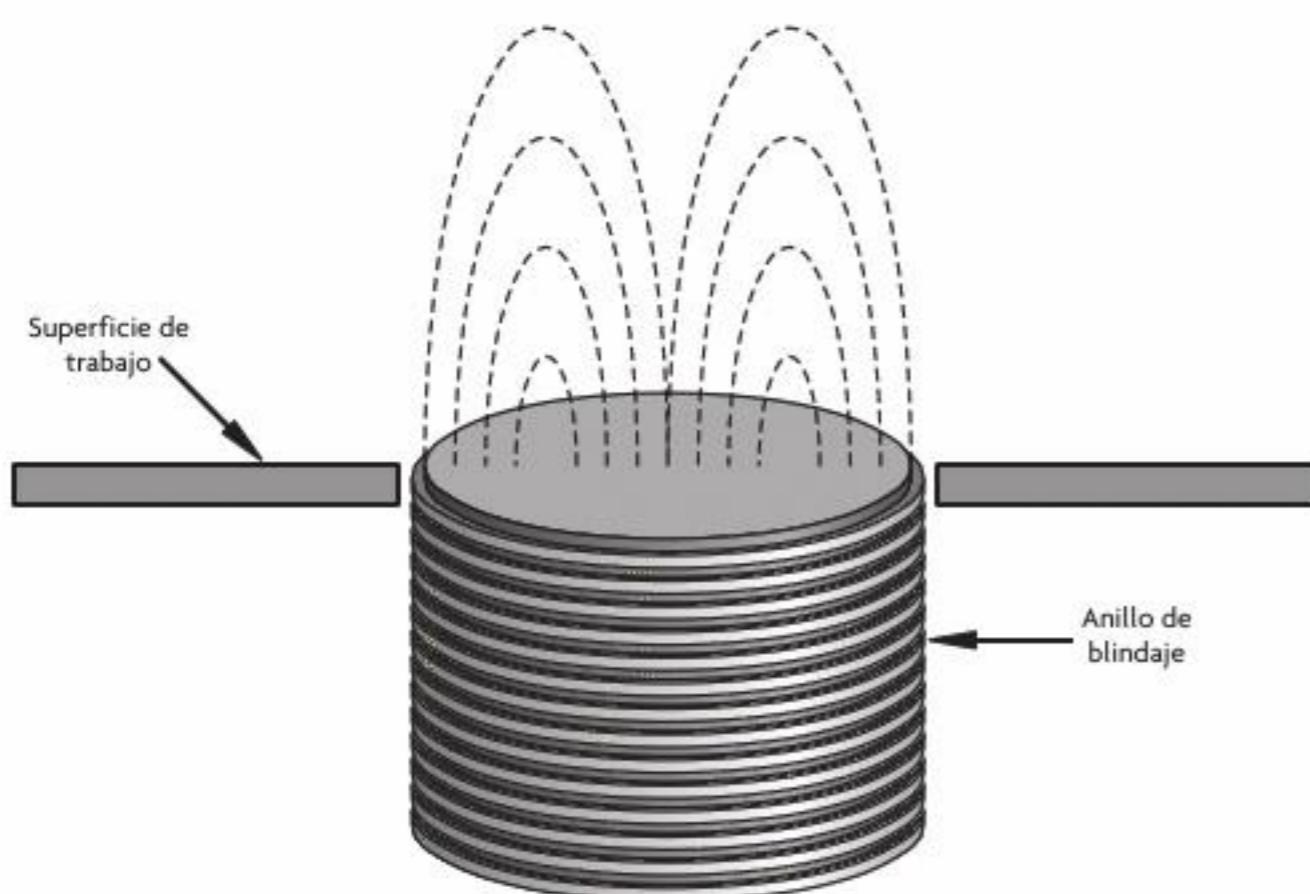
La distancia de detección de un objeto se puede incrementar al aumentar el tamaño de los electrodos. De manera teórica, un sensor capacitivo puede detectar objetos hasta a 13 cm de distancia; sin embargo, en la práctica esto no es posible debido a que los voltajes de operación de los sensores son apenas de unos cuantos volts, además de la variación de la constante dieléctrica del aire, ya que casi siempre entre el objeto a detectar y el sensor se encuentra una atmósfera de aire. Por tanto, esta constante varía con la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa del medio, llevando las distancias de detección típicas entre los 20 y 80 mm, depende de las características específicas de cada fabricante. La sensitividad de un sensor capacitivo se ve limitada debido a que es casi imposible focalizar las líneas de campo del campo electrostático en el espacio (a diferencia de un sensor inductivo).

Los sensores capacitivos comerciales tienen un anillo de blindaje con el fin de evitar un disparo en falso del sensor, además de permitir una fácil colocación para su uso. Una vez que el sensor se encuentra colocado se debe evitar que entre en contacto con líquidos, ya que el sensor también es sensible a este tipo de materiales; por ejemplo, si el sensor es mojado con alcohol, este presenta una constante dieléctrica de 25.8, lo que provoca que detecte con mucha más facilidad el líquido que algún objeto como un vidrio, que tiene una constante dieléctrica de 5.

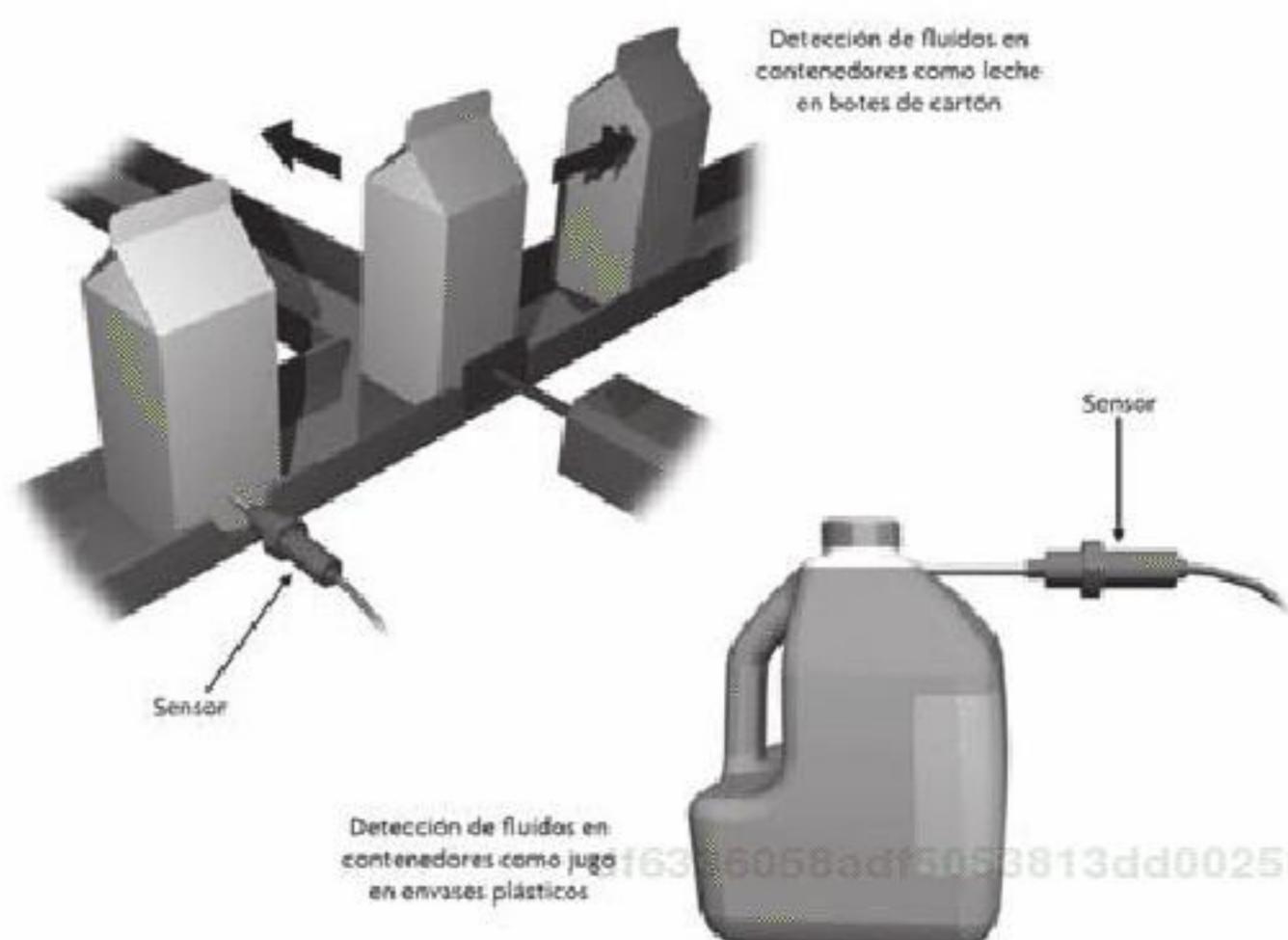
Una de las grandes ventajas de estos sensores es que, debido a que, en general, los líquidos presentan constantes dieléctricas mucho más altas que los sólidos, es posible hacer detección de líquidos incluso atravesando las paredes del contenedor. Por ejemplo, si se desea detectar agua dentro de un recipiente plástico, el agua presenta una constante dieléctrica mucho más alta que la del plástico, por lo que para el sensor capacitivo el envase plástico sería "transparente" (véase figura 5.34).



**Figura 5.32** Relación distancia de detección y constante dieléctrica.



**Figura 5.33** Anillo de blindaje para sensores capacitivos.



**Figura 5.34** Detección de líquidos a través de contenedores.

Otra gran ventaja de este tipo de sensores es que el efecto de rebote es casi nulo, comparado con otro tipo de sensores. Debido a que no requiere contacto, el desgaste de los electrodos solo será el debido a su exposición al ambiente. Además, presentan una velocidad de activación mucho mayor que los sensores inductivos y tienen buen funcionamiento en ambientes sucios.

La desventaja es que son más costosos que los sensores inductivos y presentan menor distancia de detección que los sensores ópticos. Sus principales aplicaciones son en la industria alimentaria, de plásticos, para detección en atmósferas explosivas, como supervisores de llenado y control de nivel. Los sensores capacitivos de control de nivel solo permiten indicar si está fluyendo líquido a través de una manguera o si el contenedor está lleno o vacío; no permiten mediciones de porcentaje de llenado, a no ser porque se coloque más de un sensor en el tanque, lo que representaría un alto costo.

## 5.6 Sensores capacitivos touch, como medidores de proximidad y desplazamiento

Este tipo de sensores funciona de manera muy similar a los sensores capacitivos de proximidad convencionales; la única diferencia radica en que la variable de entrada es la capacitancia del cuerpo humano. Estos sensores son muy utilizados en dispositivos como *smartphones*, computadoras, *tablets*, reproductores de audio, pantallas táctiles, etcétera.

El principio de funcionamiento de los sensores capacitivos es el siguiente:

- Se coloca una placa conductora que tiene el papel de uno de los electrodos del capacitor o botón táctil.
- Cuando un conductor (en este caso el dedo humano) se aproxima al botón se forma el capacitor; dependiendo de la resistencia presente en cada posición que forma la placa del capacitor se tiene un valor relativo de capacitancia.
- Este tipo de sensores requiere una calibración de fábrica; por ejemplo, cada esquina del botón tiene un valor de capacitancia relativa, y cuando se toca una de las esquinas de la placa que forma al botón la capacitancia incrementa su valor, de tal modo que entre más próximo sea el contacto en esa esquina, mayor es la capacitancia.

Para entender cómo funciona este sensor es necesario explicar cómo se forma un capacitor convencional. La capacitancia, en términos geométricos, está dada por la siguiente fórmula:

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

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

donde:

$C$ : capacitancia [F]

$\epsilon_0$ : permitividad relativa del vacío  $\left[ \frac{\text{F}}{\text{m}} \right]$

$\epsilon_r$ : permitividad relativa del medio

$A$ : área de traslape de los electrodos [ $\text{m}^2$ ]

$D$ : distancia entre los electrodos [m]

Entre mayor es el área de traslape entre los electrodos y más próximos estén el uno con el otro, mayor será la capacitancia. Suponiendo una placa conductora como uno de los electrodos, sin importar si esta es o no tocada por un conductor (por ejemplo un dedo), se forma un capacitor parásito llamado  $C_0$  existente entre la placa conductora y el ambiente (en este caso el dielectrónico será el aire), y cuando el dedo se aproxima al capacitor, se forma un capacitor llamado  $C_T$ . Estos capacidores están conectados a un circuito de medición. Téngase en cuenta que los capacidores están conectados en paralelo; debido a esto, cuando el dedo toca el botón, la capacitancia se incrementa (véase figura 5.35).

La sensitividad del sensor está determinada por el tamaño del panel y el espesor de la capa protectora del panel; así, entre más grande sea el panel y más delgada sea la capa protectora, mayor será la diferencia de capacitancia entre la capacitancia del panel sin ser tocado y la capacitancia del panel al ser tocado. Esta configuración sirve para determinar un estado lógico (en este caso, si el sensor fue o no fue tocado). Para configuraciones más complejas (en este caso, paneles con más de un botón o paneles con deslizadores), se colocan varios botones contiguos, de tal manera que se establece cuál de todos fue tocado y con cuánta intensidad; al pasar este valor por un convertidor analógico digital es posible determinar la coordenada  $xy$  que fue tocada. Cabe aclarar que los circuitos de lectura de los sensores capacitivos son circuitos en extremo especializados, ya que se debe convertir la carga almacenada en el capacitor en un voltaje o corriente equivalente, esto sin "absorber" dicha carga por la circulación de una corriente a través del capacitor (véase figura 5.36).

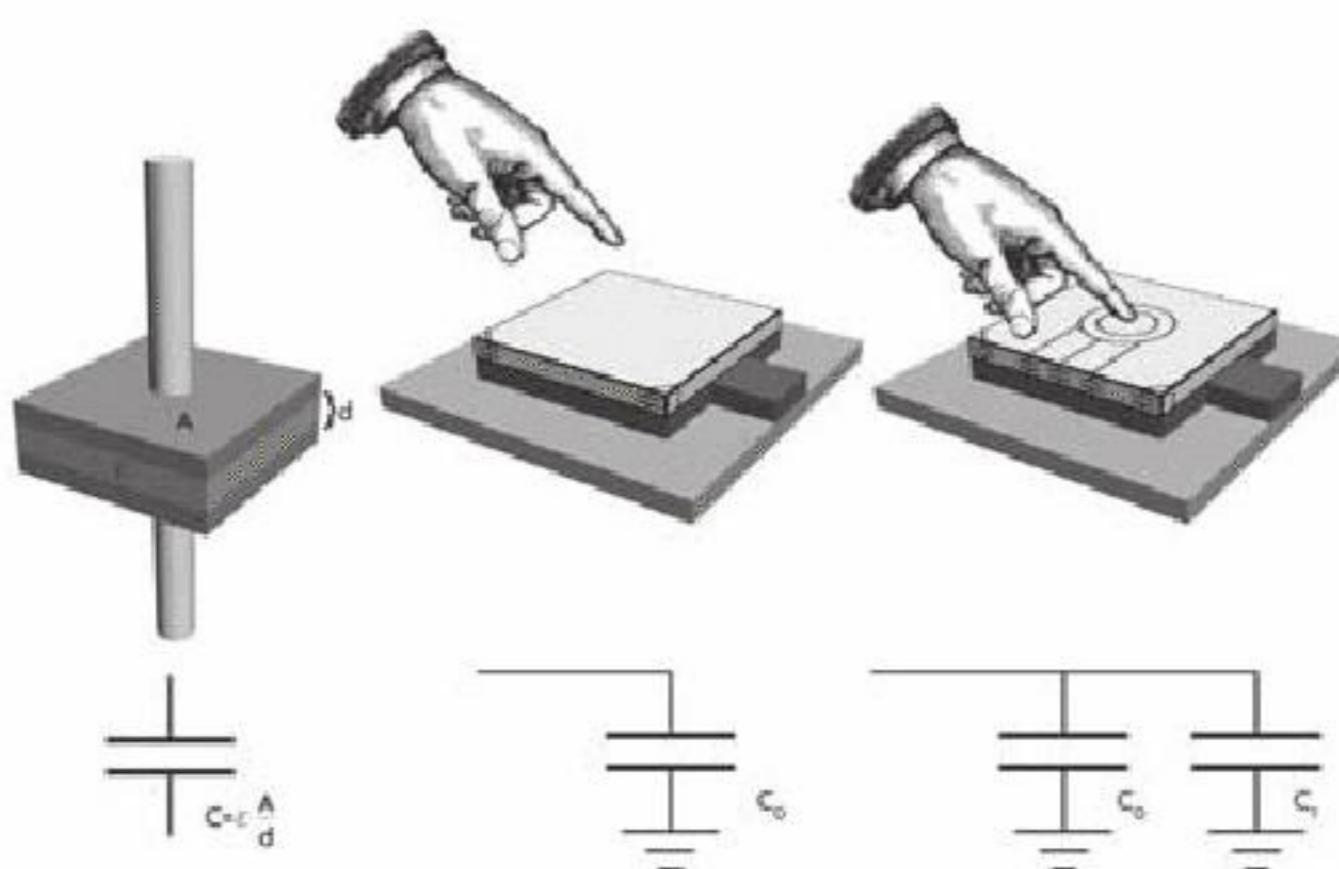


Figura 5.35 Sensor touch capacitivo.

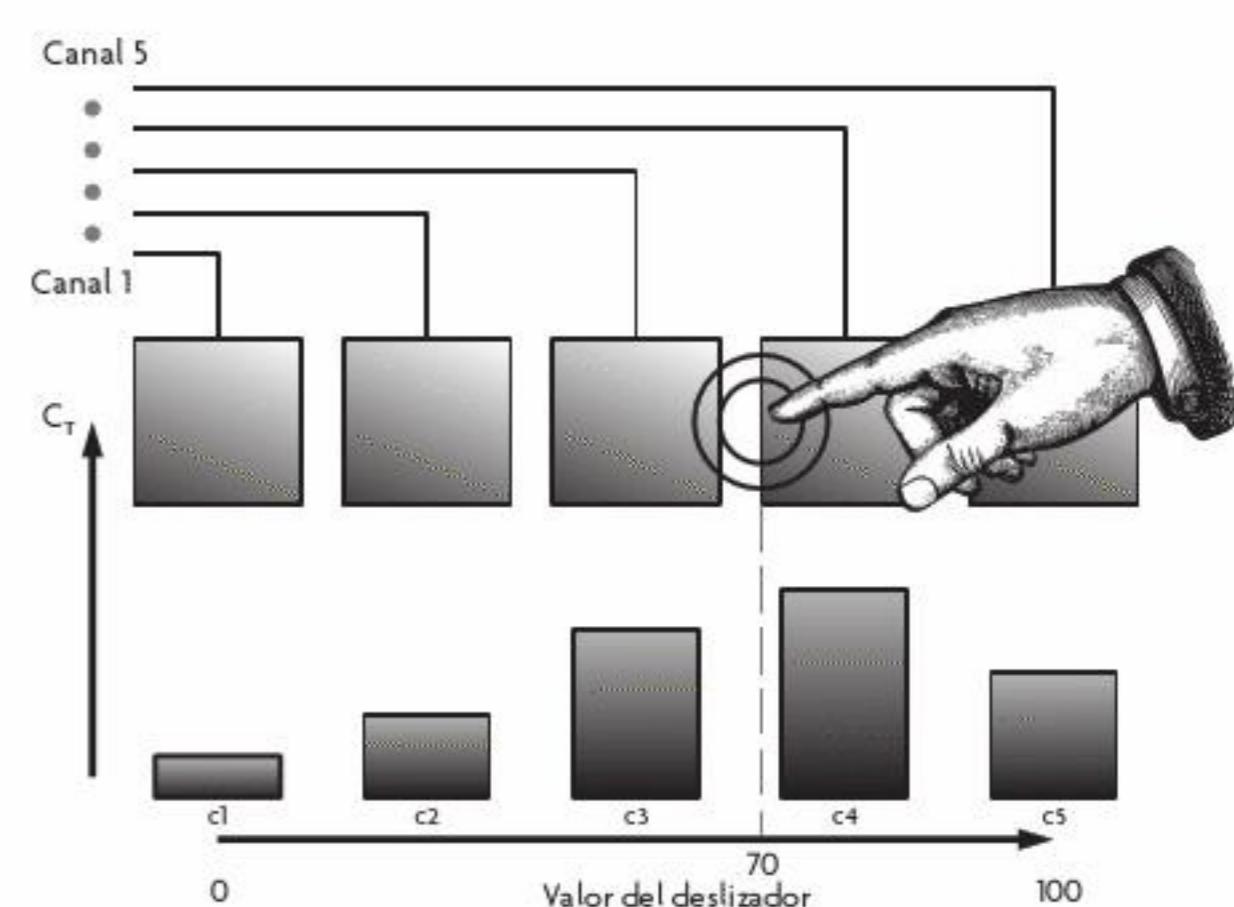


Figura 5.36 Deslizadores capacitivos.

## Ejercicio de aplicación

### Uso de teclado capacitivo touch

#### Objetivo

Elaborar un candado electrónico con el teclado Touch Shield empleando el Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Módulo teclado Touch Shield (sensor MPR121)
- 3 diodos rojos, 3 diodos verdes y 3 diodos amarillos
- 1 LED RGB
- 5 resistencias de  $330\ \Omega$
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del módulo Touch Shield

El *Touch Shield* (véase figura 5.37) es un teclado touch capacitivo con nueve caracteres numéricos (del 1 al 9) adaptado para montar sobre el Arduino Uno®, y funciona a partir del circuito integrado MPR121.



**Figura 5.37** Sensor touch capacitivo.

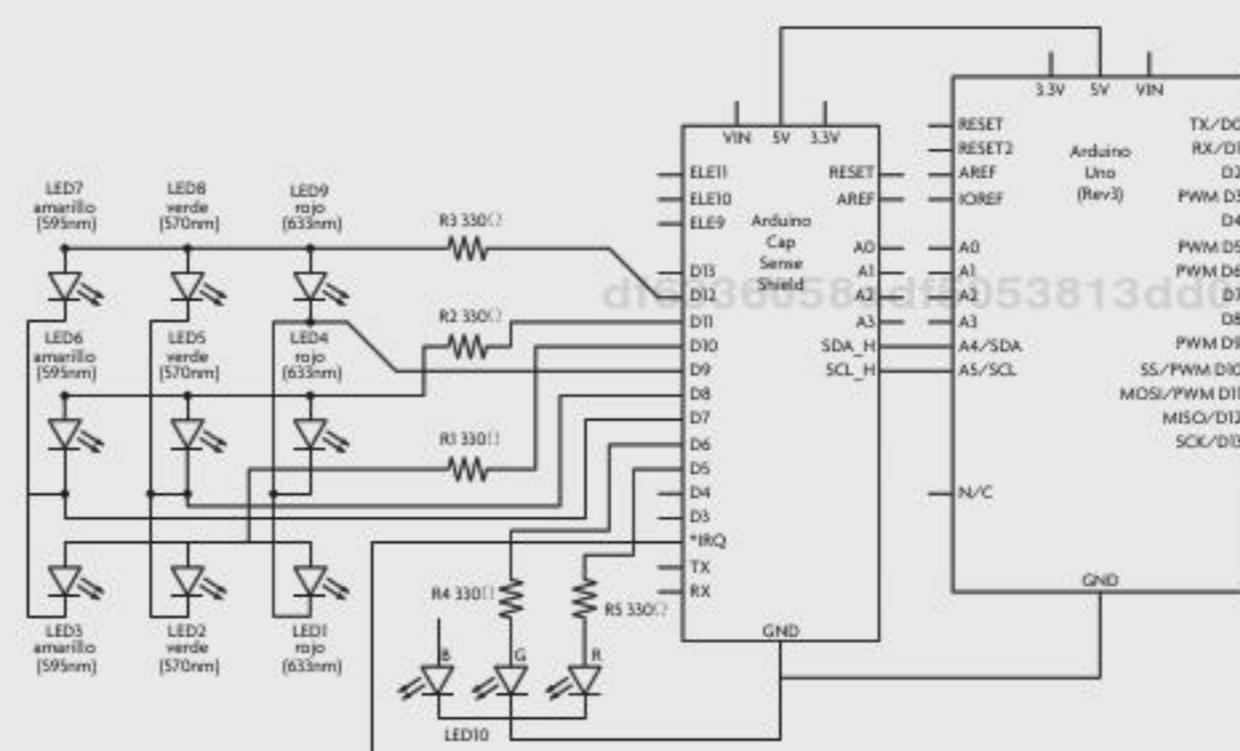
El MPR121 es un sensor que mide la capacitancia en cada uno de los electrodos conectados a cualquiera de sus 12 terminales. A partir de algunos parámetros configurables como el umbral, baseline y diversos filtros, puede establecerse si alguno de los electrodos fue presionado. De esta forma, puede determinarse a partir de dónde se considera que el electrodo se presionó o si solo se trata de ruido. Su comunicación es a través del protocolo I2C.

Cuando se pulsa una tecla y se reconoce como auténtica (no se trata de ruido), el sensor envía una señal en estado bajo para informar de esta situación a algún otro dispositivo. En el módulo *Touch Shield* esta señal se envía al PIN digital 2 del Arduino®, el cual puede configurarse como fuente de interrupción.

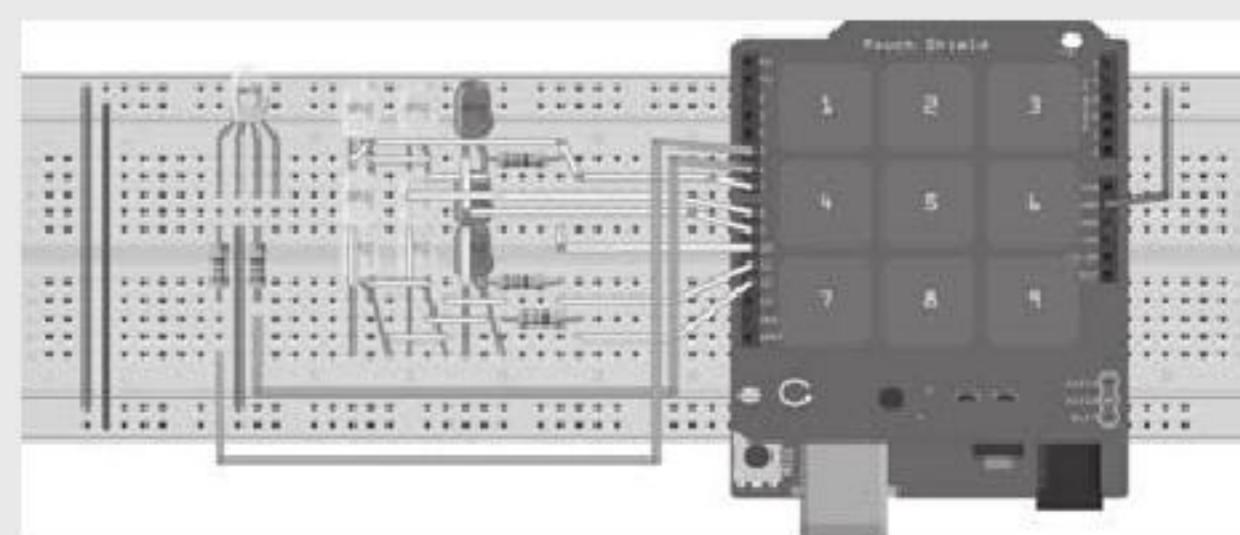
Los pines analógicos 4 y 5 se conectan a través del módulo a las terminales SDA y SCL del sensor MPR121 para la comunicación I2C.

El *Touch Shield* también utiliza los pines de alimentación de 5 V y GND del Arduino®.

#### Construcción del circuito



**Figura 5.38** Esquema del circuito del candado electrónico con una matriz de LED.



**Figura 5.39** Diagrama en protoboard del circuito de candado electrónico con una matriz de LED.

Las figuras 5.38 y 5.39 muestran los diagramas del circuito de candado electrónico con el módulo *Touch Shield* y una matriz de LED.

El módulo *Touch Shield* es de fácil instalación, solo se monta sobre el Arduino Uno®, pues sus pines tienen esas dimensiones.

La matriz de LED consiste en un arreglo de tres columnas por tres filas. Para encender un LED específico, una de las filas debe estar en estado alto y el resto en bajo, y una de las columnas en estado bajo y el resto en alto; así se crea una diferencia de voltaje positiva en un solo LED, lo que provoca que este se encienda. El resto de los LED mantienen un diferencial de potencial negativo manteniéndose apagados.

En la matriz, se enciende el LED ubicado en la misma posición que la tecla que se pulse. Asimismo, cuando la contraseña introducida es válida, en la matriz se muestra una pequeña rutina de encendido de los LED.

El LED RGB indica el estado de la contraseña: rojo es incorrecta y verde es correcta.

## Código

### Descripción del programa

El siguiente programa lee una secuencia de teclas pulsadas en el *Touch Shield* como contraseña de un candado electrónico.

Como primer paso, deben configurarse algunos parámetros del sensor *Touch Shield*, como MHD, NHD, NCL y FDL, para los estados *Touchy Release* (para filtrar el ruido). También es necesario configurar los umbrales para estos dos estados, para saber en qué momento se considera que se presionó una tecla y hasta cuándo se considera que ya se liberó. En el programa se agregó un archivo de cabecera (.h) que contiene el número de los registros para realizar las configuraciones iniciales y la lectura de la tecla pulsada.

Durante el programa principal se espera a que la señal de interrupción del *Touch Shield* cambie al estado bajo (lo que implica que se ha presionado una tecla).

Para la lectura de la tecla se toman los bytes de los registros 0x00 y 0x01, LSB y MSB de la tecla pulsada, respectivamente. Estos bytes se concatenan y se les asigna una tecla según su valor. En ese mismo momento se enciende el LED correspondiente en la matriz y se imprime la tecla en el monitor serie.

Cuando se introduce la contraseña correcta (8, 7, 4, 1), el LED RGB enciende en color verde; entonces se envía al monitor serie el mensaje de que la contraseña fue correcta. De inmediato se inicia la rutina de LED de la figura 5.46. En caso contrario, el LED RGB enciende en color rojo y el programa se habilita para insertar una nueva contraseña.

### Programa

```
df6336058adf5053813dd00258e6f84c
ebrary
//***Sensor Touch Shield (Teclado con MPR121)****
/*
 * El sensor Touch Shield consiste en un teclado
 * de 9 caracteres de
 * tipo touch (formados de placas metálicas),
 * controlado por el
 * circuito MPR121. La comunicación con otros
 * dispositivos es a
 * partir del protocolo I2C.
 *
 * El siguiente programa consiste en un candado
 * electrónico que
 * solicita una contraseña de 4 dígitos para
 * acceder a una pequeña
 * rutina de LED. Como interfaz se utiliza el
 * teclado Touch Shield.
 * Cada que se presiona una tecla el sensor
 * envía una señal para
 * informarlo a un dispositivo de control
 * (Arduino).
 //*****
```

```
#include <Wire.h> //Librería para la comunicación
I2C
#include "mpr121.h" //Librería que contiene la
información sobre
    //algunos comandos del
    MPR121 (vease hoja de datos)
#define irqPin 2 //La señal que avisa que
    alguna tecla ha sido
        //presionada se envía al
    PIN DIG 2 (Así es como se
        //encuentra en el
    TouchShield). La alarma se da
            //en estado bajo.

//Se declaran las variables empleadas.
int keyPress, key = 0; check = 0;
int pass[5], count = 0;
intcodigo[] = {8, 7, 4, 1}; //Contraseña del
    sensor
//Secuencia de encendido de LED una vez ingresada
    correctamente la
//contraseña
intseq[] = {1, 4, 7, 8, 5, 2, 3, 6, 9, 8, 5, 2};
booleanlog_in = false;

voidsetup()
{
    Serial.begin(9600); //Iniciamos la
    comunicación serie a 9600 baudios
    Wire.begin(); //Se inicia la
    comunicación I2C

    pinMode(irqPin, INPUT); //Se declara el PIN
    DIG 2 como entrada
    digitalWrite(irqPin, HIGH); //Se activan las
    resistencias de PULL-UP

    for (int j = 0; j < 8; j++) //Los PINES DIG
    5~12 se declaran como salida
        pinMode(5+j, OUTPUT);

    configInicial(); //Configuración Inicial
    del MPR121
    Serial.println("Password: "); //Se solicita
    la contraseña
}

voidloop()
{
    while (log_in == false) //Mientras la
    contraseña sea falsa
    {
        if (digitalRead(irqPin) == LOW) //Cuando se
        avise que una tecla
            {
                //se
                presiona
                readKey(); //Se llama a la función
                que lee la tecla
                if (count == 4) //Si ya se han presionado
                4 teclas, se verifica
                    password(); //la validez de la
                    contraseña.
```

```

        }

    }

//Cuando la contraseña sea correcta se
presentara una
//rutina de encendido de los LED.
while (true)
{
    for(int a = 0;a < 12;a++)
    {
        led(seq[a]);
        delay(50);
    }
}

void readKey()
{
    byte LSB = lecturaIIC(KEY_LSB); //Lectura LSB
    del registro que
    //contiene
    //la informacion de la tecla presionada
    byte MSB = lecturaIIC(KEY_MSB); //Lectura MSB
    del registro que
    //contiene
    //la informacion de la tecla presionada

    //Se concatenan los bytes LSB y MSB
    keyPress = (int)(MSB & 0x01) << 8 | (int) LSB;

    //Se verifica que tecla fue presionada
    switch (keyPress)
    {
        case 1:
            key = 9; //Bit 0 a tecla 9
            break;
        case 2:
            key = 6; //Bit 1 a tecla 6
            break;
        case 4:
            key = 3; //Bit 2 a tecla 3
            break;
        case 8:
            key = 8; //Bit 3 a tecla 8
            break;
        case 16:
            key = 5; //Bit 4 a tecla 5
            break;
        case 32:
            key = 2; //Bit 5 a tecla 2
            break;
        case 64:
            key = 7; //Bit 6 a tecla 7
            break;
        case 128:
            key = 4; //Bit 7 a tecla 4
            break;
        case 256:
            key = 1; //Bit 8 a tecla 1
            break;
    }
}

```

```

        default: //En el caso que varias teclas
        se hayan presionado
            key = 0; //estas simplemente se
            ignoran.
        }

//Cuando se presione solo una tecla (key es
diferente de 0)
if (key != 0)
{
    led(key); //Esta funcion enciende
    uno de los LED de la
    //matriz. Correspondiente a la tecla
    presionada
    Serial.print(key); //Se imprime en el
    monitor serie la tecla
    //presionada
    Serial.print(" ");
    pass[count] = key; //Se almacena la
    contraseña en un buffer y se
    //cuenta el numero de datos insertados,
    count++; //cuando sean 4 se
    realiza
    //la comprobacion y
    posible validacion.
}

void password (void)
{
    count = 0; //Se reinicia el
    contador de digitos
    //introducidos
    for (int i = 0;i < 4;i++)
    {
        if (pass[i] == codigo[i]) //Se comparan los
        datos introducidos con la
        //contraseña
        check++; //si coinciden en
        orden se incrementa un
        //contador. Si dicho
        contador llega a 4 //implica que la
        contraseña introducida es valida
    }
    //Si la contraseña es valida
    if (check == 4)
    {
        digitalWrite(6, HIGH); //Se enciende el
        LED verde (indica
        //contraseña valida)
        digitalWrite(5, LOW); //Se mantiene
        apagado el LED rojo
        //((contraseña invalida)
        log_in = true; //Se habilita la
        rutina de LED
        Serial.println("ACTIVADO");
    }
    else
    {
        //Si la contraseña es incorrecta
    }
}

```

```

        digitalWrite(6, LOW);      //Se mantiene
        apagado el LED
            //verde(contraseña valida)
        digitalWrite(5, HIGH);    //Se enciende el
        LED rojo (contraseña
            //invalida)
        Serial.println("ERROR");
    }
    check = 0;
}

voidconfigInicial (void)
{
    //Caracteristicas del filtro
    //MHD: La mayor variacion de magnitud que pasa
    a traves del Baseline
    //del filtro. Valor entre 1-63
    //NHD: Determina el cambio incremental cuando
    se detecta la deriva
    //sin ruido. Valor entre 1-63
    //NCL. Determina el numero de muestras
    consecutivas mayores que el
    //valor Max Half Delta (consultar hoja de
    datos). Necesario para
    //determinar que no se trata de ruido. Valor
    de 0-255
    //FDL. Velocidad de operacion del filtro. Un
    valor alto significa
    //un funcionamiento lento. Valor de 0-255

    escribirIIC(MHD_R, 0x01);
    escribirIIC(NHD_R, 0x01);
    escribirIIC(NCL_R, 0x00);
    escribirIIC(FDL_R, 0x00);

    escribirIIC(MHD_F, 0x01);
    escribirIIC(NHD_F, 0x01);
    escribirIIC(NCL_F, 0xFF);
    escribirIIC(FDL_F, 0x02);

    //Se definen para todos los pines el valor de
    //TouchThreshold «Umbral al momento de tocar»
    = 10
    //ReleaseThreshold «Umbral al liberar» = 5
    //La hoja de datos especifica que
    TouchThreshold es
    //ligeramente mayor que ReleaseThreshold para
    generar
    //histeresis y reducir el ruido. Usualmente
    estos umbrales
    //se establecen entre 0x04 y 0x10

    //Estos umbrales indican al sensor a partir de
    cuando se
    //considera que se pulso una tecla
    (TouchThreshold) y
    //cuando se libera.

    //Condicion «Touch»: Baseline - Electrode
    filtered data > Touch
    //threshold
}
//Condicion «Release»: Baseline - Electrode
filtered data < Release
//threshold
//Baseline puede configurarse en los registros
0x04~0x1D, por default
//es 0x00

escribirIIC(ELE0_T, TT);
escribirIIC(ELE0_R, RT);
escribirIIC(ELE1_T, TT);
escribirIIC(ELE1_R, RT);
escribirIIC(ELE2_T, TT);
escribirIIC(ELE2_R, RT);
escribirIIC(ELE3_T, TT);
escribirIIC(ELE3_R, RT);
escribirIIC(ELE4_T, TT);
escribirIIC(ELE4_R, RT);
escribirIIC(ELE5_T, TT);
escribirIIC(ELE5_R, RT);
escribirIIC(ELE6_T, TT);
escribirIIC(ELE6_R, RT);
escribirIIC(ELE7_T, TT);
escribirIIC(ELE7_R, RT);
escribirIIC(ELE8_T, TT);
escribirIIC(ELE8_R, RT);
escribirIIC(ELE9_T, TT);
escribirIIC(ELE9_R, RT);
escribirIIC(ELE10_T, TT);
escribirIIC(ELE10_R, RT);
escribirIIC(ELE11_T, TT);
escribirIIC(ELE11_R, RT);

//Se habilitan los 12 pines del sensor
escribirIIC(ECR, 0x0C);
}

//Escritura I2C
voidescribirIIC (byte add, byte valor)
{
    Wire.beginTransmission(ADDR); //Se inicia la
    comunicacion I2C con el
    //dispositivo de la direccion ADDR
    Wire.write(add);
    //Se escribe en un comando «add» un «valor»
    Wire.write(valor);
    Wire.endTransmission(); //Finalizamos la
    comunicacion I2C
}

//Lectura I2C
byte lecturaIIC (byte add)
{
    byte reading;
    Wire.beginTransmission(ADDR); //Se inicia la
    comunicacion I2C con el
    //dispositivo de la direccion ADDR
    Wire.write(add); //Escribimos el comando para
    leer algun registro
    Wire.endTransmission(false);

    Wire.requestFrom(ADDR, 1); //Leemos el registro
    establecido por el
}

```

```

    //comando
    reading = Wire.read();

    return reading;
}

//Función que enciende un LED específico dentro
//de la matriz
void led(int ledKey)
{
    for(int i = 0; i < 3; i++)
    {
        digitalWrite(7 + i, HIGH); //Se escriben
        unos
        en las filas y
        digitalWrite(10 + i, LOW); //ceros en las
        columnas
    }

    if (ledKey < 4) //Se busca la tecla en la
    primera fila: 1, 2 o 3
    {
        digitalWrite(ledKey + 6, LOW); //Se busca
        la columna y se enciende
        //el LED
        digitalWrite(10, HIGH);
    }
    elseif(ledKey < 7)//Búsqueda en la segunda
    fila: 4, 5 o 6
    {
        digitalWrite(ledKey + 3, LOW); //Se busca la
        columna y se enciende el
        //LED
        digitalWrite(11, HIGH);
    }
    else//Búsqueda en la tercera fila: 7, 8 o 9
    {
        digitalWrite(ledKey, LOW);
        digitalWrite(12, HIGH); //Se busca la
        columna y se enciende el LED
    }
}

```

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

```

Librería MPR121
#define ADDR 0x5A      //Dirección I2C del
MPR121
#define KEY_LSB 0x00    //LSB de la tecla pulsada
#define KEY_MSB 0x01    //MSB de la tecla pulsada

```

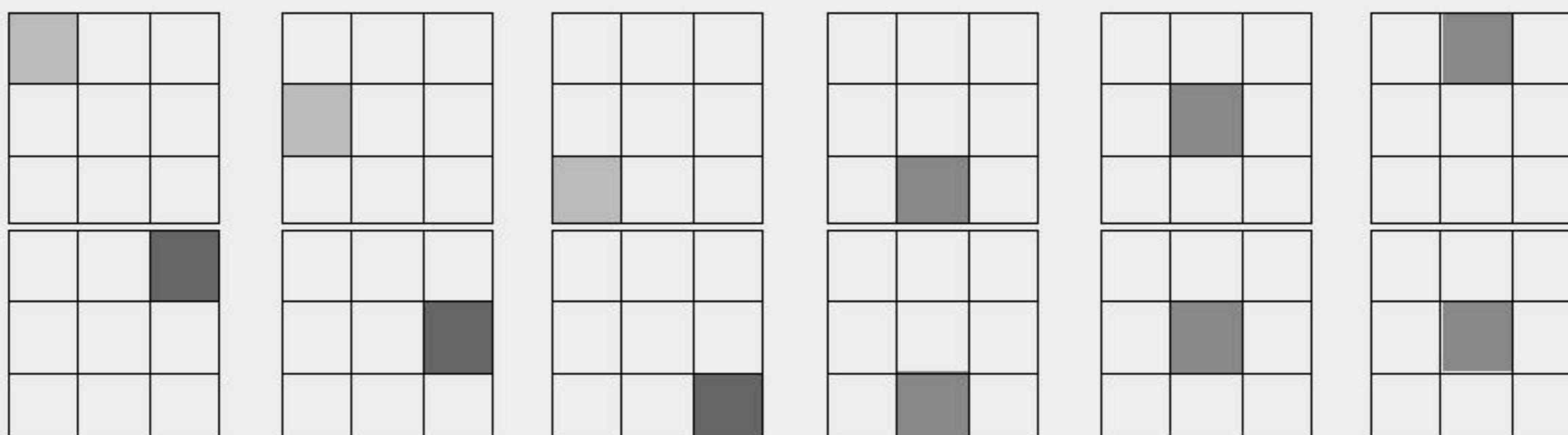
```

#define MHD_R 0x2B
#define NHD_R 0x2C
#define NCL_R 0x2D
#define FDL_R 0x2E
#define MHD_F 0x2F
#define NHD_F 0x30
#define NCL_F 0x31
#define FDL_F 0x32

//Registros Touch Threshold (T) y
//Release Threshold (R) de todos los
//pines
#define ELE0_T 0x41
#define ELE0_R 0x42
#define ELE1_T 0x43
#define ELE1_R 0x44
#define ELE2_T 0x45
#define ELE2_R 0x46
#define ELE3_T 0x47
#define ELE3_R 0x48
#define ELE4_T 0x49
#define ELE4_R 0x4A
#define ELE5_T 0x4B
#define ELE5_R 0x4C
#define ELE6_T 0x4D
#define ELE6_R 0x4E
#define ELE7_T 0x4F
#define ELE7_R 0x50
#define ELE8_T 0x51
#define ELE8_R 0x52
//Del 9-11 están físicamente disponibles
//para otros usos
#define ELE9_T 0x53
#define ELE9_R 0x54
#define ELE10_T 0x55
#define ELE10_R 0x56
#define ELE11_T 0x57
#define ELE11_R 0x58
//Registro que habilita los pines del sensor
#define ECR 0x5E

//Se definen los valores de 0x0A como valor
//de Touch Threshold y 0x05 como Release
//Threshold, con base a la hoja de datos
#define TT 0x0A
#define RT 0x05

```



**Figura 5.40** Rutina de LED cuando la contraseña es correcta.

### Pruebas

El programa inicia cuando se solicita la contraseña.

Se introduce la contraseña. La tecla pulsada se imprime en el monitor serie y se enciende el LED correspondiente.



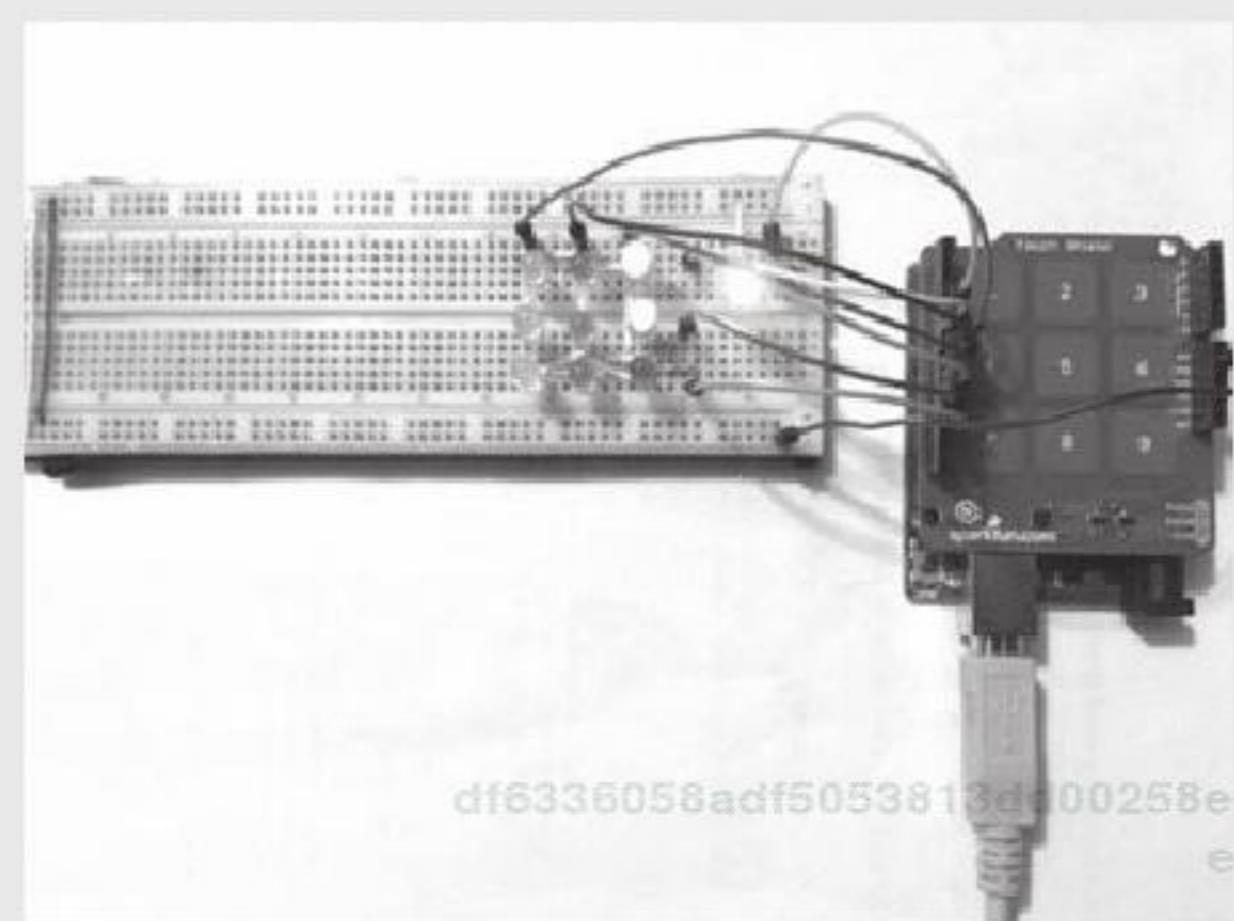
**Figura 5.41** Introducción de una contraseña.

Una vez que se han introducido cuatro caracteres, se verifica la validez de la contraseña y se enciende el led blanco; si la contraseña es inválida, se enciende el led rojo.

### Contraseña válida



**Figura 5.42** Introducción de una contraseña válida.



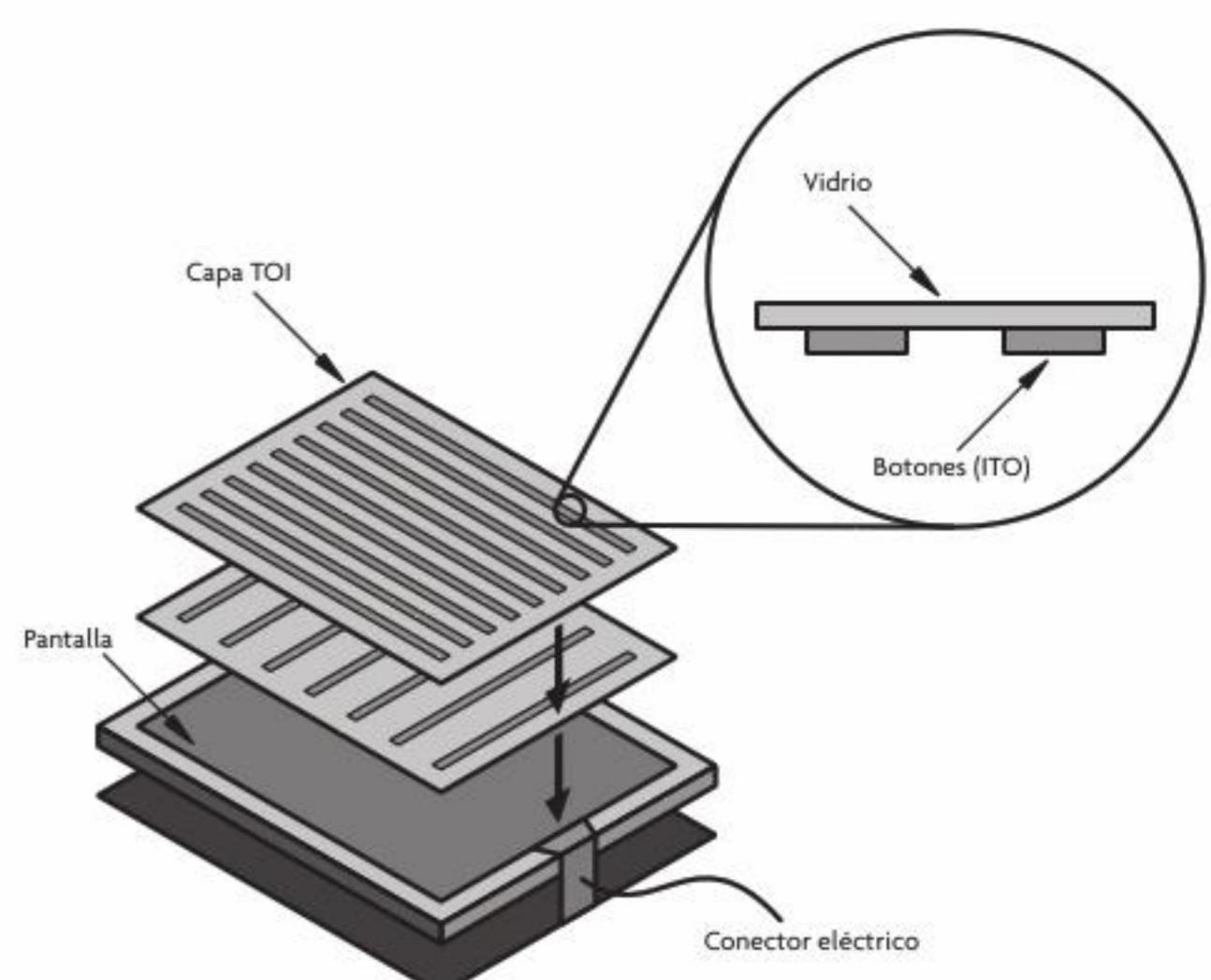
**Figura 5.43** Si la contraseña es correcta, se da el aviso por el monitor serie (imagen superior) y el LED verde se enciende (imagen inferior); asimismo, se inicia la rutina de encendido de LED.

## 5.7 Sensores capacitivos en pantallas táctiles

Las pantallas táctiles son sensores que a últimas fechas han sustituido el uso de paneles con múltiples interruptores, debido a que estos sensores pueden implementarse de manera virtual y no presentan el desgaste inherente a un interruptor mecánico, además de hacer más intuitivo el uso de deslizadores para control de procesos.

De manera general, los sensores que componen una pantalla táctil se fabrican usando una fina capa de óxido de estaño indio (ITO, por sus siglas en inglés) transparente a la vista, el cual se deposita sobre una lámina transparente o de vidrio, ya que por debajo de esta se coloca la pantalla encargada de generar el panel virtual a través de desplegar una imagen (véase figura 5.44).

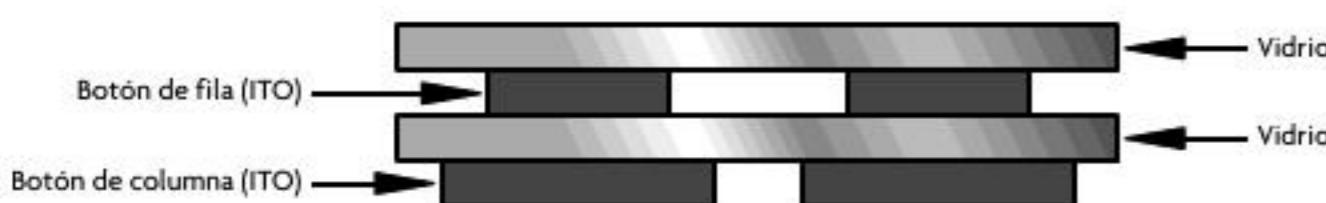
El ITO tiene la característica de ser un buen conductor. En ocasiones, para incrementar su sensibilidad, se suele incrementar el grosor de la capa depositada. No obstante, el grosor tiene un límite, ya que entre más gruesa es la capa, en efecto se mejora su conductividad, pero comienza a perder su



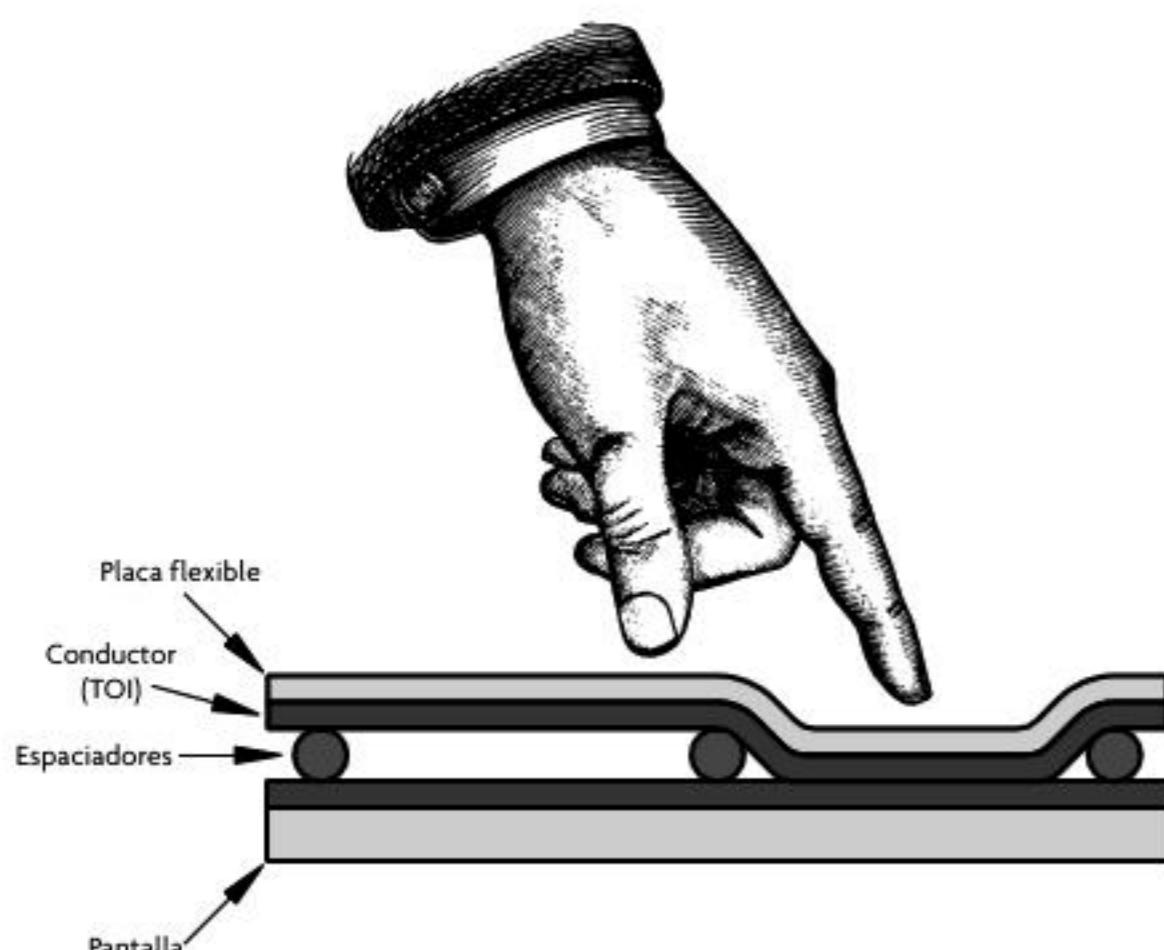
**Figura 5.44** Panel táctil capacitivo.

característica de transparencia. Recuérdese que la conductividad es el inverso de la resistividad; la resistividad de una lámina de ITO es aproximadamente de cientos de ohms por cuadro.

Conforme el tamaño del panel táctil es el número de sensores que se deben colocar; por ejemplo, para pantallas táctiles de baja sensitividad se colocan hasta 10 sensores de tacto capacitivos; para el caso de altas resoluciones (por ejemplo, paneles de  $680 \times 480$ ) es necesario colocar dos capas de ITO aisladas entre sí, esto para formar una matriz de detección que indique qué fila y qué columna del arreglo matricial fue tocada (véase figura 5.45).



**Figura 5.45** Arreglo para paneles de alta resolución.



**Figura 5.46** Paneles táctiles resitivos.

Por esta razón los fabricantes ofrecen, por un lado, sensores capacitivos de tacto y deslizadores, y por otro lado, pantallas táctiles a precios muy distintos; sin embargo, las pantallas táctiles resultan mucho más costosas que los sensores de tacto.

Las primeras pantallas táctiles usadas contaban con tecnologías similares a las actuales, solo que utilizaban un principio de transducción distinto, ya que se basaban en el cálculo de la resistencia equivalente. Por ejemplo, dichas pantallas también se implementaban usando TOI; se depositaban dos capas con una ligera separación entre sí, una de las capas estaba depositada sobre un sustrato flexible, que al ser presionado hacia contacto con la capa de abajo, formando un divisor de voltaje (véase figura 5.46).

Este tipo de pantallas táctiles resistivas todavía está en uso debido a sus bajos costos de implementación en lo que se refiere a sus circuitos de lectura; recuérdese que los circuitos de lectura para el caso de cargas capacitivas son mucho más especializados y requieren una alta escala de integración comparados con los circuitos para medir cargas resitivas. El principal problema que presentan las pantallas táctiles resitivas es que su uso

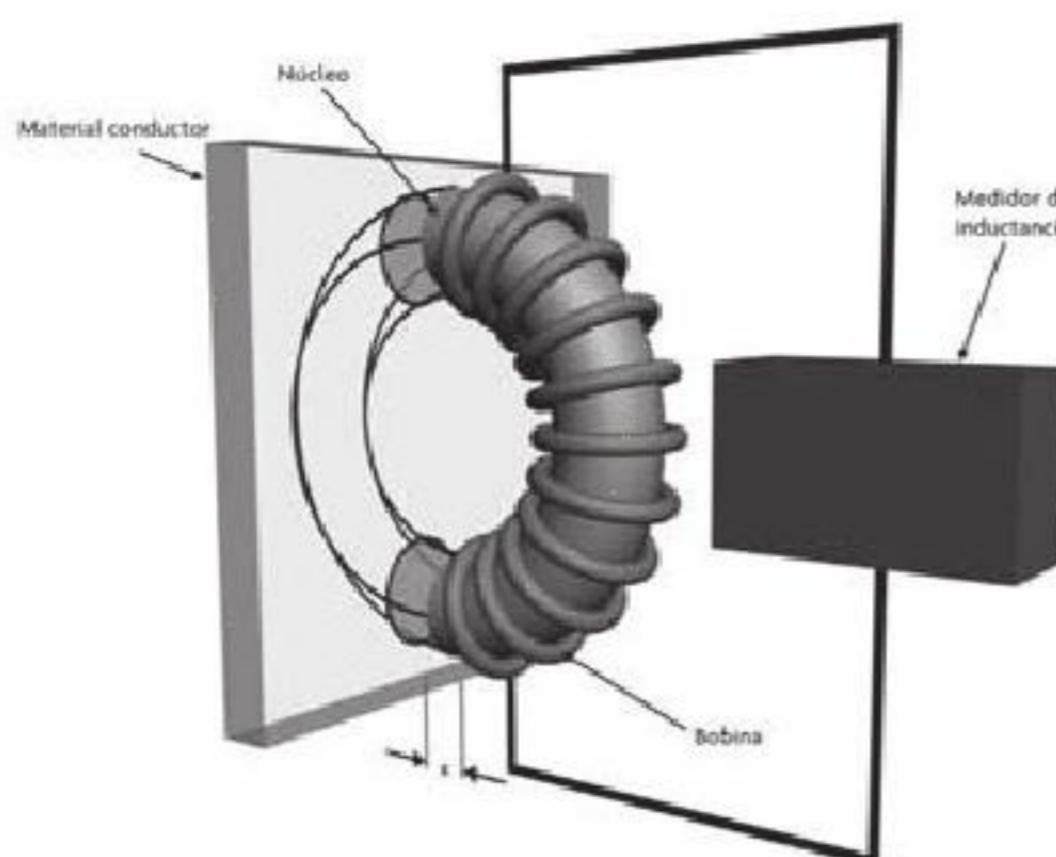
frecuente desgasta la lámina flexible, lo que minimiza el tiempo de vida de la pantalla; otra desventaja es que, debido a que el panel flexible solo está fijo por los extremos, al presionar un extremo de la pantalla no se producirá la misma deflexión en la pantalla que al presionar el centro de la misma. Por esta razón, el comportamiento de la pantalla táctil resistiva es no lineal, aunque una gran ventaja que tienen las pantallas táctiles capacitivas es su capacidad para detectar varios toques de pantalla a la vez.

## 5.8 Inductivos

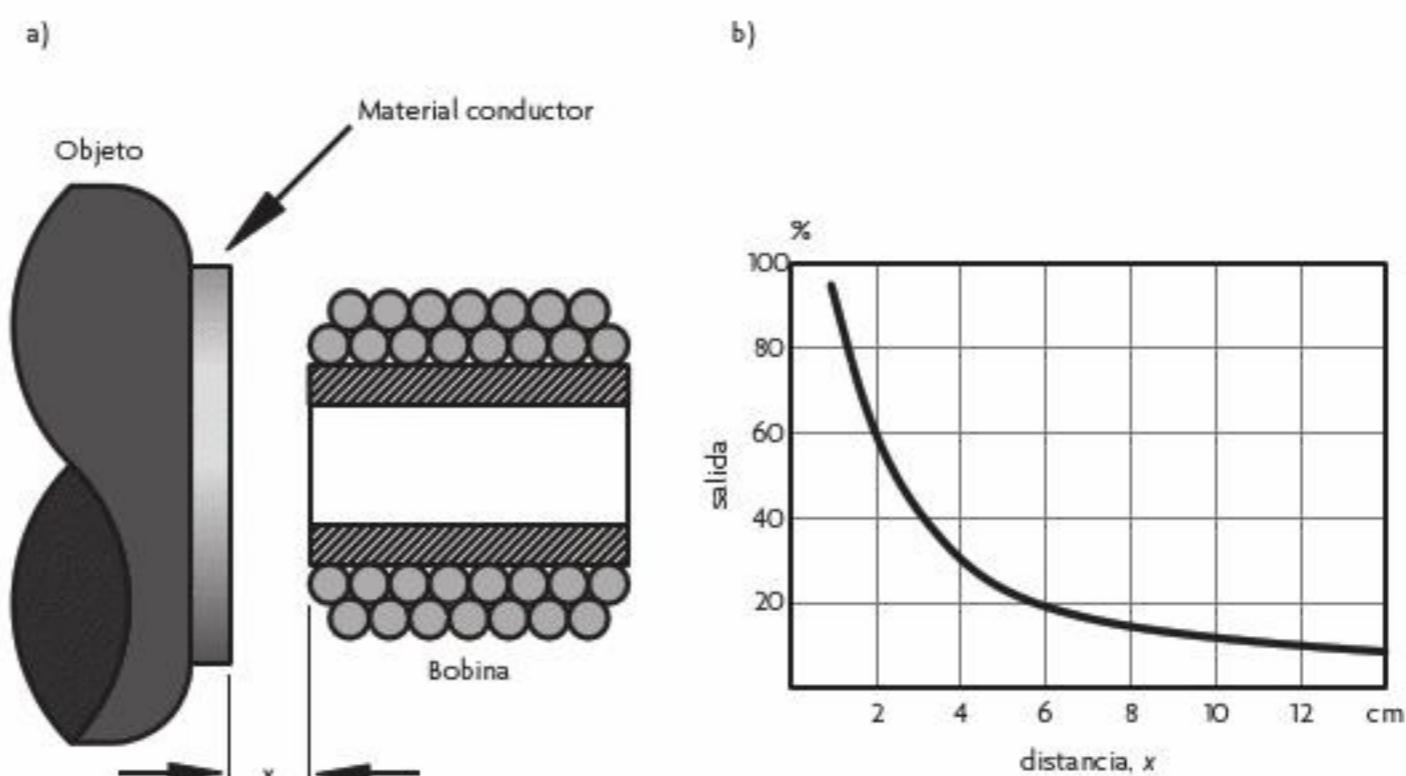
### Detectores de proximidad inductivos transversales

Los detectores de proximidad inductivos transversales se basan en el principio de que la inductancia de una bobina cambia en forma considerable en presencia de un conductor. En general, la bobina se coloca como parte de un circuito de puente. La presencia del conductor cerca de la bobina tiene la tarea de sacar de balance al circuito puente del que forma parte la bobina. El cambio suele utilizarse para operar un circuito de cambio de estado bajo a estado alto. Estos sensores se conocen como sensores autoinducidos, debido a que cuando se aproxima el conductor cambia la inductancia equivalente del circuito (véase figura 5.47).

Una de las grandes ventajas de los detectores de proximidad inductivos es que no requieren de contacto con el objeto a detectar, lo que minimiza el desgaste. Sin embargo, la principal desventaja es que solo son sensibles a materiales conductores y dependen en gran medida del tipo de conductor



**Figura 5.47** Sensor de proximidad inductivo.



**Figura 5.48** Sensor de proximidad inductivo modificado.

del que se trate; las distancias nominales de detección van desde unas décimas de milímetros hasta centenas de milímetros, dependiendo de la calidad del sensor y del fabricante. Por ejemplo, para el caso de acero de alto carbono la distancia de detección de un cierto sensor oscila entre 0.8 y 2 mm; para acero inoxidable se tiene 30% menos de efectividad; para latón hasta 60% menos. La distancia nominal de detección es una función del diámetro del sensor y de la potencia existente para generar el campo electromagnético. Otro factor importante es que el objeto que se esté detectando sea plano, ya que esto afecta el desempeño del sensor.

Una forma de utilizar este tipo de sensores para distintos materiales, además de los conductores, es la configuración que se muestra en la figura 5.48, que consiste en acoplar en forma mecánica un pequeño trozo de material conductor al objeto a detectar. De manera alternativa, la bobina puede estar acoplada al objeto y el material conductor fijo.

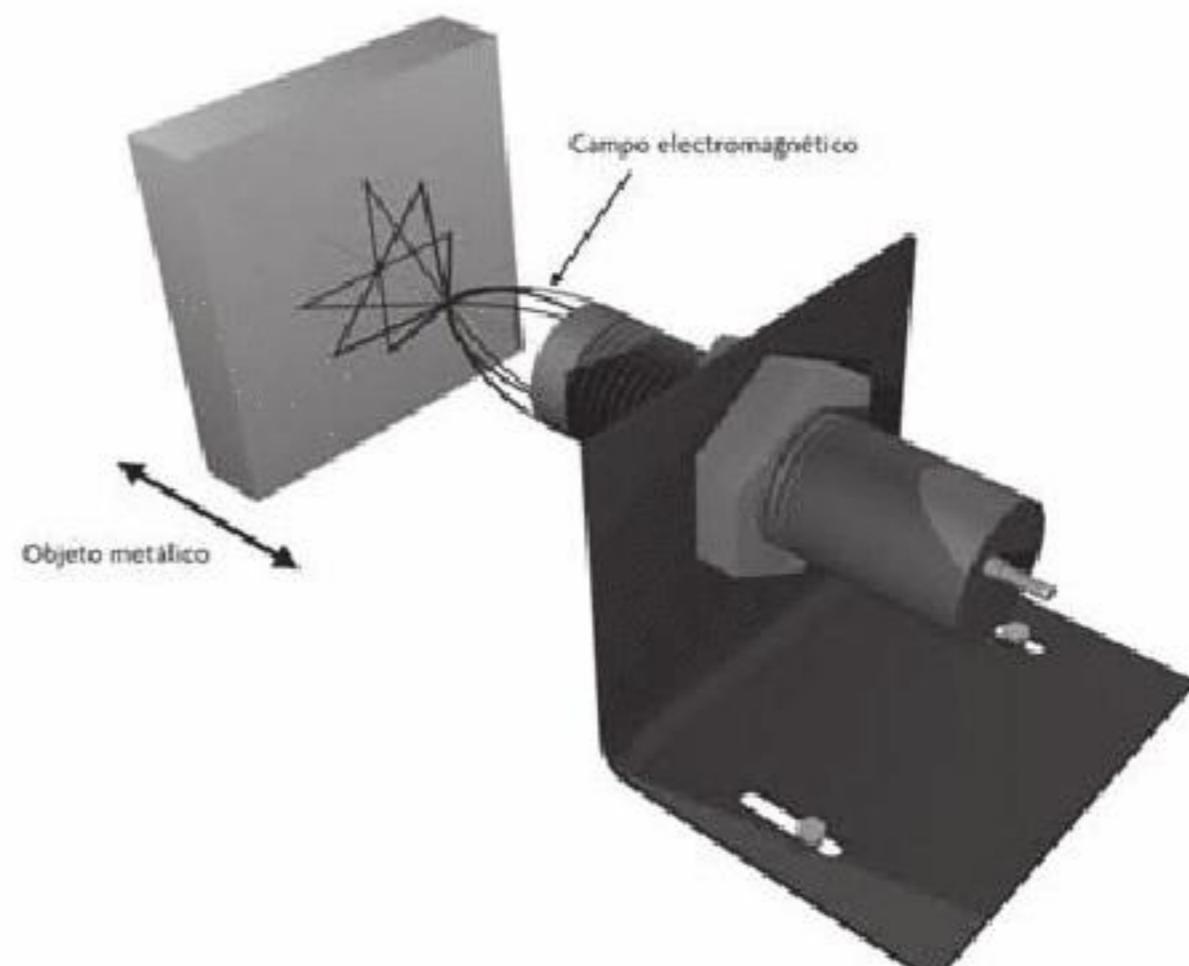
En este tipo de sensores se pueden identificar cuatro partes básicas:

- La bobina y el núcleo
- Circuito oscilador
- Circuito detector
- Circuito de acondicionamiento para la salida del sensor

El **circuito oscilador** tiene la tarea de inducir el campo electromagnético emitido por el sensor. El campo se concentra sobre el eje en que se está sensando. Cuando el elemento metálico se aproxima, una *corriente de Eddy* (véase capítulo 1) o corriente de *Foucault* es inducida sobre el objeto detectado, lo que provoca una reducción en la amplitud del campo emitido (véase figura 5.49).

El **circuito detector** se encarga de percibir el cambio en la amplitud del campo emitido y envía una señal al **circuito de acondicionamiento** para enviar la señal de salida del sensor como un cambio de estado bajo a estado alto.

Existen dos tipos de sensores de proximidad inductivos: blindados y no blindados. Los sensores blindados tienen una cubierta de metal alrededor del conjunto del núcleo y la bobina; esto concentra el campo electromagnético en la parte delantera del sensor y permite que sea incrustada en el metal, sin influir en el rango de detección. El sensor no blindado tiene la capacidad de detección por los costados, no solo al frente. En ambos casos se requiere que la parte frontal del sensor esté libre de metal.



**Figura 5.49** Sensor inductivo y el campo electromagnético emitido.

## Sensores basados en corrientes de Eddy o corrientes de Foucault

Los sensores basados en corrientes de Eddy son **transductores entre la proximidad de un material conductor y un cambio de inductancia**. Las corrientes de *Eddy*, también conocidas como corrientes de *Foucault* (llamadas así en honor a su descubridor), consideran un conductor y un campo magnético; las corrientes de *Eddy* se presentan en dos casos:

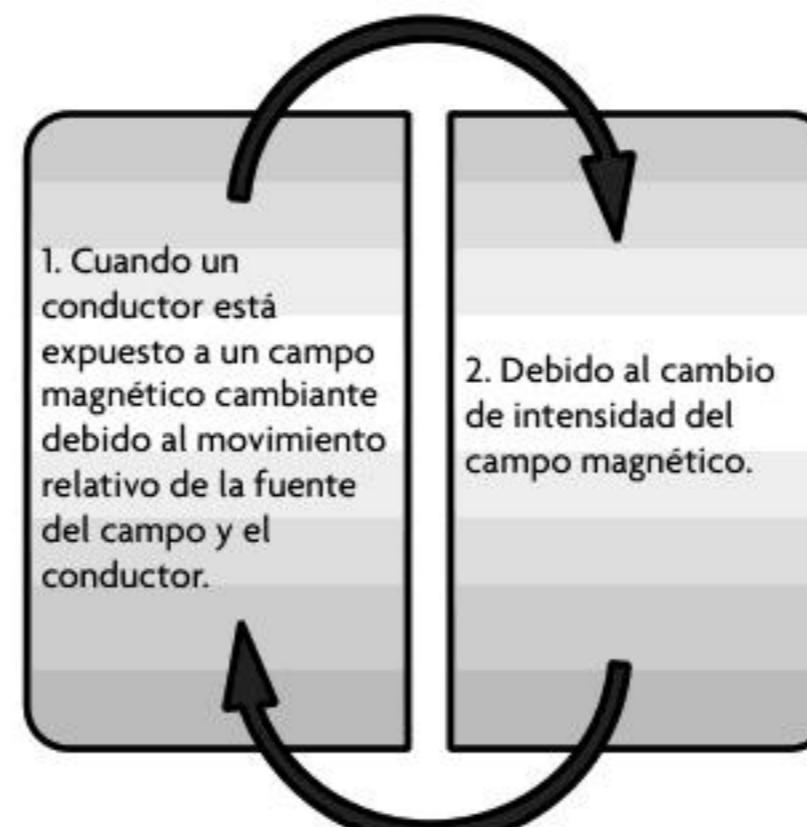


Figura 5.50

La presencia de corrientes de Foucault en un conductor causa que exista un flujo de electrones en el conductor; esto crea un campo magnético opuesto al presente en la fuente original debido a la ley de Lenz, provocando fuerzas de repulsión entre el conductor y la fuente de campo original. Existen tres formas de maximizar las corrientes inducidas en el conductor: 1) aumentando la conductividad del conductor, 2) aumentando el campo magnético de la fuente original o 3) variando muy rápido el campo.

Este principio de funcionamiento se usa para detectar materiales conductores (no magnéticos). La configuración básica consta de dos bobinas: una que se toma como referencia y otra que sirve para detectar. Las corrientes de Foucault producen el campo magnético que se opone al de la bobina de detección, lo que da como resultado un desequilibrio con respecto a la bobina de referencia (véase figura 5.51).

Entre más cerca se encuentre el objeto conductor al campo, mayor es el campo de impedancia magnética. La profundidad del objeto a la cual una corriente de Foucault puede ser inducida ( $\delta$ ) depende de tres variables: 1) la frecuencia a la cual está siendo emitido el campo magnético ( $\omega$ ), 2) la conductividad del objeto ( $\sigma_c$ ) y 3) la permeabilidad del medio ( $\mu$ ), y puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma_c \mu \omega}}$$

Cabe aclarar que el objeto debe tener un espesor mayor a  $\delta$ . Por tanto, los objetos que se pueden detectar con este tipo de sensores deben ser gruesos. Además, se requiere una frecuencia de operación por arriba de los 5 KHz; en ocasiones, dependiendo del fabricante y del tipo de objeto a detectar, la frecuencia de trabajo deberá ser de hasta 10 MHz.

Al igual que los sensores inductivos transversales, este tipo de sensores puede estar o no blindado. Un sensor blindado tiene la ventaja de que puede ser montado sobre una línea de producción, sin presentar problemas de interferencia; la desventaja es que solo permite la detección de objetos de manera frontal, ya que el campo está focalizado al frente por el mismo blindaje.

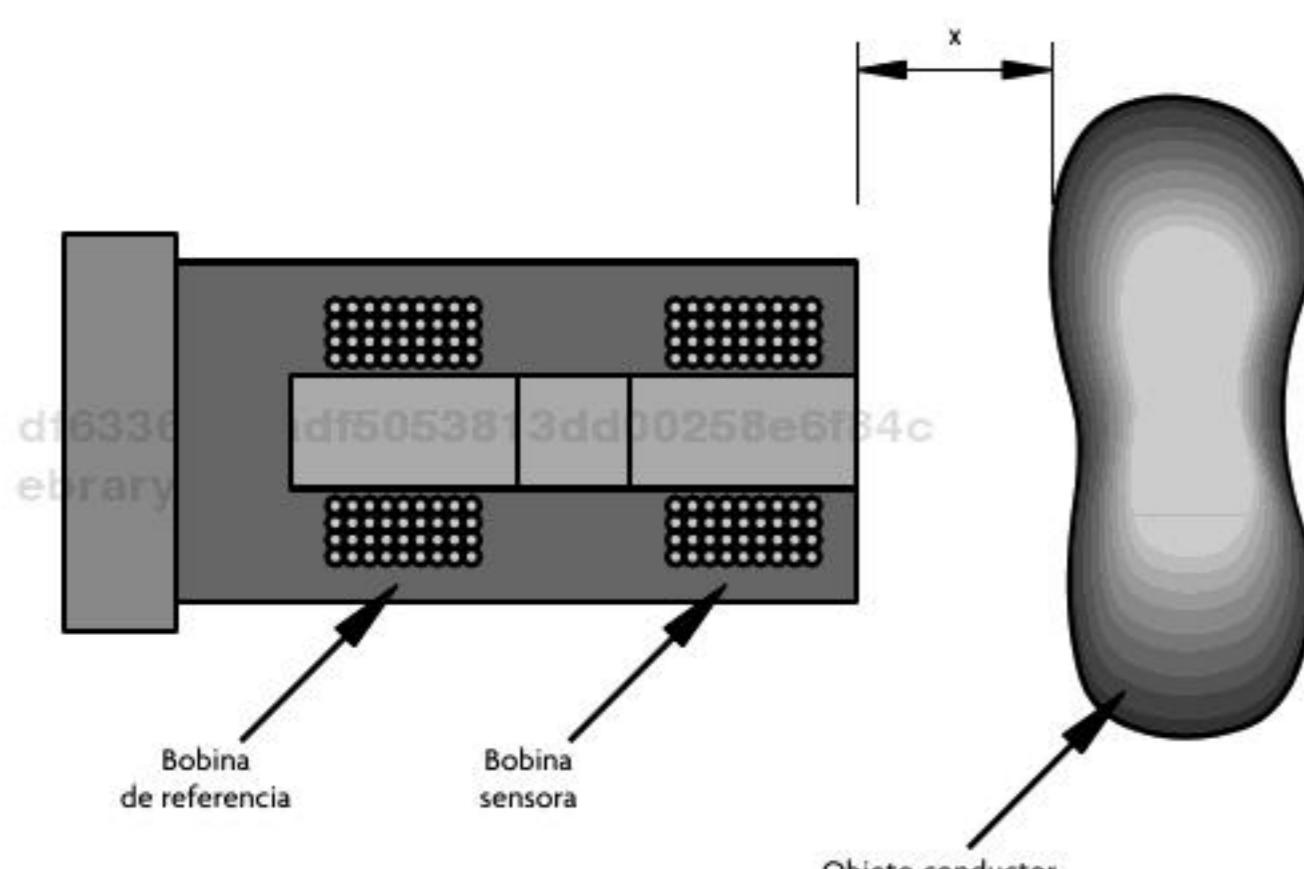


Figura 5.51 Sensor basado en corrientes de Eddy.

Además de la detección de proximidad, los sensores basados en corriente de *Eddy* pueden utilizarse para determinar el espesor del material, el espesor del revestimiento no conductor, la conductividad y grietas en el material; esta última resulta ser una de las aplicaciones típicas para estos sensores.

Una de las grandes ventajas de estos sensores es que no requieren de materiales magnéticos para su operación, por lo que pueden ser muy eficaces a altas temperaturas. Por ejemplo, una gran aplicación es la medición de nivel para metales fundidos.

## 5.9 Reed switch (interruptor de lengüeta)

Un *reed switch* es un transductor entre un campo magnético y un contacto mecánico. Este dispositivo electromecánico está compuesto de dos láminas ferromagnéticas (en algunos casos tres láminas ferromagnéticas), que en presencia de un campo magnético tienden a atraerse entre sí debido a la fuerza magnética ejercida. Una fuerza magnética también se conoce como fuerza de Lorentz; esta es percibida por un observador, en este caso el sensor, cuando existe carga en movimiento. En un imán permanente existe carga en movimiento, lo que provoca que líneas de campo magnético cerradas salgan y entren a través del material formando polos.

La arquitectura típica de un *reed switch* se observa en la figura 5.52. Las láminas están inmersas en un gas inerte, típicamente nitrógeno, y encapsuladas en un vidrio, con la finalidad de ser protegidas del medio.

Las láminas de un *reed switch* típicamente son fabricadas de níquel-hierro. El principio de operación de un *reed switch* es el siguiente: cuando se induce un campo magnético sobre las placas ferromagnéticas, estas tienden a ser atraídas entre sí debido a la fuerza magnética ejercida y cerrando un interruptor mecánico, lo que permite el paso de corriente en un circuito (véase figura 5.53).

La dirección del campo determina si el contacto mecánico se abre o se cierra. Cuando el eje del polo magnético es paralelo al eje del switch, este se cierra, y cuando, por el contrario, el eje del polo magnético es perpendicular al eje del switch, este se abre, siempre que se trate de un *reed switch* normalmente abierto; ahora bien, cuando se trata de un *reed switch* normalmente cerrado, esto ocurre en sentido inverso. De igual manera, es posible abrir el interruptor si el campo magnético es alejado del sensor (véase figura 5.54).

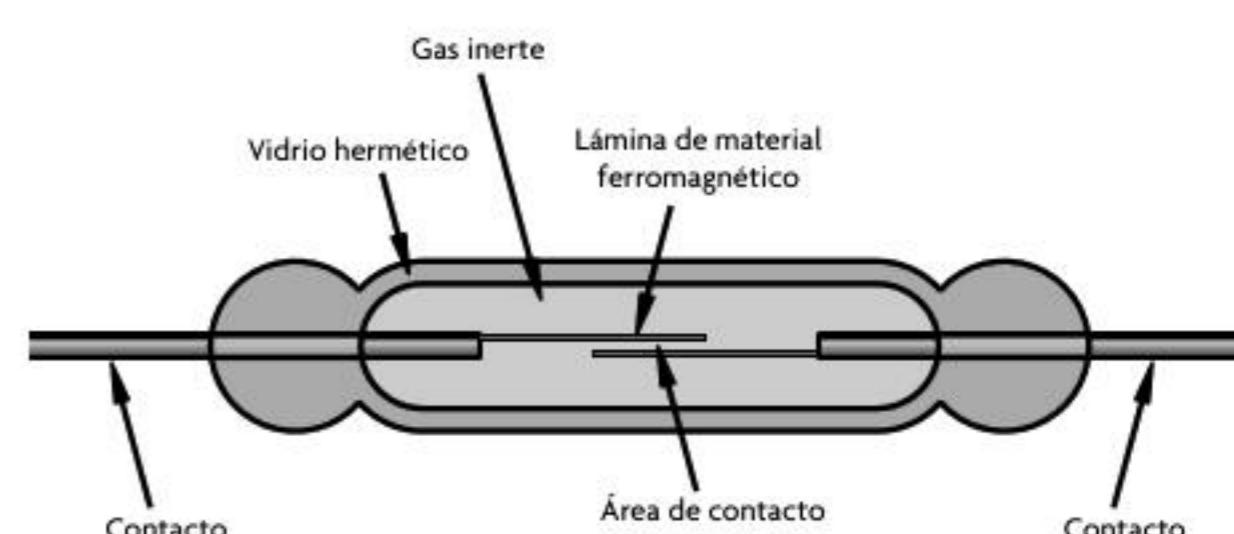


Figura 5.52 Arquitectura típica de un *reed switch*.

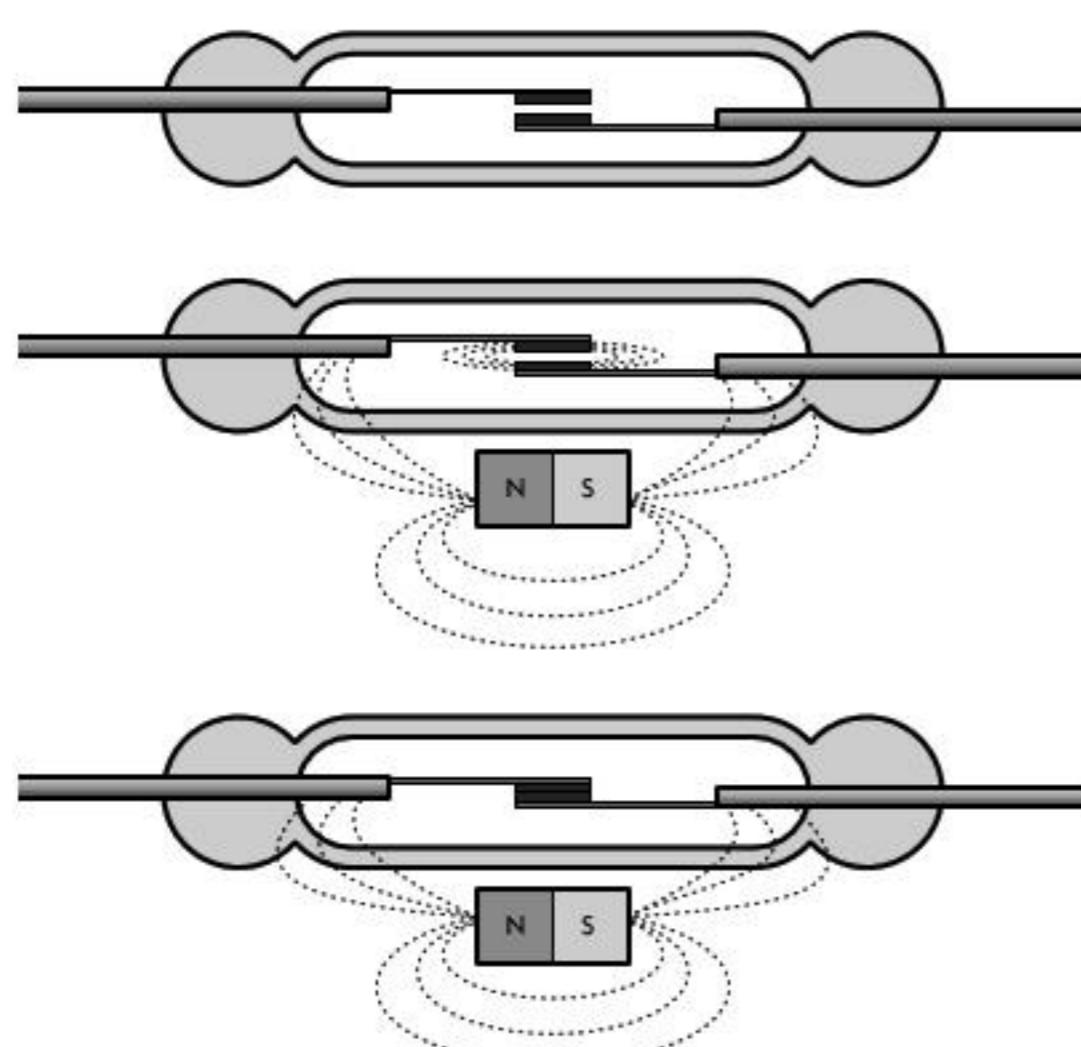


Figura 5.53 Principio de operación de un *reed switch*.

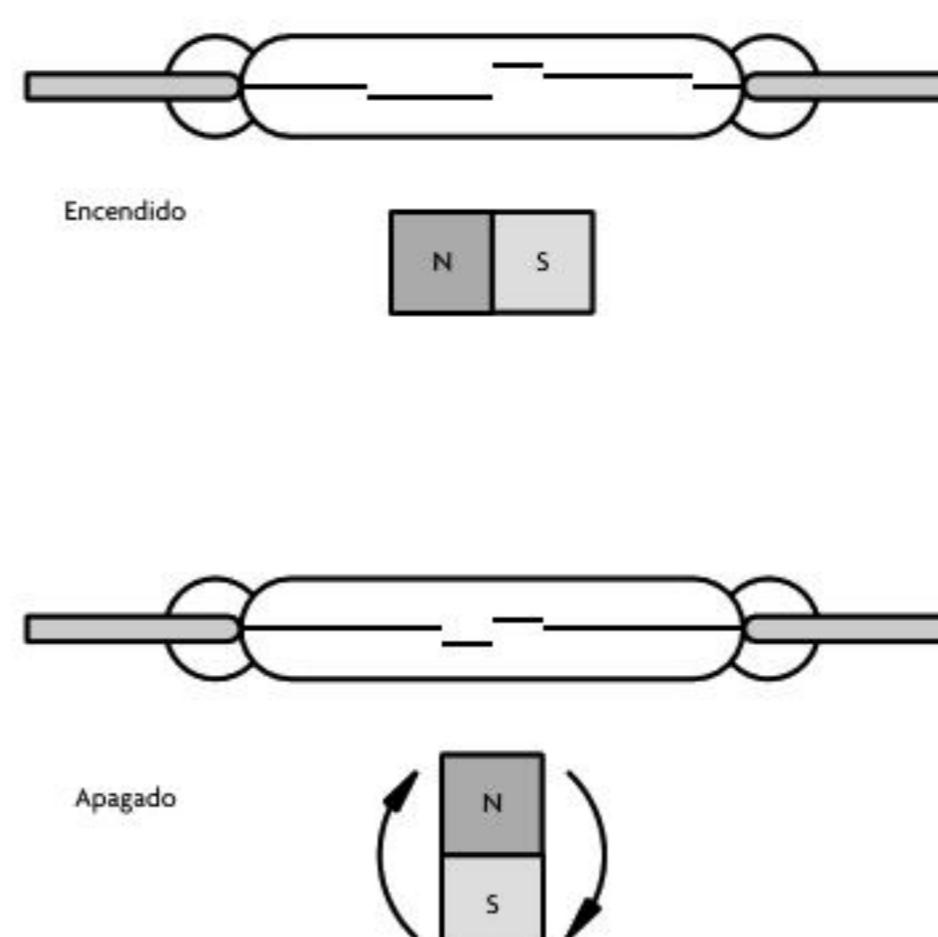
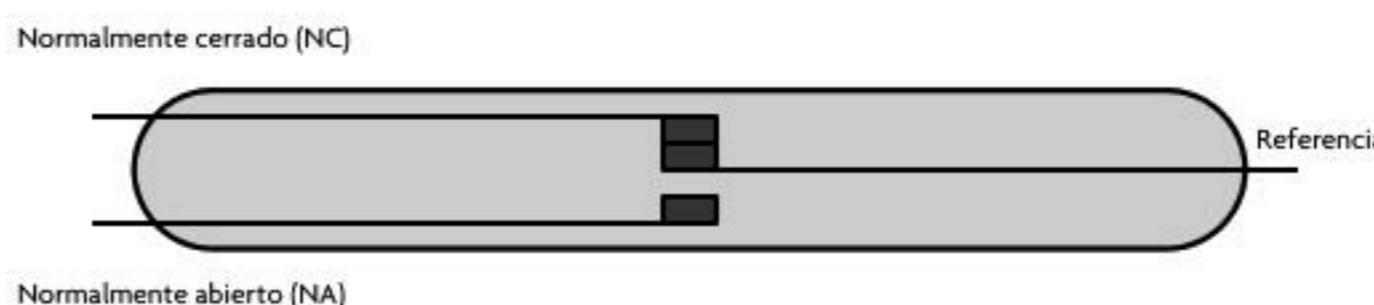


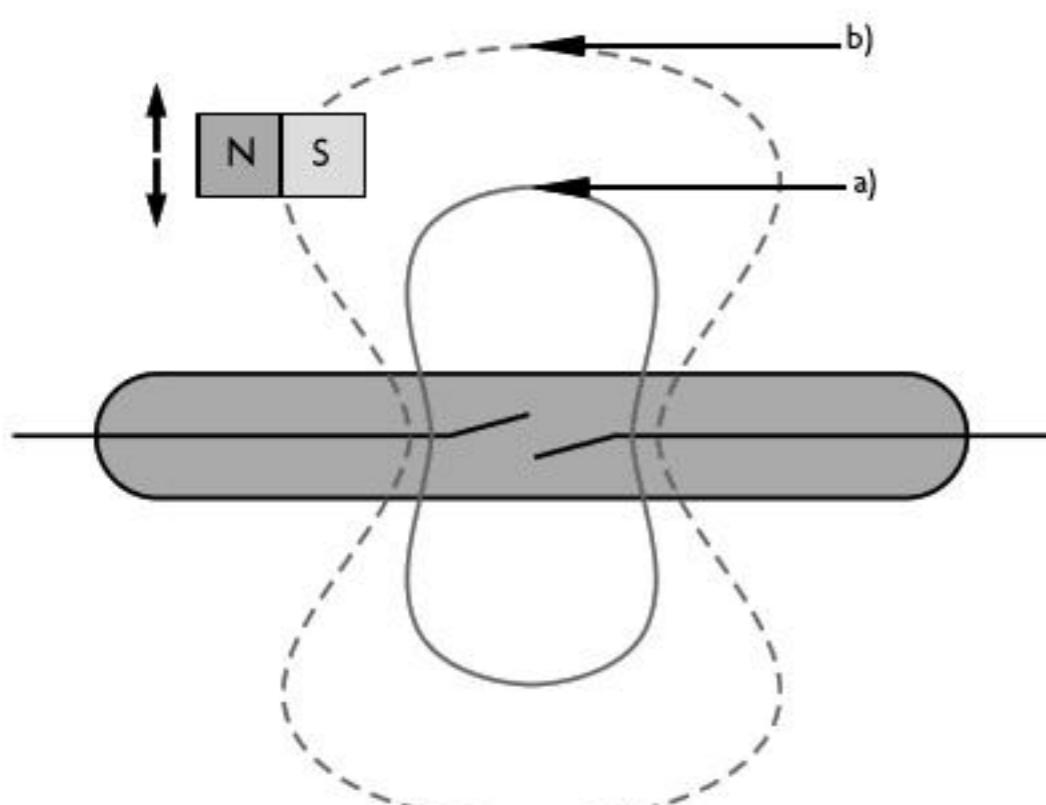
Figura 5.54 Operación de un *reed switch*.

Cuando se trata de un *reed switch* de tres terminales, este cuenta con dos contactos: uno normalmente abierto y uno normalmente cerrado (véase figura 5.55).



**Figura 5.55** Reed switch con tres terminales.

La principal ventaja de este sensor de proximidad es su bajo costo. Además de tener un principio de operación muy sencillo, permite billones de cambios de estado hasta tener que ser reemplazado. Su gran ventaja es que cuando se encuentra en estado bajo no permite el flujo de corriente en el circuito, lo que lo hace un excelente candidato cuando se trata de ahorro de energía. Las desventajas son que su tiempo de conmutación de estado bajo a estado alto es muy elevado, lo que lo hace un mal candidato cuando se trata de operación a altas frecuencias. Además, se requiere que las aplicaciones en las que se encuentre sean estáticas o estén libres de vibraciones mecánicas, debido a que el sensor presenta histéresis; esto quiere decir que si el imán permanente, que en este caso representa la fuente de campo magnético, tiene ligeras fluctuaciones en su posición, provoca que el sensor tenga cambios de estado indeseables. Considérese la figura 5.56, en esta se muestra que cuando el imán se encuentra en la posición más allá del punto b), el *reed switch* está en estado bajo; pero cuando el imán sobrepasa el punto a), este está en estado alto. La posición indeseable para el imán es entre a) y b), ya que causa fluctuaciones indeseables en el estado del sensor, por lo que no es muy recomendable el uso de este sensor en sistemas dinámicos.



**Figura 5.56** Histéresis en un *reed switch*.

## Ejercicio de aplicación

### Detector de proximidad usando un *reed switch*

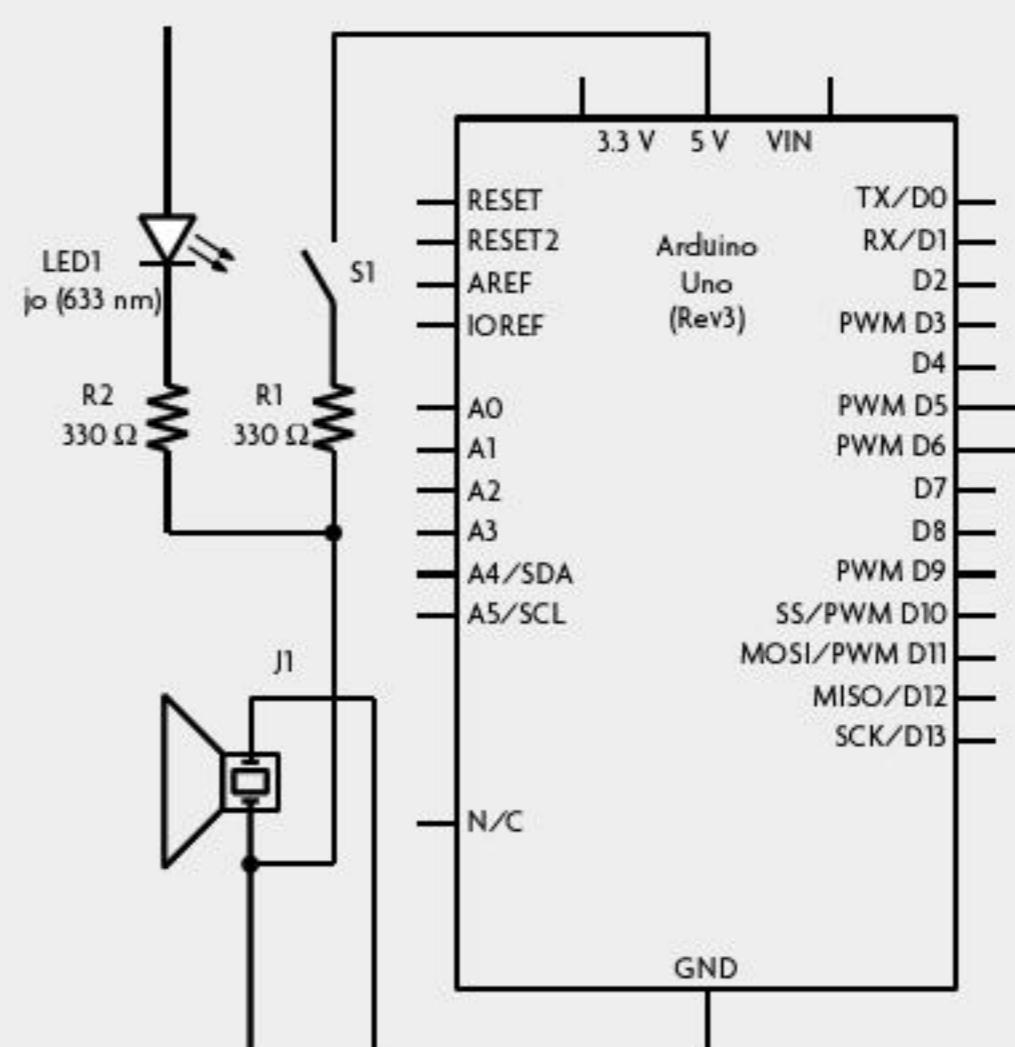
#### Objetivo

Construir una alarma que indique el estado de una puerta (cerrado/abierto) a través del interruptor magnético *reed switch* empleando el Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- *Reed switch* (normalmente abierto)
- 1 resistencia de  $10\text{ k}\Omega$ , 1 de  $330\ \Omega$
- 1 buzzer
- 1 LED blanco
- Imán de neodimio
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Construcción del circuito

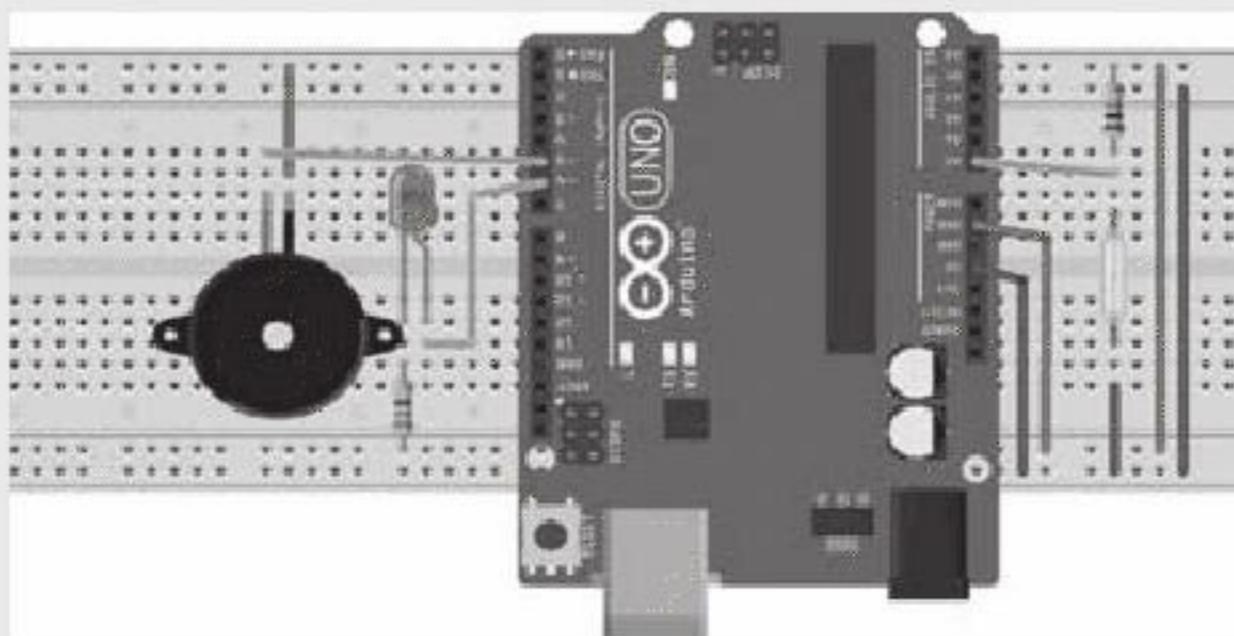


**Figura 5.57** Esquema del circuito de alarma con *reed switch*.

Para registrar la apertura y el cierre del *reed switch* por efecto de un campo magnético, una terminal del *reed switch* se conecta a  $V_{CC}$  y la otra terminal a una resistencia de pull-down (véanse figuras 5.57 y 5.58). De esta forma, cuando el circuito esté abierto se tendrá una señal en estado bajo ('0' lógico), y al cierre del interruptor un estado alto ('1' lógico). Como alarma se empleará un LED y un buzzer.

### Instalación de la alarma

En el marco de la puerta se instala un imán de neodimio, de tal forma que no intervenga con el paso de la puerta. El *reed switch* y su circuito (resistencia pull-down) se colocan en la parte superior de la puerta, cercana al imán, asegurando que al momento de mantenerla cerrada el campo magnético interactúe con el *reed switch*, cerrando el interruptor y enviando una señal en estado alto al Arduino®.



**Figura 5.58** Esquema en protoboard del circuito de alarma con *reed switch*.

### Código

#### Descripción del programa

El siguiente programa lee en forma constante el estado del *reed switch*. Un estado alto indica que el *reed switch* está bajo el influjo de un campo cercano, lo que implica que la puerta está cerrada. Si el estado es bajo indica que se ha alejado el *reed switch* del imán; esto significa que la puerta está abierta y se activa la alarma del LED y el buzzer.

```
*****Reed Switch*****
/*
 * El reed switch es un sensor magnético que
 * funciona como switch.
 * Cuando se acerca un campo magnético lo
 * suficientemente grande al
 * reed switch este se cierra.
 * Este sensor está normalmente abierto.
 *
 * La siguiente práctica consiste en una pequeña
 * alarma que alerta la
 * apertura de puerta. En la puerta se instala el
 * reed switch y un imán
 */


```

```
/*en el marco. La señal del sensor es enviada al
Arduino, el cual al *
percibir la señal de que se ha *
abierto la puerta enciende un LED y hace
sonar un buzzer*
*****



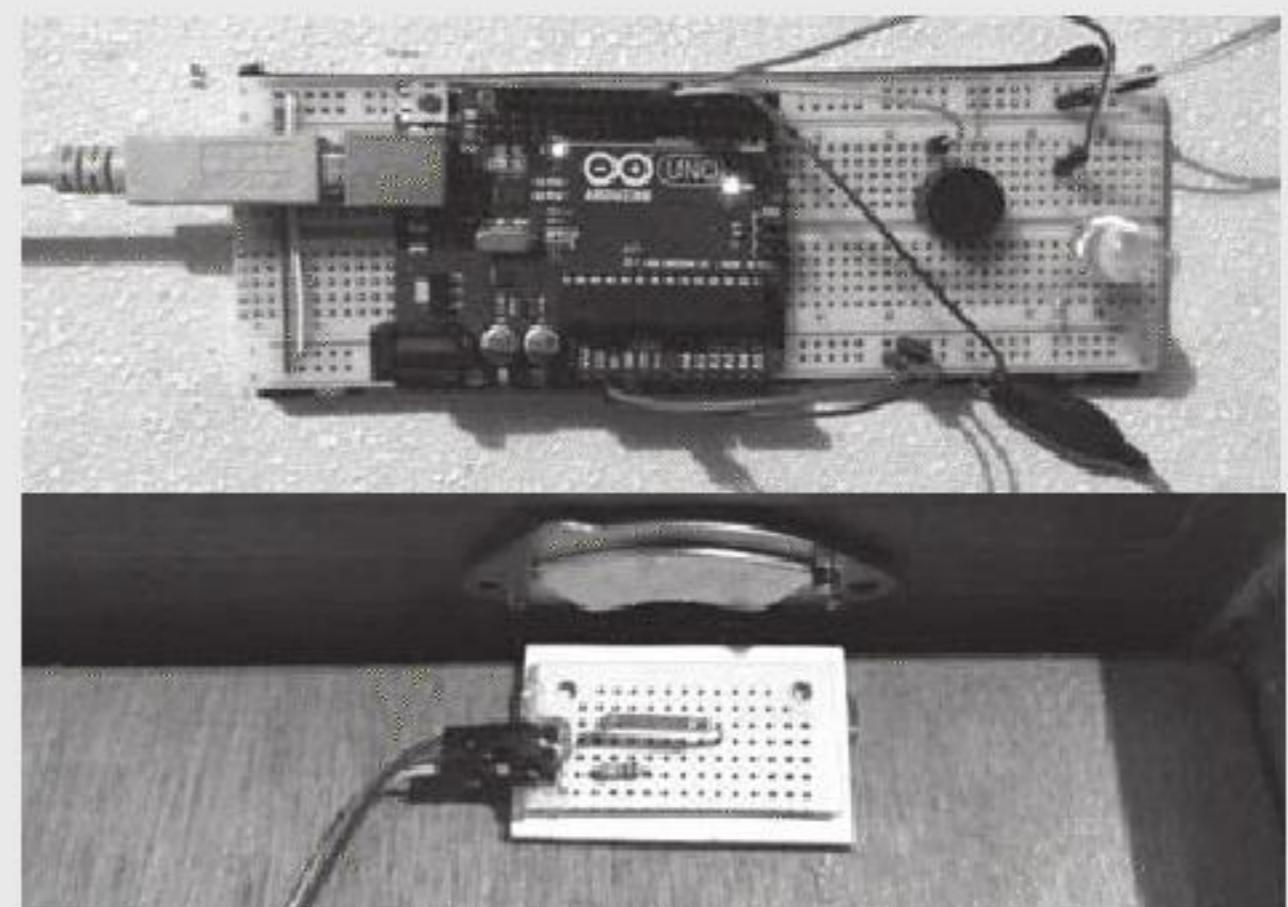
//Definimos los pines de salida y entrada
#define buzzer 7
#define led 6
#define rSwitch 2

void setup()
{
    pinMode(buzzer, OUTPUT);      //Definimos la
    //configuración de los
    //distintos pines
    pinMode(led, OUTPUT);
    pinMode(rSwitch, INPUT);
}

void loop()
{
    while(digitalRead(rSwitch) == LOW) //Cuando se
    abre la puerta el
    //circuito del reed switch se abre y envía un
    '0' logico al Arduino.
    //Mientras la puerta este abierta:
    {
        digitalWrite(buzzer, HIGH);    //
        Encendemos el buzzer
        digitalWrite(led, HIGH);      //
        Encendemos el diodo LED
    }
    digitalWrite(buzzer, LOW); //Cuando la puerta
    esta cerrada apagamos el
    digitalWrite(led, LOW);     //buzzer y el LED
}
```

### Pruebas

#### Puerta cerrada



**Figura 5.59** Cuando la puerta está cerrada, el imán mantiene cerrado el interruptor *reed switch* y no se activa la alarma.

Cuando la puerta se abre, el *reed switch* abre el circuito, pues disminuye el efecto del campo magnético del imán; esto activa la alarma.

## 5.10 Efecto Hall

Los sensores de proximidad basados en el principio de transducción del efecto Hall requieren de un campo magnético (en general, un imán permanente) y una placa conductora. El principio básico de funcionamiento consiste en convertir un campo magnético en un voltaje equivalente llamado *voltaje Hall* (véase capítulo 1). El efecto Hall establece que si una corriente eléctrica fluye a través de un conductor en presencia de un campo magnético, se ejercerá una fuerza transversal que busca equilibrar el efecto de dicho campo, produciendo un voltaje Hall, medible en los extremos del conductor.

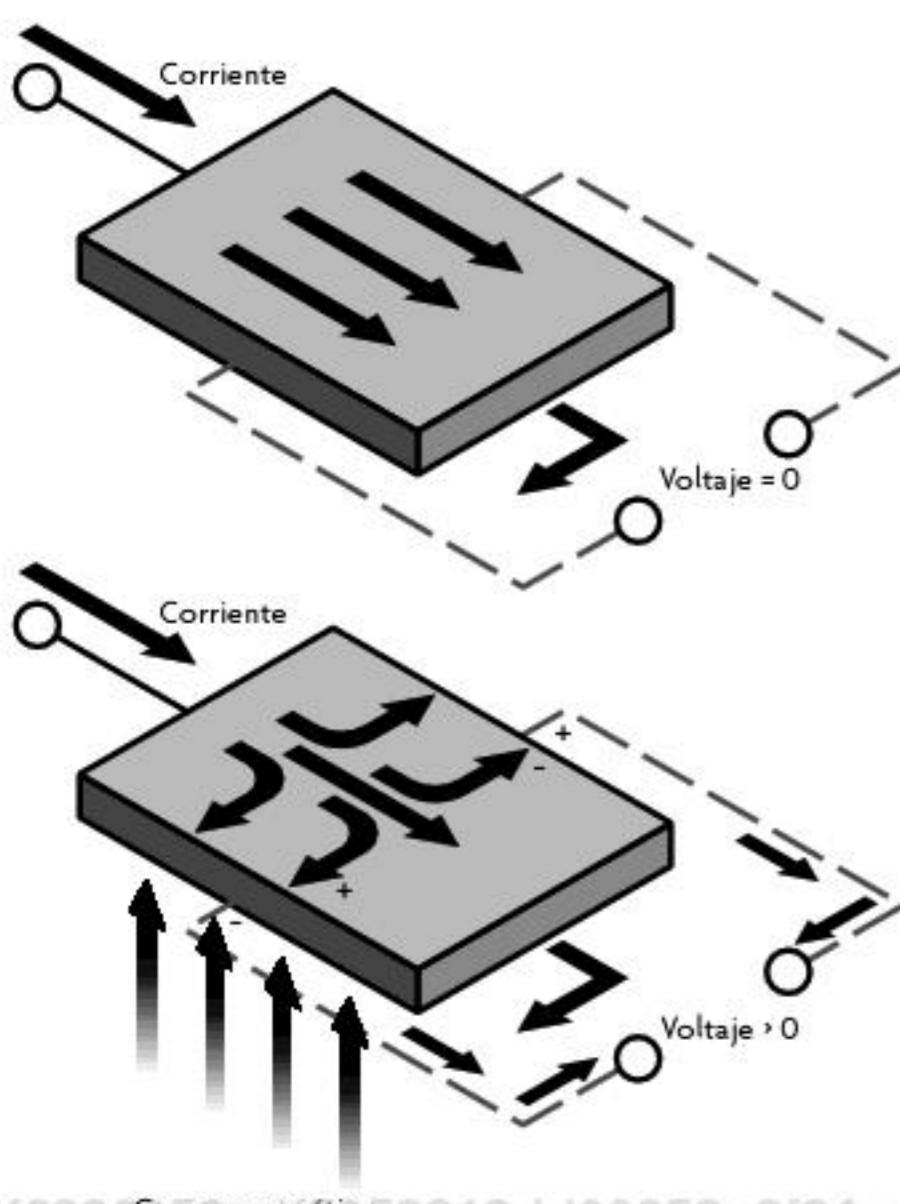
Este tipo de sensor determina la proximidad de un objeto mediante el uso de un imán permanente acoplado a dicho objeto; si el imán se aproxima se genera el voltaje Hall, pero si el imán se aleja no existe el efecto Hall, lo que se traduce en un cambio de un estado alto a un estado bajo en la salida del sensor y permite determinar si el objeto está próximo o no. Otra posible configuración es mantener la fuente de campo cercana al sensor; cuando un material ferromagnético se aproxima, el campo magnético percibido por el sensor se debilita y permite identificar si el objeto ferromagnético está próximo. Este principio solo funciona para materiales ferromagnéticos, ya que con el uso de otro tipo de material, este no tendría influencia sobre el campo del imán permanente y no sería posible determinar si el objeto está próximo o no.

Un sensor de efecto Hall está conformado por un amplificador de voltaje y un circuito comparador, encargado de emitir la señal de cambio de estado. En operación normal, una corriente fluye a través del chip; debido a que la carga está distribuida de manera uniforme sobre la placa conductora, no existe un voltaje Hall; cuando el objeto se aproxima trayendo consigo la fuente de campo magnético, la carga se alinea generando un voltaje Hall. Dicho voltaje es amplificado, y al pasar por el comparador se emite una señal en alto indicando que el objeto se encuentra próximo al sensor.

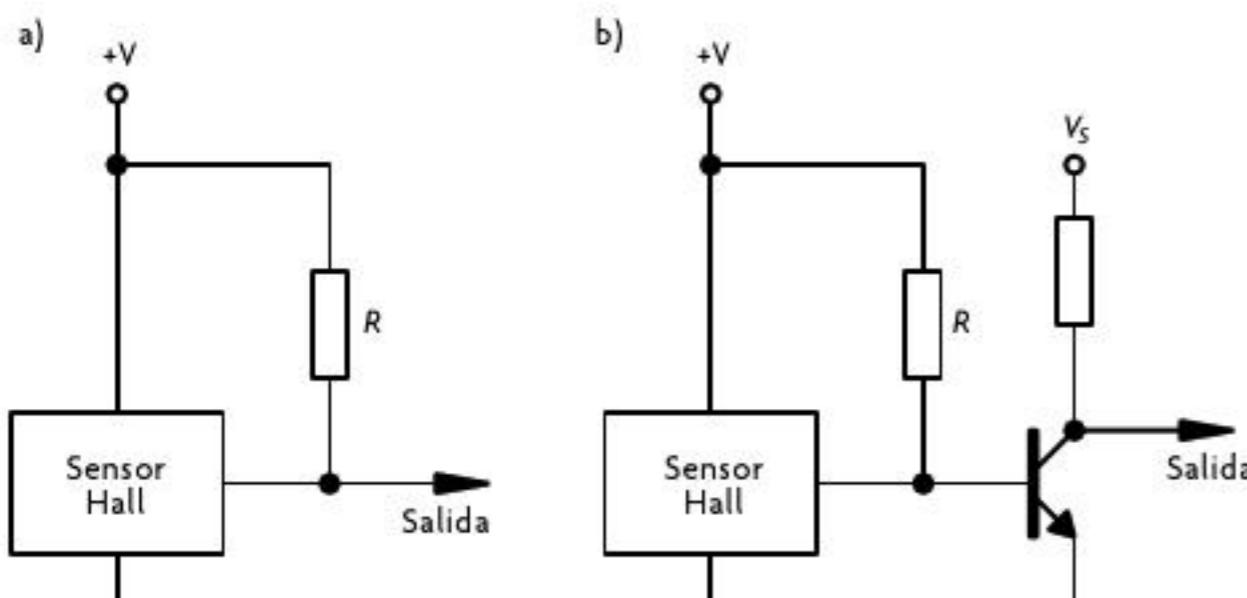
Debido a que el efecto Hall se presenta solo cuando el campo magnético fluye en dirección vertical al sensor, es posible que existan errores de comutación, además de presentar velocidades de comutación bajas.

Las aplicaciones de los sensores de efecto Hall son muy amplias; por ejemplo, en la industria automotriz este tipo de sensores ha sustituido a los sensores inductivos convencionales, que constan de una bobina, ya que el acondicionamiento de los sensores de efecto Hall es mucho más barato y práctico, debido a que manejan los niveles de voltaje necesarios para ser conectados de forma directa a una microcomputadora o un microprocesador. Sistemas de alarmas en puertas y ventanas, encoders y límites de carrera también son aplicaciones de estos sensores.

La salida de este tipo de sensores es, en general, de colector abierto, por lo que se requiere de una resistencia a la salida, ya sea entre la alimentación y el nodo de salida o entre la referencia a tierra y el nodo de salida. Otra posible configuración es el uso de un circuito de disparo como un transistor.



**Figura 5.60** Efecto Hall.



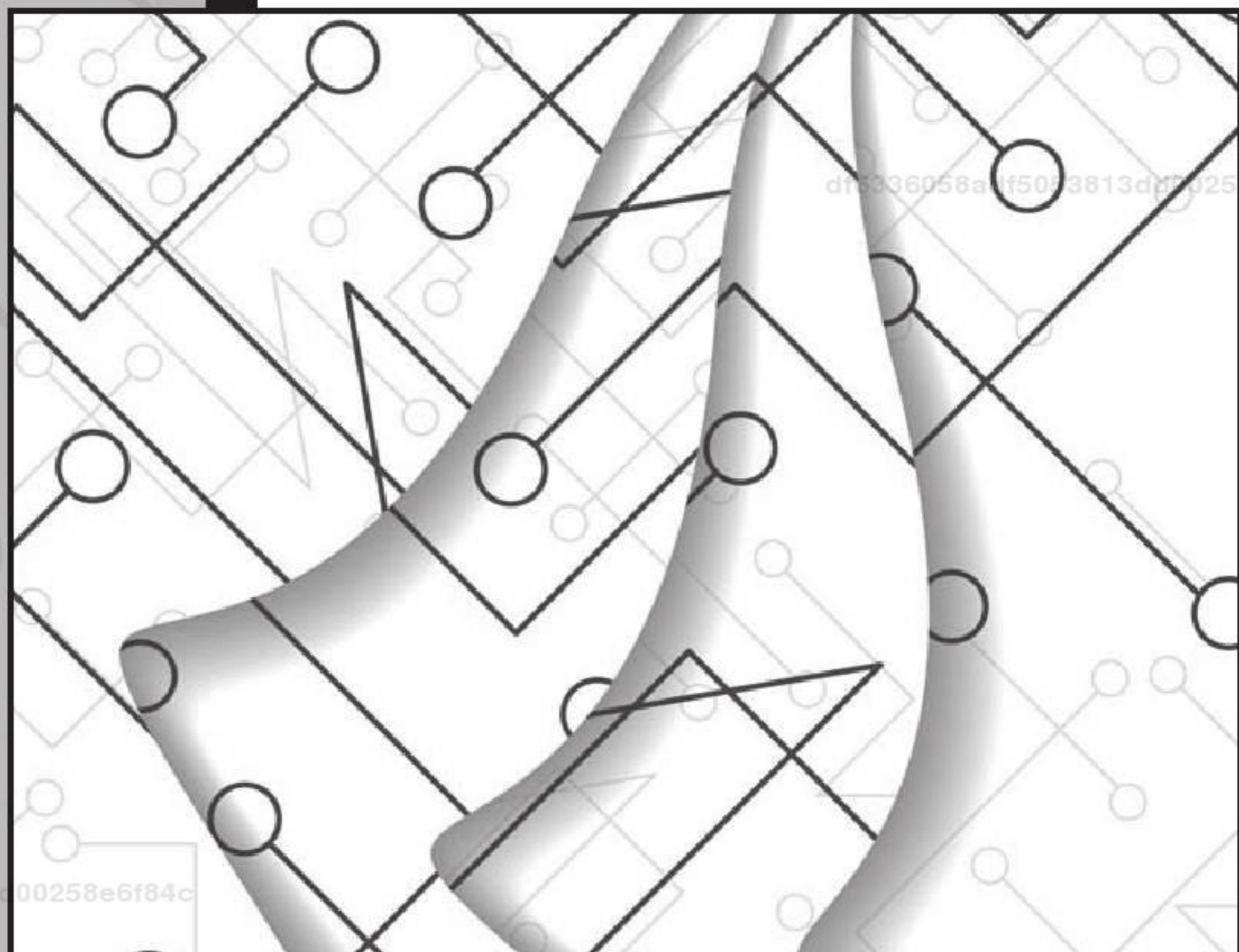
**Figura 5.61** Circuitos típicos de acondicionamiento para sensores de efecto Hall. a) Configuración con resistencia en pull up. b) Configuración con circuito de disparo.



df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# 6

## Sensores de temperatura y humedad



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

#### Objetivo general

#### Objetivos particulares

- ▶ Para leer este capítulo es necesario tener conocimientos básicos de electrónica y circuitos eléctricos, así como conocimientos elementales con la tarjeta Arduino®, sobre todo en lo que compete a su interfaz gráfica y al lenguaje de programación.
- ▶ Conocer el principio de funcionamiento de los sensores de humedad y temperatura, sus características y configuraciones, así como algunas aplicaciones con la tarjeta Arduino®.
- ▶ ■ Identificar la diferencia entre los sensores de temperatura y los sensores de humedad.
  - Distinguir entre los diferentes sensores de temperatura y sus posibles aplicaciones.
  - Distinguir entre los diferentes sensores de humedad y sus posibles aplicaciones.

## 6.1 Conceptos básicos de temperatura

En este capítulo se tratan los sensores que se utilizan para medir la temperatura y la humedad, así que primero se define el concepto de **temperatura**. Se dice que la temperatura es la intensidad de calor de un objeto. Este tipo de energía calorífica es una medida promedio de la energía cinética de las partículas de la materia; es decir, es la energía asociada a los movimientos de las moléculas del sistema. Esto ocasiona que cuanto mayor sea esta energía, mayor es la temperatura. Existen varios procedimientos utilizados para determinar esta magnitud física, los cuales pueden variar de manera significativa de acuerdo con las condiciones de detección, tipo de elemento u objeto a medir y la precisión requerida. Esta información suele suministrarse en unidades de grados en una escala estándar como:

- Escala Fahrenheit
- Escala Celsius
- Escala Kelvin
- Escala Rankine

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Estas escalas tienen la característica de poder establecerse a partir de las propiedades termométricas de una sustancia; por tanto, una escala de temperatura puede definirse como la relación continua entre la propiedad termométrica de una sustancia específica y la temperatura, tal como es medida en la escala. Por ejemplo, en el caso del agua contenida en un tubo, la propiedad termométrica puede ser la presión del vapor. En la tabla 6.1 se muestran las propiedades físicas del agua de acuerdo con las escalas de temperatura más comunes.

Escala	Cero absoluto	Ebullición del agua	Fusión del hielo
Fahrenheit	-459.6 °F	212 °F	32 °F
Celsius	-273.2 °C	100 °C	0 °C
Kelvin	0 K	373.2 K	273.2 K
Rankine	0 R	671.6 R	491.6 R

**Tabla 6.1** Propiedades del agua de acuerdo con diferentes escalas de temperatura

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

En general, las propiedades físicas de los cuerpos varían en función de la temperatura; por ejemplo, la densidad, la solubilidad, la dureza, la elasticidad, inclusive el área y el volumen.

Los instrumentos para sensar la temperatura suelen aprovechar distintos fenómenos característicos y propios de los materiales con los cuales se fabrican, fenómenos que se producen cuando son sometidos a la influencia de la energía térmica, entre los que destacan los siguientes:

- Radiación suministrada por el material.
- Fuerza electromotriz generada por la unión de dos metales de diferentes propiedades.
- Cambio en el valor de la resistividad de un material.
- Cambio en el estado del material, así como en el volumen del mismo.

En general, se suele clasificar a los transductores que convierten la energía térmica en otro tipo de energía en tres categorías principales, con base en las propiedades termométricas utilizadas como función del medio:

- **Termómetros:** De líquido (alcohol y mercurio) en vidrio y bimetálico.
- **Sistemas termales:** Líquidos orgánicos, vapor orgánico, gas y mercurio.
- **Termoeléctricos:** Termistor, termopar, bulbo de resistencia eléctrica y pirómetro.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## 6.2 De energía térmica a energía eléctrica

Los transductores termoeléctricos son dispositivos que relacionan la variación de la energía térmica del objeto con una variación equivalente de una señal eléctrica; estos transductores, que trabajan gracias a las propiedades eléctricas de los conductores y semiconductores, están conformados de manera principal por el termistor, termopar, resistencias eléctricas, medidores de radiación y medidores ópticos. En la tabla 6.2 se muestra un concentrado de ventajas y desventajas de los sensores de temperatura basados en el principio de transducción termoeléctrico.

Sensor	Ventajas	Desventajas
Termistor	Alta salida Rápido Alta sensibilidad Implementación fácil	No lineal Rango de temperaturas limitado Requiere fuente de corriente Autocalentamiento
Termopar	Implementación simple y fácil Bajo costo Amplio rango de temperaturas	No lineal Bajo voltaje Requiere referencia Baja estabilidad Baja sensibilidad
Rtd (del inglés: <i>Resistance temperature detector</i> )	Alta estabilidad Alta precisión	Alto costo Lento Requiere fuente de corriente Poco cambio en la resistencia Medida con puente (4 conductores)
IC (del inglés: <i>Integrated Circuit</i> )	Alta linealidad Salida alta Bajo costo	Rango de temperaturas limitado < 250 °C Requiere fuente de alimentación Lento Autocalentamiento

Tabla 6.2 Ventajas y desventajas de los sensores de temperatura

## 6.3 Termistor

El termistor es básicamente una resistencia construida a base de material semiconductor que es sensible a los diferentes niveles de temperatura y varía su valor resistivo en función de los cambios de la energía térmica. Se sabe que en un metal puro el aumento de la temperatura provoca un incremento de la resistencia eléctrica; en contraste, el aumento de temperatura en el material semiconductor con el que está construido el termistor provocará una disminución en dicha resistencia. Esta característica se debe al incremento de energía cinética en los electrones presentes en el semiconductor. Con el aumento de temperatura, el incremento en el suministro de electrones es alto; esto da un coeficiente negativo mucho mayor que el positivo de los metales, lo cual implica que el termistor tiene sensibilidad alta a cambios pequeños de temperatura. Sin embargo, existe un tipo de termistores llamados de coeficiente de temperatura positivo que actúan de forma similar a los metales puros, ya que aumentan su resistividad con el aumento de la temperatura.

La temperatura ambiente dentro del rango de los termistores se puede considerar como una temperatura "baja"; esto significa que el termistor tendrá una alta resistencia, lo cual simplifica su implementación, ya que permite únicamente el uso de dos filamentos para generar dicha resistencia. En estas condiciones, para proveer una respuesta mayor con una variación pequeña en la temperatura, las dimensiones y la forma del termistor pueden variar.

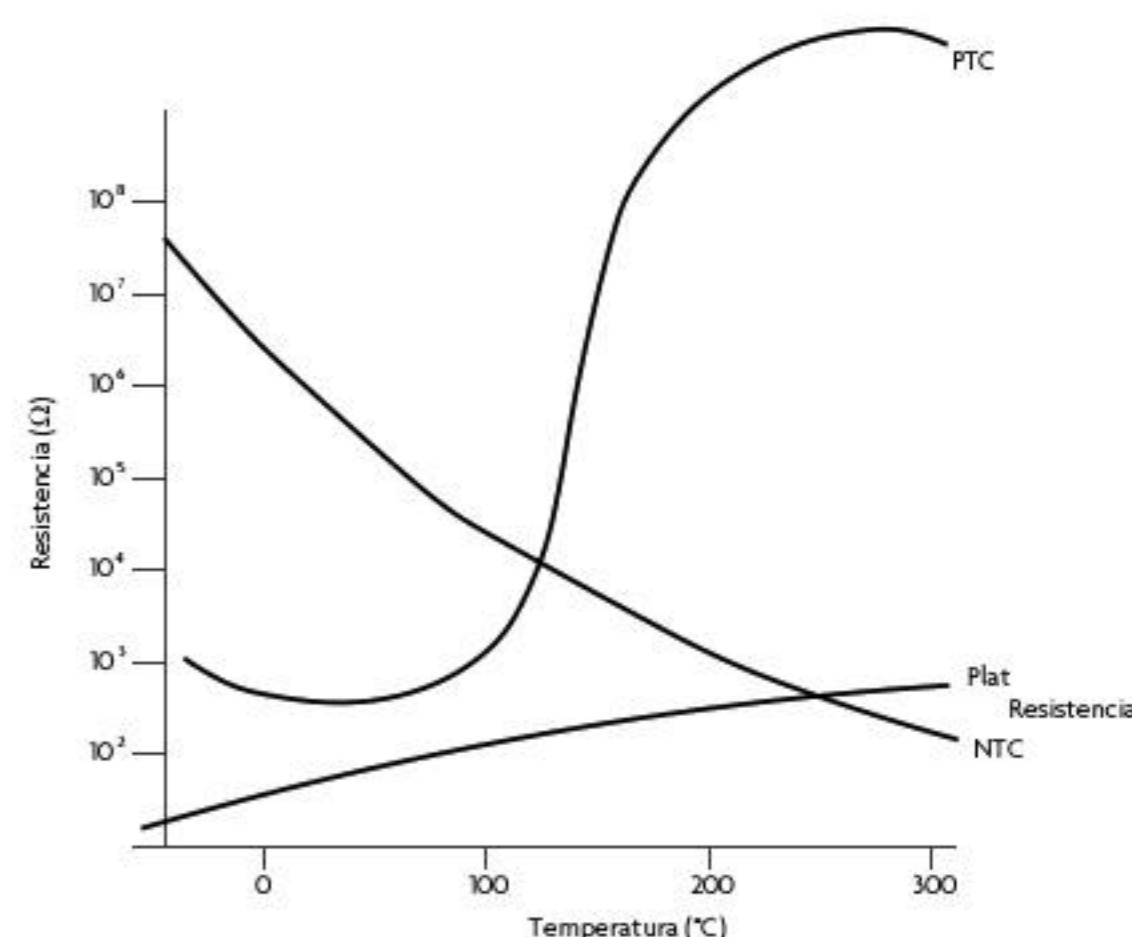
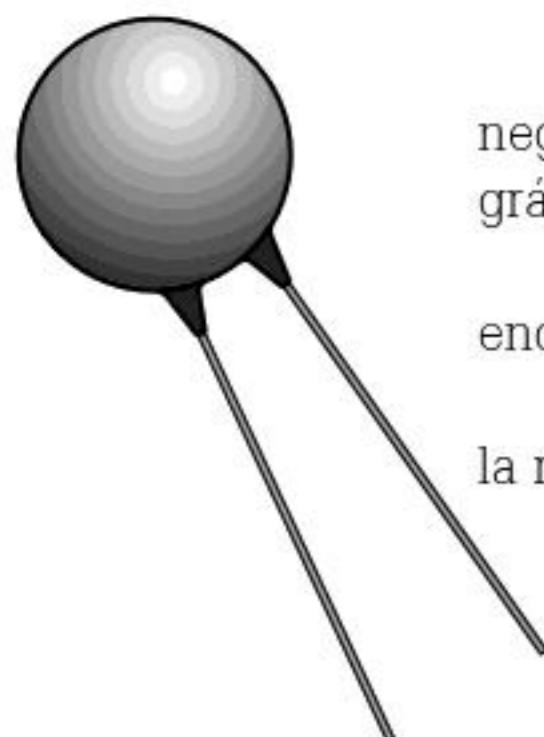


Figura 6.1 Relación temperatura-resistencia de los termistores PTC y NTC.058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary



**Figura 6.2**  
Termistor tipo NTC.

Como ya se dijo antes, existen dos grupos de termistores: 1) los de coeficiente de temperatura negativo (NTC) y 2) los de coeficiente de temperatura positivo (PTC); en la figura 6.1 se muestran las gráficas que los caracterizan.

Por lo común, los termistores con coeficiente de temperatura negativo se fabrican en distintos encapsulados, como elipsoide, de disco, de barra y de chip, por citar solo algunos (véase figura 6.2).

Este tipo de fabricación depende básicamente de su aplicación final. La función que relaciona la resistencia de este tipo de termistor y la temperatura no es lineal, y está dada en la ecuación 6.1.

$$R_t = R_o e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right)} \quad (6.1)$$

donde:

$R_t$ : resistencia del termistor a la temperatura  $T$  en Kelvin [ $\Omega$ ]

$T_o$ : temperatura de referencia en Kelvin, por lo normal 298 Kelvin

$R_o$ : resistencia referida a la temperatura  $T_o$  en Kelvin [ $\Omega$ ]

$\beta$ : constante sobre rangos moderados de temperatura que depende de la composición y fabricación del material del termistor [ $\Omega$ ]

A la ecuación 6.1 se le llama **ecuación beta** del termistor, ya que  $\beta$  es el principal parámetro proporcionado por los fabricantes. Este parámetro depende del tipo de termistor y no es independiente de la intensidad de la temperatura; por tanto, asumir una  $\beta$  constante a pesar de que exista una variación en la temperatura puede acarrear errores. Es frecuente observar que el valor de  $\beta$  se encuentra entre el rango de los 2 000 K y 5 000 K; por ejemplo, para el caso del dispositivo termistor con nomenclatura NTC101,  $\beta$  se encuentra aproximadamente a 3 100 K.

Existe una condición en los termistores que se debe tomar en cuenta y es debido a la circulación de corriente, la cual genera el calentamiento del dispositivo. Este calentamiento conlleva un error aproximado de  $\pm 0.3$  °C en un rango de 0 a 50 °C; sin embargo, esta corriente también es necesaria en el termistor para medir la resistividad. Por último, esto ocasionará pérdidas por el efecto joule, las cuales elevan la temperatura y reducen la resistencia, disipando más potencia al ambiente; esta propiedad se representa en la figura 6.3.

La ecuación 6.2 que relaciona la potencia consumida con la temperatura del termistor viene dada por:

$$P_{Th} = \delta_d (T_{Th} - T_{amb}) \quad (6.2)$$

donde:

$T_{Th}$ : temperatura de trabajo [K]

$T_{amb}$ : temperatura ambiente [K]

$\delta_d$ : constante de disipación de calor [W/K]

Cabe recordar que la mayoría de los termistores en condiciones de operación "normales" tienen definida esta constante para el aire; entonces, es lógico encontrar un valor diferente de este parámetro si las condiciones de operación se realizan en aceite, agua e inclusive el vacío.

Si la intensidad de corriente que circula en el termistor es pequeña, entonces la potencia no será lo bastante alta para apreciar cambio alguno en la temperatura; en otras palabras, la resistencia permanecerá con el mismo valor, así que existirá una aproximación lineal a la ley de Ohm. Obsérvese esta relación en las corrientes menores a las del punto A de la figura 6.3; si el voltaje en el termistor aumenta

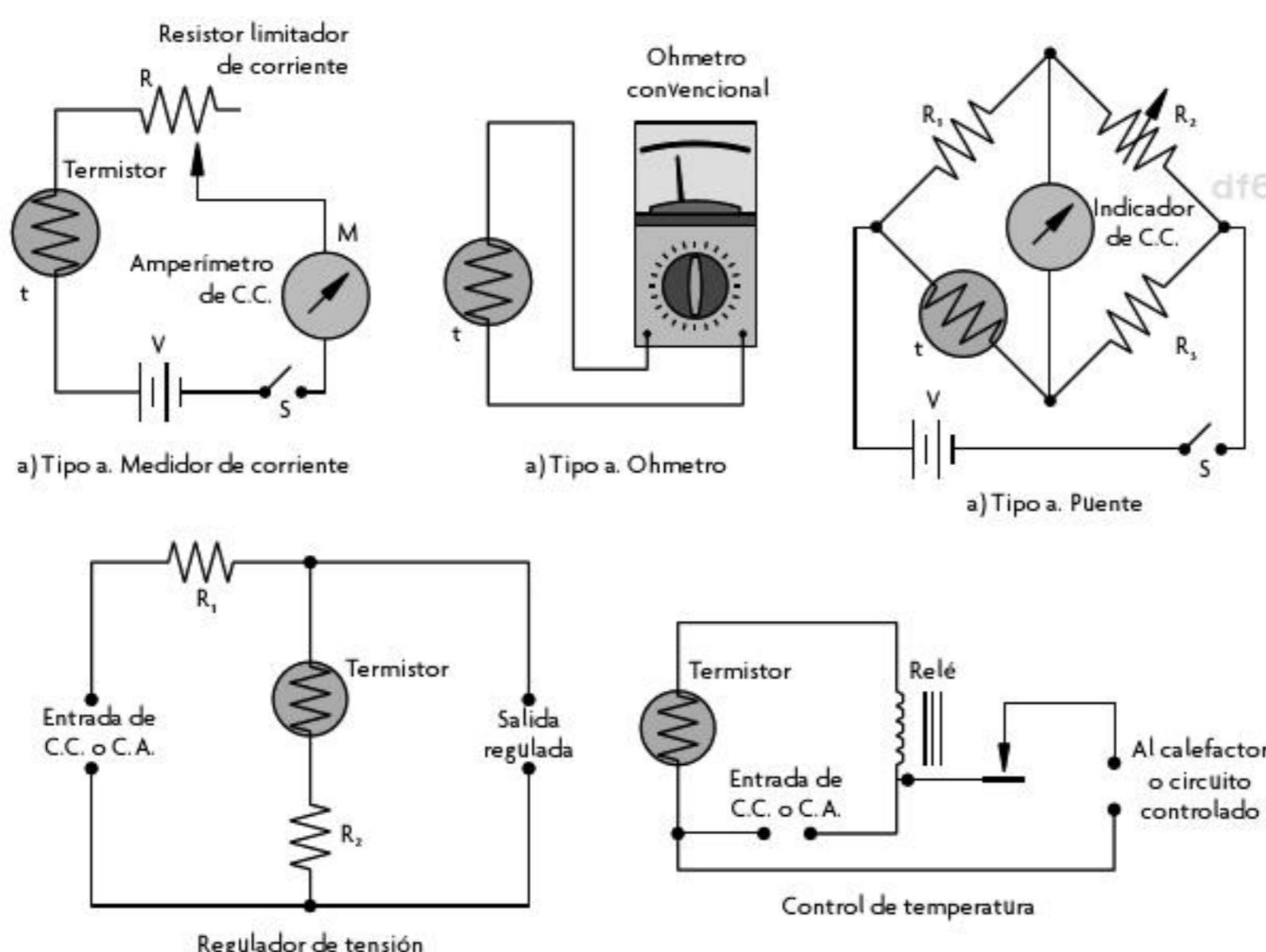


**Figura 6.3** Relación voltaje-corriente del termistor tipo NTC paramétrica con la resistencia y la potencia disipada.

la potencia, esto provoca una disminución de la resistencia, ya que aumenta la temperatura y la corriente.

## 6.4 Medición de temperatura

Existen algunas ventajas en la medición de la temperatura a partir del termistor, de las cuales se puede resaltar su fácil manejo e incorporación a los sistemas de medición por su tamaño reducido; el sensor es de bajo costo, además de que permite obtener alta sensitividad. En la figura 6.4 se muestran los circuitos electrónicos con algunas de las configuraciones usadas con frecuencia en aplicaciones del termistor.



**Figura 6.4** Circuitos básicos con aplicaciones del RTD.

## Ejercicio de aplicación

### Medición de la temperatura con termistor

#### Objetivo

Medir la temperatura de algún medio a través de un termistor con el uso del Arduino Uno®.

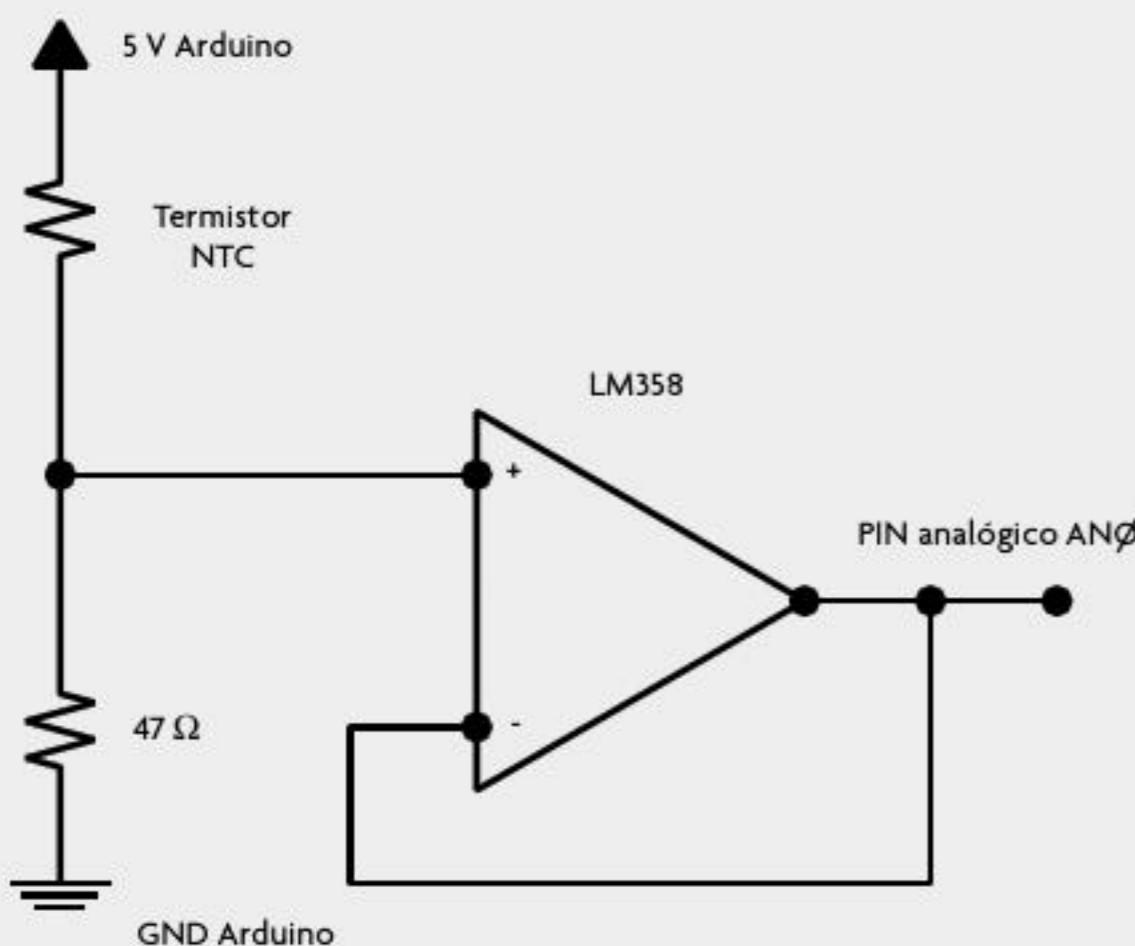
#### Material

- Arduino Uno®
- Termistor NTC SL10 10003
- 1 resistencia de  $4.7\ \Omega$
- Amplificador operacional LM358
- Termómetro de carátula con un rango de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 2 caimanes
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Construcción del circuito

Dado que el termistor se comporta como una resistencia variable, se arma un divisor de voltaje para medir dicha variación. El tamaño de la resistencia fija debe proponerse en un valor aproximado a la resistencia del termistor a temperatura ambiente, para una lectura más precisa. Con resistencias muy grandes o muy pequeñas sería muy difícil distinguir los cambios de temperatura. Realizando la medición a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente, la resistencia del termistor es de  $15.8\ \Omega$ , de ahí que el valor escogido para la resistencia fija sea de  $47\ \Omega$ . La salida de este divisor se conecta a un seguidor de voltaje, el cual aísla al divisor del resto del circuito permitiendo una lectura más fiable en el Arduino®. El diagrama del circuito se aprecia en la figura 6.5.



**Figura 6.5** Circuito para la lectura de la temperatura del termistor.

#### Ecuación resistencia vs. temperatura

Para conocer qué valor de resistencia del termistor pertenece a cierta temperatura será necesario caracterizar al sensor; es decir, tomar varias muestras del termistor a distintas temperaturas (utilizando un termómetro analógico) y a partir de estas realizar una regresión lineal que explique el comportamiento.

Así, se obtienen los datos de la tabla 6.3:

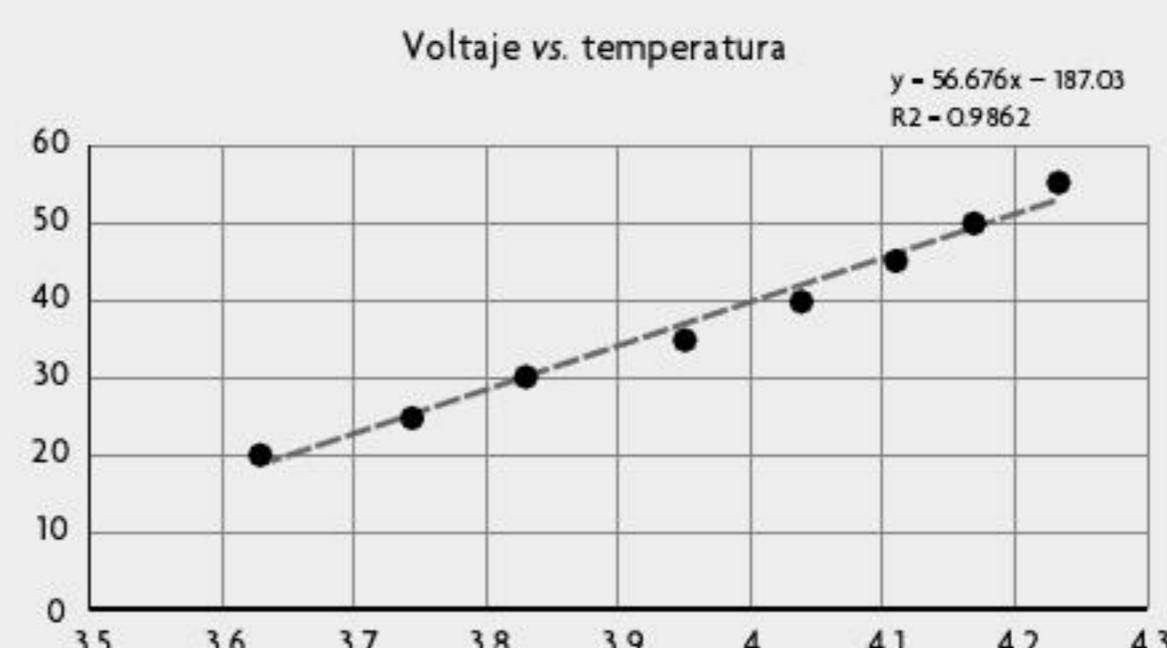
Resistencia	Temperatura
17.8	20
15.8	25
14.4	30
12.5	35
11.2	40
10.2	45
9.4	50
8.5	55

**Tabla 6.3** Datos obtenidos a partir de la caracterización del termistor

Considerando que la resistencia fija del divisor de voltaje es de  $47\Omega$ , se calcula el voltaje de salida para cada uno de los valores de resistencia de la tabla 6.4.

Resistencia	Voltaje de salida ( $R_1 = 47\Omega$ )
17.8	3.62654321
15.8	3.742038217
14.4	3.827361564
12.5	3.949579832
11.2	4.037800687
10.2	4.108391608
9.4	4.166666667
8.5	4.234234234

**Tabla 6.4** Voltaje de salida para un divisor de voltaje con una resistencia fija de 47 ohms



**Figura 6.6** Gráfica tensión del divisor vs. temperatura del termistor NTC SL 10003.

Con base en los datos de las tablas 6.3 y 6.4 se construye la curva de voltaje de salida del sensor vs. temperatura (véase figura 6.6), y a partir de esta se obtiene, mediante una regresión lineal, la ecuación característica del termistor (esta ecuación puede variar según el tipo y modelo del termistor).

$$\text{Temperatura} = 56.676 \text{ (voltaje de salida del divisor)} - 187.03 \quad (1)$$

#### Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

El programa realiza la lectura del voltaje del divisor del termistor y después se aplica la ecuación característica de este termistor (ecuación 6.1). Por último, se imprime la temperatura en el monitor serial.

```
/*
 * El termistor es un dispositivo que
 * varia su resistencia conforme
 * a la
 * temperatura a su entorno. Existen dos tipos
 * de termistores: NTC y PTC
 * El primero es de coeficiente termico
 * negativo, es decir, si aumenta
 */
```

```


$$\text{const float A = 56.676;}$$


$$\text{const float B = 0.00488;}$$


$$\text{const float C = 187.03;}$$


$$\text{const float D = 47;}$$


$$\text{float Termistor = A * (B * readTerm) - C;}$$


$$\text{Serial.println(Termistor);}$$


$$\text{delay(10);}$$


$$\text{void loop() {$$


$$\text{int readTerm = analogRead(A0);}$$


$$\text{float Termistor = A * (B * readTerm) - C;}$$


$$\text{Serial.println(Termistor);}$$

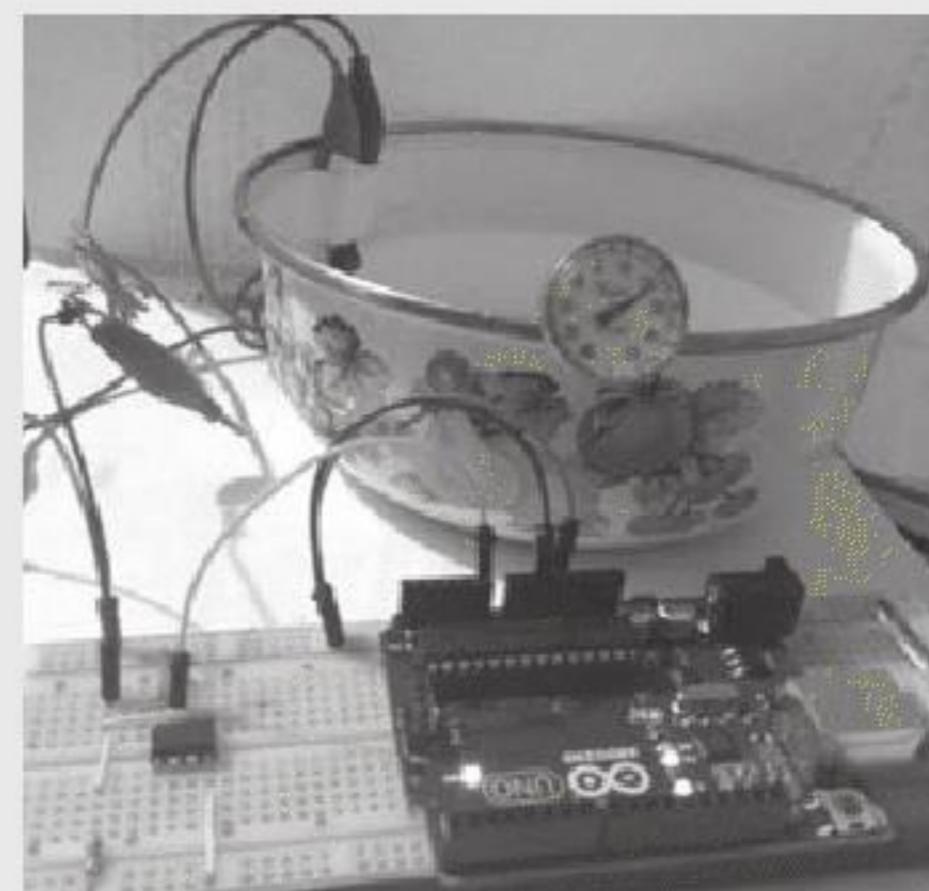
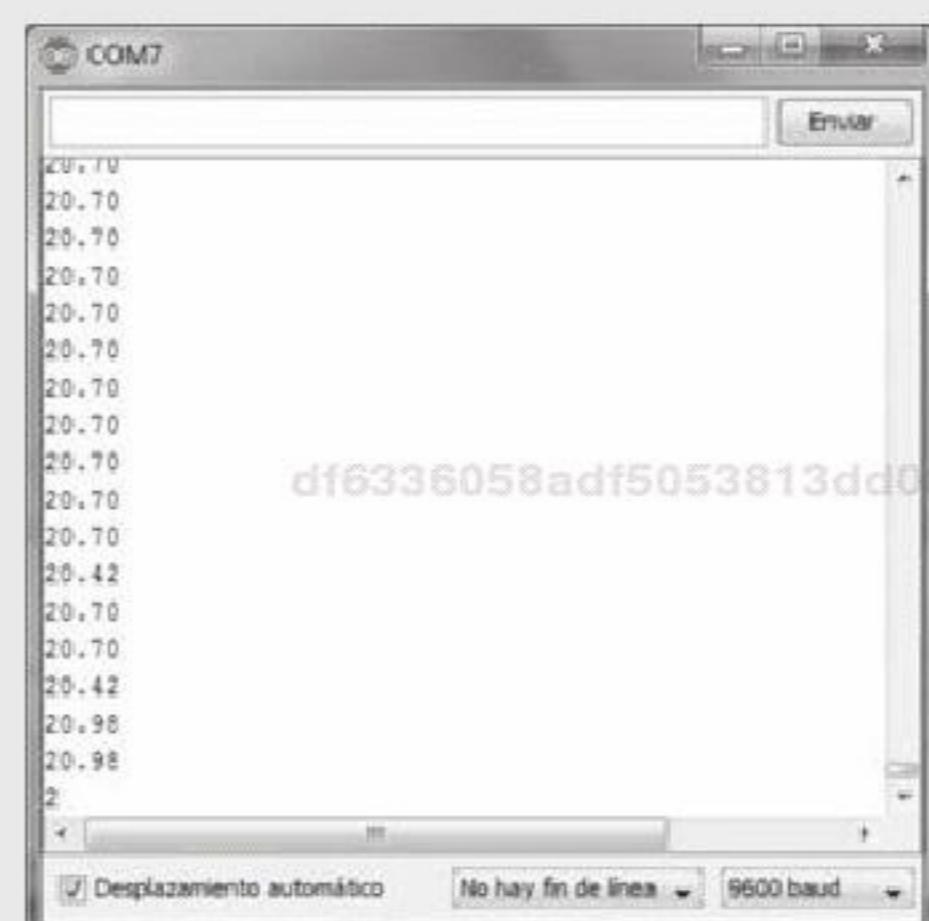

$$\text{delay(10);}}$$


$$\text{}}$$


```

### Comprobar el funcionamiento

Al medir la temperatura del agua de un recipiente con un termómetro analógico se obtiene un valor de 22 °C aproximadamente, mientras que la lectura del termistor es de 20.7 °C, valor muy próximo a la temperatura esperada.

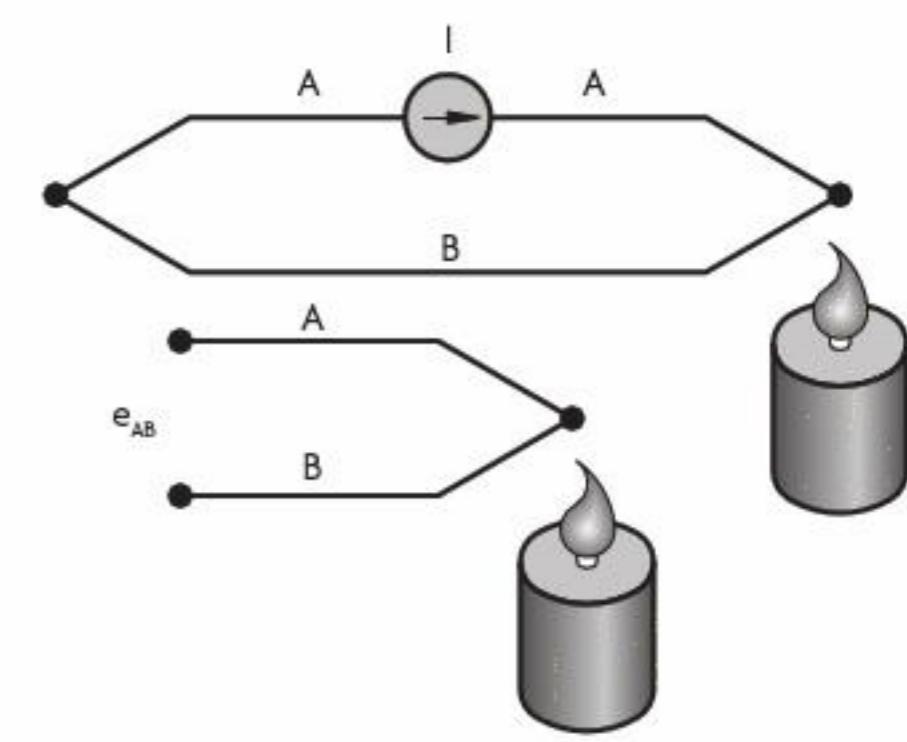


**Figura 6.7** Comparación entre las lecturas del termómetro analógico y el termistor.

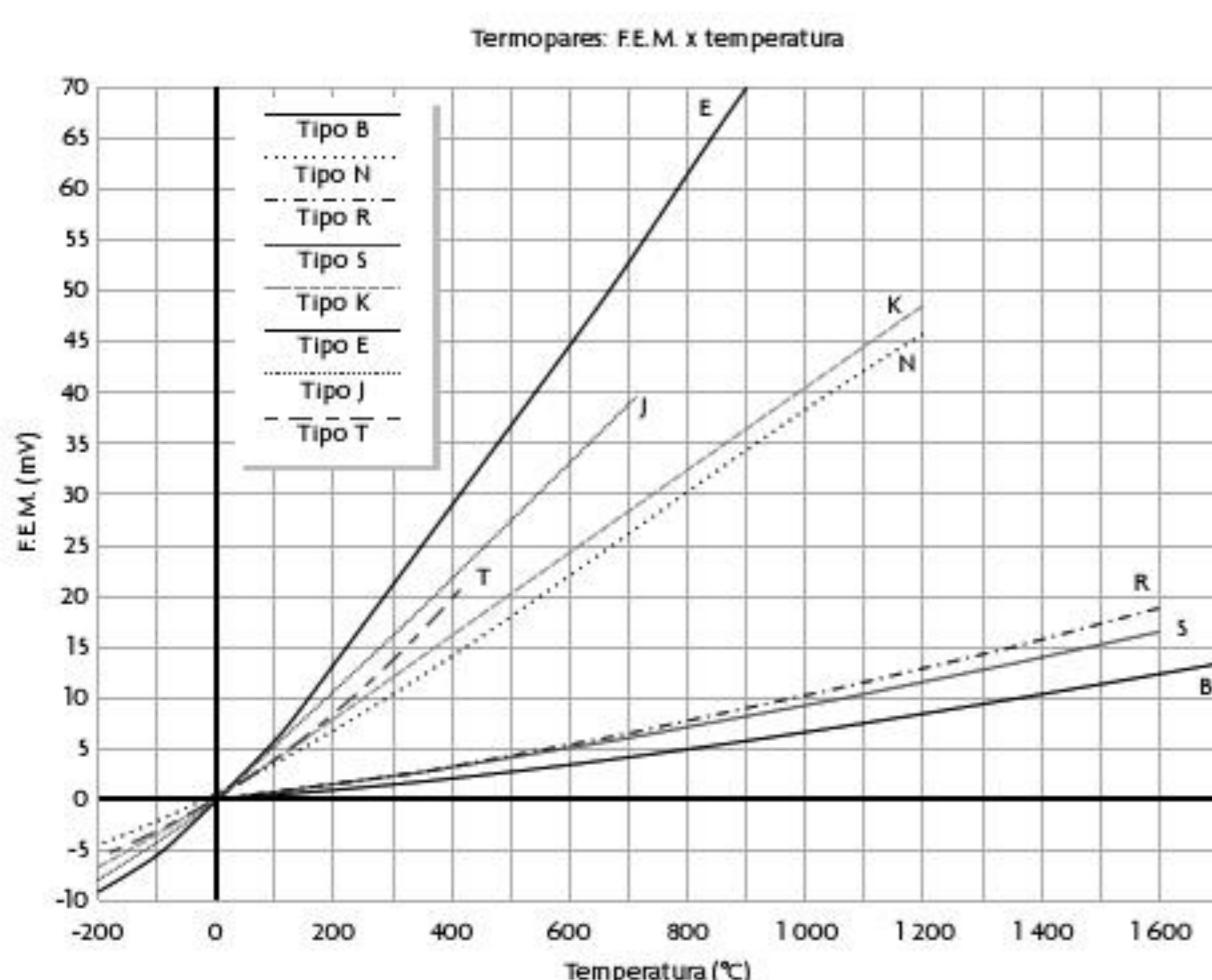
## 6.5 Termopar o termocupla

Este dispositivo ha revolucionado la forma de medir la temperatura, por lo que en la actualidad constituye uno de los dispositivos más usados en la industria. Como se muestra en la figura 6.8, este consiste básicamente en un par de conductores (etiquetados como A y B), los cuales tienen diferentes propiedades; en general, estos conductores son metálicos y se encuentran unidos entre si formando un bucle o circuito, donde dichas uniones están sometidas a diferentes temperaturas. En estas circunstancias se genera una corriente eléctrica a través del circuito (fenómeno descubierto por Thomas Seebeck).

La conversión de energía térmica en corriente eléctrica es producida por este efecto; pero, si además se abre el circuito se genera una fuerza conocida

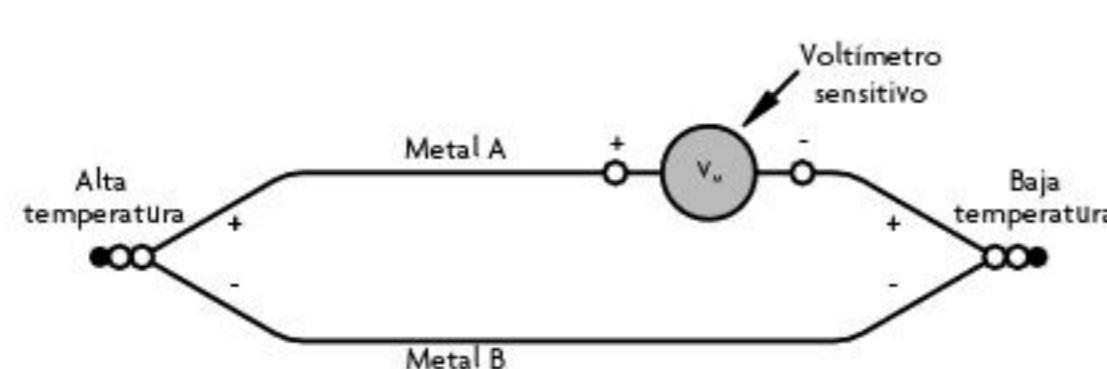


**Figura 6.8** Termopar.

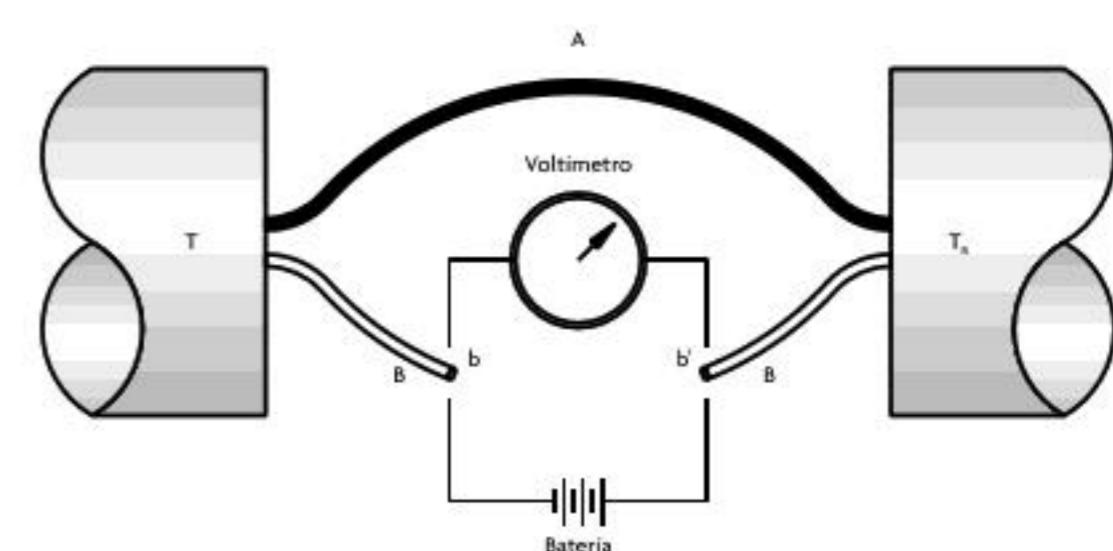


**Figura 6.9** Curvas características de termopares más comunes.

va significativamente afectada por el tipo de metales que se utiliza. Debido a que en el termopar un bucle completo siempre está conformado por dos uniones, la diferencia de temperaturas que se encuentra presente produce dos voltajes en el circuito con polaridades tales que se oponen entre ellos, como lo muestra la figura 6.10.



**Figura 6.10** Polaridades opuestas entre los voltajes del termopar.



**Figura 6.11** Medición de diferencia de temperaturas.

Por tanto, el voltaje total disponible en el bucle necesario para conducir una corriente a través de la resistencia es la diferencia entre estos dos voltajes individuales. En estas condiciones, para lograr medir la diferencia de temperaturas basta abrir el bucle o circuito en algún punto y conectar un medidor de voltaje que sea lo bastante sensitivo debido a que el voltaje producido por un bucle del termopar está en el rango de los milivoltios; de esta forma la lectura registrada indicará un nivel de temperatura, como se muestra en la figura 6.11.

En la actualidad, se sabe que el efecto Seebeck que se genera en los termopares en realidad es una combinación de otros dos fenómenos de la física conocidos como efectos **Peltier** y **Thomson** (véase capítulo 1). El efecto Peltier se presenta cuando existe una corriente circulando por las uniones de dos metales diferentes; en estas condiciones, se produce una absorción o liberación de calor debido a las propiedades moleculares de cada uno de los metales, ya que existe un desbalance de energía en los electrones libres de cada uno de los metales. Cuando la corriente eléctrica circula por el circuito, si la dirección de la corriente es contraria a la de los electrones, estos tienen que extraer energía de los metales enfriando la unión, mientras que si es a favor, entonces los electrones pierden energía, pero esta misma es absorbida por los metales y la unión tiende a calentarse. Asimismo, el efecto Thomson se presenta cuando una corriente circula por un metal homogéneo sometido a un gradiente de temperatura; esto provoca una absorción o liberación de calor. Con frecuencia, algunas de las propiedades de los termopares se resumen en tres leyes.

como termoelectromotriz,  $e_{AB} = \alpha T$ , que al igual que la corriente producida depende del tipo de conductores y de la diferencia de temperatura entre las uniones, donde  $\alpha$  se conoce como coeficiente de Seebeck y representa la variación de voltaje que se produce por la diferencia de un grado Celsius de temperatura para cada par de materiales. Para exemplificar esto, considérese el par hierro-constantán; entonces,  $\alpha$  será de 0.0828 mV por grado. Obsérvese la curva J de la figura 6.9. En esta imagen también se observa el comportamiento entre la fuerza termoelectromotriz en milivoltios y la temperatura en grados Celsius para diferentes pares de materiales de las uniones que usan los termopares más comunes. Cabe mencionar que esta clasificación o tipos mostrados se describen a detalle en secciones posteriores.

La relación entre el voltaje y la temperatura es no lineal, aunque para pequeños cambios dentro del rango de temperatura puede aproximarse a la linealidad. La constante de proporcionalidad entre el voltaje y la temperatura se obser-

### Ley del circuito homogéneo

En un circuito de un único conductor metálico con características homogéneas no se puede percibir una corriente eléctrica por el efecto único de la temperatura, aun si este conductor tiene cambios en su sección transversal a lo largo de su recorrido.

### Ley de los metales intermedios

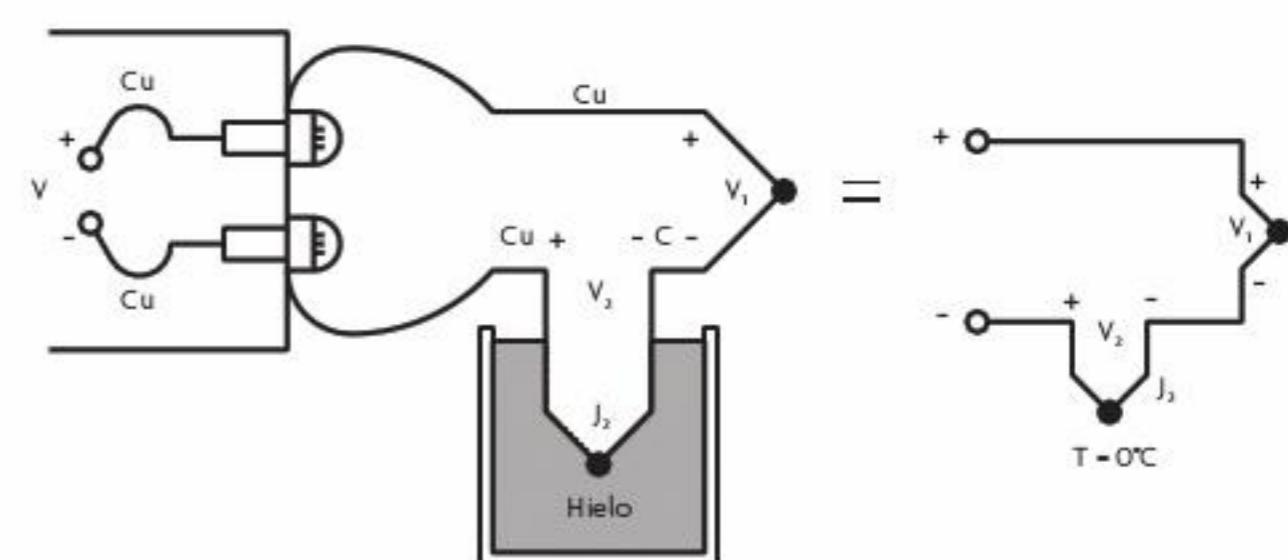
Si en un circuito formado por varios tipos de conductores existe la misma temperatura en todo el circuito, entonces la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es siempre cero, independientemente del número de uniones metálicas intermedias.

### Ley de las temperaturas sucesivas

Considérese un circuito de conductores metálicos de tres uniones (A, B y C); la fuerza electromotriz producida por la unión de los metales A y C es la suma algebraica de la fuerza electromotriz generada entre la unión de los metales A y B y de la de los metales B y C, donde B es un metal intermedio.

En este punto es indiscutible que en el circuito se desarrolla un voltaje proporcional a la temperatura de la unión que se mide, siempre que exista una diferencia de temperaturas con la unión de referencia.

Es importante hacer notar que para lograr una lectura de precisión no se recomienda medir en forma directa el voltaje de Seebeck de un termopar. Supóngase, por ejemplo, un termopar cobre-constantán; en estas condiciones, al conectar el dispositivo de medición, los cables del instrumento crearán una nueva unión termoeléctrica. Obsérvese que para esto uno de los conductores de cobre del instrumento está unido con el conductor del termopar también de cobre, se tendrá entonces una unión cobre-cobre, y de acuerdo con la ley de metales homogéneos no se generará ninguna fuerza electromotriz; sin embargo, la otra unión quedará conformada de cobre-constantán. En estas condiciones se genera un voltaje no deseado por la acción de esta nueva unión que inducirá un error en la lectura. Una posible solución es conocer primero el voltaje generado por la unión cobre-constantán, sometiendo esta a una temperatura conocida de antemano, por ejemplo a 0 °C (inmersión en agua con hielo); así, esta unión se establecerá como referencia (véase figura 6.12).



**Figura 6.12** Unión cobre-constantán sometida a 0 °C.

Hoy día, los termopares o termocuplas se fabrican para diferentes calibraciones, ya que, de acuerdo con el tipo de aplicación para el cual fueron diseñados, existen diversas combinaciones (uniones) de metales con los que se construyen. Sin embargo, cabe resaltar que las calibraciones más utilizadas son cuatro: T, J, K y R. En la figura 6.13 se muestra el termopar tipo J.



**Figura 6.13** Termopar tipo J.

### Calibración tipo T

Para la fabricación de este tipo de termopar se utiliza material de cobre, como el conductor positivo, y un material aleado con 60% de cobre y 40% de níquel (constantán), como el conductor negativo. El rango de operación es de 0 °C a 350 °C, ya que el cobre se oxida con rapidez cuando se supera este límite superior. Gracias a que el cobre y el níquel son materiales relativamente baratos, el costo del termopar es bajo.

### Calibración tipo J

En este caso, para el conductor positivo se utiliza hierro y para la parte negativa constantán. A diferencia del tipo T, en este termopar es posible medir temperaturas superiores a 350 °C; de hecho, es posible medir sin problema hasta los 700 °C, ya que el hierro comienza a oxidarse a esta temperatura.

Se recomienda su uso en atmósferas donde no haya oxígeno libre. Al igual que el tipo T, su costo es bajo y su uso es muy amplio.

#### Calibración tipo K

Para esta calibración el conductor positivo está formado por una aleación de 90% de níquel y 10% de cromo (chromel), y el conductor negativo usa la aleación de 94% de níquel, 2% de aluminio, 3% de manganeso y 1% de silicio (alumel). Puede trabajar hasta los 1 200 °C, lo que lo hace muy utilizado en la industria metalmecánica y de fundición; sin embargo, debido a los materiales utilizados en su construcción, su precio se ve afectado y es relativamente alto comparado con los tipos J o T.

#### Calibración tipo R

En este termopar se usa una aleación a base de 87% de platino y 13% de sodio, como conductor positivo, y un alambre de platino, como conductor negativo; esta aleación permite una capacidad de operación hasta los 1 500 °C, lo que hace que sea muy apreciado dentro de la industria, aunque debido al valor que tiene el platino en el mercado de los metales, su precio es mayor que el de los termopares descritos antes.

Hoy día existe una gama amplia de termopares. Véase la tabla 6.5 donde se muestra el tipo de material y las aleaciones con que están fabricados los conductores tanto positivos como negativos, así como el rango de operación de cada uno de estos.

Tipo de termopar	Metales	Rango de temperatura
B	+ Platino – 30% Rodio – Platino – 6% Rodio	0 ÷ 1700 °C
C	+ Tungsteno – 5% Renio – Tungsteno – 26% Renio	0 ÷ 2320 °C
E	+ Níquel – Cromo – Cobre – Níquel	-200 ÷ 900 °C
J	+ Hierro – Cobre – Níquel	0 ÷ 750 °C
K	+ Níquel – Cromo – Níquel – Aluminio	-200 ÷ 1250 °C
N	+ Níquel – 14.2% Cromo – 1.4% Silicio – Níquel – 4.4% Silicio – 0.1% Magnesio	-200 ÷ 1250 °C
R	+ Platino – 13% Rodio – Platino	0 ÷ 1450 °C
S	+ Platino – 10% Rodio – Platino	0 ÷ 1450 °C
T	+ Cobre – Cobre – Níquel	-200 ÷ 350 °C

Tabla 6.5 Especificaciones de los termopares

## Ejercicio de aplicación

### Medición de la temperatura con termopar tipo J

#### Objetivo

Medir la temperatura de un medio con un termopar tipo J con el uso del Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Termopar tipo J
- Circuito Integrado AD594
- 1 resistencia de  $1 M\Omega$
- 1 capacitor de  $0.1 \mu F$
- Amplificador operacional LM358
- Fuente de alimentación de 5 V
- Termómetro de carátula con un rango de  $-40^{\circ}C$  a  $50^{\circ}C$
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción de la actividad

En esta práctica se utiliza el circuito integrado AD594 y el termopar tipo J que está formado por hierro y constantán (aleación de 60% de cobre y 40% de níquel). El rango de medición para este termopar es de  $-270^{\circ}C$  a  $700^{\circ}C$ .

El AD594 es un amplificador de instrumentación para termopares tipo J con compensador del punto frío que entrega a su salida un voltaje de 10 mV por cada grado Celsius.

Cuenta con una alerta que indica si alguna de las terminales del termopar está abierta. Para leer temperaturas por debajo de  $0^{\circ}C$ , el AD594 debe alimentarse con una fuente dual.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

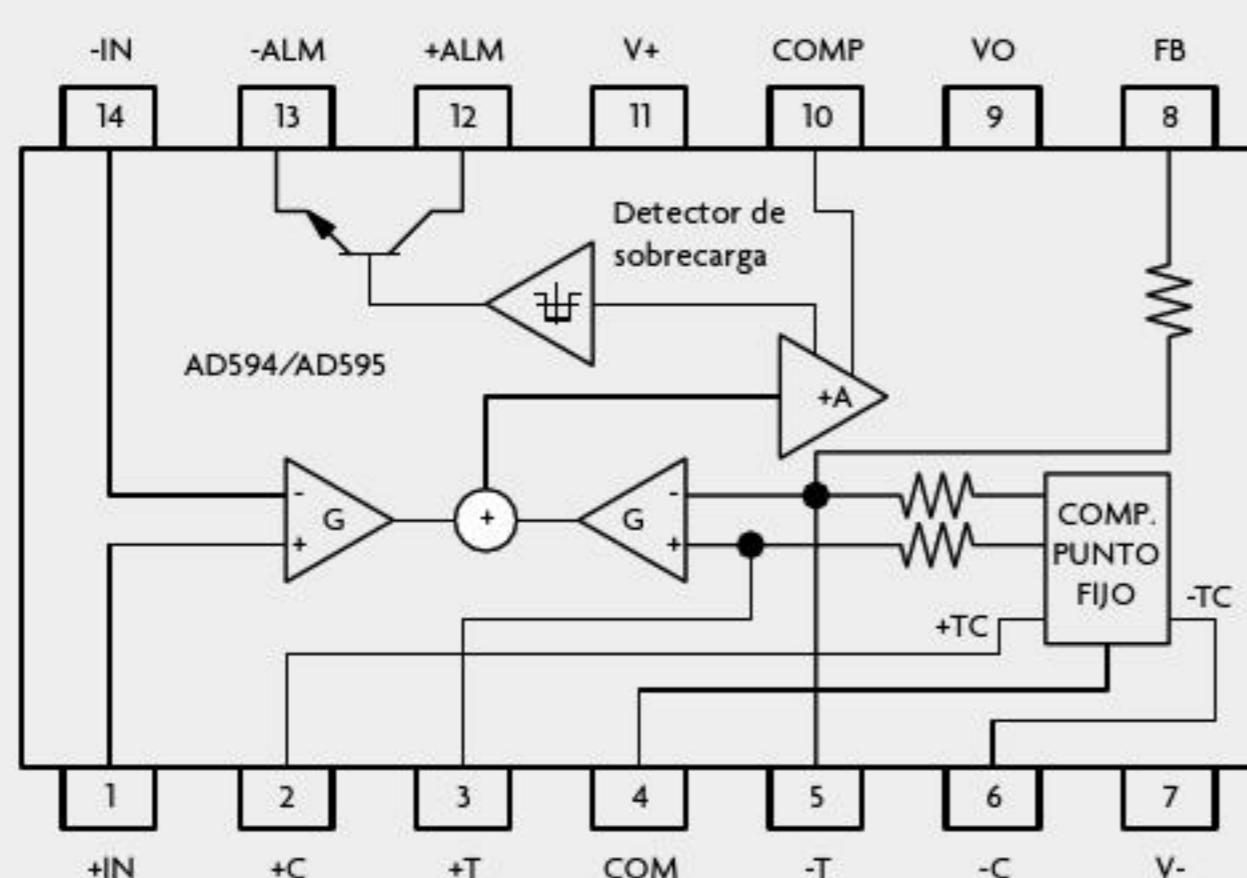


Figura 6.14 Circuito integrado AD594 para termopar tipo J.

### Construcción del circuito electrónico

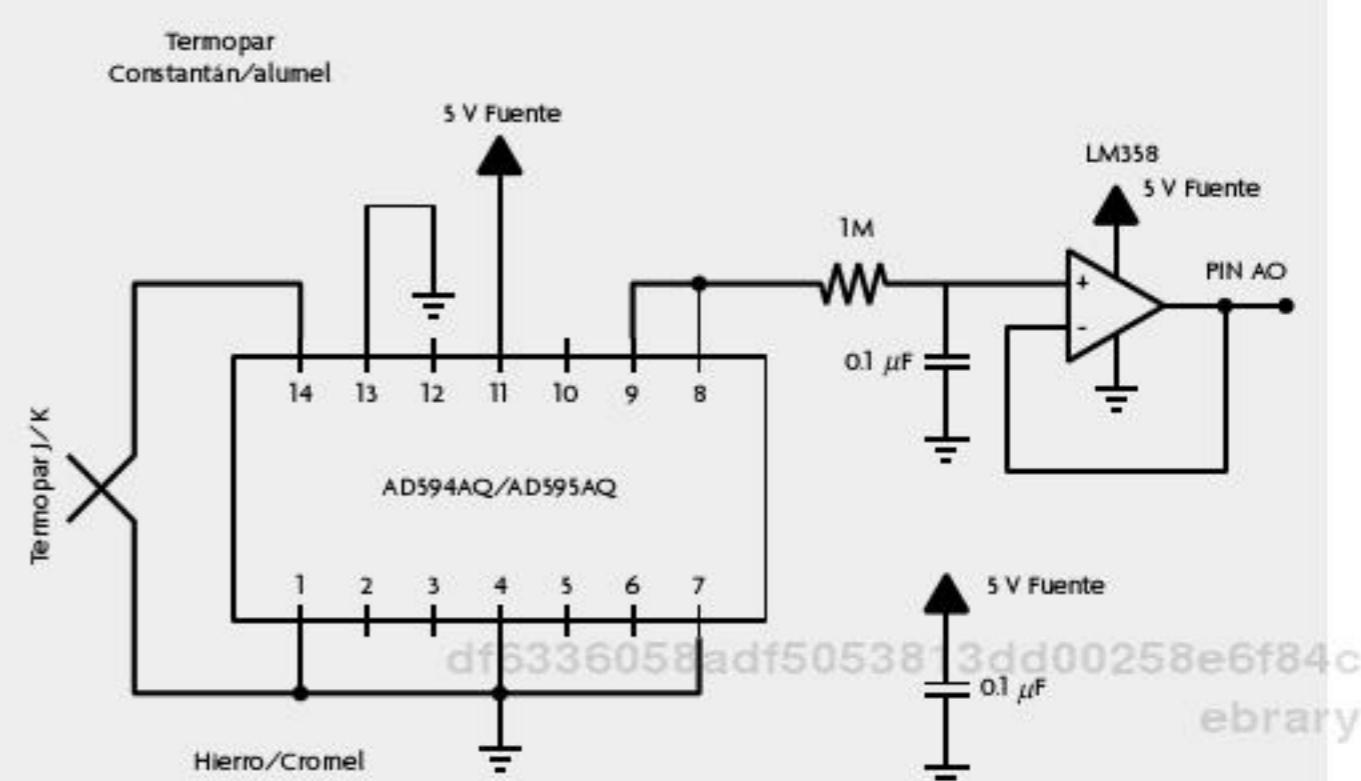


Figura 6.15 Diagrama del circuito que mide la temperatura a partir de un termopar.

Para acondicionar la señal del termopar J se utiliza el circuito AD594 en la configuración que se muestra en la figura 6.15. La alimentación del circuito es positiva, por lo que solo pueden detectarse temperaturas por arriba de los 0 grados Celsius. La alarma se desactiva conectando el pin 13 a tierra. A la salida se implementa un filtro pasa bajas para suprimir el ruido. Por último, se construye un seguidor de voltaje para acoplar las impedancias. Esta señal se conecta al pin analógico A0 del sensor.

#### Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

Lo primero es realizar la lectura analógica por el pin A0 del termopar. Luego, se debe calcular el promedio de 20 lecturas para reducir el ruido que aún persista en la señal.

Después se pide realizar la conversión a grados Celsius, considerando que la resolución es de 10 bits ( $5 V / 1024 = 0.00488 V$ ) y el voltaje de salida del sensor es de  $10 mV / ^{\circ}C$ :

$$^{\circ}C = \frac{5V}{1024} \times V_{out} \times \frac{1}{10mV/^{\circ}C} - 0.488 \times V_{out}$$

Por último, se imprime la temperatura en el monitor serie.

```
/* El termopar es un dispositivo que puede medir
   la temperatura de algún medio a través del
   efecto Peltier-Seebeck. Se utiliza para medir
   las
   altas temperaturas de hornos industriales.
   Los termopares según los
   materiales que los conformen se clasifican
   en: K, J, E, T, N, B, R y
   */
   /*
   El siguiente programa lee la señal de salida
   del AD594, un circuito
   df6336058adf5053813dd00258e6f84c
   ebrary
```

```

 $\text{/** que linealiza el termopar tipo J, entregando}$ 
 $\text{una voltaje de } 10 \text{ mV/}^{\circ}\text{C.}$ 
 $\text{/** Con esta señal se calcula la temperatura en}$ 
 $\text{la punta del termopar y}$ 
 $\text{/** se imprime en el monitor serie.}$ 
 $\text{/**}$ 
 $\text{/** El programa obtendrá el promedio de 20 datos}$ 
 $\text{para reducir el ruido de}$ 
 $\text{/** la señal}$ 
 $\text{*****}$ 

 $\text{//Se declaran las variables empleadas}$ 
 $\text{const int sample = 20;}$ 
 $\text{int suma = 0, count = 0;}$ 
 $\text{int buffer[sample], prom;}$ 
 $\text{float tmp;}$ 
 $\text{void setup()}$ 
 $\{$ 
 $\text{    Serial.begin(9600); //Se inicia la}$ 
 $\text{    comunicación serie a 9600 baudios}$ 
 $\text{    for (int i = 0; i < sample; i++) //Se define}$ 
 $\text{    en ceros el vector que}$ 
 $\text{    //almacena los datos a promediar.}$ 
 $\text{    buffer[i] = 0;}$ 
 $\}$ 
 $\text{void loop()}$ 
 $\{$ 
 $\text{    suma = suma - buffer[count]; //Se resta el}$ 
 $\text{    valor anterior, donde se}$ 
 $\text{        //almacena uno nuevo}$ 
 $\text{    buffer[count] = analogRead(A0); //Se realiza}$ 
 $\text{    una lectura y se almacena}$ 
 $\text{        //en el buffer}$ 
 $\text{    suma += buffer[count];//Se suma al resto de}$ 
 $\text{    los valores para iniciar el}$ 
 $\text{    //cálculo del promedio}$ 
 $\text{    count++; //Se incrementa el contador}$ 

 $\text{    prom = suma / sample; //Cálculo del}$ 
 $\text{    promedio}$ 
 $\text{    tmp = prom * 0.488; //Se realiza la}$ 
 $\text{    conversion de V a } ^{\circ}\text{C}$ 

 $\text{    Serial.print("Temperatura: "); //Se imprime}$ 
 $\text{    el valor de la temperatura}$ 
 $\text{    Serial.print(tmp);}$ 
 $\text{    Serial.println(" } ^{\circ}\text{C");}$ 

 $\text{    if (count >= sample)//Se reinicia el contador}$ 
 $\text{        cuando supera el tamaño}$ 
 $\text{        count = 0; //del buffer}$ 

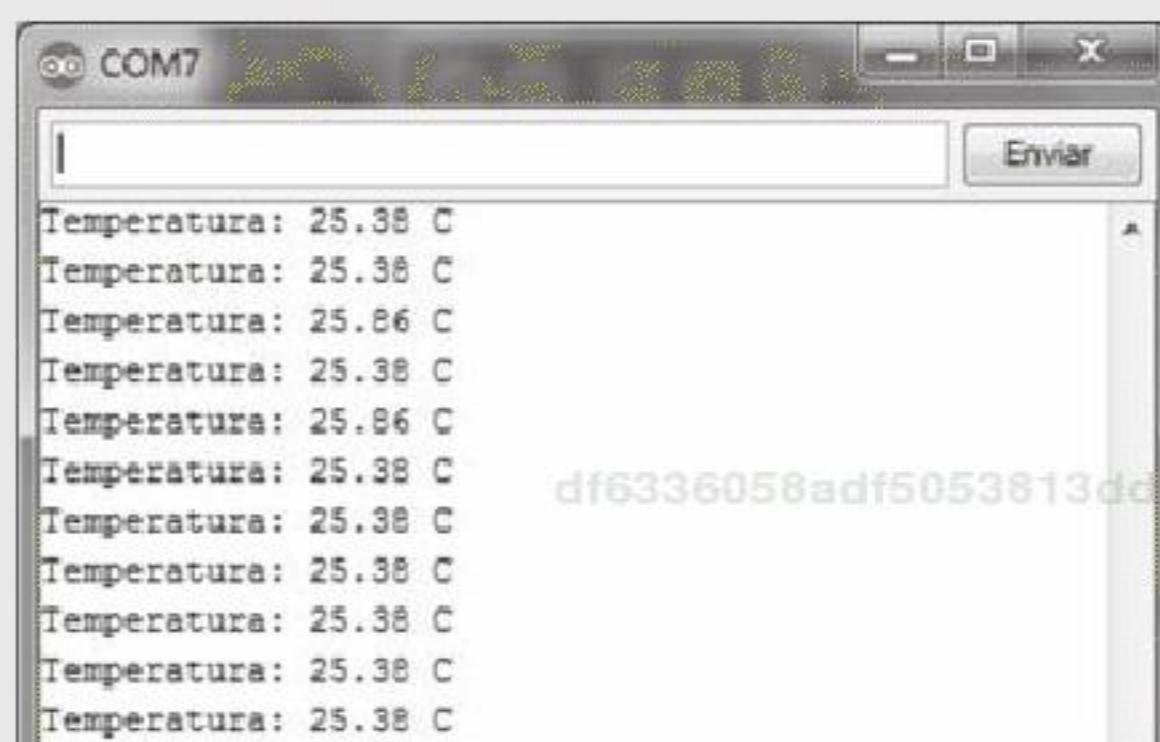
 $\text{    delay(5); //Retardo por estabilidad}$ 
 $\}$ 

```

### Comprobar el funcionamiento

#### Medición de temperatura ambiente 1 ( $25^{\circ}\text{C}$ )

La lectura del termopar J es de 25.38 grados Celsius.



**Figura 6.16** Temperatura registrada por el termopar J =  $25.38^{\circ}\text{C}$ , apenas unas décimas superior a la temperatura del termómetro analógico.

#### Medición de temperatura 2

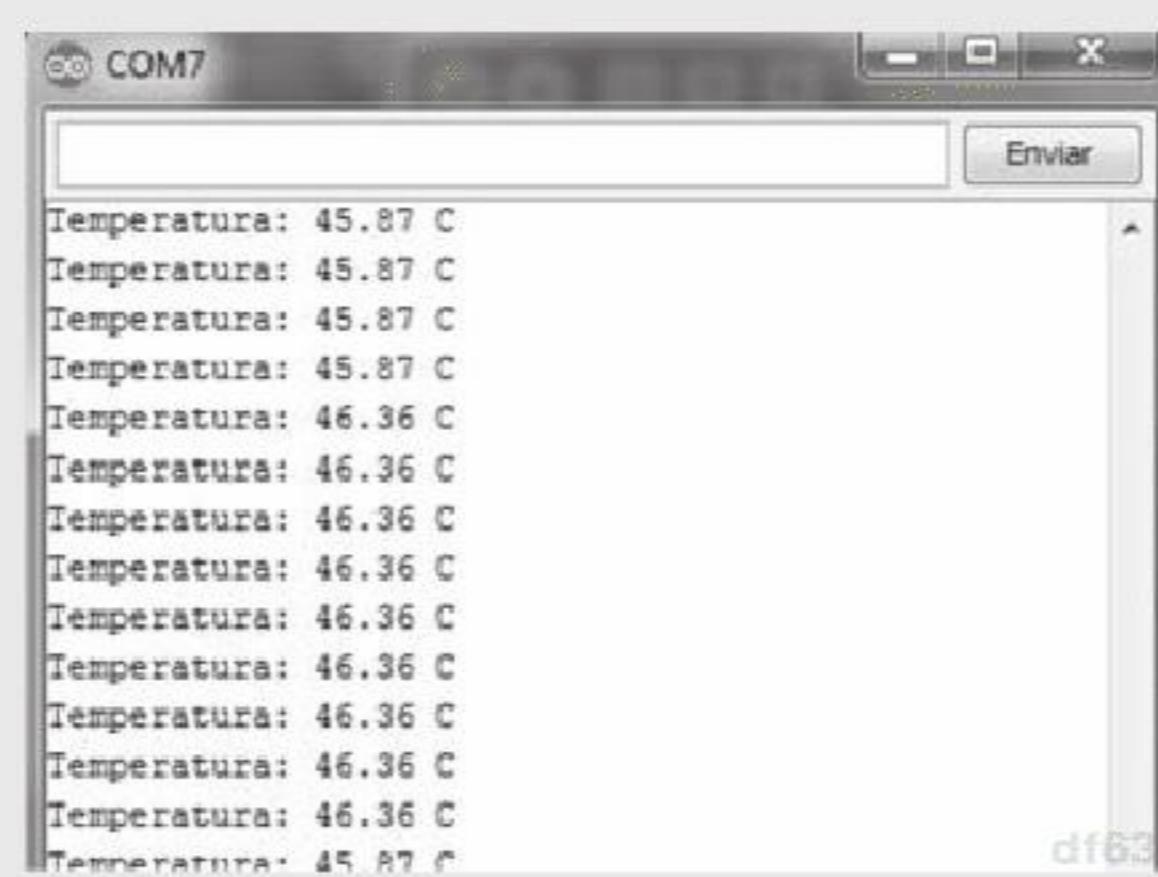
##### Aqua caliente a $45^{\circ}\text{C}$

Después de calentar un recipiente con agua se mide su temperatura.



**Figura 6.17** La temperatura del agua caliente es de  $45^{\circ}\text{C}$ , según medición del termómetro analógico.

La lectura del termopar J es de  $45.87^{\circ}\text{C}$ , muy próxima a la obtenida por el termómetro analógico.



**Figura 6.18** Temperatura registrada por el termopar J = 45.87 °C, apenas unas décimas superior a la temperatura del termómetro analógico.

## 6.6 Sensor de temperatura resistivo (RTD)

El sensor de temperatura resistivo (RTD, por sus siglas en inglés), al igual que el termistor de coeficiente de temperatura positivo, opera de acuerdo con el principio de los cambios en la resistencia eléctrica de los metales puros; es decir, a un aumento de la temperatura existe un incremento gradual de la resistencia eléctrica. Es uno de los dispositivos más utilizados para medir temperatura gracias a las características que posee, como su estabilidad y su cambio positivo lineal en determinado rango entre la relación temperatura y resistencia eléctrica, la cual experimenta una variación proporcional al cambio del valor en la magnitud de la temperatura (véase figura 6.19), donde puede notarse la linealidad de dicha relación.

La función que relaciona la resistencia del RTD y la temperatura está dada en la ecuación 6.3:

$$R_t = R_0(1 + \alpha_{\text{RTD}} T) \quad (6.3)$$

donde:

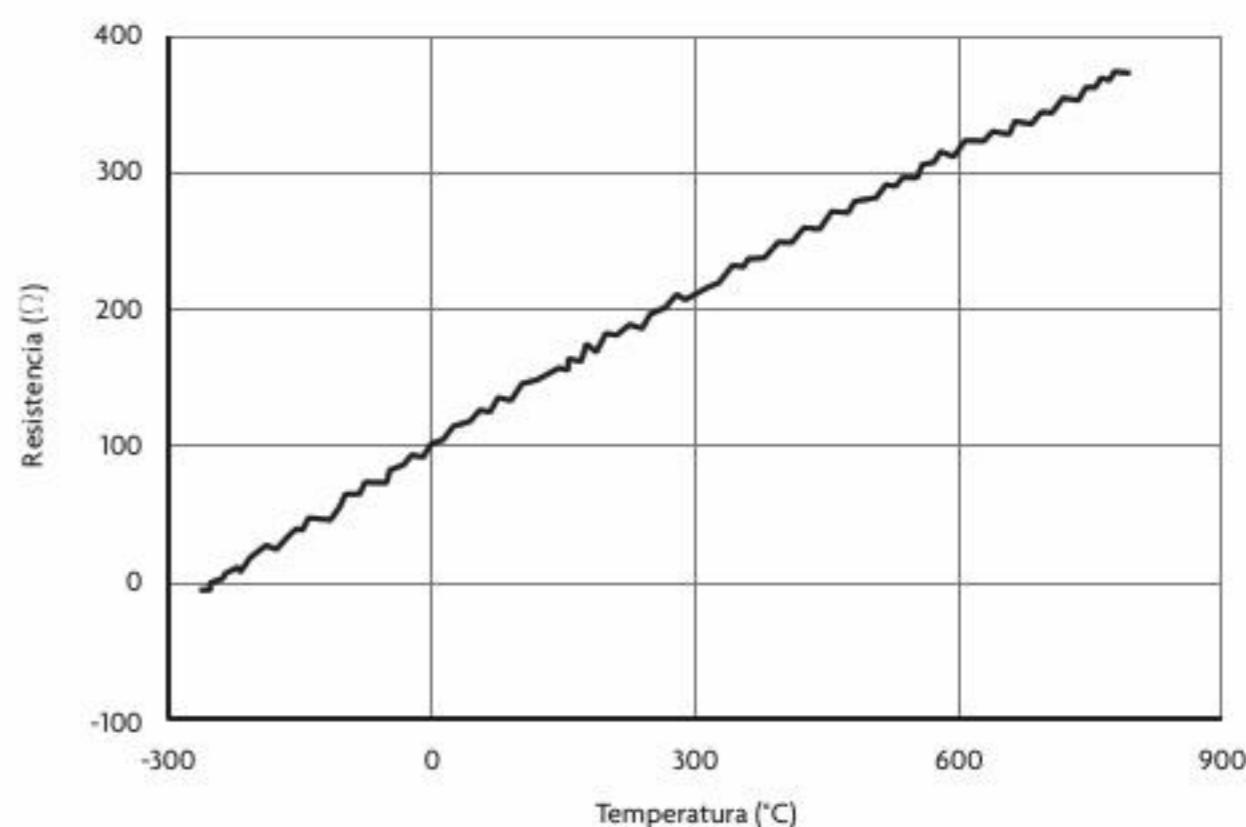
$R_0$ : resistencia en ohms a 0 grados Celsius

$R_t$ : resistencia en ohms a t grados Celsius

$\alpha_{\text{RTD}}$ : coeficiente de temperatura de la resistencia

Esta define la sensitividad del elemento metálico; sin embargo, también se utiliza para distinguir las curvas de resistencia/temperatura de varios RTD.

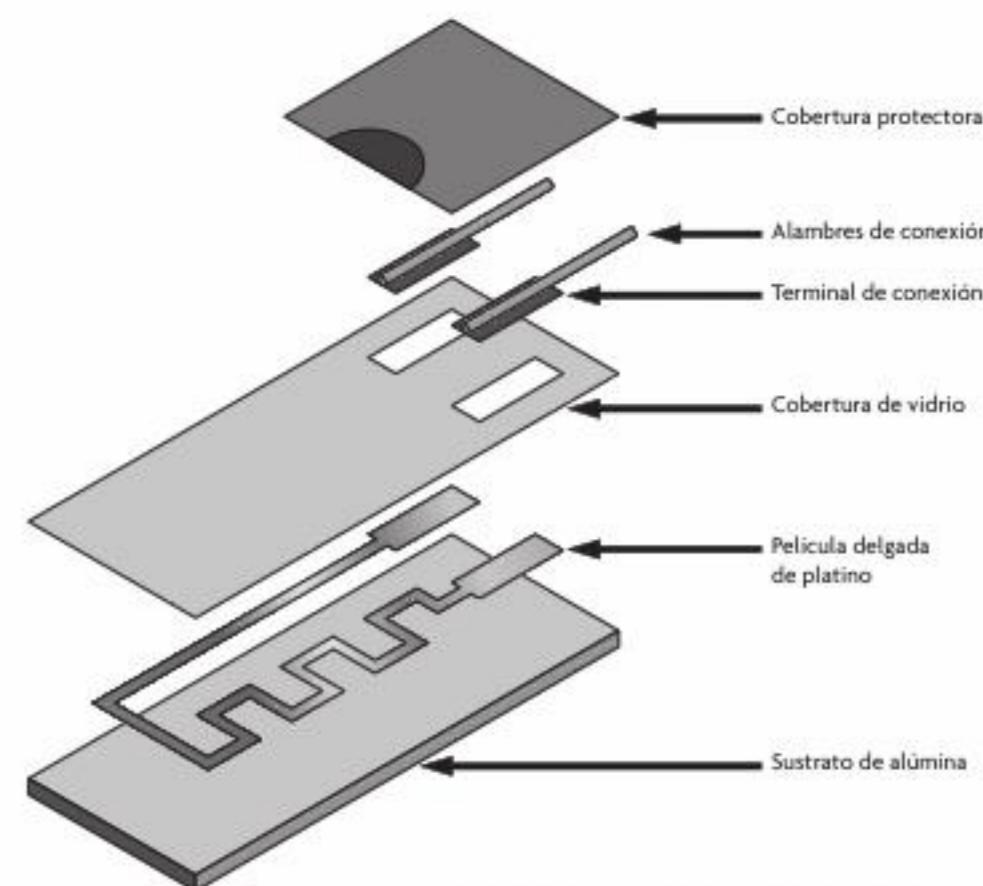
Existen dos tipos de fabricación para estos dispositivos, los cuales son conocidos como de bobina o alambre enrollado (véase figura 6.20) y de película delgada (véase figura 6.21). En general, los materiales empleados para su fabricación son platino, níquel, níquel-hierro, cobre y tungsteno. El aspecto exterior de los RTD industriales es prácticamente idéntico al de las termocuplas.



**Figura 6.19** Curva resistencia-temperatura del sensor RTD.



**Figura 6.20** Dispositivo RTD de bobina o alambre enrollado.



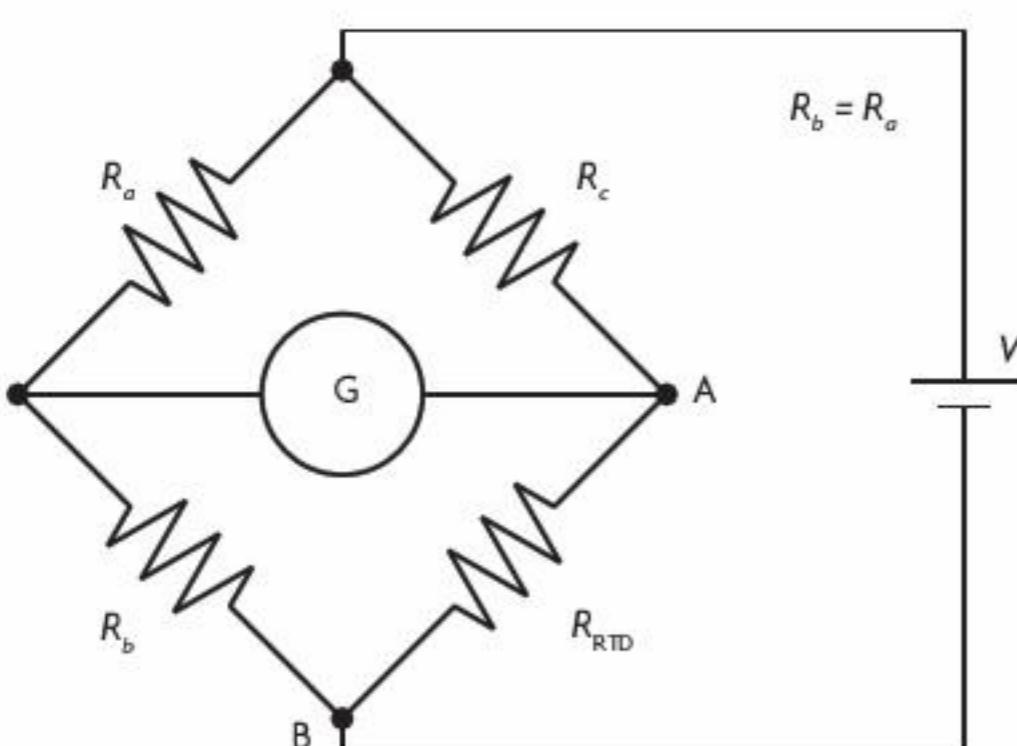
**Figura 6.21** Dispositivo RTD de película delgada.

El RTD de mayor uso es el que se fabrica con platino (Pt), de película delgada, con un valor  $\alpha$  de 0.385%/°C, y está especificado por “**DIN-EN 60751**”. Gracias a su estabilidad, exactitud y amplio rango de temperatura, que va desde -260 °C hasta 630 °C, se utiliza como estándar internacional.

Por ejemplo, los sensores Pt100 o Pt1000 representan una resistencia de 100 ohms o 1 000 ohms, respectivamente, a 0 °C. Esta variación de resistencia, en general, es determinada con un puente de Wheatstone configurado a partir de las terminales de conexión del sensor y el elemento resistivo del puente. Las clases implantadas por la norma IEC 751:1995 para este sensor se observan en la tabla 6.6.

Tipo	Temperatura	Resistencia
Clase 2B	±0.60 °C	±0.24 Ω
Clase B	±0.30 °C	±0.12 Ω
Clase A	±0.15 °C	±0.06 Ω
Clase 1/3B	±0.10 °C	±0.04 Ω
Clase 1/5B	±0.06 °C	±0.02 Ω
Clase 1/10B	±0.03 °C	±0.01 Ω

**Tabla 6.6** Especificaciones de RTD

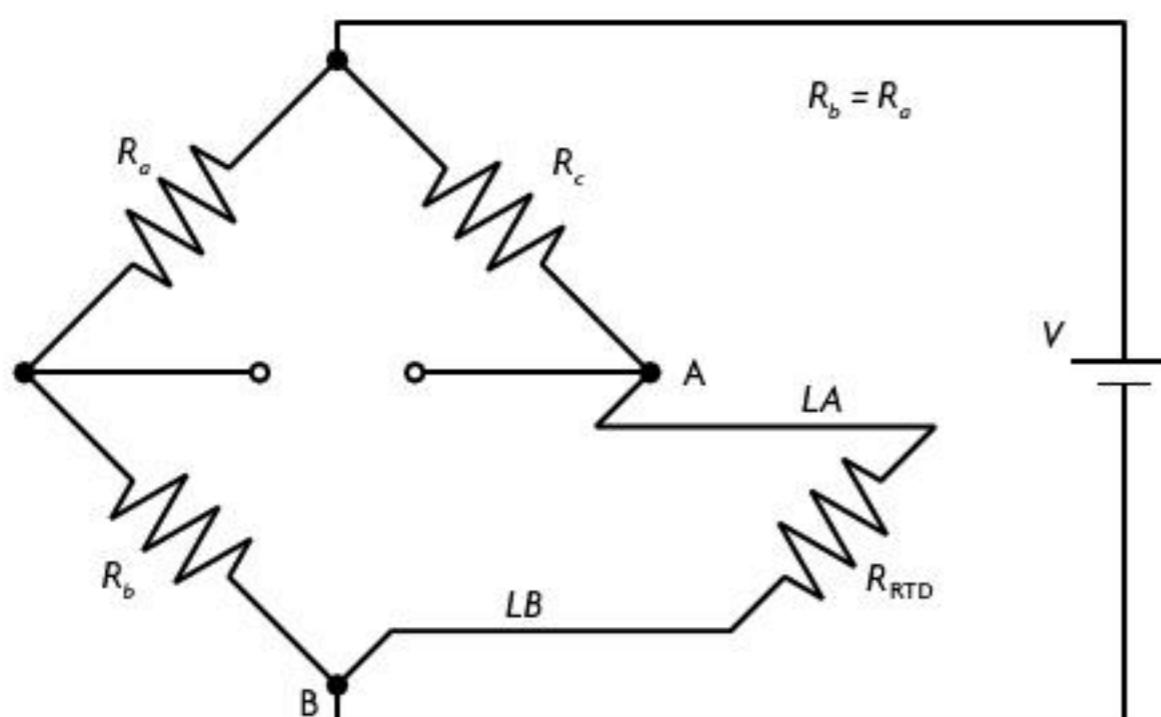
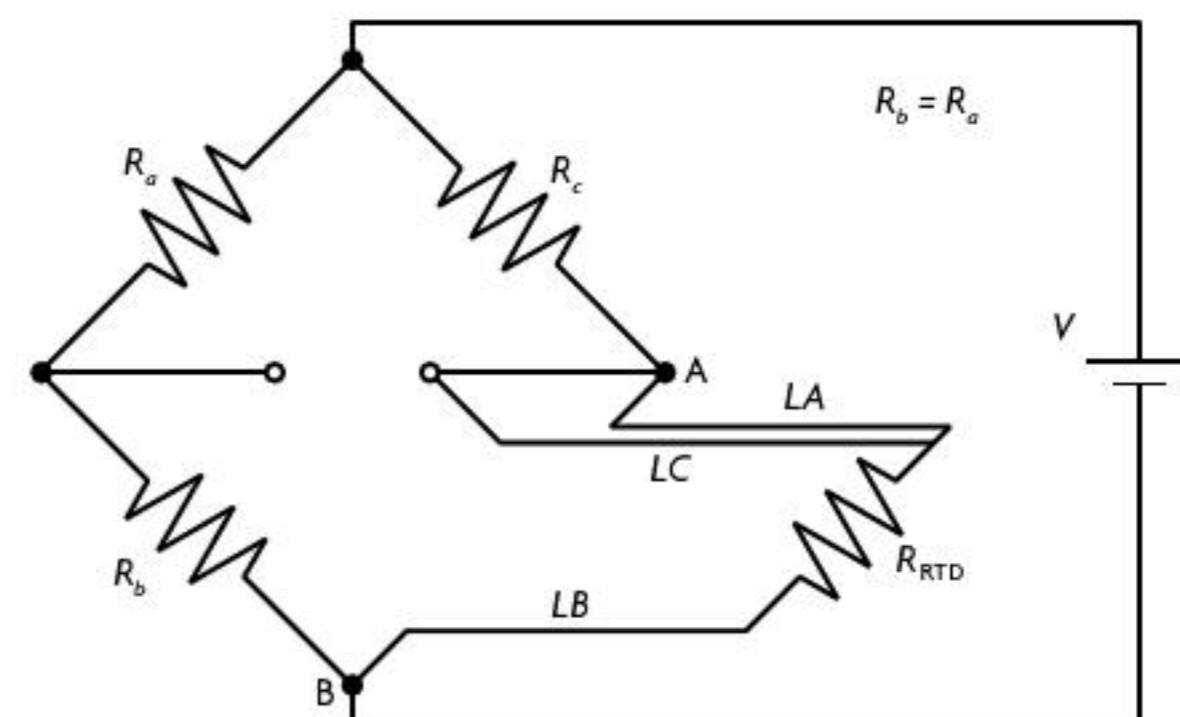


**Figura 6.22** Configuración del RTD.

De esta manera, un sensor RTD PT100 clase 2B tiene una resistencia de 100 ohms a 0 °C, con un margen de error de ±0.60 °C o ±0.24 Ω.

Sin embargo, en lo que se refiere a las desventajas, el conductor de platino tiene una resistividad baja; entonces, para aumentar la resistencia eléctrica es necesario formar una bobina de espiras de platino. No obstante, esto produce un incremento en los costos de fabricación del sensor. Respecto del precio, volumen y masa de un RTD, por lo regular estos son mayores que en el termopar o el termistor.

En general, el RTD se utiliza como se muestra en la configuración de la figura 6.22; esto es, se conecta entre los nodos de uno de los filamentos del puente de Wheatstone y se varía  $R_c$  hasta eliminar la desviación del dispositivo que se emplea para medir la magnitud de las corrientes eléctricas (galvanómetro), con lo que se cumple la ecuación 6.4.

**Figura 6.23** Configuración del RTD con segmentos conductores.**Figura 6.24** Configuración de RTD, tres filamentos.

$$R_{\text{RTD}} = R_c \frac{R_b}{R_a} \quad (6.4)$$

Una desventaja de este tipo de configuración es la variación de la resistencia en los segmentos conductores  $LA$  y  $LB$ , que conectan al sensor con las terminales  $A$  y  $B$  (véase figura 6.23), la cual se puede incrementar como resultado de los cambios en la temperatura; por esta razón, es necesario agregar un coeficiente de resistencia por unidad de longitud ( $K_L$ ) a la ecuación 6.4, con lo que se obtiene la ecuación 6.5.

$$\frac{R_a}{R_c} = \frac{R_b}{RTD + K_L(LA + LB)} \quad (6.5)$$

Por su parte, la configuración de tres y cuatro filamentos se realiza de manera semejante. En la figura 6.24 se observa la configuración para tres filamentos; nótese la línea  $LC$ . En este caso, la medida no es afectada por la longitud de los conductores  $LA$  y  $LB$ , si se hace que  $LA = LB$ , ni por la temperatura, ya que esta afectaría a dos brazos adyacentes del puente. Como lo muestra la ecuación 6.6, donde  $K_L \times LA = K_L \times LB$  y  $R_b/R_a = 1$  y  $R_c$  es la resistencia de ajuste.

$$\frac{R_a}{R_c + K_L \times LA} = \frac{R_b}{RTD + K_L \times LB} \quad (6.6)$$

Es importante mencionar que la precisión de esta medición está relacionada en forma directa con el número de filamentos conectados a los nodos del puente de Wheatstone.

## Ejercicio

Considérese el diagrama eléctrico que se muestra en la figura 6.22. Calcule el voltaje de salida, si se trabaja a  $50^\circ\text{C}$  y se utiliza un sensor de temperatura resistivo (RTD) PT100.

donde:

$$R_a = R_c = 2000 \Omega$$

$$R_b = 150 \Omega$$

$$V = 15 \text{ V}$$

El valor de la resistencia RTD se calcula a partir de la ecuación 6.3; entonces:

$$R_t = R_o(1 + \alpha_{\text{RTD}}t) = 50(1 + 0.00385 \text{ de } l) = 69.25 \Omega$$

Luego, se calcula el voltaje en el nodo A:

$$V_{A'} = \frac{R_b}{R_a + R_b} V = \frac{150}{2000 + 150} 15 = 1.04 \text{ V}$$

Ahora, se calcula el voltaje en el nodo B:

$$V_A = \frac{R_t}{R_c + R_t} V = \frac{69.25}{2000 + 69.25} 15 = 0.5019 \text{ V}$$

Entonces, el voltaje entre bornes es:

$$V = VA' - VA = 0.539 \text{ V}$$

## 6.7 El diodo y otros CI como sensores de temperatura

Los medidores de temperatura basados en diodos semiconductores son la aplicación más simple de las uniones semiconductoras utilizadas en sensores. El diodo posee como característica una gran variación de su curva  $V-I$  debido a un gradiente de temperatura, y si bien esto se considera un inconveniente en muchos casos, es posible utilizar dicha propiedad para medir la temperatura u otra magnitud que se pueda asociar a las variaciones de esta. Para eso es necesario realizar una calibración cuidadosa y mantener una corriente de excitación estable.

El voltaje sobre un diodo conduciendo corriente en directo tiene un coeficiente de temperatura de alrededor de  $2.3 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$  y la variación, dentro de un rango, es razonablemente lineal. Por tanto, se debe establecer una corriente básica de excitación; lo mejor para esto es utilizar una fuente de corriente constante, o en su defecto usar una resistencia conectada a una fuente estable de voltaje. Como es bien sabido, la característica básica de un diodo es dejar fluir la corriente eléctrica en un solo sentido; la respuesta ante corriente o voltajes aplicados se puede modelar mediante la ecuación 6.7, cuya representación gráfica voltaje-corriente se muestra en la figura 6.25.

$$I_{DA} = I_S \left( e^{V_{DA}/nV_T} - 1 \right) \quad (6.7)$$

donde:

$I_{DA}$ : corriente en el diodo [A]

$I_S$ : corriente de saturación en inversa [A]

$V_{DA}$ : voltaje de polarización del diodo [V]

$V_T$ : voltaje térmico [V]

donde la corriente de saturación es:

$$I_S = kT \frac{2}{n} e^{\frac{-V_S}{nV_T}} \quad (6.8)$$

En la ecuación 6.8,  $V_T = KT/q$ , donde  $k$  es una constante llamada constante de Boltzman,  $T$  indica la temperatura en Kelvin,  $q$  representa la carga del electrón,  $V_g$  es el ancho de la banda prohibida<sup>1</sup> y  $\eta$  es la constante de idealidad.

Con base en las ecuaciones (6.7) y (6.8) es posible corroborar que los cambios de temperatura representados como variaciones del voltaje son aspectos importantes que deben ser tomados en cuenta para el diseño o análisis de los circuitos electrónicos donde el diodo está presente. Por tanto, si se deriva la ecuación (6.7) pueden calcularse dichas variaciones. Obsérvese que la temperatura está considerada de manera implícita en  $V_T$  y en la corriente inversa de saturación  $I_S$ , obteniéndose la expresión  $dV/dT = (V_a - V_g)/T$ , donde  $V_a$  es el voltaje de inicio.

Se puede diseñar un circuito electrónico que funcione como medidor de temperatura, como se muestra en la figura 6.26, donde un diodo es utilizado como sensor de temperatura. Por tanto, al resolver dicho circuito se obtiene que el voltaje de salida en el diodo  $V_0$  es igual a la ecuación 6.9.

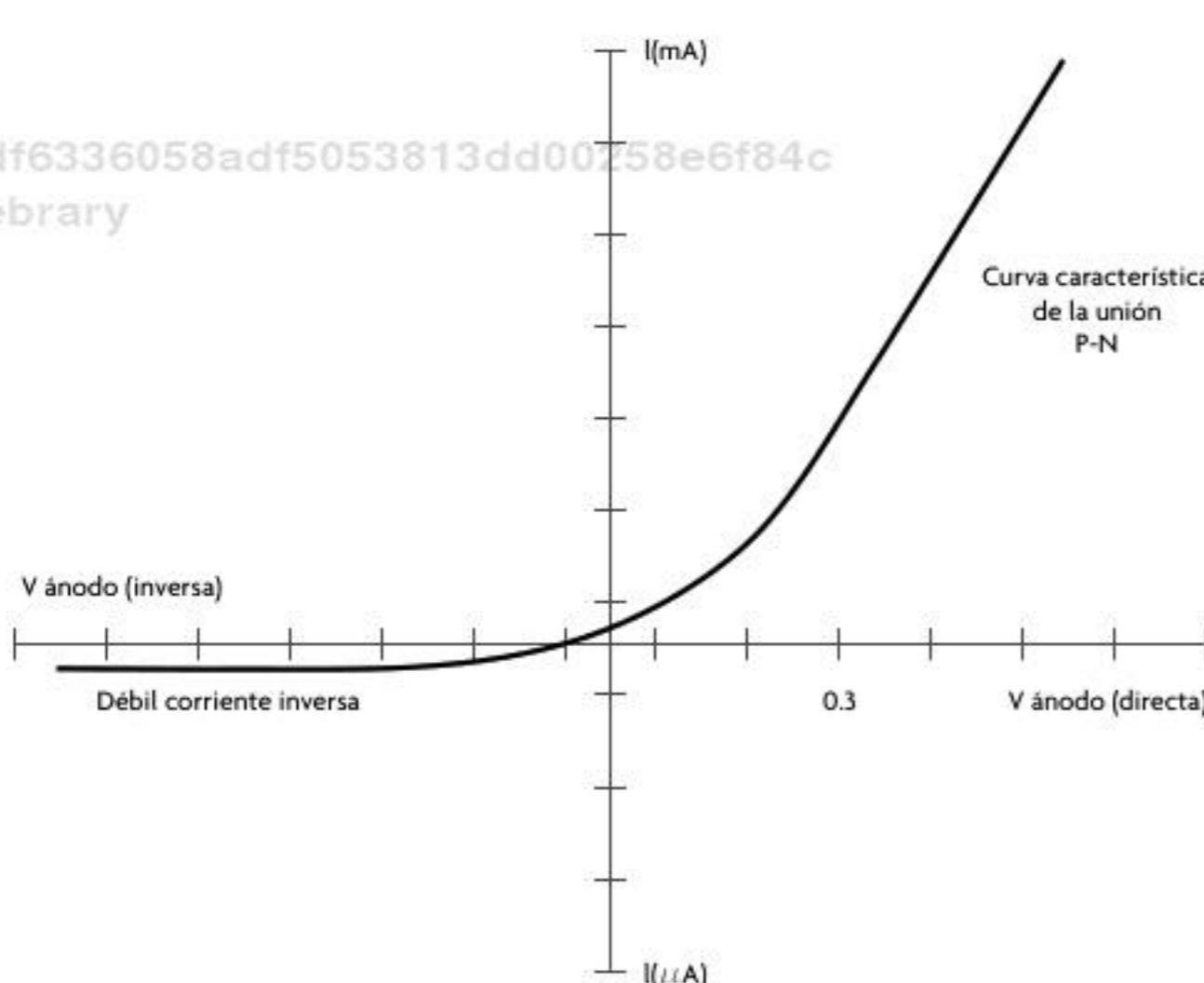


Figura 6.25 Representación gráfica voltaje-corriente del diodo.

<sup>1</sup> Diferencia de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia.

$$V_o = \frac{2R_f T}{R_a} \quad (6.9)$$

### Sensor CI LM35 de temperatura

Es un sensor de temperatura en circuito integrado producido por la compañía Texas Instruments, en su división National Semiconductor, tiene una precisión de 1 °C y trabaja en un rango que abarca desde -55 °C a +150 °C.

Una gran ventaja de este sensor es que su salida es lineal y equivale a 10 mV/°C (véase la gráfica de la figura 6.27).

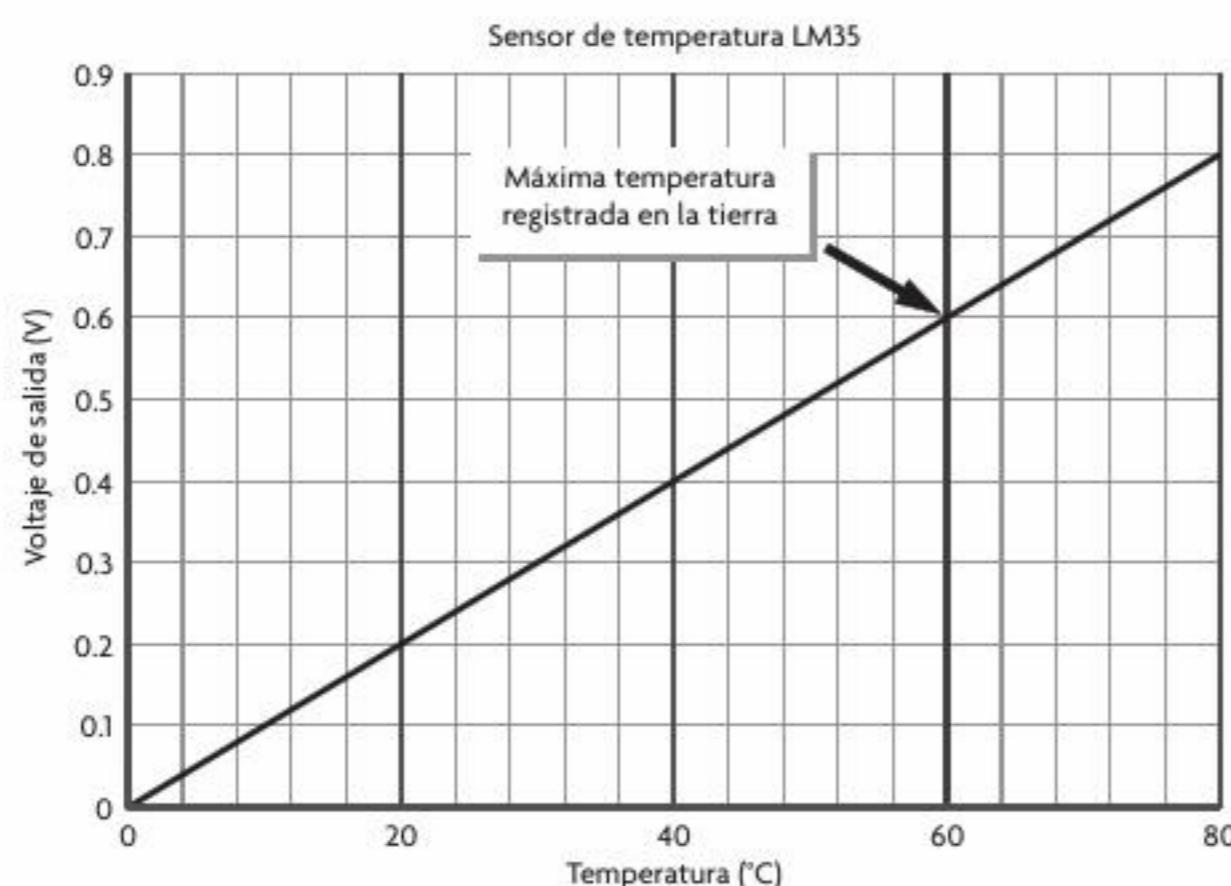


Figura 6.27 Relación voltaje-temperatura del sensor LM35.

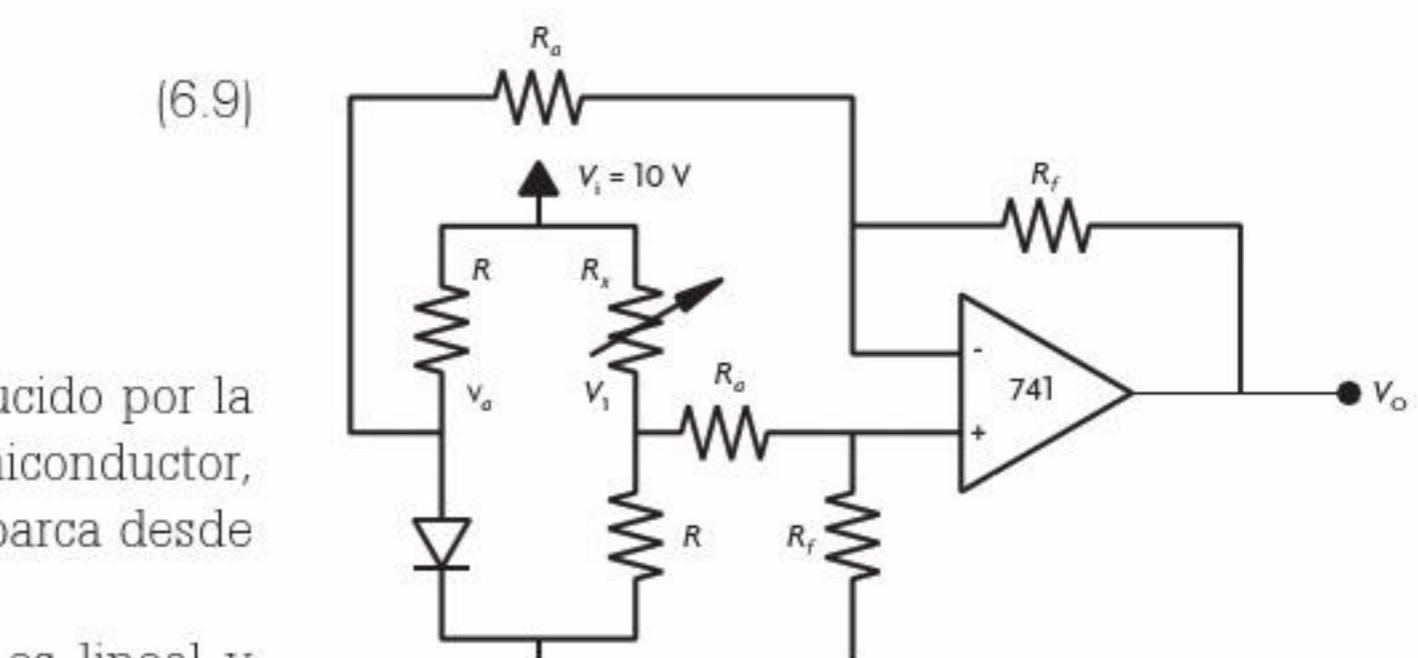


Figura 6.26 Circuito electrónico como medidor de temperatura.

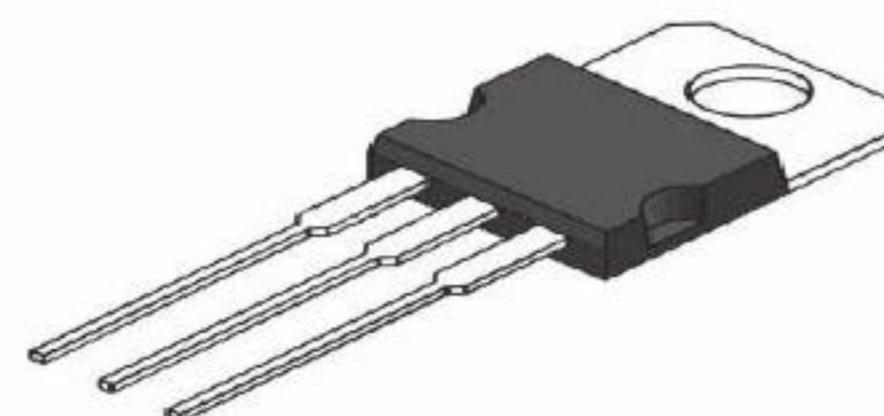


Figura 6.28 Sensor TO-220.

### Características principales

- Calibrado en forma directa en grados Celsius.
- Escala de factor lineal.
- Opera con entre 4 y 30 volts de alimentación.
- Bajo autocalentamiento.

La figura 6.28 muestra la configuración TO-220 de tres terminales de este sensor.

En la figura 6.29 se muestra el circuito clásico de acoplamiento; obsérvese el potenciómetro de 10 kΩ que se utiliza para regular la ganancia del amplificador, con lo cual se calibra la medición.

### Sensor CI TMP36 de temperatura

Es un sensor de temperatura en circuito integrado producido por la compañía de semiconductores Analog Devices; se trata de un sensor de bajo voltaje y alta precisión. Suministra un voltaje linealmente proporcional a la temperatura (véase figura 6.30). Una de sus ventajas es que si el sensor no es calibrado, este presenta un error no mayor de ±2 °C en el rango de -40 °C a +125 °C; además, trabaja en la escala de grados Celsius.

Se alimenta con un voltaje de 2.7 a 5.5 VDC. Mapea el voltaje de salida a la temperatura usando el factor de 10 mV/°C. Cuenta con un nivel de offset inicial de 500 mV; es decir, a una temperatura de 25 °C entrega un voltaje de 750 mV.

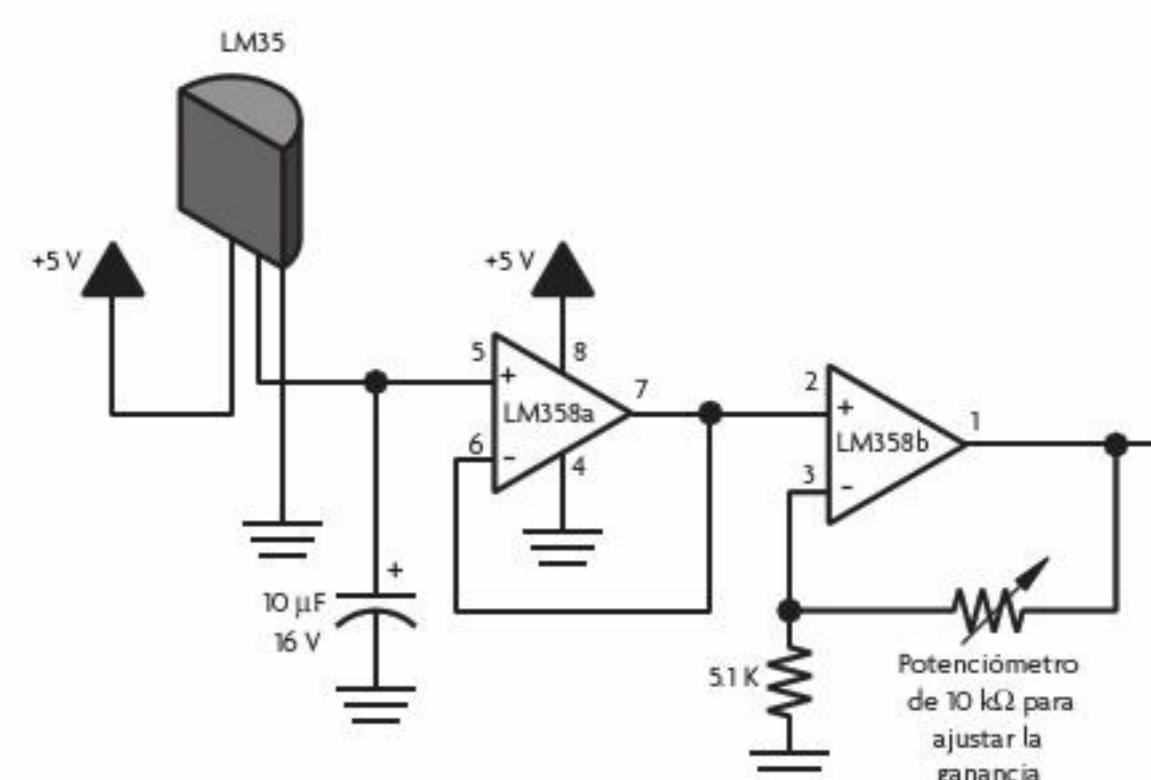
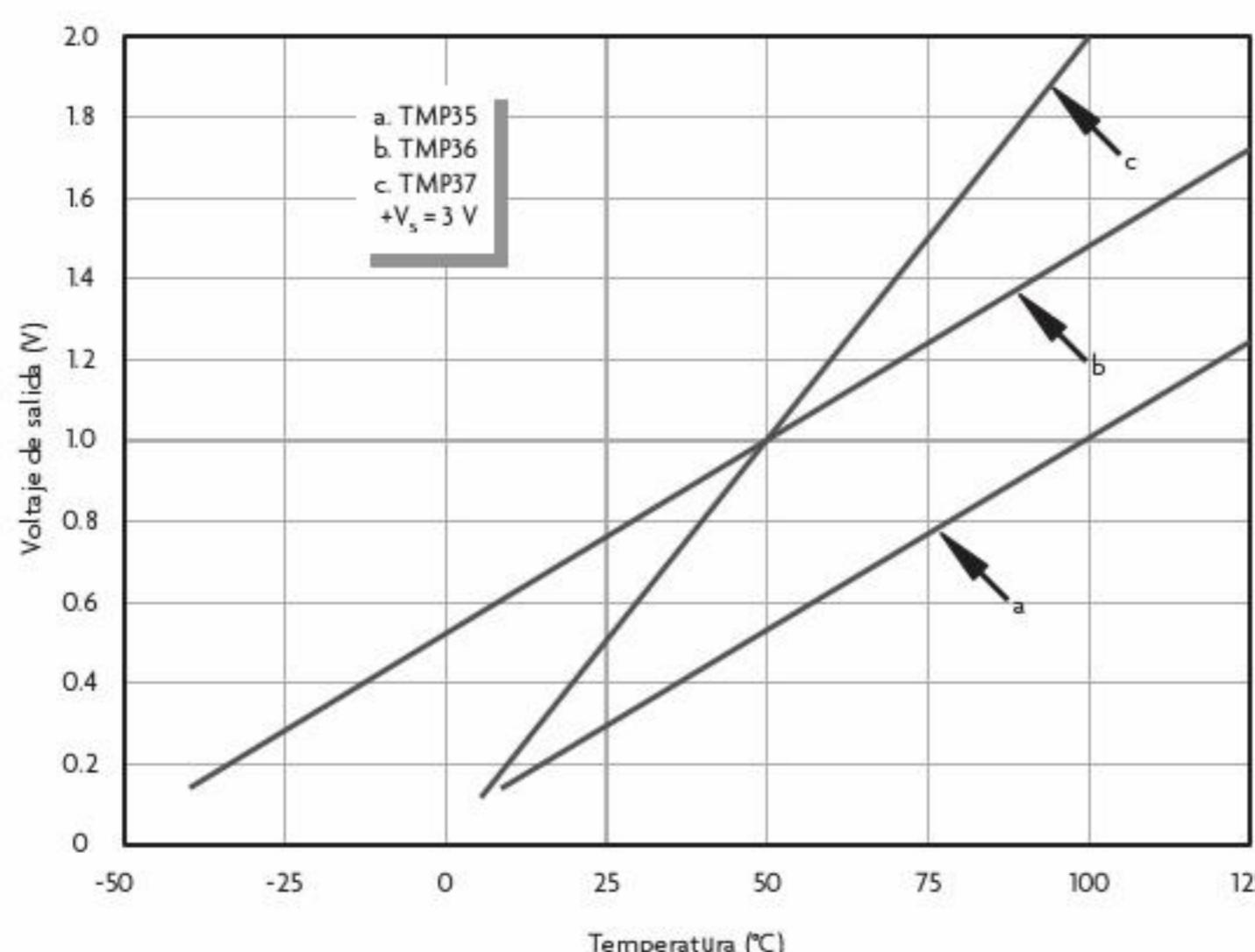


Figura 6.29 Circuito para medir temperatura con el sensor LM35.

**Figura 6.30** Curva característica del sensor TMP36.df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary**Figura 6.31** Sensor TMP36.

La figura 6.31 muestra la configuración de tres terminales de este sensor.

## Ejercicio de aplicación

### Medir la temperatura con los sensores LM35 y TMP36

#### Objetivo

Medir la temperatura ambiente a través de los sensores LM35 y TMP36 con el uso del Arduino Uno® como procesador de estas señales.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor LM35
- Sensor TMP36
- Resistencia 10 kΩ
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

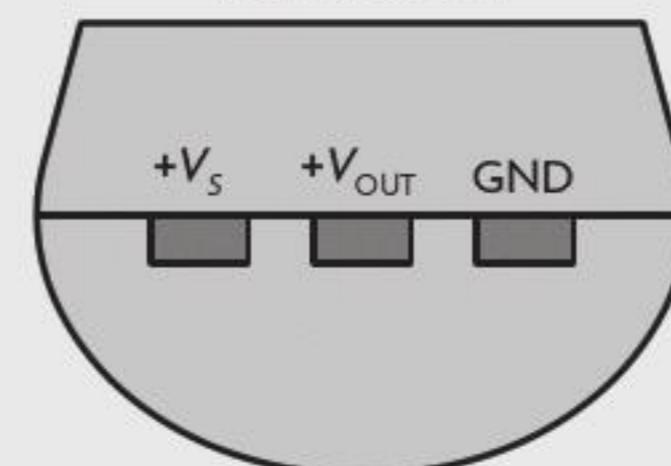
##### Descripción del sensor de temperatura LM35

El circuito integrado LM35 es un sensor de temperatura preciso, con un voltaje de salida linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius. Con una precisión de  $\pm 0.25$  °C trabaja en un rango de -55 °C a 150 °C y entrega una voltaje de 10 mV/°C.

La descripción de los pines de acuerdo con la figura 6.32 es la siguiente:

- $+V_s$ : Voltaje de alimentación de 4–30 V.
- $+V_{out}$ : Voltaje de salida. 10 mV por cada grado centígrado registrado.
- **GND**: Conexión de tierra.

Vista inferior del encapsulado plástico TO-92

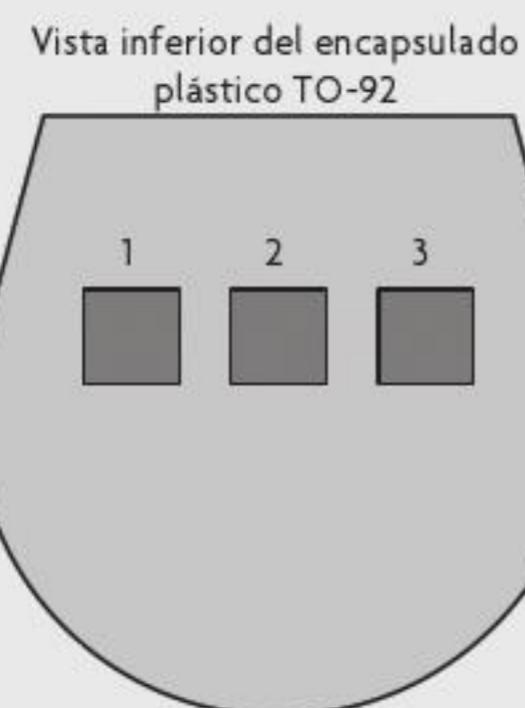
**Figura 6.32** Sensor LM35 encapsulado TO-92.

##### Descripción del sensor de temperatura TMP36

El circuito integrado TMP36 es un sensor de temperatura en grados Celsius. El voltaje de salida es directamente proporcional a la temperatura en grados Celsius. Este sensor trabaja en el rango de -40 °C a 125 °C y provee una voltaje de 10 mV/°C, aunque cuenta con un nivel de offset inicial de 500 mV; es decir, a una temperatura de 25 °C entrega una voltaje de 750 mV.

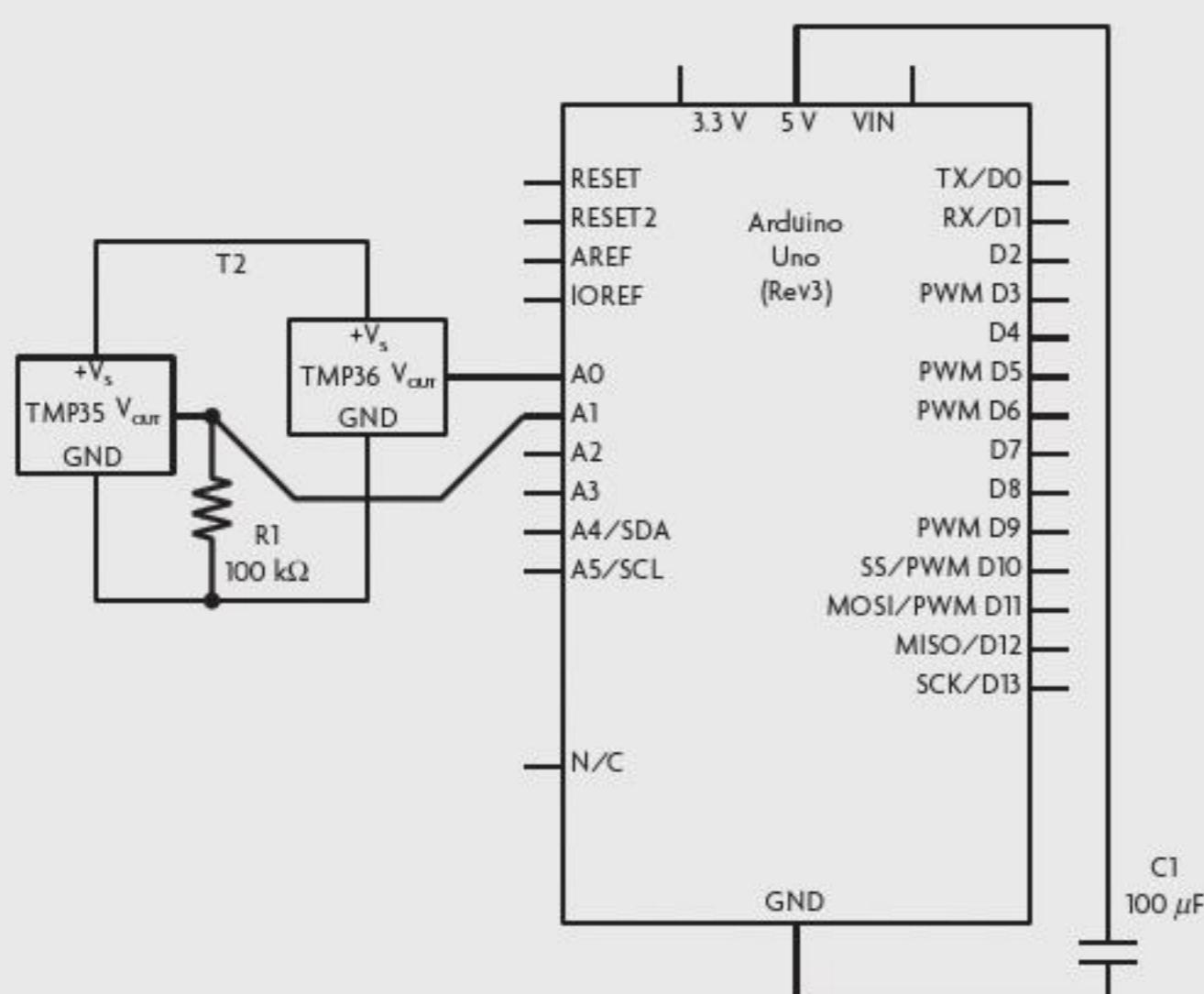
Los pines para el encapsulado TO-92 del TMP36 son similares al LM35 (véase figura 6.33).

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

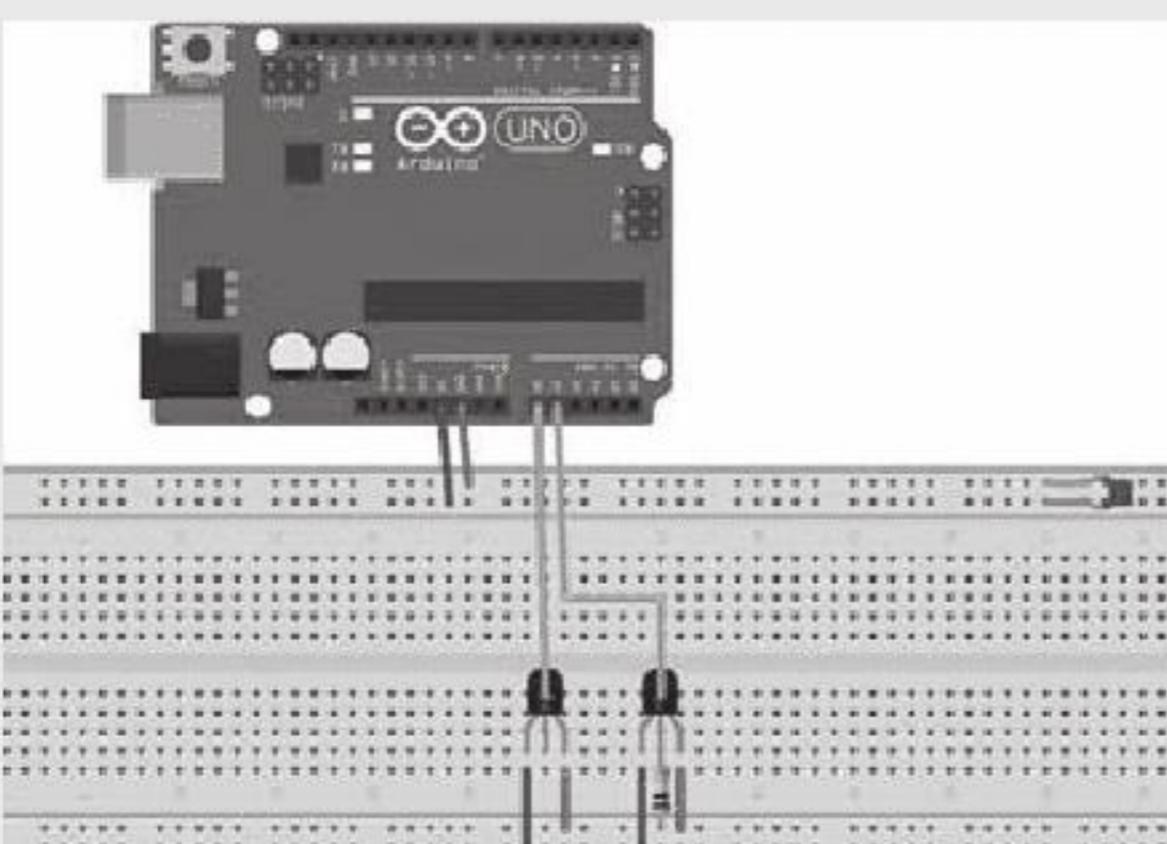


**Figura 6.33** Sensor TMP36 encapsulado TO-92.

### Construcción del circuito



**Figura 6.34** Circuito esquemático de los sensores TMP36 y LM35.



**Figura 6.35** Diagrama en protoboard del Arduino® y los sensores LM35 y TMP36.

El capacitor de 100 nF se utiliza como capacitor de bypass para mantener estable el voltaje de alimentación.

### Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

El Arduino® efectúa la lectura y la conversión de las señales de los sensores de temperatura LM35 y TMP36; los resultados se muestran en la terminal serie.

Para el sensor LM35 solo se hace la conversión a grados Celsius, considerando que por cada 10 mV se tiene un grado centígrado. En el caso del TMP36, además de realizar la conversión se requiere eliminar el voltaje de offset de 500 mV.

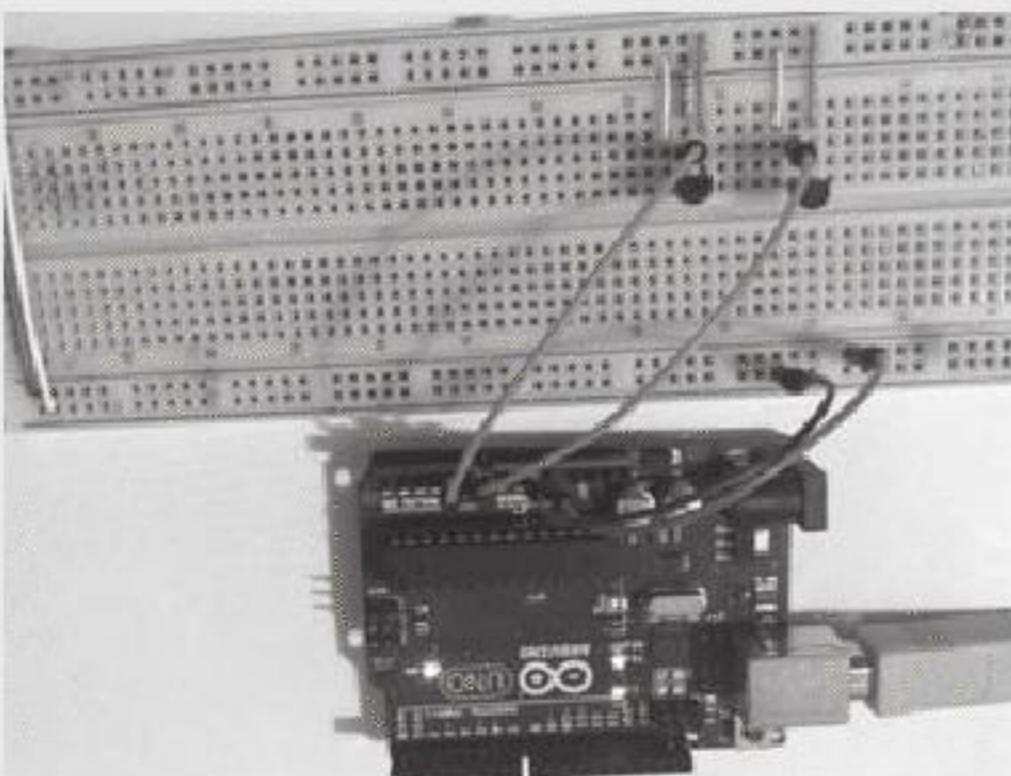
```
*****Termometro con TMP36 y LM35*****
/*
**En el siguiente programa el Arduino leera el
voltaje de los sensores de temperatura
**TMP36 y LM35. Ambos sensores entregan a la
salida un voltaje de 10 mV por 1 °C, aunque
**el sensor TMP36 tiene un nivel de offset de
500 mV respecto a los 0 °C. Se hara la
**conversion a grados Celsius y se mostrara el
valor por la terminal serie.
*****


//Variables empleadas
int readTM36, readLM35;
float tmp36, lm35;

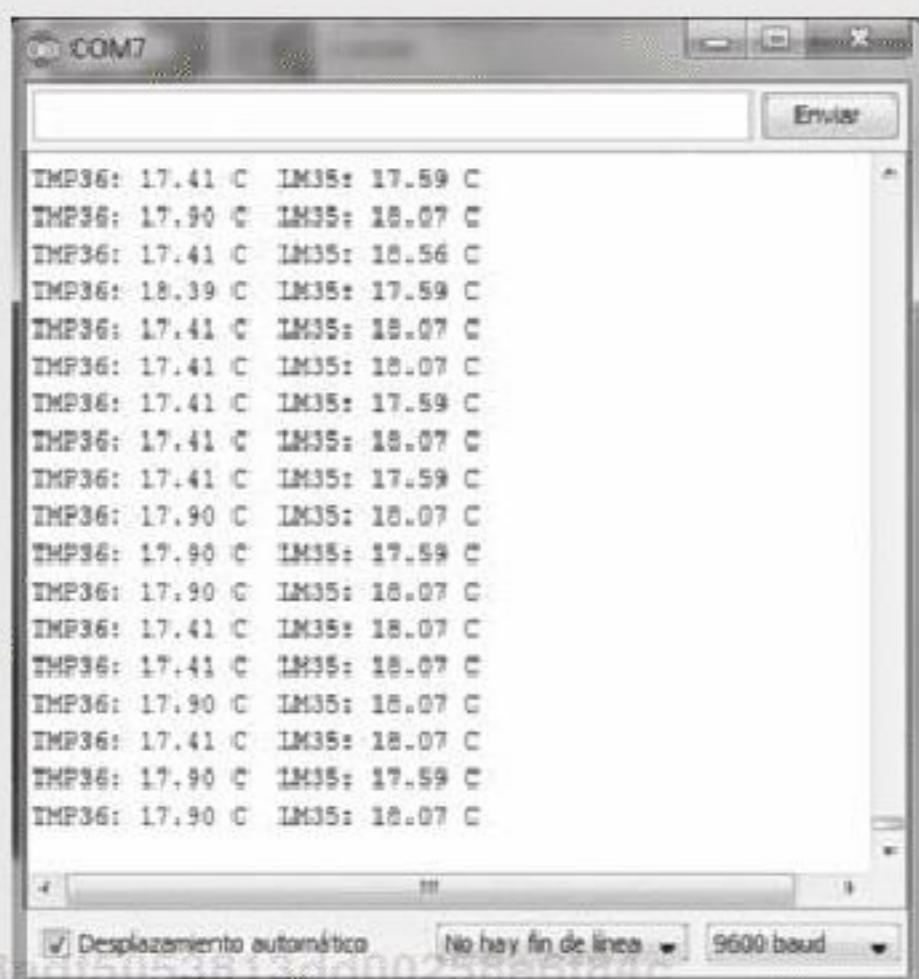
void setup()
{
Serial.begin(9600);           //Se inicia la
    comunicacion a una velocidad de 9600 baudios
}

void loop()
{
readTM36 = analogRead(A0);   //Lectura
analogica y conversion digital del sensor
TMP36
readLM35 = analogRead(A1);   //Lectura
analogica y conversion digital del sensor
LM35
tmp36 = readTM36*0.488-50; //Si el ADC del
Arduino es de 10 bits -> 5/1024 = 4.88 mV/
unidad-          x100 = 0.488 °C/unidad menos
el offset de 500 mV o 50 °C
lm35 = readLM35*0.488;      //
Conversion similar al sensor TMP36 aunque sin
offset
Serial.print("TMP36: ");     //Se escribe la
informacion en la terminal serie
Serial.print(tmp36);
Serial.print(" C ");
Serial.print("LM35: ");
Serial.print(lm35);
Serial.println(" C ");
delay(100);                 //Pequeño retardo para
realizar menos conversiones y mostrar menos
valores
}
```

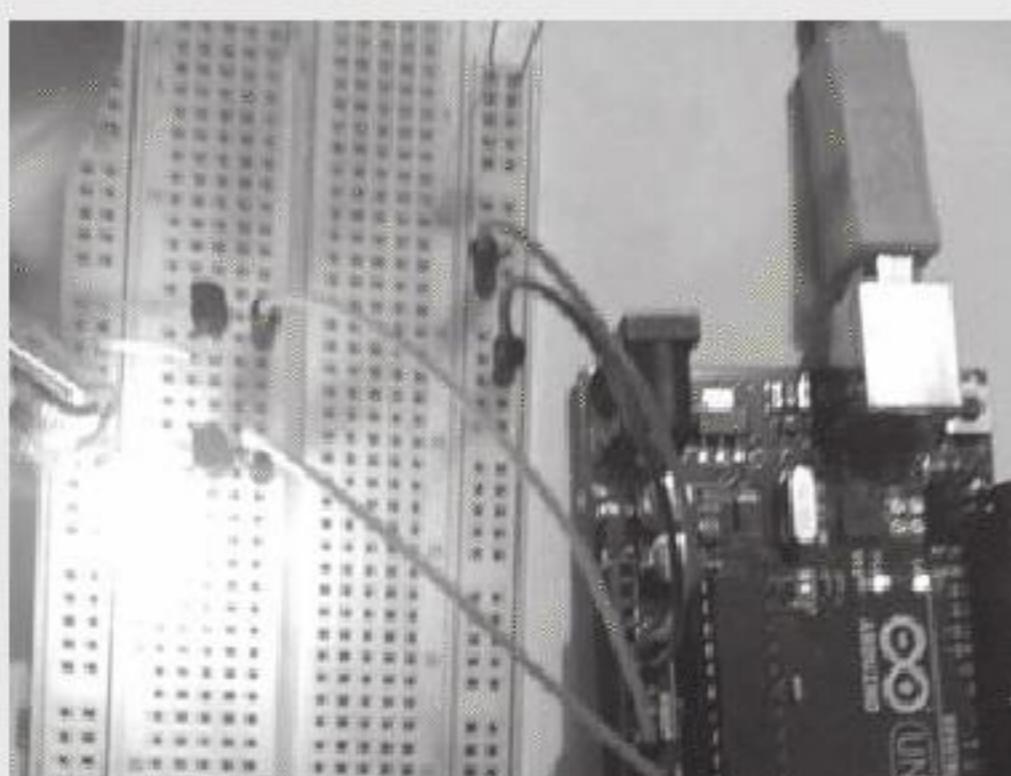
## Comprobar el funcionamiento



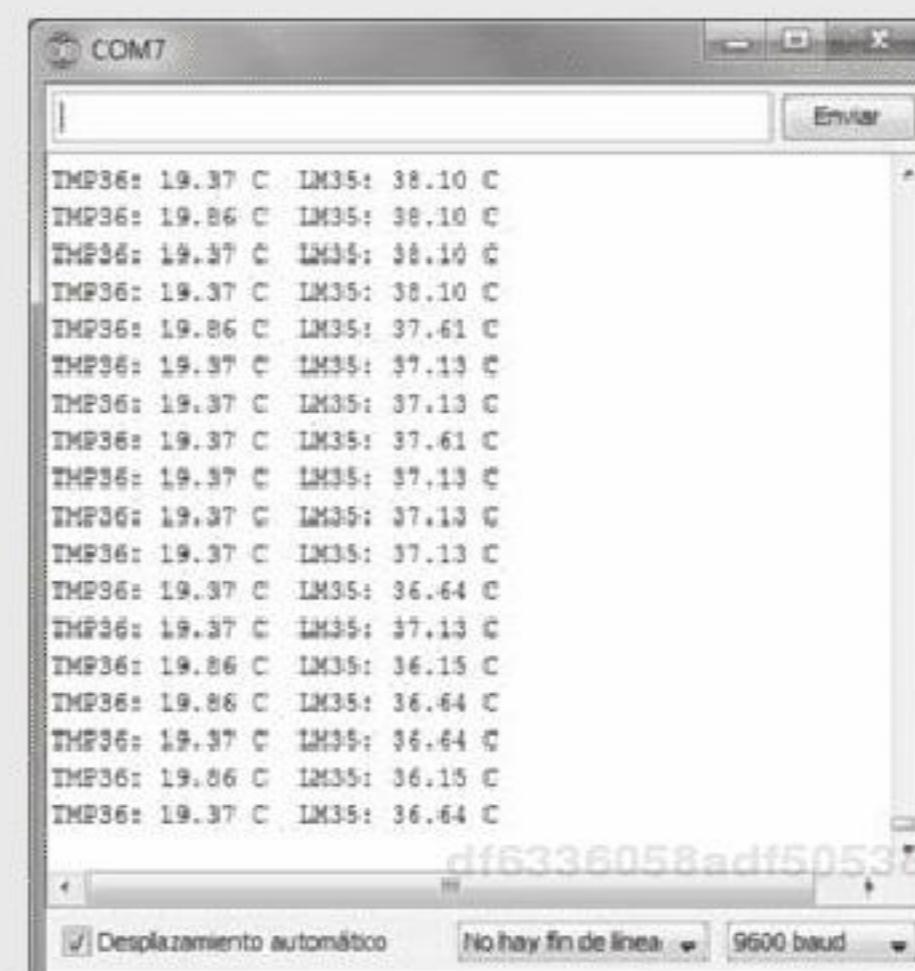
**Figura 6.36** Configuración de los sensores de temperatura TMP36 y LM35.



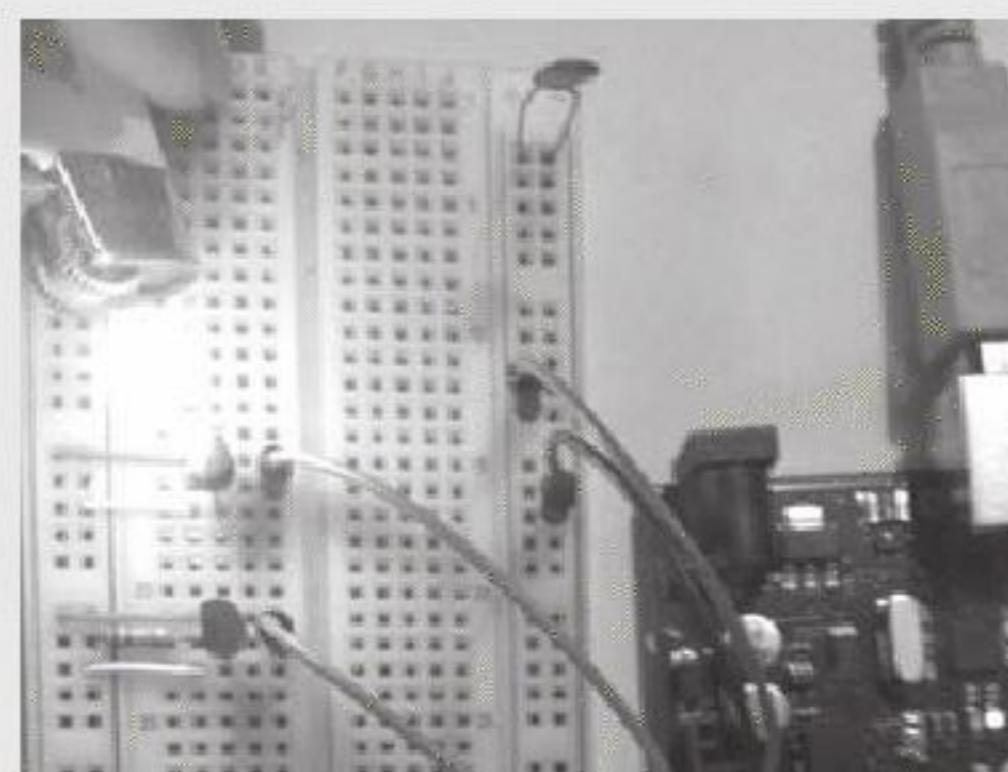
**Figura 6.37** Temperatura ambiente medida por ambos sensores. La variación entre ambos es mínima.



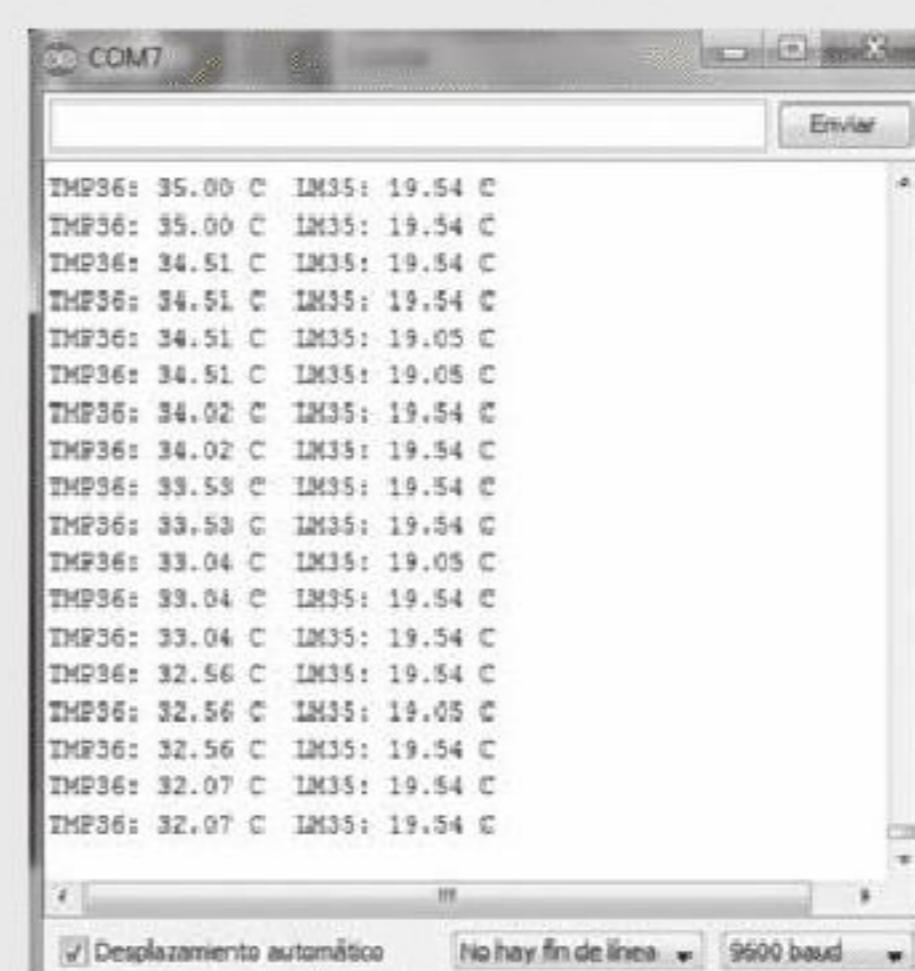
**Figura 6.38** Al acercar un encendedor al sensor LM35 se eleva de inmediato la temperatura.



**Figura 6.39** Aquí se observa cómo aumenta más la temperatura en el sensor LM35 que en el TMP36 debido a su cercanía con el encendedor.



**Figura 6.40** Al acercar el encendedor al sensor TMP36 se nota un incremento rápido en su lectura.



**Figura 6.41** Se observa cómo es más alta la lectura del sensor TMP36 que la del sensor LM35 por su cercanía al encendedor.

## Ejercicio de aplicación

### Medir la temperatura con un termostato TMP102

#### Objetivo

Medir la temperatura del medio y emitir una alerta si esta sobrepasa los límites inferior y superior (termostato) a través del sensor TMP102, con el uso de Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor de temperatura TMP102
- 1 resistencia de 220 Ω
- 1 diodo LED
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del sensor TMP102

El TMP102 es un sensor digital de temperatura del medio circundante en un rango entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $150^{\circ}\text{C}$ . El sensor cuenta con una resolución de 12 bits y se comunica a través del protocolo I<sup>2</sup>C. Puede configurarse como termostato al establecer un límite superior de temperatura, a partir del cual se emite una alarma, y un límite inferior, que provoca que se apague.

La descripción de los pines del sensor TMP102 es la siguiente:

- **VCC.** Voltaje de alimentación de 3.3 V.
- **GND.** Voltaje de referencia (tierra).
- **SDA.** Línea de datos del protocolo I<sup>2</sup>C.
- **SCL.** Señal del reloj del protocolo I<sup>2</sup>C.
- **ALT.** Únicamente funciona cuando se configura como termostato. Muestra el estado de alarma.
- **ADD0.** Establece la dirección I<sup>2</sup>C del sensor. Si se conecta a GND, la dirección del sensor es 0x48. Si es a VCC, la dirección es 0x49. A SDA la dirección es 0X4A. Por último, si este se conecta a SCL, la dirección es 0x4B. Esto permite la conexión de cuatro sensores de este tipo en un mismo sistema.

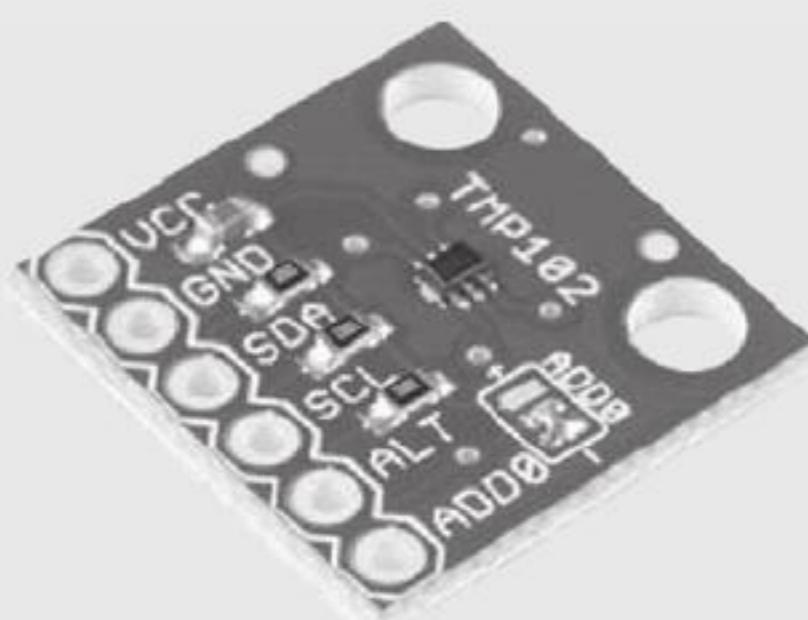


Figura 6.42 Sensor TMP102.

#### Construcción del circuito

Las figuras 6.43 y 6.44 muestran la conexión entre el sensor TMP102 y el Arduino®. Dado que la terminal ADD0 se conecta a GND, la dirección I<sup>2</sup>C es 0x48. Los pines VCC y GND se conectan a las terminales 3.3 V y GND del Arduino®, respectivamente. La línea SDA se conecta con el pin analógico A4 y el SCL al analógico A5, tal como se definen en la librería Wire.h, empleada en esta práctica. De modo adicional, también se conecta un diodo con su resistencia limitadora de corriente al pin de salida ALT, el cual indica el estado de la alarma del termostato.

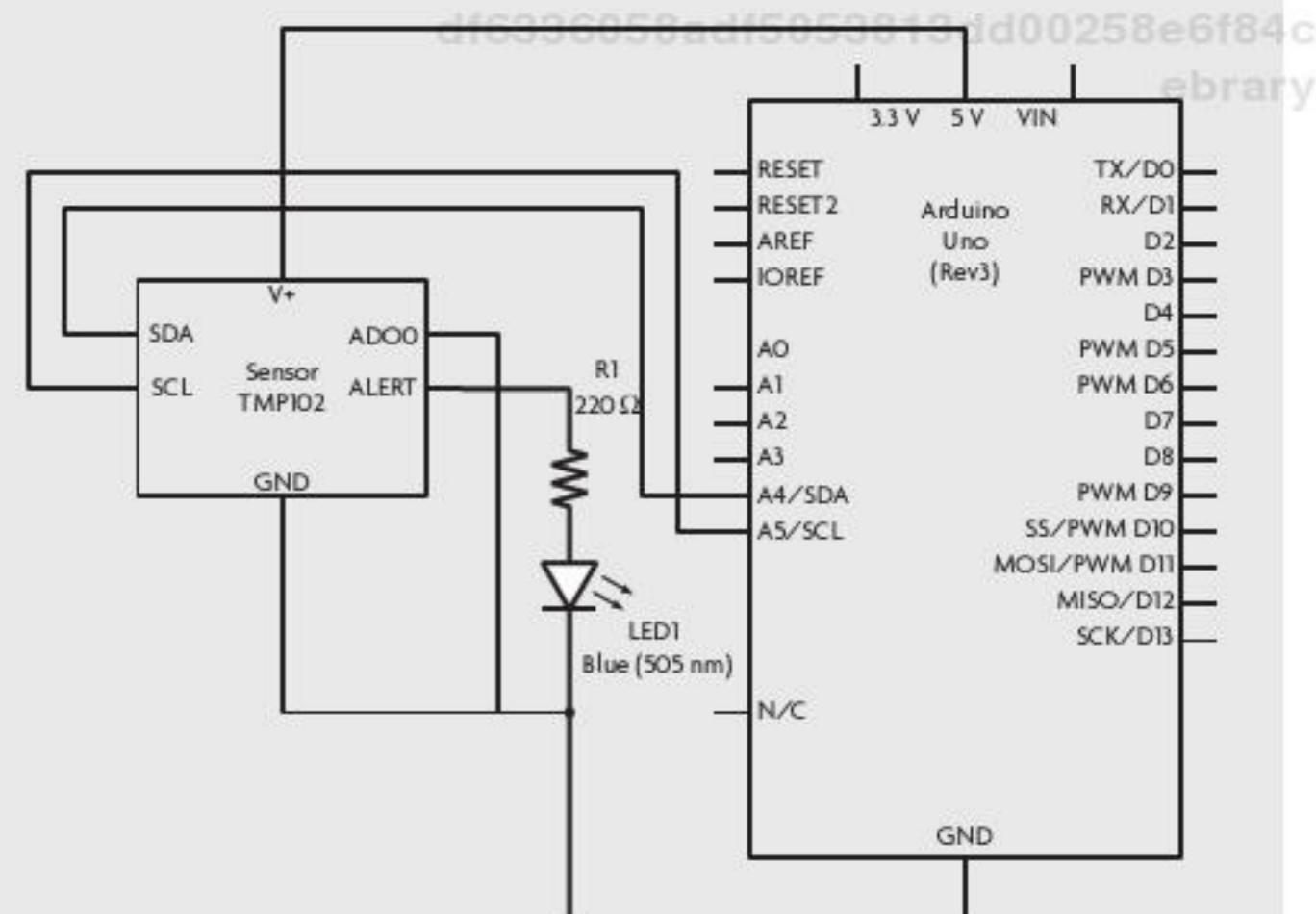


Figura 6.43 Diagrama de conexión entre el sensor TMP102 y el Arduino®.

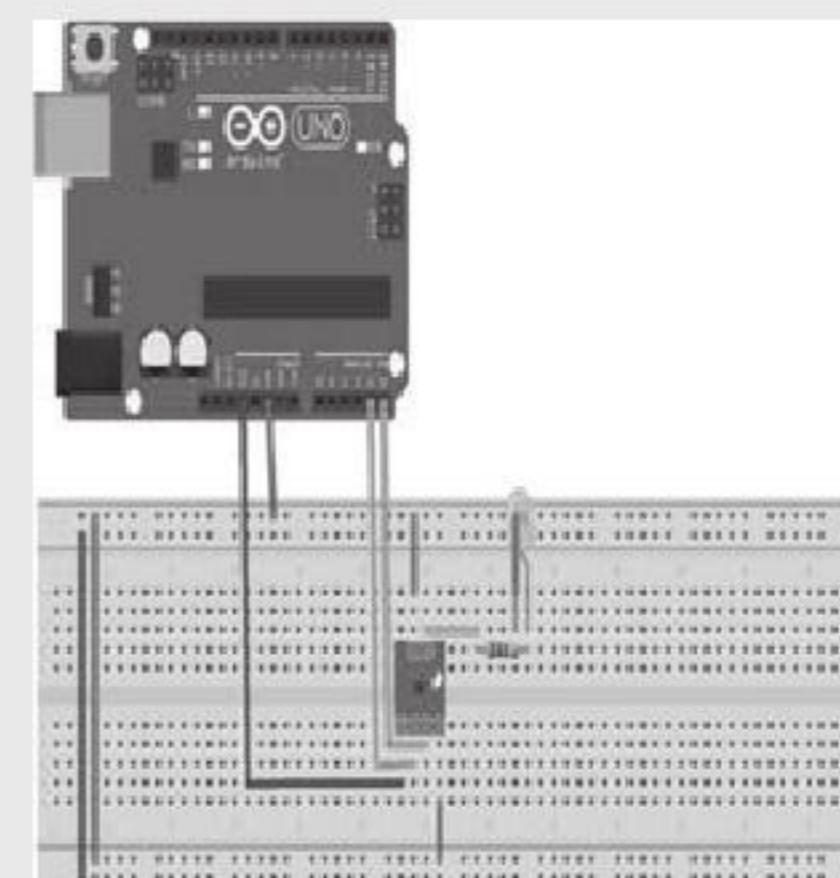


Figura 6.44 Diagrama de conexión en protoboard entre el sensor TMP102 y el Arduino®.

#### Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

1. **Se configura la polaridad de la alarma.** Desde fábrica, por definición, la alarma está configurada en estado bajo;

es decir, cuando se sobrepasan los límites del termostato el estado de la alarma es en bajo. Para invertir su estado, el bit POL del registro de configuración se configura en '1'.

## 2. Se establece la temperatura mínima del termostato.

Temperatura mínima que debe pasar el sensor para apagar la alarma. Se configura por medio de dos bytes, 8 bits para el MSB y 4 bits para el LSB (la resolución del sensor es de 12 bits). Se establece en 25 °C (0x190).

## 3. Se establece la temperatura máxima del termostato.

Temperatura máxima que debe superar el sensor para activar la alarma. Se configura por medio de dos bytes, 8 bits para el MSB y 4 bits para el LSB (la resolución del sensor es de 12 bits). Se establece en 30 °C (0x1E0).

## 4. Configuración para el modo de lectura de temperatura.

Se configura en 00 el registro Pointer Register para únicamente leer la temperatura.

5. Luego, el sensor hace la lectura de los dos bytes LSB y MSB del valor de temperatura y se convierte a grados Celsius.

6. Por último, se imprime la lectura en el monitor serie.

```
*****Termostato con sensor TMP102*****
/*
**En el siguiente programa el Arduino
configurara y leera la*
**temperatura que el termostato
TMP102 mide. Ambos dispositivos *
/**comunican mediante el protocolo I2C o TWI.*/
/*
**Desde el Arduino podemos modificar la
temperatura maxima y minima de*
/**dicho termostato,
entre otras caracteristicas. Se recomienda *
/**consultar la Hoja de Datos del TMP102 para
mayor detalle. *
df6336058adf5053813dd00258e6f84c
ebrary
/**Cuando la temperatura supere los limites, el
sensor enviara una *
/**alarma. La forma en la que se presenta esta
alarma dependera de como*
/**se configure el sensor. *
*****
```

```
//Al iniciar la comunicacion con el sensor
TMP102 se configura un Pointer//Register
que define que accion realizara posteriormente
el sensor.
//Segun los 2 LSB el sensor puede:
//      00 -> Leer la temperatura medida
//      01 -> R/W el registro de
Configuracion (Se modificaron algunos
//
parametros. Ver hoja de datos del TMP102)
//      10 -> R/W la temperatura minima del
termostato del sensor
//      11 -> R/W la temperatura maxima del
termostato del sensor
```

```
#include <Wire.h>/Se incluye la libreria Wire
para la comunicacion I2C

#define ADD 0x48      //Direccion TMP102 '1001000'
con ADD0 -> GND

//El termostato sera de una temperatura minima
(Tl) = 25 °C y una
//temperatura maxima (Th) = 30 °C. Para Tl ->
25/0.0625 = 400 -> 0x190;
//Para Th -> 30/0.0625 = 480 -> 0x1E0.
//Puede optar por cualquier combinacion de
valores de temperaturas
//logicos, con la correcta conversion
#define ThMSB 0x1E
#define ThLSB 0x00      df6336058adf5053813dd00258e6f84c
#define TlMSB 0x19
#define TlLSB 0x00      ebrary

voidsetup()
{
  Serial.begin(9600); //Se inicia la
comunicacion serie a 9600 baudios
Wire.begin();         //Inicializa la libreria
Wire y se configura al
//Arduino como maestro
conf();               //Se configuran algunos
registros iniciales
tempLow();            //Se configura la
temperatura minima del termostato
tempHigh();           //Se configura la
temperatura maxima del termostato
modoTemp();           //Se configura al sensor
para unicamente leer la
//temperatura medida
}

voidloop()
{
  floattmp = readTemp();          //Lectura de
la
temperatura
Serial.print("Temperatura: ");   //Imprime el
valor de la
//temperatura en grados Celsius
Serial.print(tmp);
Serial.println(" C");
delay(50);                      //Pequeno
retardo por estabilidad
}

//Funcion que configura la temperatura minima
del termostato
voidtempLow()
{
  Wire.beginTransmission(ADD);    //Se
direcciona con el TMP102
  Wire.write(0x02);              //R/W de la
temperatura minima, por
```

```

//default es de 75 °C
Wire.write(TlMSB); //Se
escriben
los 8 MSB de la
//temperatura
Wire.write(TlLSB); //Se
escriben los otros 4 LSB. El resto
//de bits son ignorados
Wire.endTransmission(); //Finaliza
la comunicacion
}

//Funcion que configura la temperatura maxima del
termostato
voidtempHigh()
{
    Wire.beginTransmission(ADD); //Se
    direcciona con el TMP102
    Wire.write(0x03); //R/W de la temperatura
    minima, por default es de 75 °C
    Wire.write(ThMSB); //Se escriben los 8 MSB de
    la temperatura
    Wire.write(ThLSB); //Se escriben los otros 4
    LSB. El resto de bits son
    //ignorados
    Wire.endTransmission(); //Finaliza
    la comunicacion
}

//Funcion que define el pointer register
voidmodoTemp()
{
    Wire.beginTransmission(ADD); //Se
    establece la comunicacion con el
    //TMP102
    Wire.write(0x00); //Se establece que
    unicamente se realice lectura
    //de la temperatura
    Wire.endTransmission(); //Finaliza
    la comunicacion
}

//Funcion que configura algunas caracteristicas
del sensor TMP102
//Para mayor informacion consultar la Hoja de
datos del sensor TMP102
voidconf()
{
    Wire.beginTransmission(ADD);
    Wire.write(0x01); //Accede al Configure
    Register
    Wire.write(0x64); //Unicamente se modifica
    el bit de polaridad POL,
    //a POL = 1 de tal manera que cuando se
    active la
    //alerta el estado del PIN, ALT se
    encuentre en 1
    //y sea 0 en caso contrario.
}

```

```

Wire.write(0xA0);

Wire.endTransmission();
}

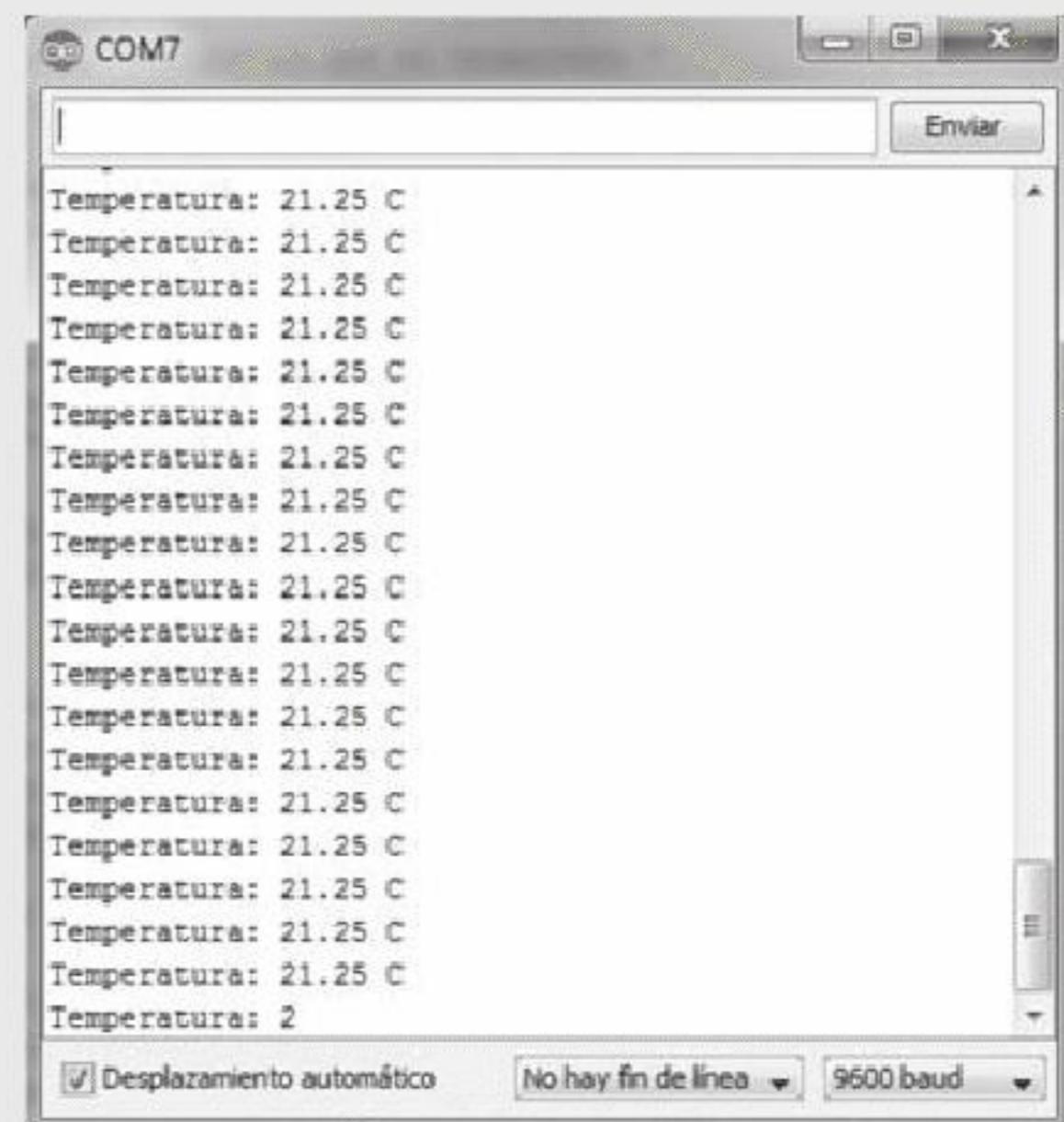
floatreadTemp()
{
    Wire.requestFrom(ADD,2); //Se leen los dos
    bytes de la temperatura,
    //donde solo 12 bits son utiles
    byte MSB = Wire.read();
    byte LSB = Wire.read();

    int signo = (MSB << 8) & 0x8000; //Se revisa
    el signo de la temperatura
    inttemp = (((MSB << 8) | LSB) >> 4) | signo;
    //Se concatenan los 12
    //bits de la temperatura en una variable tipo
    int.

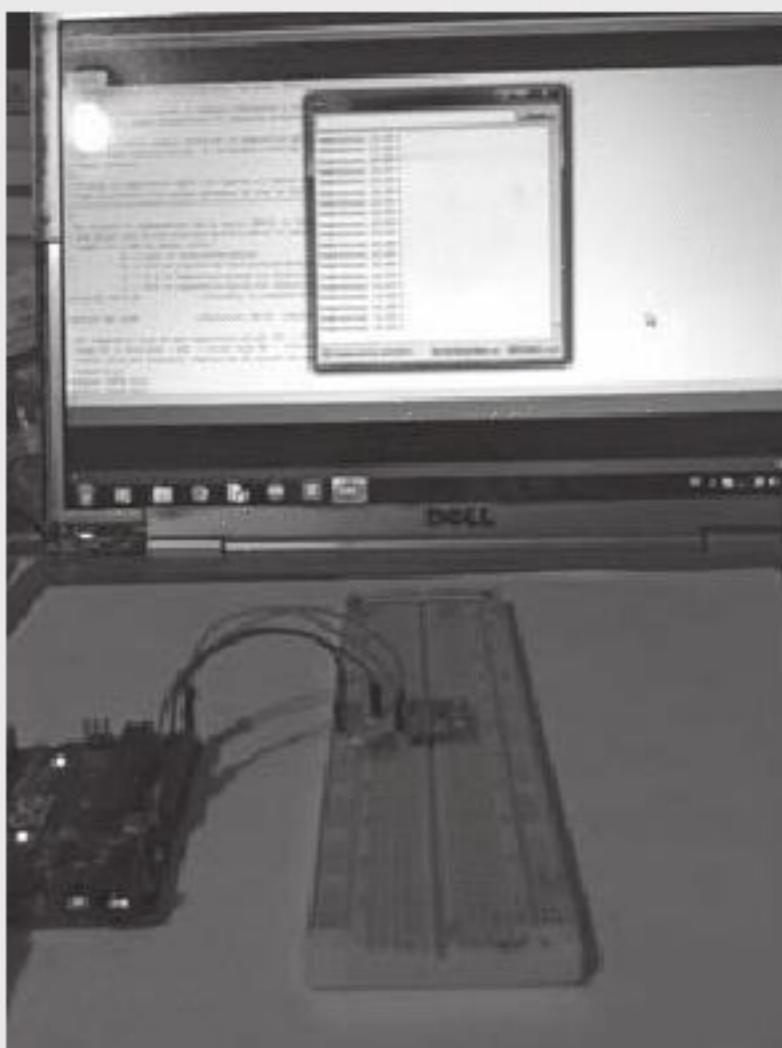
    floattp = 0.0625*temp; //Para la conversion a
    grados Celsius se
    //multiplica por 0.0625 °C, que es la
    resolucion del sensor.
    returntp;
}

```

### Comprobar funcionamiento



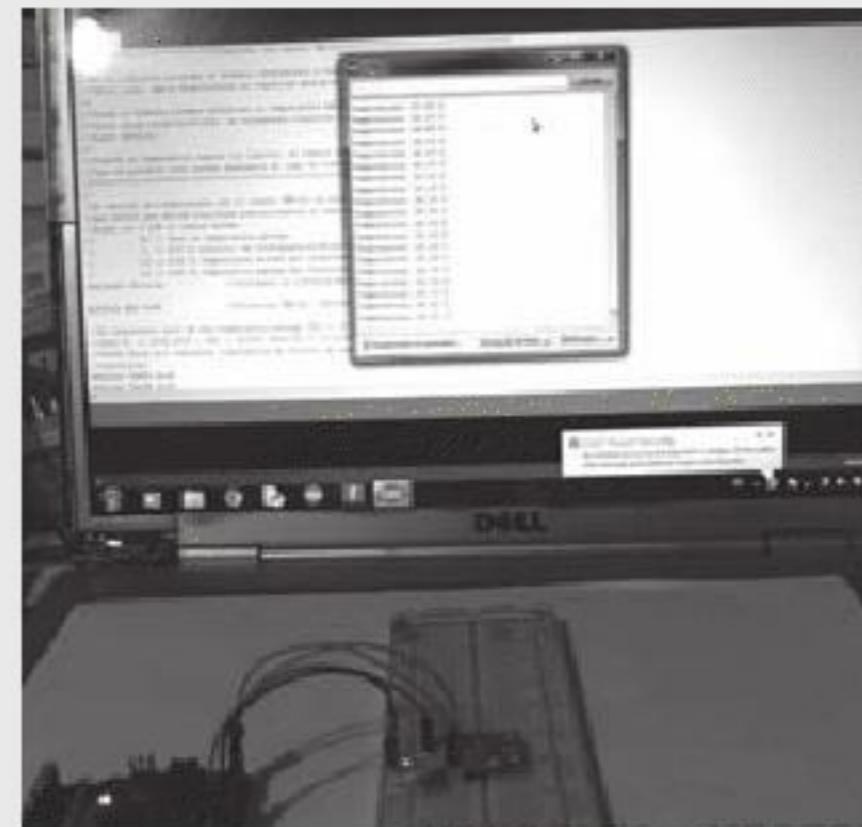
**Figura 6.45** Lectura de la temperatura del sensor TMP102.

**Cuando la temperatura es menor que el umbral (30 °C)**

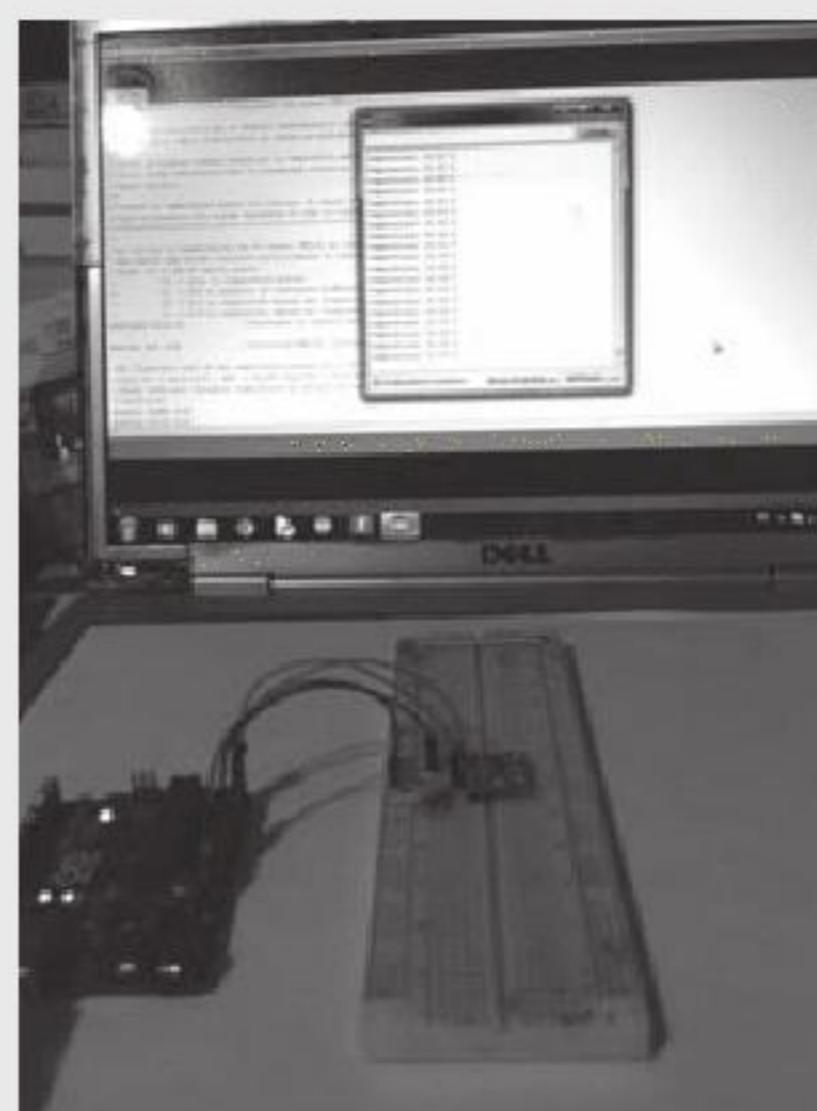
**Figura 6.46** El sensor TMP102 nos da una lectura de 22.69 °C, menor al umbral del termostato, por lo que la alarma se mantiene apagada.

**Cuando se activa la temperatura**

Si la temperatura del medio supera el umbral de temperatura máxima (30 °C), aunque sea por solo un instante, se activa la alarma y no se detiene hasta que la temperatura disminuya más allá de la temperatura mínima definida para el termostato (25 °C).



**Figura 6.47** Cuando la temperatura supera el límite máximo se activa la alarma, hasta que esta vuelve a descender más allá del límite inferior. En la imagen se observa cómo se ha activado la alarma, pues por un momento la temperatura sobrepasó los 30 °C, y a pesar de estar ya en 28 °C, la alarma no se desactiva hasta bajar a menos de 25 °C.



**Figura 6.48** La alarma se desactiva hasta el momento que la temperatura es menor que el límite inferior del termostato.

## 6.8 Medidor de temperatura a distancia (pirómetro)

De manera habitual, cuando se desea conocer la temperatura de un cuerpo se emplean instrumentos de medición como los termómetros, los sensores de temperatura resistivos, los termistores o los termocuplas, pero a medida que la temperatura aumenta es más complicado medirla por estos métodos, ya que es necesario el contacto físico, y el material del sensor debe soportar la oxidación que se presenta a altas temperaturas. Debido a esta causa es que surgen los pirómetros como instrumentos que permiten medir dichas temperaturas sin contacto físico con el objeto. Este proceso se logra gracias a que la materia sometida a cambios de temperatura irradia niveles de energía que están en función de dichos cambios. Se sabe que toda materia emite radiación térmica cuando es sometida a una temperatura superior a los 0 K. Gracias a esto, el rango de operación de un pirómetro oscila desde los -50 °C hasta los 4000 °C.

En general, los pirómetros se clasifican de acuerdo con el mecanismo utilizado para dicha lectura. En esta clasificación se encuentran los pirómetros ópticos y los de radiación.

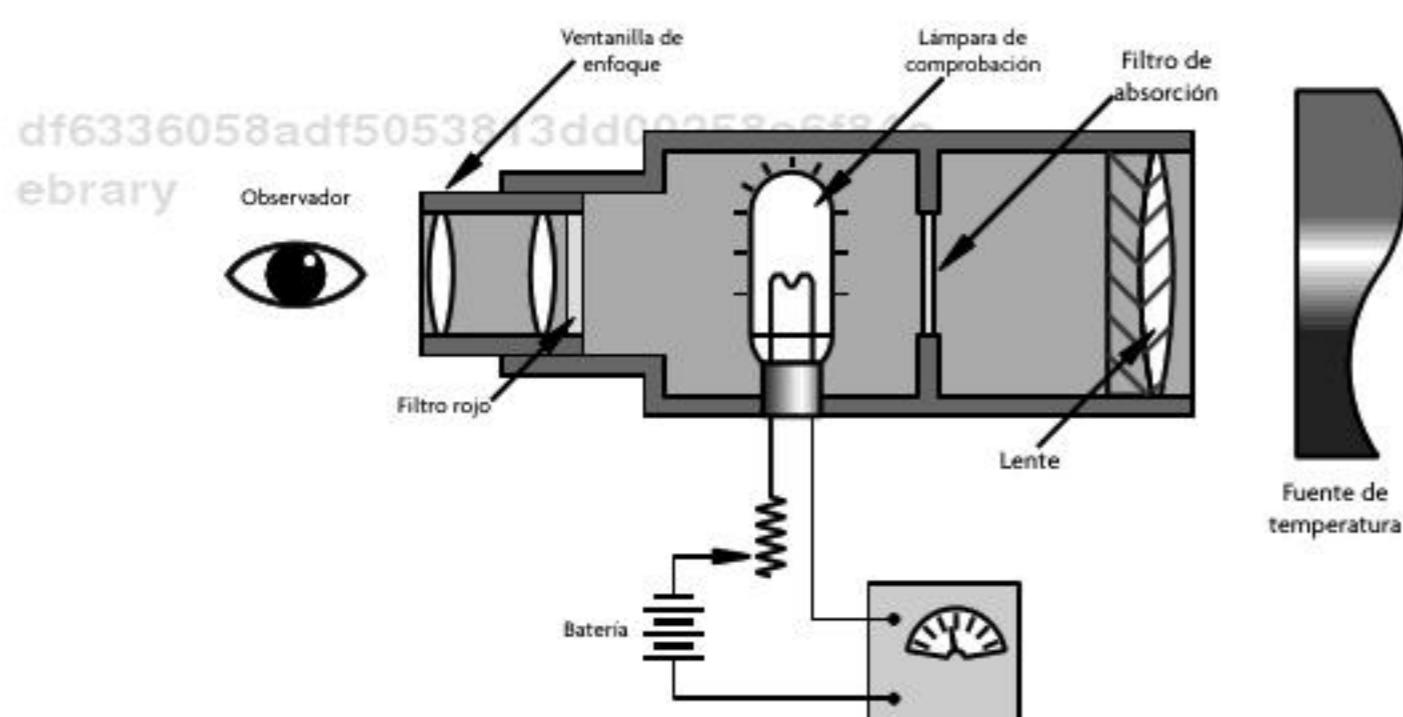
### Pirómetros ópticos

Los pirómetros ópticos se apoyan en sistemas de visión para detectar variaciones del ancho de banda de la radiación que es emitida por algún objeto sólido bajo la acción de la temperatura, ya que a partir del color de la incandescencia, que va desde un rojo oscuro hasta llegar a un blanco, pasando por un amarillo, corresponderá el nivel de temperatura presente; es decir, para determinado color de incandescencia corresponde una temperatura asociada. El rango de temperatura que genera la radiación del objeto de tal manera que pueda producir un color incandescente y que este a su vez sea detectado por el pirómetro será aproximadamente a partir de los 700 °C hasta los 1 300 grados Celsius.

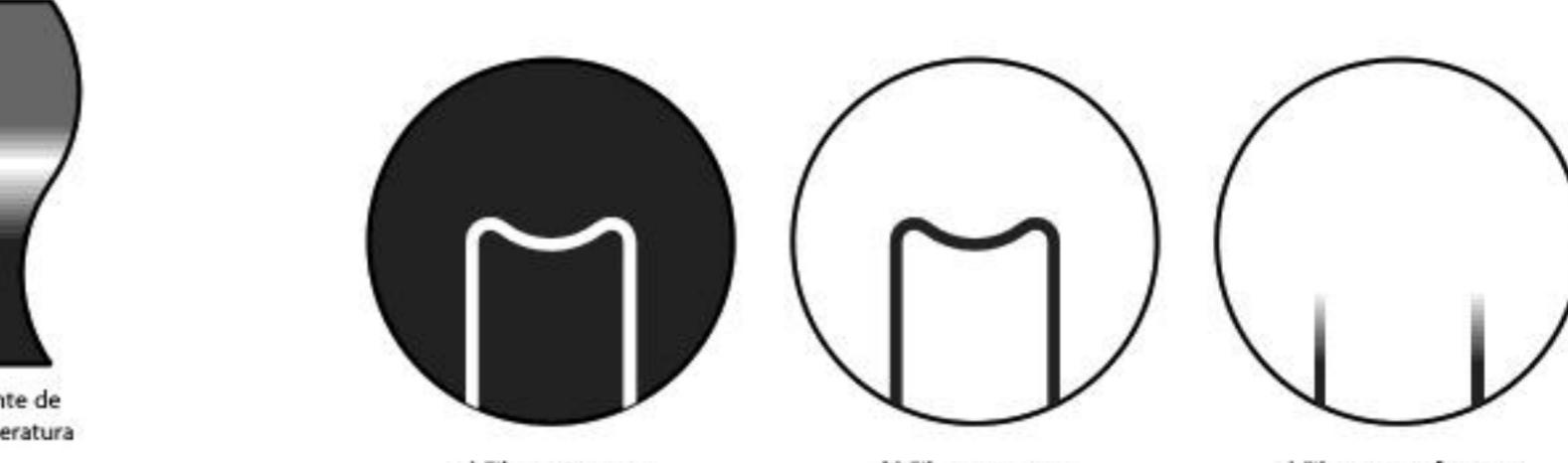
Para su operación, este tipo de pirómetro se basa en un método simple de comparación entre la radiación de un filamento de referencia (lámpara eléctrica) contra la radiación de la fuente de calor a medir; la radiación (colores) del filamento está calibrada dentro de un rango de temperaturas conocidas (véase figura 6.50).

Como se muestra en la figura 6.49, el pirómetro manual es direccionado al objeto que emite la radiación (fuente de temperatura), de tal forma que la lente del pirómetro enfoque la fuente dentro del plano del filamento; el enfoque se ajusta hasta que el filamento y el objeto a medir aparecen en una sola imagen. En estas condiciones, dependiendo de la temperatura del filamento (configurable) y la del objeto, se observa alguna de las imágenes que se muestran en la figura 6.50. Nótese que si el objeto es más frío que el filamento se observa la imagen del inciso a); en este caso, se debe ajustar el reóstato del pirómetro para reducir la temperatura del filamento, de tal manera que alcance y se observe la imagen del inciso c). Por el contrario, si la imagen que se observa corresponde al inciso b), el ajuste es entonces para elevar dicha temperatura.

En la actualidad, además del pirómetro óptico manual se pueden encontrar los pirómetros automáticos autoajustables, en los cuales un mecanismo modula la radiación del cuerpo y la de una fuente de luz (filamento estándar). Este sistema, al detectar alguna diferencia en dichas radiaciones, envía una señal que hace modificar la corriente de la lámpara hasta que ambas radiaciones coinciden. Por lógica, esta intensidad de corriente es función de la temperatura del filamento.



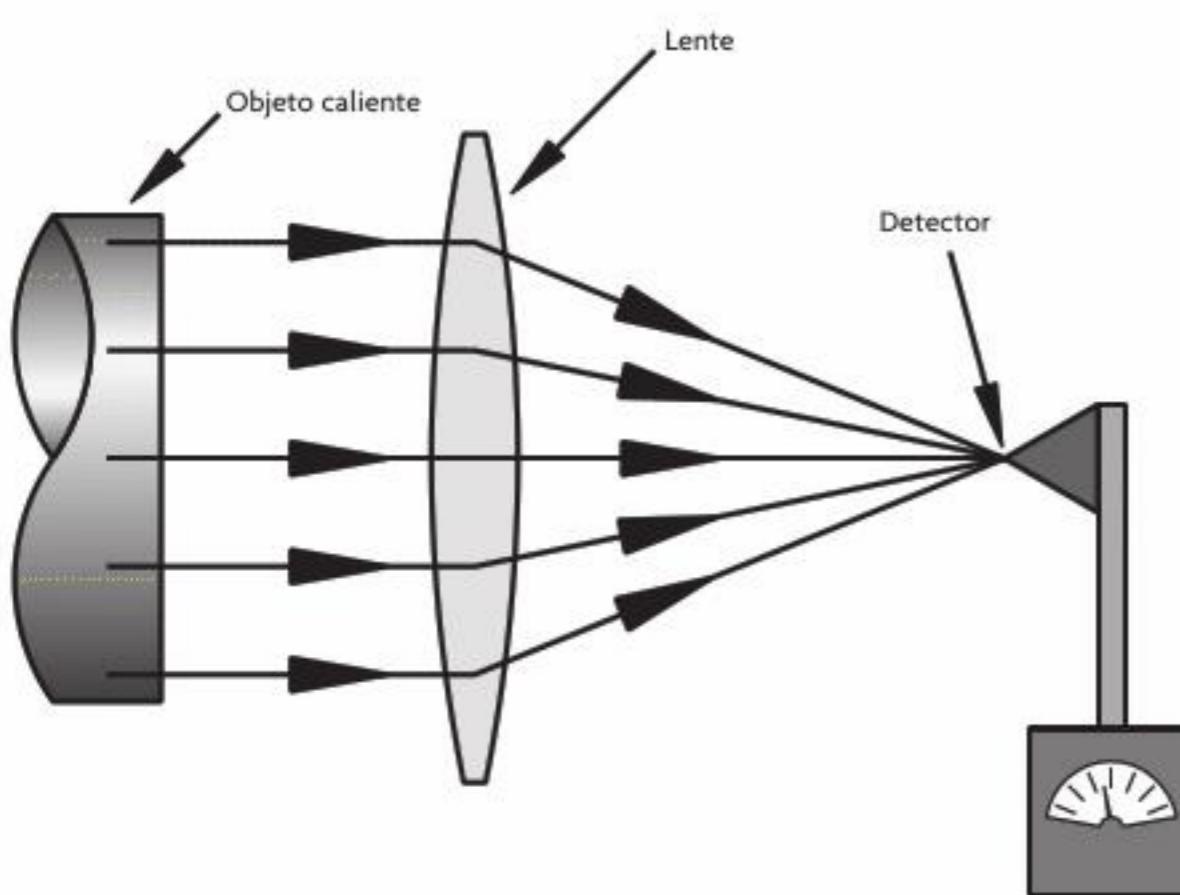
**Figura 6.49** Funcionamiento del pirómetro manual.



**Figura 6.50** Configuración del filamento según la temperatura.

### Pirómetros de radiación

La característica principal del funcionamiento de los pirómetros de radiación es que tienen la capacidad de captar la mayor parte de la radiación emitida por el cuerpo, con lo cual se consigue una métrica con menor error y un rango amplio de trabajo, cuyas temperaturas, en general, oscilan entre 550 °C y 1 600 °C. Este tipo de pirómetro se basa en la **ley de Stefan–Boltzmann: la intensidad de la energía emitida por la superficie de un cuerpo negro aumenta de manera proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo**.



**Figura 6.51** Funcionamiento del pirómetro de radiación.

Esta potencia emitida o flujo radiante puede representarse mediante la ecuación 6.10:

$$\phi_R = \sigma_{S-B} \times T_e^4 \quad (6.10)$$

donde:

$T_e$ : temperatura absoluta de la superficie (Kelvin)

$\sigma_{S-B}$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$\phi_R$ : flujo radiante por unidad de área

Por lo general, los pirómetros de radiación están constituidos por una lente de fluoruro de calcio que concentra la radiación del objeto sometido a temperatura hacia una "termopila", la cual está formada por un conjunto de termopares conectados uno tras otro (en serie). La lente se calibra y la radiación se enfoca para incidir en las uniones "calientes", con lo que se expanden las propiedades de absorción de energía de los termopares. La parte que está expuesta a la radiación se fabrica en color negro, lo que proporciona la máxima fuerza electromotriz (véase figura 6.51).

## Ejercicio de aplicación

### Detectar radiación calórica humana con un sensor piroeléctrico

#### Objetivo

Construir un sistema de seguridad que indique una alerta cuando se detecte movimiento de personas a través de un sensor piroeléctrico empleando el Arduino Uno®.

#### Material

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

- Arduino Uno®
- Sensor PIR
- Amplificador operacional LM358
- 1 potenciómetro de 10 kΩ
- 1 resistencia de 1 MΩ, 1 de 470 Ω y 1 de 150 Ω
- Optoacoplador MOC3011
- TRIAC 2N6073AG
- Lámpara incandescente de 100 W
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del sensor PIR

El sensor piroeléctrico (PIR) mide la radiación infrarroja. Una de sus ventajas es que puede configurarse al sensor para

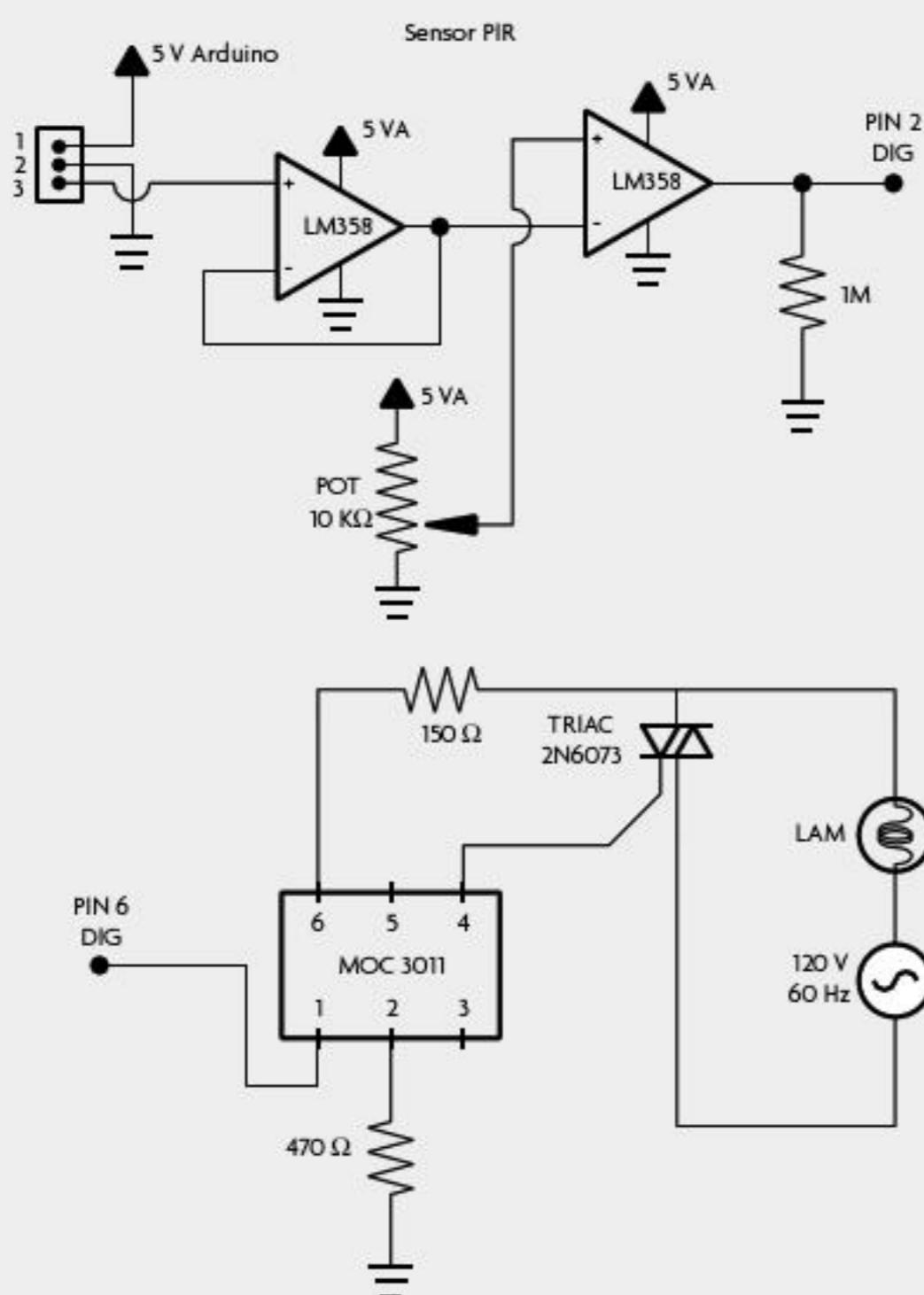
detectar únicamente en un rango específico de radiación infrarroja; en general, para sistemas de seguridad este rango comprende la IR del cuerpo humano.

La descripción de los pines del sensor es la siguiente:

- **VCC.** Voltaje de alimentación de 5 V.
- **GND.** Voltaje de referencia (tierra).
- **OUT.** Señal de salida. En estado de reposo el voltaje de salida es de 2 V. Cuando se detecta movimiento humano, el voltaje de salida es de 3 V y el pulso tiene una duración de 4 a 8 segundos.



**Figura 6.52** Sensor PIR.



**Figura 6.53** Diagrama del circuito de detector de movimiento.

### Construcción del circuito

#### Sensor PIR

La salida del sensor PIR se conecta a un seguidor de línea para acoplar las impedancias y evitar alteraciones en la lectura del sensor. Después, la señal se conecta a un comparador, donde el voltaje de referencia es definida por el divisor. De esta forma, se pasa de los niveles lógicos del sensor PIR de 2 V para estado bajo y 3 V para estado alto a 0 V y 5 V, respectivamente, para Arduino®.

A la salida del comparador se conecta una resistencia en pull-down, para definir bien los estados. Esta señal se conecta al pin digital 2 del Arduino®.

#### Switch de la lámpara incandescente

Para controlar el encendido/apagado de la lámpara de AC, a través del Arduino®, se envía una señal digital ('0' o '1') al optoacoplador MOC3011. Si la señal corresponde a un '1' lógico, el DIAC interno del circuito cierra el circuito, habilitando la compuerta del TRIAC 2N6073, con lo que puede fluir la corriente a lo largo del circuito y encender la lámpara. Pero, si la señal es un '0' lógico, el DIAC del optoacoplador abre el circuito, cerrando la compuerta del TRIAC, con lo que se apaga la lámpara. El pin digital 6 provee esta señal.

#### Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

Pregunta con frecuencia por el estado de la señal del sensor piroeléctrico. Si es alto, enciende por 10 segundos y activa la señal que enciende la lámpara incandescente. Si es estado bajo, entonces se mantiene apagada.

```
*****Sensor piroelectrico*****
**El sensor piroelectrico mide la radiacion
infrarroja del medio local.
**Puede configurarse para unicamente
detectar un rango IR
**y utilizarse en dispositivos de seguridad.
**En el siguiente programa se lee la señal
del sensor piroelectrico,
**si detecta movimiento enciende una lampara
por 10 s (alarma).
//PIN DIG 6 -> Señal que activa la lampara
#define lampara 6
//PIN DIG 2 -> Señal del sensor piroelectrico
#define input 2
voidsetup()
{
    pinMode(input, INPUT);      //PIN de entrada de
    //la señal del PIR
    pinMode(lampara, OUTPUT); //PIN de salida para
    //activar/desactivar una
    //lampara
}

voidloop()
{
    digitalWrite(lampara, LOW); //Mientras el
    //sensor
    no detecte movimiento o
    //presencia la lampara
    //esta apagada
    if (digitalRead(input) == HIGH) //Si el PIR
    detecta algo, se llama a
        //la funcion movement()
    movement();
}

voidmovement() //Esta funcion enciende la
//lampara por 10 segundos
{
    digitalWrite(lampara, HIGH);
    delay(10000);
}
```

#### Comprobar el funcionamiento

Si el sensor detecta movimiento humano, enciende una lámpara incandescente durante 10 segundos. El sensor está configurado para medir la IR del cuerpo humano y no detecta el movimiento de otros cuerpos (a menos que su radiación IR sea similar).

## 6.9 Sensores de humedad

### Conceptos y descripción

La humedad está relacionada con las moléculas de agua que pueden encontrarse en alguna sustancia; por tanto, su magnitud está directamente asociada con el número de moléculas de agua absorbidas en dicha sustancia. Esta capacidad de absorción que tienen algunos materiales, sustancias u organismos puede alterar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, de ahí la importancia de los sensores de humedad.

Existen varias maneras de expresar la humedad; por ejemplo, en la atmósfera la humedad se refiere a la presencia de moléculas de agua o vapor en el aire; en general, esta se expresa como humedad relativa, específica y absoluta.

### Humedad absoluta

La humedad absoluta representa la relación entre la cantidad de moléculas de agua presentes en una sustancia y el volumen de esta; por ejemplo, para un volumen de aire determinado representa el total del vapor de agua que está contenido en ese volumen, por lo común expresado en kg/m<sup>3</sup>. De acuerdo con lo expuesto en el capítulo de sensores de temperatura, los cambios en la temperatura afectan de manera directa la densidad de una sustancia, y esta a su vez a la humedad. Para el caso específico del aire, una baja temperatura ocasionará la condensación del vapor de agua; sin embargo, para rangos cada vez mayores podrá contener más moléculas de agua en la misma unidad de volumen; es decir, resultará en una mayor humedad absoluta.

### Humedad relativa

En las mismas condiciones de temperatura y presión, la humedad relativa ( $H_r$ ) representa la relación entre la cantidad actual de agua que contiene un gas y la cantidad que el gas tendría en estado de saturación sin que se produzca condensación. Esta humedad se expresa en porcentaje. Es claro que cuando la humedad real (actual) es igual a la máxima posible, la humedad relativa toma el valor de 100 por ciento. Por ejemplo, si una masa de aire contiene la mitad del vapor de agua que puede contener, entonces su humedad relativa equivale a 50 por ciento.

En forma analítica, esto se puede expresar como la relación entre la presión de vapor actual ( $P_v$ ) y la máxima presión que un gas puede soportar a una temperatura y presión atmosférica a partir de la cual el vapor se comienza a condensar (presión de vapor de saturación,  $P_{sat}$ ). Como lo indica la ecuación 6.11, estas presiones suelen medirse en Pascal:

$$H_r = \frac{P_v}{P_{sat}} \times 100 [\%] \quad (6.11)$$

De acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés), una definición más técnica de la  $H_r$  es la relación de la fracción mol del vapor de agua presente en el aire, con la fracción mol del vapor de agua presente en el aire saturado, a la misma temperatura y presión.

### Humedad específica

A la humedad específica también se le conoce como el contenido de humedad. Es la relación entre la masa de agua y la masa de sustancia seca; concretamente, para el aire es el peso del vapor de agua en kilogramos por kilogramo de aire seco. Se refiere a la cantidad de moléculas de agua en peso requeridas para saturar un kilogramo de aire seco, considerando el punto de rocío; es decir, una temperatura de saturación especificada.

## Punto de rocío

A la temperatura menor, al punto en el cual el vapor de agua inicia el estado de condensación, se le conoce como punto de rocío; es decir, es la temperatura de saturación para la combinación del vapor de agua y aire. En este punto de temperatura existe 100% de humedad. En la tabla 6.7 se muestran los puntos de rocío para varios porcentajes de humedad relativa. Cuando la temperatura del punto de rocío está por debajo de los 0 °C, se le conoce como punto de escarcha (*frostpoint*).

## 6.10 Otros sensores y principios de funcionamiento

### Sensor por deformación

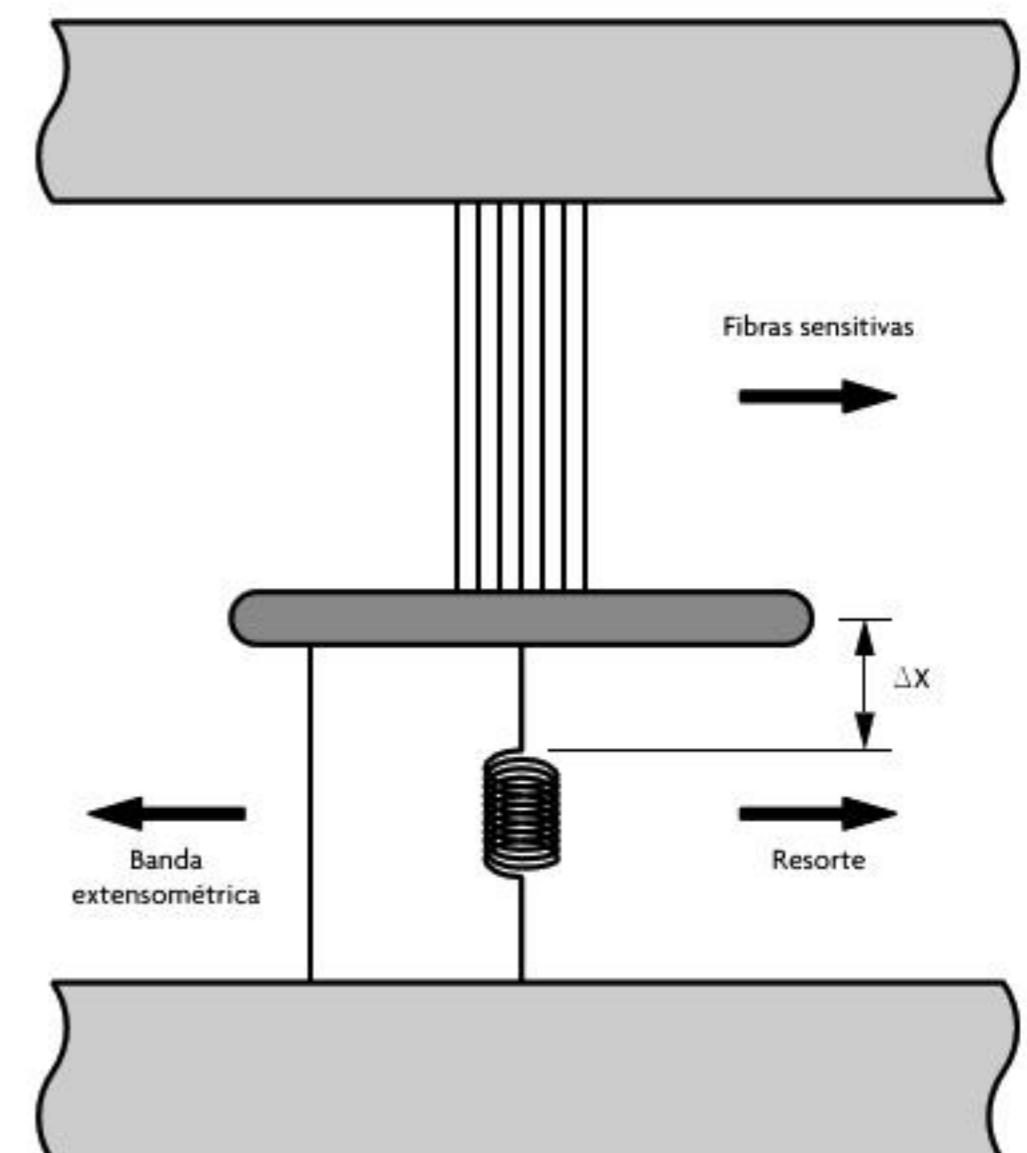
Este tipo de sensor se fundamenta en los cambios que experimentan las propiedades físicas de algunos materiales por el efecto de la humedad; por ejemplo, cuando se modifica la cantidad de moléculas de agua en la celulosa se observa una variación de sus dimensiones volumétricas. En la actualidad se fabrican fibras sintéticas especialmente diseñadas para ser utilizadas en sensores y cuya longitud se ve alterada con base en la cantidad de agua absorbida por estas. En aplicaciones típicas de medición de humedad, el sensor es compacto; debido a esto, el material sensitivo que usa es de dimensiones pequeñas, lo cual ocasiona que se tenga que amplificar la deformación que experimenta, ya sea en forma mecánica o electrónica (véase figura 6.54).

La medición de la humedad se reduce a cuantificar el cambio en las dimensiones de las fibras sensoriales; esta variación está representada por  $\Delta X$  en la figura 6.54. Un filamento metálico o semiconductor con propiedades tales que puede cambiar su resistencia eléctrica cuando es afectado por una fuerza que lo deforma de manera longitudinal se ubica entre las partes móviles del sensor, así que cuando existe una variación en la humedad se refleja en un cambio de  $\Delta X$ ; a su vez, el filamento resistivo modifica su resistencia. Cabe resaltar que esta variación puede ser convertida a voltaje a través de un puente de Wheatstone. Por último, esta variación en el voltaje de salida corresponde en forma directa a la cantidad de humedad que contiene el material. Lo anterior puede representarse en forma esquemática (véase el diagrama de flujo de la figura 6.55).

Humedad relativa del aire %	Temperatura del aire	
	21 °C	27 °C
100	21	27
90	19	25
80	18	23
70	15	20
60	13	18
50	10	15
40	7	3
30	3	8

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

**Tabla 6.7** Temperaturas de punto de rocío



**Figura 6.54** Funcionamiento del sensor por deformación.



**Figura 6.55** Diagrama de las variables que intervienen en una medición.

El sensor mecánico es de fácil aplicación. Se usa en rangos de operación de 10% a 95%, a una temperatura de entre –10 °C a 70 °C, con un error de medición de cerca de 3 por ciento.

## Bulbos húmedos y secos

Es otro método que se utiliza para cuantificar la cantidad de moléculas de vapor de agua contenidas en el aire (psicrómetro). Se fundamenta en la utilización de dos bulbos (uno conocido como bulbo seco y el otro como bulbo húmedo) para la medición de temperatura, y que a partir de esta lectura se infiera la cantidad de moléculas de agua que están presentes en el aire. La temperatura de bulbo seco se refiere a medir la temperatura presente en el medio ambiente, quizás a través de un termómetro de mercurio o alcohol, donde el bulbo del termómetro o la parte sensitiva de este está en contacto directo con el aire.

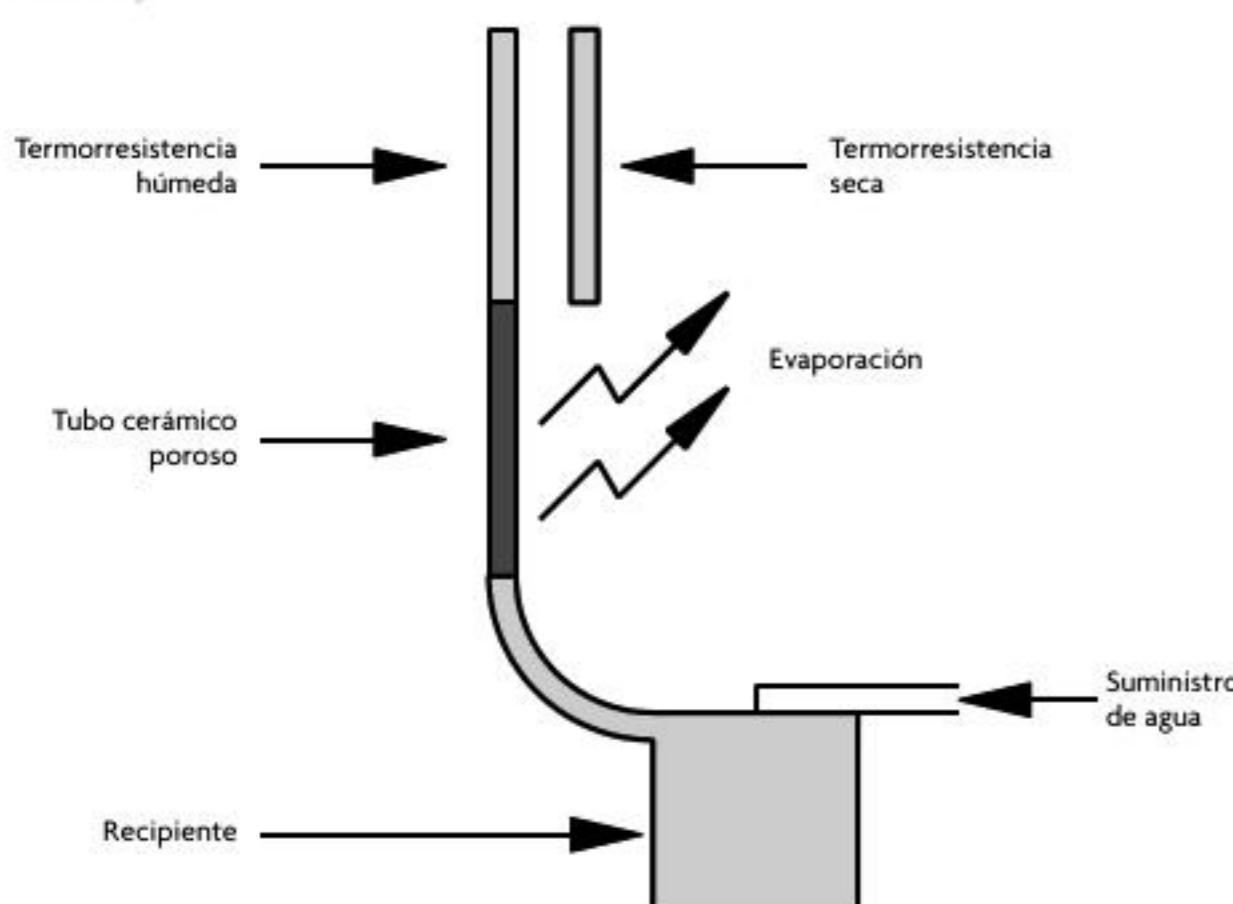
Por otro lado, la temperatura de bulbo húmedo se refiere a medir la temperatura, pero sobre la superficie de una película de agua. Un termómetro de bulbo húmedo puede ser un termómetro ordinario con el bulbo cubierto por una tela húmeda, conocida como mecha. La evaporación de las moléculas de agua disminuye la temperatura registrada por el termómetro; en general, a esta temperatura se le conoce como de bulbo húmedo. En la actualidad, para muchas aplicaciones, se utilizan mechadas que no envuelven bulbos de termómetros convencionales sino termorresistencias de platino que están en contacto con las moléculas de agua y que gracias a la capilaridad de los materiales se mantienen húmedas.

Considérese que el aire tiene una humedad relativa de 100%, entonces sería lógico pensar que las lecturas de ambos termómetros (húmedo y seco) serían las mismas; sin embargo, en la práctica es difícil mantener una humedad del ambiente a 100%; es decir, en el aire existen partes secas, por lo que un porcentaje pequeño de humedad de la mecha se evapora hacia el ambiente, lo que ocasiona que el bulbo se enfrie y registre una lectura de temperatura más baja que la del bulbo seco. Así que la temperatura del bulbo húmedo varía de acuerdo con la humedad del ambiente; es decir, en función de qué tan seco se encuentre el aire. En la figura 6.56 se muestra un esquema que relaciona las variables involucradas en una medición de bulbo húmedo y seco.



**Figura 6.56** Relación de las variables que intervienen en una medición.

En la figura 6.57 se puede observar un esquema de las partes de un sensor de bulbo húmedo y seco.



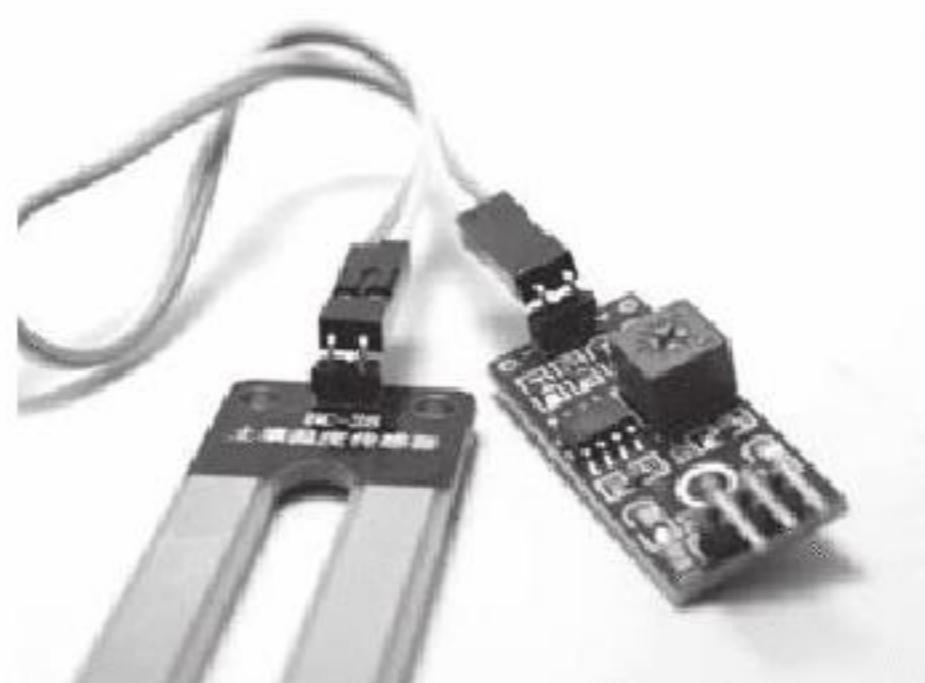
### Sensor de humedad de contacto (FC-28)

El sensor de humedad FC-28 (véase figura 6.58) es un sensor de contacto. Este sensor cuenta con dos electrodos, los cuales permiten determinar la cantidad de humedad presente en la sustancia (mezclas sólidas) por contacto. Al principio, el circuito se encuentra abierto, pues ambos electrodos no se conectan entre sí, pero al insertarlos dentro de la sustancia, esta funciona como una resistencia que los une eléctricamente, por lo que el circuito se cierra. La corriente que circula a través de los electrodos depende de la humedad de la sustancia; por tanto, a mayor humedad el medio se vuelve más conductor y genera un mayor flujo de corriente.

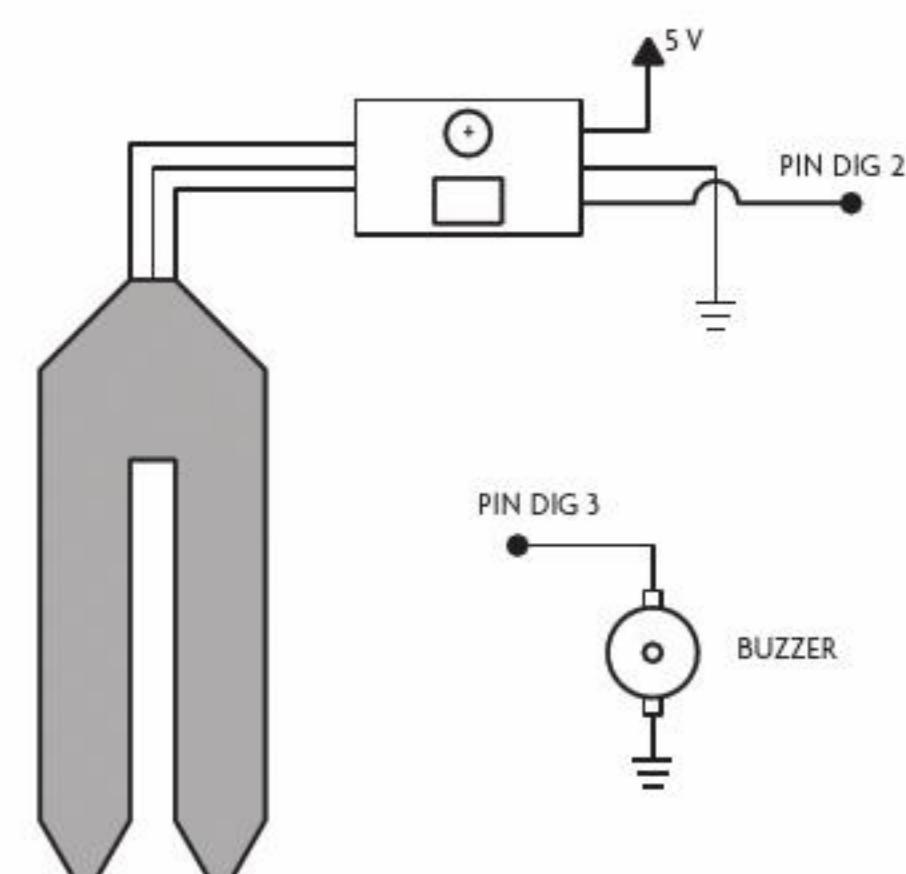
Este dispositivo cuenta con un potenciómetro para calibrar el nivel de humedad de referencia. Es decir, el estado de su salida digital es bajo cuando la humedad ajustada corresponde a la humedad detectada, y alto en caso contrario.

**Figura 6.57** Sensor de bulbo húmedo y seco.

En la figura 6.59 se muestra el diagrama habitual de conexión del sensor con la placa Arduino®. Como se puede observar, el sensor se alimenta con 5 V y su salida digital se conecta a la terminal 2 del Arduino®; de manera adicional, en la terminal 3 se conecta una alarma para indicar en forma auditiva cuando la humedad de la tierra está por debajo del límite.



**Figura 6.58** Sensor de humedad de suelo FC-28.



**Figura 6.59** Diagrama de conexión del sensor de humedad FC-28.

### Sensor de humedad y temperatura HIH6130

El sensor HIH6130 (véase figura 6.60) es un sensor digital de temperatura y de humedad relativa, con un rango de trabajo entre 5 °C a 50 °C y 10% a 90%, respectivamente. Este sensor tiene la cualidad de poder configurar dos límites de humedad, los cuales son identificados como **AL\_L** y **AL\_H**, para un valor mínimo y un valor máximo de referencia, respectivamente; la resolución de la lectura es de 14 bits y trabaja con el protocolo de comunicación I2C.

#### Descripción de las terminales del sensor

**SDA.** Línea de datos para el protocolo de comunicación I2C.

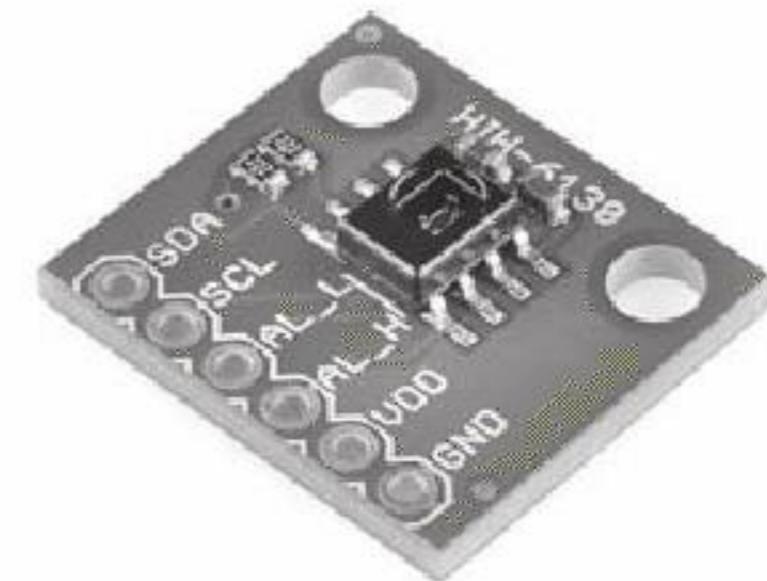
**SCL.** Línea del reloj para el protocolo de comunicación I2C.

**AL\_L.** Alerta límite inferior. Esta se activa cuando la humedad relativa es menor al límite inferior. Puede configurarse como Full Push-Pull o como drenaje abierto.

**AL\_H.** Alerta límite superior. Esta se activa cuando la humedad relativa es superior al límite superior. Puede configurarse como Full Push-Pull o como drenaje abierto.

**VDD.** Voltaje de alimentación de 5 V.

**GND.** Voltaje de referencia (tierra).



**Figura 6.60** Sensor de humedad relativa y temperatura HIH6130.

## Ejercicio de aplicación

### Sensor de humedad de contacto FC-28

#### Objetivo

Medir la humedad de la tierra con el sensor de humedad de suelo utilizando el Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor de humedad de suelo FC-28
- Buzzer
- 1 resistencia de 10 kΩ
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

### Desarrollo

#### Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

Este verifica, en forma constante, el estado de la humedad de la planta; si está por debajo de la establecida, el buzzer emite una alarma y aparece un mensaje en el monitor serie que indica que la tierra requiere agua.

```
*****Sensor de humedad de contacto*****
/*
**El sensor de humedad de contacto se emplea
para medir la humedad en*
/**la tierra.
/**Este utiliza la conductividad de la tierra
que varia segun su
/**humedad.
/**En el siguiente programa se lee la señal
digital del sensor de
```

```

    /*humedad. Si esta en alta implica que se
     requiere regar la planta, si
     es baja la humedad de la
     tierra es adecuada. Puede variarse la
     sensibilidad del sensor con el
     potenciómetro.
    ****
    //PIN DIG 2 señal de entrada del sensor de
    humedad
    //PIN DIG 3 alarma del circuito
#define signal 2
#define buzzer 3

voidsetup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
    comunicación serie a 9600 baudios
    pinMode(signal, INPUT); //Se declara como
    entrada el PIN <signal>
    pinMode(buzzer, OUTPUT); //Se declara como
    entrada el PIN <buzzer>
}

voidloop()
{
    if(digitalRead(signal) == HIGH)//Si la señal
    digital del sensor es
    //Alta significa que debe regarse la planta
    pues la humedad no es la
    //deseada.
    {
        Serial.println("Riegue la planta!!!"); //Se
        emite la alerta en el
        //monitor serie y en el buzzer.
        digitalWrite(buzzer, HIGH);
    }
    //Si la señal digital es <Baja> la humedad en
    la tierra es adecuada.
    else
        digitalWrite(buzzer, LOW); //Se mantiene
        apagada la alerta
}

```

### Comprobar el funcionamiento

Si la humedad de la tierra es la correcta, el sensor indica dicho estado al iluminarse el LED verde (véase figura 6.61).



**Figura 6.61** Humedad de la planta correcta (no existe alerta).

Por el contrario, si la humedad disminuye por debajo del límite, el LED verde se apaga y el buzzer emite un sonido; además, por el monitor serie se envía una alerta (véase figura 6.62).



**Figura 6.62** Humedad menor al límite, entonces se emite alerta por el monitor serie y el buzzer.

## Ejercicio de aplicación

### Sensor de humedad relativa y temperatura HIH6130

#### Objetivo

Medir la humedad relativa y la temperatura del ambiente a través del sensor HIH630 empleando el Arduino Uno®.

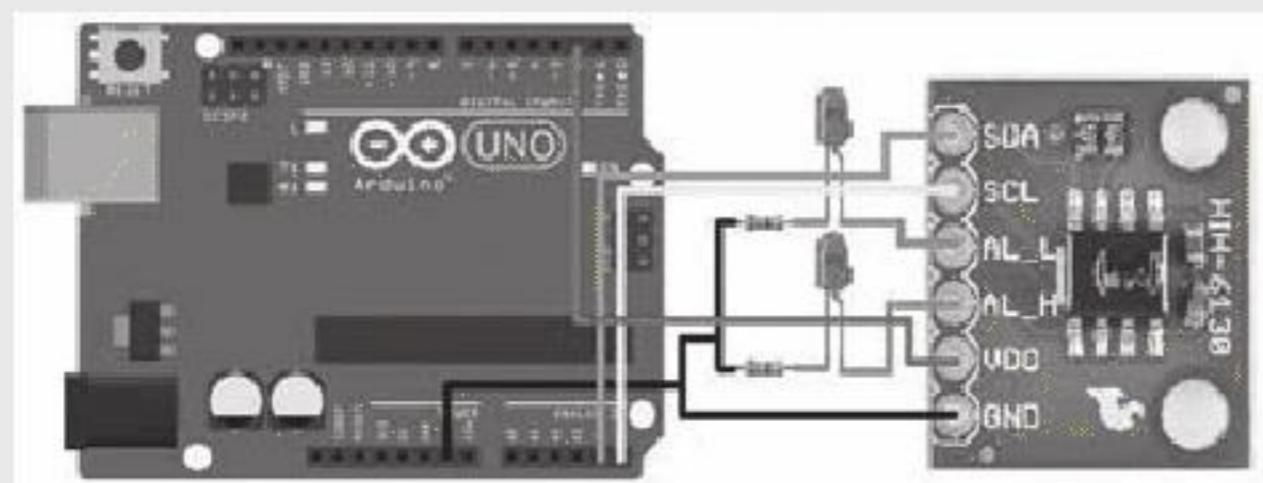
#### Material

- Arduino Uno®

- Sensor HIH6130
- 2 resistencias de 330 Ω
- 2 LED
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

## Desarrollo

### Construcción del circuito



**Figura 6.63** Diagrama de conexión del sensor HIH6130 y el Arduino Uno®.

En la figura 6.63, las terminales SDA Y SCL del sensor se conectan a los pines analógicos AN4 y AN5 del Arduino Uno®, respectivamente. Estos son los pines definidos por la librería Wire.h para la comunicación I2C.

La alimentación del sensor está controlada por el PIN digital 2 del Arduino®, esto con el fin de configurar las alertas del sensor y realizar las lecturas de humedad relativa y temperatura.

Además, dos LED se conectan a las terminales AL\_L y AL\_H (con sus respectivas resistencias limitadoras) que indican de manera visual las alertas.

### Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

#### Configurar los límites para la alarma de humedad superior e inferior del sensor

Para esto es necesario entrar en el modo comando del sensor escribiendo 0XA0 dentro de los primeros 10 ms después de encendido el sensor. Este tiempo puede ajustarse en el modo comando a 3 ms. Para cada alerta se necesitan dos valores, uno que indique a partir de qué valor se activa la alarma y otro que la apague (histéresis). El nombre de estos registros es AL\_H\_ON y AL\_H\_OFF para la alarma superior y AL\_L\_ON y AL\_L\_OFF para la alarma inferior. Por último, el sensor se apaga finalizando con el modo comando (para cambiar de modo es necesario apagar y encender el sensor).

#### Lectura de la temperatura y humedad relativa

Para realizar una lectura debe cumplirse el siguiente ciclo:

- Encender el sensor y esperar más de 10 ms (o 3 ms) para iniciar en el modo de lectura.
- Se leen los 4 bytes del sensor. En los 2 bits MSB del primer byte se indica el estado de la lectura. Si este es satisfactorio (00), se considera la información de los bits restantes. En caso contrario, estos se ignoran.
- Se realiza la conversión de los 14 bits de la humedad y los 14 de la temperatura.
- Se apaga el sensor finalizando el ciclo.

### Se imprimen los resultados en el monitor serie

Una vez configuradas, las alertas ocurren de forma independiente al Arduino®.

```
****Sensor de humedad relativa y temperatura****
/*El HIH6130 es un sensor de temperatura y
humedad relativa en el rango
*compensado de 5 °C a 50 °C y 10%-90%,
respectivamente. Se comunica con*
/*otros dispositivos mediante el protocolo
I2C. El sensor provee
/*alarmas para notificar si la humedad
relativa sobrepasa ciertos
/*limites(inferior y superior).
/*
/*En el siguiente programa se realiza la
lectura de la temperatura y
/*humedad relativa del medio local. Asimismo,
se activan las alertas de
/*humedad estableciendo los límites
superiores e inferiores.
*****
#include <Wire.h>/Libreria para la
comunicacion I2C
//SCL -> PIN A5; SDA -> PIN A4

#define ADDR      0x27 //Direccion I2C del
sensor HIH6130

//El sensor cuenta con dos alertas: cuando
la humedad relativa supera el //limite AL_H
y es menor que el límite AL_L. Para cada
una de estas
//alarmas se establecen dos valores, uno de
ellos representa la humedad
//en la que se activa la alarma, y el otro
indica cuando se apaga.

//Registros para los valores de la alarma
superior
#define AL_H_ON    0x18
#define AL_H_OFF   0x19
//Registros para los valores de la alarma
inferior
#define AL_L_ON    0x1A
#define AL_L_OFF   0x1B
//Registro de configuracion
#define COM_MODE   0xA0
//La alimentacion esta controlada por el PIN
//DIG 2 del Arduino
#define powerSensor 2

//Se declaran las variables empleadas
unsignedint* readSensor;
unsignedint* l;
unsignedint* regValue;
inthum_bin, tmp_bin;
floathumidity, tmp;
byte check;
```

```

void setup()
{
    Wire.begin(); //Se inicia la
    comunicacion I2C
    Serial.begin(115200); //Se inicia la
    comunicacion serie a 115200 baudios
    pinMode(powerSensor, OUTPUT); //Se declara
    como salida el PIN de
    //alimentacion del Arduino.
    //Configuracion de la alarma
    digitalWrite(powerSensor, HIGH); //Se enciende
    el sensor HIH6130
    //Una vez iniciado, el sensor espera 10 ms
    (configurable a 3 ms) por el
    //comando de configuracion, si no se recibe en
    este tiempo el sensor
    //entra en modo de solo lectura de la
    temperatura y humedad.
    //Se ingresa al modo de configuracion
    command_mode();
    //Se establece la alarma superior en 80. Asi
    cuando la humedad sea
    //mayor a 80% se activa la alarma y esta no se
    apaga hasta que la
    //humedad baje a menos de 75%.
    edit_alarm(AL_H_ON, 80);
    edit_alarm(AL_H_OFF, 75);
    //Se establece la alarma inferior en 30. Asi
    cuando la humedad sea
    //menor a 30% se activa la alarma y esta no se
    apaga hasta que la
    //humedad sube a mas de 35%.
    edit_alarm(AL_L_ON, 30);
    edit_alarm(AL_L_OFF, 35);
    //Se apaga el sensor
    digitalWrite(powerSensor, LOW);
    delay(1000); //Retardo de 1 segundo
    Serial.println("Inicio...");
}

void loop()
{
    //Modo lectura del sensor
    digitalWrite(powerSensor, HIGH); //Se
    enciende el sensor
    delay(50); //Se dejan pasar 50 ms para iniciar
    el modo de lectura de
    //temperatura y humedad
    readSensor = readRegisters(4); //Se leen
    los 4 bytes del sensor
    check = (readSensor[0] & 0xC0) >> 6; //Se
    verifican los 2 bits MSB del
    //primer Byte enviado por el sensor. Estos
    bits indican el estado de la
    //lectura:
    //      00 -> Lectura correcta
    //      01 -> Datos obsoletos. No se ha
    realizado una nueva lectura
    //              se conserva la anterior
}

```

```

//      10 ->CommandMode
//      11 -> Condicion de diagnostico. En
este modo todas las lecturas
//              son ignoradas.
//Si la lectura es correcta
if (check == 0x00)
{
    //Se concatenan los bytes 1 y 2
    correspondientes a la humedad. La
    //resolucion es de 14 bits.
    hum_bin = ((int)(readSensor[0] & 0x3F) << 8)
    | (int)readSensor[1];
    //Se concatenan los bytes 3 y 4
    correspondientes a la temperatura.
    tmp_bin = ((int)readSensor[3] >> 2 | (int)
    readSensor[2] << 6); df6336058adf5053813dd00258e6f84c
    ebrary
    //Conversion a humedad relativa
    //Si 0% = 0 unidades y 100% = 2^(14) -1 =
    16383
    humidity = hum_bin * 0.006103;
    //Conversion a temperatura
    //Si -40 °C = 0 unidades y 125 °C = 2^(14) -1
    = 16383
    tmp = tmp_bin * 0.01007 - 40;
    Serial.print("Humedad: "); //Se imprimen
    los resultados de las
    Serial.print(humidity); //conversiones
    en el monitor serie
    Serial.print("% ");
    Serial.print("Temperatura: ");
    Serial.print(tmp);
    Serial.println(" °C");

    //Se apaga el sensor finalizando el ciclo y
    habilitandose para una
    //nueva lectura
    digitalWrite(powerSensor, LOW);
    delay(1);
}

//Modo de configuracion (Command Mode)
void command_mode (void)
{
    write_command_mode(COM_MODE, 0x00, 0x00); //
    Con el comando A0 en los
    //primeros 10 ms (ajustable a 3 ms) se ingresa
    al modo de configuracion.
}

void edit_alarm(bytereg, intval)
{
    regValue = readRegisters(3); //Para editar la
    alarma, se leen 3 bytes
    //del sensor en CommandMode
    if ((regValue[0] & 0xFF) == 0x81) //Si los dos
    primeros bits del primer
    //byte(bits de STATUS) confirman que se esta
    en el CommandMode (10)
    {
        df6336058adf5053813dd00258e6f84c
        ebrary
}

```

```

    val = val * 163.83;           //Conversion a 14
    bits
    byte MSB = val>> 8;         //8 bits MSB
    byte LSB = val& 0xFF;        //8 bits LSB
    reg = 0x40 | reg;            //Indica el
comando sobre el que se
    //escribe LSB y MSB 0x40 escribe en la
    //dirección de memoria 'reg'.
    //0x00 es para hacer lectura de <reg>.
    write_command_mode(reg, MSB, LSB); //Se
escribe este valor en el
    //sensor
}
else//El sensor se encuentra en otro modo y no
pueden configurarse
    //los registros
    Serial.println("Error");
delay(20);
}

//Lectura de registros
unsignedint* readRegisters (intnumReg)
{
    unsignedint* reg;

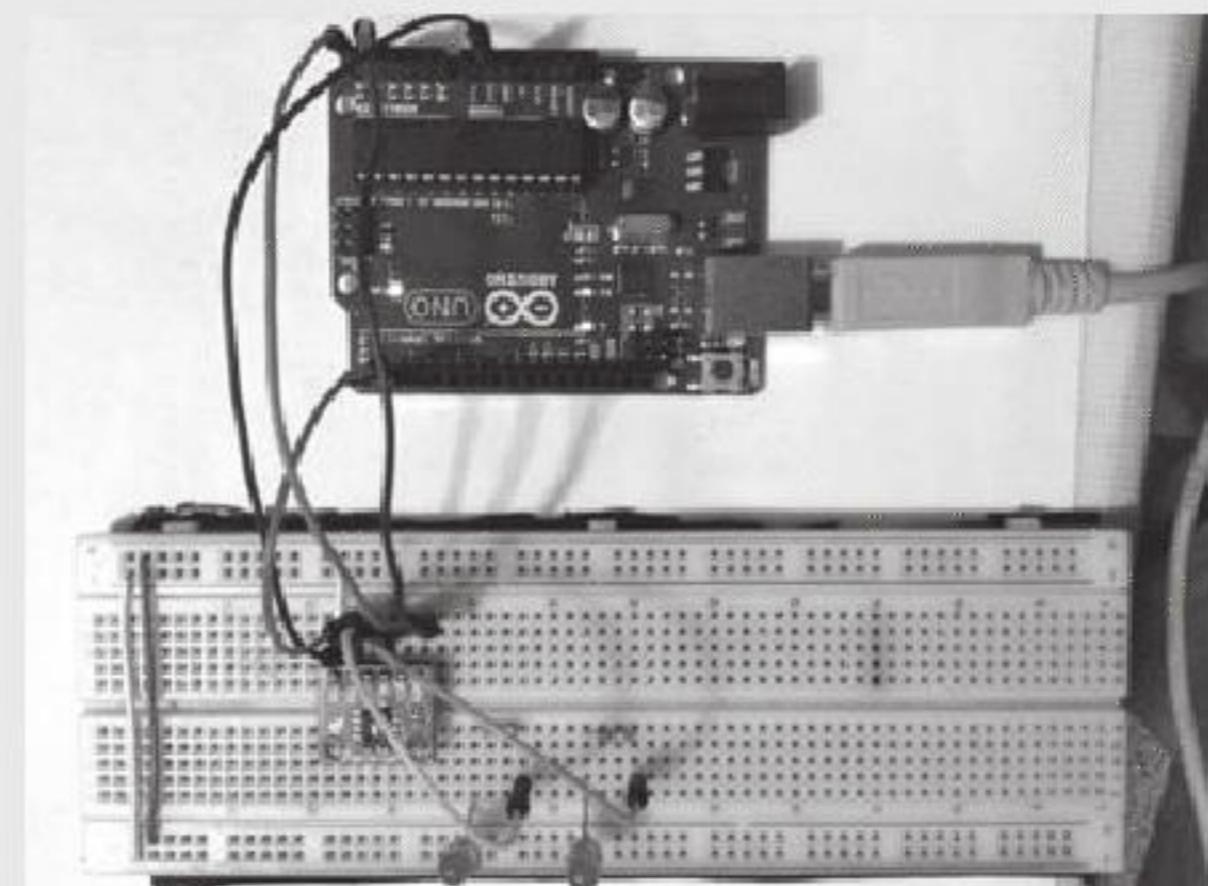
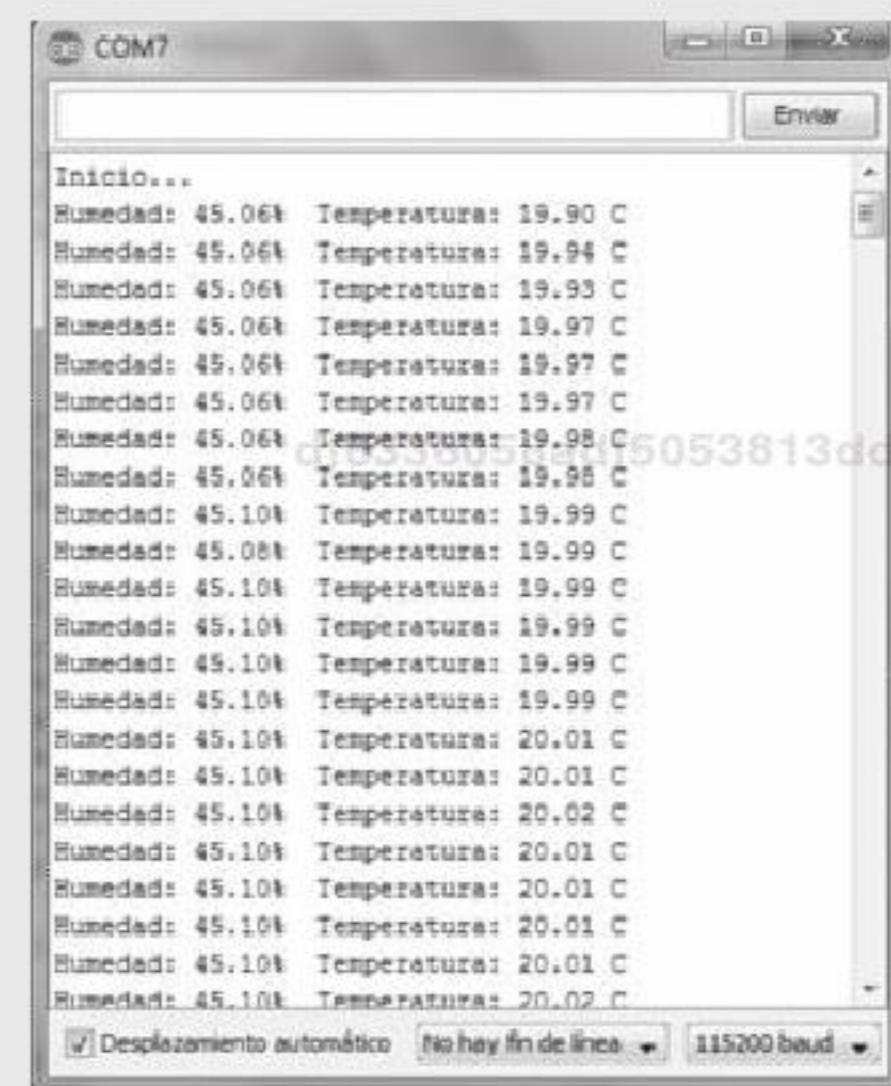
    Wire.requestFrom(ADDR, numReg); //Dirección
    del dispositivo
    for(int i = 0;i < numReg;i++)//Se leen 3 o 4
    bytes dependiendo el modo
        reg[i] = Wire.read();      //del sensor.
    returnreg;
}

//Escritura de comandos en el Command Mode
voidwrite_command_mode (byte command, byte
    data1, byte data0)
{
    Wire.beginTransmission(ADDR); //Se realiza la
    comunicación con el
    //dispositivo de la dirección ADDR
    Wire.write(command);        //Se envía el
    comando o registro a configurar
    Wire.write(data1);          //Se escriben los dos
    bytes que ajustan
    Wire.write(data0);          //al registro
    'command'
    Wire.endTransmission();
}

```

### Comprobar el funcionamiento

El sensor HIH6130 toma una lectura de 45% de humedad relativa y una temperatura de 20 °C. En este caso, no se emite ninguna alerta, pues no se cumplen las condiciones para cualquiera de los dos límites (véase figura 6.64).



**Figura 6.64** El sensor HIH6130 toma una lectura de 45% de humedad relativa.

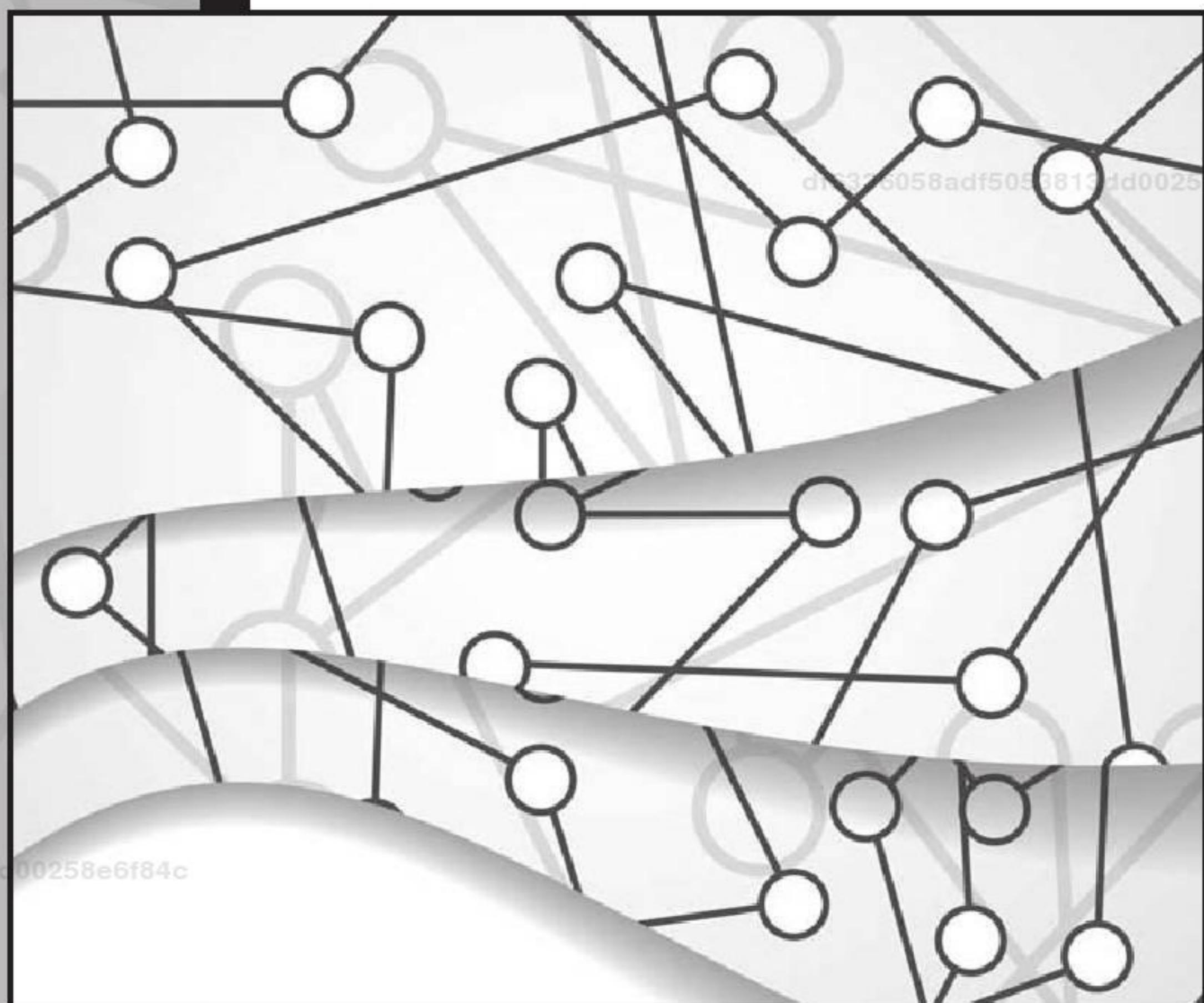




df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# 71

## Sensores de fuerza, torque y deformación



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

#### Objetivo general

Para la lectura de este capítulo se requiere tener conocimientos previos de los principios de transducción, piezoelectrinos y piezorresistivos, así como de los conceptos básicos de análisis de esfuerzos y deformaciones.

#### Objetivos particulares

Este capítulo está enfocado a comprender el principio de funcionamiento de sensores de fuerza, torque y deformación, así como sus principales aplicaciones, además de desarrollar aplicaciones prácticas con este tipo de sensores.

- ▶ Distinguir entre los sensores que usan el principio de transducción piezorresistivo de los sensores que usan el principio de transducción piezoelectrónico.
- ▶ Identificar las diferentes formas de medir esfuerzo y deformación con el uso de estos sensores.
- ▶ Implementar ejemplos sencillos de mediciones con sensores piezoelectrinos y piezorresistivos para medir deformaciones, fuerzas y vibraciones.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## Introducción

En este capítulo se trata con detalle el tema de los sensores para la medición de fuerza, par y deformación, de los cuales se exponen los principios de funcionamiento y configuraciones básicas. A pesar de que es posible diseñar sensores para medir fuerzas o deformaciones basados en los fenómenos piroeléctrico, capacitivo, óptico, ultrasónico o magnético, aquí nos limitamos a presentar los sensores de mayor aplicación comercial, aquellos basados en fenómenos piezoresistivos y piezoeléctricos.

En el sistema internacional, la unidad de medida de la fuerza es el Newton; las fuerzas consideradas positivas son aquellas que generan una tensión sobre un cuerpo, mientras que las fuerzas que comprimen un cuerpo son consideradas negativas. Por otra parte, el torque se mide en unidades de Newton-metro y suele considerarse positivo cuando este se aplica en dirección de las manecillas del reloj; por el contrario, se considera negativo si se aplica en la dirección opuesta al de las manecillas del reloj.

Por último, para la medición de las deformaciones no existe ninguna unidad; es decir, las deformaciones son adimensionales. Sin embargo, es posible clasificarlas de acuerdo con su dirección. Cuando la deformación es perpendicular a un plano se dice que la deformación es normal; en cambio, si la deformación es tangente respecto a un plano de referencia, se dice que la deformación es cortante. La medición de deformaciones tiene un campo de aplicación muy amplio en el área de la mecánica, ya que mediante la cuantificación de las deformaciones de un espécimen de prueba es posible encontrar diferentes características del material con el cual se fabricó dicho espécimen.

### 7.1 Sensores piezoresistivos

El principio piezoresistivo es muy utilizado para realizar mediciones de fuerza y deformación. Distintos tipos de sensores usan este principio para lograr la transducción de fuerza o deformación a una señal eléctrica. Los sensores basados en el principio piezoresistivo más populares son la galgas extensométricas; sin embargo, existen otros dispositivos que utilizan este mismo principio, pero con elementos diferentes a las galgas. Algunos ejemplos de dichos dispositivos pueden ser los elastómeros conductores o las fibras de carbono.

#### Galgas extensométricas

Las galgas extensométricas son, tal vez, el instrumento más utilizado para la medición de esfuerzos y deformaciones. Las galgas se basan en el principio piezoresistivo descubierto por lord Kelvin en 1856, el cual establece que la resistencia eléctrica de un metal o semiconductor varía cuando este es deformado por la aplicación de una fuerza externa o gradiente de temperatura. Pero no fue sino hasta la década de 1930 que el principio piezoresistivo fue empleado para la medición experimental de esfuerzos y deformaciones por Simmons y Ruge.

Para entender la base del funcionamiento de las galgas piezoresistivas considérese un alambre delgado con sección transversal  $A$ , dada en  $\text{m}^2$ , y longitud inicial  $L$ , dada en m, mientras que la resistencia eléctrica asociada a dicho alambre está dada por:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (7.1)$$

donde:

$\rho$ : resistividad [ $\Omega\text{m}$ ]

Dada la ecuación anterior, un cambio en la resistencia de la galga puede deberse a un cambio de longitud, sección transversal o resistividad, donde los cambios de longitud y resistividad son directamente proporcionales al cambio en la resistencia, mientras un cambio en el área sería inversamente proporcional.

Ahora, piénsese que se aplica una fuerza al alambre, la cual actúa solo en la dirección longitudinal del mismo (en dirección  $x$ ), lo que provoca una elongación de este (véase figura 7.1) y, por ende, su deformación, adquiriendo una nueva longitud  $L + \Delta L$ .

Ahora, se calcula la deformación unitaria, la cual otorga una medida de la proporción en la que cambió la longitud del alambre respecto a su estado inicial y que puede expresarse como:

$$\varepsilon_x = \frac{(L + \Delta L) - L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (7.2)$$

Como es de suponerse, después de la aplicación de fuerza se tiene un alambre más largo en comparación con el del principio, aunque se ha supuesto que la fuerza que actuó sobre el alambre fue puramente longitudinal. De manera forzosa, el aumento de longitud del alambre debe estar acompañado de una reducción de la sección transversal, de tal forma que el volumen del alambre se mantenga constante. La reducción de la sección transversal está relacionada con la elongación del alambre a través de una constante de proporcionalidad,<sup>1</sup> conocida como relación de Poisson, la cual es un número adimensional propio de cada material (véase la figura 7.2).

El cambio en la sección transversal podría evaluarse de manera individual para cada eje del plano YZ respecto a la elongación que sufrió el alambre, con las siguientes relaciones:

$$\varepsilon_z = -v\varepsilon_x \quad (7.3)$$

$$\varepsilon_y = -v\varepsilon_x \quad (7.4)$$

donde:

$v$ : relación de Poisson

$\varepsilon_y$ : deformación en dirección  $y$

$\varepsilon_z$ : deformación en dirección  $z$

Dada la sección transversal circular del alambre, primero se define el radio en términos de  $y$  y  $z$ :

$$r = \sqrt{(y \cos \theta)^2 + (z \sin \theta)^2} \quad (7.5)$$

Pero las magnitudes de  $y$  y  $z$  son iguales; por tanto:

$$r = \sqrt{y^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)} = y \quad (7.6)$$

Ahora, se define el radio deformado en términos de las deformaciones en  $y$  y  $z$  como:

$$r_d = \sqrt{(y_d \cos \theta)^2 + (z_d \sin \theta)^2} \quad (7.7)$$

donde:

$y_d$ :  $(1 - \varepsilon_y)y$

$z_d$ :  $(1 - \varepsilon_z)z$

Pero las deformaciones en  $y$  y  $z$  son iguales en magnitud; por ende, la ecuación anterior se puede reescribir como:

$$r_d = \sqrt{y_d^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)} = y_d = (1 - v\varepsilon) y \quad (7.8)$$

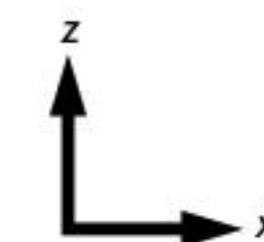
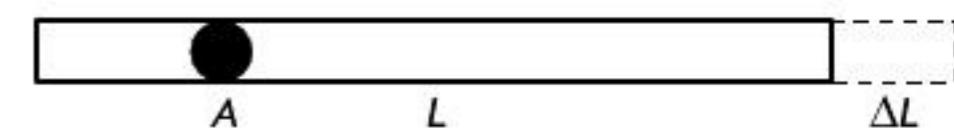


Figura 7.1 Alambre de metal o semiconductor deformado en forma axial.

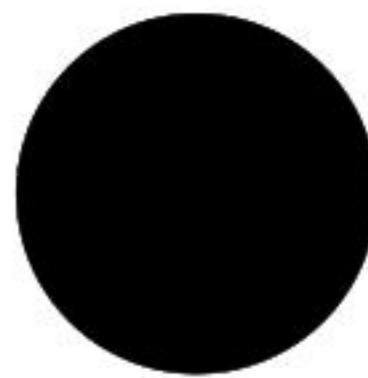


Figura 7.2 Sección transversal del alambre.

<sup>1</sup> Esto es válido al considerar un material isotrópico lineal elástico.

Ahora, se debe encontrar el cambio unitario del área de sección transversal, al igual que se hizo con la longitud; para eso, primero se define el área de sección transversal deformada como:

$$A_d = \pi r^2 - \pi [(1 - v\varepsilon_x) y]^2 \quad (7.9)$$

Pero de la ecuación 7.6 se sabe que  $r = y$ . Por tanto, el área deformada también puede expresarse como:

$$A_d = \pi r^2 (1 - v\varepsilon_x)^2 = A (1 - v\varepsilon_x)^2 \quad (7.10)$$

Sin embargo, el área deformada también puede escribirse como:

$$A_d = A - \Delta A \quad (7.11)$$

Entonces, si se combinan las ecuaciones 7.10 y 7.11 se puede encontrar que  $\Delta A$  es igual a:

$$\Delta A = A - (1 - v\varepsilon_x)^2 A \quad (7.12)$$

Si se expande la ecuación anterior se tiene:

$$\Delta A = v^2 \varepsilon_x^2 A - 2v\varepsilon_x A \quad (7.13)$$

Dado que las deformaciones en la galga serán pequeñas, se puede considerar que  $\varepsilon_x^2 \approx 0$ , lo cual reduce la ecuación 7.13 a:

$$\Delta A = -2v\varepsilon_x A \quad (7.14)$$

De la expresión anterior se puede definir al cambio unitario de sección transversal como:

$$\frac{\Delta A}{A} = -2v\varepsilon_x \quad (7.15)$$

Entonces, un cambio unitario en la resistencia de la galga puede deberse a un cambio en la longitud, sección transversal o resistividad<sup>2</sup> del alambre, y puede expresarse como:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (7.16)$$

En la ecuación 7.16, el cambio unitario de sección transversal se resta dada su relación inversa con la resistencia (ecuación 7.1). Así, la ecuación 7.16 puede reescribirse en términos de la deformación unitaria y el cambio unitario del área, con lo que se obtiene:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2v) \varepsilon_x + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (7.17)$$

La ecuación anterior se suele reescribir como:

$$\frac{\Delta R}{R} = S_A \varepsilon_x \quad (7.18)$$

<sup>2</sup> Una variación en la resistividad se puede deber a distintos factores, tales como gradientes de temperatura y, en el caso de semiconductores, una falta de uniformidad en la composición del material.

donde  $S_A$  representa la sensitividad de la galga y se define como:

$$S_A = (1 + 2v) + \frac{\Delta\rho / \rho}{\epsilon_x} \quad (7.19)$$

Es posible (y tal vez más común) que la sensitividad de la galga se exprese en términos del factor de galga  $GF$ , el cual es equivalente a  $S_A$  y se define como:

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\epsilon_x} \quad (7.20)$$

Del factor de galga queda claro el hecho de que, en efecto, una galga piezoresistiva sirve para realizar una transducción de una fuerza o desplazamiento aplicado sobre esta a un cambio de resistencia eléctrica, el cual se ve reflejado al final en la variación de un voltaje.

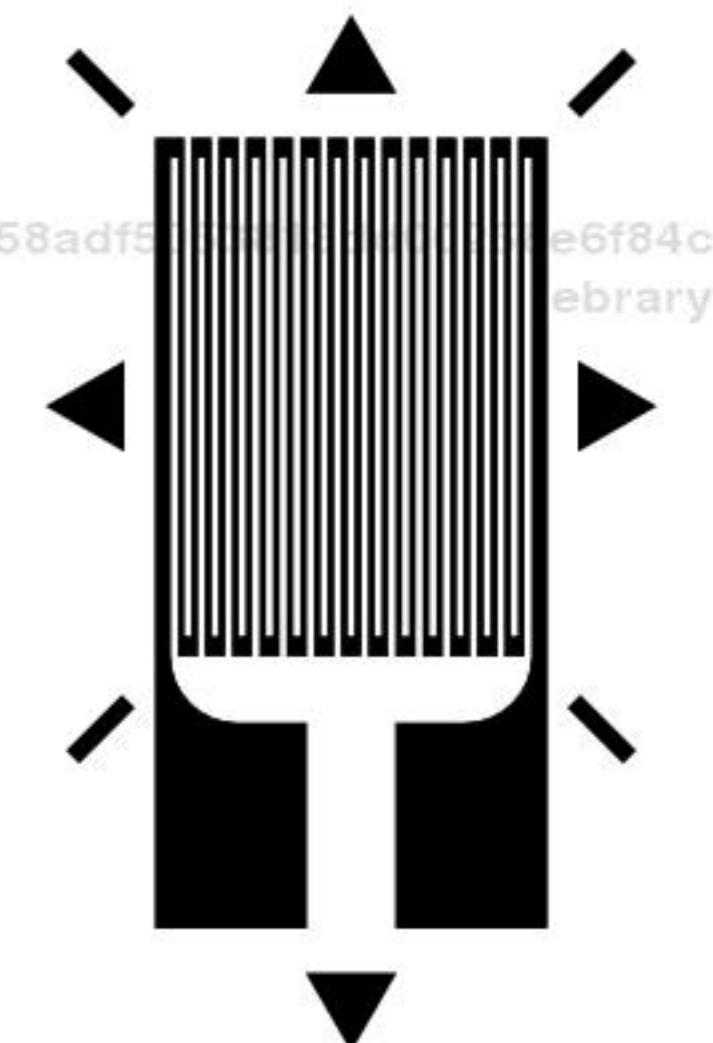
Es importante tener en cuenta que el comportamiento de una galga se puede ver alterado por factores ambientales. El principal factor a tener en cuenta es la temperatura, pues una temperatura de operación ya sea muy alta o muy baja puede provocar errores en la medición, debido a la dilatación o contracción térmica del material piezoresistivo. Existen dos formas de contrarrestar los efectos de la temperatura sobre las galgas, uno es compensar la deformación de la galga debida a la temperatura con un circuito de acondicionamiento o adquirir una galga autocompensada, la cual es menos susceptible a los efectos de la temperatura, aunque tienen un menor rango de operación. De cualquier forma, resulta crucial la elección del material de galga adecuado, de acuerdo con los rangos de operación deseados y las temperaturas a las que será sometida la galga.

En cuanto a los materiales de fabricación, se pueden distinguir dos tipos principales de galgas piezoresistivas: las fabricadas con metales y las fabricadas con semiconductores.

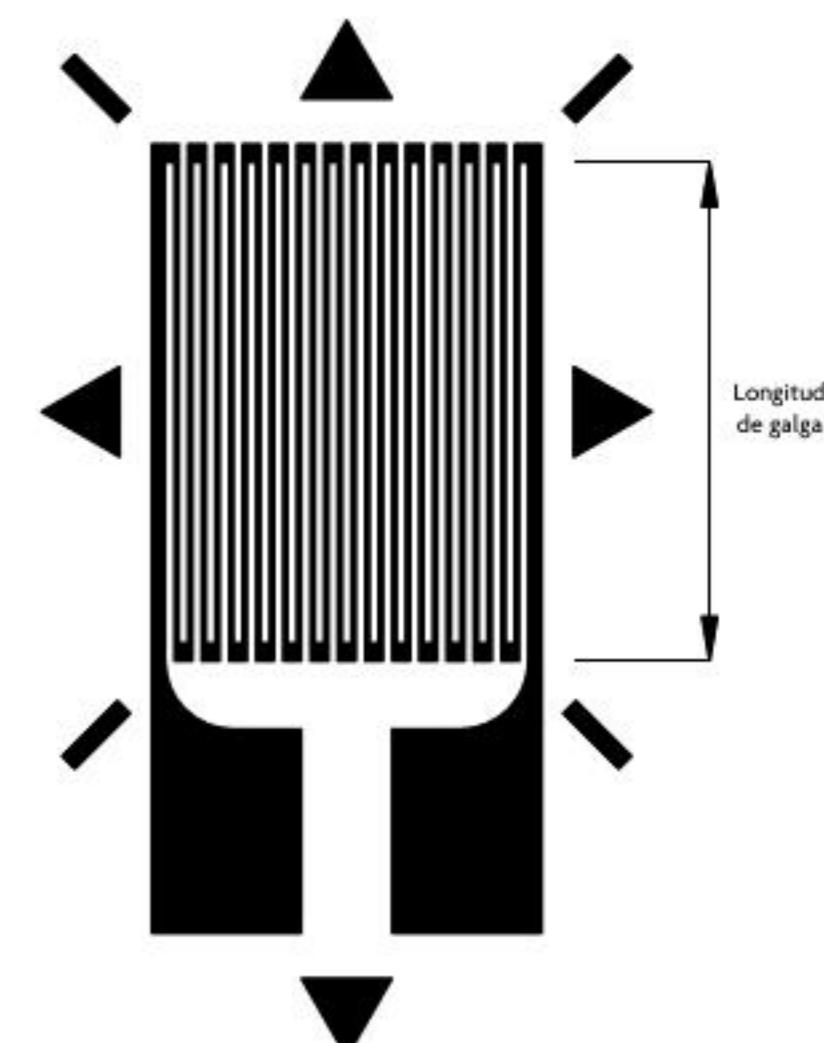
Las galgas semiconductoras presentan factores de galga mucho mayores que las galgas metálicas, lo cual permite tener un sensor mucho más sensitivo y pequeño dadas las técnicas de fabricación empleadas para producir galgas semiconductoras. Su principal desventaja es una mayor sensitividad a gradientes de temperatura; de manera general, se puede decir que estas son menos robustas que las galgas metálicas, las cuales son de uso más común (véase figura 7.3), por lo que se tratan con más detalle en lo que resta de esta sección.

Las galgas fabricadas con metales consisten en un sustrato aislante (fabricado en algún polímero o epoxifénólico) y flexible sobre el cual se coloca un patrón de alambrado. Los diámetros del alambre metálico utilizado suelen ser de alrededor de 0.025 mm y con longitudes que pueden ir desde los 0.25 mm hasta los 15 cm aproximadamente (véase figura 7.4). Las aleaciones más utilizadas son el constantán,<sup>3</sup> constantán templado, karma<sup>4</sup> y una aleación isoelástica de cromo-níquel. De las aleaciones antes mencionadas, el constantán es el material más utilizado para la fabricación de galgas, ya que tiene sensitividad lineal en un amplio rango de deformaciones, sin presentar grandes cambios, incluso para deformaciones plásticas, además de poseer gran estabilidad térmica.

Las galgas tienen resistencias nominales que pueden oscilar entre los 100  $\Omega$  y 400  $\Omega$ , además de factores de galga que, por lo común, son cercanos a 2. Las galgas metálicas se pueden encontrar en dos configuraciones básicas: 1) galgas hechas con alambres y 2) galgas hechas con láminas metálicas (véase figura 7.5).



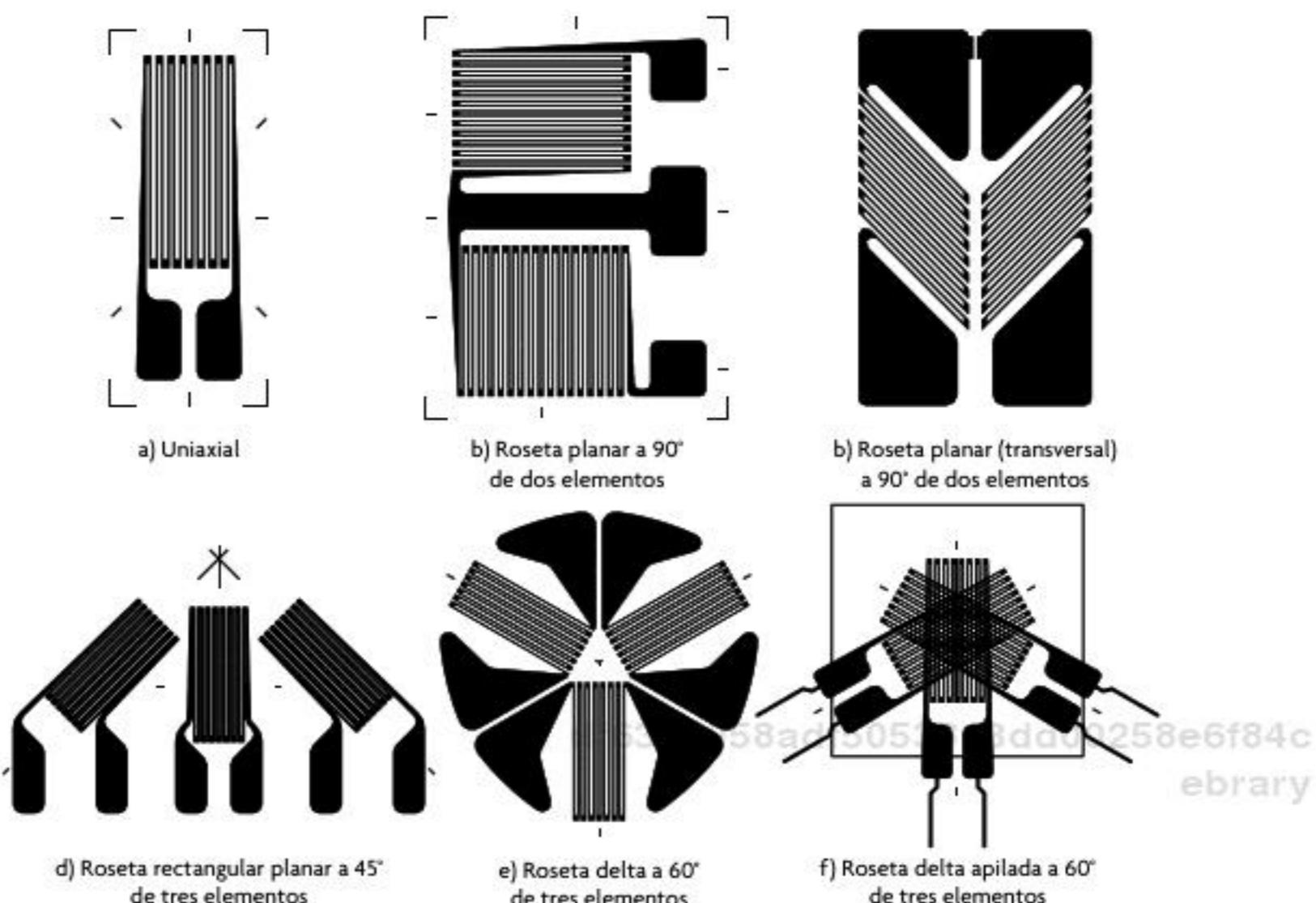
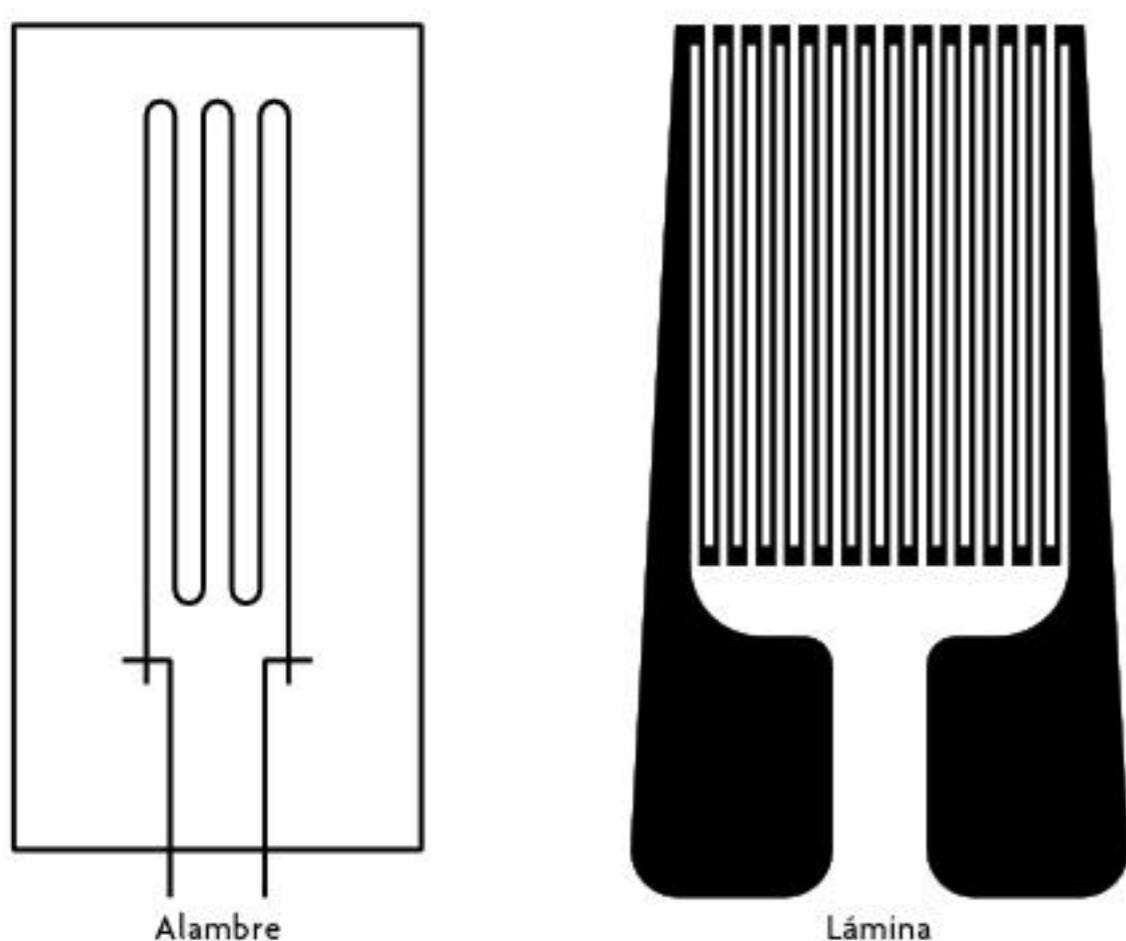
**Figura 7.3** Patrón de alambrado de una galga.



**Figura 7.4** Longitud de una galga.

<sup>3</sup> Aleación de cobre y níquel.

<sup>4</sup> Aleación de cromo y níquel.



**Figura 7.5** Galgas de alambre y lámina.

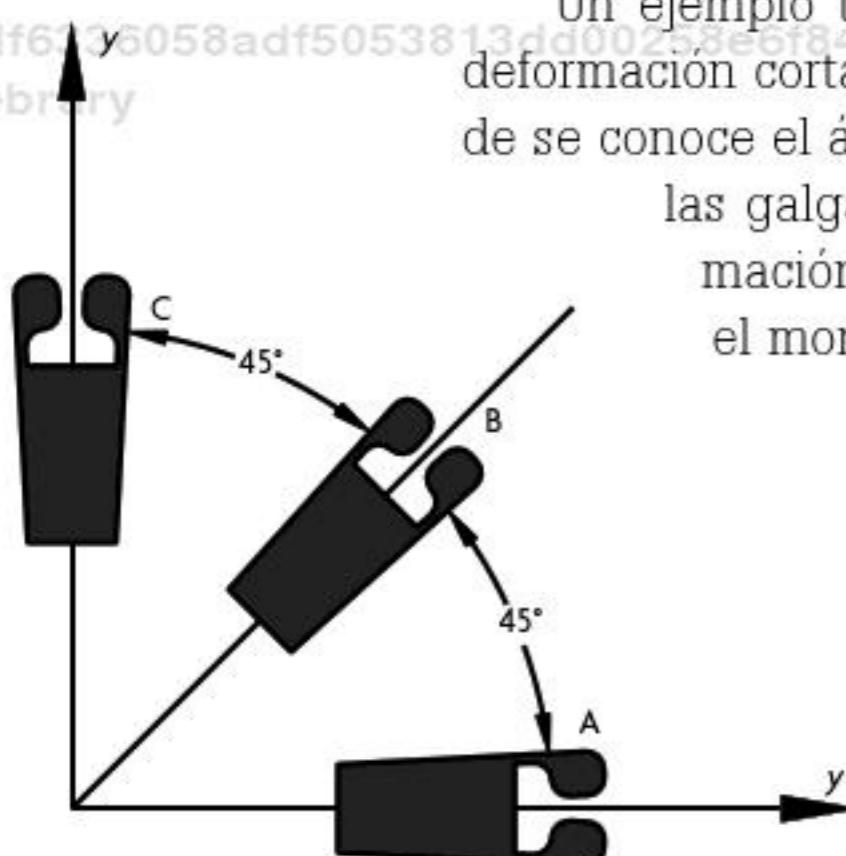
**Figura 7.6** Configuraciones típicas para medición con galgas.

Para realizar una medición, las galgas se acoplan o montan sobre un elemento del cual se quieren saber sus deformaciones, esfuerzos o fuerzas aplicadas. Para el montaje se usan diversos adhesivos que deben ser capaces de mantener la galga en posición con una resistencia al cortante de al menos 10 MPa; los adhesivos más usados son los epóxicos y los acrílicos. De manera adicional, se suelen usar recubrimientos sobre las galgas para evitar daño mecánico o químico sobre la galga durante el montaje u operación.

Además de las configuraciones que se observan en la figura 7.5, existen configuraciones de galga distintas (véase figura 7.6) que permiten realizar diversas mediciones; por ejemplo, la medición de deformaciones y esfuerzos cortantes o la determinación del campo de deformaciones de un cuerpo o superficie, las cuales no se pueden medir con una sola galga; por tanto, se suelen utilizar arreglos de tres galgas para obtener dichas mediciones.

Un ejemplo típico de aplicación de un arreglo de tres galgas es el que se usa para medir la deformación cortante.<sup>5</sup> Para llevar a cabo esta medición suele usarse un arreglo de tres galgas, donde se conoce el ángulo de orientación de cada una de estas respecto a una referencia; en este caso,

las galgas se colocan a 45 grados (véase figura 7.7). Al utilizar las ecuaciones de transformación de deformaciones (7.21) es posible encontrar la deformación cortante (7.22). Así, el montaje de las galgas debe hacerse de acuerdo con la medición que se va a realizar.



$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_A \\ \varepsilon_B \\ \varepsilon_C \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_A & \sin^2 \theta_A & \cos \theta_A \sin \theta_A \\ \cos^2 \theta_B & \sin^2 \theta_B & \cos \theta_B \sin \theta_B \\ \cos^2 \theta_C & \sin^2 \theta_C & \cos \theta_C \sin \theta_C \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7.21)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C \quad (7.22)$$

**Figura 7.7** Arreglo de galgas a 45°.

<sup>5</sup> Una deformación cortante es aquella que existe cuando se da una deformación normal en dos direcciones distintas x, y o z, las cuales provocan una deformación tangente al plano que definen cualquier par de direcciones xy, yx o zx.

La lectura de las galgas se lleva a cabo mediante el uso de un circuito de puente de Wheatstone resistivo, como los que se tratan en el capítulo 2 (Acondicionadores de señal). Para realizar la lectura de una galga es importante tener en cuenta que el cambio en la resistencia que se presenta en estas es bastante pequeño; por ejemplo, si se considera la ecuación 7.20, se puede calcular el cambio en la resistencia de la galga. Supóngase que la galga se montó sobre una pieza de aluminio, la cual experimenta un esfuerzo de 10 MPa; entonces, el cambio en la resistencia está dado por:

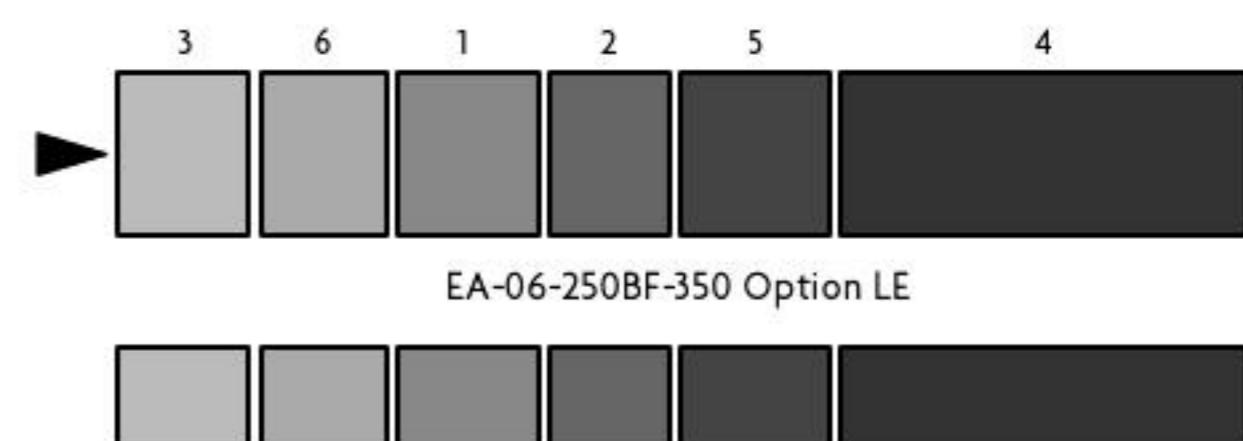
$$\frac{\Delta R}{R} = GF \times \epsilon_x = GF \times \frac{\sigma_x}{E} = 2 \times \frac{10 \times 10^6}{70 \times 10^9} = 0.00028 \quad (7.23)$$

El cambio en la resistencia en la galga se define en términos del factor de galga y la deformación de la galga; si se considera un factor de galga típico de 2 y la deformación que experimenta la galga se escribe en términos de la deformación de la pieza de aluminio, por medio de la relación esfuerzo-deformación, donde  $E$  representa al módulo de Young<sup>6</sup> del aluminio con valor numérico de 70 GPa, se encuentra que el cambio en la resistencia resulta en verdad pequeño, del orden de 0.0003% de la resistencia original. Por lo anterior, es importante tener un sistema de medición bastante sensitivo a los cambios de resistencia. Como se trata en capítulos previos, el puente Wheatstone posee esta característica; sin embargo, es importante considerar factores como la resistencia de los cables que conectarán la galga con el resto del circuito de puente, ya que esta puede llegar a ser del orden o incluso mayor que el cambio de resistencia en la galga y debe ser compensada. Un circuito de puente alimentado con una fuente de corriente constante resulta preferible en los casos que la longitud de los cables de conexión es grande.

Cuando se requiere de una galga para llevar a cabo alguna medición es necesario considerar distintos factores que ya se han comentado, de tal forma que la galga que se seleccione tenga un rendimiento óptimo. Para la selección de una galga se debe considerar la longitud de galga, el patrón del alambre o lámina, el material de fabricación y la resistencia de la galga. Para realizar la selección de una galga con base en todos estos factores se puede utilizar el código de designación de galgas,<sup>7</sup> el cual proporciona toda la información necesaria acerca de los parámetros antes mencionados (véase figura 7.8).

El código de designación de galgas puede interpretarse de la siguiente forma, según los números de la figura 7.8:

1. Representa la longitud de la galga en milímetros, la cual debe seleccionarse con base en el espacio disponible para montarla y el tipo de medición a realizar (uniaxial, biaxial, de cortante).
2. Representa al patrón de la galga. La primera consideración aquí debe ser si se requiere una galga con un solo patrón, o una con múltiples patrones, como se observa en la figura 7.6 c) y 7.6 e). Existen más de 30 patrones disponibles a escoger.
3. Serie de la galga. Una vez definidos la longitud y el patrón necesarios, se puede elegir la serie de la galga, donde la primera letra se refiere al sustrato y recubrimiento, una E indicará que el sustrato es de poliamida y no está cubierta al frente, una W indica que la galga viene encapsulada en fibra de vidrio reforzada y una CE indica un sustrato de poliamida y un encapsulado que incluye almohadillas de cobre para soldar en forma directa los cables. La segunda letra indica el material de fabricación, donde:
  - A-constantán



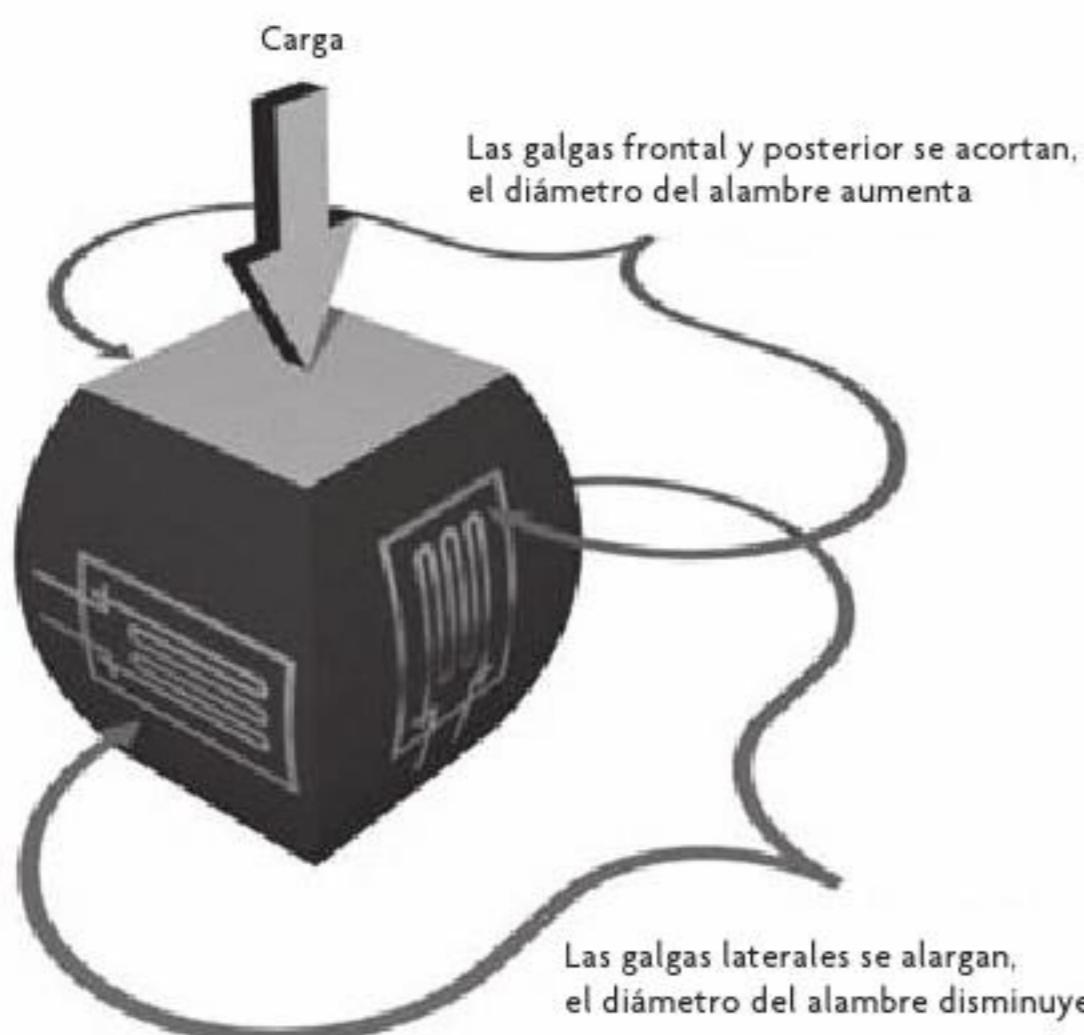
**Figura 7.8** Código de designación de galgas.

<sup>6</sup> Es una constante de proporcionalidad que relaciona la deformación de un cuerpo con el esfuerzo al que se somete el mismo, la cual se define para materiales linealmente elásticos.

<sup>7</sup> De Vishay Precision Group.

- P-constantán templado
  - D-aleación isoelástica
  - K-karma
4. Opciones extra de serie de galga, si en la serie elegida existen diferentes opciones de galga; por ejemplo, una galga con material de respaldo o con recubrimiento o sin él.
  5. Resistencia de la galga. Este número es literalmente el valor de la resistencia de la galga en ohms.
  6. Número STC. Este número es un aproximado del coeficiente de expansión térmica del material con que se fabrica la galga.

## Celdas de carga



**Figura 7.9** Principio de funcionamiento de una celda de carga.

Una de las principales aplicaciones de una celda de carga es en sistemas de medición de peso. Las celdas de carga son sensores de fuerza que suelen clasificarse de forma separada a las galgas, aunque en esencia son arreglos de galgas que permiten conocer la fuerza aplicada sobre un cuerpo.

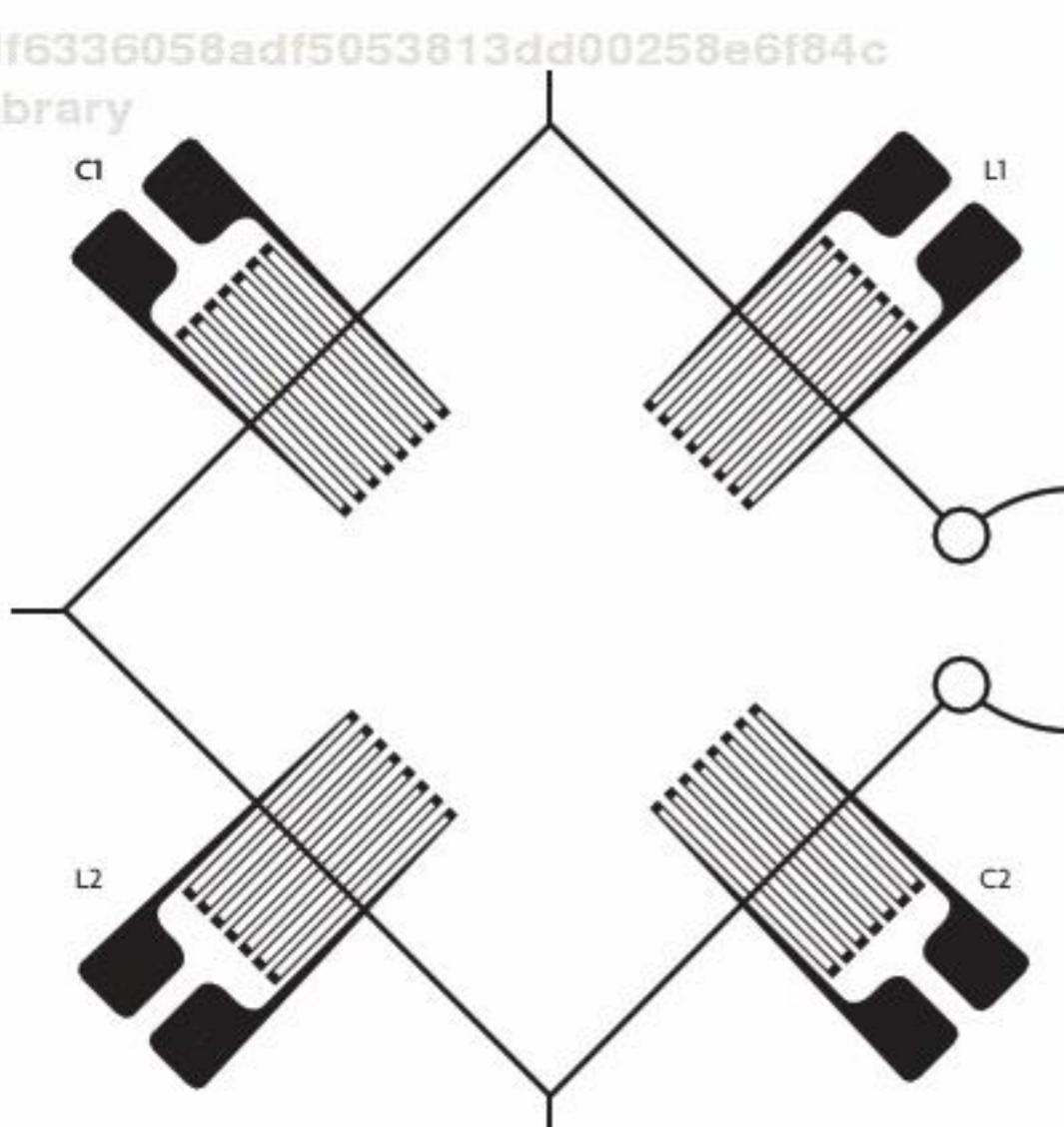
Para entender el principio fundamental de funcionamiento de una celda de carga piénsese en un cuerpo cúbico sobre el cual se montan cuatro galgas, una sobre cada cara perpendicular a la superficie de apoyo (véase figura 7.9), orientándolas de modo que las galgas de caras opuestas tengan la misma orientación y las de caras contiguas tengan una rotación de 90° una respecto a la otra. El montaje de las galgas se hará de forma tal que dos galgas midan el cambio de longitud del cuerpo en dirección normal a la superficie de apoyo y las otras dos midan el cambio en la dirección tangencial. Por último se conecta cada una de las galgas como un brazo resistivo de un puente de Wheatstone, de manera que se forme un circuito de puente con cuatro elementos variables.

Una vez montadas y conectadas las galgas, se aplica una carga sobre la cara superior del cuerpo cúbico (véase figura 7.9), lo cual resulta en una deformación de las cuatro galgas; de estas, dos registran la compresión del cuerpo en la dirección de aplicación de la carga y las dos restantes miden la elongación de las caras laterales. Así, las galgas que se comprimen presentarán una reducción en su resistencia y las que se alargan verán su resistencia aumentada.

Si las galgas han sido conectadas como se muestra en la figura 7.10, donde las galgas marcadas con una C son aquellas que se comprimen y las marcadas con una L son las que se alargan, la fuente de alimentación se conecta entre los nodos superior e inferior y la salida se toma entre los nodos izquierdo y derecho. Las galgas se conectan de la forma antes descrita para tener siempre un voltaje positivo a la salida. Entonces, el voltaje de salida del puente es:

$$V_o = V \frac{L2}{L2 + Cl} - V \frac{C2}{C2 + Ll} \quad (7.24)$$

El voltaje de salida del puente se puede relacionar de manera directa con la magnitud de la fuerza aplicada, ya que ambas magnitudes tienen una relación lineal, debido a que el cambio de resistencia de las galgas tiene una relación lineal con su deformación (equivalente



**Figura 7.10** Puente de Wheatstone para la celda de carga.

a la deformación del cuerpo) y esta a su vez tiene una relación lineal con el esfuerzo (por la relación esfuerzo-deformación,  $\sigma_x = E\varepsilon_x$ ); por último, el esfuerzo se relaciona con la fuerza aplicada por la relación  $\sigma_x = F / A$ , donde el área es un parámetro conocido del cuerpo.

La configuración de la celda de carga que se acaba de explicar para mostrar el principio de funcionamiento solo es una forma posible de hacer el arreglo; existen distintas configuraciones típicas de uso comercial, que se manejan bajo los preceptos que ya se han exemplificado. A continuación se listan algunas configuraciones de celda de carga de uso común.

### Celda de columna

A este tipo de celda se le conoce como celda de lata debido a su apariencia externa (véase figura 7.11 a), mientras que el nombre de celda de columna proviene de su construcción interna y principio de funcionamiento, el cual se basa en una o varias columnas, las cuales son comprimidas por efecto de una fuerza externa. Las galgas extensométricas se colocan sobre cada columna; por lo común se utiliza un par de galgas por columna, una para medir la variación de longitud de la columna (galga axial) y otra para medir la variación de la sección transversal (galga transversal). Las columnas de que se compone la celda de carga son de sección trasversal regular. Las celdas de carga de columna tienen un rango de medición que va de los 22 kg hasta 200 ton, además de soportar sobrecargas de 150% de la carga máxima nominal. Este tipo de sobrecarga suele denominarse sobrecarga segura. Los fabricantes proporcionan además un factor de sobrecarga última, el cual puede llegar a ser de 300% de la carga máxima nominal. Los voltajes de operación comunes son de entre 10 V y 15 V en corriente directa, mientras los valores de resistencia se encuentran alrededor de 350  $\Omega$ . Los materiales en que se fabrican este tipo de celdas son acero inoxidable o aceros para herramienta.

### Celda de viga

Este tipo de celda de carga se monta de tal forma que un extremo queda fijo a una superficie plana, mientras el otro extremo queda libre y es sobre este extremo que se coloca la carga (véase figura 7.12 b). En esta configuración, las galgas se colocan en una cavidad especialmente destinada para tal fin (véase figura 7.12 a). Aquí, las galgas miden la deformación cortante. Los materiales de fabricación de estas celdas de carga son acero inoxidable y acero para herramienta. Los rangos de medición van de los 10 kg a 50 ton, con resistencias de 350  $\Omega$ , aproximadamente. Los factores de sobrecarga segura suelen oscilar entre 120 y 150%, mientras que los voltajes de alimentación van de 5 V a 20 V en corriente directa.

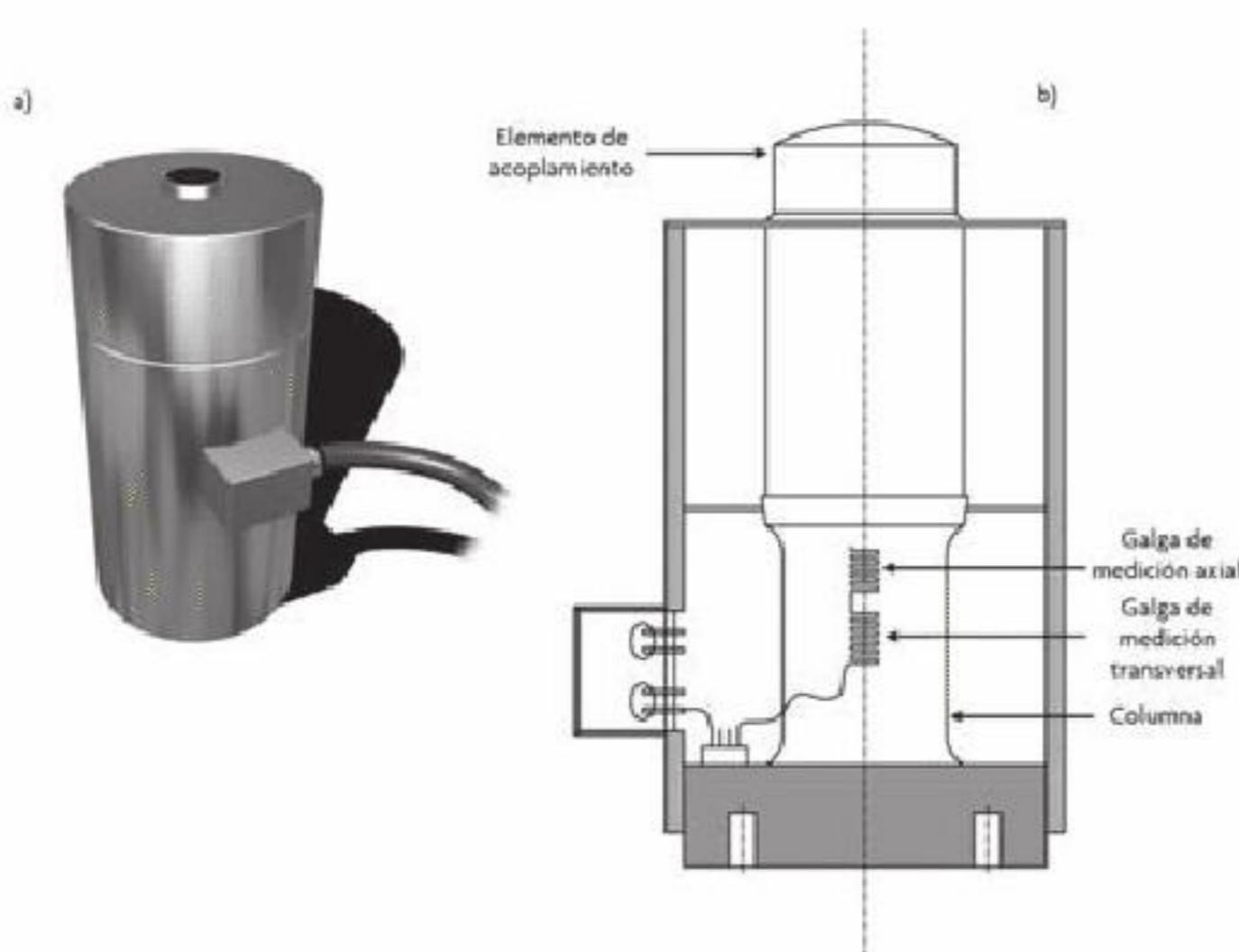


Figura 7.11 Celda de columna.

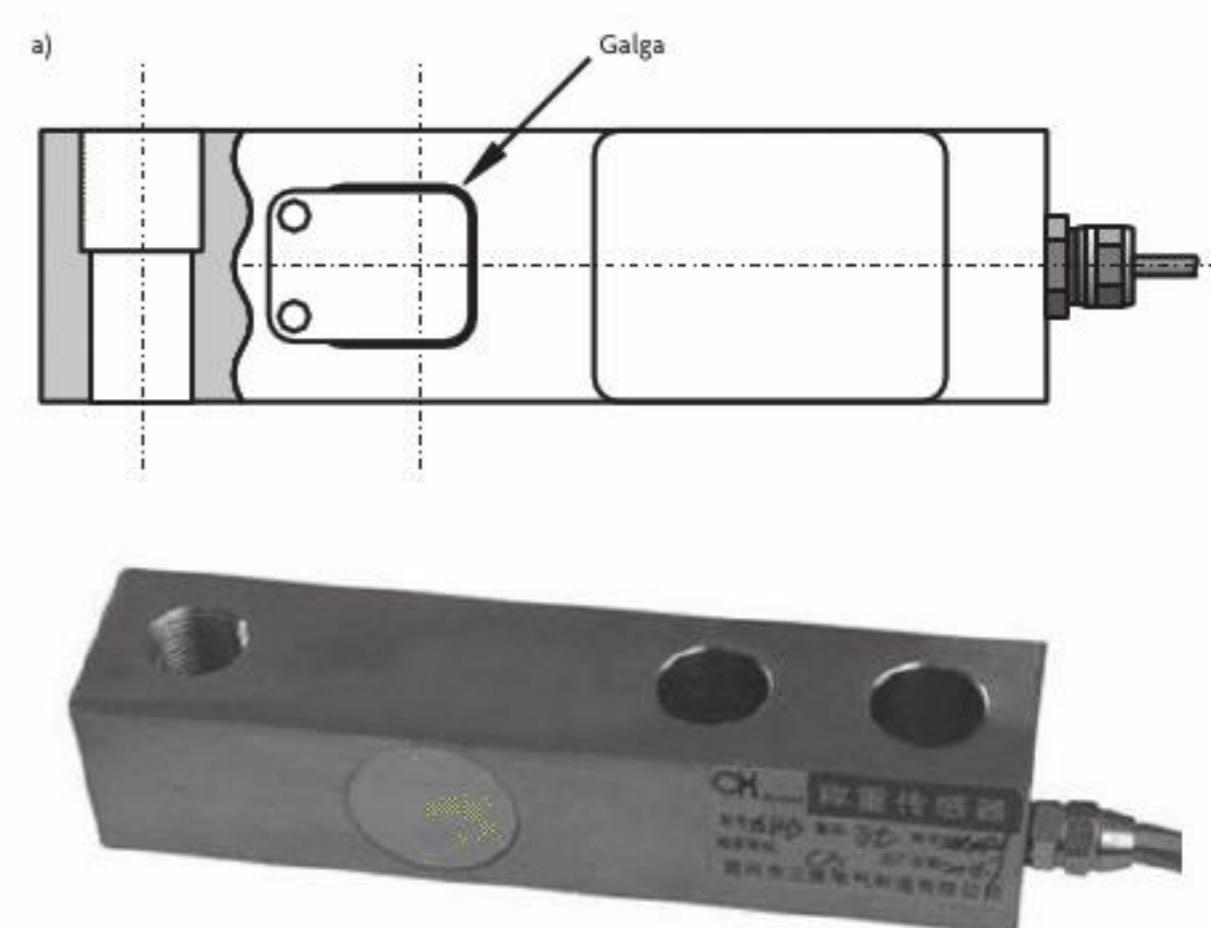


Figura 7.12 Celda de viga en cantilever.



**Figura 7.13** Celda de doble viga.



**Figura 7.14** Celda de viga en S.

### Celda de viga doble

Su construcción incluye dos vigas (véase figura 7.13), como las descritas en la celda de viga, donde la aplicación de carga se hace en la parte central de la celda de carga y los dos extremos se fijan. La resistencia de estas celdas típicamente es de  $700\ \Omega$ , con capacidades de hasta 50 ton, con sobrecargas típicas de 150% y sobrecarga última de 300%; los voltajes de operación van de los 5 V a los 20 V.

### Celda de viga en S

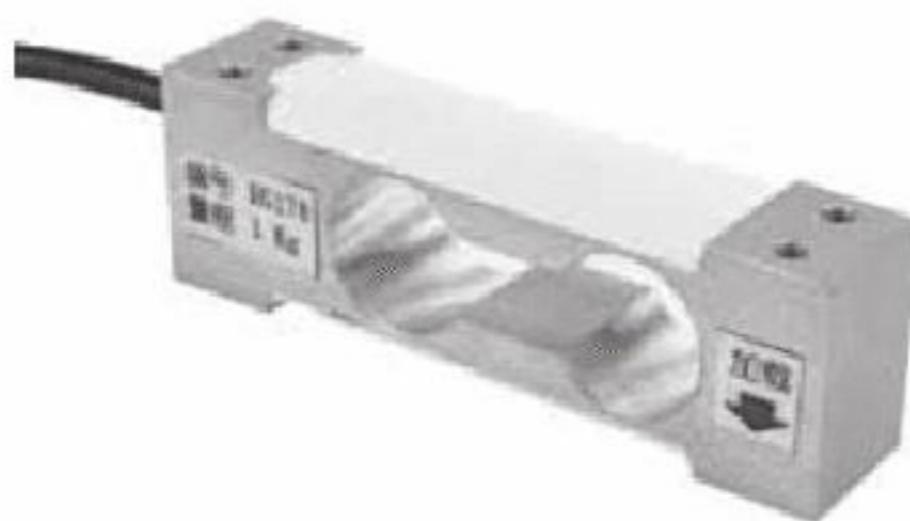
Las celdas de viga en S toman su nombre de la forma geométrica que describen (véase figura 7.14). Estas celdas pueden trabajar en compresión o tensión. Las capacidades de las celdas de viga en S varían desde 10 kg hasta 10 ton, con resistencias de  $350\ \Omega$  y voltajes de operación de entre 10 V y 15 V.

### Celda de viga en cantiléver

A diferencia de las celdas de viga, las celdas de viga en cantiléver son maquinadas con ranuras pasantes (véase figura 7.15) dentro de las cuales se colocan las galgas para medir la deflexión de la viga. Los valores de resistencia típicos son de  $350\ \Omega$  y los voltajes de operación van de 10 V a 20 V, con capacidades de medición de entre 10 kg y 10 toneladas.

### Celda de plataforma

También conocida como celda de doble viga cantiléver o viga de un solo punto, en construcción es similar a las celdas de viga en cantiléver pero con ranuras de mayor tamaño. Son celdas de bajas capacidades de entre 2.5 kg y 2 ton, con resistencias de  $350\ \Omega$  y voltajes de operación entre 10 V y 20 V. Estas celdas son fabricadas en aluminio (véase figura 7.16).



**Figura 7.15** Celda de viga en cantiléver.



**Figura 7.16** Celda de plataforma.

## Ejercicio de aplicación

### Medición de carga con una galga extensométrica

#### Objetivo

Medir el peso en kilogramos de un objeto usando una galga extensométrica.

#### Material

- Galga extensométrica de 50 kg
- Arduino Uno®
- Cables de conexión
- Amplificador de instrumentación AD620
- Amplificador operacional TL081
- 3 resistencias de 1 KΩ
- 4 resistencias de 100 KΩ
- 1 resistencia de 10 KΩ
- 1 capacitor de 100 nF
- Protoboard
- Fuente de –5 V

#### Desarrollo

En la figura 7.17 se observa la galga extensométrica de 50 kg. Una galga extensométrica cambia el valor de su resistencia al ser deformada. Así, primero se hace la medición de dichas deformaciones y se asocia a la carga ejercida por el objeto, y esta, a su vez, con el peso del objeto por medio de la tarjeta Arduino®. Debido a que la variación de la resistencia en la galga es muy pequeña, es necesario hacer un condicionamiento de señal para llevar a cabo una lectura.



**Figura 7.17** Galga extensométrica.

En este ejercicio se usa una galga dentro de una cubierta de plástico, como se observa en la figura 7.18, lo que permite colocar cargas en esta con facilidad.



**Figura 7.18** Galga con cubierta.

Se propone el circuito de la figura 7.19, donde la galga extensométrica es conectada en un puente de Wheatstone. La galga se conectarán usando un par de sus terminales que tengan como resistencia 1 KΩ. Después, con un amplificador de instrumentación se mide y amplifica la diferencia de potencial entre los nodos del puente de Wheatstone configurando el AD620 con una ganancia de 100; la señal del AD620 se pasa por un filtro pasa-bajas, que también amplificará con una ganancia de 10. Por último, la señal obtenida del filtro es conectada a la entrada analógica A0 del Arduino®. Para fines prácticos se conectarán dos resistencias de 1 KΩ en paralelo en las terminales RG del AD620, con lo que se tendrá una resistencia equivalente de 500 Ω, aproximando la ganancia a 100.

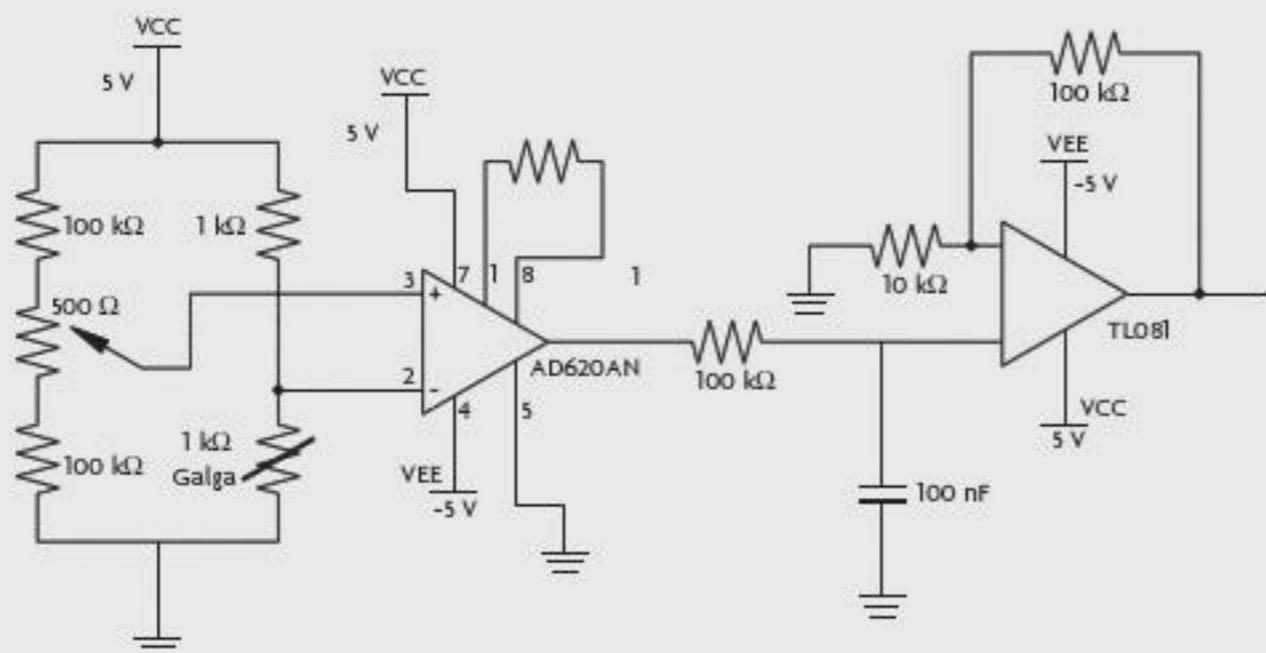
Se recomienda usar un potenciómetro en el puente de Wheatstone con el fin de ajustar a un voltaje nulo a la salida del acondicionamiento cuando no hay ninguna carga sobre la galga.

Para la calibración del sensor se aplica una carga conocida y se supone que el voltaje obtenido es directamente proporcional a la carga; en el caso de este ejercicio, al poner un peso de 2 kg se obtiene una lectura de 300 mV. Entonces, la ecuación para el peso aplicado en gramos es:

$$P = V_{out} \times \frac{2\,000}{300}$$

Al tratarse de una lectura del convertidor ADC del Arduino®, la conversión para el voltaje en mV es:

$$V_{out} = V_{ADC} \cdot \frac{5\,000}{1\,023}$$

**Figura 7.19** Circuito acondicionador.

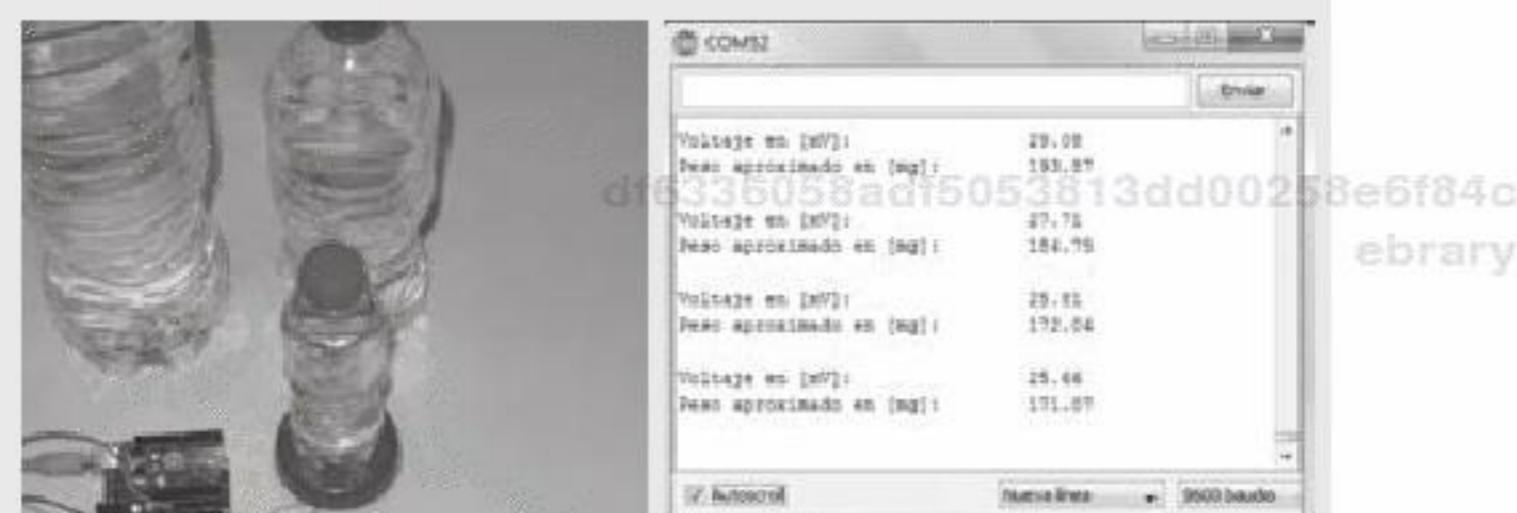
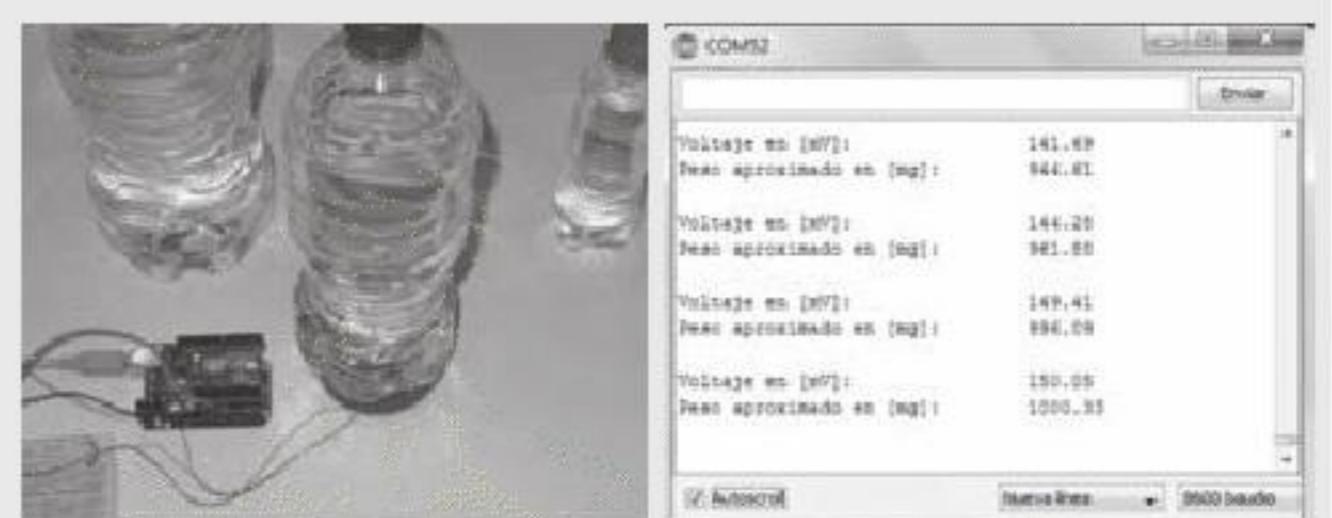
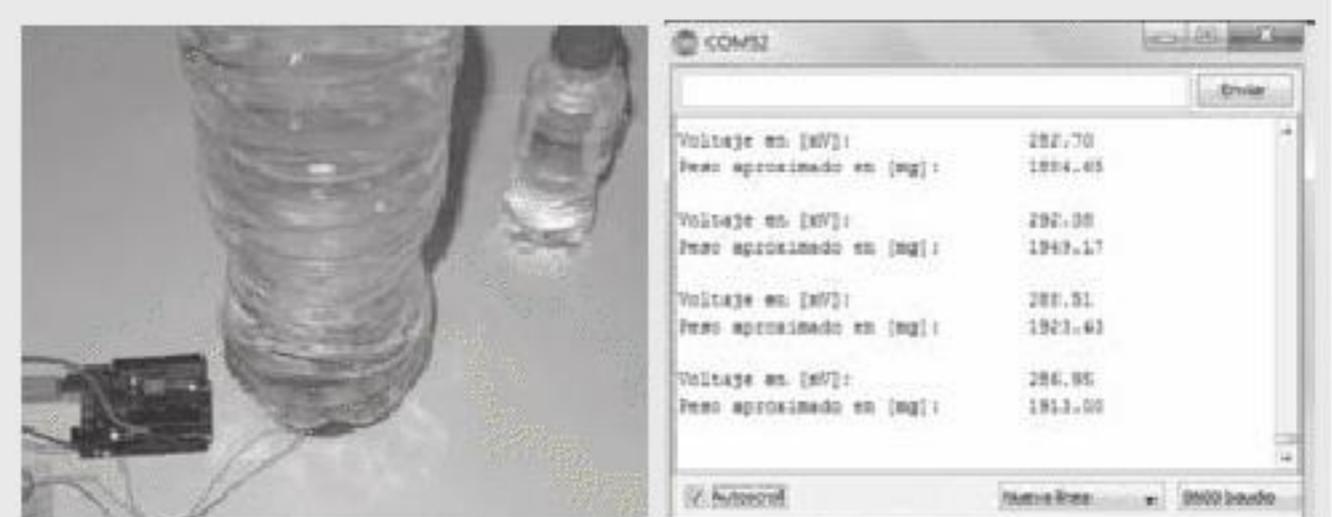
La salida del acondicionamiento de señal debe ir conectada a la entrada analógica A0 del Arduino®.

```
void setup() {
Serial.begin(9600);
}
void loop() {
float x=0;
float v=0, p=0;

//Lectura promedio del voltaje en un intervalo
// de 500 milisegundos
for (int i=0;i<100;i++){
x=x+analogRead(0);
delay(5);
}
x=x/100;

v=1000*5*x/1023;//Voltaje promedio en mV

//Calculo del peso aplicado sobre la galga
//extensométrica
p=v*2000/300; //tomando en cuenta que con 2 kg
//se tienen 300 mV
//se imprimen los resultados cada medio
//segundo
Serial.print("Voltaje en [mV]: \t\t");
Serial.println(v);
Serial.print("Peso aproximado en [mg]:\t");
Serial.println(p);
Serial.println();
}
```

**Figura 7.20** Sin carga.**Figura 7.21** Botella de 200 mililitros.**Figura 7.22** Botella de 1000 mililitros.**Figura 7.23** Botella de 2 000 mililitros.

## FlexiForce® y FSR®

Los FlexiForce® y FSR® son sensores basados en el efecto piezoresistivo (véanse figuras 7.24 y 7.25), pero, a diferencia de las galgas extensométricas, su resistencia eléctrica no varía ante una deformación. Para obtener un cambio en la resistencia eléctrica del sensor es necesario aplicar una fuerza sobre el extremo circular del sensor. La resistencia inicial del sensor es del orden de  $10 \text{ M}\Omega$  aproximadamente, y al aplicársele una fuerza la resistencia empieza a disminuir (hasta  $10 \text{ k}\Omega$ , aproximadamente); cuando la resistencia deja de disminuir, aunque se continúe aumentando la fuerza aplicada, se dice que se ha saturado el sensor; es decir, hemos alcanzado la máxima fuerza que es capaz de medir el sensor.



Figura 7.24 Sensor FlexiForce®.



Figura 7.25 Sensor FSR®.

Un sensor *FlexiForce*® o *FSR*® está compuesto por una o dos hojas de polímero que sirven de sustrato, sobre las cuales se deposita un estrato conductor, seguido de una tinta sensitiva a la presión aplicada solo en la sección circular, la cual define la zona activa de detección; en caso de existir dos sustratos, estos son unidos con un adhesivo para obtener la estructura final del dispositivo (véase figura 7.26). El área de detección es considerada como un solo punto; por tanto, para obtener mediciones adecuadas es necesario que la fuerza se distribuya de manera uniforme sobre el área de detección.

Para iniciar el sensor se recomienda aplicar 110% de la carga total que es capaz de medir, permitir que el sensor se estabilice y después remover la carga. Luego, para calibrarlo, se recomienda llevar a cabo el mismo proceso, pero con cargas cercanas a las cargas que se desea aplicar sobre el sensor durante su uso y manteniendo una temperatura igual a la temperatura de operación deseada.

Los *FlexiForce*® tienen longitudes desde 25.4 mm hasta 197 mm, con diámetros de detección de 9.53 mm o 25.4 mm y espesor de 0.2 mm, un tiempo de respuesta de menos de 5  $\mu$ s y rangos de medición de fuerza que van de 4.4 N hasta 440 N. Es importante considerar las variaciones de salida debidas a la temperatura, las cuales son de 0.2% por grado Fahrenheit.

Los *FSR*® pueden tener áreas de detección circulares o cuadradas que van de los 0.025 cm<sup>2</sup> hasta 0.3 m<sup>2</sup>, con espesores entre 0.2 mm y 1.25 mm. Los rangos de medición van de 1 N hasta 100 N.

El acondicionamiento de la señal de salida de este tipo de sensores se puede hacer con un circuito amplificador inversor (véase figura 7.27). Al ser un sensor resistivo, la señal de salida del sensor será un voltaje que cambiará según se modifique la resistencia del sensor. Con los sensores que poseen un área de detección mayor es posible medir cargas mayores si se reduce el voltaje de alimentación del sensor o si el factor de amplificación del circuito inversor se disminuye; por otra parte, si se requiere una mayor sensibilidad para medir fuerzas pequeñas se debe aumentar el voltaje de alimentación del sensor o la ganancia del circuito de amplificación.

## Ejercicio de aplicación

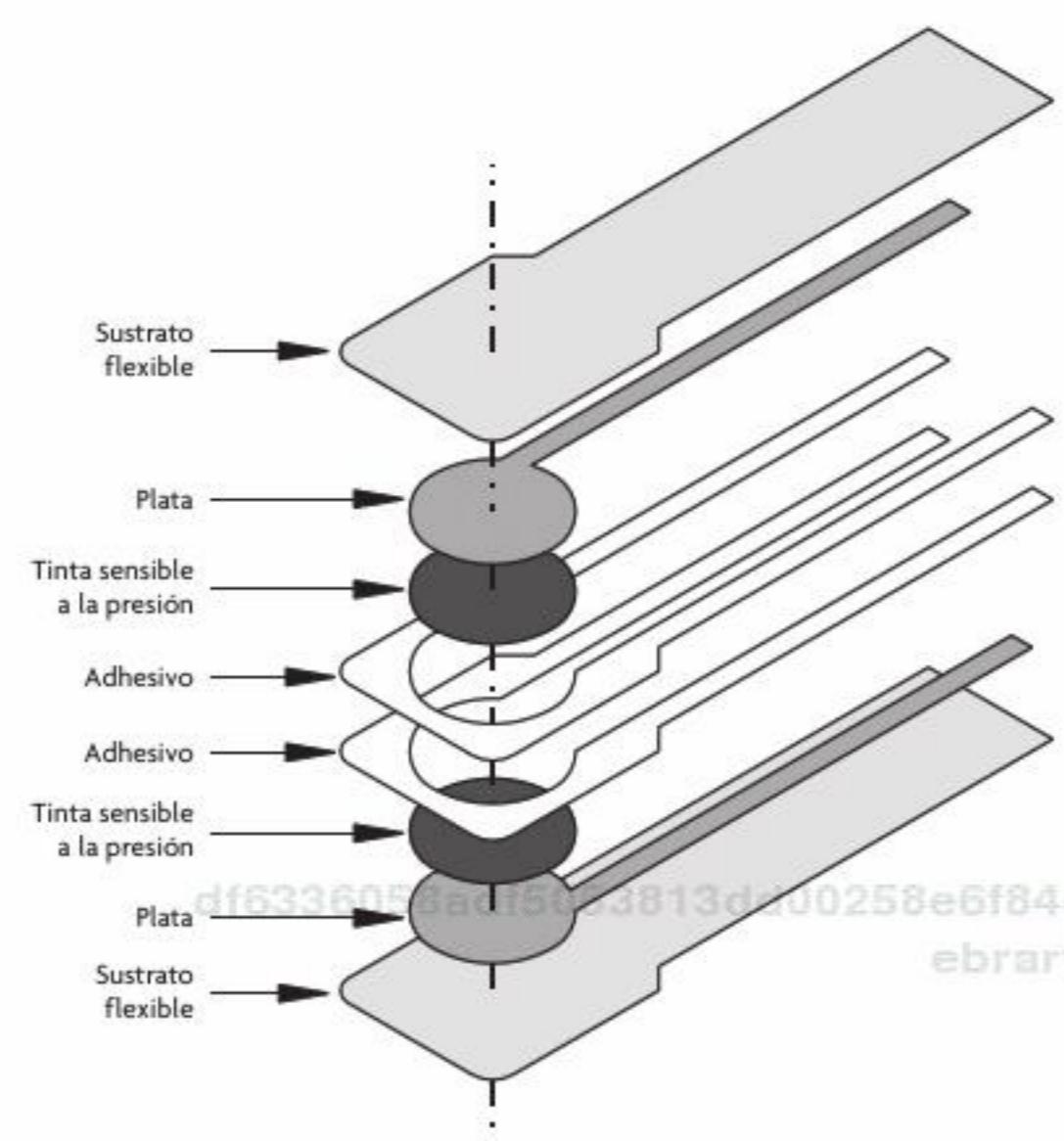
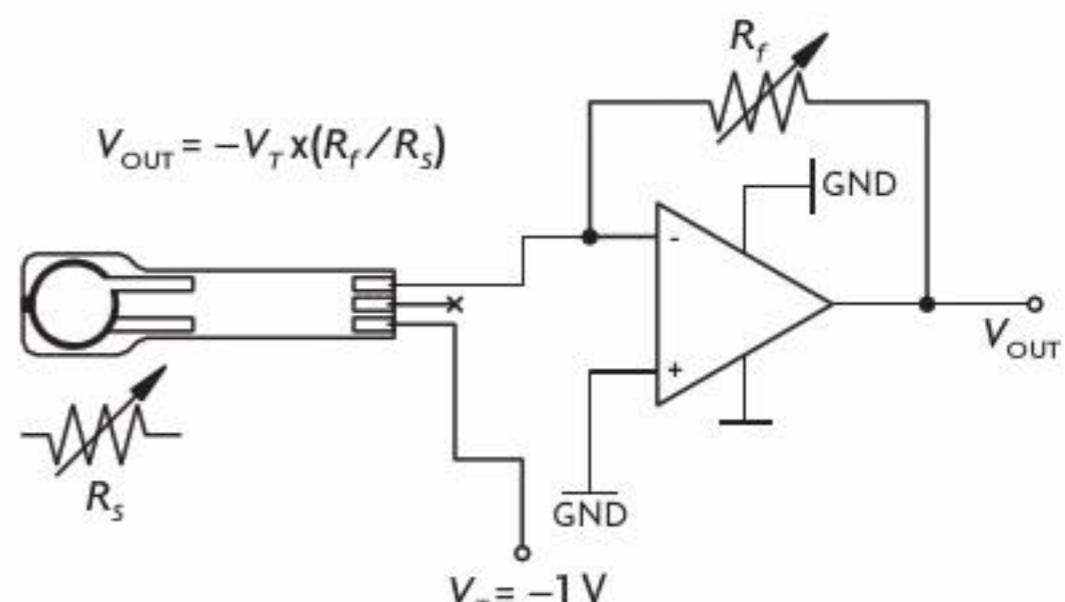
### Medición de fuerza usando un sensor de *FlexiForce*®

#### Objetivo

Medir una fuerza aplicada con un sensor *FlexiForce*®.

#### Material

- Sensor *FlexiForce*® A201
- Arduino Uno®
- Cables de conexión
- Una resistencia de 100 K $\Omega$

Figura 7.26 Estructura de un *FlexiForce*® o *FSR*®.Figura 7.27 Circuito de acondicionamiento para un *FlexiForce*® o *FSR*®.

## Desarrollo

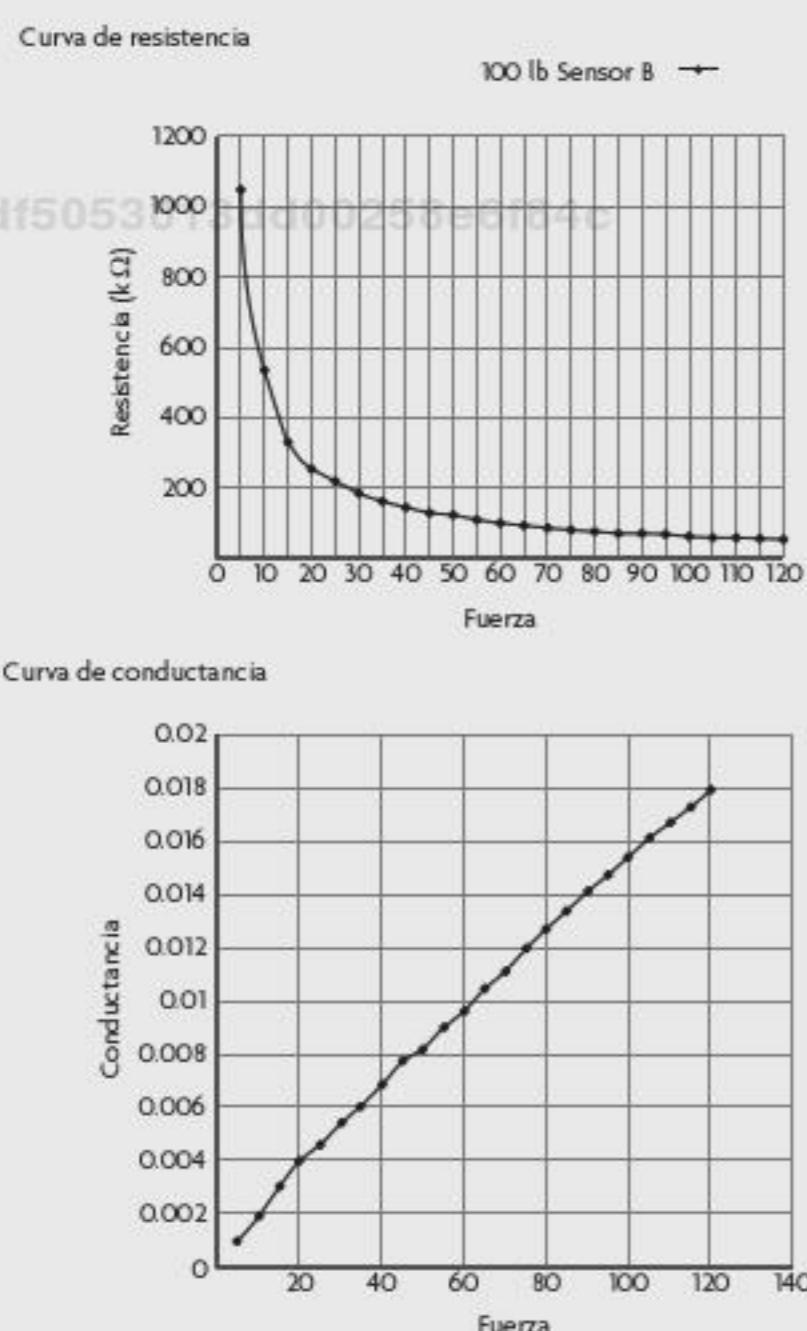
El sensor FlexiForce® (véase figura 7.28) es una placa delgada de circuito impreso flexible, que tiene la característica de variar la resistencia entre sus terminales al presionar o flexionar el área sensible ubicada en una circunferencia de 9.52 mm de diámetro al final del sensor.

Para conectar el sensor que se muestra en la figura 7.28 se utilizan las terminales de ambos extremos, debido a que es en estas donde se presenta la variación en la resistencia.



**Figura 7.28** Sensor FlexiForce® A201.

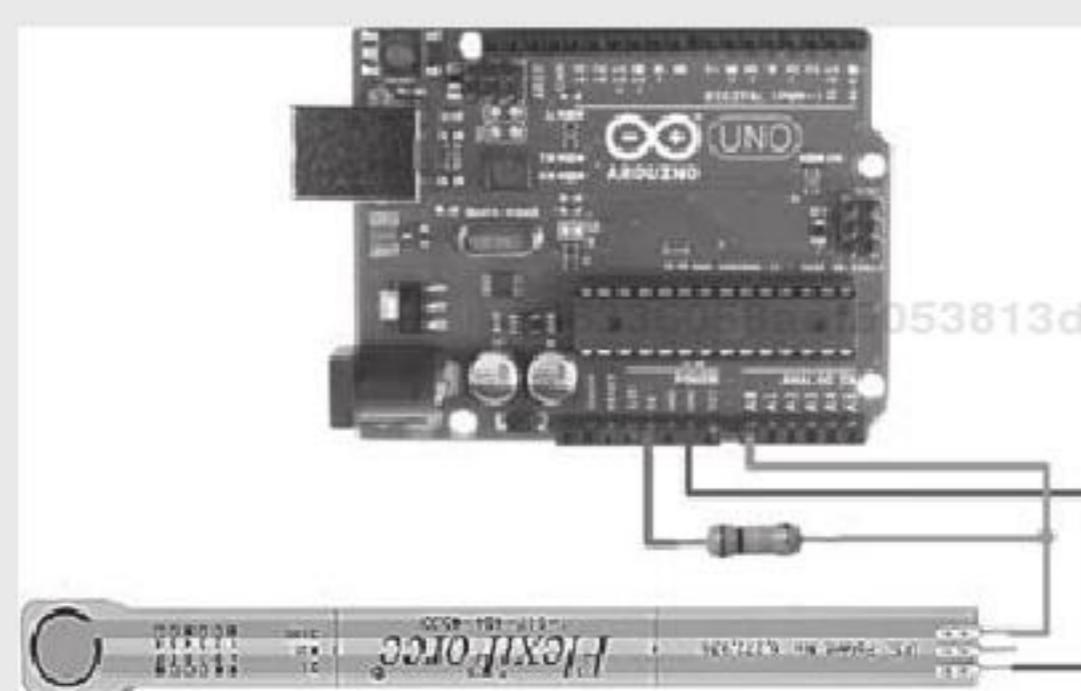
Las curvas de la resistencia en función de la fuerza aplicada en el sensor siguen una tendencia similar a la que se muestra en la figura 7.29, con una resistencia muy grande al no aplicar una fuerza que flexione al sensor y con una resistencia menor al ser presionado con más fuerza. La conductancia, que es el inverso de la resistencia, es casi linealmente proporcional a la fuerza aplicada. Para la calibración del sensor se pueden hacer mediciones comparando alguna fuerza conocida con la resistencia obtenida en el sensor FlexiForce®, con lo cual se obtienen gráficas análogas como las de la figura 7.29.



**Figura 7.29** Curvas de fuerza-resistencia y dureza-conductancia.

Los pines que deben conectarse son los siguientes:

- Terminal de un extremo: deberá conectarse en serie con la resistencia de 100 KΩ hacia VCC, a su vez esta terminal va conectada a la entrada analógica A0 del Arduino®.
- Terminal del otro extremo: deberá conectarse a la tierra común del Arduino®.
- Terminal del centro: no tiene conexión.



**Figura 7.30** Conexión con Arduino®.

El circuito a medir es un divisor de voltaje donde una resistencia, en este caso  $R_1$ , es fijada a 100 KΩ. El cálculo de la resistencia desconocida, que en este ejercicio es el sensor FlexiForce®, se obtiene con el auxilio de la siguiente ecuación de divisor de voltaje:

$$V_0 = V_i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Debido a que el voltaje medido se adquiere a través del convertidor ADC de 10 bits del Arduino®, la conversión sería:

$$V_0 = V_{\text{ADC}} \frac{5}{1023}$$

Sustituyendo 1 en 2:

$$V_{\text{ADC}} \frac{5}{1023} = 5 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Aplicando algunos pasos algebraicos se tiene:

$$R_2 = R_1 \frac{V_{\text{ADC}}}{1023 - V_{\text{ADC}}}$$

La conductancia se calcula en forma directa con el inverso de la resistencia  $R_2$ .

Para llevar a cabo la medición de la fuerza se tomará en cuenta que es directamente proporcional a la conductancia. Se considera que al aplicar una fuerza de 10 lb se obtiene una resistencia de 66.666 KΩ (es); por tanto, la fuerza se puede calcular con la ecuación:

$$\text{Fuerza} = \text{conductancia} \cdot \frac{10}{0.015}$$

```

//Código
void setup() {
Serial.begin(9600);
}

void loop() {
float x=analogRead(0);
float R1=100,R2=0,C=0,F=0;
//R1 es igual a 100 KOhms en esta aplicación
R2=x*R1/(1023.1-x);
//Con el fin de no dividir entre cero el
denominador es (1023.1-x) C=1/R2;
//Cálculo de la conductancia
F=C*10/0.015;
//Cálculo de la fuerza suponiendo que es
directamente proporcional a la
//conductancia y teniendo una equivalencia
de 10 lb para 66.666 KOhms

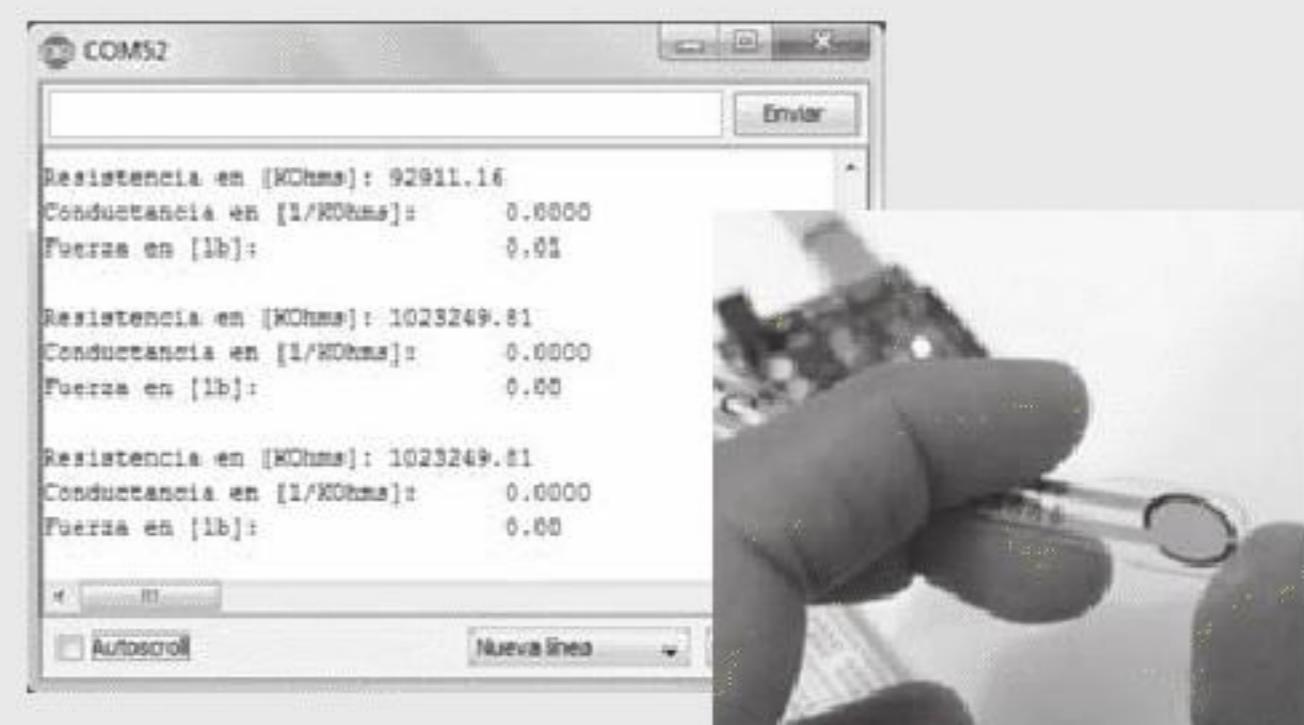
//Impresión en el monitor serial de los
resultados calculados
Serial.print("Resistencia en [KOhms]: ");
Serial.println(R2);

Serial.print("Conductancia en [1/KOhms]: \t");
Serial.println(C,4);

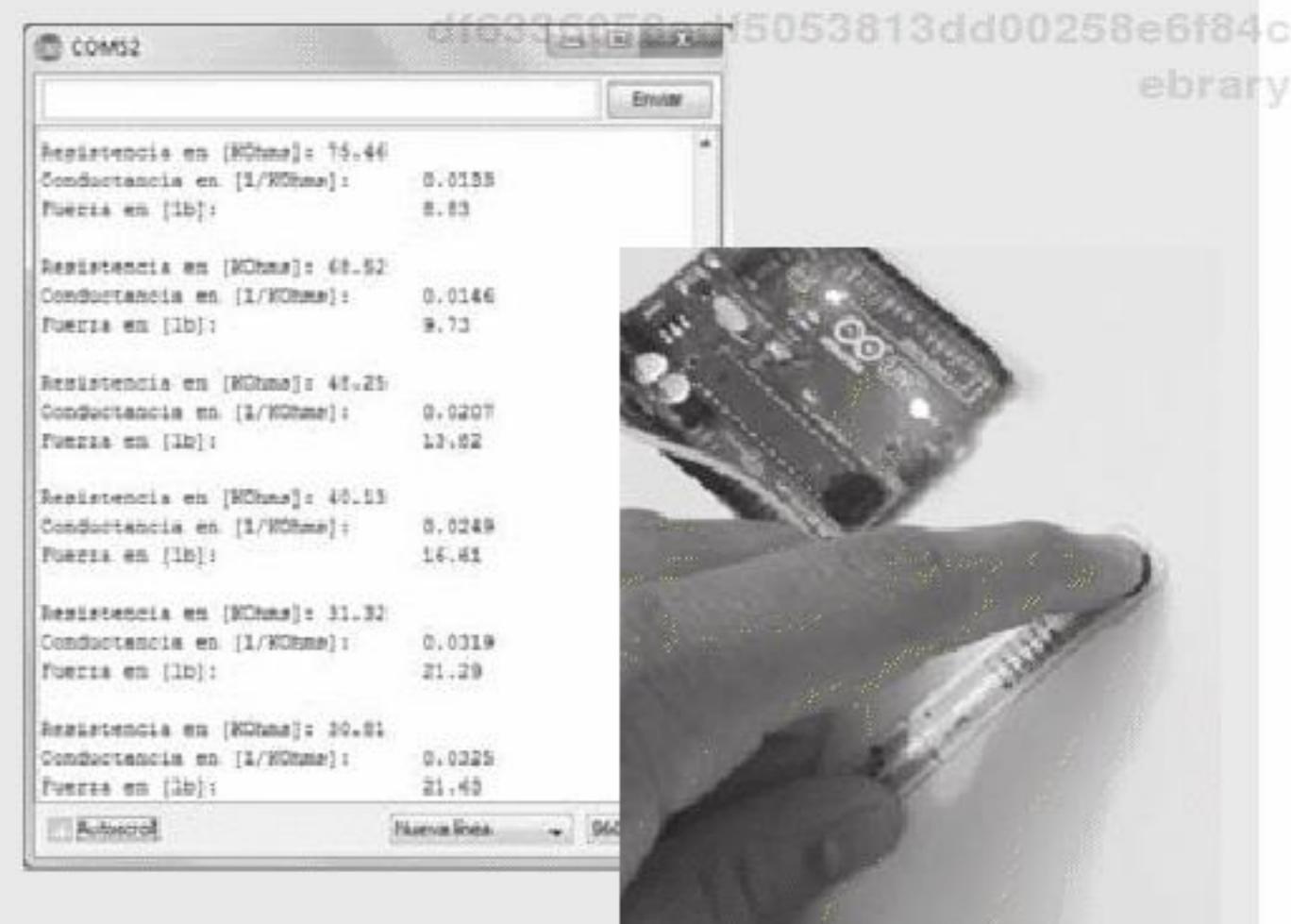
Serial.print("Fuerza en [lb]: \t\t");
Serial.println(F);
Serial.println();

delay(500);
}

```



**Figura 7.31** Sin carga.



**Figura 7.32** Aplicando una carga incremental.

## Ejercicio de aplicación

### Sensor FSR

#### Objetivo

Medir la variación de resistencia del sensor FSR a consecuencia de la aplicación de una fuerza utilizando el Arduino Uno®.

#### Material

- Sensor FSR de 0.5"
- Arduino Uno®
- Cables de conexión
- Una resistencia de 10 kΩ

#### Desarrollo

#### Descripción del FSR

El FSR (Force Sensing Resistor; véase figura 7.33) es un sensor que varía su resistencia en función de la carga que se le

aplique. Su resistencia disminuye a mayor fuerza y viceversa. A pesar de su sensibilidad, este sensor no es apropiado para mediciones precisas.



**Figura 7.33** Sensor FSR.

Las relaciones entre fuerza-resistencia y fuerza-conductancia de este sensor se observan en la gráfica de la figura 7.34.

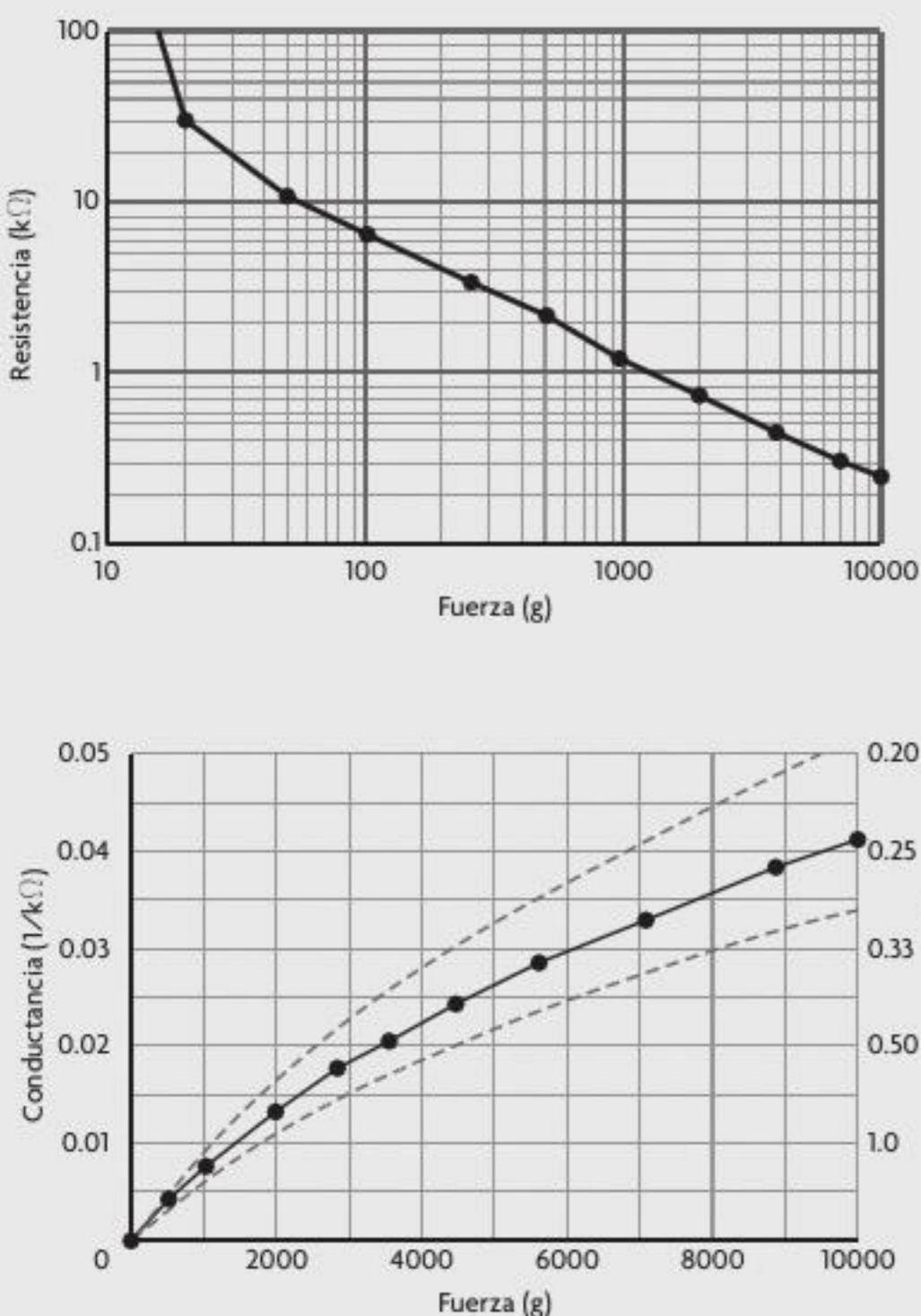


Figura 7.34 Curvas de fuerza-resistencia y fuerza-conductancia.

Los pines que deben conectarse son los siguientes:

- Terminal de un extremo: deberá conectarse en serie con la resistencia de  $10\text{ k}\Omega$  hacia VCC; a su vez esta terminal va conectada a la entrada analógica A0 del Arduino®.
- Terminal del otro extremo: deberá conectarse a la tierra común del Arduino®.

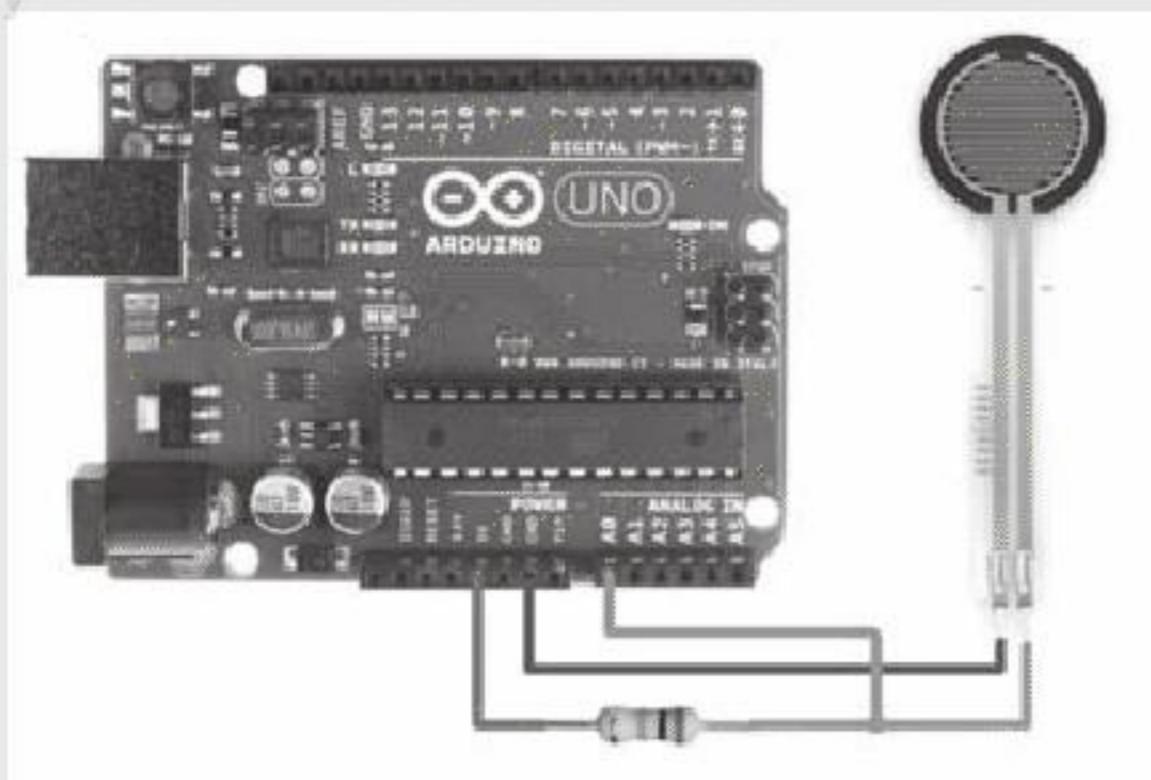


Figura 7.35 Conexión con Arduino®.

El circuito a medir es un divisor de voltaje donde una resistencia  $R_1$  es fijada, en este caso, a  $10\text{ k}\Omega$ ; el cálculo de la resistencia desconocida, que en este caso es el sensor FSR,

se obtiene con el auxilio de la siguiente ecuación de divisor de voltaje:

$$V_0 = V_i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Debido a que el voltaje medido se adquiere a través del convertidor ADC de 10 bits del Arduino®, la conversión sería:

$$V_0 = V_{\text{ADC}} \frac{5}{1\,023}$$

Sustituyendo 1 en 2:

$$V_{\text{ADC}} \frac{5}{1\,023} = 5 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Aplicando algunos pasos algebraicos se tiene:

$$R_2 = R_1 \frac{V_{\text{ADC}}}{1\,023 - V_{\text{ADC}}}$$

Con base en la curva fuerza-resistencia de la figura 7.34 se puede hacer una aproximación de la fuerza que está haciendo presión en el sensor a través de la siguiente ecuación polinomial:

$$F = 404.02 \cdot C^2 + 845.01 \cdot C$$

donde:

$$\text{Conductancia} = C = 1/R_2$$

//Código

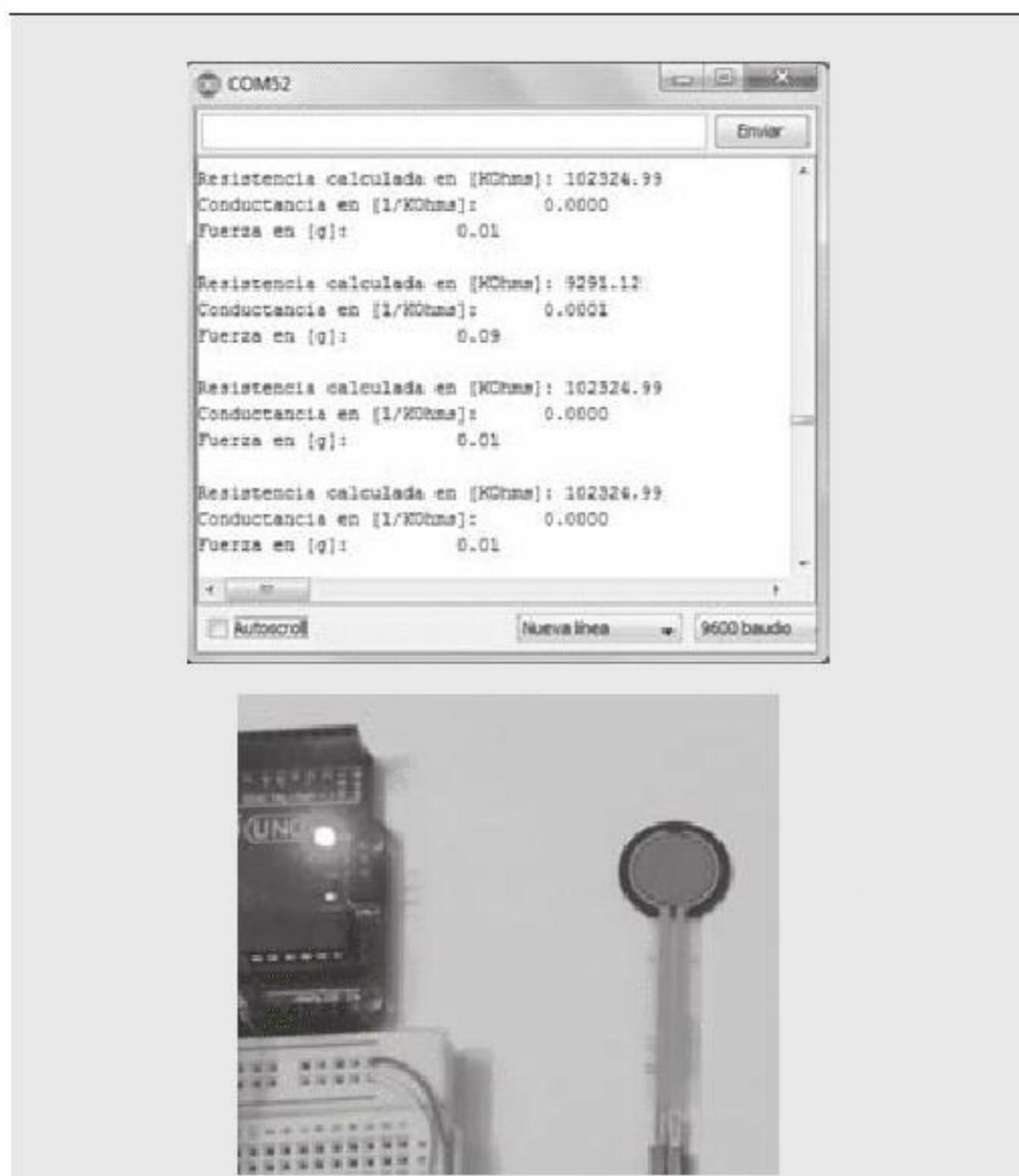
```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  float x=analogRead(0);
  float R1=10,R2=0,C=0; //R1 es igual a 10 Kohms
  //en esta aplicacion
  double F=0;
  R2=x*R1/(1023.1-x); //Con el fin de no dividir
  //entre cero el denominador es (1023.1-x)
  C=1/(R2);
  F=404.02*C*C + 845.01*C; //aproximacion
  //polinomial

  Serial.print("Resistencia calculada en
  [KOhms]: ");
  Serial.println(R2);
  Serial.println();

  Serial.print("Conductancia en [1/KOhms]: \t");
  Serial.println(C, 4);

  Serial.print("Fuerza en [lb]: \t\t");
  Serial.println(F);
  Serial.println();
  delay(500);
}
```



**Figura 7.36** Sin carga.



**Figura 7.37** Aplicando una fuerza incremental.

### Flex sensor

Un *flex sensor* es un sensor que puede clasificarse como piezoresistivo, el cual está constituido por elementos resistivos de carbono dispuestos en un arreglo en general lineal (véase figura 7.38). En este arreglo se colocan los elementos sobre un estrato conductor que a su vez se deposita sobre un sustrato flexible. La resistencia de un *flex sensor* varía cuando este es flexionado. El cambio de resistencia del sensor está directamente relacionado con la deflexión que se aplique sobre este, aunque no en términos de la deflexión del sensor sino del radio de curvatura del sensor después de ser flexionado; entre mayor sea la curvatura, mayor será la resistencia del sensor, y viceversa.

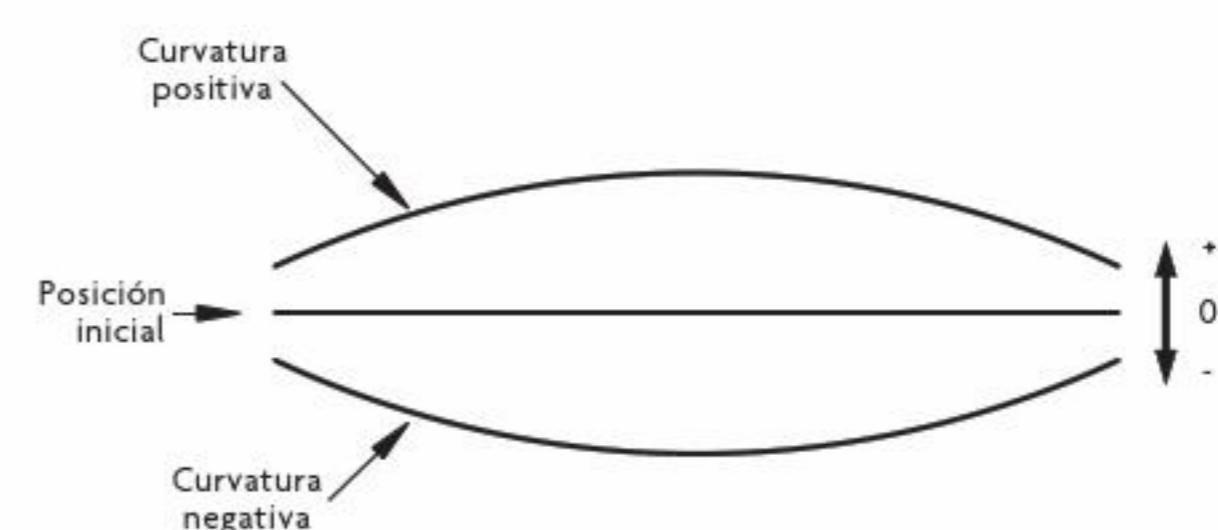
Es posible encontrar *flex sensors* que midan de forma unidireccional o bidireccional; es decir, existen *flex sensors* que solo miden cuando su curvatura es positiva, y cuando la curvatura llega a ser negativa no presentan cambios, y *flex sensors* que varian su salida tanto para curvaturas positivas como para curvaturas negativas (véase figura 7.39).

Además de medir radios de curvatura, es posible relacionar las variaciones de resistencia de un *flex sensor* con posiciones angulares. Una aplicación típica en la que se miden ángulos es en la caracterización de movimientos de los dedos humanos, que luego pueden servir para controlar algún sistema. Otra forma de relacionar la variación de resistencia de un *flex sensor* es respecto al momento flector aplicado sobre este mismo.

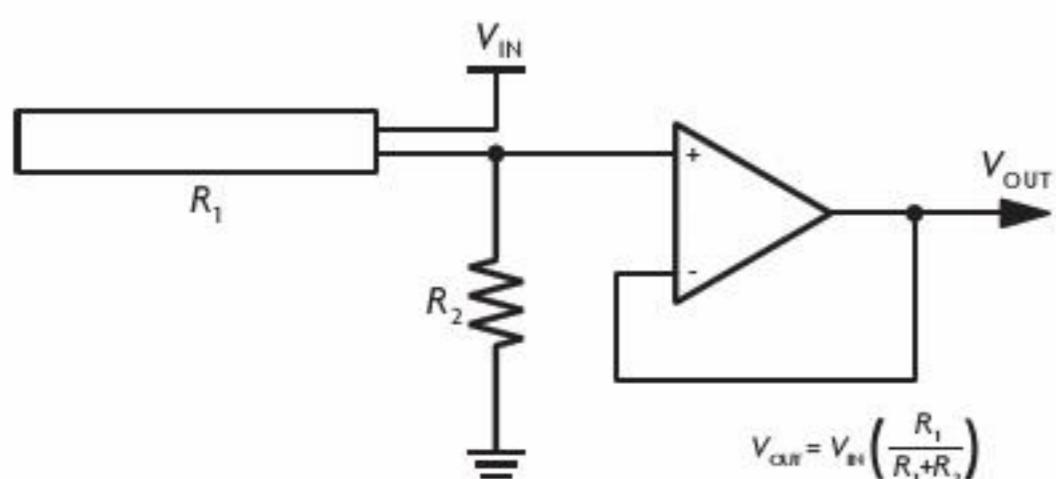
De forma comercial, es posible encontrar *flex sensors* con longitudes entre 25.4 mm y 127 mm, con resistencias nominales que van de 1 k $\Omega$  hasta 200 k $\Omega$  y espesores de menos de



**Figura 7.38** Flex sensor.



**Figura 7.39** Curvatura de un *flex sensor*.



**Figura 7.40** Circuito de acondicionamiento para un *flex sensor*.

## Ejercicio de aplicación

### Flex sensor

#### Objetivo

Medir la curvatura en grados de un *flex sensor* mediante el uso del Arduino Uno®.

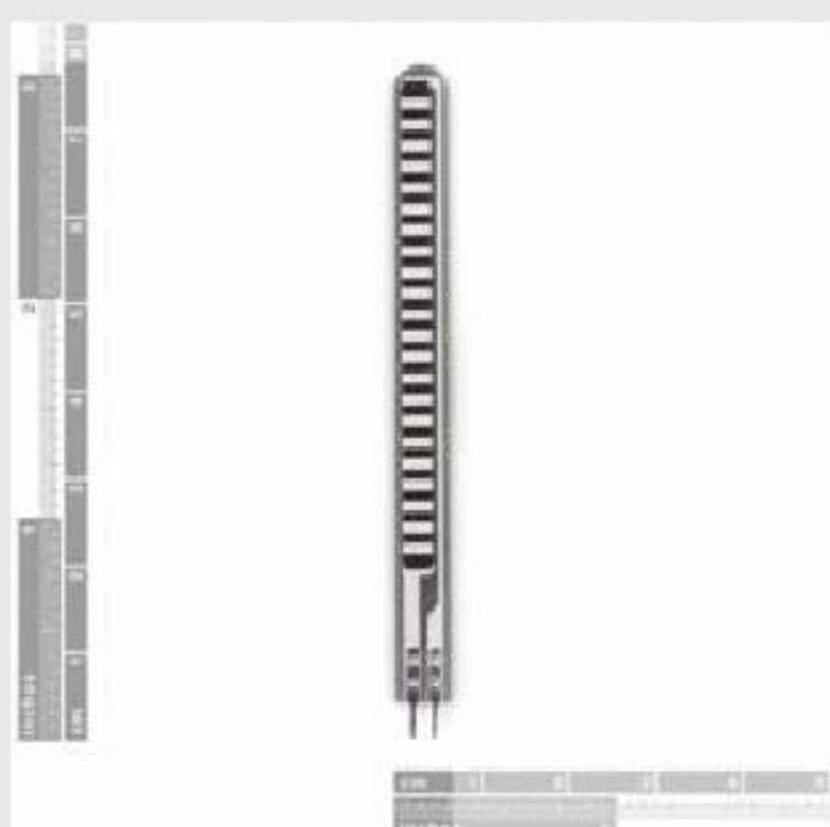
#### Material

- Arduino Uno®
- *Flex sensor*
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- 1 resistencia de 56 kΩ
- 1 amplificador operacional LM358
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del flex sensor

El *flex sensor* (véase figura 7.40) es un sensor que varía su resistencia en función de su curvatura. Tiene un valor de resistencia de aproximadamente 25 kΩ cuando está por completo plano (curvatura cero), y esta varía conforme al cambio de curvatura. A mayor curvatura, mayor es su valor de resistencia y viceversa.



**Figura 7.41** Flex sensor.

0.5 mm. Los fabricantes de este tipo de sensores suelen ofrecer fabricaciones especiales de acuerdo con los requerimientos del cliente.

El circuito de acondicionamiento para obtener la señal de salida de un *flex sensor* se puede hacer utilizando un circuito divisor de voltaje cuya salida se conecte a un amplificador de ganancia unitaria o a un amplificador inversor o no inversor de ganancia ajustable según se requiera.

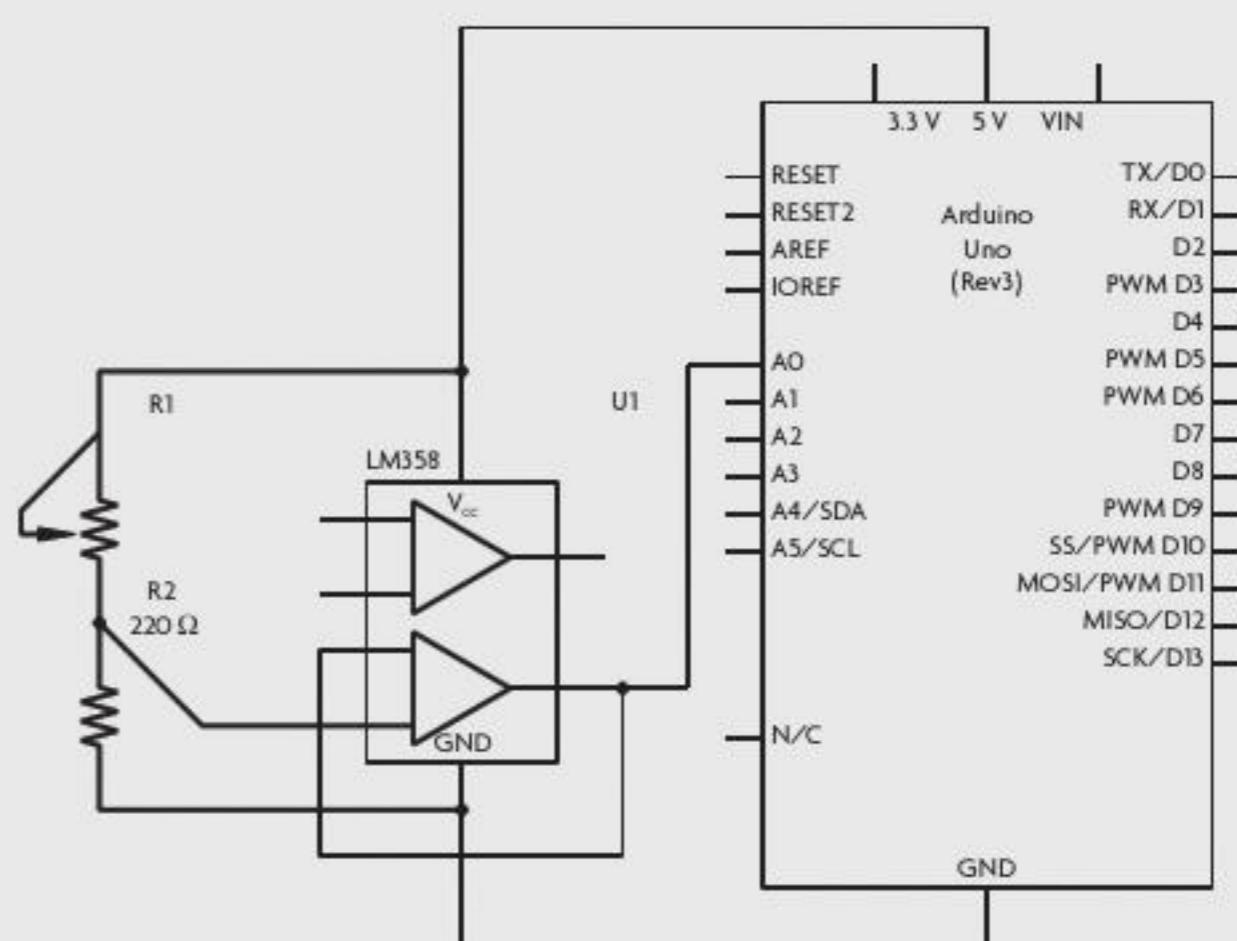
### Construcción del circuito

Las figuras 7.42 y 7.43 muestran el diagrama del circuito para medir en grados la curvatura del sensor. Para medir la variación de la resistencia del sensor se requiere de un divisor de voltaje. La resistencia fija del divisor se establece en un valor relativamente cercano al que presenta el *flex sensor* en su posición de reposo (completamente plano). Si se utiliza una resistencia muy pequeña o muy grande, resulta difícil detectar los cambios de curvatura.

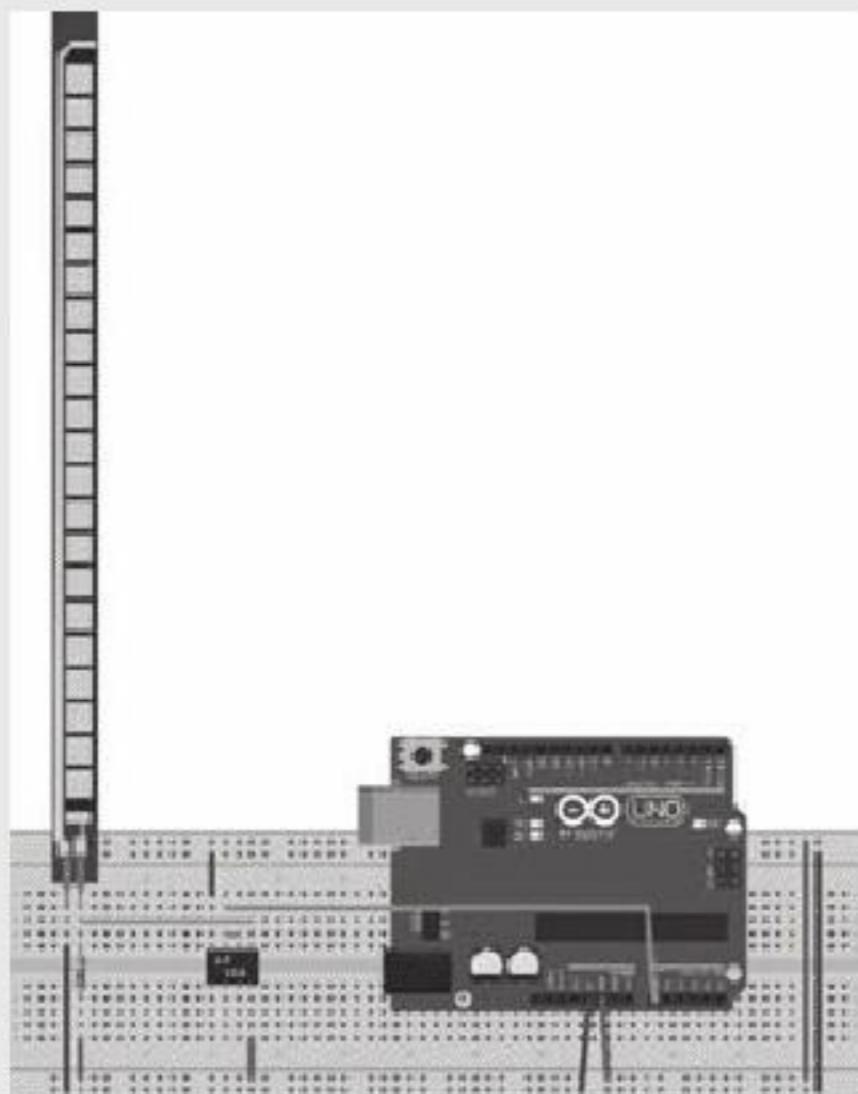
En la configuración del divisor de las figuras 7.42 y 7.43 empleado para la práctica se observa que cuando el *flex sensor* incrementa su curvatura, también su resistencia lo hará, provocando una caída en el voltaje de la resistencia fija y una disminución del voltaje de salida.

La salida del divisor de voltaje previo al Arduino® se conecta a través de un seguidor de voltaje, que al tener una impedancia de entrada muy alta aísla el sensor del resto del circuito, evitando alterar la medición del *flex sensor*.

La señal de salida del *flex sensor* se conecta al PIN analógico A0 del Arduino® para su posterior conversión y procesamiento.



**Figura 7.42** Diagrama en protoboard del circuito para la lectura del *flex sensor*.



**Figura 7.43** Diagrama del circuito del *flex sensor*.

## Código

### Descripción del programa

En el siguiente programa se realiza a través del Arduino® la conversión analógica-digital (ADC) de la señal del *flex sensor*. Como la señal presenta múltiples variaciones, será necesario obtener un promedio de 15 muestras.

A partir de este promedio se hace la conversión a grados con la función map(). Los parámetros de esta función se obtienen de forma experimental midiendo el voltaje del divisor a ciertas curvaturas del *flex sensor*.

```
*****Flex sensor*****
/*
 *El flex sensor es un sensor de tipo resistivo
 *que varia su
 *resistencia
 *según su deformación. Podemos fijar el punto
 *medio del
 */
/*sensor y a partir de ahí flexionar en
 *diferentes ángulos para su
 *medición.
 */
/*Como el sensor es susceptible a ruido es
 *necesario hacer pasar la
 *señal a través de un seguidor de voltaje y
 *obtener el promedio de
 *algunas mediciones
 *con el fin de mitigar estas variaciones
 */
/*A través del Arduino UNO se
 *medirá la deformación en grados del flex
 /*sensor tomando como vértice su punto medio
 */
*****
```

```
//Se declaran las variables a emplear
int flexSensor = 0, count;

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
    //comunicación serie a 9600 baudios
}

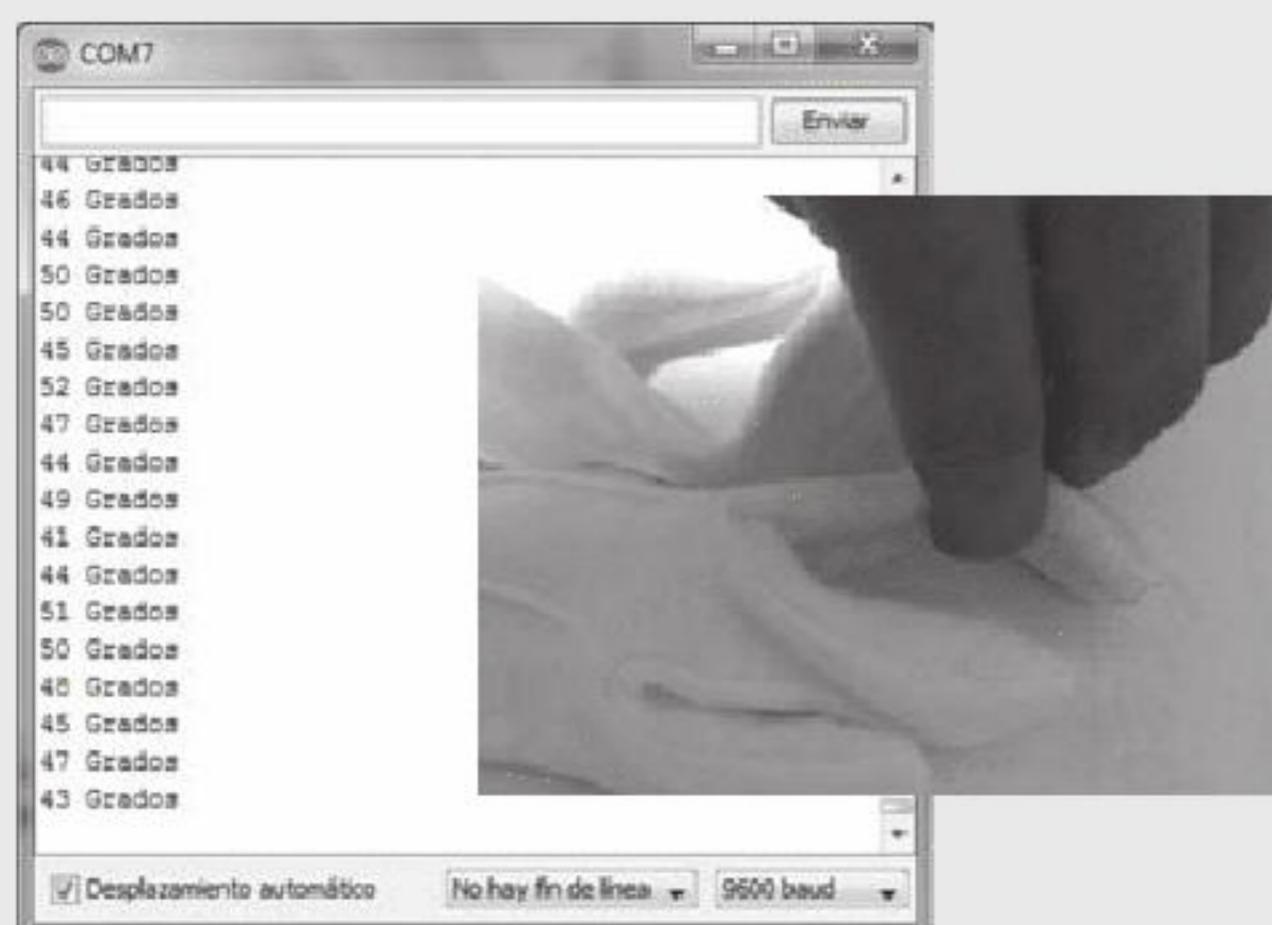
void loop()
{
    count++; //Se incrementa el
    //contador que indicará el número
    //de valores a promediar
    int readFlex = analogRead(A0); //Se hace la lectura del sensor
    flexSensor = flexSensor + readFlex; //Se suman
    los valores del sensor
    //para promediarlos

    if (count == 15) //Cuando se
        //acumulen 15 valores se
        //promediarán
    {
        count = 0; //Se
        //reinicia el contador
        flexSensor = flexSensor / 15; //Se obtiene
        el promedio
        flexSensor = map(flexSensor, 517, 633, 0,
        90); //Se escala la lectura del flex sensor
        //a grados, los límites se obtienen de forma
        //experimental con un divisor de voltaje cuya
        //resistencia fija es de
        //56 kOhms
        Serial.print(flexSensor); //Se
        //imprimen los resultados en
        //grados
        Serial.println(" Grados");
        flexSensor = 0; //Se limpia el
        //acumulador, para iniciar una nueva lectura
    }
    delay(10); //Retardo para regular la
    //velocidad de operación
    //del programa
}
```

### Pruebas

Se realizan tres mediciones del *flex sensor* en tres distintas posiciones: 0, 45 y 90 grados. Cabe resaltar que el *flex sensor* no es un sensor muy preciso y su uso se debe a su capacidad de detectar cambios de curvatura (donde no se requiere una gran precisión).

El *flex sensor* se ha adherido a un guante para tener un mejor control sobre este.

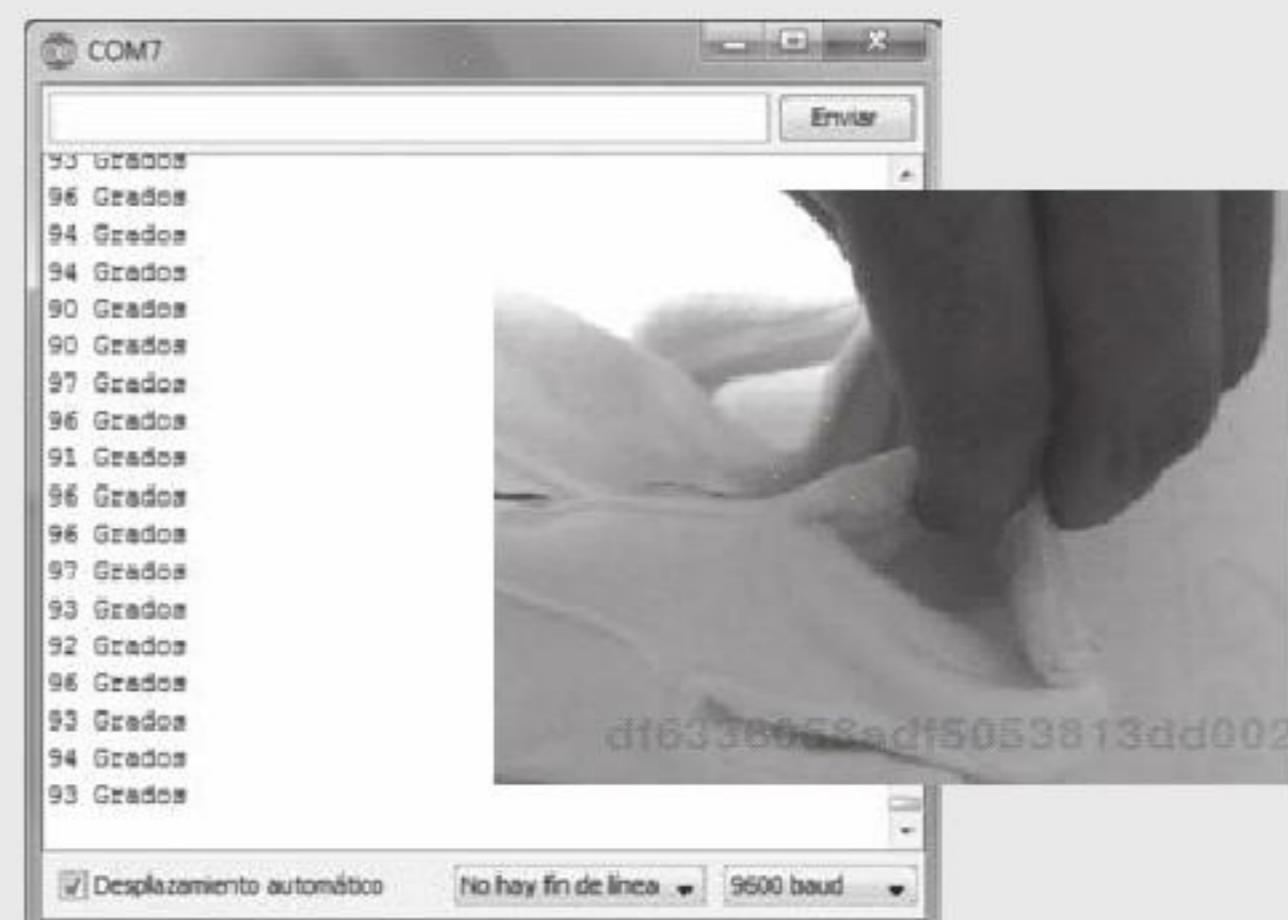


**Figura 7.44** a) El flex sensor se inclina a 45°. b) La lectura por parte del Arduino® es muy próxima, oscilando entre el valor esperado.

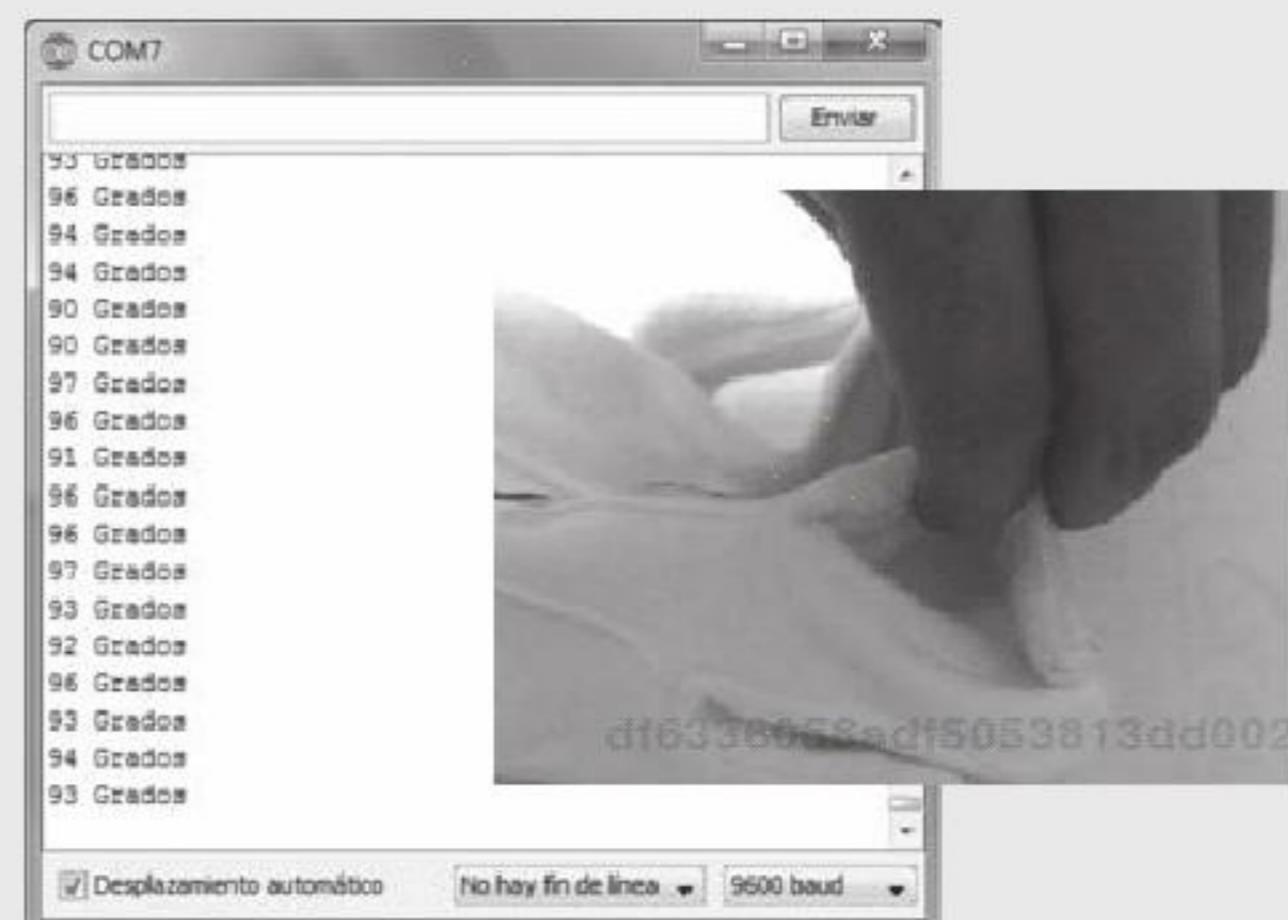


**Figura 7.44** a) El flex sensor se inclina a 45°. b) La lectura por parte del Arduino® es muy próxima, oscilando entre el valor esperado.

### Flex sensor a 0°



**Figura 7.46** a) El flex sensor a 90°. b) La lectura de la curvatura según el Arduino® es muy próxima al valor esperado.



**Figura 7.46** a) El flex sensor a 90°. b) La lectura de la curvatura según el Arduino® es muy próxima al valor esperado.

### Sensores de torque



**Figura 7.47** Sensor de torque estático.

La medición del torque o par torsor que se aplica sobre un eje puede conocerse mediante el uso de métodos de medición indirectos. Al tener conocimiento de las características del actuador que genera el torque, es posible conocer la magnitud de dicho torque si se miden el voltaje y la corriente de operación del actuador.

Otra opción es usar un método de medición directo, para lo cual se utiliza un sensor que servirá para medir la magnitud del torque aplicado. Existen dos tipos básicos de sensores de torque: los sensores de torque estático y los sensores de torque dinámico; la diferencia entre uno y otro tipo radica en la forma en que se lleva a cabo la medición y la construcción del sensor.

Un sensor de torque estático (véase figura 7.47) no tiene ninguna parte móvil en su estructura; tiene un eje que sirve para acoplar el sensor al actuador o sistema a medir, además de ser el elemento sobre el que se realiza la detección. Se usa un arreglo de galgas extensométricas montadas sobre el eje del sensor; el arreglo utilizado es similar al expuesto

para las celdas de carga. Se usan cuatro galgas, donde dos trabajan a tensión y dos a compresión; sin embargo, la orientación de las galgas será a  $45^\circ$ , ya que la medición que se desea realizar es la de las deformaciones cortantes que experimenta el eje del sensor. La deformación cortante máxima está definida por:

$$\gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G} \quad (7.25)$$

donde:

$\gamma_{\max}$ : deformación cortante máxima

$\tau_{\max}$ : esfuerzo cortante máximo [Pa]

$G$ : módulo cortante [Pa]

Entonces, una vez conocida la deformación cortante del eje, es posible conocer los esfuerzos cortantes, si se conoce el módulo cortante del material del que se fabricó el eje del sensor; si se desconoce el módulo cortante, este se puede calcular conociendo los valores de módulo de Young y eficiente de Poisson del material, empleando la relación:

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \quad (7.26)$$

Una vez calculado el máximo esfuerzo cortante es posible calcular el torque que generó dichos esfuerzos utilizando la ecuación:

$$T = \frac{\tau_{\max}}{r} J \quad (7.27)$$

donde:

$T$ : torque aplicado [Nm]

$r$ : radio del eje [m]

$J$ : momento polar de inercia del eje [ $m^4$ ]<sup>8</sup>



Figura 7.48 Medición de torque estático.

Las aplicaciones de los sensores estáticos de torque son principalmente para caracterización o prueba de sistemas rotacionales o medir la fuerza de apriete de pernos o tornillos en sistemas mecánicos de precisión (véase figura 7.48). Los rangos de medición de estos sensores van de los 0.03 Nm hasta los 271 000 Nm, con resistencias nominales típicas de  $350 \Omega$  y voltajes de operación de entre 10 V y 20 V.

Por otra parte, los sensores de torque dinámicos tienen un eje con libertad de rotación sobre el cual se monta el arreglo de galgas (véase figura 7.49). Este tipo de sensores se coloca entre el actuador y el sistema o carga que se desea mover; para acoplar el sensor dinámico se suelen usar coples flexibles tanto entre el sensor y el actuador como entre el sensor y la carga;

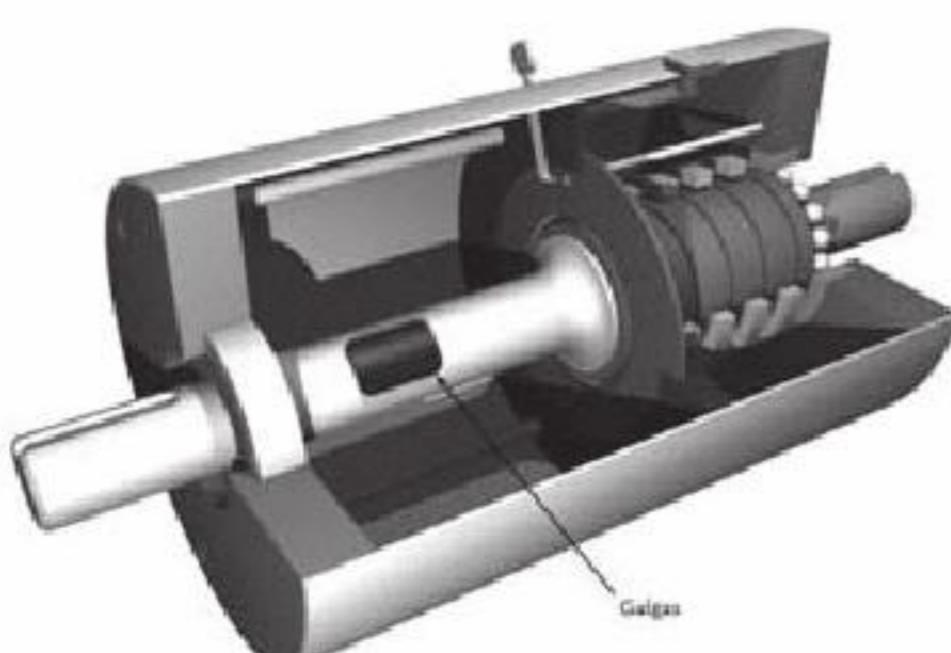


Figura 7.49 Sensor dinámico de torque.

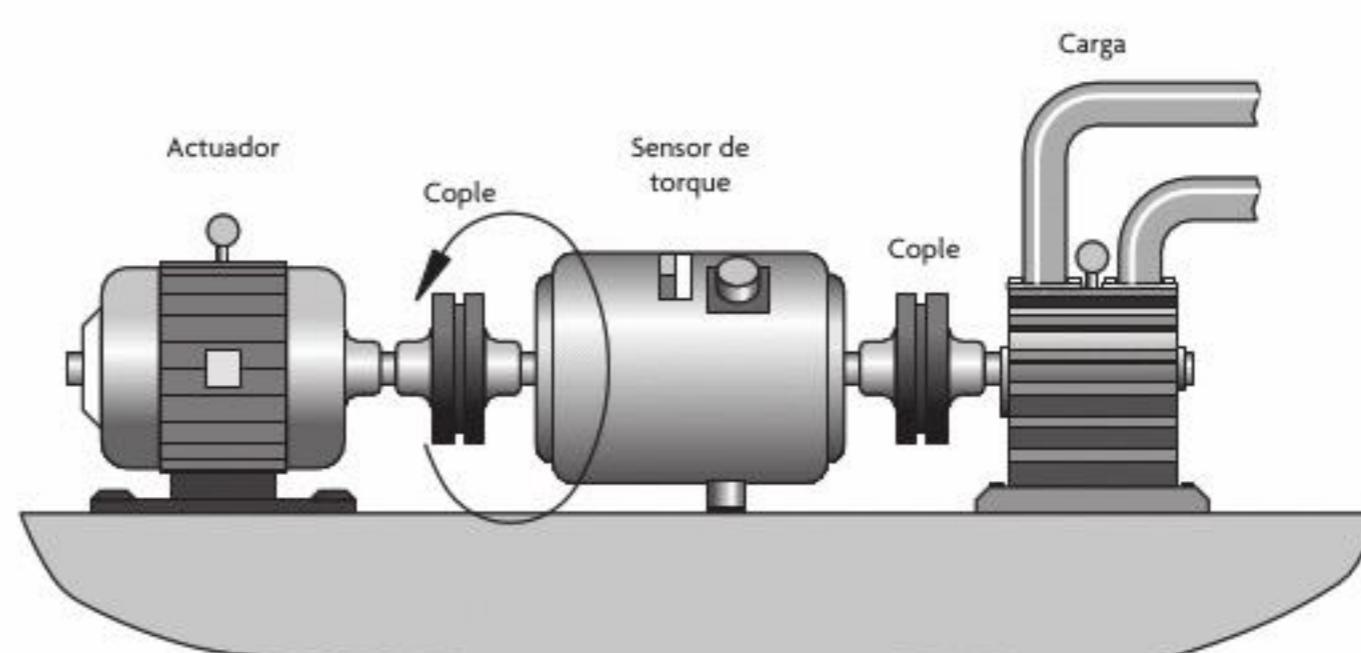


Figura 7.50 Acoplamiento de un sensor de torque dinámico.

<sup>8</sup> El momento polar de inercia es una medida de la inercia rotacional de un cuerpo y representa la oposición del cuerpo a rotar.

esto se hace con el fin de evitar que las desalineaciones provoquen una lectura errónea del torque (véase figura 7.50).

Los sensores de torque dinámicos presentan rangos de medición de 0.06 Nm hasta 565 000 Nm, resistencias nominales de 350  $\Omega$  y voltajes de operación entre 10 V y 20 V en corriente directa.

## 7.2 Sensores piezoelectrómicos

La naturaleza del fenómeno piezoelectrónico hace posible el uso de dichos materiales en sensores de fuerza y torque. Los materiales más utilizados en este tipo de sensores son cuarzo, fosfato de galio, sulfato de litio, tantalio de litio o algún polímero ferroeléctrico de la familia PVDF (fluoruro de polivinilideno). Los sensores de fuerza y torque piezoelectrómicos tienen la ventaja de ser más compactos que los piezoresistivos; además, su sensibilidad es independiente del volumen, ya que depende principalmente del material que se utilice. Otra ventaja de los sensores piezoelectrómicos respecto a los piezoresistivos son las altas frecuencias naturales que poseen, lo que los hace muy útiles en mediciones dinámicas y de impacto. Pero por otro lado los sensores piezoresistivos resultan más estables y tienen un comportamiento más lineal, presentando un mejor desempeño en mediciones de alta precisión.

### Sensores de fuerza

El diseño del sensor piezoelectrónico se puede hacer de tal forma que responda a cualquiera de los cuatro tipos de fenómenos piezoelectrómicos o, visto de otra forma, el diseño geométrico del sensor permite que este sea sensitivo a una determinada condición de carga.

Los cuatro fenómenos piezoelectrómicos son el longitudinal, el cortante, el transversal y el hidrostático. Las geometrías circulares, de anillo o de placas cuadradas explotan el fenómeno piezoelectrónico longitudinal o el cortante; en este tipo de geometrías, la cara sobre la cual se aplica la carga suele ser la misma sobre la que se mide el voltaje de salida (véase figura 7.51). Otra geometría que se puede usar para explotar el fenómeno cortante es un eje circular sometido a torsión.

Las geometrías usadas para trabajar con el fenómeno piezoelectrónico transversal son en forma de eje circular, prismas regulares, cilindros o vigas a flexión (véase figura 7.52). En estas geometrías, cuando se aplica una carga transversal, el voltaje de salida se presenta entre las caras no cargadas.

En el fenómeno hidrostático se pueden usar geometrías de prismas regulares, donde la carga se aplica en dirección normal sobre todas las caras; de manera ideal se restringe a las direcciones cartesianas x, y, z; entonces, la variación de voltaje se debe leer sobre estas mismas tres direcciones.

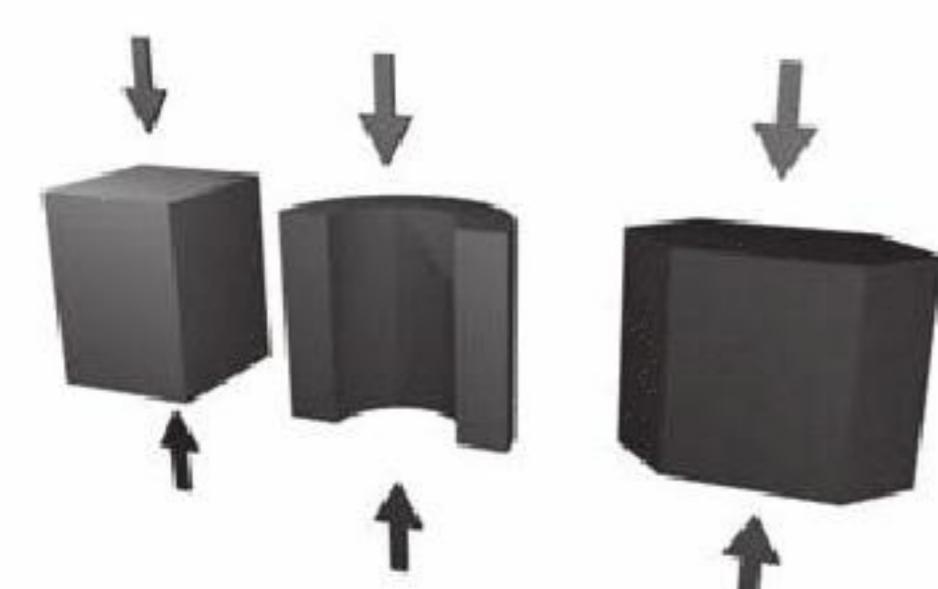
Para construir un sensor de fuerza piezoelectrónico se suele colocar el material activo entre dos placas metálicas sobre las cuales se aplican las fuerzas y además sirven como electrodos para realizar la medición de voltaje.

Como se dijo antes, la sensibilidad de un sensor piezoelectrónico dependería principalmente del material que se utilice para su fabricación; ahora se verá a qué se debe esto. Imagínese un material piezoelectrónico de área A dada en  $m^2$ , el cual se somete a una condición de carga uniaxial (véase figura 7.53); si se desprecia la deformación volumétrica del material, el esfuerzo normal resultante se puede calcular como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7.28)$$

donde:

**Figura 7.51** Geometrías típicas para sensores piezoelectrómicos.  
a) Para fenómeno longitudinal.  
b) Para el fenómeno cortante.



**Figura 7.52** Geometrías para sensores piezoelectrómicos para el fenómeno transversal.

$F$ : fuerza aplicada [N]

$\sigma$ : esfuerzo normal [Pa]

Si se considera que los electrodos que se conectan al material piezoelectrónico para fabricar el sensor están en cortocircuito, el campo eléctrico en el piezoelectrónico se puede considerar igual a cero; por tanto, la densidad de flujo eléctrico en el piezoelectrónico se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$D = C_{pz} \sigma \quad (7.29)$$

donde:

$D$ : densidad de flujo eléctrico [ $C/m^2$ ]

$C_{pz}$ : coeficiente piezoelectrónico [ $C/N$ ]

La ecuación anterior se puede reescribir como:

$$D = \frac{C_{pz} F}{A} \quad (7.30)$$

Para encontrar la carga eléctrica ( $q$  dada en Coulomb) que existe entre los electrodos del sensor, y considerando que estos tienen la misma área  $A$  que el material piezoelectrónico, se debe multiplicar la densidad de flujo eléctrico por el área, con lo que se obtiene:

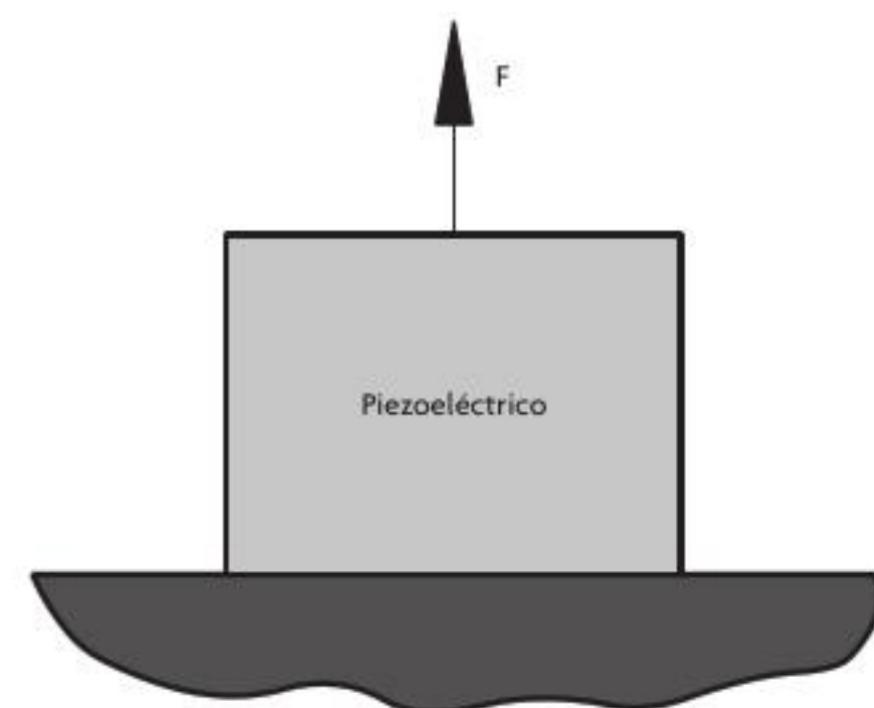
$$q = C_{pz} F \quad (7.31)$$

De la ecuación anterior se puede observar que existe una relación de proporcionalidad entre la carga eléctrica y la fuerza aplicada sobre el sensor, definida por la constante piezoelectrica, la cual es una propiedad definida para cada material piezoelectrónico.

Un sensor de fuerza piezoelectrónico muy común es el sensor de rondana (véase figura 7.54), el cual tiene una forma de disco (tiene sección transversal anular y un espesor pequeño) y es maquinado en acero. Dentro del disco de acero se colocan dos anillos de material piezoelectrónico separados por un electrodo, del cual se toma la lectura de salida del sensor. Estos sensores son diseñados para explotar el fenómeno longitudinal, teniendo rangos de medición que van de unos cuantos kN hasta más de 1 MN. La rigidez del sensor es un factor importante a considerar; al elegir un sensor de rondana, esta es dada en  $kN/\mu m$  y puede ir de  $1 kN/\mu m$  hasta  $100 kN/\mu m$ . Se puede utilizar un sensor con rango de medición superior al necesario si su rigidez es baja, ya que a pesar de trabajar en rangos mayores su poca rigidez permite leer fuerzas pequeñas.

Un sensor de fuerza piezoelectrónico que permite medir fuerzas dinámicas es el sensor lineal de compresión, que en realidad es una variación del sensor de rondana. Estos sensores tienen forma de una guía longitudinal, con una zona central circular, donde se insertan los piezoelectrónicos y electrodos. La idea básica es que un carro que recorre la guía aplica fuerza en una zona diferente del sensor conforme se desplaza; al saber en dónde se aplica la fuerza se puede conocer la posición del carro.

Además, también existen sensores piezoelectrónicos similares a las celdas de carga antes explicadas; las configuraciones más usadas son la de viga S y la de columna.



**Figura 7.53** Material piezoelectrónico sometido a carga uniaxial.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

**Figura 7.54** Sensor de rondana.



## Sensores de torque

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## Ejercicio de aplicación

### Uso de un sensor piezoelectrónico de vibraciones

#### Objetivo

Medir el impacto sobre una superficie a través del sensor de vibración utilizando el Arduino Uno®.

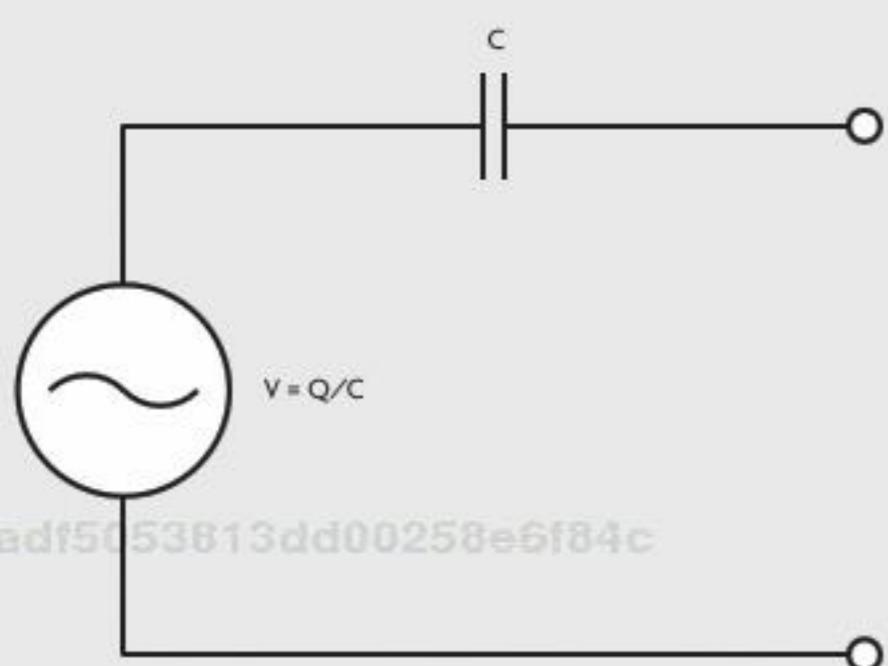
#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor de Vibración MEAS
- 1 resistencia de  $1 M\Omega$ , 5 de  $220 \Omega$
- Amplificador operacional LM358
- 2 LED verdes, 2 amarillos y uno rojo
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del sensor de vibración

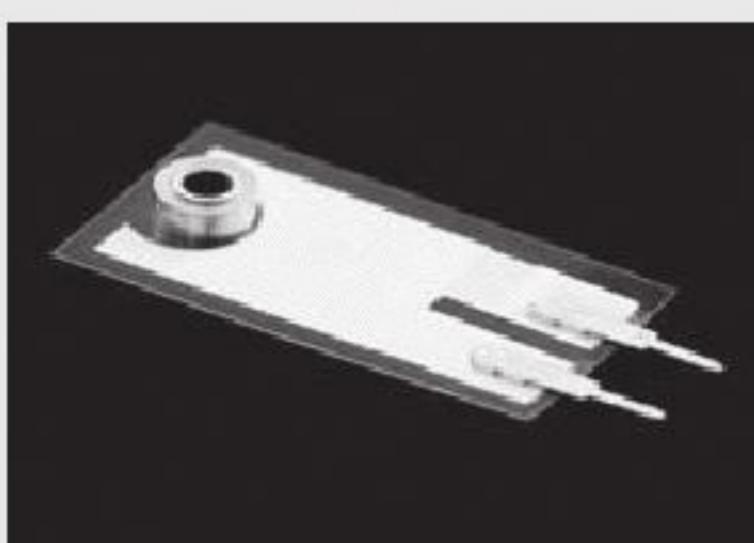
El sensor de vibración MEAS genera un voltaje en función de su frecuencia de vibración y su curvatura. El circuito equivalente del sensor consiste en una fuente de voltaje en serie con un capacitor, como se aprecia en la figura 7.55.



**Figura 7.55** Circuito equivalente del sensor de vibración.

Este sensor cuenta con múltiples aplicaciones: medidor de vibración, sensor de impacto o simplemente como un interruptor al variar su curvatura.

En la siguiente práctica se utilizará como un sensor de impacto.

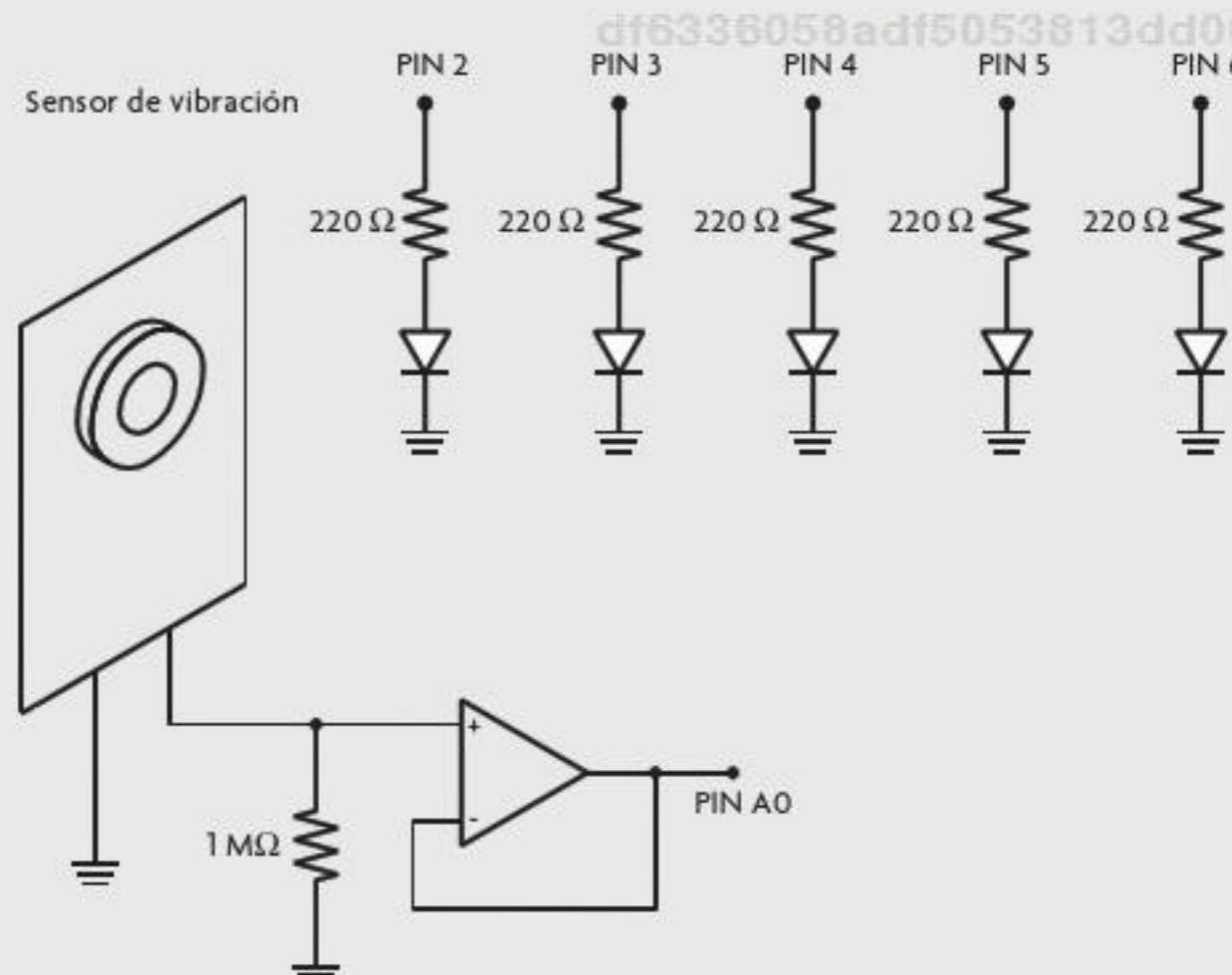


**Figura 7.56** Sensor de vibración con masa.

#### Construcción del circuito

El circuito de la figura 7.57 medirá el impacto sobre la superficie donde se ancla el sensor de vibración. Dependiendo de la intensidad, como indicador, encenderá determinado número de LED. Si el impacto es nulo, ningún LED enciende; en cambio, si este es lo suficientemente fuerte, todos o la mayoría de los LED se activan.

Se conecta una resistencia de carga de  $1 M\Omega$  en paralelo con el sensor. La salida se conecta a un seguidor de voltaje para acoplar las impedancias. Los LED se conectan a las terminales digitales 2-6 del Arduino®.



**Figura 7.57** Circuito de conexión para sensor de vibración utilizado como medidor de impacto.

#### Código

##### Descripción del programa

El siguiente programa realiza la lectura y conversión analógico-digital ADC de la señal del sensor de vibración con una resolución de 10 bits.

Dependiendo del valor de la lectura analógica se enciende un determinado número de LED. Si además es superior a un determinado rango, se emite una alerta en el monitor serie.

```
*****Sensor de vibracion*****
/*
/*El sensor de vibracion consiste en una
delgada placa de silicio que
/*genera una
diferencia de potencial al sufrir alguna
deformacion. Esta
/*deformacion puede ser
por vibracion o impacto. Estos sensores son
/*utiles para medir la frecuencia de
vibracion, la fuerza de algun
/*impacto o bien pueden utilizarse como
interruptores.
*
```

```

/*
/*En el siguiente programa se realiza la
medicion del impacto sobre la
superficie del sensor indicando la
intensidad sobre 5 LED, si
sobrepasa un limite se envia
un mensaje al monitor serie.
***** */

//Se declaran las variables a emplear
int readSensor;

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
    comunicacion serie a 9600 baudios
    for (int i = 0; i < 5; i++) //Se declaran
    los PIN DIG 2~6 como salida
    //para los 5
    pinMode(i + 2, OUTPUT); //LED
    indicadores
}

void loop()
{
    readSensor = analogRead(A0); //Lectura del
    sensor de vibracion
    if (readSensor <= 5) //Si la lectura es muy
    baja se ignora por tratarse
    led(0); //de ruido.
    elseif (readSensor < 20)//Si la lectura es
    menor de 20, se enciende el
    //1º LED
    led(1);
    elseif (readSensor < 40)//Lectura entre 20 y
    39, se enciende hasta el
    //2º LED
    led(2);
    elseif (readSensor < 60)//Lectura entre 40 y
    59, se enciende hasta el
    //3º LED
    led(3);
    elseif (readSensor < 80)//Lectura entre 60 y
    79, se enciende hasta el
    //4º LED
    led(4);
    elseif (readSensor >= 80)//Lectura mayor de 80
    se encienden todos los
    //LED.
    led(5);

    //Si la lectura es mayor de 50, se envia una
    alerta al monitor serie
    if (readSensor > 50)
        Serial.println("Alerta!!!, Fuerte Impacto");
        delay(20);
}

//Funcion que enciende 'num' LED
void led(int num)
{

```

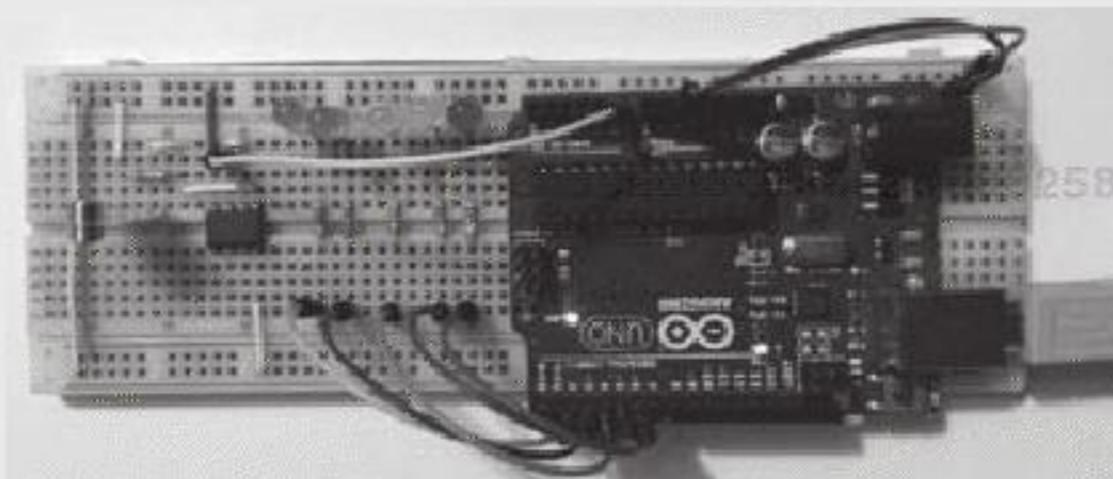
```

    for (int j = num; j < 5; j++) //LED que se
    mantienen apagados
    digitalWrite(j + 2, LOW);
    for (int j = 0; j < num; j++) //LED que se
    encienden
    digitalWrite(j + 2, HIGH);
}

```

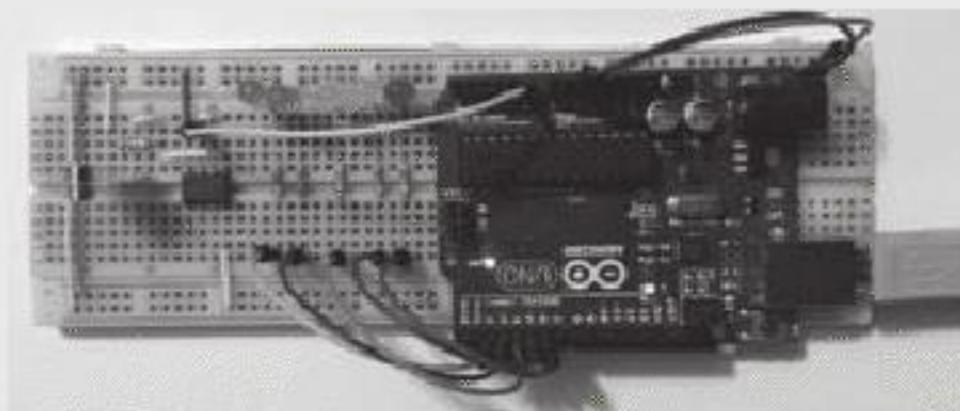
### Pruebas

**Impacto nulo.** Los LED se mantienen apagados.



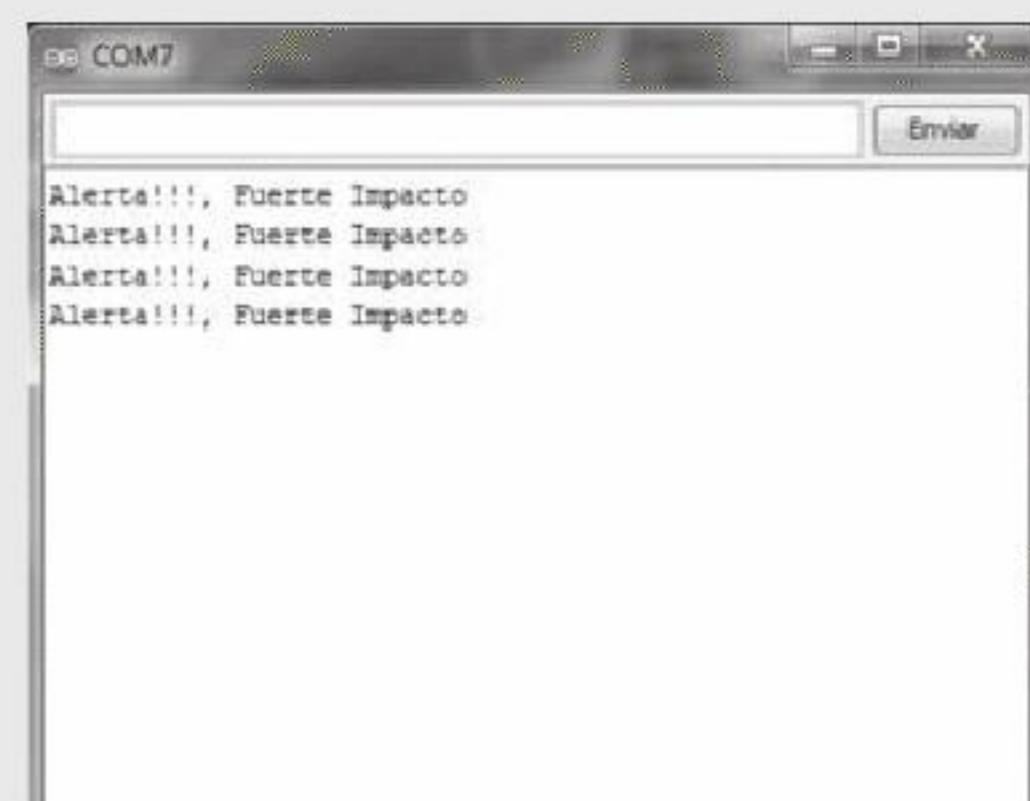
**Figura 7.58** Impacto nulo, se mantienen apagados los LED.

**Impacto medio.** Al golpear ligeramente la superficie con la mano, el sensor registra un ligero impacto reflejado en la cantidad de LED encendidos.



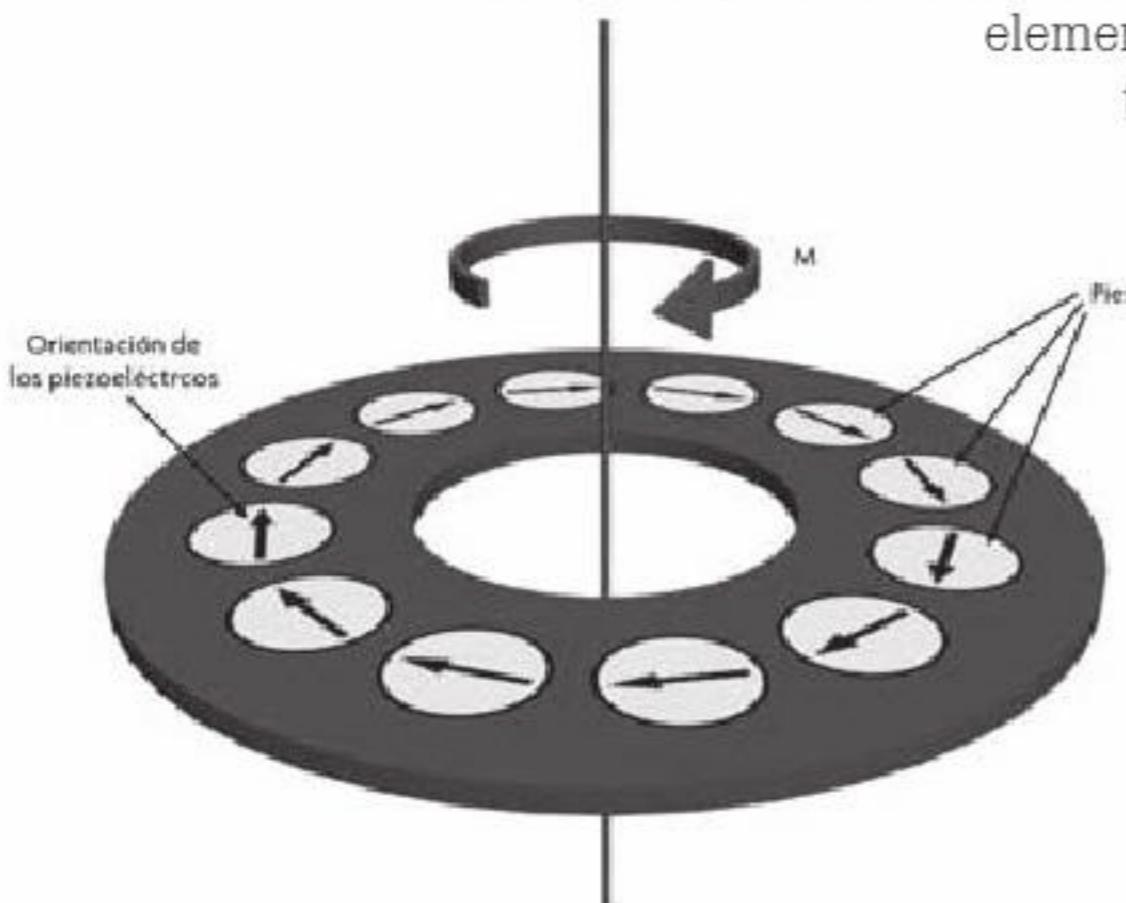
**Figura 7.59** Impacto medio, algunos LED se iluminan.

### Impacto fuerte



**Figura 7.60** Con un fuerte golpe a la superficie de la mesa se iluminan todos los LED y se emite la alerta a través del monitor serie.

Para la medición de torque con piezoelectricos se utilizan elementos sensitivos al fenómeno cortante; estos se suelen disponer en un disco, donde todos los piezoelectricos se alinean de forma tal que su "eje sensitivo" sea tangente al círculo interno del disco (véase figura 7.61); además, todos los elementos piezoelectricos se conectan en paralelo de manera que su salida total sea proporcional al torque aplicado. El disco se acopla entre el elemento que produce el torque y la carga. Los sensores de torque piezoelectricos se dividen en estáticos y dinámicos, al igual que los sensores de torque piezoresistivos, cumpliendo las mismas funciones básicas. Las aplicaciones en las que se pueden encontrar sensores de torque piezoelectricos son principalmente dinámicas, como medición de fuerza de corte en máquinas herramienta o medición de pares y fuerzas transmitidas a una rueda durante el manejo de un automóvil.



**Figura 7.61** Sensor de torque piezoelectrico.

Para una mayor comprensión de los temas de este capítulo, se sugiere revisar el CD que acompaña este libro, donde se reúnen más ejercicios propuestos y de aplicación relacionados con los temas tratados en este capítulo.

## Sitios de Internet

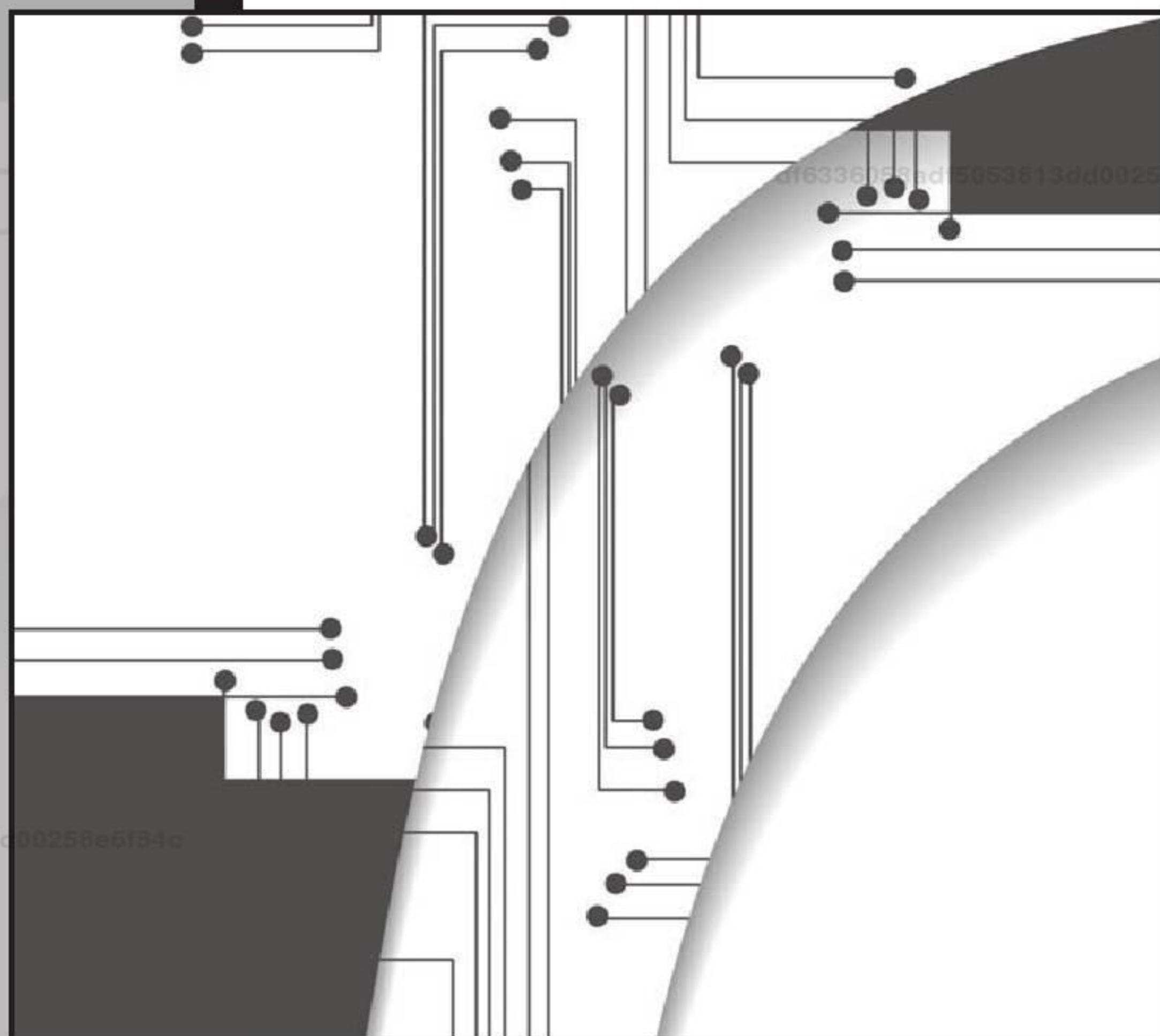
- <http://www.omega.com/pptst/LC1103.html>
- <http://www.lairdtech.com/Products/EMI-Solutions/EMI-Shielding-and-Gaskets/Conductive-Elastomers/#.UxU3H0qoGPJ>
- <http://www.zemiceurope.com/Product-Groups/shear-beam-load-cells.html>
- [http://www.omega.com/toc\\_asp/subsectionSC.asp?subsection=F08&book=pressure](http://www.omega.com/toc_asp/subsectionSC.asp?subsection=F08&book=pressure)
- <http://www.futek.com/product.aspx?t=load&cat=sb&m=lsb453>
- <http://www.lairdtech.com/Products/EMI-Solutions/EMI-Shielding-and-Gaskets/Conductive-Elastomers/#.UxU3H0qoGPJ>
- <http://www.tekscan.com/flexible-force-sensors#specifications>
- <http://www.interlinkelectronics.com/products.php>
- <http://www.sensorprod.com/flex-sensor.php>
- <http://www.meas-spec.com/torque-sensors.aspx>
- <https://measurementsensors.honeywell.com/Pages/category.aspx?category=PRODUCTTYPES-TORQUE>
- <http://www.transducertechniques.com/torque-sensor.aspx>
- <http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/force/>
- <http://www.kistler.com/us/en/category/sensors-and-transmitter/PSE?application&reload=true>
- <http://www.hbm.com/es/menu/productos/transductores-y-sensores/>



df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# 8

## Sensores de flujo y presión



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

Para la lectura de este capítulo es necesario tener conocimientos básicos acerca de la relación entre el flujo, la presión y las leyes básicas que rigen su comportamiento, además de conocer los principios de transducción capacitivo, piezoelectrónico, ultrasónico y magnético.

### Objetivo general

Conocer los distintos tipos de sensores usados para la medición de variables físicas, como la presión y el flujo, además de distinguir entre diferentes principios de transducción usados en dichos sensores para medir el mismo tipo de variable física.

### Objetivos particulares

- Identificar los tipos de sensores usados para la medición de presión.
- Identificar los tipos de sensores usados para la medición de flujo.

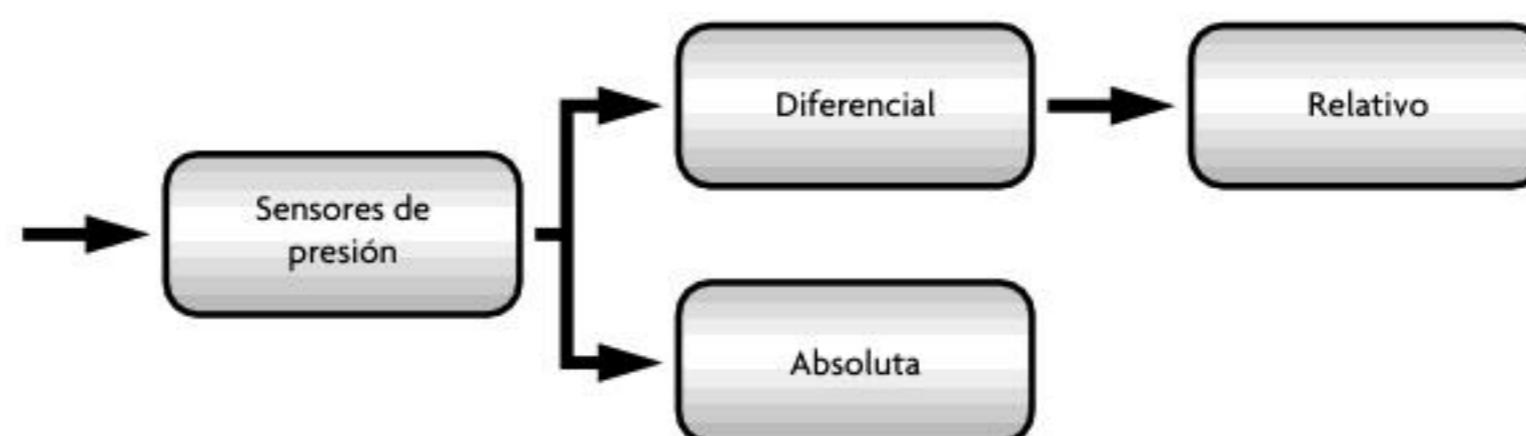
## 8.1 Sensores de presión

Un sensor de presión **es un transductor**, en general de voltaje, **entre la fuerza aplicada en un área determinada y una señal eléctrica**. Por esta razón, es importante especificar que un sensor de presión es una aplicación específica de sensores de fuerza; asimismo, lo que distingue a los sensores de fuerza convencionales de los sensores de presión es que los sensores de presión, en general, cuentan con diafragma, el cual es el área efectiva en la que se mide la fuerza ejercida. De esta manera, es posible determinar la fuerza por unidad de área.

La *cantidad* de presión en un fluido, ya sea un líquido o un gas, se define como la fuerza por unidad de área. En el sistema internacional de unidades, la unidad para la medición de la presión son los pascales,  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ; si se compara el valor de un pascal con la presión barométrica<sup>1</sup> se puede ver que esta es pequeña, pues a nivel del mar una atmósfera de presión es aproximadamente 100 kPa. Debido a que la mayoría de los sensores de presión usan a la presión barométrica como valor de referencia, en este caso resulta más conveniente usar las unidades de medición como los bares; un bar tiene su equivalencia con atmósferas de presión como  $1 \text{ atm} = 1.03525 \text{ bares}$ , por lo que a lo largo de este capítulo se usan los bares como unidad de medición.

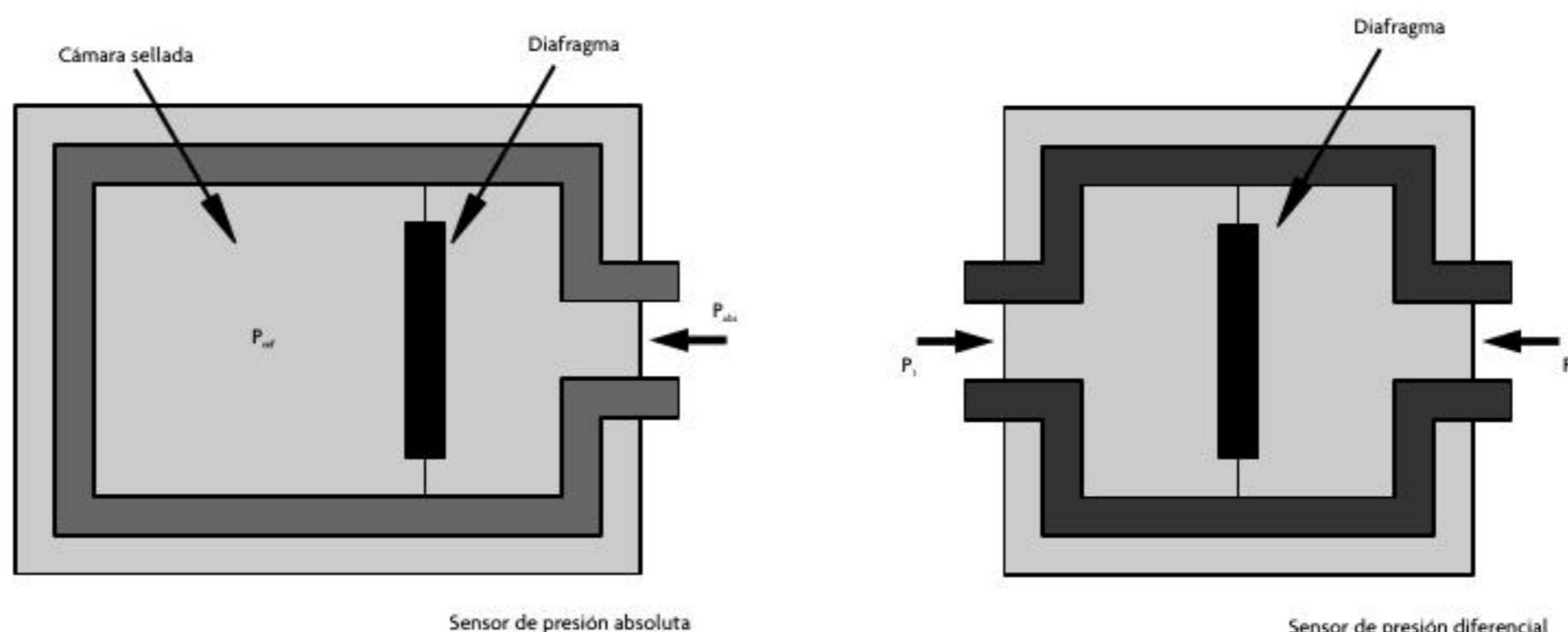
### Clasificación de los sensores de presión

Los sensores de presión están divididos en dos grandes grupos, diferenciales o absolutos, como se muestra en el esquema de la figura 8.1; ya sean diferenciales o absolutos, este tipo de sensores tiene la capacidad de medir presión estática, presión dinámica o presión total.



**Figura 8.1** Clasificación de los sensores de presión.

Los **sensores de presión absoluta** ( $P_{abs}$ ) (véase figura 8.2) tienen una cámara sellada, la cual contiene la presión de referencia ( $P_{ref}$ ); en general, se escoge vacío para la representación de la presión cero, con la finalidad de evitar compensaciones complejas por la variación de presión que existiría en la cámara de referencia debido a cambios de temperatura.



**Figura 8.2** Sensor de presión absoluta.

**Figura 8.3** Sensor de presión diferencial.

<sup>1</sup> La presión barométrica es una forma de referirse a la presión atmosférica local, y se distingue de la presión atmosférica por una corrección debido a la altitud geopotencial local.

Los **sensores de presión diferenciales** (véase figura 8.3) funcionan, tal como su nombre lo indica, bajo el precepto de una diferencia de presiones entre una presión de referencia dada ( $P_1$ ) y una segunda presión detectada ( $P_2$ ). Si la presión de referencia es la presión barométrica, entonces se dice que el sensor es un **sensor de presión relativo**.

En sensores de presión diferenciales, el diafragma debe ser diseñado de tal modo que pueda lidiar con cambios de temperatura, humedad o cualquier condición ambiental a la que esté expuesto. De manera general, en estos sensores el fluido que esté midiendo el sensor en  $P_1$  y  $P_2$  es el mismo.

Otra forma de clasificar los sensores de presión es por el principio de transducción que utilizan; en la figura 8.4 se muestra la clasificación de este tipo de sensores.



**Figura 8.4** Clasificación de sensores de presión por su principio de transducción.

En todo este capítulo se utiliza la clasificación anterior, de acuerdo con su principio de funcionamiento.

### Sensores de presión basados en variaciones de resistencia

En este tipo de sensores se usa el principio de transducción resistivo, de tal manera que el elemento móvil de un potenciómetro está acoplado en forma mecánica al diafragma sensitivo por medio de un tubo de Bourdon; en este caso, el desplazamiento mecánico que experimenta el diafragma es transmitido al elemento móvil del potenciómetro. Si dicho potenciómetro forma parte de un circuito eléctrico, el voltaje entre sus terminales cambiará de manera proporcional al cambio de presión (véase figura 8.5).

Si se supone que el circuito cuenta con un voltaje de alimentación  $V_0$ , entonces la variación de voltaje  $V_0$  está dada por la ecuación 8.1:

$$V_0 = V \frac{R_x}{R_0} \quad (8.1)$$

donde:

$R_x$ : resistencia debida a un cambio en la presión

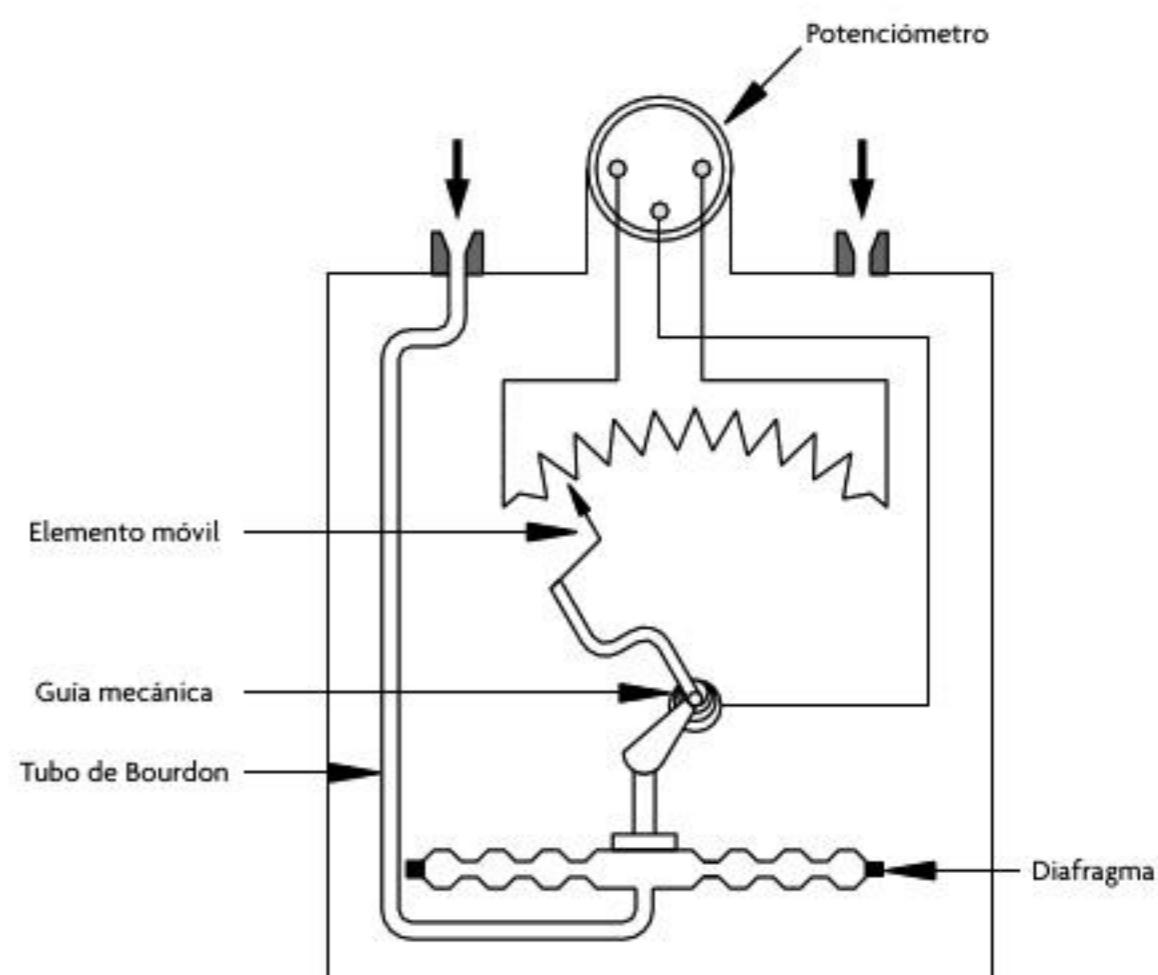
$R_0$ : resistencia debida a la presión de referencia (ya sea vacío, presión atmosférica o alguna otra presión de referencia)

Entre las principales ventajas de este tipo de detección destacan:

- Bajo costo.
- No requiere de amplificadores adicionales.
- Tecnológicamente es robusto.
- Es adaptable a muchas aplicaciones.

Por otro lado, las desventajas de este principio de operación son:

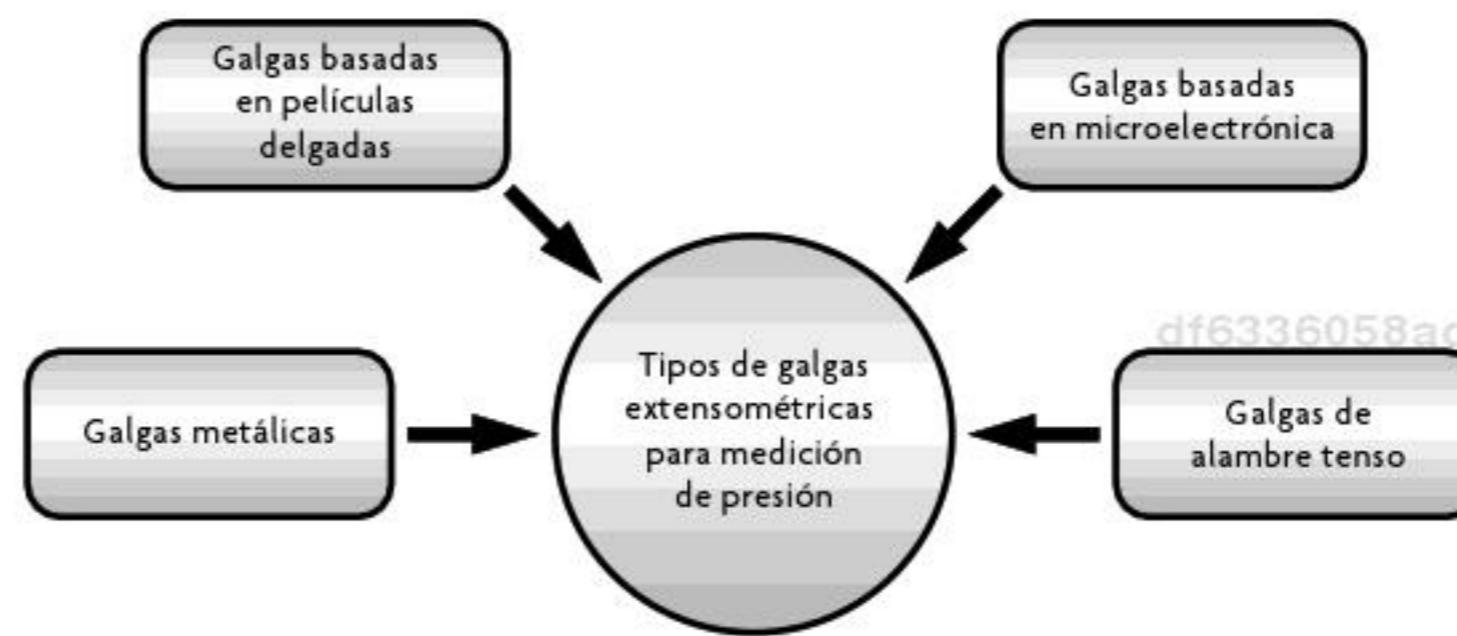
- Presenta una histéresis alta.
- Altamente sensible a vibraciones.



**Figura 8.5** Sensor de presión basado en el principio de variación de resistencia.

## Sensores de presión basados en galgas extensométricas (*strain gauge*)

En este principio de transducción se usan los materiales piezoresistivos, de tal manera que se configura una galga extensométrica con estos. Esta galga extensométrica tiene la tarea de detectar el cambio de presión y traducirlo en un cambio de resistividad, con lo que se deriva un cambio en la resistencia del sensor. Existen múltiples configuraciones de galgas extensométricas para implementar un sensor de presión; en la figura 8.6 se muestra la clasificación de las galgas extensométricas.



**Figura 8.6** Tipos de galgas extensométricas para medición de presión.

### Galgas metálicas

En este tipo de galgas, una red resistiva formada por cuatro resistencias en configuración de puente de Wheatstone se encarga de realizar la transducción entre la deformación inducida en el material (metálico en este caso) y un cambio en el voltaje de salida del puente. Las resistencias internas son las responsables de medir el cambio de manera tangencial y las resistencias externas de detectar el cambio de manera radial (véase figura 8.7).

Las principales ventajas de este tipo de detección son:

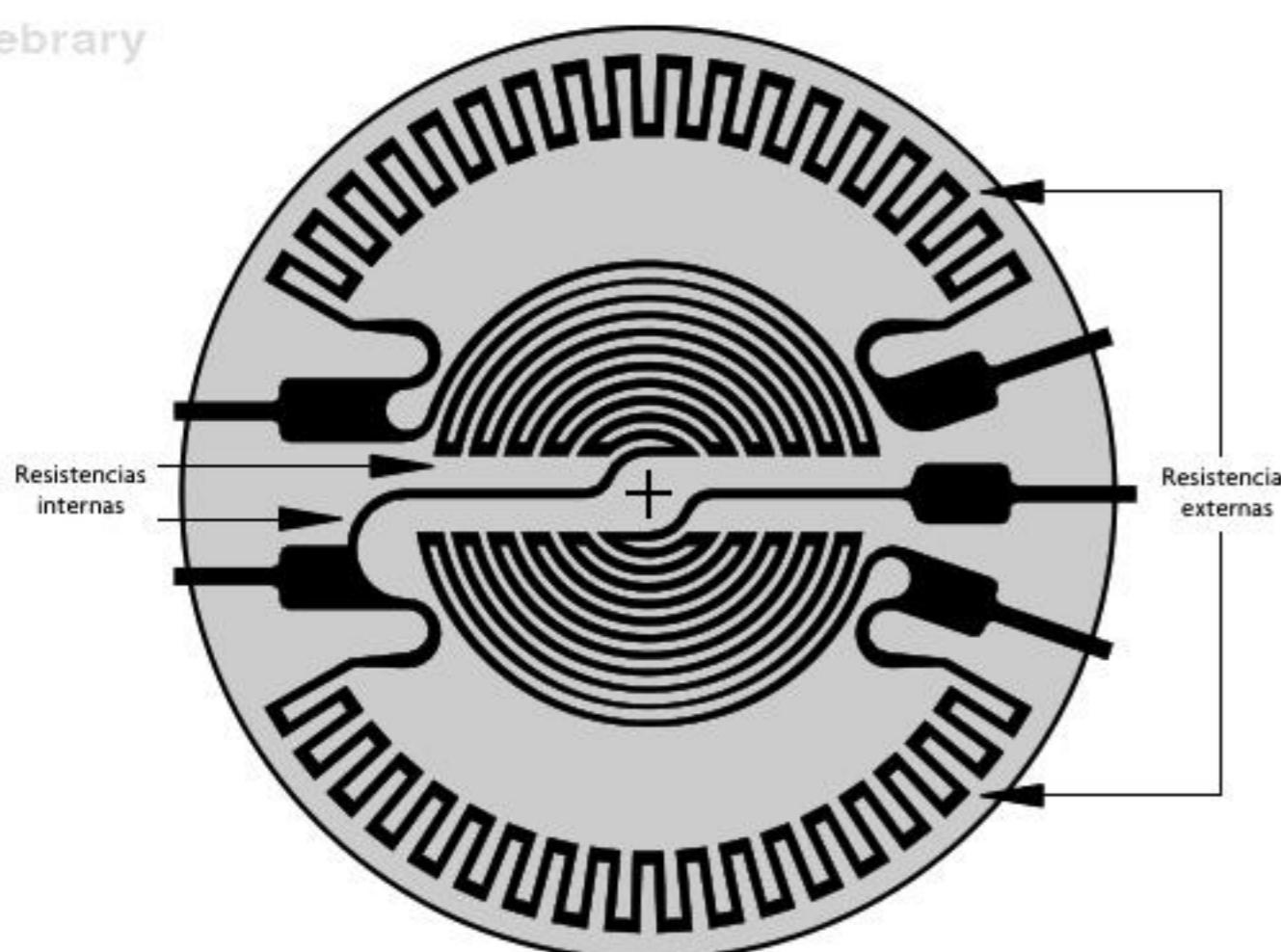
- Bajo costo.
- Resistencia a vibraciones.
- Adaptación simple a un circuito eléctrico.

Por otro lado, este tipo de detección tiene la desventaja de que el factor de galga es bajo, comparado con el resto de las configuraciones presentadas aquí.

### Galgas basadas en películas delgadas

En este tipo de configuración la película delgada es el diafragma sensitivo a la presión, con lo que se forma el arreglo resistivo de la galga, de tal manera que depende del tipo de película que se use el factor de galga que se obtiene. Por ejemplo, con películas metálicas delgadas, el factor de galga va desde 2 hasta 4; en películas resitivas, el factor de galga se encuentra entre 10 y 20; para el caso de películas semiconductoras, el factor está alrededor de 100. Al igual que las galgas metálicas, estas tienen las mismas ventajas:

- Bajo costo.
- Resistencia a vibraciones.
- Adaptación simple a un circuito eléctrico.



**Figura 8.7** Galga metálica para detección de presión.

Mientras que su desventaja es:

- No soporta grandes cargas eléctricas debido a la naturaleza de las películas delgadas.

### Galgas basadas en microelectrónica

Este tipo de galgas (véase figura 8.8) se basa en el uso de la tecnología microelectrónica para su implementación; su elemento sensor es un sustrato, en general de silicio monocristalino tipo N (esto se logra difundiendo impurezas donadoras), y una piezoresistencia tipo P (esto se logra difundiendo impurezas aceptoras). Para implementar este tipo de detección se realiza un proceso de metalización para formar los electrodos que constituirán los extremos de la piezoresistencia detectora. De esta manera, se forman cuatro resistencias iguales que, en conjunto, forman el puente de Wheatstone. Este tipo de detección tiene la ventaja de una alta miniaturización; sin embargo, presenta una alta dependencia de la temperatura, ya que de manera parásita se forma una unión PN, que induce un diodo.

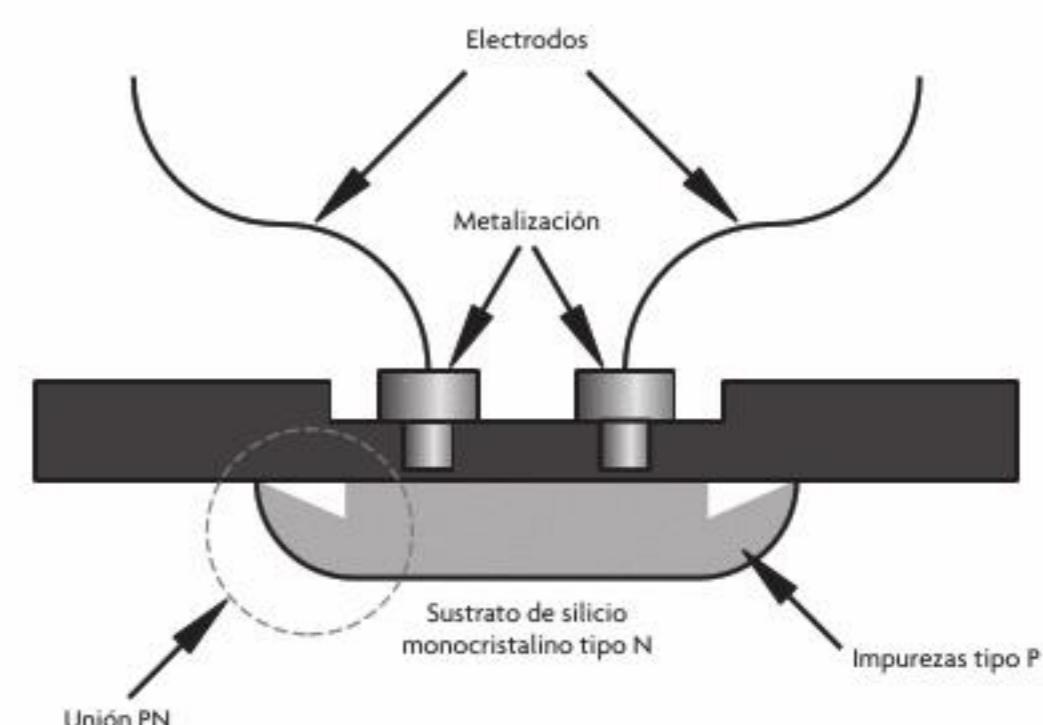
Entre las principales ventajas de este tipo de principio de funcionamiento están:

- Bajo costo de producción en masa.
- Factor de galga alto.
- Tiene sensores muy pequeños (de alrededor de 1 mm<sup>2</sup>).

Por otra parte, la desventaja que tienen es una alta dependencia de la temperatura, de tal manera que sus temperaturas de operación no deben rebasar los 120 °C, aproximadamente.

### Galgas de alambre tenso

Este tipo de galgas se forma al colocar un alambre tenso sobre la superficie detectora, el cual se recubre con plásticos; cuando el alambre experimenta la presión del medio, registra un cambio. Este tipo de galgas es poco utilizado debido a su alta sensibilidad a la vibración y su alta fragilidad (véase figura 8.9).



**Figura 8.8** Galga extensométrica basada en tecnología de microelectrónica para mediciones de presión.



**Figura 8.9** Galgas de alambre tenso para medición de presión.

## Ejercicio de aplicación

### Uso de un sensor de presión

#### Objetivo

Medir la presión manométrica de la línea de un circuito neumático a través del sensor MPX2010 con el uso del Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor de presión MPX2010
- Amplificador de instrumentación AD620
- Amplificador operacional TL084
- 2 resistencias de 1 kΩ, 4 de 10 kΩ
- 2 baterías de 9 V
- Potenciómetro de 10 kΩ

- Caimanes
- Compresor
- Válvula neumática
- Mangueras neumáticas

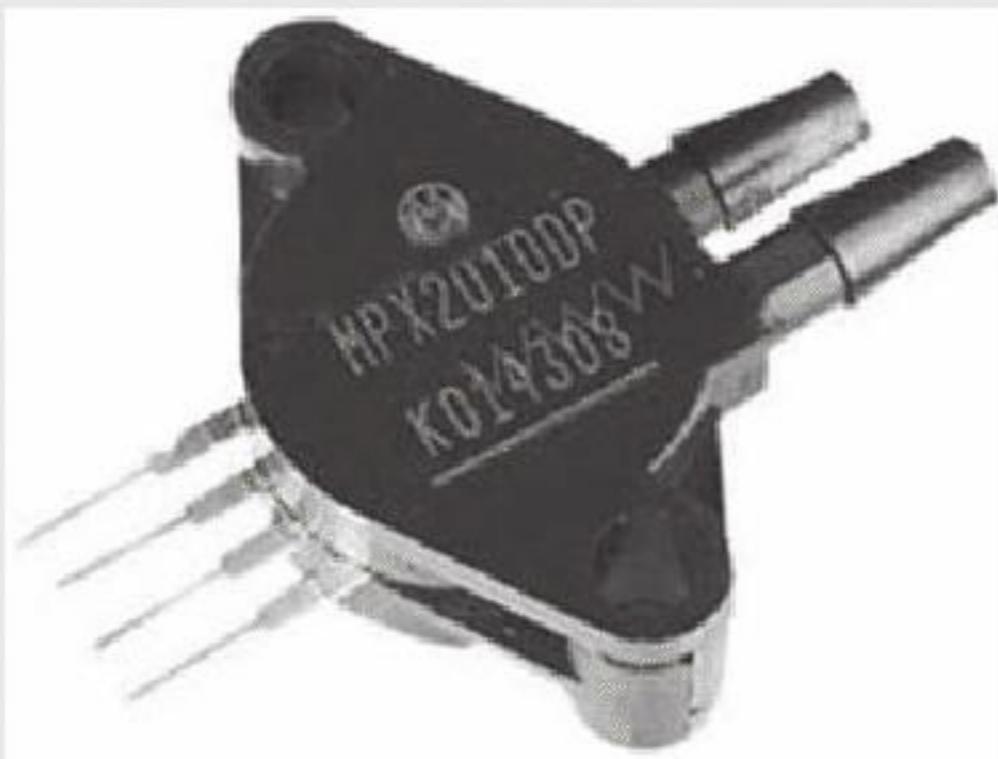
#### Desarrollo

#### Descripción del sensor MPX2010

El MPX2010 (véase figura 8.10) es un sensor que mide la diferencia de presión entre sus dos terminales superiores de entrada; su voltaje de salida diferencial es directamente proporcional a esta presión y tiene un rango útil de medición de 0 a 10 kPa.

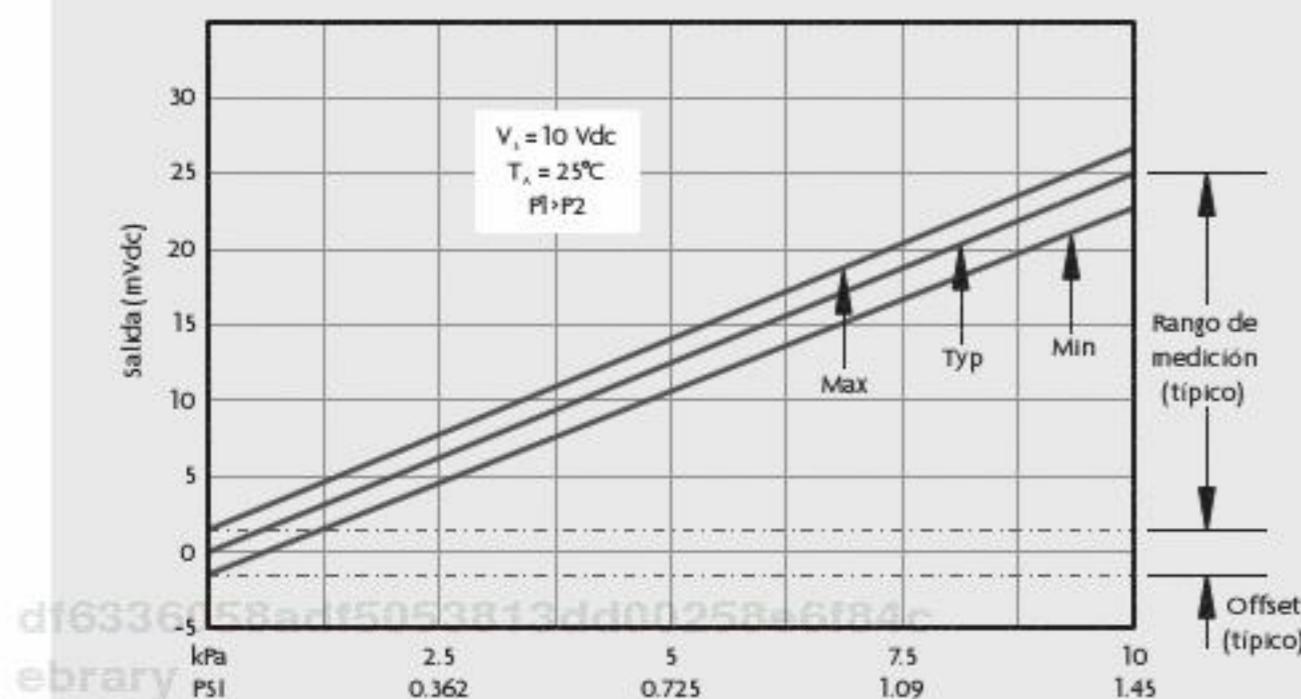
La descripción de pines del sensor es la siguiente:

- $V_S$ . Voltaje de alimentación del sensor de 10 V.
- $+V_{OUT}$ . Salida diferencial positiva.
- $-V_{OUT}$ . Salida diferencial negativa.
- **GND**. Voltaje de referencia (tierra).



**Figura 8.10** Sensor de presión MPX2010.

El comportamiento del sensor se describe en la gráfica de la figura 8.11.



**Figura 8.11** Gráfica de voltaje diferencial vs. presión del sensor MPX2010.

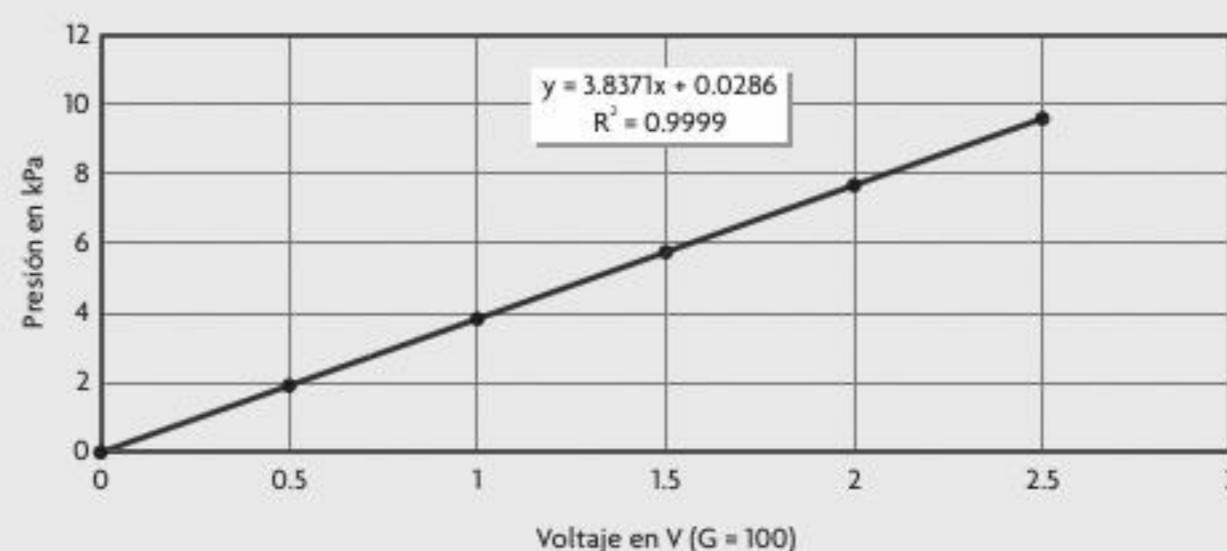
#### Ecuación representativa del sensor

Al graficar algunos puntos de la curva típica del sensor MPX2010 (con un voltaje de alimentación de 10 V), y con base en el hecho de que la ganancia del amplificador de instrumentación es de 100, al aplicar una regresión lineal se obtiene su ecuación característica:

$$\text{Presión (kPa)} = 3.8371 \times (\text{voltaje}) + 0.0286 \quad (8.2)$$

Si se considera el valor de la ordenada al origen como despreciable, entonces:

$$\text{Presión (kPa)} = 3.8371 \times (\text{voltaje}) \quad (8.3)$$



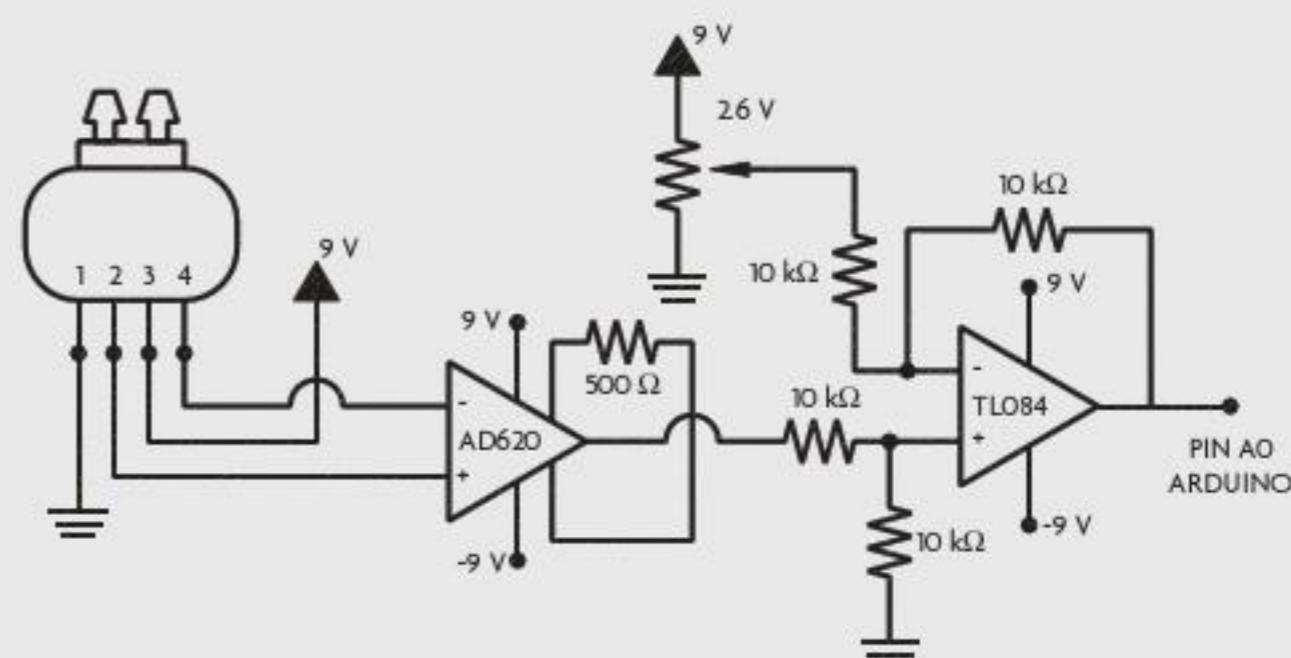
**Figura 8.12** Gráfica y ecuación de la curva del sensor MPX2010.

Voltaje (mV)	Voltaje	Presión (kPa)
0	0	0
5	0.5	2
10	1	3.85
15	1.5	5.75
20	2	7.75
25	2.5	9.6

**Tabla 8.1** Tabla de datos para la gráfica de la figura 8.12

#### Construcción del circuito

Sensor de presión  
MPX2010



**Figura 8.13** Diagrama del circuito para medir la presión en una línea neumática.

Como la señal de salida del sensor MPX2010 es diferencial, resulta necesario calcular esa diferencia; para eso se utiliza un sensor de instrumentación (también es adecuado un restador). La matrícula utilizada es el AD620, cuya ganancia está en función de la resistencia RG:

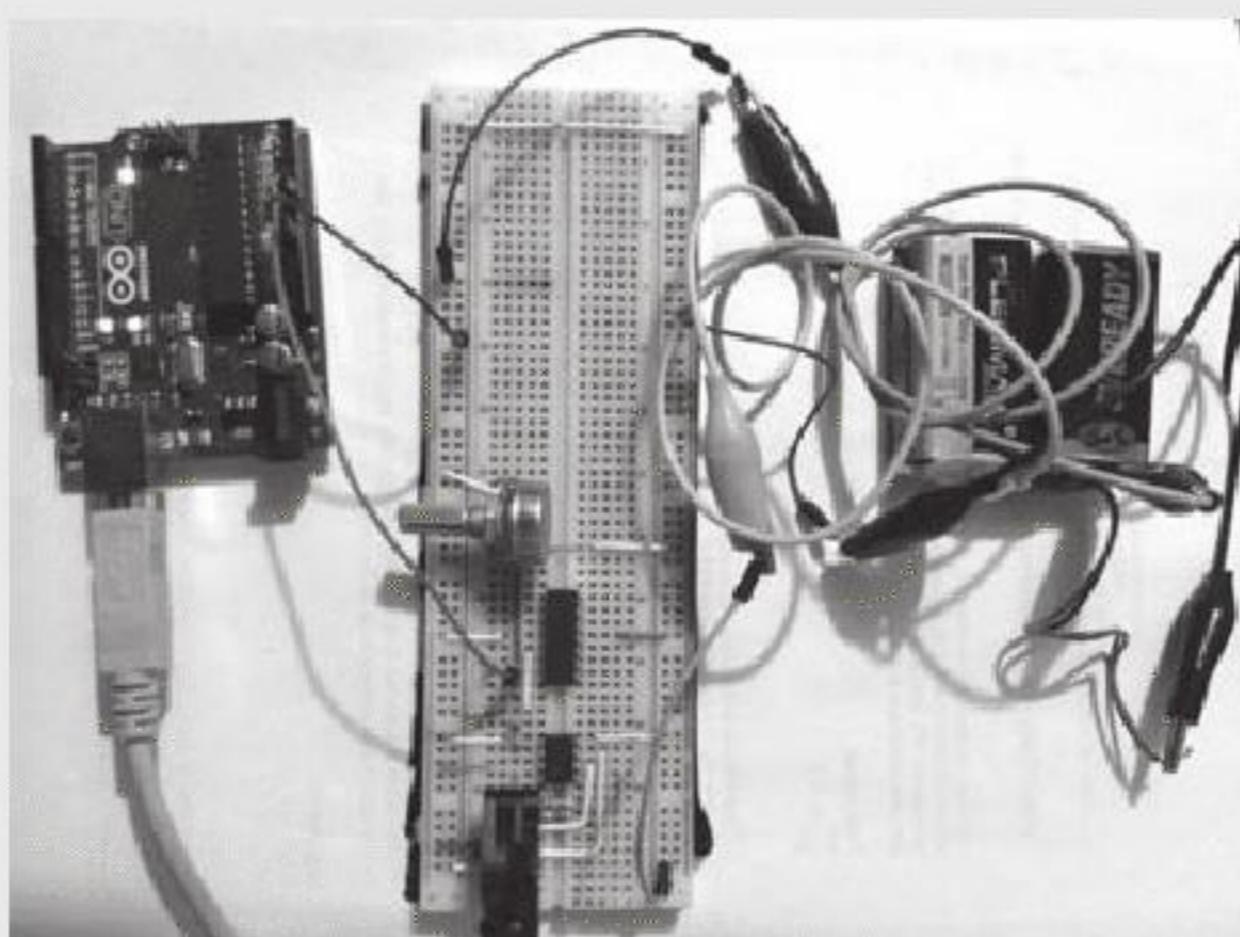
$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{RG} + 1$$

Si se propone una resistencia  $RG$  de  $500\ \Omega$  (2 resistencias de  $1\ k\Omega$  en paralelo):

$$G = \frac{49.4\ k\Omega}{RG} + 1 = 99.8 \approx 100$$

Es posible que la señal diferencial del sensor tenga ruido, mismo que también se amplifica. Estas señales pueden afectar la lectura final. Para suprimirlas a la salida del sensor de instrumentación se introduce un restador que permite calibrar la lectura. Si no se aplica ninguna presión adicional a la atmosférica en las terminales superiores, la salida del amplificador tendría que ser cero; si no es así, el potenciómetro del restador se ajusta hasta alcanzarlo.

La señal de salida de este circuito se conecta al PIN A0 del Arduino® para su procesamiento. La figura 8.14 muestra el montaje físico del circuito descrito en la figura 8.13.



**Figura 8.14** Montaje del circuito que mide la presión en una línea neumática.

## Código

### Descripción del código

El siguiente programa realiza la lectura y conversión analógico-digital (ADC) de la señal del sensor MPX2010 (acondicionada con antelación). Con este valor y con base en la ecuación 8.3 se obtiene la diferencia de presión entre las terminales del sensor. Por último, se indica este valor en el monitor serie.

```
*****Sensor de presion*****
/*
/*El sensor de presion MPX2010 mide la
diferencia de presion que existe
/*entre sus dos terminales de entrada
y es directamente proporcional a
```

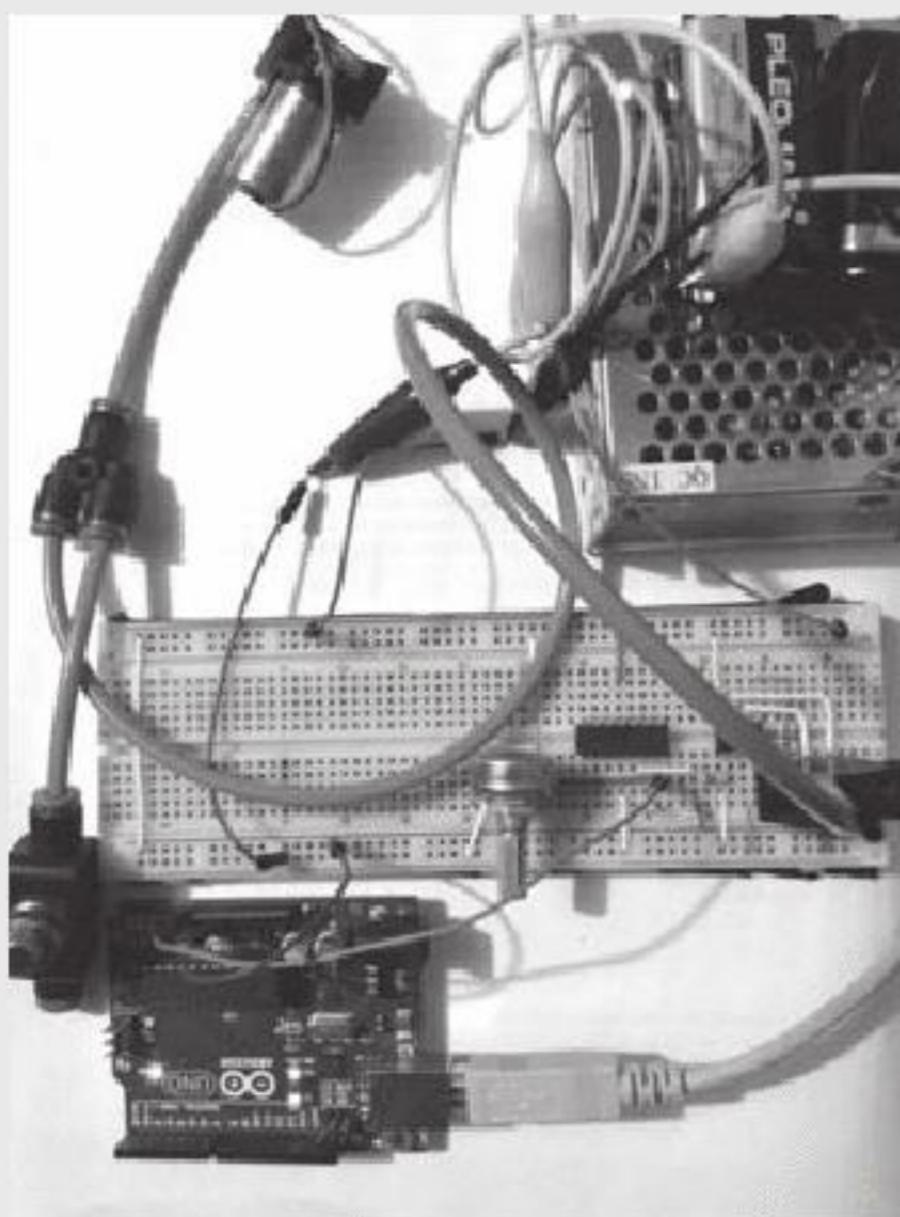
```
/*
el voltaje entre sus dos terminales
electricas de salida. Para
/*calcular la diferencia entre estas dos
terminales se requiere del uso
/*de un amplificador de instrumentacion o
bien un amplificador
/*operacional configurado como restador.
/*
/*Con un amplificador de instrumentacion
se restan y amplifican
/*las señales del sensor. A esta señal se le
aplica un voltaje de
/*offset para ajustar dicha señal.
*****Se declaran las variables a emplear
intreadSensor; df6336058adf5053813dd00258e6f84c
floattensionSensor, presion;

voidsetup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
comunicacion serie a 9600 baudios
}

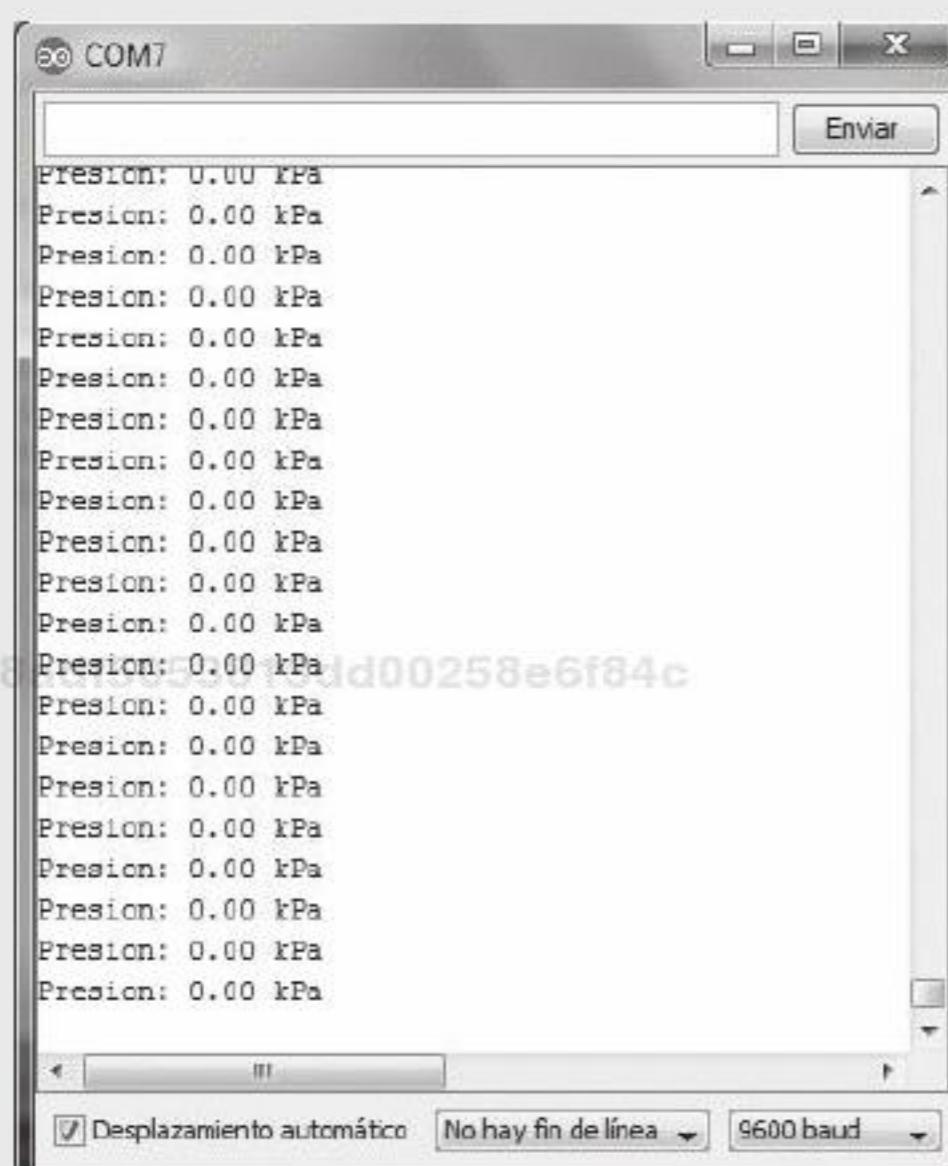
voidloop()
{
    readSensor = analogRead(A0); //Lectura del
voltaje del sensor
    //((previamente tratado)
    tensionSensor = 0.00478*readSensor;
    //Conversion de unidades a volts
    presion = 3.8371*tensionSensor;
    //De acuerdo con la hoja de datos del
    //sensor y considerando que se aplico una
    amplificacion de 100 (en el
    //amplificador de instrumentacion) obtenemos
    la ecuacion que relaciona
    //el voltaje medido con la presion existente
    en el sensor.
    //Esta ecuacion es: presion = 3.8371 * voltaje
    Serial.print("Presion: ");
    //Imprimimos el resultado. Recordando que
    esta dado en kPa
    Serial.print(presion);
    Serial.println(" kPa");
}
```

## Pruebas

Para medir la presión, una de las terminales del sensor se conecta a la línea neumática alimentada por un compresor, misma que puede regularse con ayuda de una válvula (véase figura 8.15).

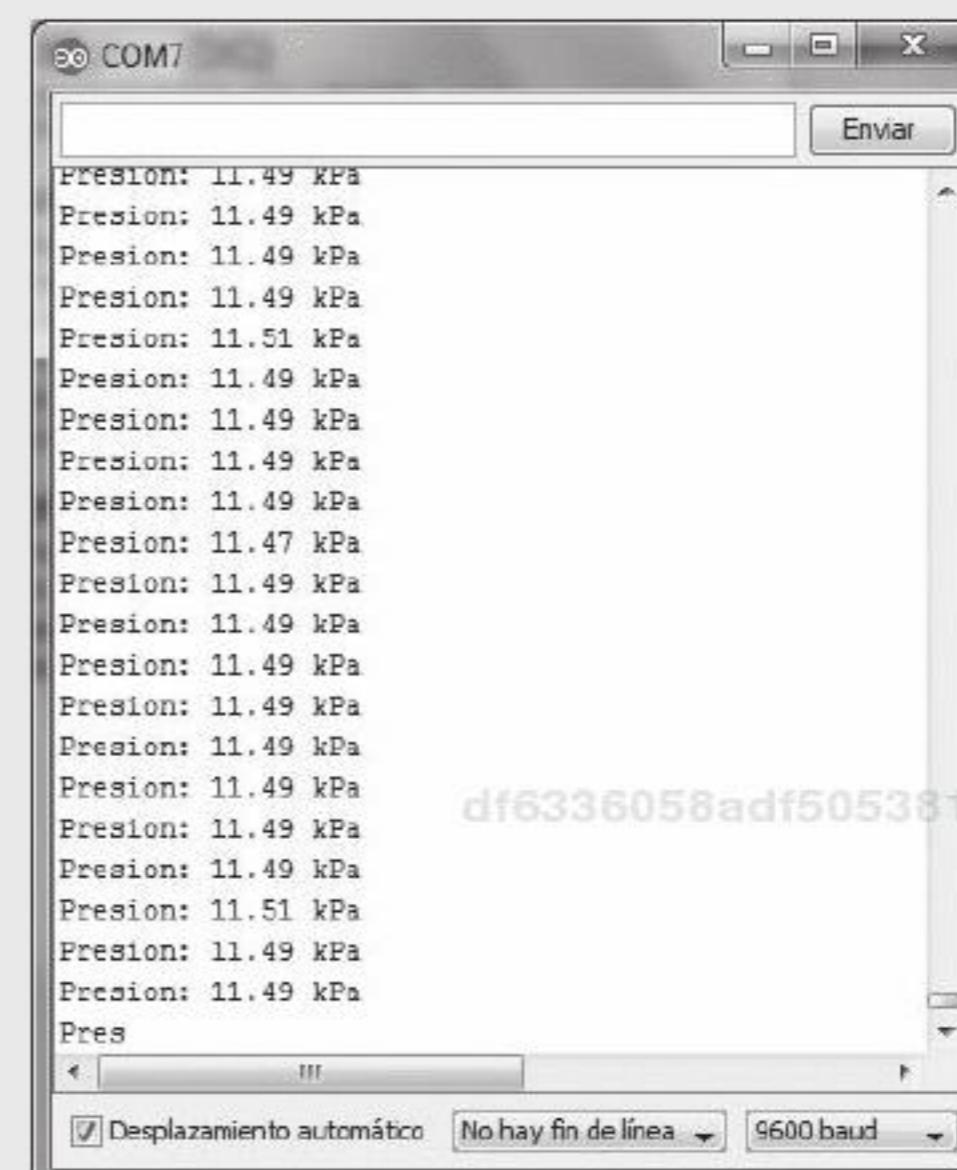


**Figura 8.15** La línea neumática alimentada por un pequeño compresor se conecta al sensor de presión MPX2010. El flujo es regulado por una válvula.



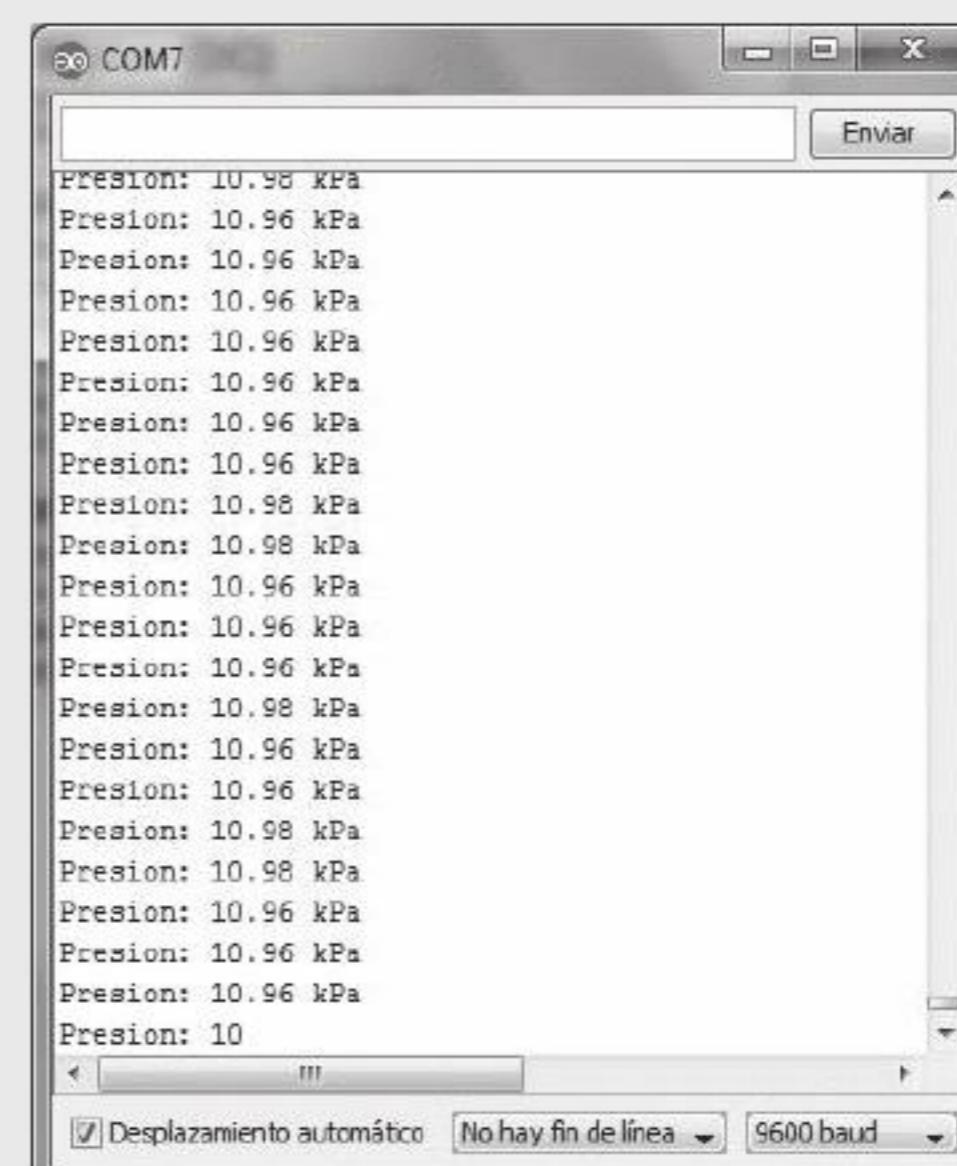
**Figura 8.16** Con el compresor apagado, la presión en la línea es cero.

Con el compresor apagado, la lectura que registra el sensor es presión cero (véase figura 8.16). En tanto, con el compresor encendido y la válvula cerrada por completo (evitando la fuga de aire) se registra la máxima presión que provee el compresor: 11.49 kPa (véase figura 8.17).



**Figura 8.17** Con la presión máxima en la línea con el compresor encendido y la válvula de escape cerrada por completo se tienen 11.49 kPa.

Al abrir un poco la válvula y liberar presión en la línea, se tiene una presión de 10.96 kPa, ligeramente menor que con la válvula cerrada.



**Figura 8.18** Al abrir un poco la válvula, la presión en la línea baja es de 10.96 kPa.

## Sensores de presión basados en variación de reluctancia

Este tipo de sensores de presión se basa en la variación de reluctancia de un circuito magnético, misma que se obtiene al exponer un diafragma, en este caso de algún material ferromagnético, que constituye el elemento sensor, a la presión. Cuando el diafragma se aproxima o se aleja del circuito magnético induce un cambio de reluctancia, el cual es procesado por el circuito de acondicionamiento de la señal (para mayor detalle véase el capítulo 5, Sensores de nivel y proximidad). Además de los sensores basados en diafragmas, uno de los sensores más utilizados para transducir la presión ejercida sobre un elemento es el LVDT.

Algunas de las ventajas de este tipo de sensores de presión basados en un elemento de variación de reluctancia son:

- Presentan una resolución muy alta.
- Tienen una señal sumamente estable en un ambiente libre de ruido electromagnético.

Por otro lado, una de sus grandes desventajas es su alta sensibilidad ante vibraciones mecánicas.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

## Sensores de presión con materiales piezoelectricos

En este tipo de sensores se emplean materiales piezoelectricos como elemento de detección, debido a que, como es sabido, un material piezoelectrico tiene la característica de transformar un esfuerzo aplicado a un voltaje. El principio de aplicación es el siguiente: una pequeña placa de área conocida, con características piezoelectricas, se coloca de manera normal a la fuerza que ejerce la presión a detectar; así, cuando la presión se incrementa o disminuye, el elemento piezoelectrico genera un voltaje proporcional a la compresión o la extensión de dicha placa. Luego, por medio de electrodos metálicos, es posible leer el voltaje generado por el circuito piezoelectrico. Los materiales piezoelectricos más utilizados para estos propósitos son cuarzo, PVDF, titanato de bario y sal de Seignette.

En este caso, el rango de medición del sensor estará determinado por el esfuerzo máximo soportado por el material piezoelectrico y los electrodos metálicos.

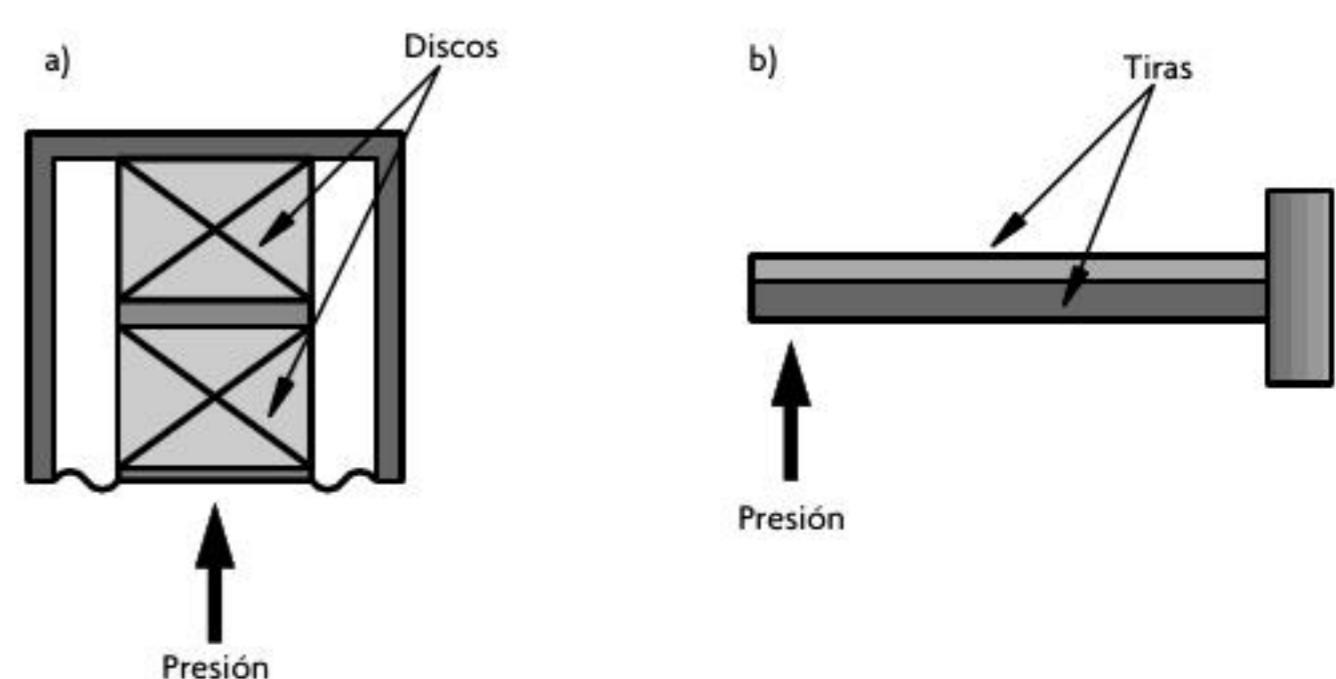
Existen dos configuraciones básicas para implementar este tipo de sensores (véase figura 8.19); la primera consiste en colocar discos de material piezoelectrico interconectados entre si, con la cual es posible incrementar la resolución del sensor. Otra posible configuración consiste en superponer dos tiras de material piezoelectrico, mismas que estarán colocadas de tal modo que tengan polaridades opuestas, de esta manera se verá incrementado el voltaje a la salida.

Estas estructuras están auxiliadas por un resorte que ayuda a linealizar la señal, controlando el desplazamiento debido a la presión aplicada. Entre las principales ventajas de estos sensores destacan:

- Fácil miniaturización.
- Compatibilidad de fabricación con procesos de microelectrónica (lo que los hace menos costosos).
- Ancho de banda amplio.
- Sensitividad baja a la vibración.

Por otro lado, entre sus desventajas se encuentran:

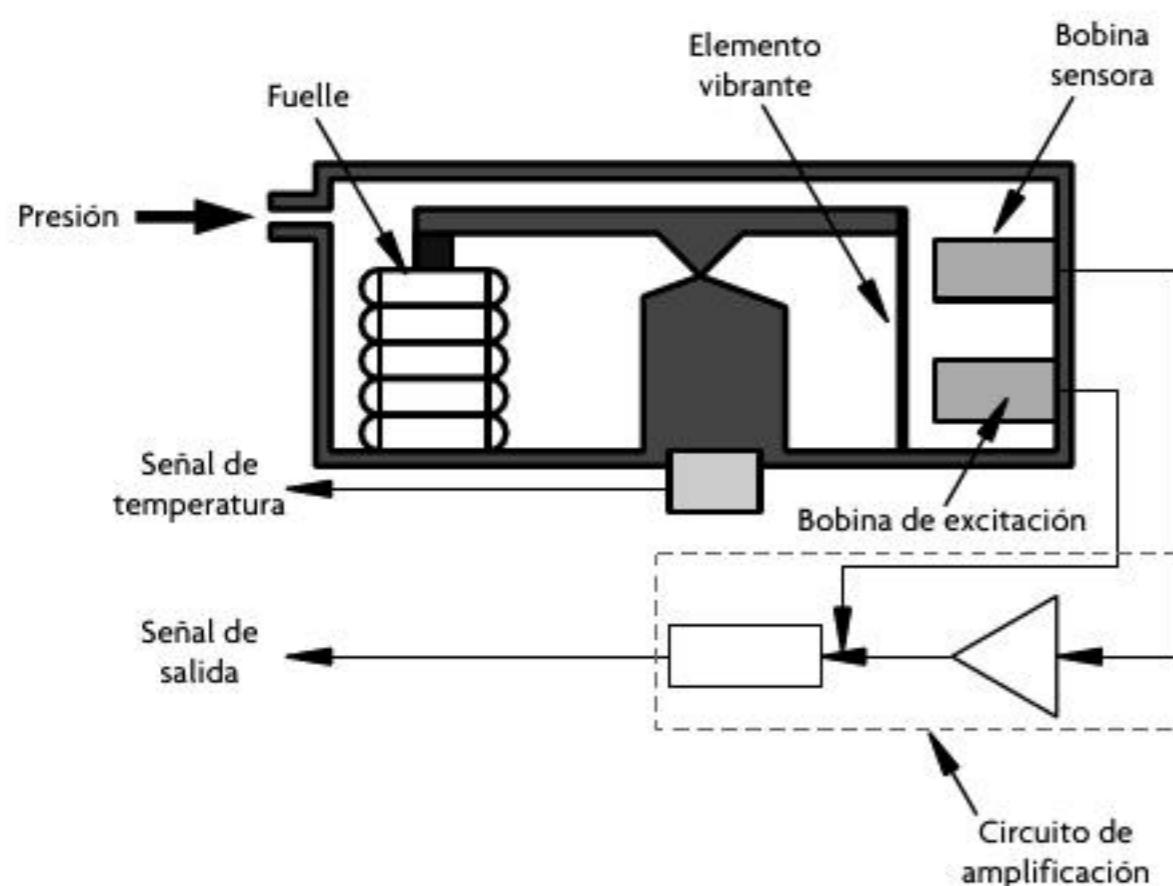
- Sensitividad alta a la temperatura.
- Dificultad para hacer mediciones de presiones estáticas, debido a que el voltaje generado por el material piezoelectrico es bajo.



**Figura 8.19** Principio de transducción piezoelectrico usado en sensores de presión. a) Configuración de disco. b) Configuración de tira.

- Requerimiento de circuitos de acondicionamiento de señal robustos, por lo que el tipo de cable requerido para la medición es especializado, pues tiene la posibilidad de atenuar la señal de lectura.

## Sensores de presión basados en osciladores (sensores de fuelle)



**Figura 8.20** Sensor de presión basado en el principio de fuelle-vibración.

Este tipo de sensores de presión (véase figura 8.20) se basa en el acople mecánico entre un elemento vibrante y un fuelle mecánico. Antes de tratar el funcionamiento de este tipo de sensores conviene aclarar que un fuelle es un dispositivo mecánico que se encarga de contener aire para después expelerlo con una presión y dirección determinadas. En el caso de este tipo de sensores, el fuelle capta la presión a detectar y la traduce en la vibración del elemento vibrante. El elemento vibrante formará parte de un circuito magnético que tiene la tarea de transducir la vibración inducida por el fuelle a una señal de voltaje cambiante en el tiempo. La bobina excitadora se encarga de inducir el campo en el elemento vibrante, el cual induce el campo en la bobina de medición; de este modo, la señal presente en la bobina de medición es transformada en una señal de voltaje mediante circuitos amplificadores. Este tipo de sensores cuenta con un medidor de temperatura embebido que permite compensar las variaciones de presión debidas a esta variable física. Otro importante uso de estos sensores de temperatura embebidos es para que el usuario final tenga una medición más completa.

Para que este tipo de transducción tenga éxito se requiere que el elemento vibrante esté fabricado de material ferromagnético, esto con el fin de que pueda interactuar con el campo emitido por la bobina excitadora. La vibración del elemento depende del tipo de material de que está construido, así como de su densidad y su módulo de Young, además de su longitud, volumen y de la cantidad de presión emitida por el fuelle. Matemáticamente, la frecuencia de vibración puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{A\rho_d}}$$

donde:

$f$ : frecuencia

$L$ : longitud

$F$ : fuerza

$\rho$ : densidad

$A$ : área de sección transversal

El modelo del sensor de fuelle puede representarse por medio de la siguiente ecuación:

$$P = X(f - f_0) + Y(f - f_0)^2 + Z(f - f_0)^3$$

donde:

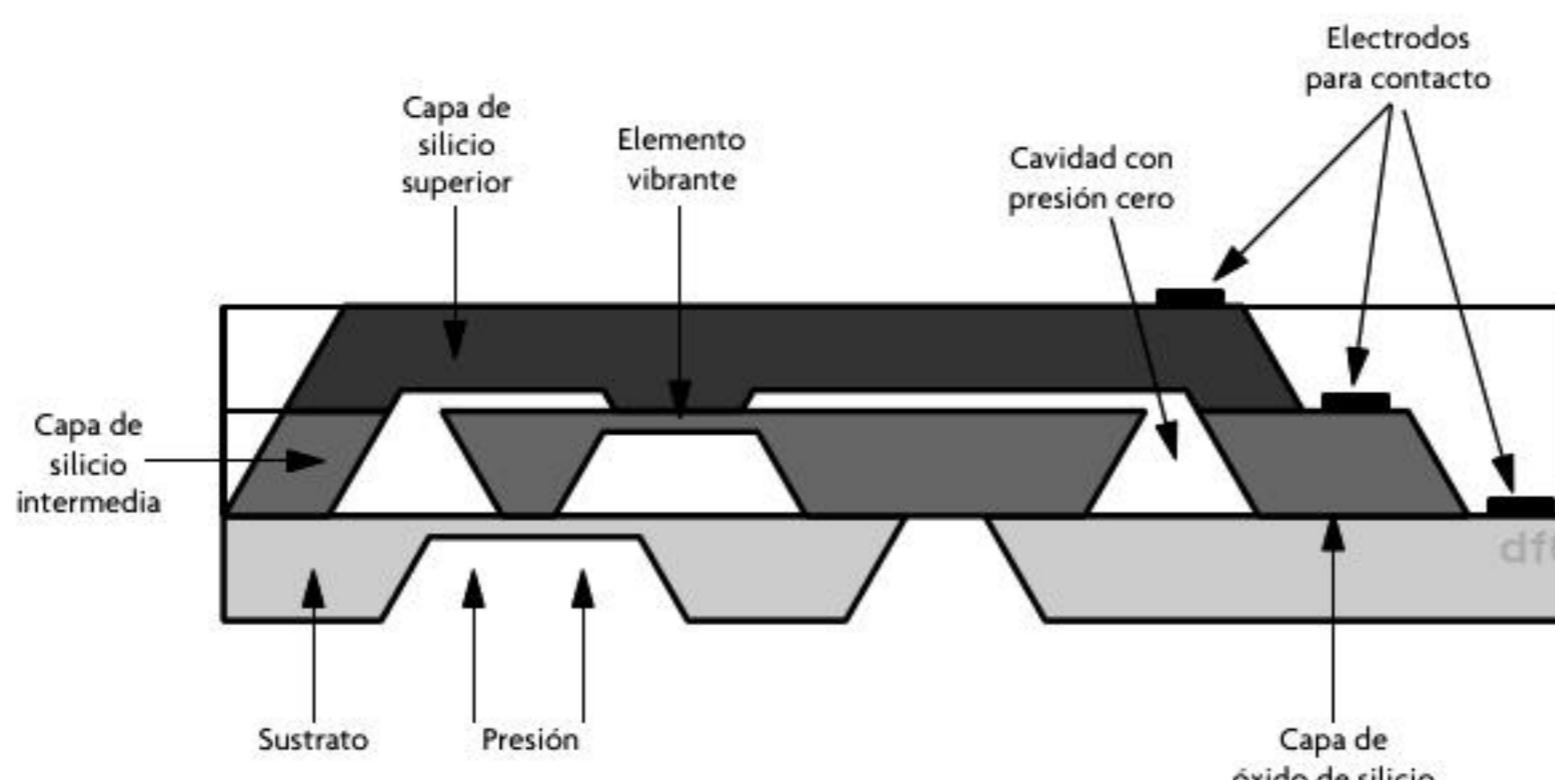
$P$ : presión

$f$ : frecuencia

$f_0$ : frecuencia en estado inicial

$X, Y, Z$ : constantes propias del sensor

Este tipo de sensores también se desarrolla en tecnología de microelectrónica; en este caso, son llamados sensores de estado sólido de presión o sensores MEMS de presión. En estos solo cambia el elemento de transducción; en este caso, el circuito con las bobinas y el amplificador son reemplazados por circuitos de lectura especializados. En la figura 8.21 se muestra un corte transversal de un sensor de presión basado en el principio de oscilación.



**Figura 8.21** Sensores de presión basados en sensores de estado sólido.

Entre las principales ventajas que presenta este tipo de sensores destacan:

- Su exactitud.
- Presión y resolución excelentes.
- Bajo costo.

Por otro lado, una de sus principales desventajas es su limitado ancho de banda, debido a las características físicas del elemento oscilador.

## Ejercicio de aplicación

### Altímetro

#### Objetivo

Medir altitud, presión barométrica y temperatura a las que se encuentra el sensor MEMS MPL3115A2, con el uso de Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor de altitud MPL3115A2
- Push-button
- 1 resistencia de 10 kΩ
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del sensor de altitud MPL3115A2

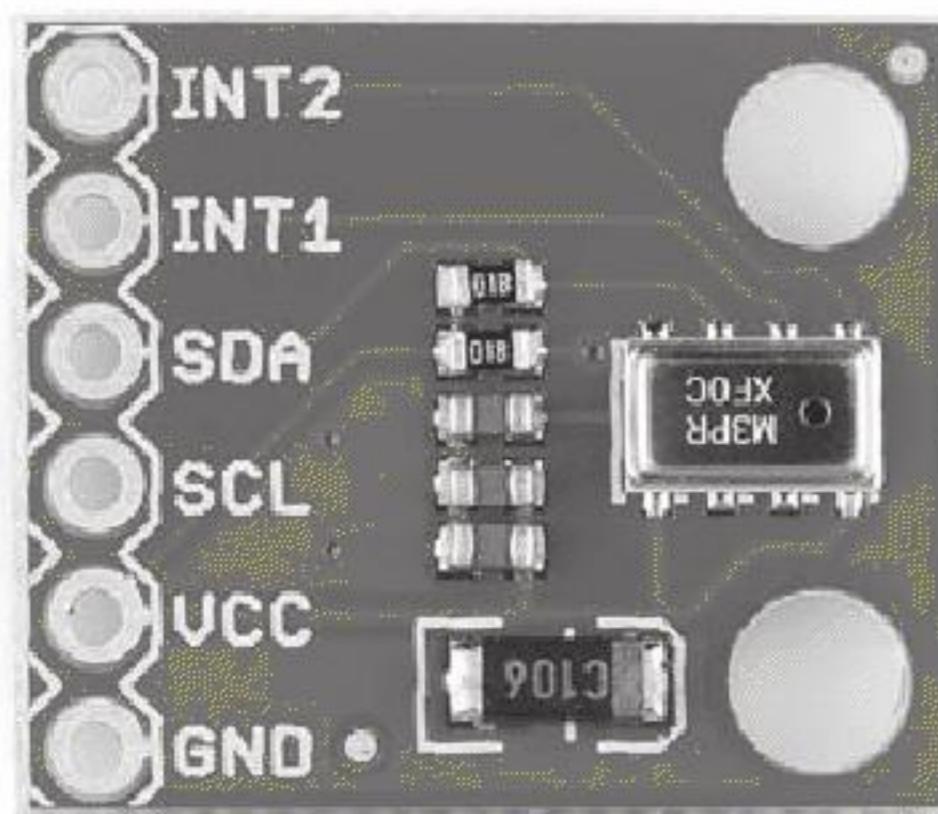
El MPL3115A2 es un sensor que mide la presión barométrica de un lugar y a partir de esta calcular su altitud; además,

también mide la temperatura del medio. El sensor puede comunicarse con otros dispositivos mediante el protocolo de comunicación serie I2C. La resolución para la altitud/presión barométrica es de 20 bits, mientras que para la temperatura es de 12 bits.

El sensor cuenta con dos señales de interrupciones, las cuales se activan cuando una nueva adquisición de datos está disponible, cuando un número de muestras es almacenado en el sistema FIFO o cuando se detecta un cambio en la presión/altitud o temperatura.

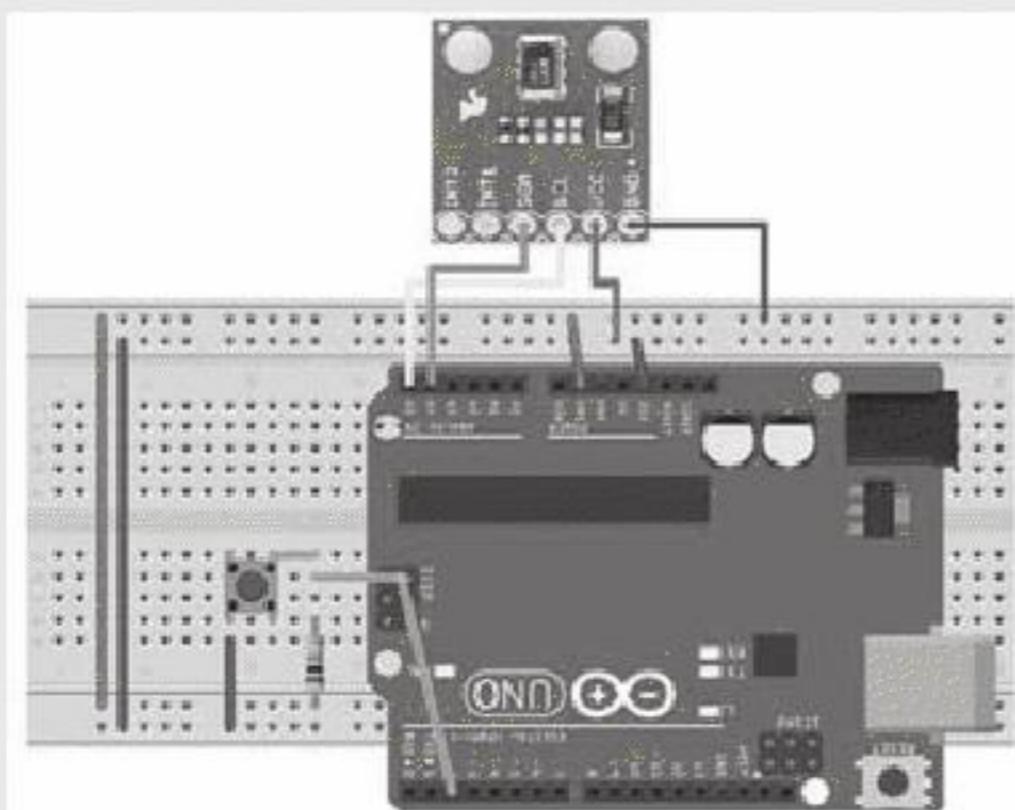
La descripción de pines del sensor es la siguiente:

- **INT2.** Señal de Interrupción 2 del sensor.
- **INT1.** Señal de Interrupción 1 del sensor.
- **SDA.** Línea de datos del protocolo I2C
- **SCL.** Señal del reloj del protocolo I2C
- **VCC.** Voltaje de alimentación de 3.3 V
- **GND.** Voltaje de referencia (tierra)



**Figura 8.22** Sensor de presión/altitud.

### Construcción del circuito



**Figura 8.23** Diagrama del circuito para medir la presión, altitud y temperatura del medio.

Los pines para la comunicación I2C del sensor MPL3115A2 SDA y SCL se conectan a los pines analógicos A4 y A5, respectivamente, que corresponden a los pines configurados por la librería Wire.h para la comunicación TWI.

Un push-button se conecta con una resistencia pull-down, lo que se utiliza para hacer intercambios entre los modos de presión o altitud, que se despliegan en el monitor serie.

### Código

#### Descripción del programa

El siguiente programa:

- Configura el tiempo mínimo entre muestras en 130 ms.
- Si la variable `select = false`, el sensor se configura como altímetro.
- Lee los 20 bits correspondientes a la altitud con una resolución de 30 cm y los convierte a decimal para imprimirlas en el monitor serie.

- Si la variable `select = true`, el sensor se configura como medidor de presión barométrica.
- Lee los 20 bits de la presión barométrica con una resolución de 2 Pa y los muestra en el monitor serie.
- Realiza la lectura de la temperatura con una resolución de 12 bits y los convierte a grados Celsius para imprimirlas en el monitor serie.

```

//*****Altimetro*****
/*
**El MPL3115A2 es un sensor que mide la
presion atmosferica del lugar y
**calcula la altura a la que se encuentra
sobre el nivel del mar.
**Tambien detecta la temperatura local en
grados Celsius. Se comunica
**con otros dispositivos mediante el protocolo
I2C. Consta de una
**resolucion menor de 30 cm y 2 pascales.
*/
/*
**En el siguiente programa se obtendra la
altitud en m, la presion
**atmosferica en Pa y la temperatura local
en °C del sensor. Con un
**push-button se alternara entre la altitud
y la presion.
*/
//*****
//Libreria que hace posible la comunicacion I2C
#include <Wire.h>

#define ADDRESS 0X60      //Direccion I2C del
sensor MPL3115A2

#define OUT_P_MSB  0x01    //Lectura del MSB de la
altitud/presion. No es //necesario definir la
direccion para el LSB pues el valor del
//comando se incrementa en forma automatica.
Consultar la hoja de datos para //mas detalle
#define OUT_T_MSB  0x04    //Lectura del MSB de la
temperatura

#define CTRL_REG1  0x26    //Registro de Control 1
#define DR_STATUS  0X00    //Registro STATUS

//La variable 'select' conmuta entre los modos
altitud/presion
boolean select = false;

void setup()
{
  Wire.begin(); //Se inicia la comunicacion I2C,
Arduino se establece como
  //maestro
  Serial.begin(9600); //Se inicia la
comunicacion serie a 9600 baudios
  attachInterrupt(0, altpre, FALLING); //
Interrupcion para la
  //conmutacion entre los modos altitud/presion.
  La interrupcion se

```

```

//activa en el PIN DIG 2 con los flancos de
bajada. La interrupcion
//activa la funcion altpre.
overSampleRatio(5); //Se define el tiempo
entre muestras de 130 ms.
}

voidloop()
{
//Altimetro
if (select == false)
{
    modoAltimetro(); //Se configura al
sensor en modo altimetro
    longreadAltura = readAP(); //Se lee la
altura del sensor
    floatint_altura = (float) (readAltura>>
8); //Parte entera de la
//altura
    floatdec_altura = (float) ((readAltura>> 4)
& (0x0F)) / 16;
//Parte decimal de la altura
    float altura = int_altura + dec_altura; ///
Se calcula la altitud
    //final
    Serial.print("Altitud: "); //Se imprime
el valor de altura
    //calculado
    Serial.print(altura);
    Serial.print("m ");
}
//Medicion de la presion
else
{
    modoBarometro(); //Se configura al sensor
para la medicion de presion
    longreadPresion = readAP(); //Lectura de la
presion
    floatint_presion = (float) (readPresion>>
6); //Parte entera de la
//presion
    floatdec_presion = (float) ((readPresion>>
4) & (0x03)) / 4;
//Parte decimal de la presion
    floatpresion = int_presion + dec_presion;
//Calculo de la presion
    //final
    Serial.print("Presion: "); //Se imprime
el valor de presion
    //calculado
    Serial.print(presion);
    Serial.print("Pa ");
}
//Temperatura
floattemp = readTMP(); //Lectura de la
temperatura local en
//grados Celsius
Serial.print("Temperatura: ");//Se imprime el
valor de la temperatura
Serial.print(temp);
Serial.println(" C");
}

```

```

}

voidaltpre()
{
    //Antirrebotes. Se esperan 20 ms para ignorar
los rebotes y
    //posteriormente se pregunta de nuevo por el
estado del PIN
    //Se invierte la variable 'select' para
cambiar de modo altitud/presion
    if (digitalRead(3) == LOW)

        delay(20);
    if (digitalRead(3) == LOW)
        select = !select;
}
longreadAP()
{
    oneShot(); //Se toma una lectura

    bytepdr = leerIIC(DR_STATUS); //Hasta que el
bit 2 del registro
    //STATUS (el bit PDR)
    while(pdr& 0x02 == 0) //sea igual a 1
se continuara con la
    //lectura de los registros
    delay(1); //es decir,
hasta que no exista nueva
    //informacion disponible
    //no se
continua con la lectura.

    //Si existe informacion disponible se procede
a leer los registros
correspondientes
    Wire.beginTransmission(ADDRESS); //Se inicia la
comunicacion I2C con el
    //sensor
    Wire.write(OUT_P_MSB); //Este comando
permite comenzar con
    //la lectura de los registros desde el MSB. No
se necesita escribir el
    //comando para la lectura del CSB y LSB, pues
el sensor se direcciona
    //en forma automatica.
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(ADDRESS, 3); //Lectura del
MSB, CSB y LSB
    bytemsb = Wire.read();
    bytecsb = Wire.read();
    bytelsb = Wire.read();

    //Se concatenan los 3 bytes
    long pressure = (long) msb<< 16 | (long) csb<< 8
    | (long) lsb;

    returnpressure;
}

floatreadTMP()
{
}

```

```

oneShot(); //Se toma una lectura

bytepdr = leerIIC(DR_STATUS); //Se espera
hasta que se tenga
//disponible una nueva lectura
while(pdr& 0x02 == 0) //Revisando
el bit PDR del registro
//STATUS
delay(1);
Wire.beginTransmission(ADDRESS); //Se inicia
la comunicacion I2C con
//el sensor
Wire.write(OUT_T_MSB); //Se
comienza la lectura de la
//temperatura
Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(ADDRESS, 2); //Lectura
del MSB y LSB
bytemsb = Wire.read();
bytelsb = Wire.read();
floatdec_tmp = (float) (lsb>>4)/16; //Parte
decimal de la temperatura
floattmp = (float) (msb) + dec_tmp; //Se suma
la parte decimal con la
//parte entera

returntmp;
}

//Se
habilita al sensor para tomar una sola lectura
voidoneShot()
{
    byte ost1 = leerIIC(CTRL_REG1); //Se pone en 0
el bit 2 del registro de
//Control 1 para preparar al sensor para una
nueva lectura
    byte ost0 = ost1 & 0xFD;
    escribirIIC(CTRL_REG1, ost0);
ost1 |= 0x02; //Se pone en 1
el bit 2 del registro de
    escribirIIC(CTRL_REG1, ost1); //Control 1 para
tomar una lectura.
}

voidmodoBarometro()
{
    bytemodoP = leerIIC(CTRL_REG1);
    modoP &= 0x7F; //Se pone en 0
el bit 7 del reg.
    escribirIIC(CTRL_REG1, modoP); //de Control 1
que habilita al sensor
//como medidor
de presion
}

voidmodoAltimetro()
{
    bytemodoA = leerIIC(CTRL_REG1);
    modoA |= 0x80; //Se pone en
1 el bit 7 del reg. de

```

```

escribirIIC(CTRL_REG1, modoA); //Control 1
que habilita el modo
//altimetro
}

voidoverSampleRatio (bytesampleRatio)
{
    sampleRatio <=> 3;//Se escribe <101> en los
bits 3~5(OST) del Registro
    bytereg = leerIIC(CTRL_REG1); //de Control 1,
para configurar la
    reg |= sampleRatio; //velocidad de
muestreo a 130 ms
    escribirIIC(CTRL_REG1, reg);
}

//Lectura I2C
byteleerIIC (byte add)
{
    bytereading;
    Wire.beginTransmission(ADDRESS); //Se inicia
la comunicacion I2C con
//el dispositivo de la direccion ADDRESS
    Wire.write(add); //Se escribe el comando
para leer algun registro
    Wire.endTransmission(false);

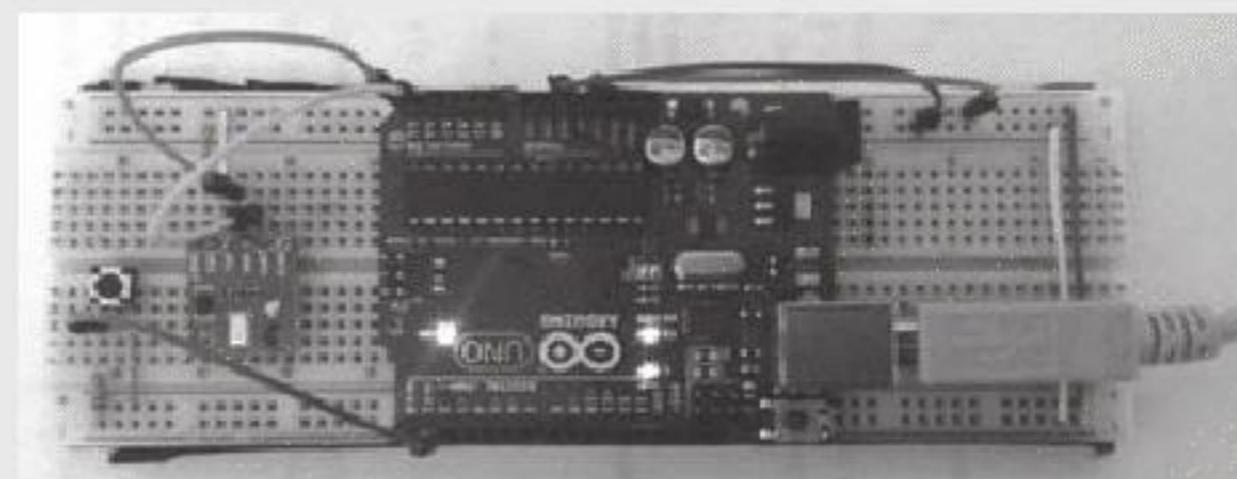
    Wire.requestFrom(ADDRESS, 1); //Se lee el
registro establecido por
//el comando
    reading = Wire.read();

    return reading;
}

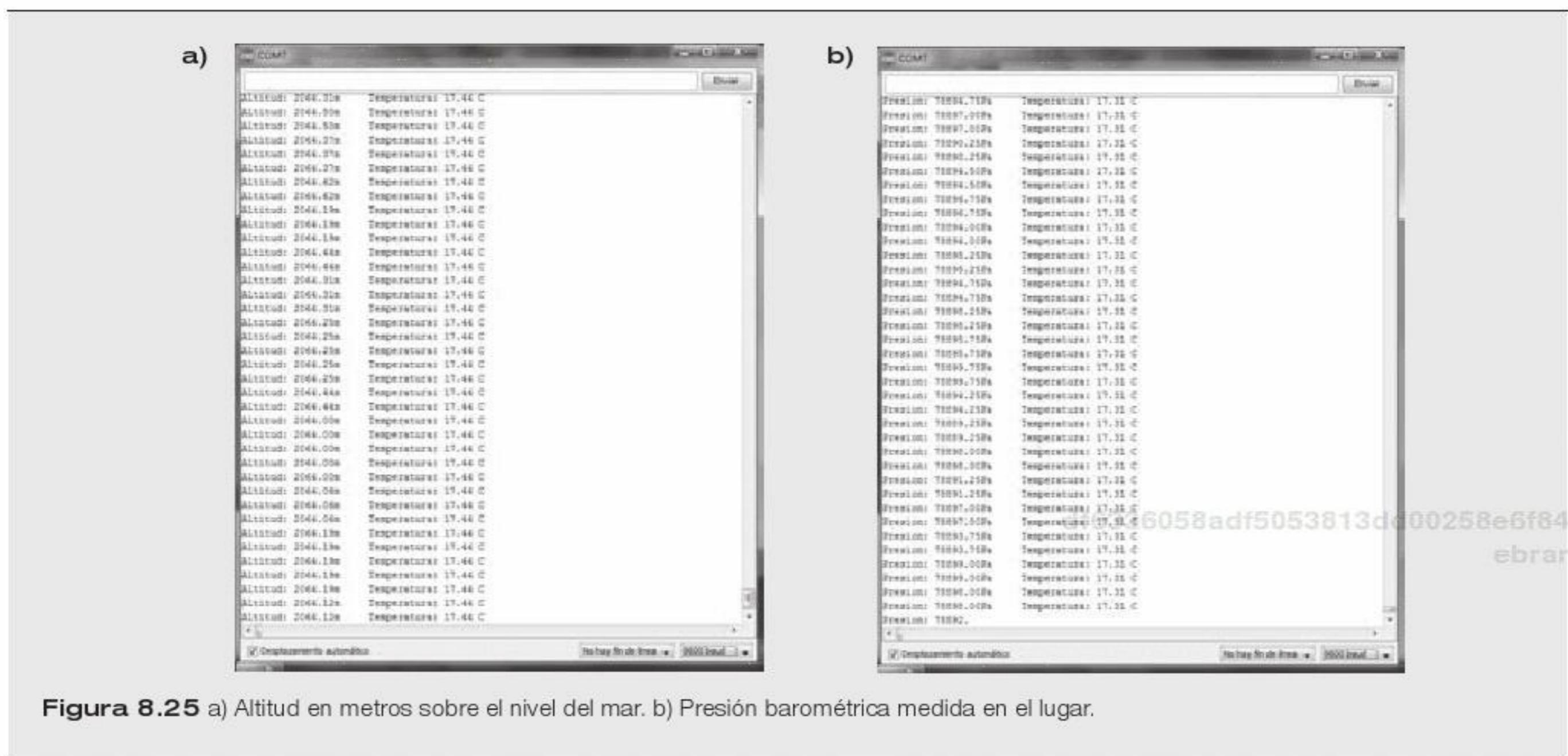
//Escritura I2C
voidescribirIIC (byteadd, byte valor)
{
    Wire.beginTransmission(ADDRESS); //Se inicia
la comunicacion I2C con
//el dispositivo de la direccion ADDRESS
    Wire.write(add); //Se escribe en un
comando «add» un «valor»
    Wire.write(valor);
    Wire.endTransmission(); //Se finaliza la
comunicacion I2C
}

```

### Pruebas



**Figura 8.24** Altímetro/medidor de presión barométrica. El modo se alterna cada que se presiona el push-button.



**Figura 8.25** a) Altitud en metros sobre el nivel del mar. b) Presión barométrica medida en el lugar.

## Sensores de presión basados en medición de capacitancia variable

Este tipo de sensores se basa en el principio de transducción de capacitancia variable, de tal modo que la transducción es entre la fuerza ejercida sobre un diafragma de área conocida y el desplazamiento de uno de los electrodos que forman el capacitor variable; así, a mayor presión, mayor desplazamiento del diafragma.

Para explicar cómo funciona este sensor es necesario recordar cómo se calcula un capacitor con respecto a su geometría:

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

donde:

$C$ : capacitancia

$d$ : distancia entre electrodos

$\epsilon_r$ : permitividad relativa del medio

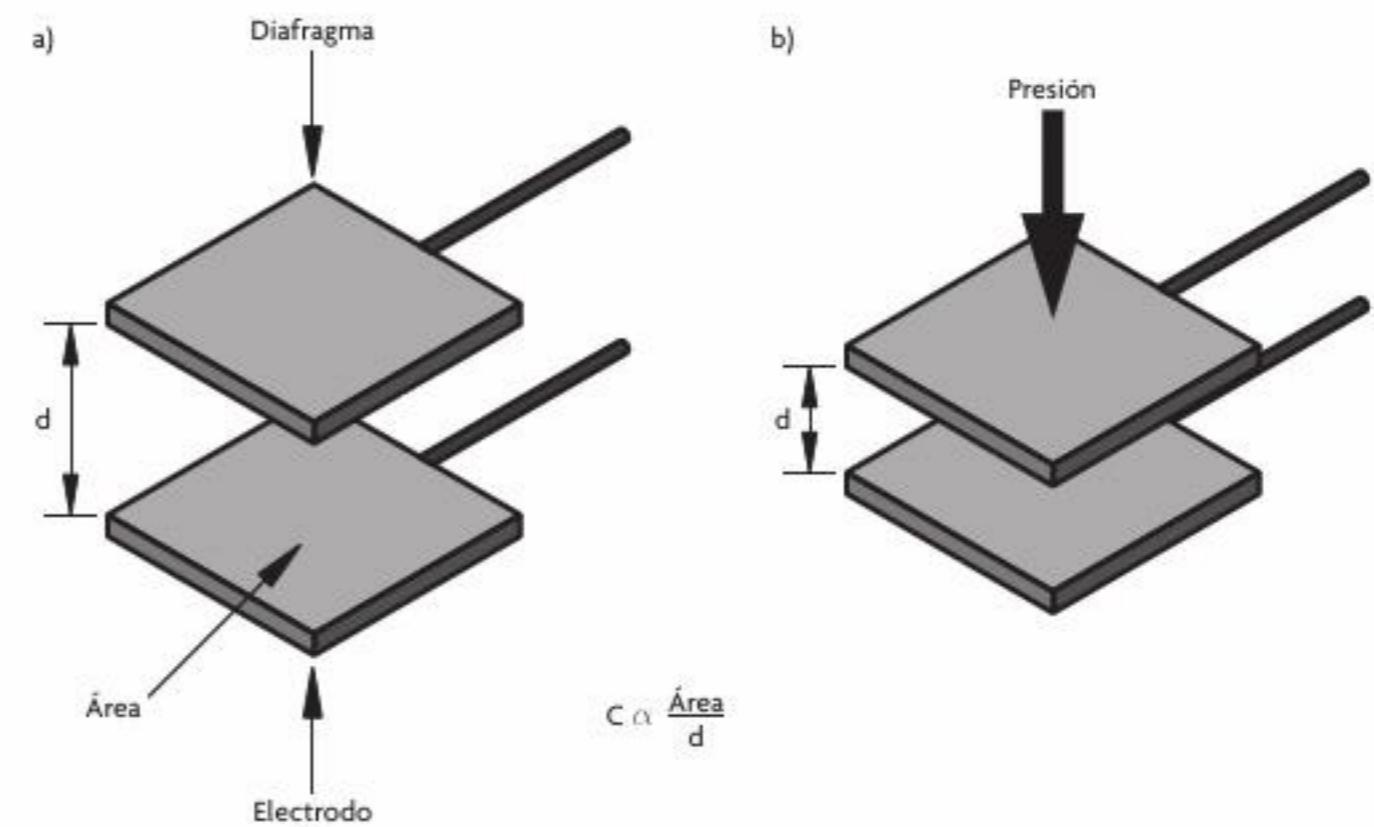
$\epsilon_0$ : permitividad del vacío

$A$ : área de traslape

De acuerdo con la figura 8.26, es posible observar que cuando se aplica la presión sobre el diafragma existe un cambio en la distancia entre los electrodos, suponiendo que el electrodo opuesto esté fijo. Así, el cambio de capacitancia puede calcularse con la ecuación:

$$\frac{C}{d} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d^2}$$

Este tipo de sensores suele implementarse como un sensor MEMS de estado sólido, debido a su baja dependencia de la temperatura y su bajo consumo de potencia, comparado con sensores pie-



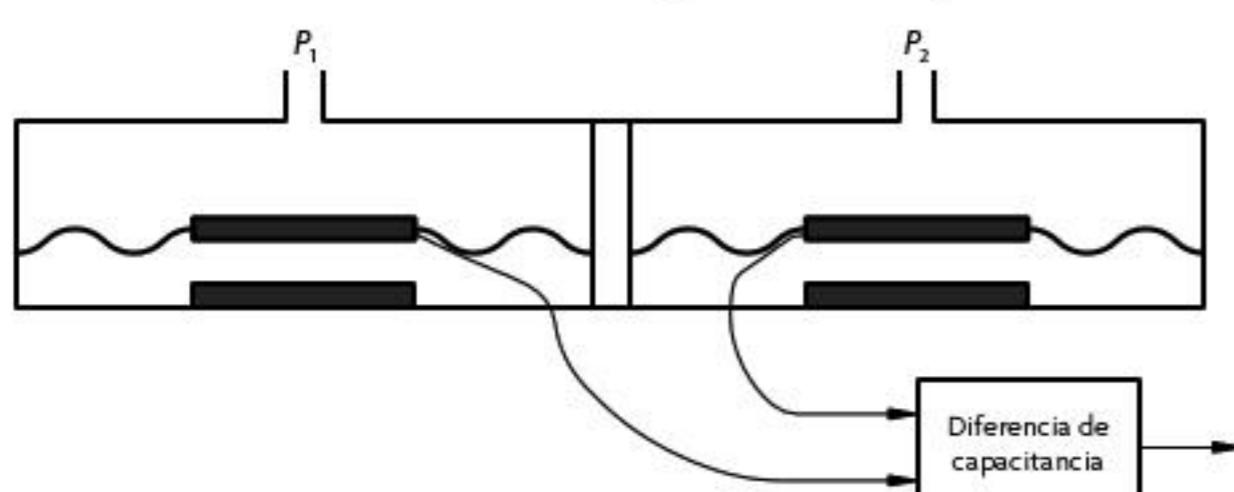
**Figura 8.26** Sensor de presión basado en el principio de variación de capacitancia. a) Capacitor de placas paralelas. b) Capacitor como sensor de presión.

zoresistivos o piezoelectricos; otra ventaja es que al ser un sensor MEMS y tener tamaños muy pequeños, es posible afirmar que, a pesar de la naturaleza de la ecuación anterior, el sensor trabaja de manera lineal dentro de los rangos propuestos por los fabricantes.

En este tipo de sensores se suele distinguir dos arquitecturas básicas de detección, la primera consiste en implementar un principio de capacitancia diferencial, y la segunda en fabricar una micro-masa que tiene la función de electrodo móvil.

### Sensores capacitivos de presión basados en capacitancia diferencial

Este principio de funcionamiento consiste en medir la diferencia de capacitancia entre dos transductores capacitivos el primero es el elemento de referencia (elemento sensitivo a la presión  $P_1$ ) y el segundo transductor es sensitivo a la presión que se desea medir (elemento sensitivo a la presión  $P_2$ ).



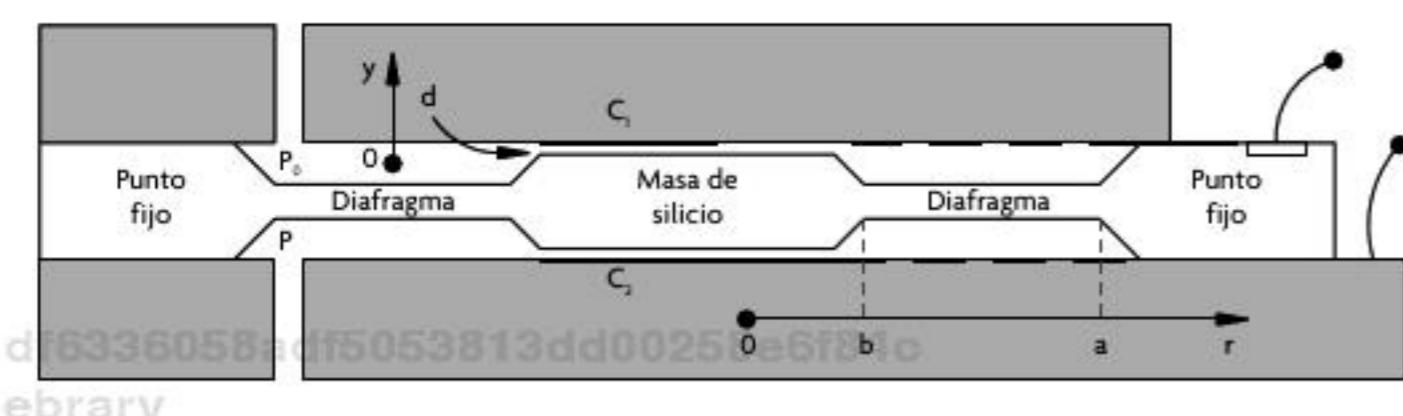
df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Esta configuración de sensor de presión presenta un compromiso entre sensitividad y linealidad, esto significa que a mayor sensitividad, menor linealidad (véase figura 8.27). Esto se debe principalmente a que cuando el diafragma sensitivo percibe la presión, la proximidad a la placa paralela no es uniforme, de tal manera que cuanto más aumenta la presión, la forma que describe el diafragma será más parecida a la de un objeto cóncavo, disminuyendo mucho la linealidad del sensor.

**Figura 8.27** Sensor de presión basado en el principio de capacitancia diferencial.

### Sensores capacitivos de presión basados en una masa móvil

Como se menciona en la sección anterior, el principal problema que presentan los sensores capacitivos de presión basados en captores de placas paralelas y diafragmas planos es su alta no linealidad cuando el área de traslape es grande, ya que su desplazamiento cada vez es menos uniforme. Con el fin de evitar estos problemas, la arquitectura de sensores capacitivos de presión basados en una masa móvil ha ganado popularidad entre los sensores MEMS de presión.



**Figura 8.28** Sensor de presión capacitivo basado en el principio de masa móvil.

Este tipo de sensores constan de un elemento de masa móvil acoplado mecánicamente al diafragma sensitivo, de tal manera que el desplazamiento de la masa móvil será proporcional a la diferencia de presiones y a la rigidez del diafragma.

El desplazamiento en el diafragma puede calcularse por medio de la ecuación:

$$y = k_x(P - P_0)$$

donde:

$y$ : desplazamiento en el eje  $y$

$k_x$ : rigidez del diafragma en dirección  $x$

$P$ : presión aplicada

$P_0$ : presión de referencia

Así, la capacitancia equivalente para  $C_1$  y  $C_2$  cambiará de manera opuesta (véase figura 8.28):

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0 - y}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0 + y}$$

donde:

$d_0$ : distancia inicial

Al calcular la diferencia de capacitancia entre  $C_1$  y  $C_2$  es posible incrementar la sensitividad del sensor. Una de las principales ventajas que tiene este principio de transducción es que a pesar de que el diafragma se sigue deformando de manera cóncava o convexa, induce un movimiento lineal en la masa móvil. Por otro lado, la desventaja que presentan es su dificultad de fabricación.

## Manómetros

El manómetro es un instrumento utilizado para la medición de la presión en los fluidos, en general determinando la diferencia entre la presión del fluido y la presión local. Una configuración básica para un manómetro es un tubo de vidrio con forma de U, el cual se llena con un líquido (por lo común mercurio). Si los extremos A y B (véase figura 8.29) del tubo lleno de líquido se dejan sin conexión, considerando que se encuentran a la misma altura, el líquido tendrá alturas iguales dado que existen presiones iguales. Ahora, si se aplica un flujo con una presión diferente a la atmosférica por el extremo B, existirá un cambio en la altura del líquido, la cual será proporcional a la diferencia de presiones (véase figura 8.30).

Para la medición de presiones con manómetros de este tipo (también conocidos como manómetros de columna) se suele agregar una escala conocida que relacione la altura del líquido con la presión aplicada, conociendo una presión de referencia, la cual puede ser la atmosférica. Además de la forma en U, los manómetros de columna también son comunes en forma de tubo inclinado, los cuales siguen el mismo principio de funcionamiento.

Otro tipo de manómetro muy popular es el manómetro de Bourdon (véase figura 8.31), considerado un instrumento mecánico que emplea como elemento sensitivo un tubo metálico curvado (denominado tubo Bourdon), de sección transversal aplanada. Debido a que un extremo del tubo del manómetro de Bourdon es cerrado, la presión que se va a medir se aplica por el otro extremo. En el caso de este manómetro, a medida que la presión aumenta, el tubo tiende a adquirir una sección circular y enderezarse. El movimiento del extremo cerrado mide la presión interior y provoca el movimiento de una aguja, la cual se desplaza sobre una escala.

Los manómetros son elementos muy utilizados para la medición de presiones en sistemas neumáticos e hidráulicos, así como para la medición de flujos de fluidos.

## 8.2 Sensores de flujo

La medición del flujo de líquidos o gases tiene un amplio campo en diversos procesos industriales, donde además juega un papel en extremo relevante, ya que la medición de flujos sirve como base para controlar el desarrollo del proceso de manera adecuada.

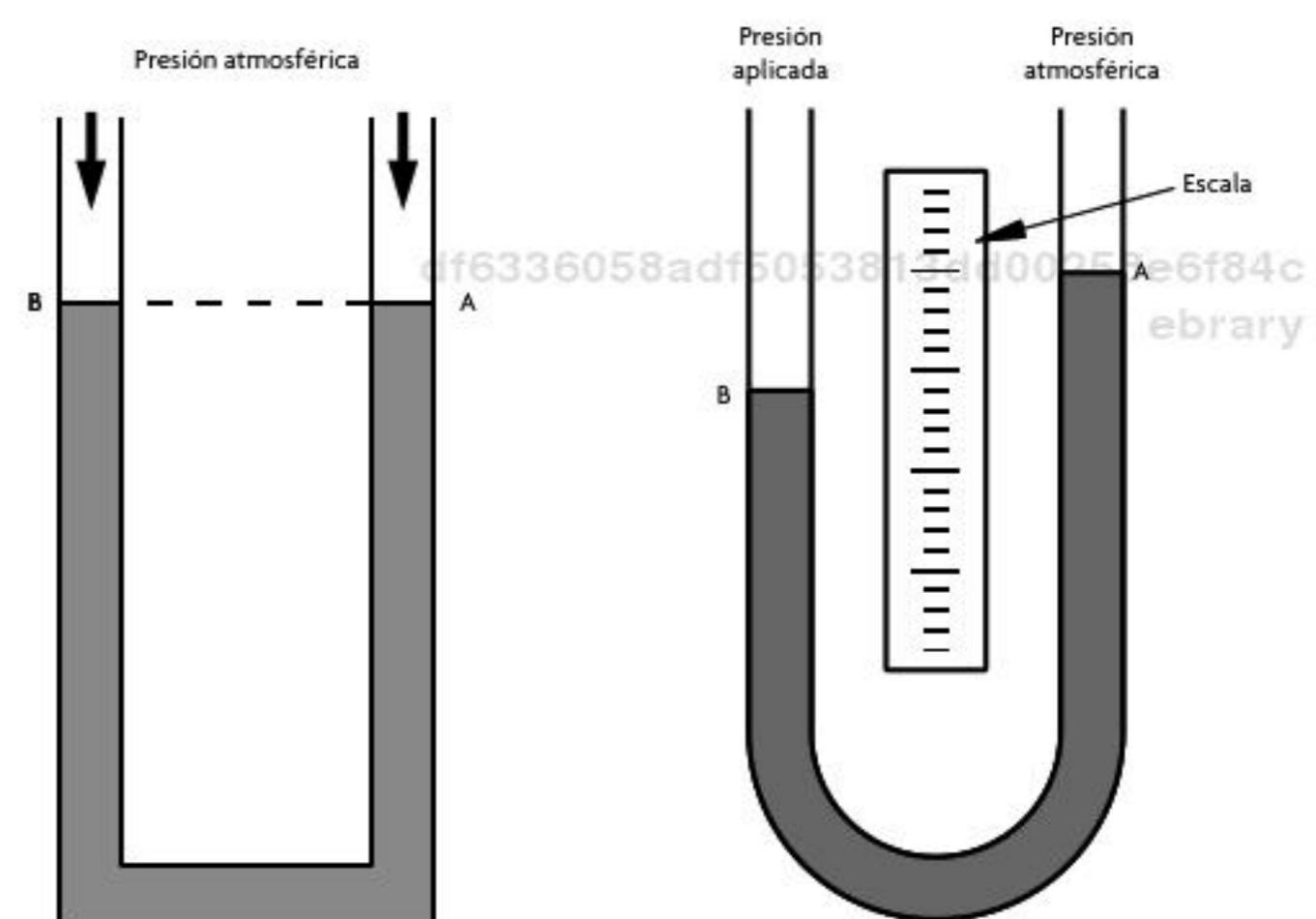


Figura 8.29 Manómetro en U a presión atmosférica.

Figura 8.30 Manómetro en U con presión aplicada.

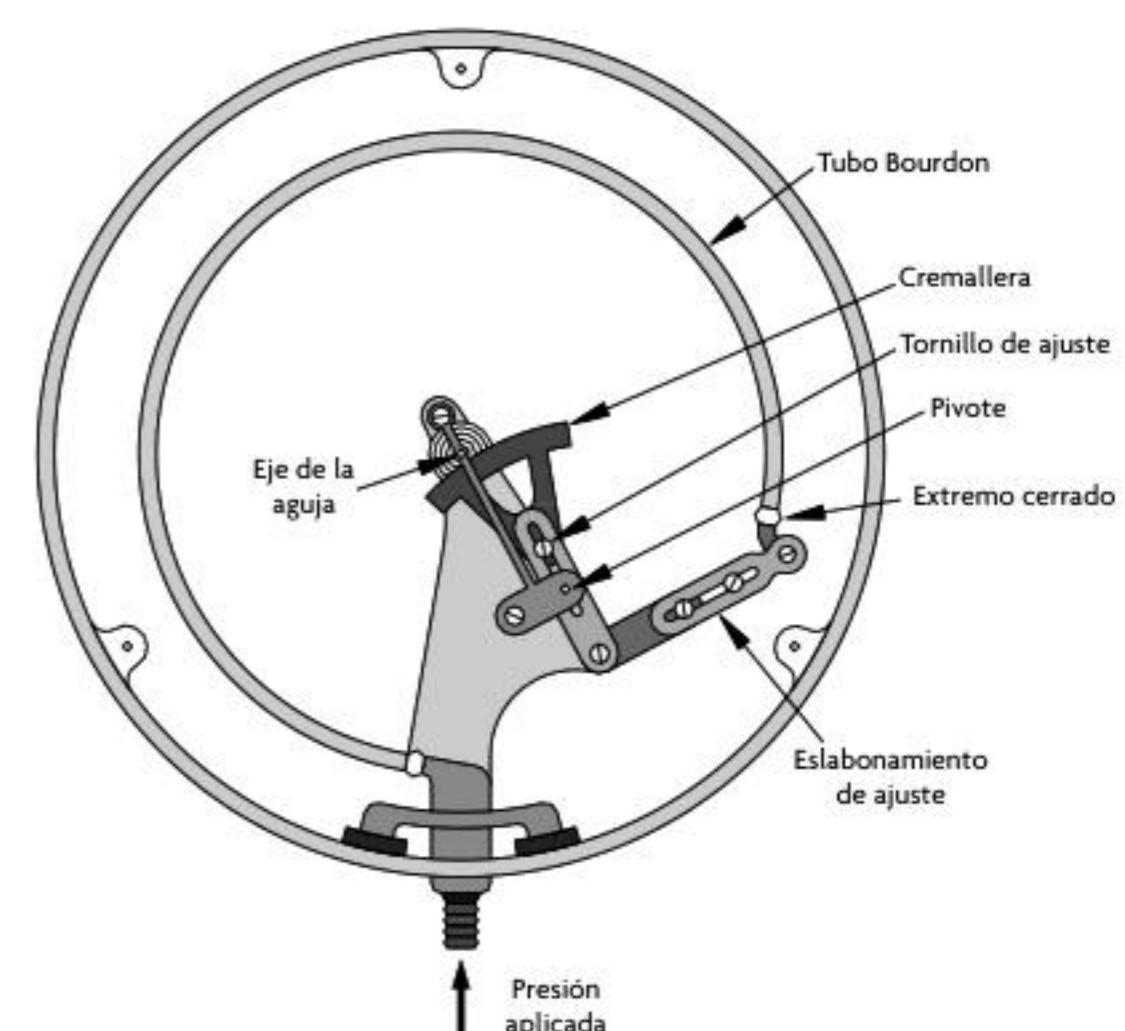


Figura 8.31 Manómetro de Bourdon.

La detección del flujo de un líquido o gas se puede realizar de tres formas distintas. Una es la medición vectorial, en la cual la velocidad y dirección del fluido deben ser detectados; un segundo tipo de medición es la detección del flujo volumétrico, y el tercer tipo de medición es la de flujo máscio. Para la medición de flujo en cualquiera de sus tres variantes se suele emplear distintas técnicas.

Para entender los principios de funcionamiento de los sensores de flujo, primero es necesario definir algunos conceptos básicos. Así, lo primero es definir qué es un flujo y qué unidades de medida se usan para cuantificar su magnitud.

Un **flujo** se define como la cantidad de sustancia que pasa por una sección determinada durante un instante dado. Por su parte, la **unidad de medida** utilizada en el sistema internacional para cuantificar el flujo es  $\text{m}^3/\text{s}$ . Una relación muy utilizada para medir el flujo de un gas o fluido es:

$$Q_V = vA \quad (8.4)$$

donde:

$Q_V$ : flujo volumétrico

$v$ : velocidad de la sustancia

$A$ : área del conducto

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

De la ecuación 8.4 se ve que si se conoce el área del conducto por el cual circula el fluido y su velocidad, es posible calcular el flujo volumétrico. Varios métodos de detección de flujo en conductos cerrados se basan en esta sencilla expresión; no obstante, lo que se detecta en realidad es la velocidad del fluido.

Cuando lo que se requiere es una medición vectorial del fluido, es posible determinar la dirección del flujo si se conocen las diferencias de presión en el conducto, ya que el flujo siempre irá de la zona de mayor presión a la de menor presión; así, para una medición vectorial se requiere medir tanto la velocidad de un fluido como sus presiones. Aunque a primera vista parece más compleja la labor de una medición vectorial respecto a una de flujo volumétrico, en realidad la medición vectorial se puede llevar a cabo solo si se conoce la diferencia de presiones entre dos secciones del conducto, lo que permite conocer de forma directa la dirección de flujo, y con el uso de la ecuación de Bernoulli (ecuación 8.5) podemos conocer las velocidades tomando como base las diferencias de presiones.

$$P_1 + \frac{\rho_d v_1^2}{2} + \rho_d g y_1 = P_2 + \frac{\rho_d v_2^2}{2} + \rho_d g y_2 \quad (8.5)$$

donde:

$P_1$ : presión en el punto 1

$P_2$ : presión en el punto 2

$\rho_d$ : densidad del fluido

$g$ : aceleración de la gravedad

$v_1$ : velocidad del fluido en el punto 1

$v_2$ : velocidad del fluido en el punto 2

$y_1$ : altura del fluido en el punto 1

$y_2$ : altura del fluido en el punto 2

La ecuación de Bernoulli establece una relación entre la presión, la velocidad y la altura de un flujo en un punto (estable, no viscoso e incompresible) respecto del mismo flujo en otro punto. Para observar la relación existente entre las presiones y las velocidades se considera que ambos puntos están a la misma altura; así, la ecuación 8.5 se simplifica como:

$$P_1 + \frac{\rho_{v1}^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_{v2}^2}{2} \quad (8.6)$$

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Si se considera que el conducto tiene un área de sección menor en el punto 2 que en el punto 1, ¿cómo serán las velocidades y presiones de un punto respecto al otro? Para responder a esto es necesario recurrir a la ecuación de continuidad, la cual establece que para un flujo incompresible que fluye a través de un conducto de área variable, el flujo másico es igual en cualquier parte del conducto.

$$m = \rho_{av} V \quad (8.7)$$

donde:

$m$ : masa

$V$ : volumen

Ahora bien, primero se define el flujo másico como la cantidad de masa de una sustancia que pasa por una determinada sección durante un instante. Como podrá recordarse, esta definición es bastante similar a la definición del flujo volumétrico. Entonces, como se vio antes, se usará la ecuación 8.4, que define al flujo volumétrico para encontrar una expresión que defina al flujo másico, la cual, para el caso planteado de un flujo incompresible, se obtiene usando la relación de masa-volumen (ecuación 8.7) y la ecuación de flujo volumétrico; así, la ecuación para el flujo másico ( $Q_m$ ) queda de la forma siguiente:

$$Q_m = \rho_{vd} \quad (8.8)$$

Así, la ecuación de continuidad para el caso que se analiza queda como:

$$\rho_1 d_1 A_1 = \rho_2 d_2 A_2 \quad (8.9)$$

Si en la ecuación 8.9 se considera que la densidad del fluido es constante, entonces esta se puede reducir a:

$$d_1 A_1 = d_2 A_2 \quad (8.10)$$

De la ecuación 8.10 se puede deducir que si el área del conducto en el punto 2 es menor al área en el punto 1, para que se mantenga la igualdad en la ecuación de continuidad la velocidad en el punto 2 deberá ser mayor a la velocidad en el punto 1. Volviendo a la ecuación de Bernoulli que se había planteado para ver la relación existente entre las velocidades y presiones, ahora ya se sabe que la velocidad en el punto 2 será mayor a la velocidad en el punto 1; entonces, para que el balance de la ecuación 8.6 se mantenga, la presión en el punto 2 debe ser menor a la presión en el punto 1, entonces la relación entre la diferencia de presiones y la diferencia de velocidades en un fluido se escribe como:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_d}{2} (V_2^2 - V_1^2) \quad (8.11)$$

Por último, se puede calcular la velocidad del fluido en un punto si, con base en las presiones, la ecuación 8.11 se expresa en términos de una sola velocidad. Lo anterior se puede lograr si se despeja alguna de las dos velocidades de la ecuación 8.10; en este caso, al despejar la velocidad en el punto 1, la expresión resultante sería:

$$V_1 = V_2 \frac{A_2}{A_1} \quad (8.12)$$

Sustituyendo la ecuación 8.12 en la ecuación 8.11 se obtiene:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_d}{2} \left( V_2^2 - \left( V_2 \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right) \quad (8.13)$$

Si de la ecuación 8.13 se despeja  $v_2$ , entonces se habrá encontrado la velocidad en el punto 2 con base en las diferencias de presión (ecuación 8.14); así, midiendo solo las presiones se podría realizar una medición vectorial.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_d \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}} \quad (8.14)$$

Como se mencionó antes, este cálculo sería válido para el caso de un fluido no viscoso; por tanto, no toma en cuenta la fuerza de fricción presente entre el fluido y el conducto, la cual se opondría al flujo del fluido, variando así el flujo volumétrico.

Si ahora se considera la viscosidad dinámica del fluido para definir el flujo volumétrico del mismo por el conducto, primero se debe considerar el régimen del flujo<sup>3</sup> que se presenta en el proceso a medir.

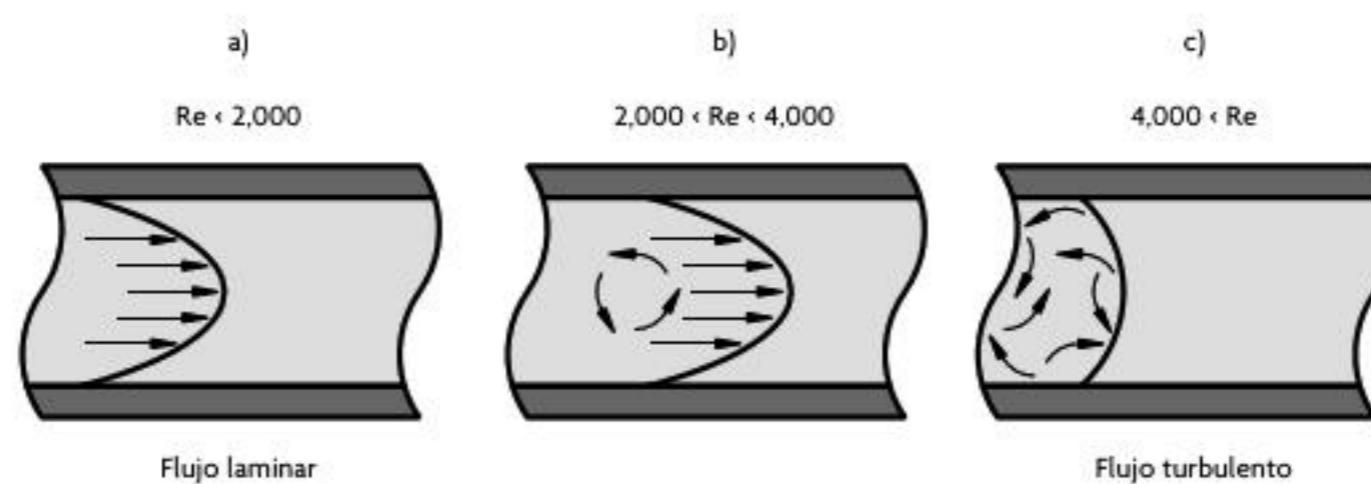
Para definir el régimen en que se encuentra un flujo se utiliza el número de Reynolds, el cual es una relación adimensional que relaciona la inercia del fluido con la fuerza de fricción presente entre el fluido y el conducto, y se calcula con la ecuación 8.15, para el caso de conductos de sección circular.

$$Re = \frac{vd\rho_d}{\eta} \quad (8.15)$$

donde:

- Re: número de Reynolds
- d: diámetro del conducto
- $\eta$ : viscosidad dinámica del fluido

Por una parte, si el número de Reynolds resulta menor a 2 000, se dice que el flujo está en régimen laminar; por tanto, el perfil de velocidades del fluido estará definido por una parábola, teniendo el fluido su máxima velocidad al centro de la sección transversal, como se observa en la figura 8.32 a). Pero, por otra parte, si el número de Reynolds es mayor a 4 000 se dice que el flujo está en régimen turbulento, con un perfil de velocidades irregular, pero con la misma velocidad promedio en toda la sección transversal, como se observa en la figura 8.32 c). Para valores intermedios del número de Reynolds se pueden tener flujos laminares, turbulentos o mixtos, según la velocidad y viscosidad del fluido y el tipo de conducto, como se ve en la figura 8.32 b).



**Figura 8.32** Regímenes de flujo.

El cálculo del flujo volumétrico considerando los efectos de la viscosidad se deberá realizar según el régimen del flujo; para un flujo laminar el flujo volumétrico viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q_v = \frac{\pi r^4 (P_1 - P_2)}{8 \eta L} \quad (8.16)$$

<sup>3</sup> El régimen de un flujo se define por la combinación del efecto de gravedad y viscosidad, y se relaciona en forma directa con el perfil de velocidades de un fluido dentro de un conducto.

La ecuación anterior es mejor conocida como la ecuación de Poiseuille.

Por último, cuando se requiere medir el flujo de gases es importante tener en cuenta la ecuación general de los gases (ecuación 8.17), de la cual se puede decir que para cada variación de presión o temperatura existe una variación en el volumen del gas. Por tanto, es importante considerar las condiciones de operación de presión y temperatura cuando se hacen mediciones del flujo de gases,

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (8.17)$$

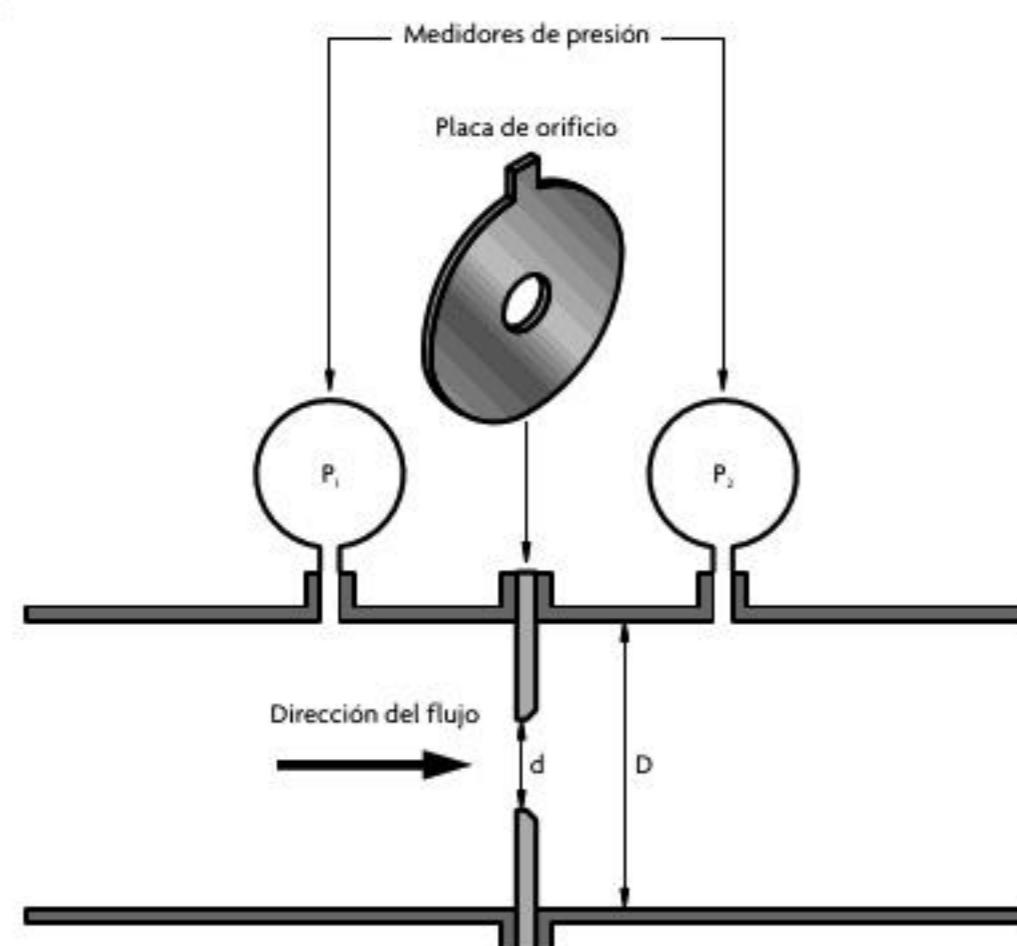
A continuación se presentan los distintos principios de operación de los sensores de flujo para fluidos monofásicos en conductos cerrados.

### Sensores de presión diferencial o deprimógenos

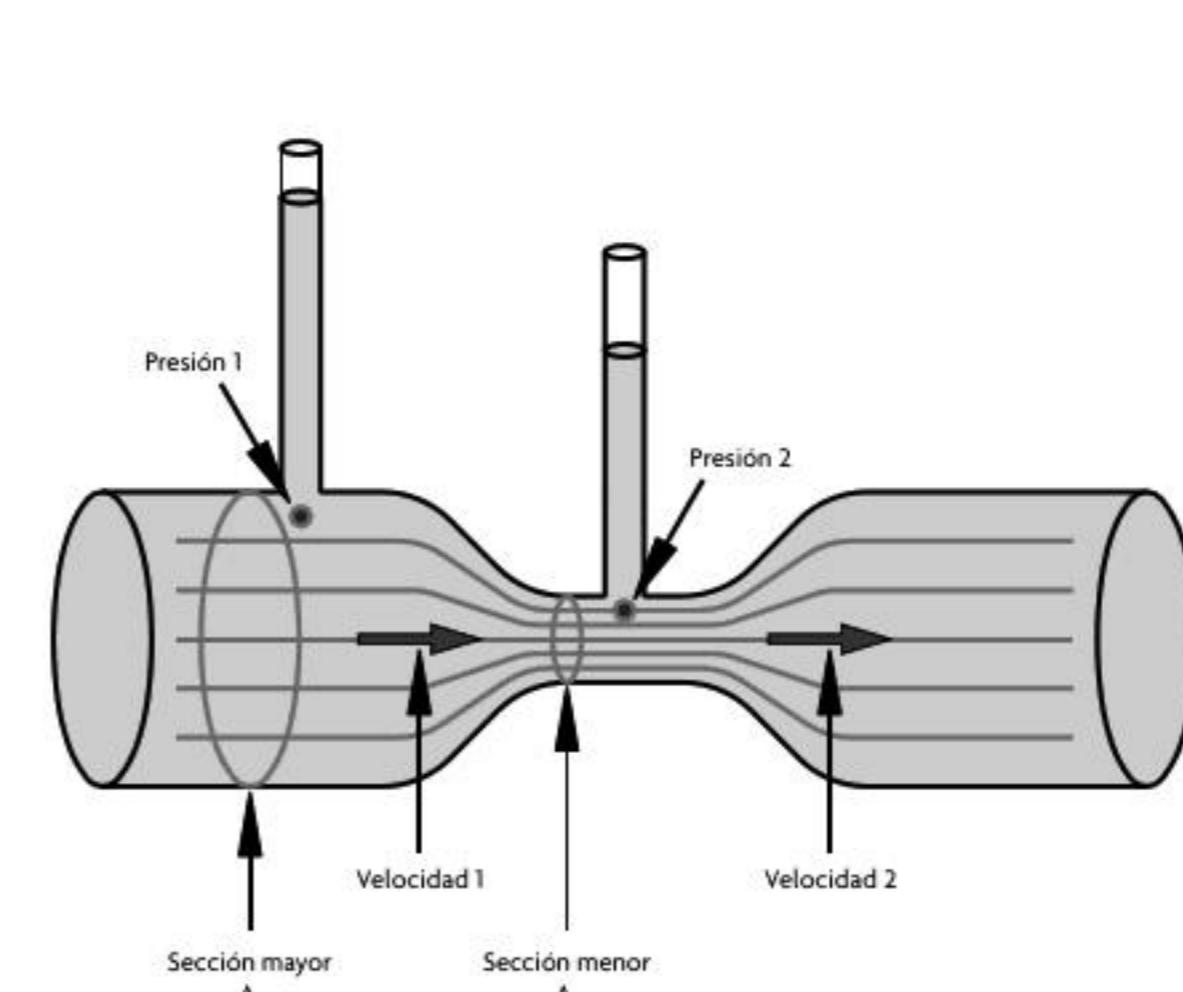
Son los sensores de flujo más antiguos para realizar la medición del flujo volumétrico en una tubería cerrada. Este tipo de sensores miden las diferencias de presión antes y después de un obstructor, conocido como elemento primario. Con las presiones medidas, y dado que es conocida la forma del obstructor, es posible calcular el flujo dentro del conducto. Los elementos primarios más usados para sensores de flujo son:

- **Placa de orificio.** Los sensores que usan platos de orificio son los más sencillos y baratos, en cuanto a medición de flujo se refiere, ya que simplemente se usa una placa con un orificio de dimensiones y ubicación específicas, la cual se coloca dentro del conducto, y se miden las presiones del fluido antes y después de la placa, con el fin de determinar el flujo volumétrico (véase figura 8.33).
- **El tubo Venturi.** Un tubo Venturi (véase figura 8.34) se compone de tres secciones. La sección de entrada, tiene un diámetro igual al del conducto y una parte cónica que concluye en un diámetro igual al diámetro de garganta; en esta sección es donde se mide la primera presión. La segunda sección se conoce como la **garganta**, y es donde se lleva a cabo la medición de la segunda presión. Por último, se tiene **la salida**, que es la tercera sección, la cual tiene una parte cónica que inicia con un diámetro igual al de garganta y termina con el diámetro del conducto.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary



**Figura 8.33** Sensor basado en una placa de orificio.



**Figura 8.34** Tubo Venturi.

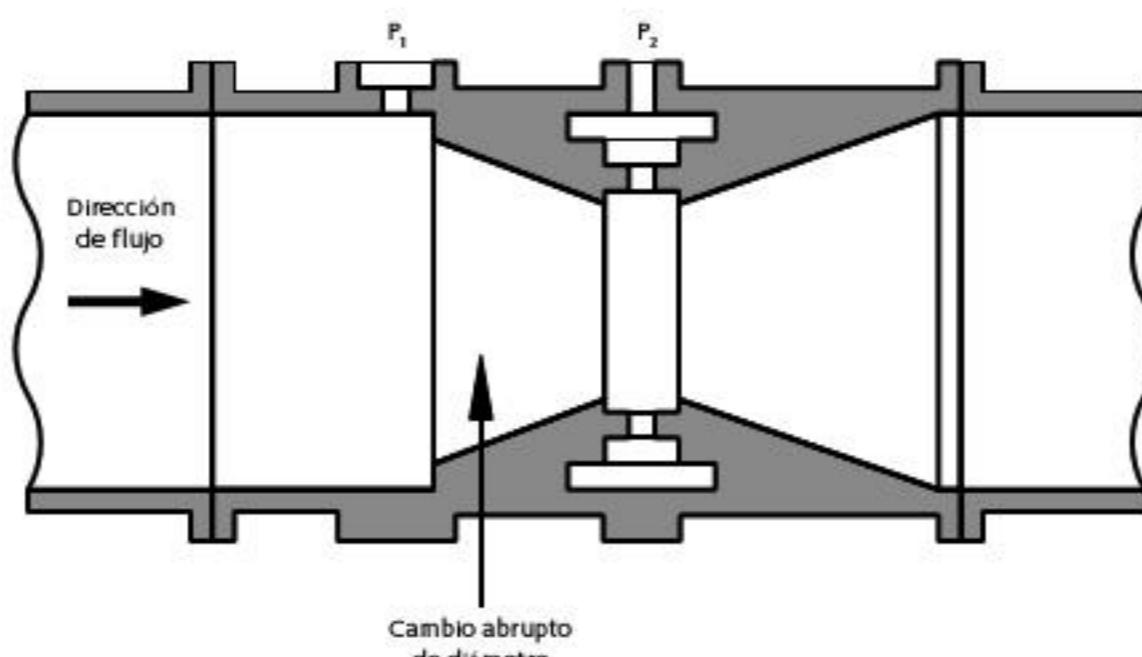


Figura 8.35 Tubo de Dall.

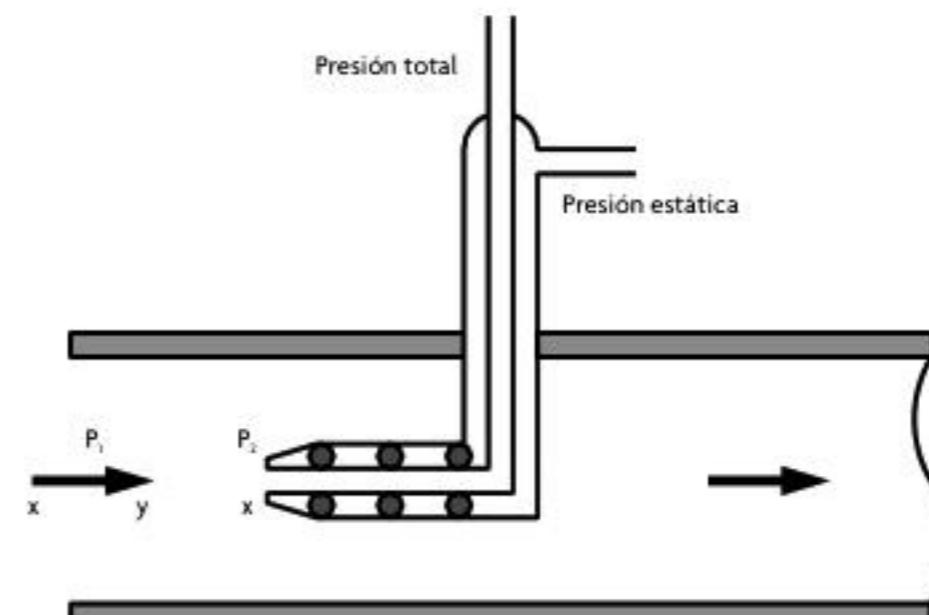


Figura 8.36 Tubo de Prandtl.

Cuando se desea usar un tubo Venturi es importante que el flujo de entrada sea uniforme, por lo que es indispensable que el tubo se instale entre dos tramos largos y rectos del conducto.

- **El tubo de Dall.** Es una variación del tubo Venturi, donde la sección de entrada termina con un cambio abrupto de diámetro seguido de una reducción cónica hasta una pequeña garganta a la cual le sigue una sección cónica uniforme de salida. En este, las presiones se toman al igual que en el tubo Venturi: a la entrada y en la garganta del tubo (véase figura 8.35).

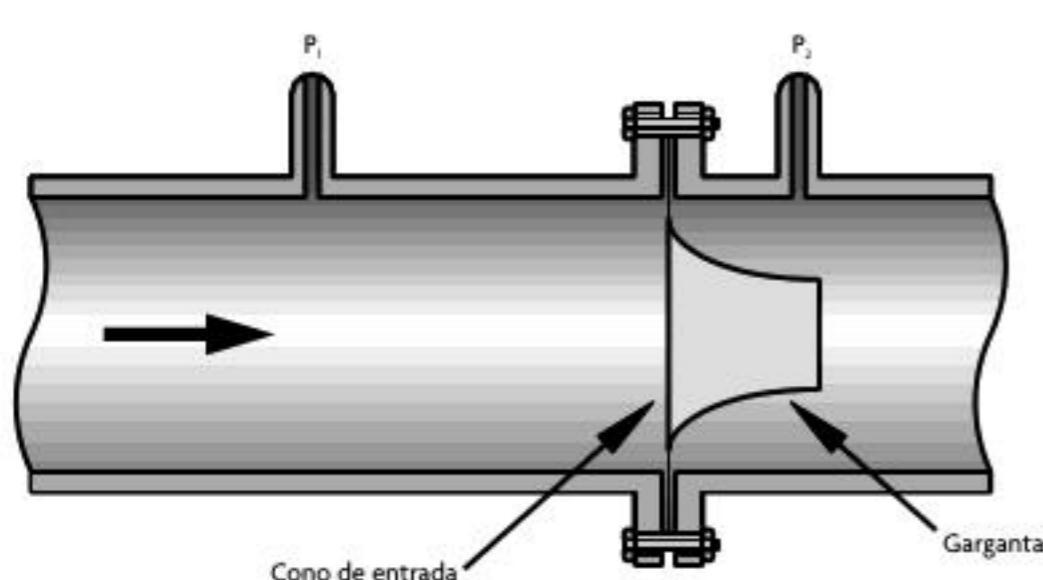


Figura 8.37 Tobera.

- **El tubo de Prandtl.** La idea de un tubo de Prandtl (véase figura 8.36) es combinar en un solo instrumento un tubo de Pitot, que mide la presión total del fluido, y un tubo piezométrico o manómetro, que mide la presión estática del fluido. En el tubo de Prandtl se mide la diferencia de estas dos presiones y utilizando la ecuación de Bernoulli se puede conocer la velocidad del fluido y después el flujo volumétrico.
- **Tobera.** Las toberas pueden considerarse como una variación del plato de orificio, aunque, a diferencia de este, la tobera tiene una sección cónica que termina en una garganta similar al tubo Venturi, por lo que las presiones se miden antes y después de la tobera (véase figura 8.37).

Los sensores de flujo de presión diferencial basados en platos de orificio, tubos Venturi y toberas están normados por las regulaciones ISO 5167, API 2530 y DIN 1952.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

### Sensores de área variable

Al igual que los sensores de presión diferencial, los sensores de área variable usan un obstructor del flujo; aunque, a diferencia de los sensores deprimógenos, en estos la presión se mantiene constante y lo que cambia es el área por la que circula el fluido. El cambio del área se obtiene al desplazarse el obstructor, debido a un aumento del flujo volumétrico en el conducto.

El sensor de área variable más común es el rotámetro (véase figura 8.38), que se compone de un tubo de sección cónica dentro del cual también se coloca un obstructor de perfil cónico, mismo que es desplazado cuando se hace pasar un flujo por el rotámetro; en este caso, el obstructor se mueve hasta alcanzar un punto de equilibrio, ya que para medir el flujo se mide la distancia que el obstructor se desplazó.

Se prefiere que los rotámetros sean de vidrio, ya que sobre este material es posible colocar una escala como en un termómetro, la cual permite una lectura directa del flujo; sin embargo, para grandes presiones, lo común es que los rotámetros se fabriquen de metal, donde la lectura del desplazamiento se hace mediante el uso de otro sensor, el cual mide el desplazamiento del obstructor. Es importante mencionar que el material con el que se fabrica el obstructor depende de la presión de operación, así como del régimen de flujo y del fluido a detectar.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

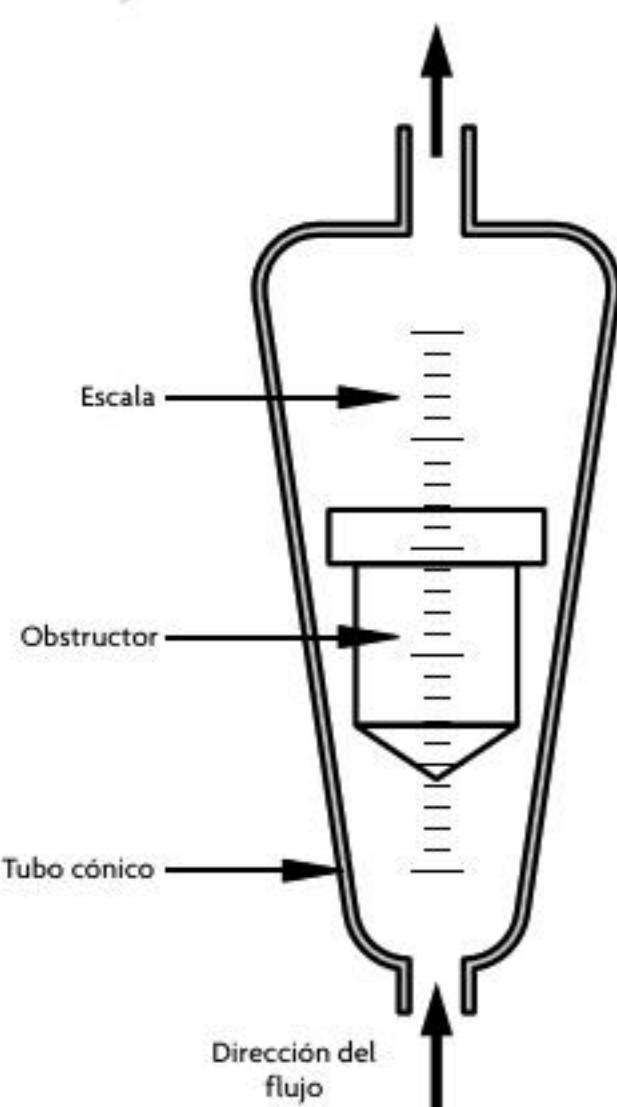


Figura 8.38 Rotámetro.

## Sensores de turbina

Como su nombre lo indica, el principio de funcionamiento de estos sensores es una turbina, la cual se coloca dentro del conducto, sobre la cual se hace incidir el flujo, provocando que esta gire. La velocidad angular de la turbina será casi proporcional a la velocidad del fluido (véase figura 8.39). En este tipo de sensores lo que se mide, entonces, es la velocidad angular de la turbina, lo cual por lo común se hace con un encoder magnético.

## Sensores de desplazamiento positivo

Los sensores de desplazamiento positivo (véase figura 8.40) miden el flujo desplazando volúmenes conocidos del fluido, lo que se logra con el uso de elementos mecánicos, por lo común rotacionales, contenidos en cámaras de volumen conocido. Cuando un flujo intenta pasar por la cámara ocasiona que los elementos mecánicos rotén, lo que permite el paso del fluido a la cámara. El flujo continuo causa un movimiento cíclico de los elementos mecánicos que se ve acompañado de un alojamiento y desalojamiento del fluido en las cámaras; dado que el volumen de las cámaras es conocido, si se conoce a cuántas revoluciones por unidad de tiempo se mueven los elementos mecánicos, se puede calcular el flujo volumétrico.

Cuando se miden líquidos con los sensores de desplazamiento positivo, los elementos mecánicos que más se utilizan son los engranes elípticos o discos, mientras que para la medición de gases se prefieren los diafragmas.

## Sensores electromagnéticos

Los sensores de flujo electromagnéticos se basan en la ley de inducción de Faraday, la cual establece que cuando un conductor se desplaza de manera perpendicular a un campo magnético, el voltaje inducido será proporcional a la velocidad de desplazamiento del conductor; en este caso, el conductor será el fluido a medir, por lo que es importante hacer notar que el voltaje inducido será independiente de la presión, temperatura o viscosidad del fluido. Entonces, para conocer el flujo volumétrico a través del uso de este tipo de sensores, primero se mide la velocidad del flujo y luego se usa el dato de área del conducto.

Este tipo de sensores se compone de dos unidades (véase figura 8.41): 1) **la unidad de generación de campo magnético**, la cual consiste en una bobina que se acopla alrededor de la sección del conducto sobre la cual se medirá y una fuente de excitación (de CA o CD), que en conjunto generan el campo magnético necesario para realizar la medición, y 2) **la unidad de medición**, la cual consiste en dos electrodos perpendiculares al eje de la bobina, que se acoplan al conducto para medir el voltaje inducido, entrando directamente en contacto con el fluido, y una etapa de amplificación de señal, ya que los voltajes inducidos no alcanzan valores mayores a unos cuantos mV. Dado que los conductos son fabricados, por lo común, con materiales conductores, como el acero inoxidable, para tener una buena lectura del voltaje inducido se incluye un aislante, para evitar que el voltaje inducido se disipe en la tubería. Otro punto importante es que el recubrimiento

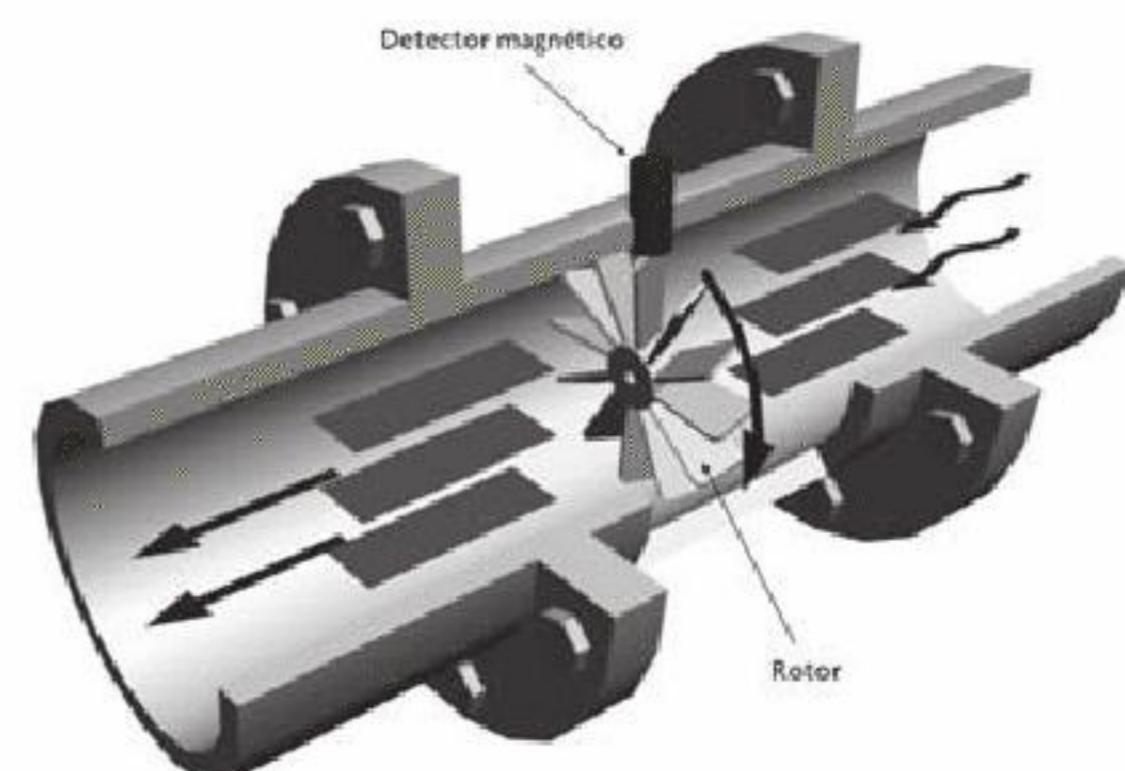


Figura 8.39 Sensor de turbina.

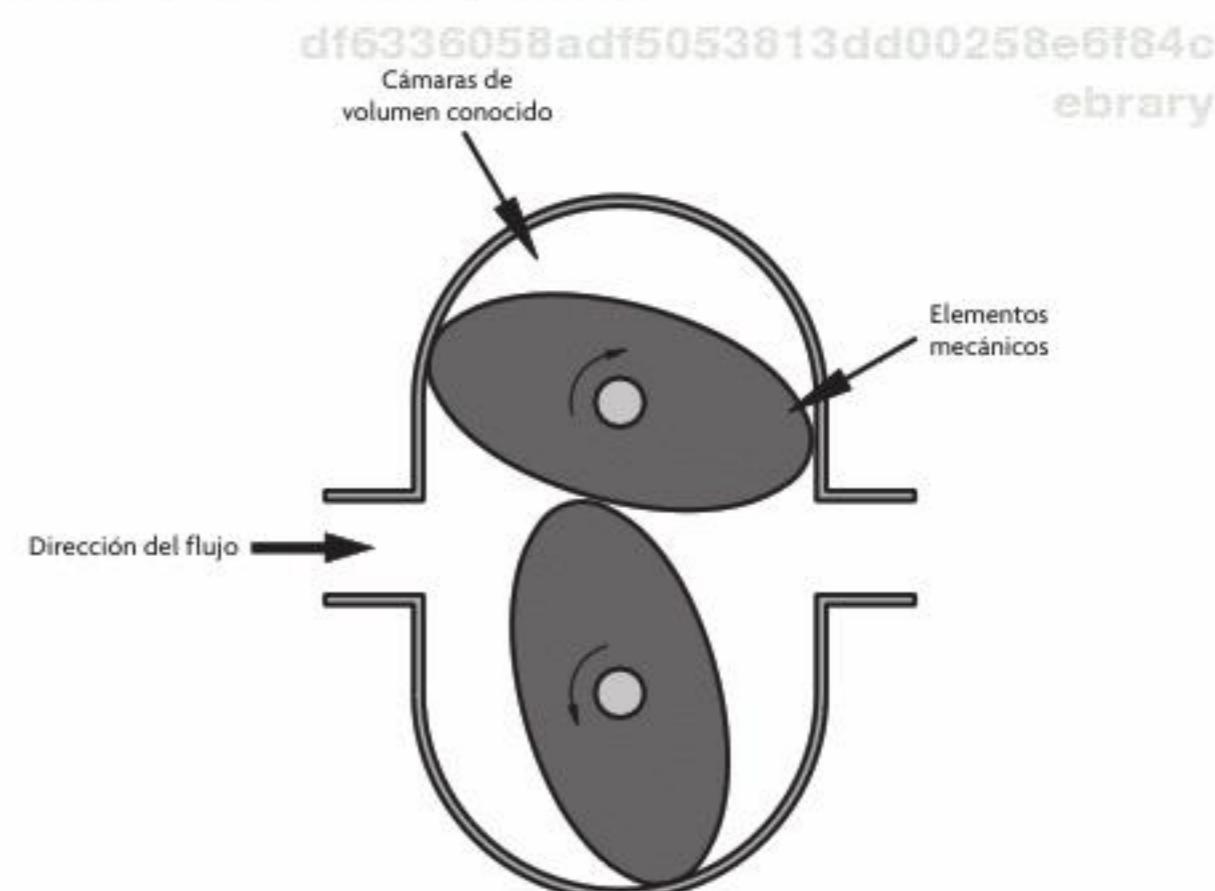


Figura 8.40 Sensor de desplazamiento positivo.

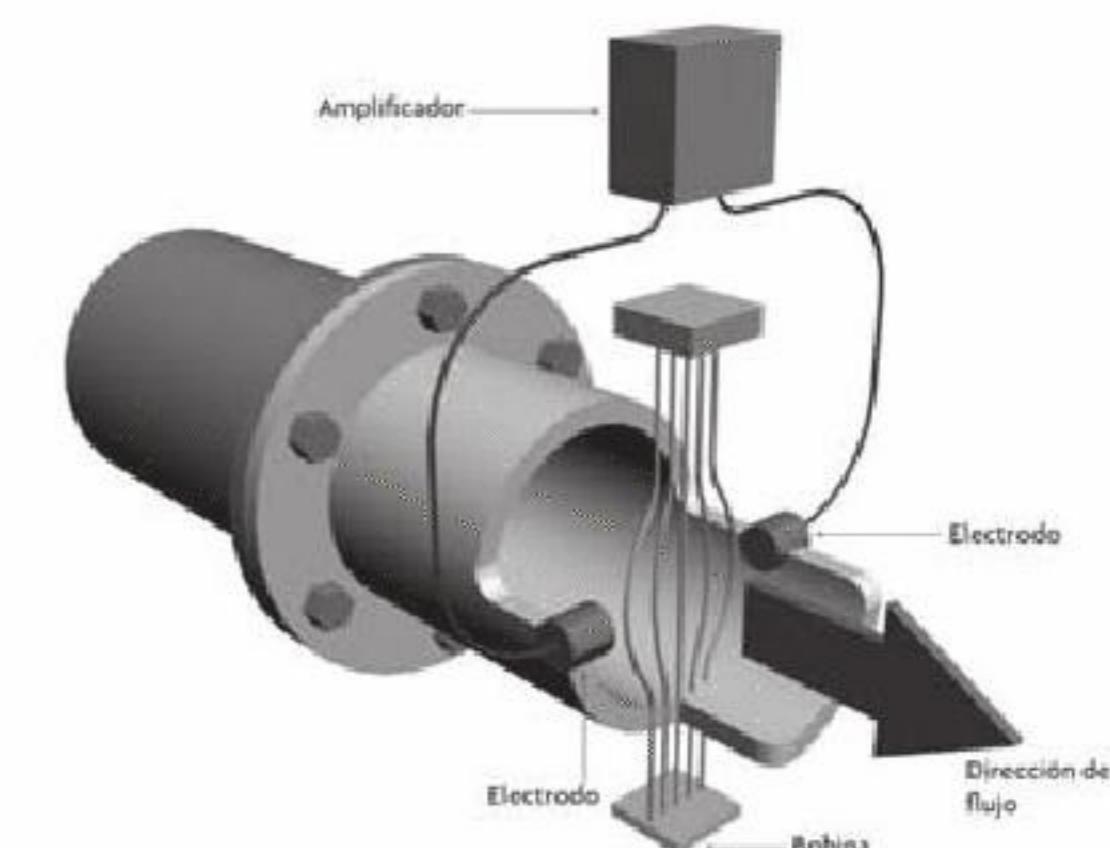


Figura 8.41 Sensor electromagnético de flujo.

de la bobina que utilizan estos sensores por lo común se hace con acero al carbono, de manera que el campo magnético se concentre dentro de la zona de interés para realizar la medición.

Entre las ventajas de estos sensores destacan:

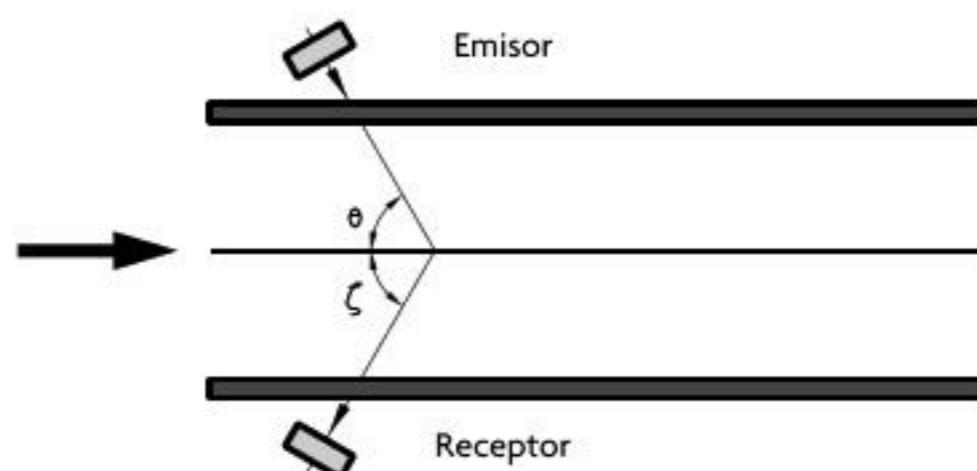
- No poseen partes móviles.
- No obstruyen el conducto.
- Están disponibles para un amplio rango de diámetros.
- Su precisión no se ve afectada por cambios de temperatura o viscosidad.

Por otra parte, su mayor limitación es que los fluidos a medir deben tener una conductividad relativamente alta.

### Sensores ultrasónicos

Existen dos principios de funcionamiento básicos para estos sensores: el efecto Doppler y el principio del tiempo de tránsito.

Los sensores que se basan en el efecto Doppler usan un emisor y un receptor ultrasónicos, los cuales se alinean de tal manera que la onda ultrasónica (por lo común de 1 MHz) no se transmita de manera perpendicular a la dirección de flujo (véase figura 8.42).



**Figura 8.42** Configuración de un sensor de flujo ultrasónico basado en el efecto Doppler.

Lo que miden estos sensores es la velocidad del flujo, lo que logran comparando las frecuencias de la onda emitida y la recibida; una vez conocida la velocidad, se calcula el flujo volumétrico.

Los sensores que se basan en el principio de tránsito utilizan un par de transductores ultrasónicos colocados de tal forma que se encuentren diametralmente opuestos y su línea de transmisión forme un ángulo  $\theta$  respecto a la dirección del flujo (véase figura 8.43). La diferencia en los tiempos que le toma a la onda emitida por el ultrasónico 1 llegar al ultrasónico 2, y viceversa, es lo que interesa medir en este tipo de sensores; esa diferencia de tiempo está dada por:

$$\Delta t = \frac{2dv \cos \theta}{V_s^2} \quad (8.18)$$

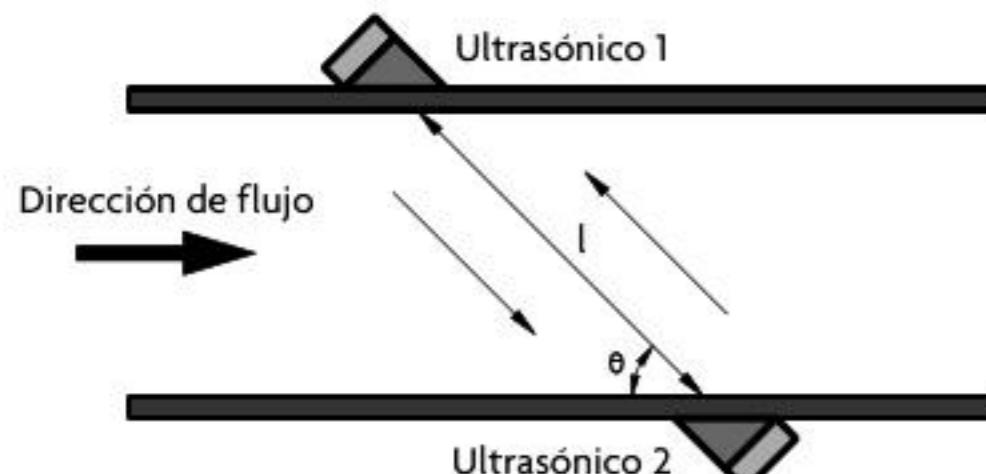
df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

donde:

$v_s$ : velocidad del sonido

$v$ : velocidad del fluido

$d$ : distancia entre ultrasónicos



**Figura 8.43** Configuración de un sensor de flujo ultrasónico basado en el tiempo de tránsito.

De la ecuación 8.18 se observa que, dado que la velocidad del sonido es una constante, la relación entre la velocidad del fluido y la diferencia de tiempos es lineal. Sin embargo, las dificultades para implementar este tipo de sensores se basan en que las diferencias de tiempo son muy pequeñas ( $< \mu s$ ) y que el valor de  $V$  varía según la temperatura. Para aumentar la precisión del sensor y que, además, pueda trabajar de manera adecuada con flujos turbulentos, por lo común se usan arreglos de múltiples sensores.

### Sensores de vórtice

Estos sensores se basan en el hecho de que después de que un flujo pasa un obstáculo se forman vórtices. Este fenómeno se conoce como la calle de vórtices de Karman. Así, para la medición del flujo con estos sensores se coloca un obstáculo en la parte media del conducto; de esta manera, al tiempo

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

que el flujo pasa el obstáculo, se forman vórtices en ambos lados del obstáculo. La frecuencia con que aparecen los vórtices resulta proporcional a la velocidad del fluido; por tanto, dicha frecuencia también es proporcional al flujo volumétrico. Los vórtices generados se contabilizan mediante el uso de sensores de presión, capacitivos, piezoelectrónicos o ultrasónicos, los cuales se colocan a los lados del obstáculo (véase figura 8.44).

Estos sensores se emplean cuando se presentan flujos turbulentos con números de Reynolds entre 3 000 y 10 000, pues por debajo de estos valores no se presentan vórtices, y por tanto el sensor resulta inútil.

### Sensores de Coriolis

Como su nombre lo indica, este tipo de sensores se basa en el efecto Coriolis. Se caracterizan por ser sensores que permiten la medición directa del flujo másico, el cual constituye una cantidad muy importante en la mayoría de los procesos de la industria química.

El principio básico de funcionamiento de los sensores de Coriolis es hacer fluir la sustancia a detectar por una manguera flexible, la cual se encuentra oscilando. Cuando el fluido pasa por las mangueras que oscilan, se generan fuerzas de Coriolis que actúan sobre las partículas del fluido, las cuales, a su vez, provocan que las mangueras se tuerzan, lo que tiene como consecuencia un desfasamiento en la oscilación de las mangueras respecto a los puntos fijos A y B (véase figura 8.45), donde se colocan sensores de proximidad; así, la diferencia en el tiempo de registro de estos sensores es el parámetro de interés para calcular el flujo másico por medio de la relación:

$$Q_m = \frac{k_s}{8r^2} \Delta t \quad (8.19)$$

donde:

$k_s$ : rigidez del sistema

$r$ : radio de la manguera

Las variantes de sensores de Coriolis donde las mangueras son rectas funcionan de manera muy similar; la única diferencia radica en que la medición que se realiza en estos es la de la frecuencia de oscilación, la cual es proporcional al flujo másico. Los sensores que se usan para medir dichas frecuencias por lo común se montan sobre las mangueras mismas, no en puntos de referencia estáticos (véase figura 8.45).

Los sensores basados en el efecto Coriolis son bastante precisos y poco sensativos a factores como cambios de presión, temperatura, densidad o viscosidad del fluido, lo cual representa una gran ventaja respecto al resto de los sensores que se han presentado antes; sin embargo, resultan más costosos.

Es importante resaltar el hecho de que las oscilaciones de la manguera deben ser en dirección perpendicular a la dirección de flujo para que exista el efecto Coriolis. Otro punto importante es que estos sensores tienen aplicación en la medición de flujos bifásicos.

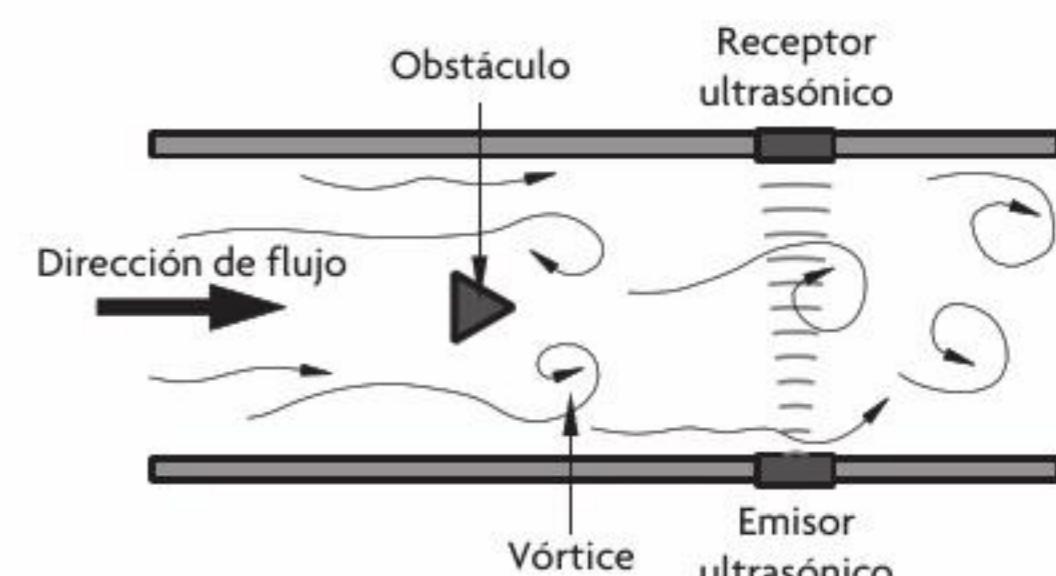


Figura 8.44 Sensor de vórtice con detector ultrasónico de vórtices.

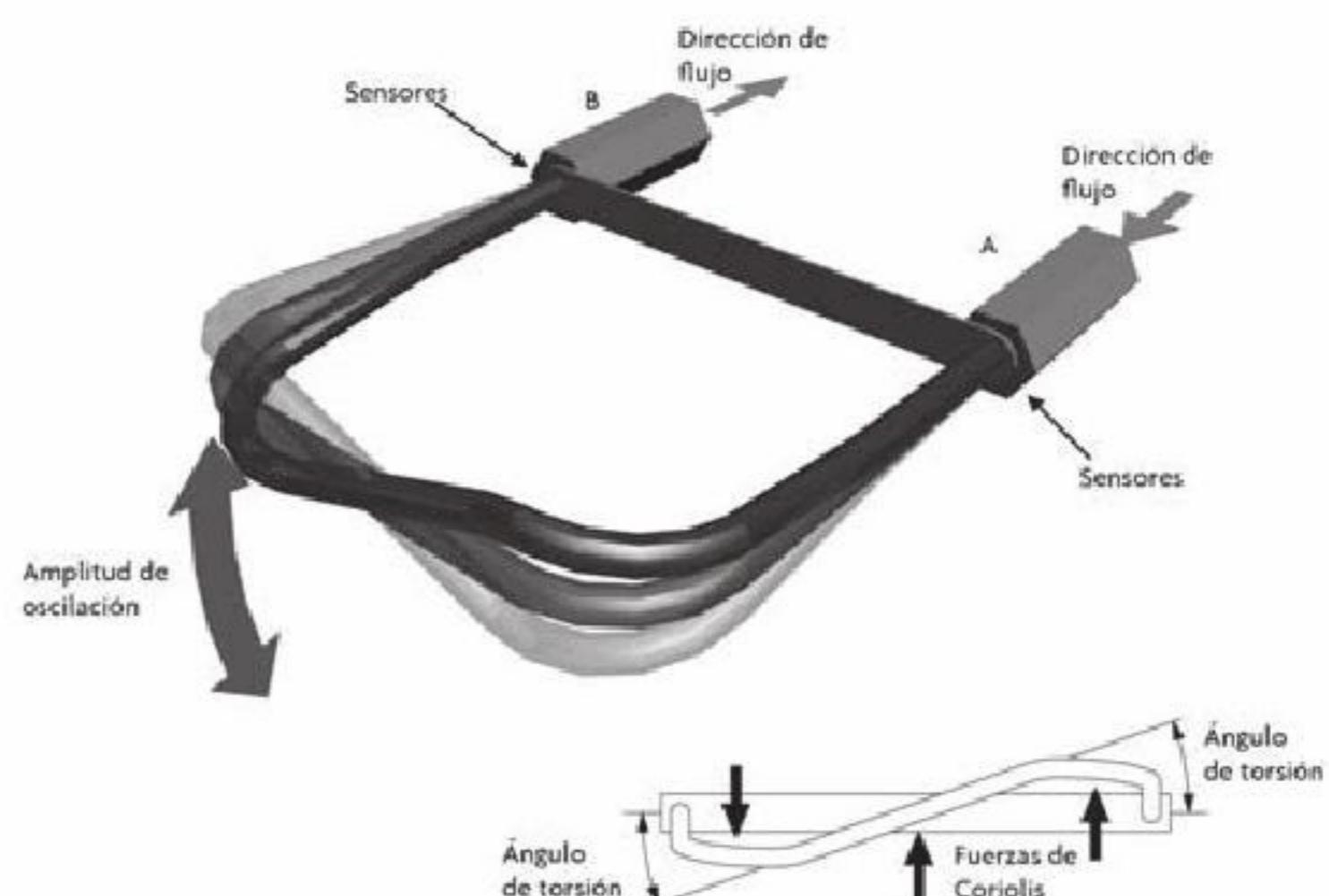


Figura 8.45 Funcionamiento de un sensor de Coriolis.

## Sitios de Internet

[www.omega.com](http://www.omega.com)

<http://www.flowmeters.com>

<http://www.yokogawa.com/us/products/field-instruments/flow-meters>

<http://www.automation.siemens.com/mcms/sensor-systems/en/process-instrumentation/flow-measurement>

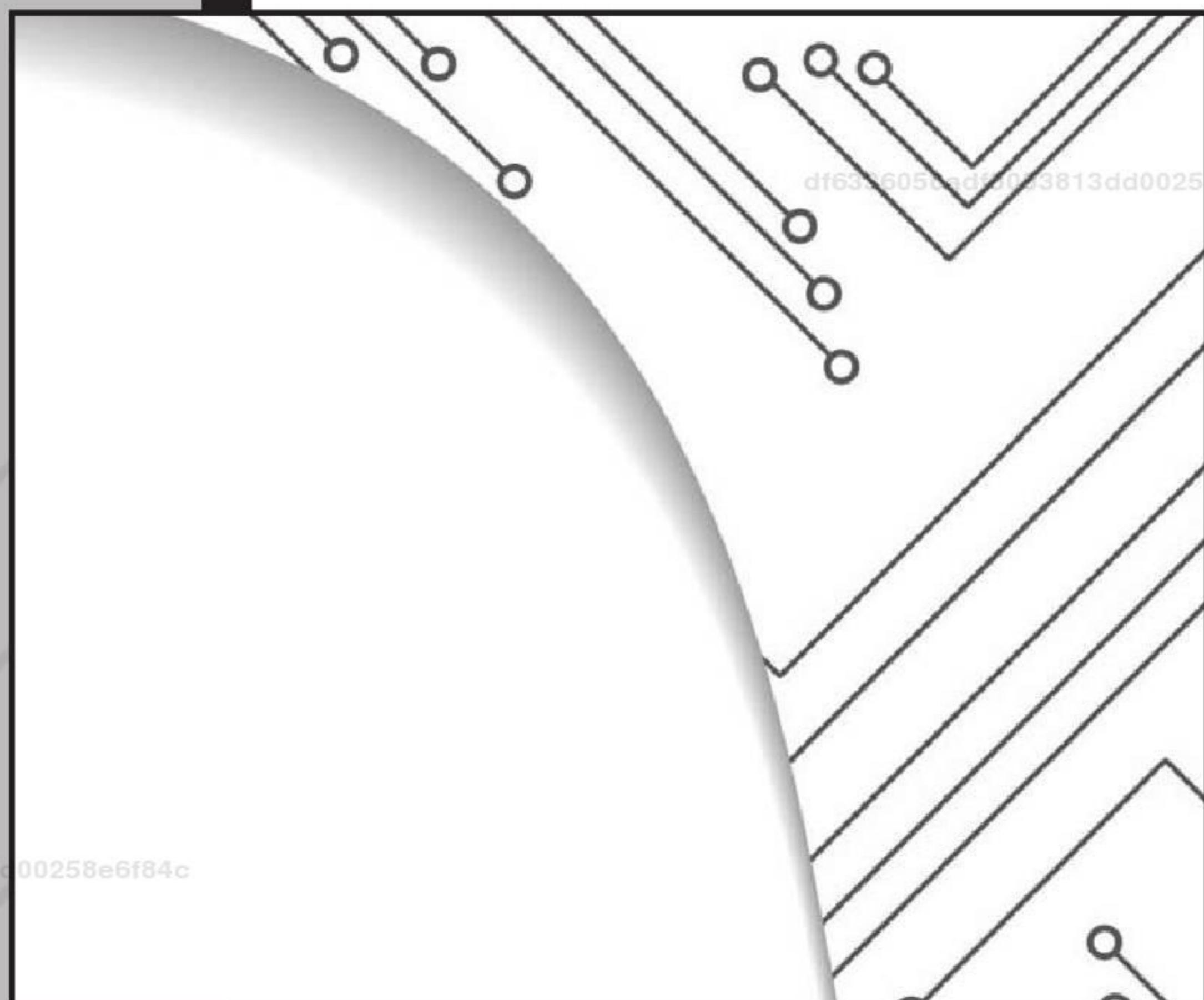
<http://www.tricorflow.com/home.html>



df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# 91

## Otros sensores



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

#### Objetivo general

#### Objetivos particulares

En este capítulo se abordan temas muy variados, como sensores de gas, sensores de corriente y biosensores, por lo que se recomienda conocer los aspectos básicos de los distintos tipos de transducción tratados en el capítulo 1 (Introducción).

Conocer y saber emplear los sensores para mediciones específicas, desde concentración de gas en el ambiente y características biométricas mediante el uso de biosensores, hasta mediciones de corriente con sensores de estado sólido.

- Conocer los principios de funcionamiento de sensores de gas en ambiente.
- Conocer y distinguir los diferentes tipos de sensores de corriente que existen y sus principios de funcionamiento.
- Conocer los diferentes tipos de biosensores que existen, así como sus diferentes principios de funcionamiento.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## Introducción

En los capítulos anteriores se analizan los tipos de sensores que pueden clasificarse con facilidad, de acuerdo con la variable física que se desea medir. En tanto, en este capítulo se estudian los tipos de sensores para aplicaciones muy específicas, como los sensores de gas, los sensores de corriente, los sensores biométricos y algunos otros tipos más para aplicaciones bien definidas.

### 9.1 Sensores de gas

Los sensores de gas son **transductores entre una reacción química de un determinado gas y una resistencia de óxido semiconductor y el cambio de resistividad del material con el cual ocurre la reacción**. De manera principal, este tipo de sensores se basa en el uso de semiconductores, donde se implementan resistencias con materiales como películas de óxidos semiconductores para realizar la función de detección. El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en el comportamiento de la película de óxido semiconductor, la cual, al entrar en contacto con el gas para el cual es sensitivo el material del cual está hecha, se genera una reacción química que libera o absorbe electrones (véase figura 9.1).

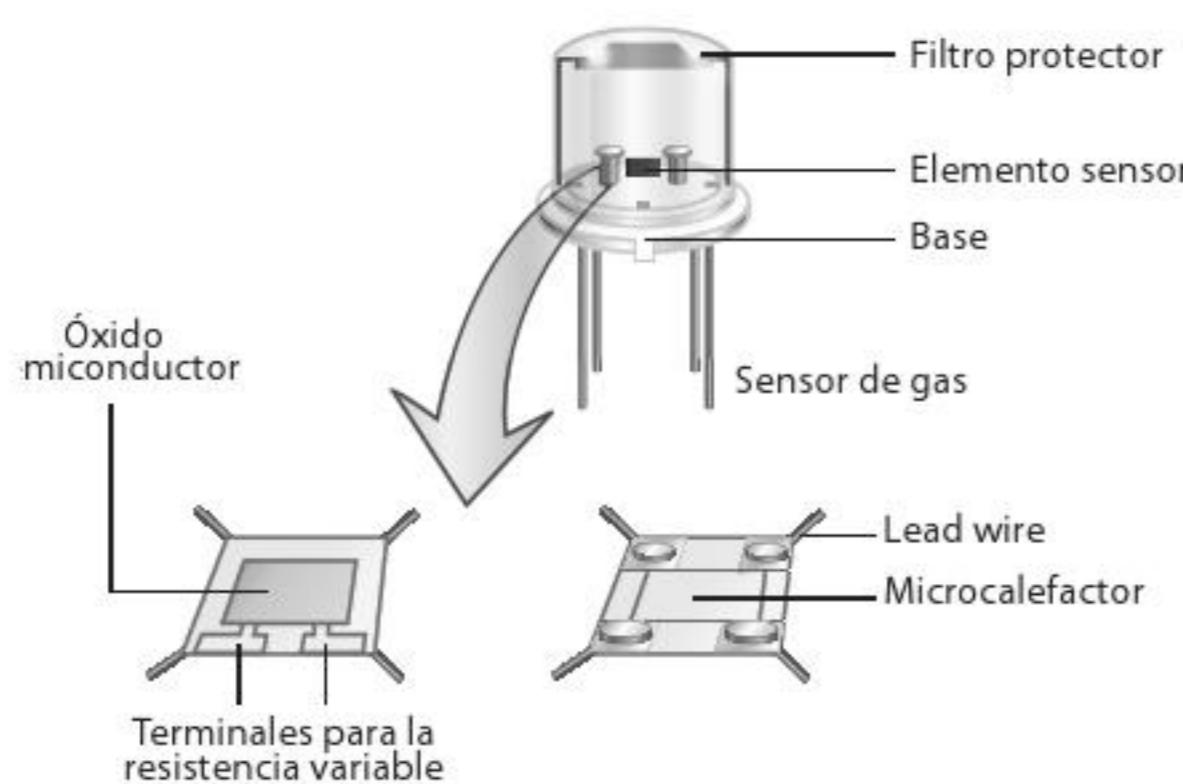
Estos sensores requieren de tres elementos básicos: 1) una película sensora, 2) un microcalefactor y 3) un circuito de acondicionamiento.

El principio de operación de estos sensores consta de los siguientes pasos:

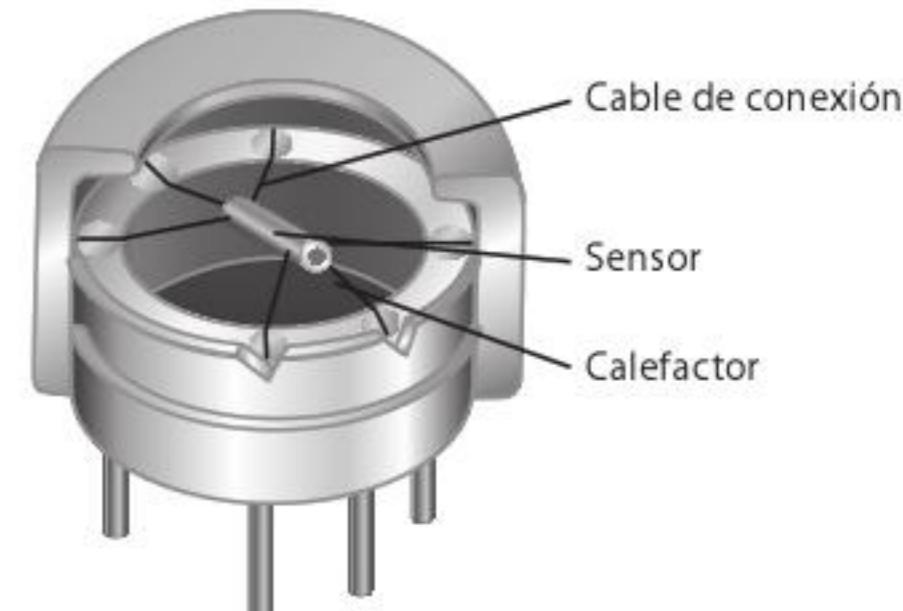
1. Cuando una mezcla de gas-aire pasa por encima de una superficie catalítica<sup>1</sup> caliente (en este caso, el microcalefactor), la reacción química entre la película sensora y el gas se acelera, con lo que se produce un cambio casi inmediato en la resistividad de la película del óxido semiconductor.
2. Al existir un cambio de resistividad en la película, el circuito de lectura registra un cambio en la resistencia equivalente, relacionando dicho cambio con una concentración del gas en el ambiente.

Algunas otras configuraciones, sobre todo más económicas, integran los elementos de la siguiente manera:

En el caso de los sensores como el de la figura 9.2, los materiales que se usan con mayor frecuencia para el microcalefactor son las bobinas de platina recubiertas de alúmina y con un revestimiento de paladio o rodio disperso en un sustrato de Thorio, mientras que para los sensores MEMS los microcalefactores suelen fabricarse en materiales como el polisilicio sobre un sustrato de silicio



**Figura 9.1** Estructura básica para un sensor de gas.



**Figura 9.2** Sensor de gas.

<sup>1</sup> Un elemento catalítico es aquel que aumenta la velocidad de una reacción química sin ser consumido por dicha reacción.

monocristalino. Por su parte, en la fabricación de las películas detectoras de óxido semiconductor los materiales más usuales son el ZnO y el SnO<sub>2</sub>.

Este tipo de sensores requiere una cuidadosa caracterización ante variaciones de temperatura y humedad relativa, ya que si la reacción química para la cual corresponde una variación de resistencia ocurre a una temperatura diferente se producirá un error en la medición; por tanto, es común usar configuraciones de puente de Wheatstone para compensar la temperatura del microcalefactor. Por ejemplo, si se tiene una temperatura ambiente muy baja, el microcalefactor deberá elevar la temperatura; pero, por el contrario, si la temperatura ambiente es alta, el microcalefactor deberá compensar la temperatura solo unos cuantos grados. De este modo, la caracterización del sensor se facilita para el usuario final. Otro problema asociado con este tipo de sensores es que la película del óxido semiconductor no es 100% selectiva a un tipo de gas. Por ejemplo, la curva de la figura 9.3 corresponde a un sensor de alcohol en gas, pero, como se puede observar, este sensor también es sensible a gases como benceno, hexano, etcétera, aunque en menor medida, por lo que se recomienda que al hacer mediciones de concentración de un cierto tipo de gas, el ambiente esté lo más libre posible de fuentes de ruido, como lo son otros gases.

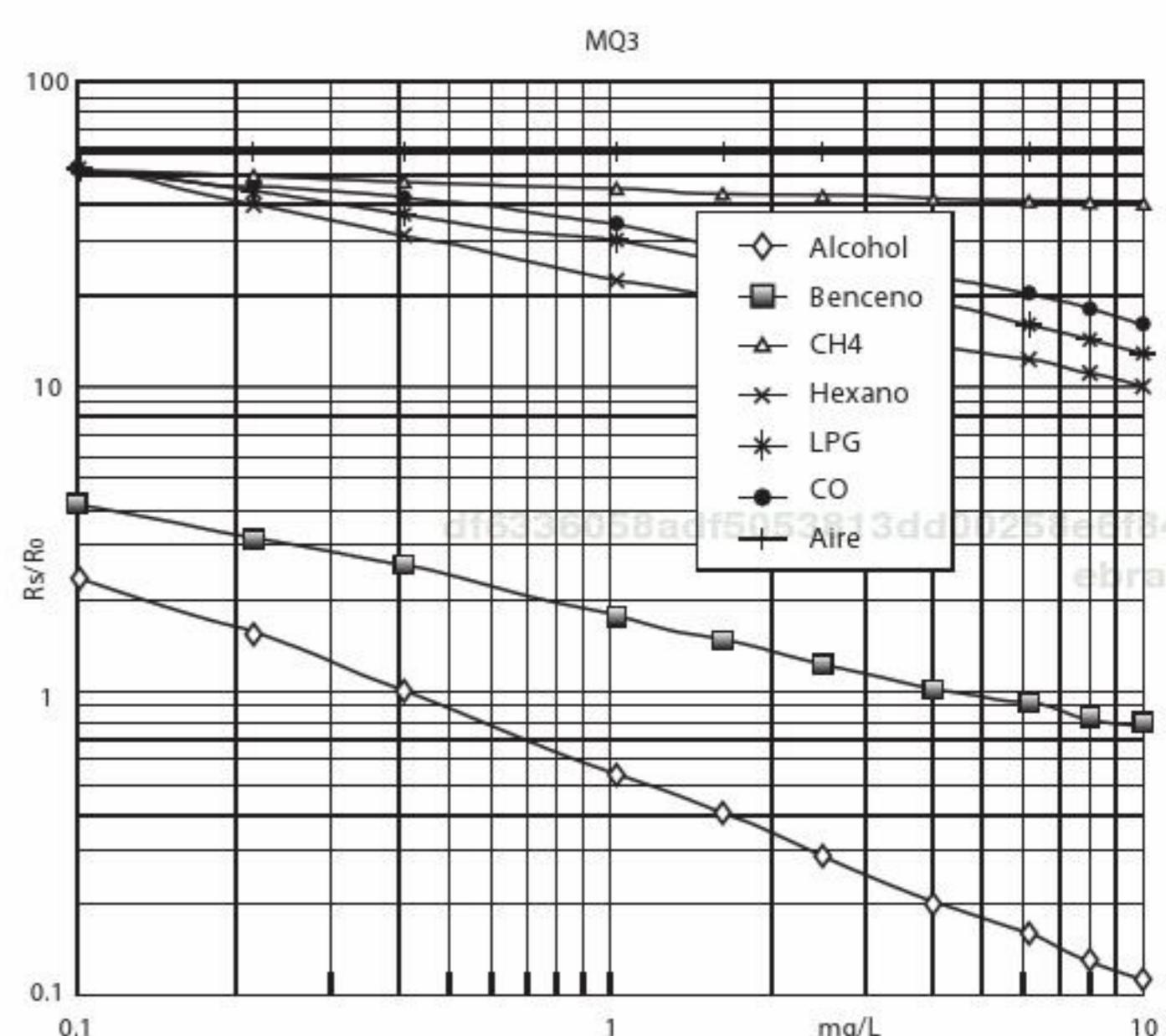


Figura 9.3 Curva de sensitividad para un sensor de alcohol.

## Ejercicio de aplicación

### Medidor de concentración de alcohol usando un sensor de gas

#### Objetivo

Medir la concentración de alcohol en mg/L en el aire mediante el sensor MQ-3, con el uso del Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor de alcohol MQ-3
- 1 potenciómetro de 100 kΩ
- Multímetro
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del sensor MQ-3

El MQ-3 (véase figura 9.4) es un sensor que mide la concentración de alcohol en el aire. Actúa como una resistencia que varía en función de la cantidad de alcohol detectada; mientras mayor sea la concentración de alcohol, dicha resistencia disminuye.

El sensor cuenta con dos salidas, A y B, y siempre puede utilizarse cualquiera de las dos. La descripción de sus pines es la siguiente:

- H. Consta de dos pines iguales llamados H. Estos representan las terminales de alimentación. El voltaje de alimentación es de 5 V en corriente directa o alterna. En caso de emplearse DC, la conexión de GND y VCC es indistinta.
  - A. Señal de salida.
  - B. Señal de salida.



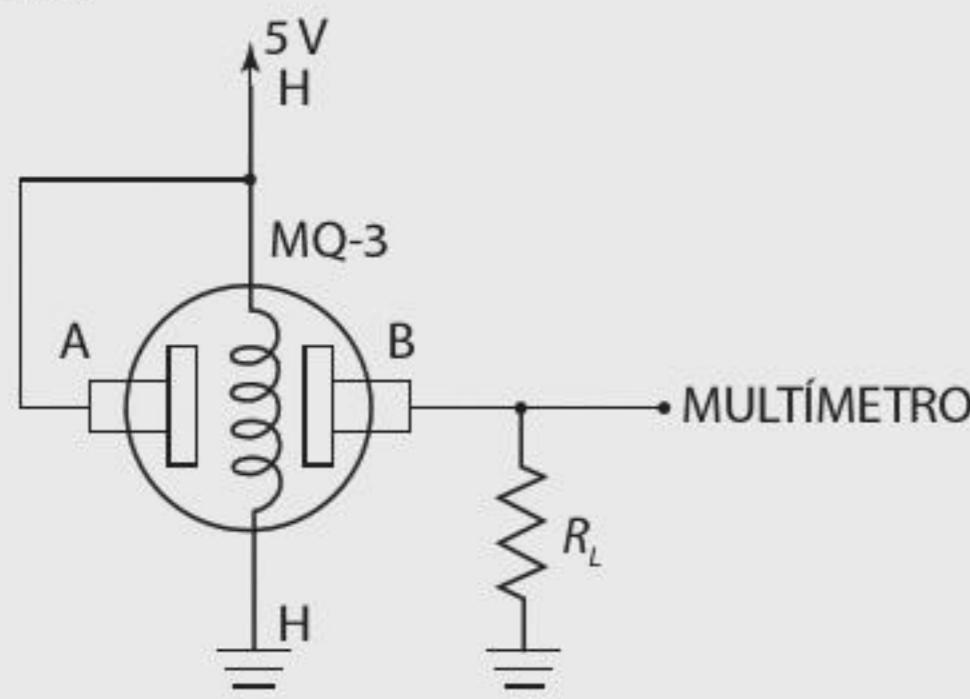
Figura 9.4 Sensor de alcohol MQ-3.

Cuando se encuentra una concentración de 0.4 mg/L de alcohol en el aire limpio, el sensor posee una resistencia  $R_o$ . Pero cuando la concentración cambia por cualquier factor, el sensor posee una resistencia  $R_s$ .

Para realizar una buena medición, el sensor requiere de un tiempo de calentamiento de aproximadamente 24 horas, después del cual debe ser calibrado con una resistencia de carga  $R_L$ .

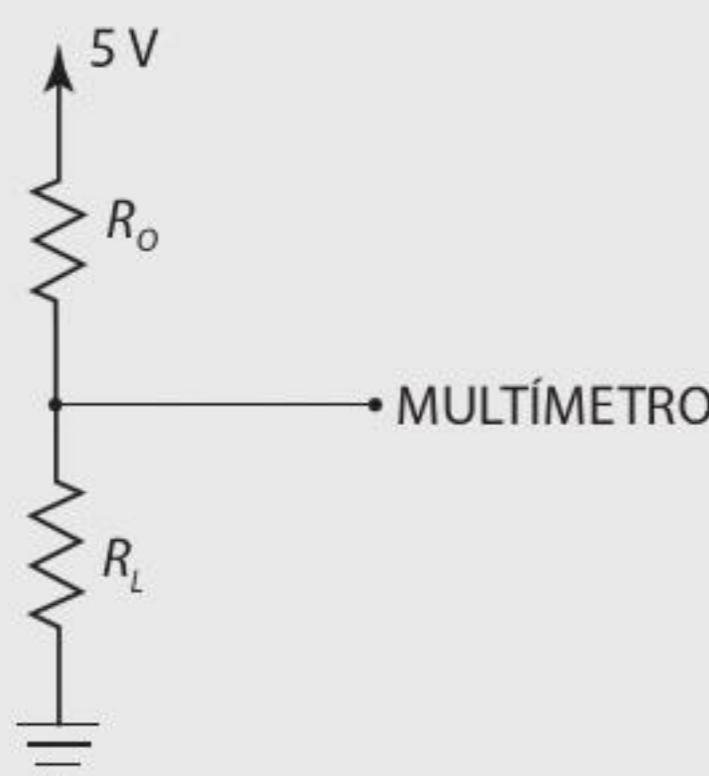
### Calibración del sensor

Para calibrar el sensor, lo primero es armar el circuito de la figura 9.5.



**Figura 9.5** Circuito de conexión del sensor de alcohol MQ-3, donde  $R_L$  representa una resistencia variable (potenciómetro configurado como reóstato).

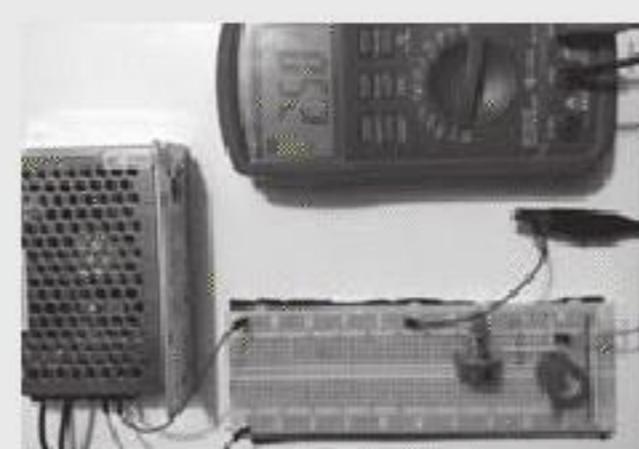
Si se parte de un ambiente de aire limpio, aunque no se cuente con los instrumentos para crear una atmósfera de 0.4 mg/L de alcohol, se considera que  $R_o$  es la resistencia del sensor en condiciones normales, libre de alcohol. Ahora bien, para calcularla primero debe analizarse el circuito equivalente de la figura 9.6, que corresponde a un divisor de voltaje, donde  $R_o$  es la resistencia conectada a VCC y la resistencia de carga  $R_L$  es por donde cae el voltaje de salida (véase figura 9.6).



**Figura 9.6** Circuito equivalente del sensor MQ-3 en atmósfera libre de alcohol.

Como se desea encontrar el valor de  $R_o$ , se varía la resistencia de  $R_L$  hasta que el voltaje de salida sea la mitad del voltaje de alimentación (2.5 V, ya que VCC = 5 V). De esta forma, se iguala el valor de  $R_L$  con  $R_o$ . Después, se desconecta el circuito y se mide la resistencia resultante en la resistencia  $R_L$  (véase figura 9.7).

a)



b)

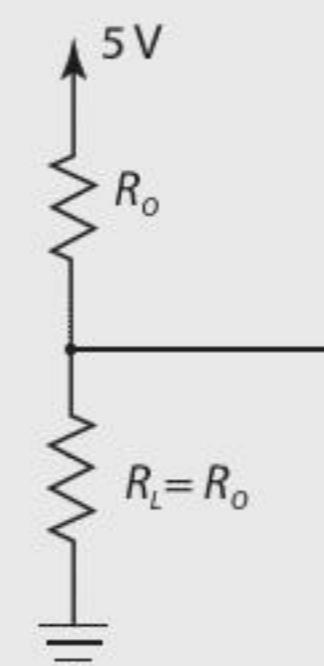


**Figura 9.7** a) Para encontrar el valor de  $R_o$ , se ajusta  $R_L$  hasta que el voltaje de salida sea la mitad del voltaje de alimentación a la salida. b) Luego se desconecta el circuito y se mide el valor final de  $R_L$ ; en esta ocasión 71.1 kΩ.

En este caso,  $R_L$  es de 71.1 kΩ, y si  $R_L = R_o$ , entonces  $R_o$  también es de 71.1 kΩ. La resistencia de carga  $R_L$  se mantiene en el circuito con ese mismo valor.

### Cociente $R_s/R_o$

A partir de este momento, el comportamiento del sensor de alcohol se define como la resistencia  $R_s$ , donde la concentración de alcohol varía según la prueba. Si se mantiene la resistencia de carga  $R_L$  (igual a  $R_o$  con calibración previa), entonces se tiene el circuito equivalente que se muestra en la figura 9.8, que equivale a un divisor de voltaje.



**Figura 9.8** Circuito equivalente del sensor MQ-3 y la resistencia de carga. Gracias a la calibración previa,  $R_L$  es igual que  $R_o$ , y la resistencia característica del sensor pasa a ser  $R_s$ .

La ecuación del divisor de voltaje de la figura 9.8 es:

$$V_{out} = \frac{R_o}{R_o + R_s} \times V_{cc}$$

Despejando el cociente  $\frac{R_s}{R_o}$  se tiene:

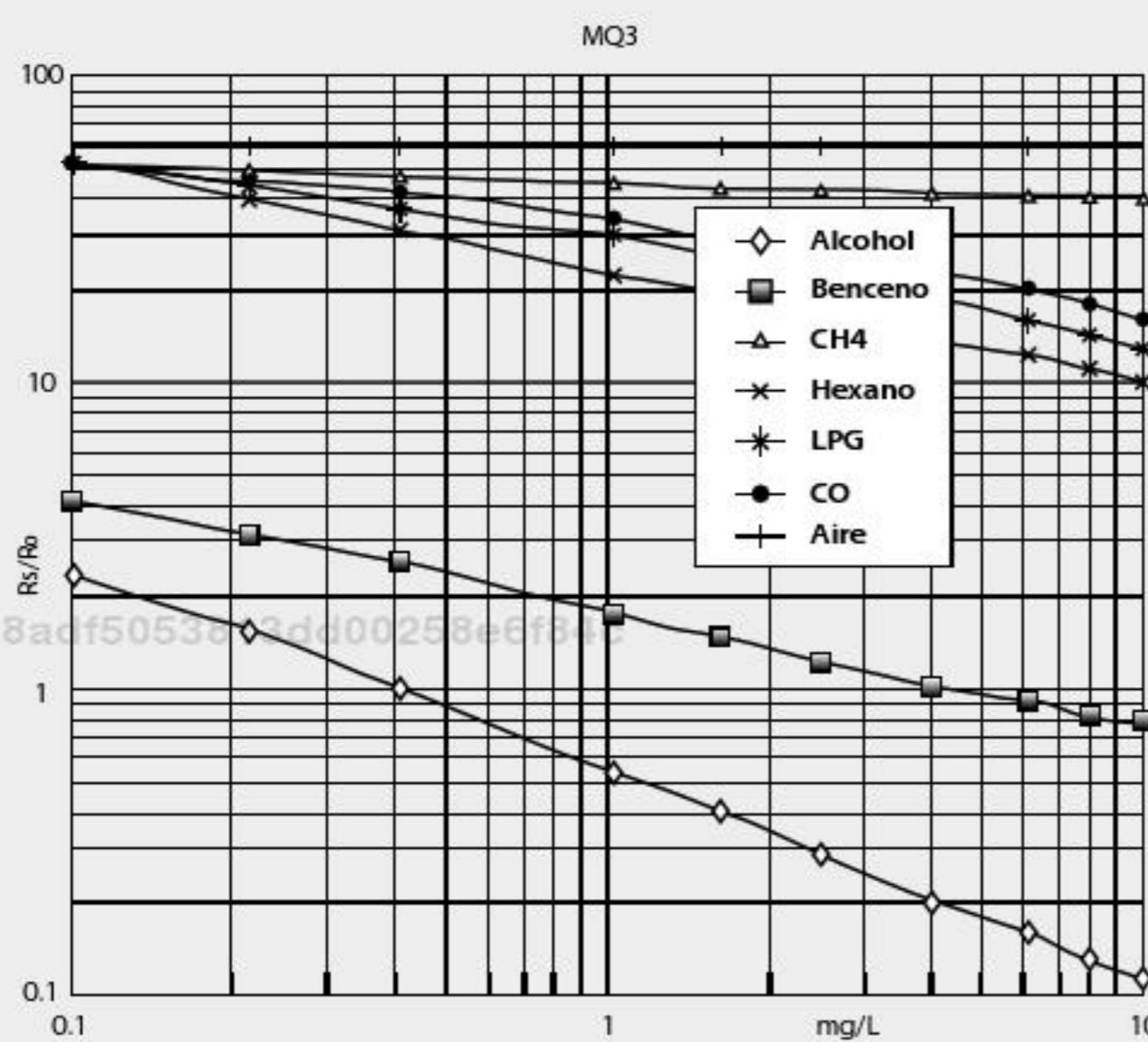
$$V_{out}(R_o + R_s) = V_{cc} \times R_o \rightarrow V_{out} \times R_o + V_{out} \times R_s = \\ V_{cc} \times R_o (V_{cc} - V_{out}) = V_{out} \times R_s$$

$$\frac{V_{out}}{V_{cc}} = \frac{R_o}{R_o + R_s}$$

Si el voltaje de alimentación es  $V_{CC} = 5$  V:

$$\frac{R_s}{R_o} = \frac{V_{cc} - V_{out}}{V_{out}} = \frac{V_{cc}}{V_{out}} - 1 \quad (9.1)$$

Este cociente permite determinar la concentración de alcohol del aire conforme a la figura 9.9, extraída de la hoja de datos del sensor.

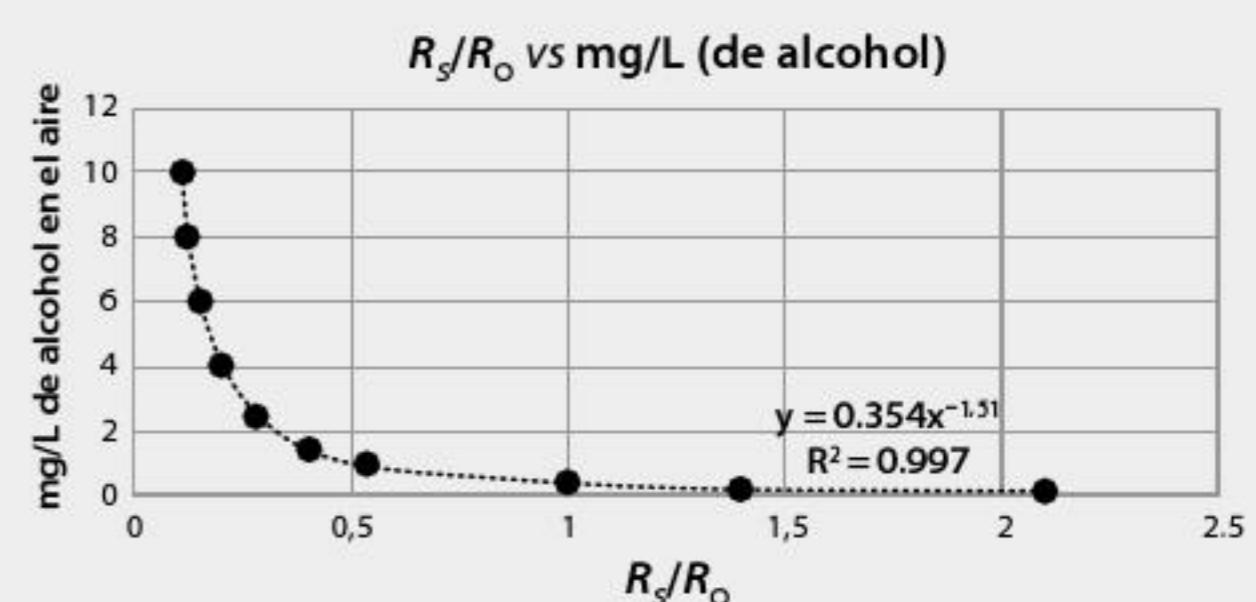


**Figura 9.9** Gráfica de concentración de alcohol vs. cociente  $R_s/R_o$ .

#### Ecuación característica del sensor

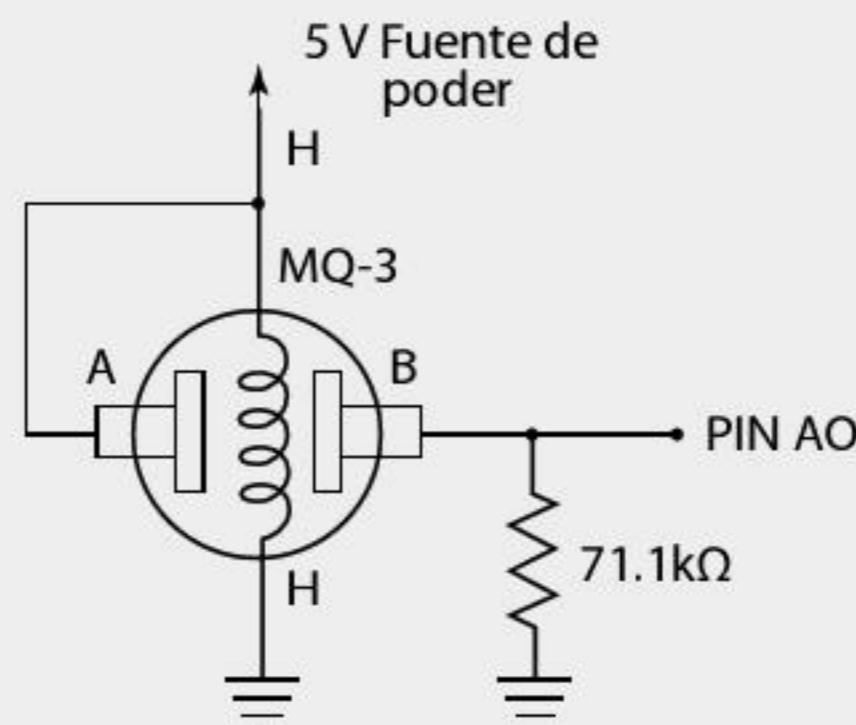
Al graficar algunos puntos de la curva de alcohol del sensor MQ-3 de la figura 9.9 y aplicar una regresión lineal se obtiene su ecuación característica:

$$\text{Concentración de alcohol } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0.354 \times \left( \frac{R_s}{R_o} \right)^{-1.518} \quad (9.2)$$



**Figura 9.10** Gráfica y ecuación del sensor MQ-3.

#### Construcción del circuito



**Figura 9.11** Diagrama del sensor de alcohol MQ-3.

El sensor se alimenta con una fuente externa de 5 V y 3 A. La salida del pin B (aunque también puede utilizarse el pin A) se conecta en paralelo con la resistencia de carga  $R_L$ , cuyo valor corresponde a la resistencia  $R_o$  obtenido durante la calibración.

La salida del circuito se conecta al pin analógico A0 del Arduino® para su procesamiento.

#### Código

#### Descripción del programa

El siguiente programa realiza la lectura y conversión analógico-digital ADC del sensor. Luego, aplica las ecuaciones 9.1 y 9.2 para obtener la cantidad de alcohol en el aire, mismo que se imprime en el monitor serial.

```
*****Sensor de alcohol*****
/*
**El MQ-3 es un sensor que mide la
concentración en mg/L de alcohol en
**el aire.
**El siguiente programa realiza la lectura del
sensor de alcohol MQ-3
//y con base en este dato calcula la
concentración en mg/L en el aire.
*****
```

```

//Se declaran las variables empleadas
int readSensor;
float rs_ro, alcohol, vout;

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
    comunicacion serie a 9600 baudios
}

void loop()
{
    readSensor = analogRead(A0); //Lectura del
    sensor
    vout = 0.00488 * readSensor; //Conversion a
    volts. La resolucion es
    //5V/1024 = 0.00488mV
    rs_ro = (5/vout) - 1; //Calculo del cociente
    Rs/Ro. Esta ecuacion se
    //obtiene del analisis del circuito realizada
    en el Desarrollo.
    alcohol = 0.354*pow(rs_ro, -1.518); //
    Conforme a la figura 2 de la hoja
    //de datos del sensor MQ-3 se realiza la
    regresion en Excel,
    //obteniendo asi su ecuacion caracteristica:
    mg/L de alcohol =
    //0.354*(RS/RO)^-1.518

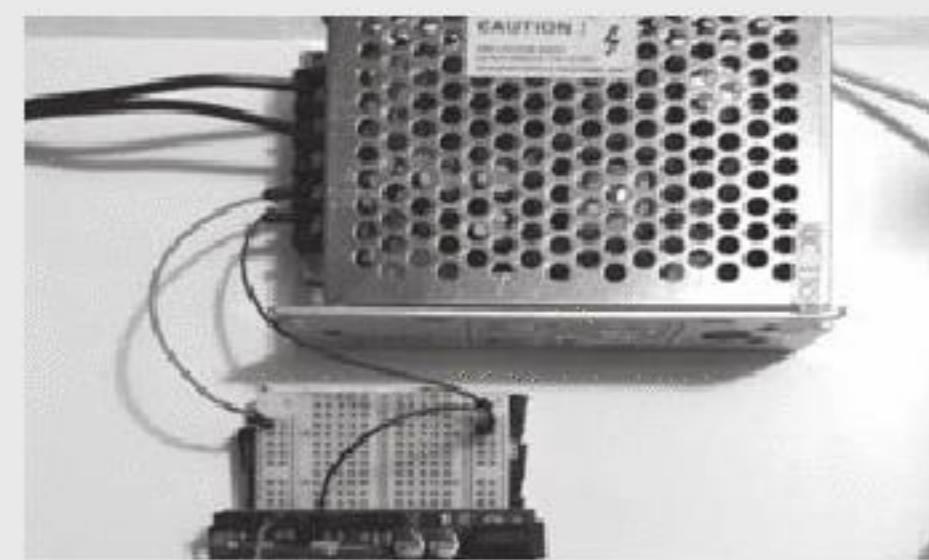
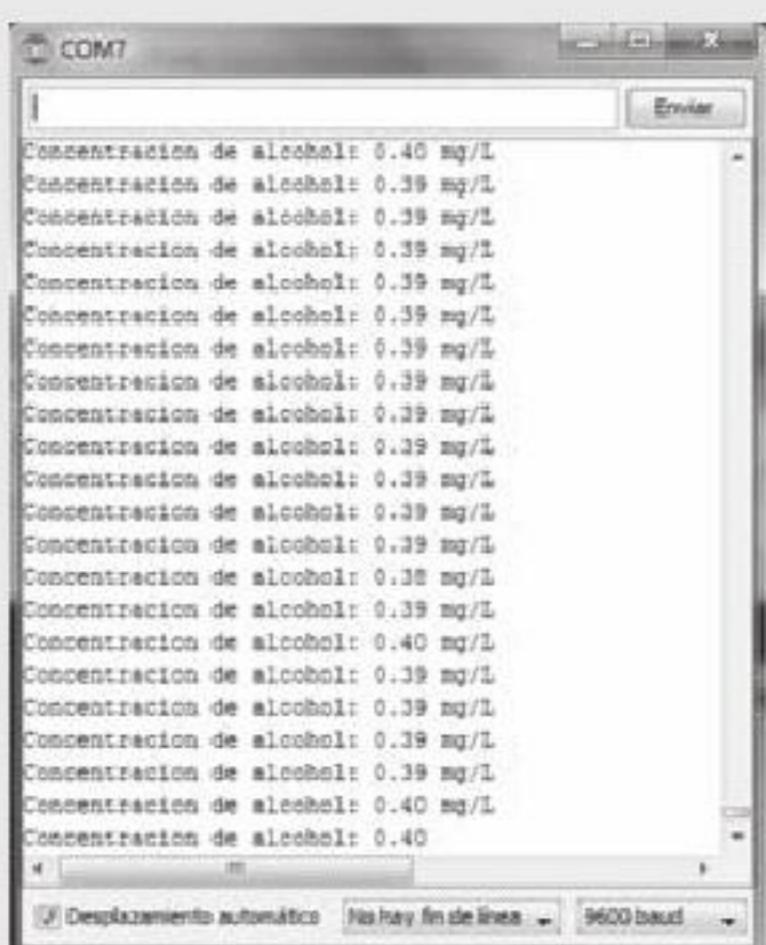
    //Se imprime en el monitor serie la
    concentracion de alcohol en el aire
    Serial.print("Concentracion de alcohol: ");
    Serial.print(alcohol);
    Serial.println(" mg/L");

    delay(10); //Retardo por estabilidad
}

```

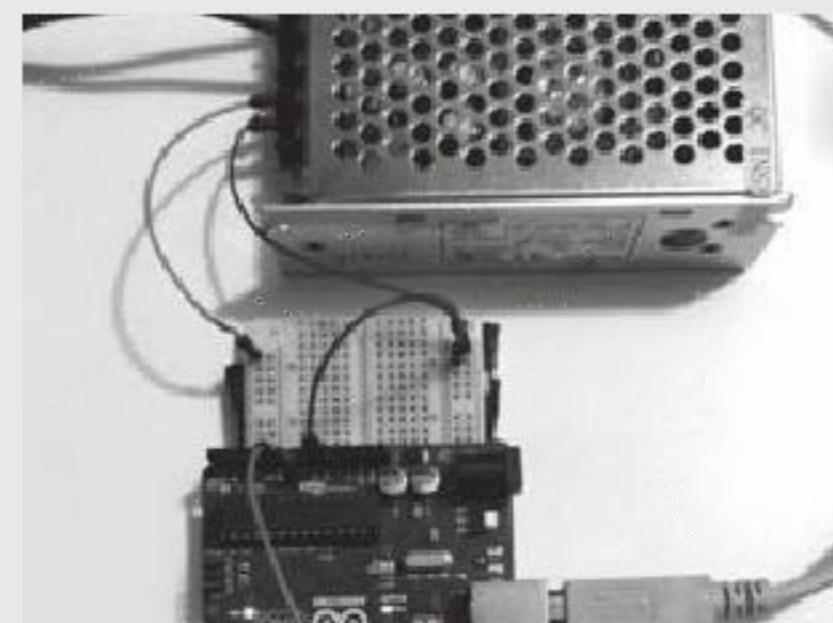
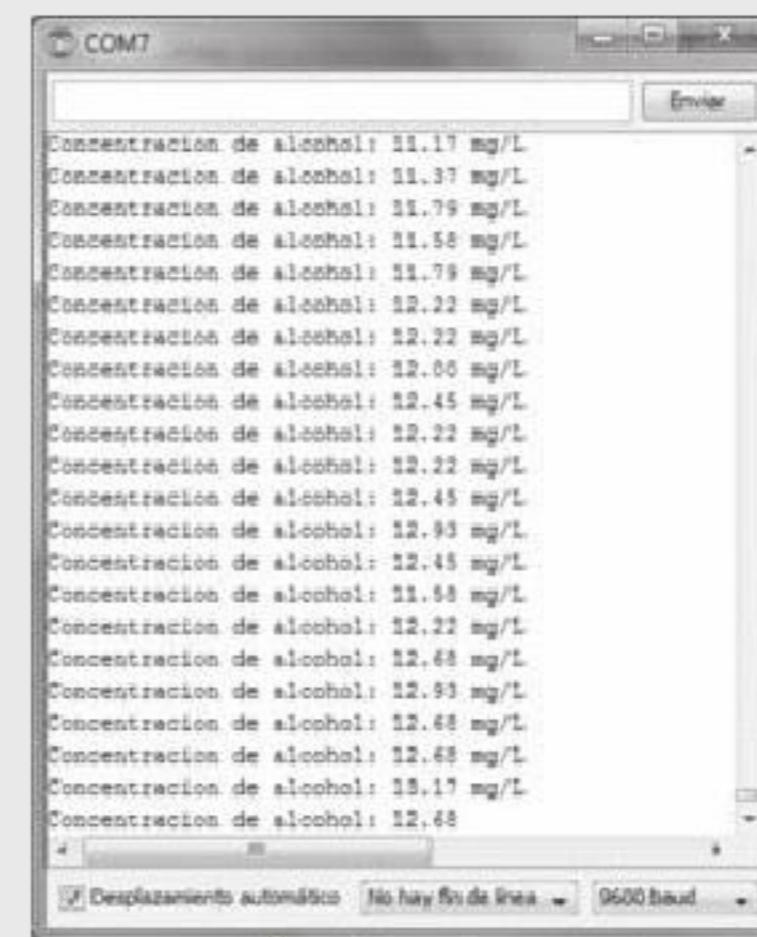
#### Pruebas

En ausencia de alcohol en el aire, la lectura del sensor es de 0.4 mg/L, debido a que este fue calibrado a esta concentración (véase figura 9.12).



**Figura 9.12** En una atmósfera libre de alcohol, la lectura del sensor corresponde precisamente a la que fue calibrado, es decir, 0.4 mg/L.

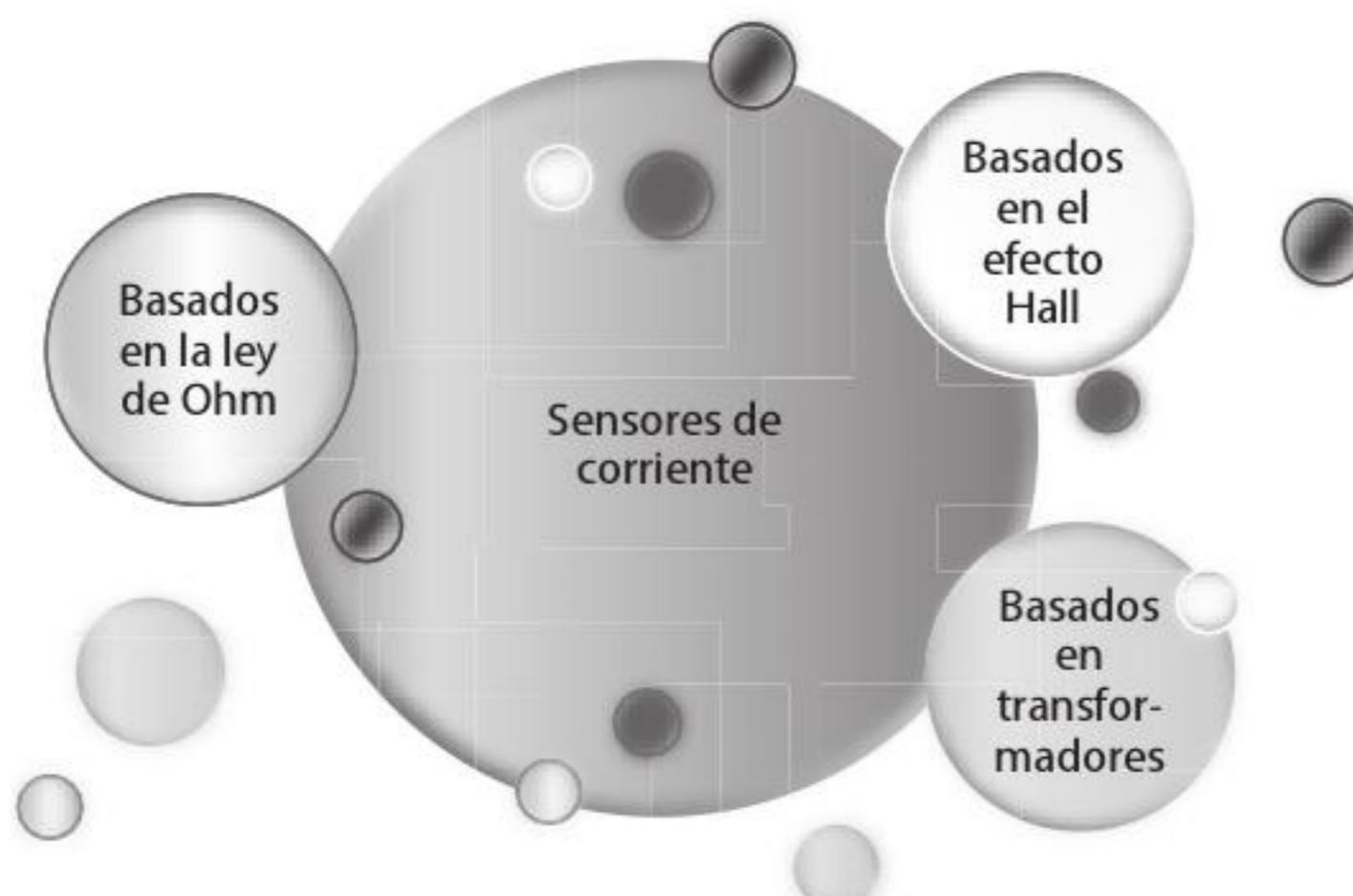
Si se acerca un poco de alcohol, este comienza a evaporarse de inmediato por su bajo punto de ebullición, lo que provoca que se contamine la atmósfera y cambie la concentración de alcohol del medio, misma que es detectada con facilidad por el sensor, como se muestra en la figura 9.13.



**Figura 9.13** En una atmósfera con presencia de alcohol la lectura del sensor corresponde a 12.6 mg/L.

## 9.2 Sensores de corriente

Un sensor de corriente es un transductor entre la variación de corriente eléctrica y un cambio de voltaje proporcional. Este tipo de sensores es muy útil cuando se trata de implementar un sistema de control, se desea conocer la potencia consumida por una serie de circuitos que en conjunto están alimentados por una sola batería, se necesita detectar el sobreconsumo de corriente, etcétera. En este tipo de sensores existen múltiples vertientes, sensores de corriente cuyo principio de operación está basado en el efecto Hall, sensores que se basan en la ley de Ohm y sensores basados en transformadores. En general, los dos primeros tipos de sensores están enfocados a aplicaciones donde la corriente es relativamente baja (hasta unas decenas de amperes), mientras que en el caso del tercer tipo su uso está enfocado a aplicaciones industriales, donde los niveles de corriente manejados son muy altos.



**Figura 9.14** Clasificación de sensores de corriente.

Para el caso de los sensores de corriente es cada vez más común encontrar medidores de estado sólido en lugar de medidores basados en el uso de bobinas, debido a que la tecnología disponible para microelectrónica permite mediciones de corriente cada vez más grandes con menores pérdidas por calor.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

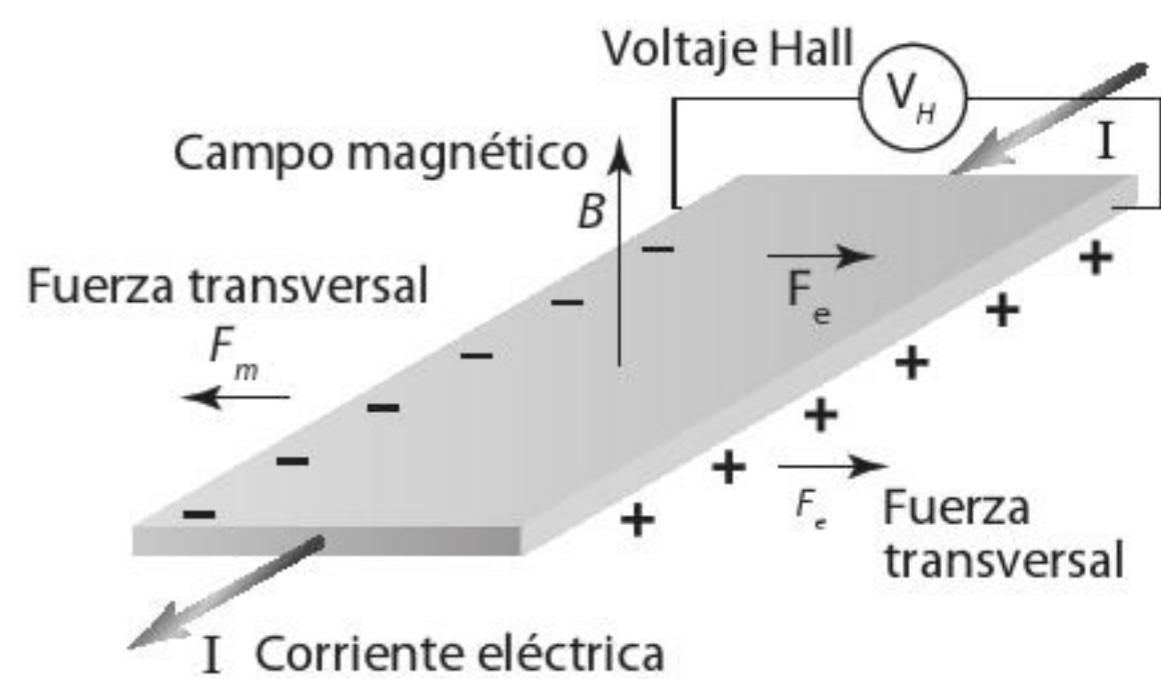
ebrary

### Sensores de corriente basados en el efecto Hall

Los sensores de corriente basados en el efecto Hall son, en general, sensores de estado sólido; su principio de funcionamiento (tratado en capítulos anteriores), como su nombre lo indica, se basa en el efecto Hall, el cual consiste en convertir un campo magnético en un voltaje equivalente mediante el efecto Hall. El efecto Hall, descubierto en 1879 por Edwin F. Hall, establece que si una corriente eléctrica ( $I$ ) fluye a través de un conductor en presencia de un campo magnético ( $B$ ) se ejercerá una fuerza transversal (también llamada fuerza de Lorentz) que busca equilibrar el efecto de dicho campo, produciendo un voltaje, llamado voltaje Hall, medible en los extremos del conductor (véase figura 9.15).

El voltaje Hall para una placa conductora simple, en este caso la pista de cobre, se puede calcular con la ecuación siguiente:

$$V_H = -\frac{IB}{ned} \quad (9.3)$$



**Figura 9.15** df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

donde:

- $n$ : densidad de portadores
- $e$ : carga del electrón
- $d$ : espesor de la placa conductora
- $I$ : corriente eléctrica
- $B$ : campo magnético

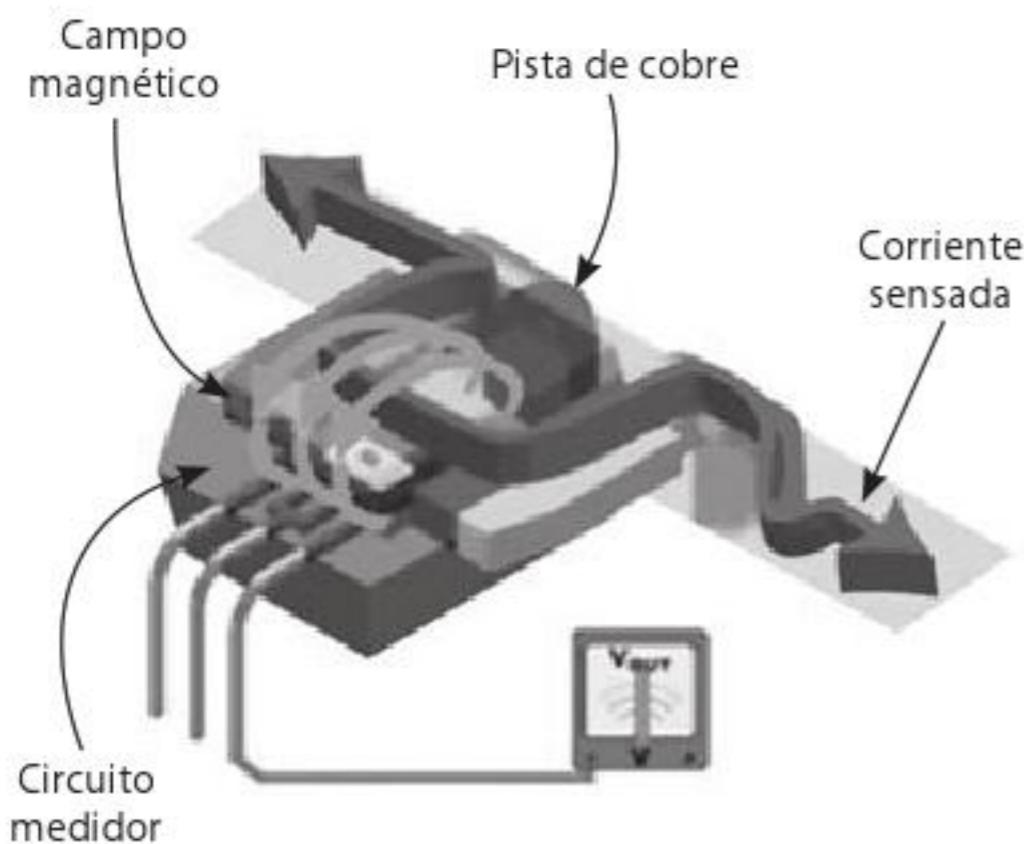


Figura 9.16 Sensor de corriente de efecto Hall.

De la ecuación anterior se observa que la variación en el campo magnético es directamente proporcional a la variación en el voltaje Hall, por lo que este tipo de sensores puede considerarse lineal (véase figura 9.16). La corriente eléctrica en el circuito de medición se mantiene constante, mientras que la corriente en la pista de cobre es la corriente que se desea detectar; así, al variar la corriente sensada también varía el campo magnético, lo que provoca, a su vez, que también varíe el voltaje a la salida del sensor. Una gran ventaja de este tipo de sensores es que debido a que la pista conductora es metálica, la resistencia es muy baja (desde unos cuantos  $m\Omega$  hasta  $\mu\Omega$ ), lo que reduce mucho las pérdidas de corriente durante la medición. Es importante resaltar que en este tipo de sensores el circuito medidor está aislado eléctricamente del circuito de detección, lo que significa que no comparten conexiones eléctricas. Algo de suma importancia es que este tipo de sensores tiene la ventaja de poder medir corrientes en CA y CD.

Otra forma de medición de corriente es montar un sensor de efecto Hall convencional como se muestra en la figura 9.17; esta configuración se conoce como **configuración de concentrador de campo**.

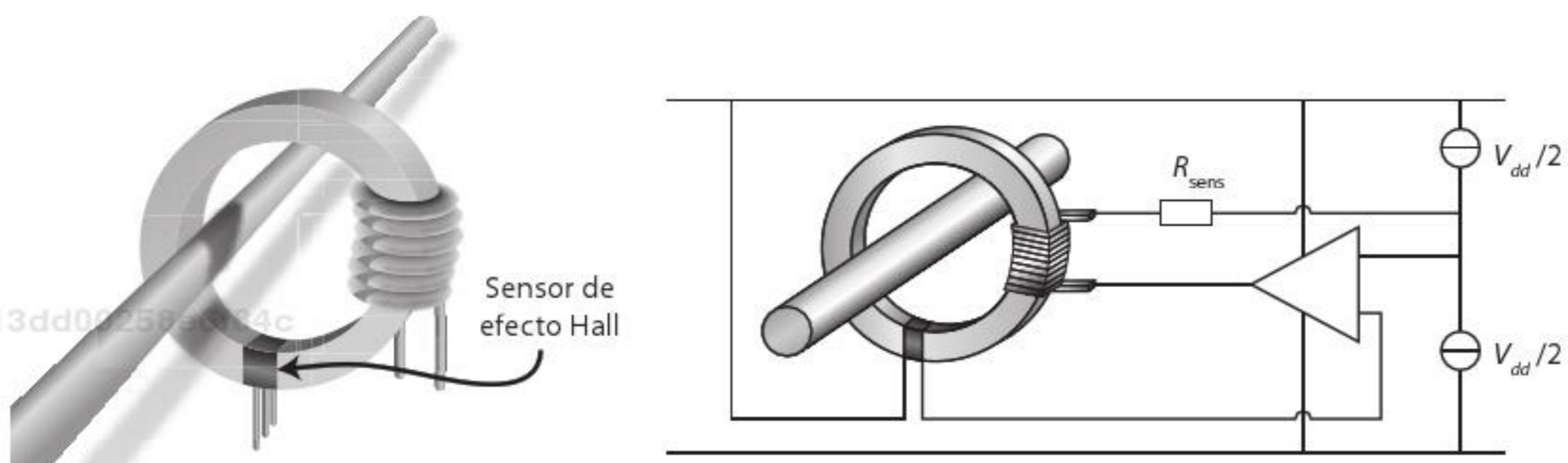


Figura 9.17 Sensor de corriente usando un concentrador de campo.

Este concentrador consiste en un material blando, con alta permeabilidad y baja remanencia, que rodea al conductor por el cual circula la corriente a medir. El uso de este tipo de concentradores se debe a varias razones: permite amplificar la densidad de flujo efectiva, se elimina la dependencia de la distancia del sensor al cable, ya que el concentrador "recogerá" de manera efectiva todo el flujo, lo que permite ligeras variaciones en la posición del cable, y hace posible la medición sin abrir el circuito, o en configuraciones especiales permite diseñar circuitos de control de lazo cerrado.

### Sensores de corriente basados en la ley de Ohm

Este tipo de dispositivos convierte un voltaje diferencial en una salida de corriente, misma que es transformada de nuevo mediante una carga resistiva ( $R_L$ ) a voltaje; donde dicho voltaje puede ser escalado de acuerdo con la aplicación deseada. Obsérvese en este caso que se cuenta con dos cargas para el sensor; la primera es  $R_L$ , que representa la resistencia donde se mide la salida del sensor, y la segunda es el propio circuito al que se le desea medir la corriente.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

Considérese el circuito que se muestra en la figura 9.18, donde la resistencia  $R_s$  se encarga de generar el voltaje diferencial para su procesamiento posterior. Ese voltaje diferencial será proporcional a la corriente  $I_s$ ; una vez que el voltaje diferencial, definido como  $(V_{IN+}) - (V_{IN-})$ , entra al circuito de acondicionamiento, este será el encargado de convertirlo en una corriente proporcional a  $I_s$ , que es la corriente que se desea medir. Lo importante en este tipo de circuitos acondicionadores es que deben tener la característica de no interactuar con el comportamiento del circuito; es decir, no deben actuar como una carga, extrayendo corriente eléctrica del circuito o comportarse como una fuente de corriente, esto es, solo interactúan "observando" la caída de voltaje en la resistencia  $R_s$ . Una vez que la corriente  $I_s$  es "copiada" en el circuito de acondicionamiento, es transformada a voltaje por medio de una resistencia de carga  $R_L$ .

Gracias a que este sensor utiliza el principio de funcionamiento de la ley de Ohm para calcular el voltaje equivalente a la salida, se comporta de manera lineal, de tal manera que es posible calcular su salida como:

$$V_o = R_{eq} I_s \quad (9.4)$$

donde:

$V_o$ : voltaje de salida [V]

$R_{eq}$ : resistencia equivalente [ $\Omega$ ]

$I_s$ : corriente a sensar [A]

En este caso, el valor de  $R_{eq}$  está determinado por el arreglo interno del sensor de corriente, que depende del fabricante, de tal manera que el valor de la resistencia equivalente debe ser una combinación entre  $R_s$ ,  $R_L$  y la resistencia interna del circuito acondicionador. Las estructuras típicas para este tipo de acondicionadores de señal se muestran en la figura 9.19.

La desventaja de este tipo de sensores es que para que exista una menor disipación por calor, la resistencia sensora debe ser de grandes dimensiones físicas; precisamente por estos problemas de autocalentamiento es que no es posible medir grandes valores de corriente.

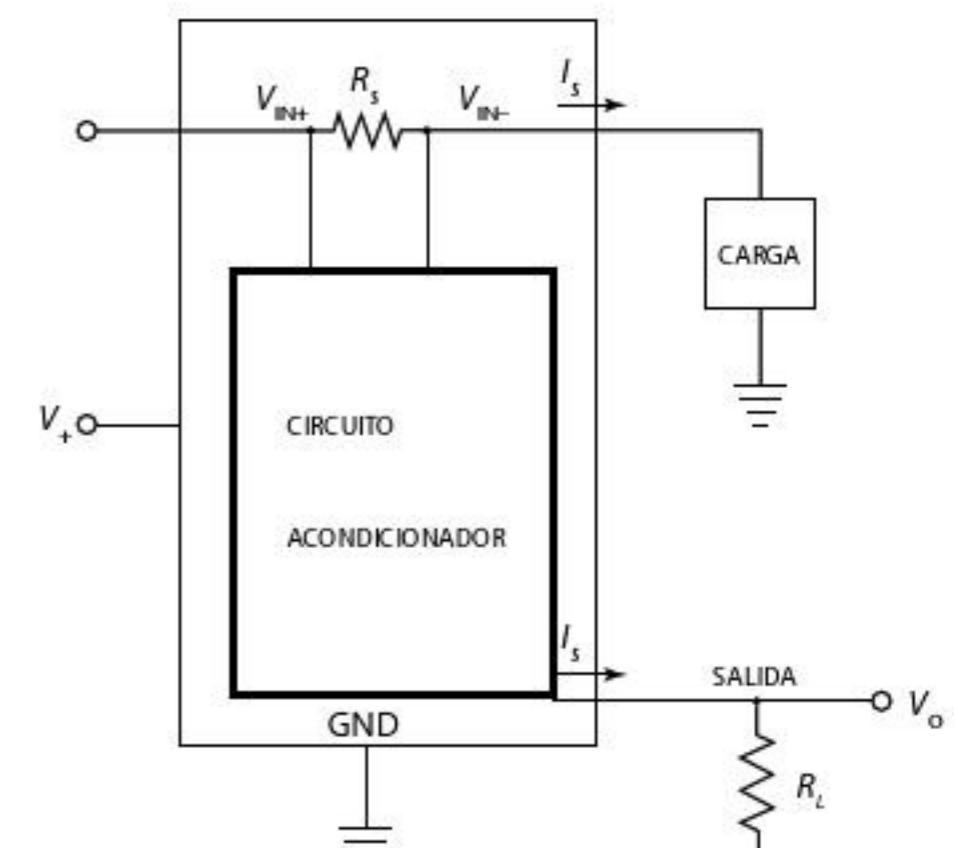


Figura 9.18 Sensor de corriente basado en la ley de Ohm.

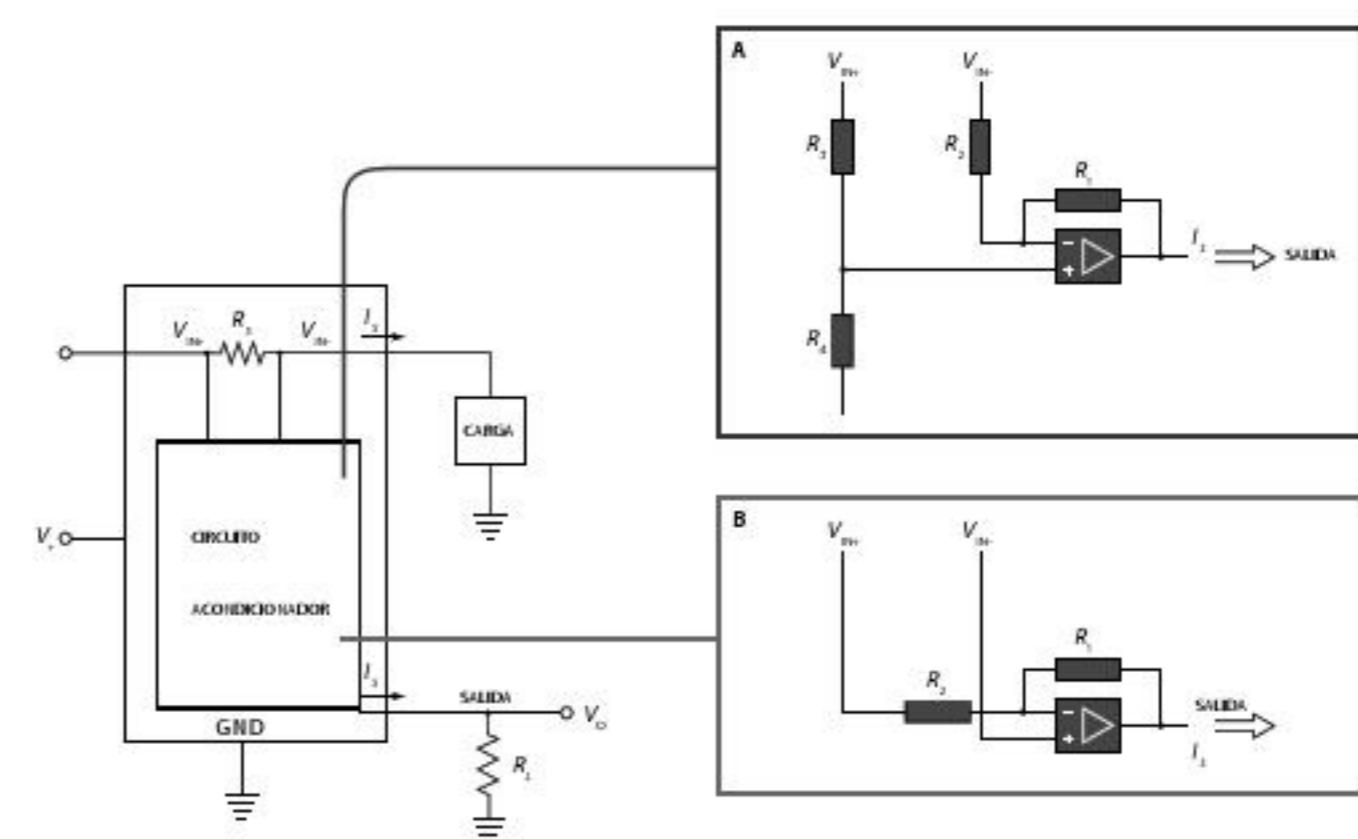


Figura 9.19 Configuración de circuitos acondicionadores para sensores de corriente basados en la ley de Ohm.

## Ejercicio de aplicación

### Medidor de corriente con el uso de un sensor de corriente basado en la ley de Ohm

#### Objetivo

Medir la corriente que circula a través de cualquier circuito con el uso de un sensor de corriente INA169 y un Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Sensor de corriente INA169
- Amplificador operacional LM358

- 1 resistencia de 330  $\Omega$
- 1 LED amarillo
- Fuente de alimentación externa de 5 V
- Multímetro
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Descripción del sensor de corriente INA169

- Voltaje de alimentación de 2.7 V a 60 V.

- El circuito mide la corriente que circula a través de la resistencia  $R_S$  entre las terminales  $V_{IN+}$  y  $V_{IN-}$ .
- El máximo voltaje entre las terminales  $V_{IN+}$  y  $V$  es de 0.5 V.
- Las resistencias  $R_L$  y  $R_S$  determinan la ganancia del sistema y su rango de medición.
- De fabricación, en la placa INA169 de Sparkfun  $R_L = 10\text{ k}\Omega$  y  $R_S = 10\text{ }\Omega$ , aunque cuenta con terminales para conectar otras resistencias en paralelo y modificar estos valores.
- El voltaje de salida del sensor está en función de la corriente que circula por  $R_S$ , así:

$$V_{out} = \frac{I_s \times R_L \times R_S}{1000}; I_s = \frac{V_{out} \times 1000}{R_L \times R_S} \quad (9.5)$$

La descripción de sus pines es la siguiente:

- **GND.** Referencia a tierra.
- **$V_{IN+}$ .** Terminal más positiva del circuito cuya corriente se medirá.
- **$V_{IN-}$ .** Terminal menos positiva del circuito.
- **$V_{OUT}$ .** Voltaje de salida en función de la corriente que fluye por  $R_S$ .
- **VCC.** Voltaje de alimentación del circuito de entre 2.7 y 60 V.

Por una parte, el sensor de corriente INA169 no puede sensor voltaje mayor a 500 mV entre sus terminales  $V_{IN+}$  y  $V_{IN-}$ , y por otra parte, se incrementa el error en la lectura cuando el voltaje es menor de 35 mV. Por tanto, si se incluye el voltaje de caída en el transistor, el rango de voltaje válido entre  $V_{IN+}$  y  $V_{IN-}$  es de 35 mV a 350 mV.

Ahora, si el voltaje que cae sobre la resistencia  $R_S$  es:

$$VR_S = I_s \times R_S = (V_{IN+}) - (V_{IN-})$$

$$I_s = \frac{(V_{IN+}) - (V_{IN-})}{R_S}$$

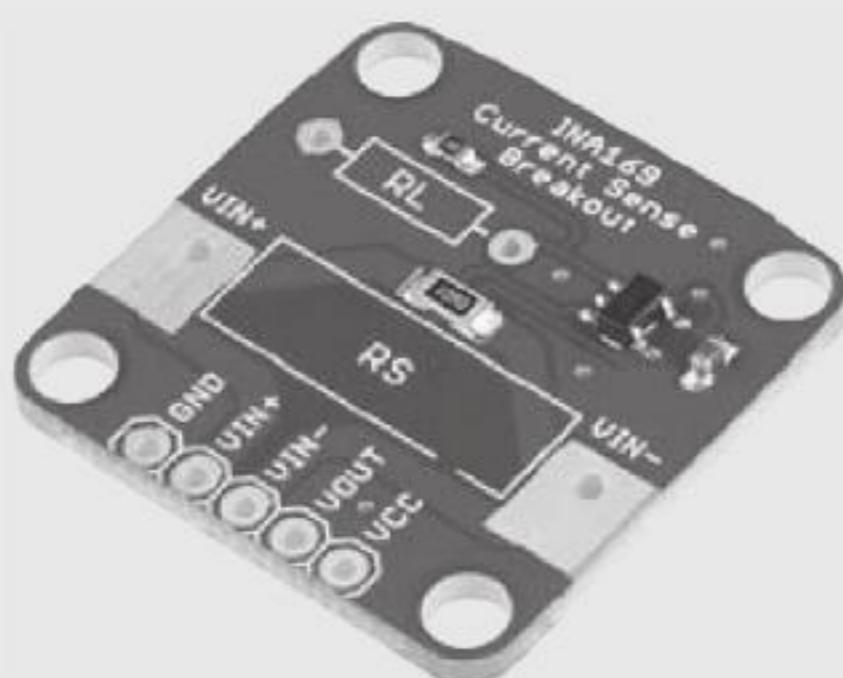


Figura 9.20 Sensor de corriente INA169.

El rango medible de corriente puede modificarse al variar el valor de la resistencia  $R_S$ , como se aprecia en la siguiente tabla.

$R_S$	Rango de corriente
10 $\Omega$	3.5 mA-35 mA
1 $\Omega$	35 mA-350 mA
0.1 $\Omega$	350 mA-3.5 A

De acuerdo con los propósitos de esta práctica, se mantienen las resistencias  $R_S = 10\text{ }\Omega$  y  $R_L = 10\text{ k}\Omega$  de fabricación de la tarjeta de SparkFun.

### Construcción del circuito

El objetivo de esta práctica es medir la corriente que pasa a través de un circuito LED-resistencia; la conexión del sensor de corriente se aprecia en la figura 9.21. De la figura se observa que la terminal más positiva del circuito se conecta a  $V_{IN+}$ , mientras que la resistencia de  $330\text{ }\Omega$  y el LED a tierra se conectan a la terminal  $V_{IN-}$ . El voltaje de salida  $V_{OUT}$  se envía a un seguidor de voltaje para acoplar las impedancias y que el ADC no altere la lectura. Por último, esta señal se conecta a la terminal analógica A0 del Arduino Uno®.

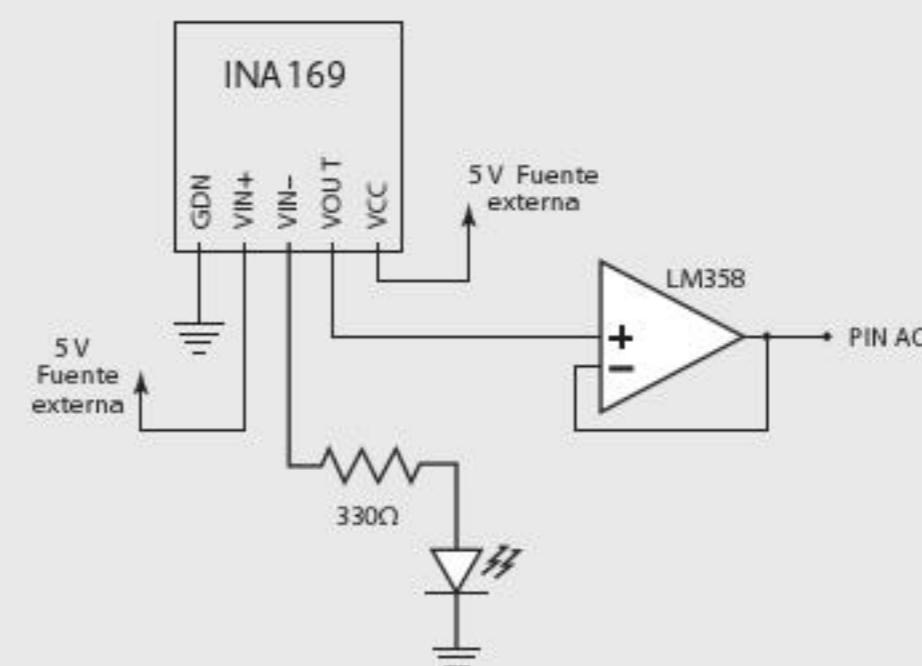


Figura 9.21 Circuito sensor de corriente INA169, donde  $R_S = 10\text{ }\Omega$  y  $R_L = 10\text{ k}\Omega$ .

### Código

#### Descripción del programa

El siguiente programa:

- Realiza la lectura y conversión analógica-digital ADC del sensor IN169 con una resolución de 10 bits.
- Al considerar que  $R_L = 10\text{ k}\Omega$  y  $R_S = 10\text{ }\Omega$ , el cálculo de la corriente que circula a través de  $R_S$  se realiza con la ecuación 9.3. Además, se multiplica por 1 000 para mostrar la lectura en el monitor serial en miliamperes (mA).

```
*****Sensor de corriente*****
/*
/*El INA169 es un sensor capaz de medir la
corriente que pasa a través */


```

```

    /*de la RS. Ofrece un voltaje a su salida
    directamente proporcional
    /*a la corriente que fluye por la resistencia
    RS.
    /*El rango de medición de corriente depende
    del valor de RS.
    /*
    /*En el siguiente programa se hace la lectura
    del sensor y se realiza
    /*el cálculo de la corriente que consume un
    circuito cualesquiera (Un
    /*LED, motor, etc.).
    ****

```

```

//Se declaran las variables empleadas
int readSensor;
float vout, Is;

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la
comunicación serie a 9600 baudios
}

void loop()
{
    readSensor = analogRead(A0); //Lectura
análogica del sensor
    vout = readSensor * 0.00488; //Conversion a
volts. Resolución = 5V/1024 =
//0.00488V
    Is = vout * 10; //Según el IN169, IS =
1000 * Vout / (RS * RL). En la placa
    //RS = 10 Ohms, y RL = 10kOhm (pueden
modificarse), por tanto IS =
    //Vout/100. Para obtener IS en mA, IS =
1000 * Vout/100 -> IS =
//10 * Vout.

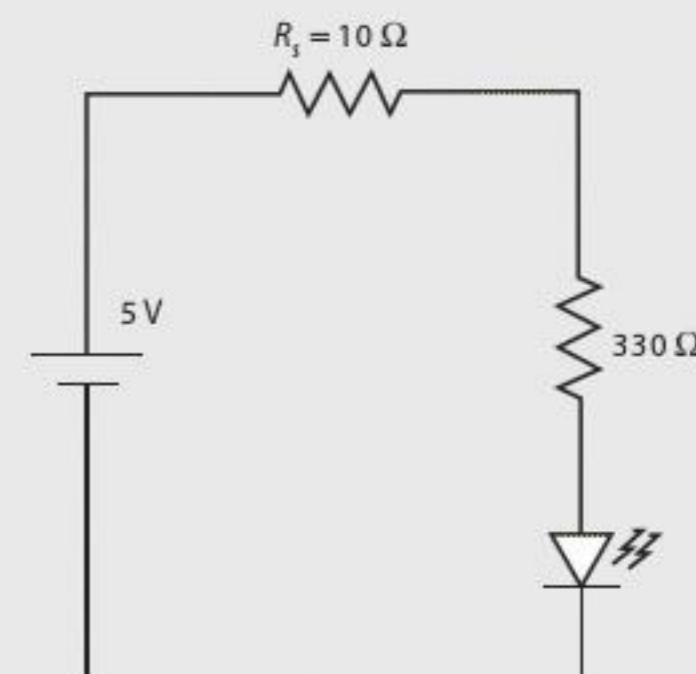
    Serial.print("Corriente: "); //Se imprime la
corriente en mA que
    //circula por RS.
    Serial.print(Is);
    Serial.println(" mA");

    delay(50); //Pequeño retardo para regular la
velocidad del programa.
}

```

### Pruebas

La corriente que circula a través del circuito LED-resistencia que se muestra en la figura 9.22 puede obtenerse como se describe a continuación.



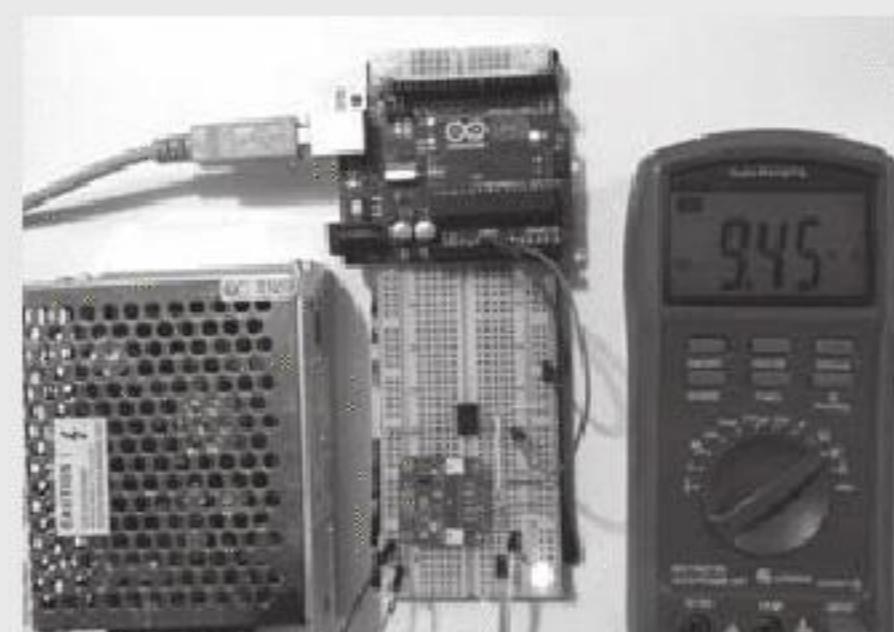
**Figura 9.22** Circuito al que el sensor mide su corriente.

Si se considera que el voltaje que cae en el LED verde opaco es de 1.7 V y se utiliza el método de mallas, el circuito puede describirse por la siguiente ecuación:

$$5 \text{ V} - I \times R_s - I \times 330 - 1.7 \text{ V} = 0 \\ I(R_s + 330) = 5 \text{ V} - 1.7 \text{ V} = 3.3 \text{ V}$$

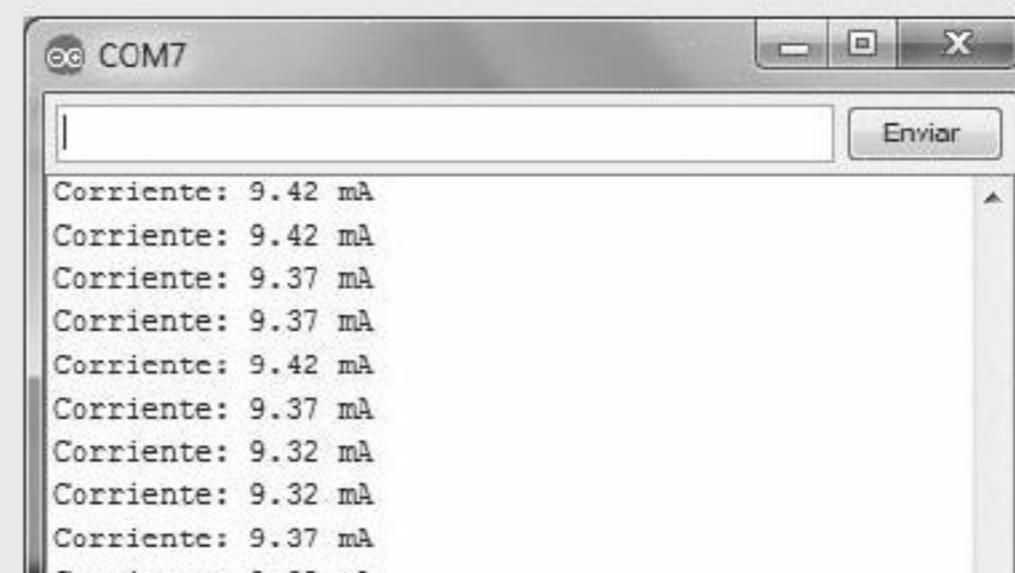
$$I_s = \frac{3.3 \text{ V}}{R_s + 330 \Omega} = \frac{3.3 \text{ V}}{10 \Omega + 330 \Omega} = 9.7 \text{ mA}$$

Como se puede comprobar, esta corriente es muy próxima a la medida por el multímetro que se muestra en la figura 9.23.



**Figura 9.23** Medidor de corriente conectado al circuito.

De la figura se puede ver que la lectura del sensor es de 9.4 mA aproximadamente, muy cercana a los cálculos y a la lectura del multímetro.



**Figura 9.24** El sensor registra una corriente de 9.4 mA en el circuito del LED-resistencia.

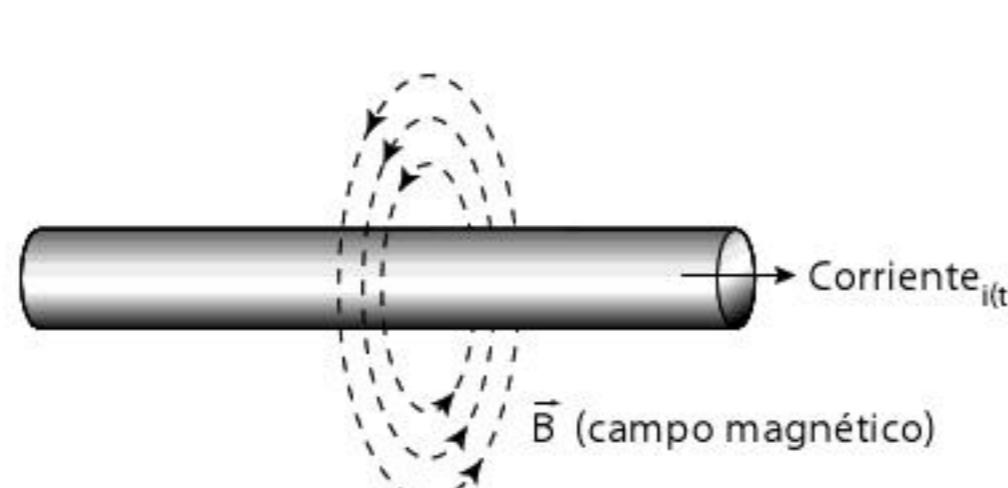
## Sensores de corriente basados en transformadores

Este tipo de sensores es el más común cuando se requieren medir grandes corrientes; además, resulta de gran interés que en estos sensores la corriente eléctrica que circula por el circuito no se interrumpe cuando se realiza la medición. Empero, una de las desventajas de este tipo de sensores es que tienen un corrimiento de fase intrínseco de entre  $0.1^\circ$  y  $0.3^\circ$ , además de que el núcleo de hierro usado por lo común en estos sensores se satura a un cierto valor nominal de corriente (ya sea en CC o en CA). Por tanto, con el fin de combatir los problemas de saturación del núcleo, se usan materiales de alta permeabilidad; no obstante, esto reduce sus características de fase ante grandes corrientes y altas temperaturas.

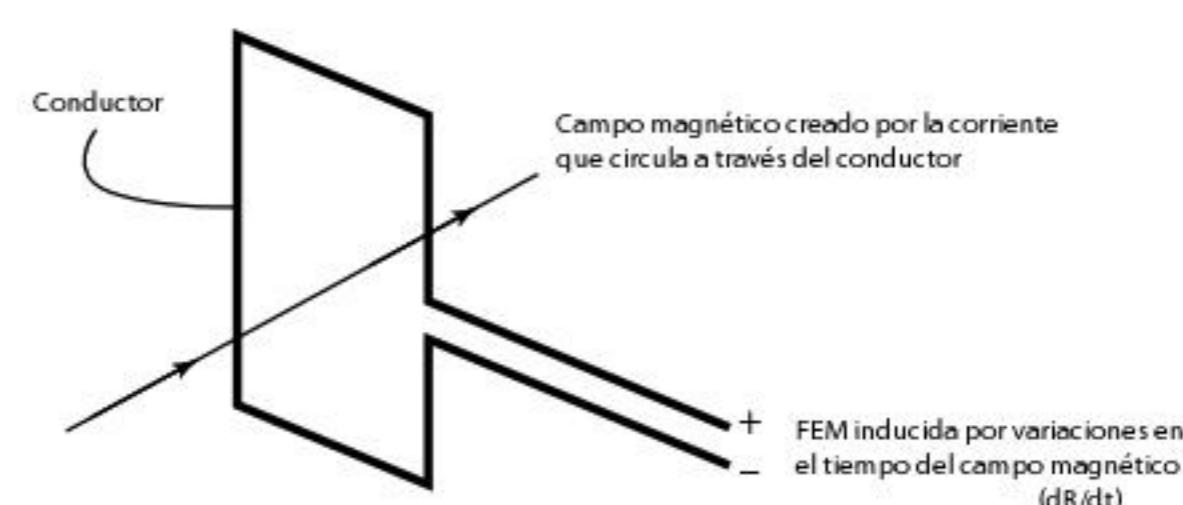
### Bobinas de Rogowski

Estos sensores también son conocidos como transductores de núcleo de aire. Su principio de funcionamiento se sintetiza de la siguiente manera: cuando en un conductor circula una corriente eléctrica se forma un campo magnético alrededor del conductor; la magnitud de dicho campo magnético es directamente proporcional a la corriente que circula por el cable (véase figura 9.25).

Ahora, considérese que el cable forma un circuito como el que se muestra en la figura 9.26. Si el campo magnético es variante en el tiempo se genera una fuerza electromotriz (FEM), la cual es proporcional a la variación en el tiempo del campo dentro del circuito cerrado.



**Figura 9.25** Campo magnético en un conductor.



**Figura 9.26** FEM generada por cambios en el campo magnético.

Debido a que las variaciones en el campo magnético son proporcionales a la FEM inducida y la magnitud del campo magnético es proporcional a la corriente que circula por el conductor, es posible concluir que la FEM es proporcional a las variaciones de la corriente en el tiempo. Recuérdese que la FEM es la fuerza encargada de mantener una magnitud de voltaje entre los bornes de un circuito abierto o producir una corriente eléctrica dentro de un circuito cerrado, y que esta se mide en volts.

Este tipo de sensor está constituido por un inductor de núcleo de aire tipo toroide;<sup>2</sup> la FEM generada puede ser representada por el voltaje generado mediante la ecuación:

$$V = M \frac{di}{dt} \quad (9.6)$$

donde:

$M$ : inductancia mutua

$\frac{di}{dt}$ : variaciones de corriente respecto al tiempo

Algunas de las grandes ventajas de este tipo de sensores son su alta linealidad y su gran resistencia a roturas o deformaciones; además, debido a la baja permeabilidad del núcleo de aire, su

<sup>2</sup> Un inductor tipo toroide consiste en un núcleo magnético en forma de anillo, fabricado en un material de alta permeabilidad, alrededor del cual estará enrollado el cable que formará al inductor.

reluctancia es notablemente más alta que la de los materiales ferrosos. La única desventaja de este tipo de sensor es que requiere de un circuito de acondicionamiento que permita integrar el voltaje para calcular el valor de la corriente que circula por el alambre, además de que su sensitividad es muy baja comparada con los sensores tratados antes, la cual es del orden de  $100 \mu\text{V/A}$ , lo que lo hace una mala opción si se requieren medir niveles bajos de corriente (véase figura 9.27).

#### Sensores de corriente con pinza ampermétrica de núcleo de hierro

Este tipo de sensores se prefiere cuando se trata de una medición que puede resultar de alto riesgo para el operario; es decir, cuando el valor de corriente esperado es muy alto. Una de sus principales ventajas es que no es necesario interrumpir el flujo de corriente del circuito para tomar la medición, lo que agiliza la toma de la misma.

La pinza ampermétrica de estos sensores funciona de manera muy similar a un transformador, a excepción de que la pinza tiene dos entrehierros, los cuales son necesarios para abrir la pinza y abrazar al conductor en el que se desea medir la corriente, respectivamente, y que el número de vueltas del circuito primario es, en general, una sola, que se usa para abrazar solo un cable.

Los sensores de pinza ampermétrica se basan en la permeabilidad del material con el cual se construyen, que van desde los 2000 hasta los 6000  $\mu\text{H}$ . Recuérdese que la permeabilidad puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\rho_\phi}{H} \quad (9.7)$$

donde:

$\rho_\phi$ : densidad del flujo magnético

$H$ : intensidad del campo magnético

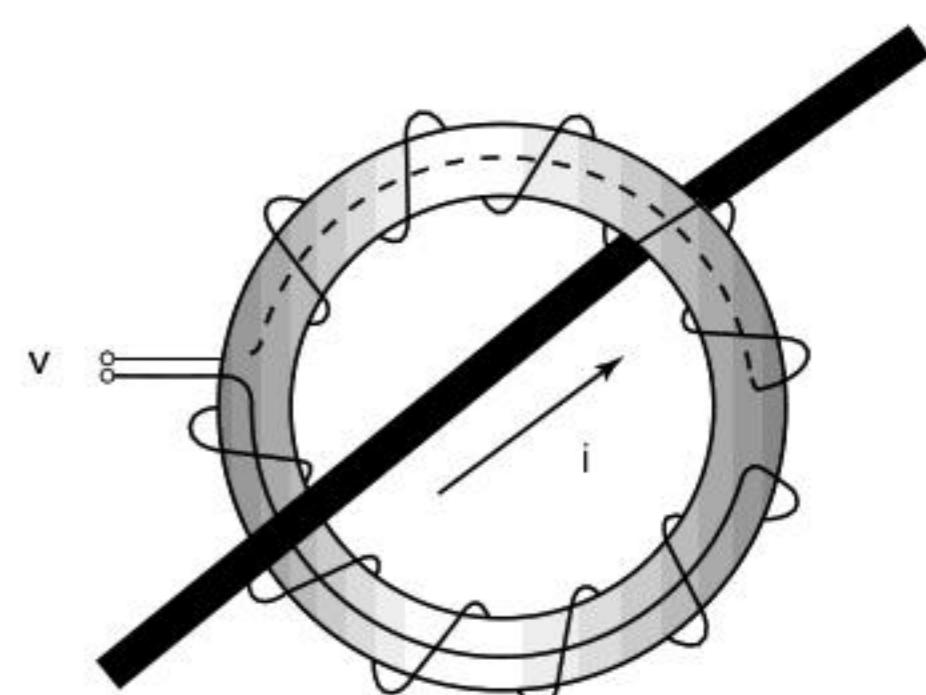


Figura 9.27 Sensor de Rogowski.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

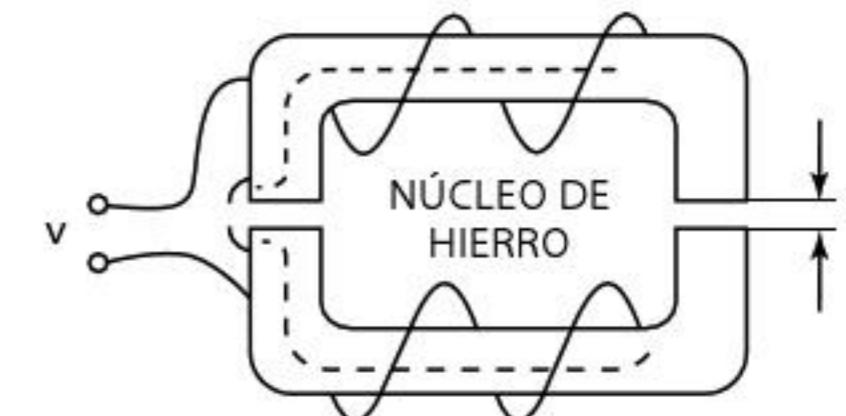


Figura 9.28  
Sensor de pinza ampermétrica.

Es importante mencionar que esta relación no es lineal, por lo que es indispensable mantener al sensor operando dentro de los rangos indicados por el fabricante, de otra manera es en extremo probable que el sensor esté operando de manera inapropiada. El voltaje entregado por el sensor dependerá de la variación del flujo magnético en su núcleo (véase figura 9.28).

Uno de los problemas típicos de este tipo de sensor es que la imperfección en el cierre del circuito constituye un factor de gran relevancia para que este funcione en forma adecuada. Por esta razón, para minimizar el efecto del entrecierre, el material que suele utilizarse para su construcción es el hierro, debido a su excepcional valor de permeabilidad y a que presenta altas relaciones de transferencia. Otro problema es la suciedad; el óxido formado de manera natural sobre la pinza o el desajuste mecánico son fuentes de ruido para este tipo de sensores. Por ejemplo, en ciertos modelos un desajuste en el cierre de la pinza de  $50 \mu\text{m}$  provoca que la exactitud del sensor sea cinco veces menor.

En cambio, una de sus ventajas es su sensitividad, ya que este tipo de sensores presenta variaciones de hasta  $1 \text{ mV/A}$ .

### 9.3 Sensores de pH

Un sensor de pH es un transductor entre la acidez de una solución y una señal eléctrica. Estos sensores son muy usados en la industria, debido a que es imprescindible controlar el pH de las sustancias usadas en procesos químicos, como la producción de pulpas, bebidas, alimentos, papel, derivados del petróleo y algunos otros procesos en los cuales los residuos son sustancias corrosivas dañinas para el ambiente.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

El pH es la abreviatura utilizada para referirse al potencial de hidrógeno en una sustancia. Este parámetro determina el grado de acidez o alcalinidad de las sustancias. Este se mide en un rango de 0 a 14, donde 7 significa un valor neutro. La escala del pH se puede interpretar de la siguiente forma: los valores menores a siete indican un rango de acidez, los valores mayores a 7 dan una medida de alcalinidad o basicidad. El valor del pH se describe matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$\text{pH} = -\log_{10} a_{H^+} \quad (9.8)$$

donde  $a_{H^+}$  representa la concentración molar de los iones hidronio.

Un medidor de pH consta de tres partes básicas:

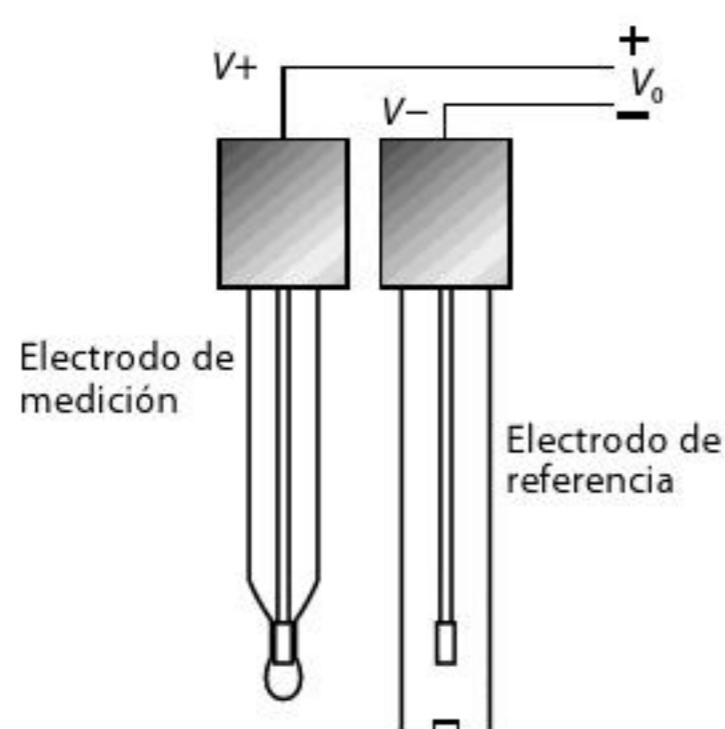
- Un electrodo sensitivo (en general un vidrio).
- Un electrodo de referencia.
- Un medidor de temperatura.

El funcionamiento de sus partes se sintetiza como sigue:

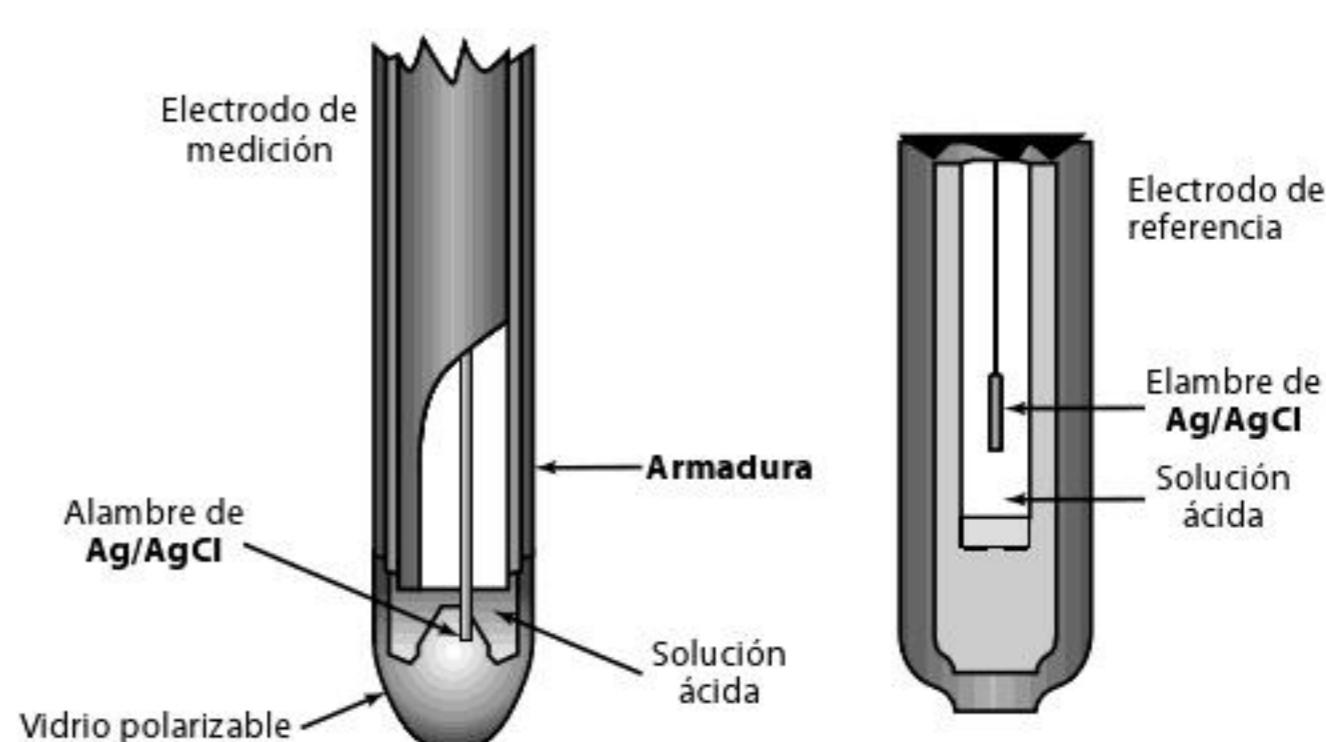
1. El **electrodo sensitivo**, inmerso en la solución, se encarga de generar un voltaje proporcional al valor del pH detectado
2. El **electrodo de referencia** se encarga de mantener un valor de voltaje fijo, sin importar variaciones de temperatura. La diferencia entre el voltaje en el electrodo sensitivo y el electrodo fijo será proporcional al pH de la solución. La mayoría de los sensores de pH están calibrados de fábrica para registrar un valor de 0 V correspondiente a un valor de pH de 7 a 25 °C.

Para explicar cómo funciona un sensor de pH, primero se debe aclarar lo siguiente: cuando un metal entra en contacto con una solución de sales o ácidos se genera un pequeño potencial; lo mismo sucede cuando dos líquidos se ponen en contacto, para lo que solo basta con colocar una membrana que los mantenga sin mezclarse por completo. Este potencial generado se conoce como **potencial electroquímico**, que consiste en una diferencia de iones a ambos lados de una membrana, lo cual produce, por una parte, una diferencia en la carga eléctrica y, por otra parte, una diferencia en la concentración química de ambas sustancias (véase figura 9.29).

En esencia, un medidor de pH mide ese potencial electroquímico entre el líquido contenido en el electrodo sensitivo y la sustancia a medir; en este caso, la membrana es el vidrio del electrodo. Dicho potencial electroquímico se mide con respecto al potencial generado en el electrodo de referencia ( $V^-$ ). De esta manera, el voltaje medido es la diferencia entre el voltaje presente en el electrodo de referencia ( $V^+$ ) y el voltaje en el electrodo de medición; obsérvese que en el circuito en realidad no fluye corriente, sino que solo se genera una diferencia de voltaje ( $V_0$ ). Por tanto, si ocurre una pequeña fuga de electrones del electrodo de referencia en dirección al electrodo sumergido en la solución, la medición se verá afectada, por lo que no se recomienda medir pH en una solución en movimiento o en contenedores grandes (véase figura 9.30).



**Figura 9.29** Arquitectura básica para la medición de pH.



**Figura 9.30** Detalle de electrodos.

Algunos fabricantes integran ambos electrodos en un solo bulbo, conservando el mismo principio de funcionamiento, solo que en este caso la solución ácida se debe introducir en el bulbo cada vez que se desea medir (véase figura 9.31).

Los medidores de pH tienen el problema de que la temperatura altera en gran medida la medición, por lo que muchos medidores de pH modernos incluyen un termistor que permite ajustarlos en forma automática, haciendo una corrección en el voltaje entregado debido a una variación en la temperatura.

## 9.4 Biosensores

Un biosensor es un elemento sensitivo a elementos biológicos como enzimas, anticuerpos, ácidos nucleicos, microorganismos, organelos, células receptoras, etcétera. Un biosensor tiene la característica principal de requerir contacto íntimo entre el material biológico a medir y el transductor utilizado. Otro tipo de biosensores son sensitivos a elementos derivados de materiales biológicos, mientras que algunos otros incorporan elementos biomiméticos<sup>3</sup> para su funcionamiento.

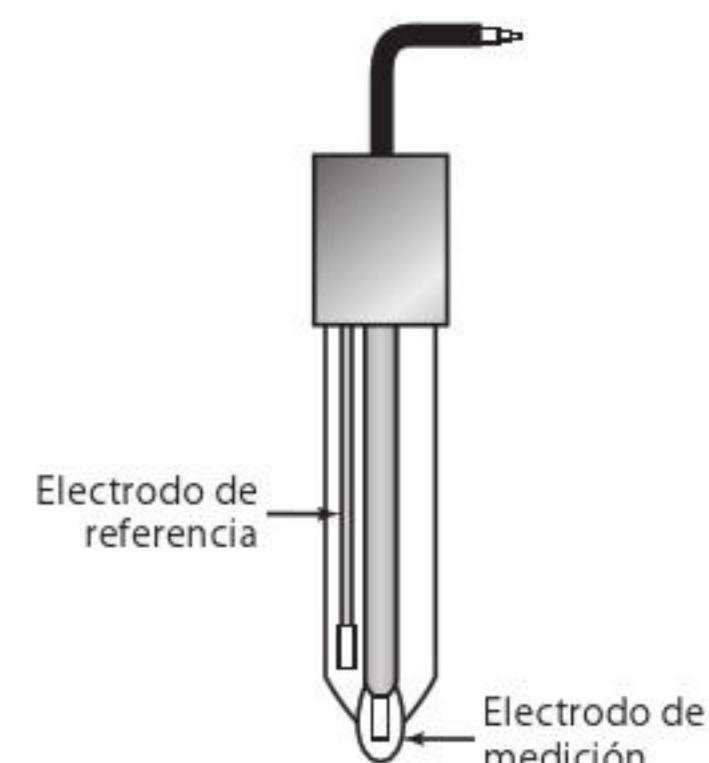
Los biosensores tienen una amplia gama de aplicaciones en el área de la medicina, el medio ambiente, la industria alimenticia, los sistemas de seguridad, etcétera.

La efectividad de un biosensor se basa en la calidad de su elemento selectivo; en general, este elemento selectivo está formado por una membrana semipermeable que permite separar el tipo de molécula que se desea analizar, de tal manera que es posible filtrar la molécula deseada, o **analito**, de líquidos como agua, orina, sangre, entre otros. Una vez que la molécula deseada ha sido separada del resto, un elemento transductor se encarga de emitir una señal eléctrica; dicho **elemento transductor** puede ser **óptico, piezoelectrónico, termoelectrónico, electroquímico** e incluso **magnético**. El principio de transducción empleado dependerá en gran medida de las características propias de cada molécula (véase figura 9.32).

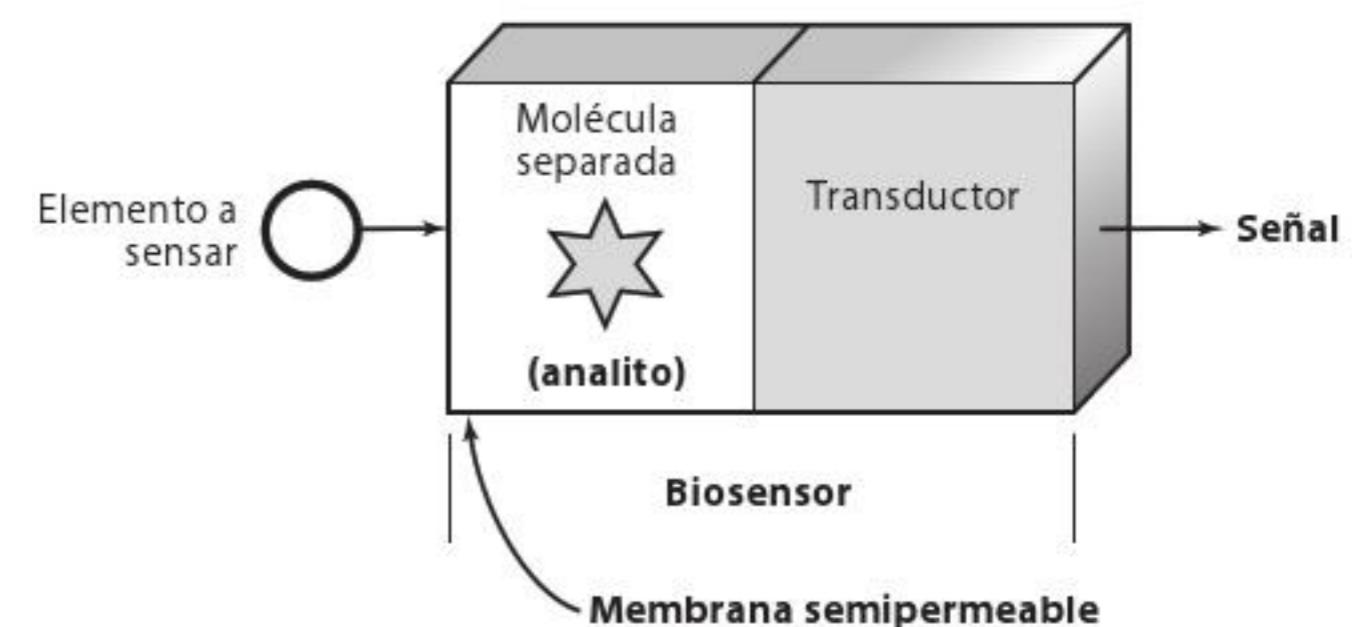
El tipo de respuesta de estos sensores no siempre es una señal eléctrica; entre las formas más populares de detección se encuentran las que se relacionan en la figura 9.33.

La sensitividad de un biosensor depende del tipo de transductor usado y del circuito amplificador de la señal. El límite de detección estará determinado por la relación señal a ruido, ya que este tipo de sensores son en extremo susceptibles al ruido, debido a la naturaleza de la membrana semipermeable.

Un biosensor también puede clasificarse de acuerdo con el tipo de molécula a detectar o el tipo de evento químico derivado de la interacción de las mismas. En el esquema se muestra dicha clasificación (véase figura 9.34).



**Figura 9.31** Electrodo combinado.

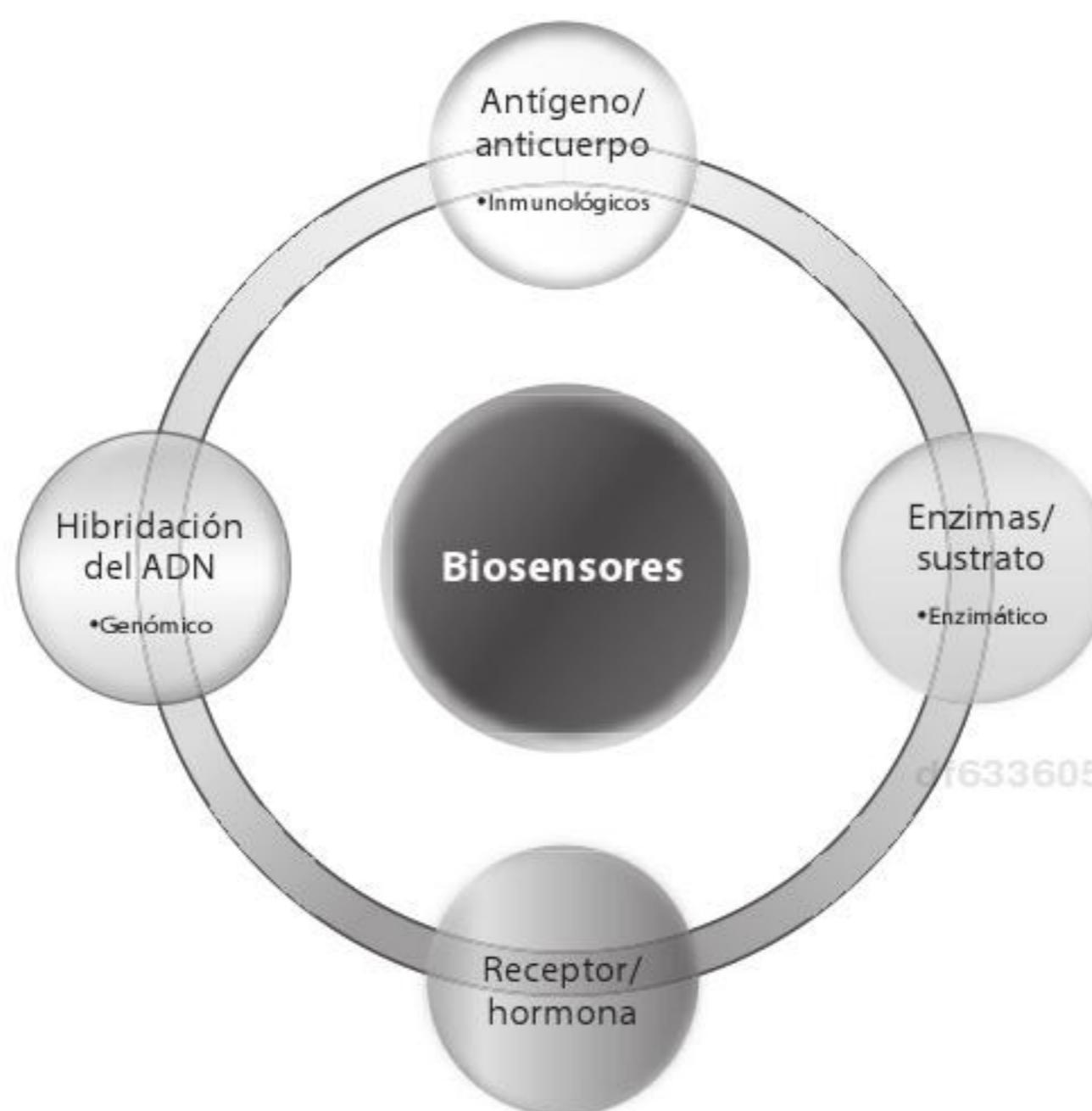


**Figura 9.32** Arquitectura básica de un biosensor.



**Figura 9.33** Tipos de señales producidas por biosensores.

<sup>3</sup> La biomimética se refiere a la tecnología que se encarga de imitar a la naturaleza.



**Figura 9.34** Clasificación de los biosensores.

### Biosensores basados en la relación antígeno/anticuerpo

Este tipo de biosensores, también conocidos como sensores de bioafinidad, se basan en la relación antígeno/anticuerpo. Un anticuerpo es una proteína que, de manera selectiva, se une a una molécula complementaria llamada antígeno; en este caso, el antígeno es el analito y el anticuerpo el elemento en el biosensor; cuando ocurre la unión antígeno/anticuerpo, el transductor se encarga de transformar estas uniones en una señal eléctrica medible.

Entre las principales ventajas de este tipo de biosensores destacan:

- Muy alta afinidad.
- Bajo costo.
- Respuesta rápida

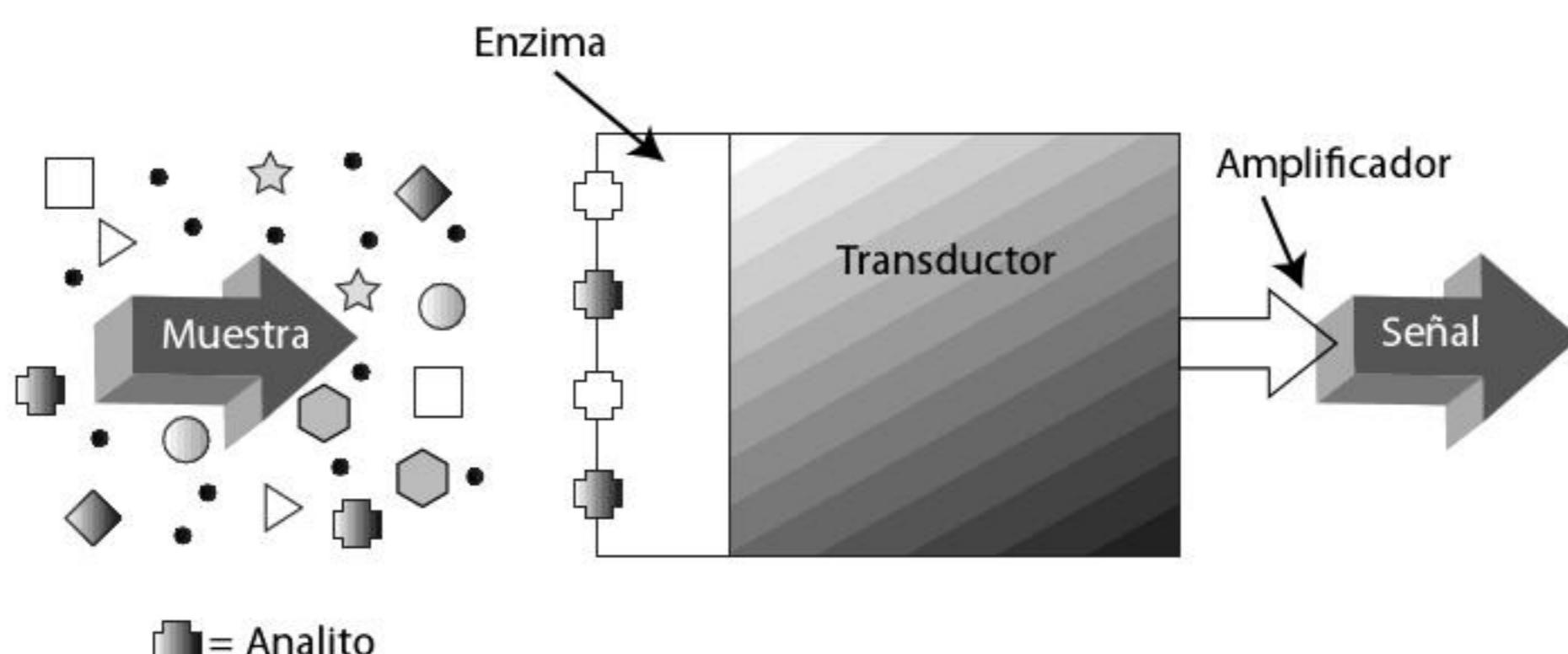
Por otro lado, las desventajas de este tipo de detección son:

- Debido a su principio de funcionamiento, es fácil saturar al sensor.
- Tiene una regeneración difícil.
- La sustancia a detectar debe ser específica para el tipo de anticuerpo contenido en el sensor.

### Biosensores basados en la relación enzima/sustrato

Para comprender cómo funciona este tipo de biosensor es imperativo definir qué es una enzima. Una enzima es una proteína que cataliza un proceso bioquímico; esto significa que una enzima es el elemento que se encarga de acelerar una reacción sin alterar químicamente el proceso ni alterarse a sí misma en el curso de la reacción.

En este caso, la enzima es la interfaz entre la membrana semipermeable y el elemento transductor; una vez que el analito ha atravesado la membrana semipermeable, interactúa con la enzima, generando un producto que es la entrada para el elemento transductor; luego, el elemento transductor se encarga de producir una señal eléctrica proporcional a la magnitud del producto (véase figura 9.35).

**Figura 9.35** Biosensor basado en la relación enzima/sustrato.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c

ebrary

Este biosensor se conoce como enzima/sustrato debido a que una vez que la enzima atraviesa la membrana permeable, el analito interactúa con el sustrato en el cual se encuentra el transductor; esta interacción puede suceder de tres formas: por absorción, por atrapamiento o generando uniones covalentes entre el analito y el sustrato.

La desventaja de este tipo de transducción es su alta dependencia de la temperatura, el pH y las fuerzas iónicas, además de presentar un tiempo de vida corto; por otra parte, entre sus ventajas es posible encontrar elevada sensitividad, respuestas rápidas y diseños simples; además, puede utilizarse una amplia gama de enzimas.

### Biosensores basados en la relación receptor/hormona

Este tipo de biosensores tienen un principio de funcionamiento muy similar a los sensores basados en la relación enzima/sustrato, solo que en este caso se trata de la relación entre hormonas y receptores específicos para cada tipo; en este caso, el receptor es el elemento que se encuentre en el biosensor y el analito es la hormona que se desea detectar.

### Biosensores basados en la hibridación del ADN

Este tipo de biosensores, también conocido como *gene chips*, se basa en el proceso de hibridación del ADN. Este proceso consiste en la unión de la cadena de ADN con su parte complementaria. Son muy utilizados para la identificación o reconocimiento de muestras de interés.

## Ejercicios propuestos

- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>Con base en la práctica de medición de concentración de alcohol en ambiente, realice una nueva calibración para medir dicha concentración a partir de 0.1 mg/L.</li> <li>Con base en la práctica de medición de corriente eléctrica, desarrolle un algoritmo que le permita medir</li> </ol> | <p>la corriente en un circuito que incluya un circuito compuesto por un diodo, una resistencia y un LED.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Realice una búsqueda bibliográfica acerca de biosensores e identifique en qué tipo de mediciones se utiliza cada principio de transducción (óptico, termoeléctrico, magnético, etcétera).</li> </ol> |
|---|--|

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary





df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

# 10I

## Actuadores



### ¿Qué debo saber para la lectura de este capítulo?

#### Objetivo general

#### Objetivos particulares

- ▶ Para leer este capítulo es necesario tener conocimientos básicos de circuitos eléctricos, neumática e hidráulica, así como conocer las características principales de programación elemental para la tarjeta Arduino®.
- ▶ Conocer el funcionamiento de los actuadores eléctricos, cilindros neumáticos y cilindros hidráulicos para su integración en diversas aplicaciones con el uso de la tarjeta Arduino®.
- ▶
  - Identificar propiedades electromecánicas de los actuadores, ventajas y desventajas, así como su principio de funcionamiento.
  - Integrar y acondicionar las interfaces de comunicación, etapas de potencia y de control entre los sensores y actuadores a través de la tarjeta Arduino®.
  - Desarrollar y programar con tarjeta Arduino® algoritmos de control para el correcto funcionamiento de los actuadores.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## Generalidades

Las magnitudes físicas pueden ser transformadas en otro tipo de magnitudes con propiedades que logran interactuar con el entorno; al final, dichas propiedades se reflejan como un cambio en el estado de un sistema. Las variables involucradas con estas magnitudes suelen ser de fuerza, posición, velocidad y aceleración. Los dispositivos que realizan la transformación de las magnitudes se conocen como actuadores y se clasifican, según su funcionamiento, en eléctricos, hidráulicos y neumáticos.

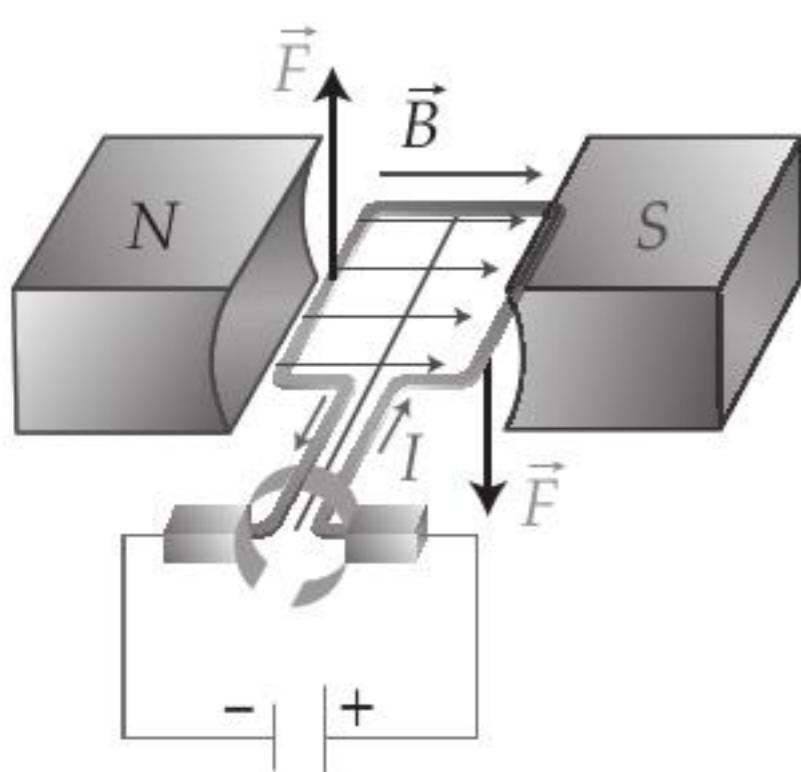
### 10.1 Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos, como hace referencia su nombre, transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Su principio de funcionamiento se fundamenta en el efecto que produce una espira

conductora que se encuentra dentro de la acción de un campo magnético y por la que circula una corriente eléctrica. En estas condiciones se experimenta una fuerza electromagnética en la espira, la cual induce un desplazamiento perpendicular a las líneas de acción del campo magnético, como se muestra en la figura 10.1.

En este contexto, si se requiere que la magnitud de la fuerza de desplazamiento sea mucho mayor que la que produce una espira, entonces es necesario utilizar un conjunto de espiras. En general, a este conjunto de espiras se le conoce como devanado del motor.

Como se estudia en el capítulo 1 (Introducción), es muy frecuente clasificar a los actuadores eléctricos de acuerdo con el tipo de energía eléctrica que utilizan para su funcionamiento; por ejemplo, cuando un motor convierte la energía eléctrica que no varía en el tiempo en energía mecánica se conoce como motor de corriente directa, pero cuando utiliza la energía variable en el tiempo se denomina motor de corriente alterna.



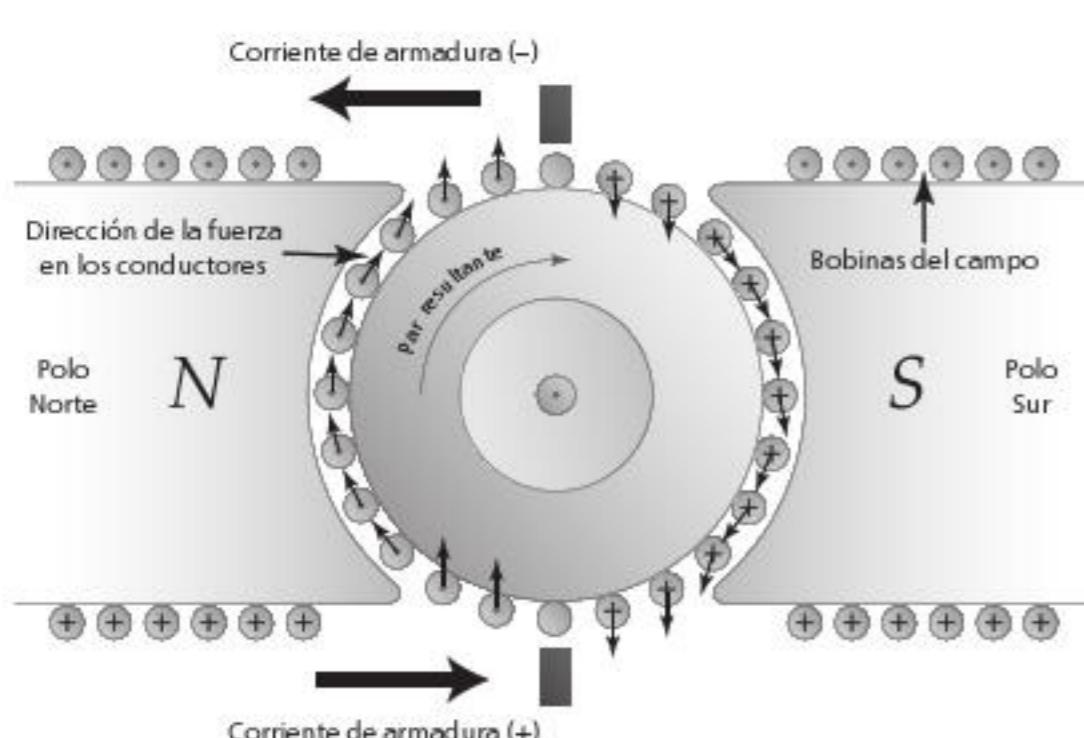
**Figura 10.1** Acción del campo magnético en una espira.

#### Motor de corriente directa (CD)

Como se hace referencia al inicio de este libro, el motor de corriente directa consta de un rotor y un estator. El rotor es la parte móvil que proporciona la fuerza que actúa sobre la carga mecánica, mientras que el estator es la parte fija que provee el magnetismo necesario para inducir la fuerza electromotriz. Una de las características principales de este tipo de motor radica en que la velocidad de rotación es proporcional al voltaje, mientras que el torque es proporcional a la corriente que circula por su devanado.

En un motor de corriente directa las espiras están alojadas en la armadura y son recorridas por una corriente continua que genera una fuente de energía externa; estas espiras, a su vez, están sometidas a la acción del campo magnético homogéneo que generan los polos del motor. En estas circunstancias, de acuerdo con el principio de Lorentz (como se menciona en el capítulo 1), se genera todo un conjunto de fuerzas en las espiras conductoras que ocasionan que la armadura gire. Para el caso particular de la distribución de elementos que se muestra en la figura 10.2, el sentido de la corriente en las espiras y la ubicación de los polos norte-sur generan vectores y fuerzas cuyas direcciones son tales que ocasionan que la armadura gire en el sentido de las manecillas del reloj.

La suma de las fuerzas electromotrices que se producen en las espiras conductoras genera un par de fuerzas del motor (en la armadura). Nótese que este par tiene la misma dirección de movimiento de la armadura, por tanto:



**Figura 10.2** Dirección de fuerzas en un motor de CD de imán permanente.

$$T_d = K_a \Phi_p I_a$$

donde:

$T_d$ : par inducido [Nm]

$K_a$ : constante de la máquina

$\Phi_p$ : flujo por polo [Gs]

$I_a$ : corriente de la armadura [A]

Es claro que cuando el motor se encuentra en movimiento, cada una de las bobinas en la armadura experimenta una variación en el flujo magnético. Este cambio de flujo induce en estas una fuerza electromotriz (fem), así que, por la ley de Faraday, esta fuerza electromotriz inducida es opuesta pero de igual magnitud al voltaje aplicado. Esta fem inducida en un motor se conoce como fuerza contraelectromotriz.

$$E_a = K_a \Phi_p \omega_a$$

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

donde:

$E_a$ : fuerza contraelectromotriz

$\omega_a$ : velocidad angular de la armadura, en general se da en radianes sobre segundo (rad/s)

Entonces, por medio de la ley de Ohm, es posible relacionar el voltaje aplicado en la armadura, la resistencia total, la corriente de la armadura y la fuerza contraelectromotriz con la siguiente expresión:

$$I_a = \frac{V_s - E_a}{R_a}$$

donde:

$I_a$ : corriente de la armadura

$R_a$ : resistencia de la armadura

$V_s$ : voltaje aplicado en las terminales de la armadura

### Modelo del motor de CD

Uno de los actuadores más usados en los sistemas de detección y de control es precisamente el motor de corriente directa que utiliza imanes permanentes como polos magnéticos que generan el flujo  $\Phi_p$ . Debido a esto, resulta necesario modelarlo para establecer algún esquema de control que pueda modificar sus variables, tanto de posición como de velocidad. En la figura 10.3 se muestra el diagrama eléctrico-mecánico que representa al motor de corriente directa y donde se observa la presencia del par de carga de salida  $T_s$ ; recuérdese que  $T_d$  es el par del motor.

Debido a que el motor que se modela utiliza imanes permanentes, entonces el flujo  $\Phi_p$  es una constante; por tanto, se puede observar que las constantes cumplen la igualdad  $K_b = K_i = \Phi_p K_a$ ; entonces, las expresiones para  $T_s$  y  $E_a$  se pueden reducir como:

$$T_s = K I_a$$

$$E_a = K_b \omega_m$$

$$E_a = K_b \omega_a$$

Por otra parte, a partir de la figura 10.3 se tiene:

$$\frac{d}{dt} = I_a(t) = \frac{\frac{V_s(t)}{L_a - R_a I_a(t)}}{\frac{L_a - E_a(t)}{L_a}}$$

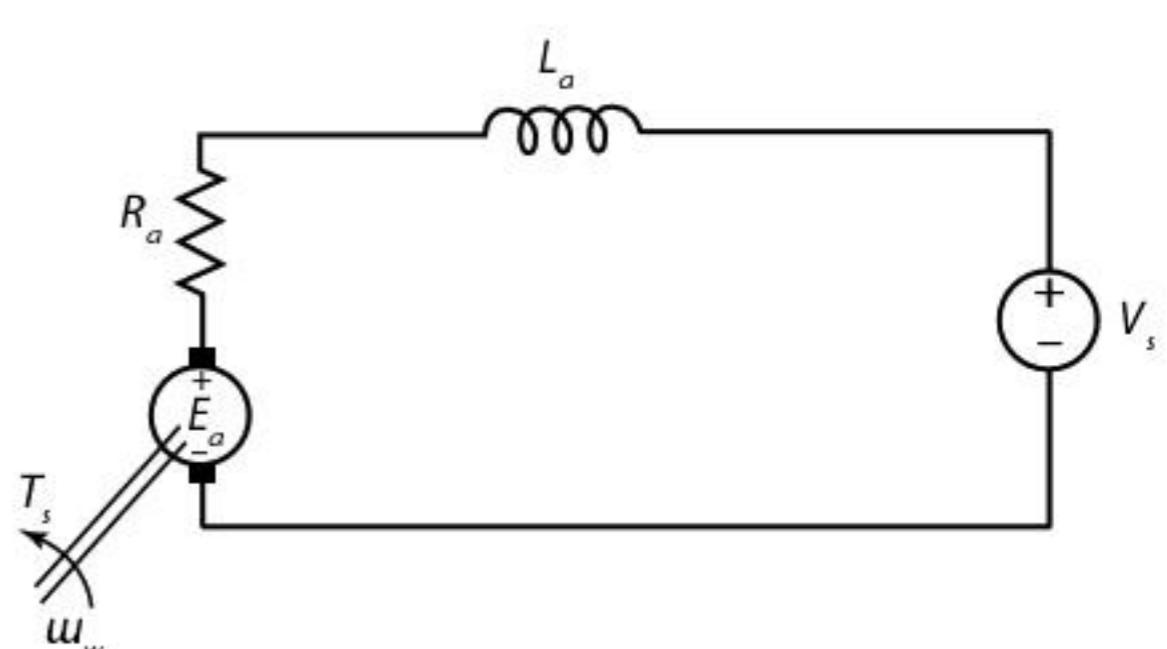


Figura 10.3 Diagrama eléctrico-mecánico del motor de CD  
df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

De la segunda ley de Newton para el movimiento rotacional se sabe que el momento de torsión resultante ( $T_d - T_s$ ) es equivalente al momento polar de inercia ( $J_m$ ) multiplicado por la razón de cambio en el tiempo de la velocidad angular de la armadura del motor,  $\frac{d^2}{dt^2}\theta_m(t)$ . De este modo, la aceleración angular puede representarse por:

$$\frac{d^2}{dt^2}\theta_m(t) = T_d(t) / J_m - \frac{\xi}{L_a} \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

donde:

$\theta_m$ : desplazamiento de la armadura del motor

$\xi$ : coeficiente de fricción viscosa

$J_m$ : momento polar de inercia del motor

Si se define la corriente de armadura, la velocidad angular y el desplazamiento angular del motor como las variables de estado, entonces las ecuaciones anteriores se pueden reescribir en la forma matricial siguiente:

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt}\theta_m(t) \\ \frac{d}{dt}\omega_m(t) \\ \frac{d}{dt}I_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\xi}{J_m} & \frac{K_i}{J_m} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & \frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ I_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_s(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_s(t)$$

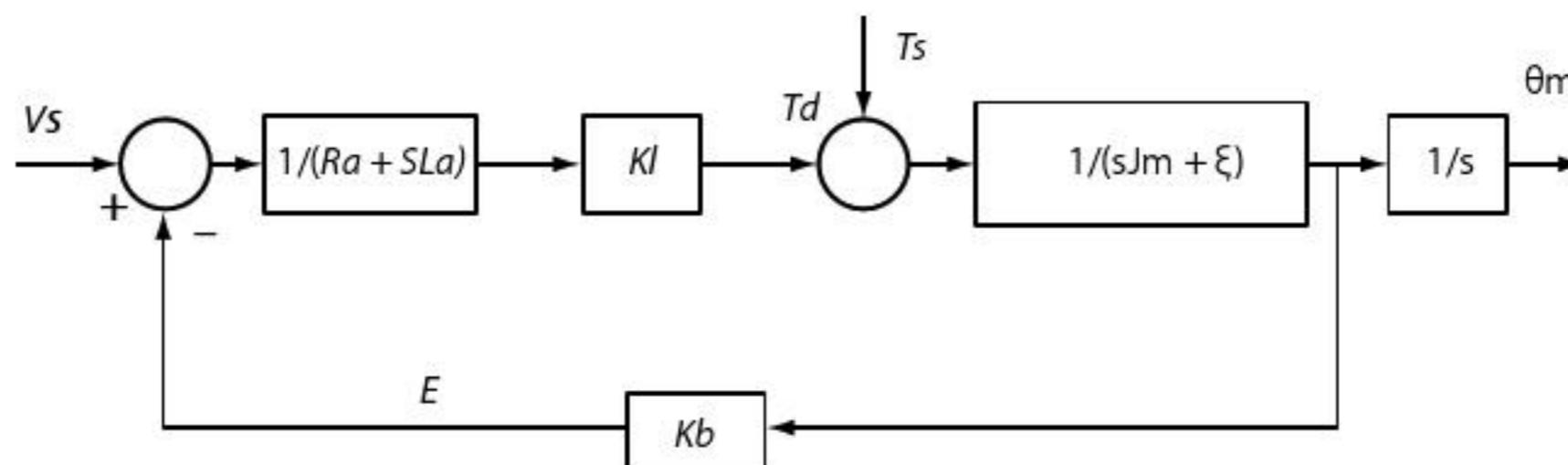
Como se puede ver, las ecuaciones matriciales cumplen la forma de las ecuaciones de estado:

$$\begin{aligned} x &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

donde la entrada del sistema ( $u$ ) es el voltaje aplicado al motor y la variable de salida ( $y$ ) se encuentra definida en términos del desplazamiento angular del motor, a saber:

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ I_a \end{bmatrix}$$

Todo sistema cuyas ecuaciones de estado cumplan la forma anterior puede representarse en términos de Laplace, a través de la función de transferencia  $G(s) = Q(sI - A)^{-1}B + D$ , donde  $I$  es la matriz identidad. Una ventaja de tener el modelo del motor como una función de transferencia  $G(s)$  es la reducción en la complejidad del modelo matemático, ya que los operadores diferenciales en función del tiempo son transformados en operadores de productos en términos de Laplace. Además, a partir de alguna señal de prueba, ya sea escalón, impulso o rampa, en la entrada del sistema es fácil determinar el comportamiento de la variable de salida en estado estacionario o incluso transitorio; a esto súmese que para conocer la estabilidad del sistema solo basta determinar los polos y los ceros de la función de transferencia del motor. En la figura 10.4 se muestra el diagrama de bloques de la función de transferencia del motor de CD. De la figura se observa que debido a las pérdidas, el voltaje de entrada se resta con el voltaje de armadura. De igual manera, la fricción y el contacto físico causan pérdidas mecánicas en el motor, así que el par de carga y del motor también se ven afectados por la operación de sustracción.



**Figura 10.4** Diagrama de bloques del motor de CD.

Como se dijo antes, en un motor de corriente continua de imanes permanentes, el flujo producido por los polos es fijo; por tanto, las características del comportamiento entre velocidad y el par del motor pueden ser expresados de acuerdo con la siguiente relación matemática:

$$\omega_m = \frac{V_s}{K_a \Phi_p} - \frac{R_a}{(K_a \Phi_p)} T_d$$

En las mismas condiciones, la relación corriente-par se expresa con la ecuación siguiente:

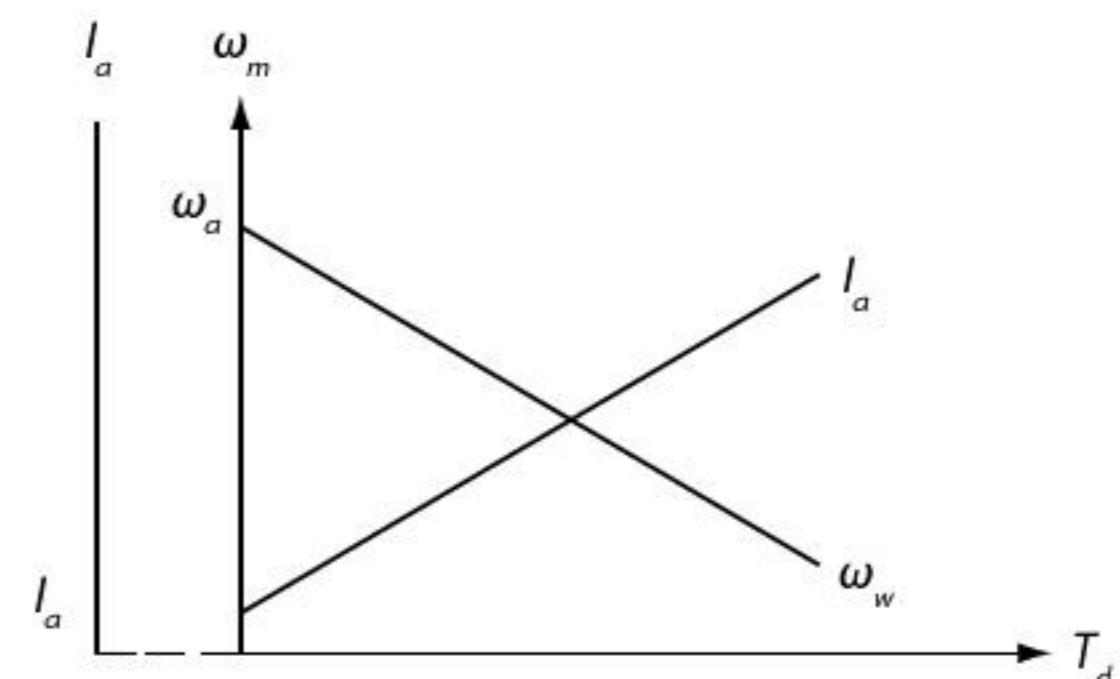
$$I_a = \frac{1}{K_a \Phi_p} T_d$$

En la figura 10.5 se representan de manera gráfica estas características: velocidad-par y corriente-par. En la figura obsérvese el aumento del par en el motor cuando la corriente incrementa su valor, al contrario de lo que sucede con el incremento de la velocidad.

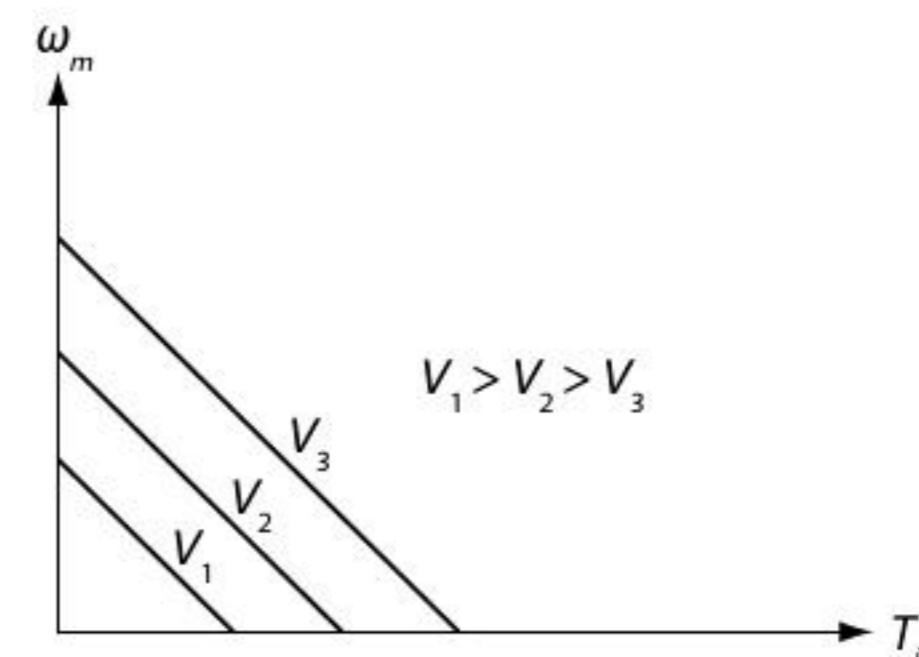
No obstante, estas propiedades pueden verse afectadas al modificar la resistencia de armadura  $R_a$  o el voltaje de alimentación del motor  $V_s$ , ya que dichas modificaciones alteran la velocidad de carga del motor, aunque no afectan la pendiente entre la relación par-velocidad. Por ejemplo, si se suministran diferentes voltajes de alimentación, entonces para todos los niveles de voltaje existe una relación con un comportamiento paralelo entre estos; es decir, las líneas características tienen la misma pendiente (véase figura 10.6).

### Motor paso a paso

Como se trata en el capítulo 1 (Introducción), los motores de imanes permanentes, de reluctancia variable e híbridos son los tres tipos principales de motores paso a paso. En lo que se refiere a la conversión de la energía eléctrica a movimiento angular, estos trabajan con el mismo principio físico que los motores eléctricos rotatorios de corriente continua y alterna. Sin embargo, para el caso particular del motor paso a paso, la conmutación se logra a través de algún sistema electrónico o tarjeta microcontroladora, como la tarjeta Arduino®, la cual genera una secuencia de pulsos de corriente modulados que alimentan los devanados internos del motor; por tanto, no son necesarias las escobillas o algún conmutador mecánico, ya que la serie de impulsos eléctricos son transformados en desplazamientos angulares discretos en forma directa por los polos del motor. Por tanto, depende de las entradas de control, el eje motriz es capaz de avanzar un determinado valor en grados, que puede ir desde  $1.8^\circ$  hasta  $90^\circ$ , según sea la secuencia que se indique.



**Figura 10.5** Relación par-velocidad y par-corriente.

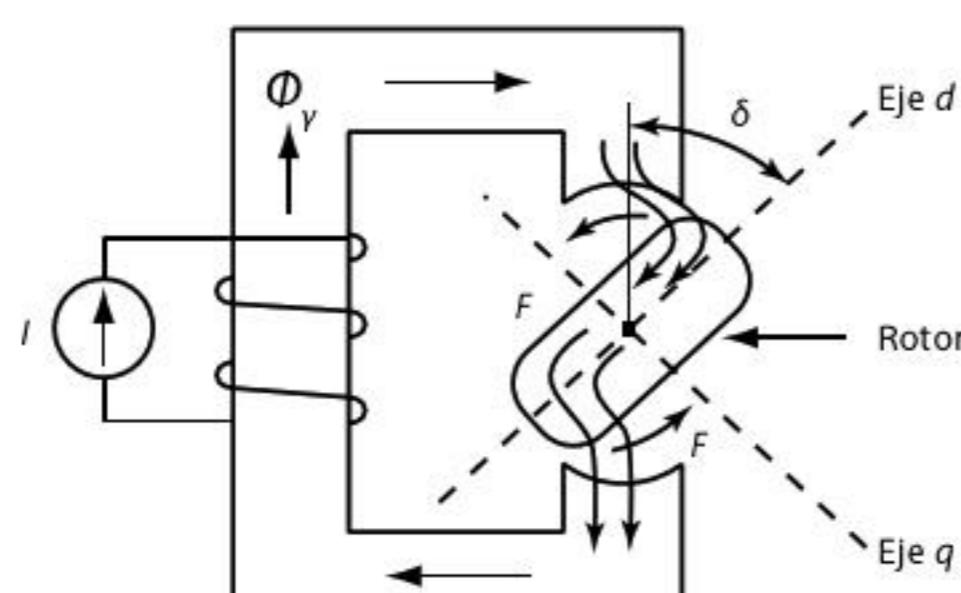


**Figura 10.6** Relación par-velocidad para diferentes voltajes.

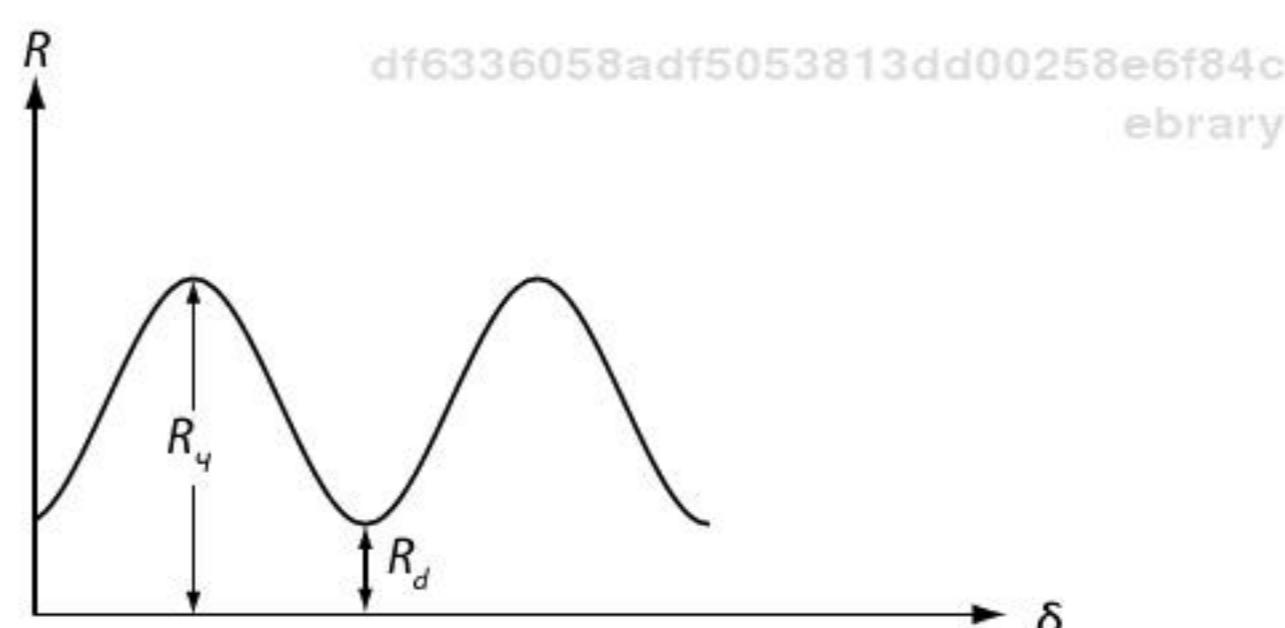
### Motor paso a paso de reluctancia variable

La característica principal de este motor es la reducción y el aumento de la resistencia a la circulación del flujo magnético que se genera a lo largo del recorrido del campo magnético aplicado (véase figura 10.7).

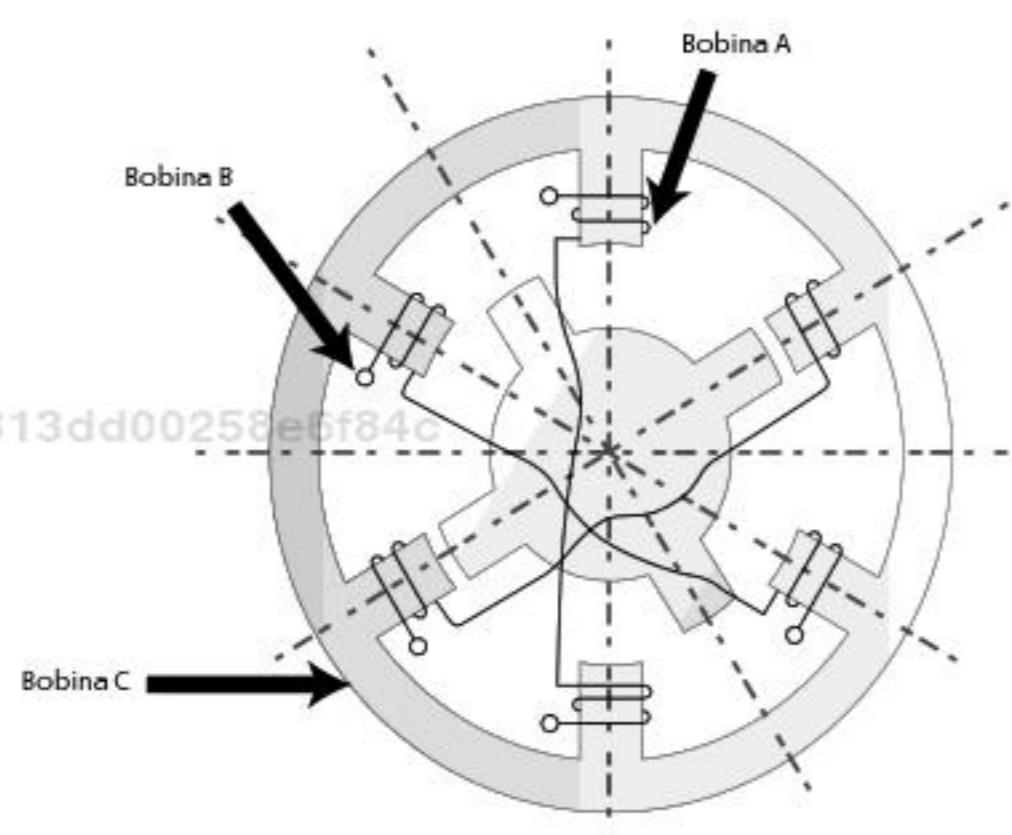
La trayectoria del flujo magnético, que es generado por la corriente que circula en el inductor, cruza el entrehierro y sufre una resistencia por el efecto del cambio del permeabilidad, ya que el aire tiene una permeabilidad mucho menor que la del hierro, además de que también es importante considerar la posición del rotor; así, cuando el eje  $d$  del rotor se encuentra en una posición vertical, es decir el valor del ángulo  $\theta_p$  es  $0^\circ$  o  $180^\circ$ , la resistencia al flujo magnético (reluctancia) es mínima. Es importante hacer notar que la variación es periódica y depende del ángulo  $\delta$  (véase figura 10.8). Por su parte, la frecuencia está en función de la velocidad angular del estator.



**Figura 10.7** Variación de la reluctancia.



**Figura 10.8** Gráfica de comportamiento de reluctancia variable.



**Figura 10.9** Motor de reluctancia variable.

En los motores de reluctancia variable, el estator y el rotor están construidos con un conjunto de láminas de acero, esto con la finalidad de evitar las corrientes parásitas. En general, el estotor está conformado por seis polos, mientras que el rotor se conforma de cuatro. La estructura del estotor tiene seis dientes, donde yacen las bobinas que forman los polos [véase figura 10.9], las cuales se excitan en tiempos diferentes, con lo que se crea una bobina de varias fases del estotor; por ejemplo, para el caso de la figura 10.8, el estotor tiene tres fases. Obsérvese que cada una de las bobinas inician en un diente del estotor y terminan en el diente opuesto ( $90^\circ$ ); en el caso particular de esta figura, la fase C se encuentra activa. Por su parte, la

estructura del rotor solo tiene cuatro dientes, pero no tiene ningún devanado.

Si se requiere hacer girar el motor de forma continua, en el sentido de las manecillas del reloj, es necesario aplicar los voltajes de fase como se indica en la tabla 10.1. Así, para generar una vuelta completa es necesario aplicar cinco ciclos.

El ángulo de paso,  $\theta_p$ , para un motor de pasos de reluctancia variable está determinado por la siguiente ecuación:

$$\theta_p = \frac{2\pi}{n_F p}$$

donde:

$n_F$ : número de fases

$p$ : número de dientes del rotor

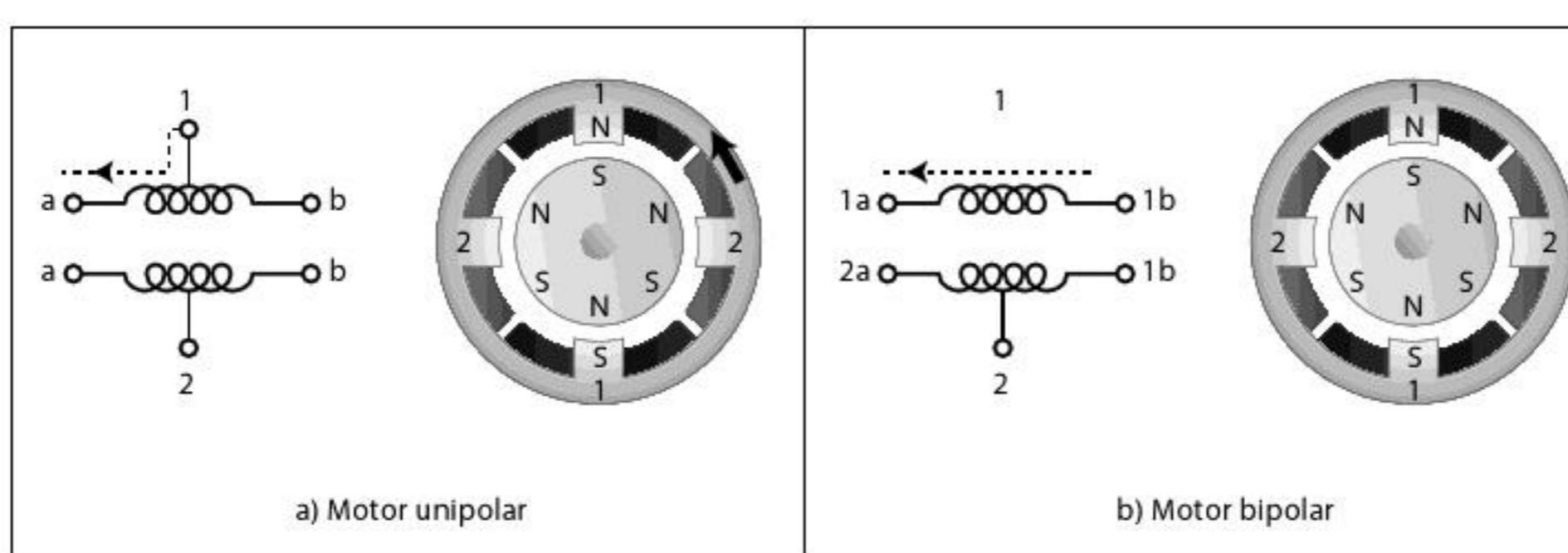
Ciclo	Fase A	Fase B	Fase C	Posición del rotor
1	Activa	No activa	No activa	0
	No activa	Activa	No activa	30
	No activa	No activa	Activa	60
2	Activa	No activa	No activa	90
	No activa	Activa	No activa	120
	No activa	No activa	Activada	150
3	Activa	No activa	No activa	180
	No activa	Activa	No activa	210
	No activa	No activa	Activa	240
4	Activa	No activa	No activa	270
	No activa	Activa	No activa	300
	No activa	No activa	Activa	330
5	Activa	No activa	No activa	360

**Tabla 10.1** Secuencia de fases de un motor de reluctancia variable

### Motor a pasos de imán permanente

Este motor, al igual que el de reluctancia variable, no posee devanados en el rotor; sin embargo, a diferencia de este, tiene imanes permanentes. En general, este tipo de motores se fabrica con una disposición de seis y cuatro polos para el estator, y de seis, cuatro y dos polos para el rotor. En el caso de seis polos en el rotor, el ángulo de paso natural es de  $30^\circ$ ; se dice que la posición de  $0^\circ$  es la posición imaginaria de una manecilla de reloj que apunta hacia las 12 horas (véase figura 10.10).

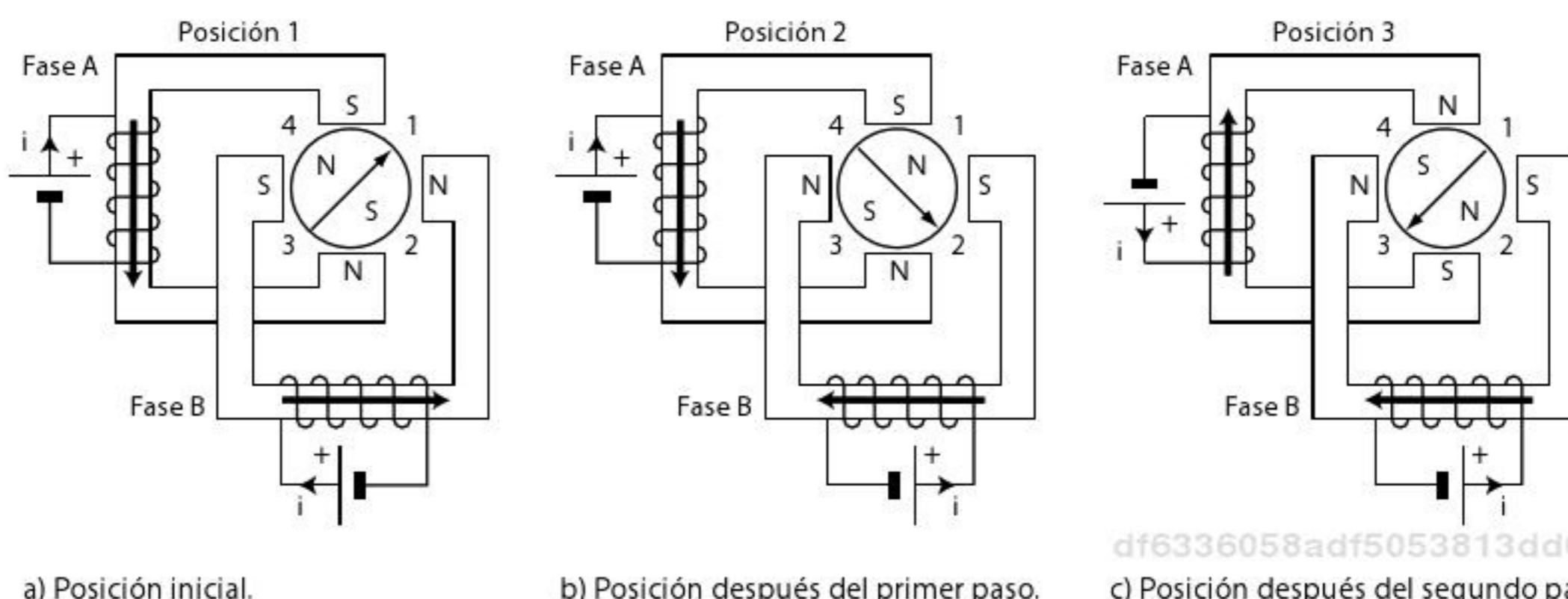
Para una mayor comprensión acerca de cómo opera del motor a pasos de imanes permanentes, considérese un motor de dos fases con dos polos en el rotor (véase figura 10.11).

**Figura 10.10** Motores a pasos unipolar y bipolar de imanes permanentes.

En el estado inicial, sin corriente en las bobinas, los polos se encuentran alineados con los dientes del estator, esto gracias a que el rotor está magnetizado de forma radial. En el caso del motor que se observa en la figura 10.11a), las dos fases se encuentran excitadas, lo que forma un campo magnético que orienta el rotor a la posición uno de equilibrio. Por otra parte, en la figura 10.11b) se observa cómo se realiza la inversión de la corriente en la fase B, lo que produce una variación del campo magnético en sentido horario; a su vez, el rotor se desplaza en el mismo sentido, buscando siempre la

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

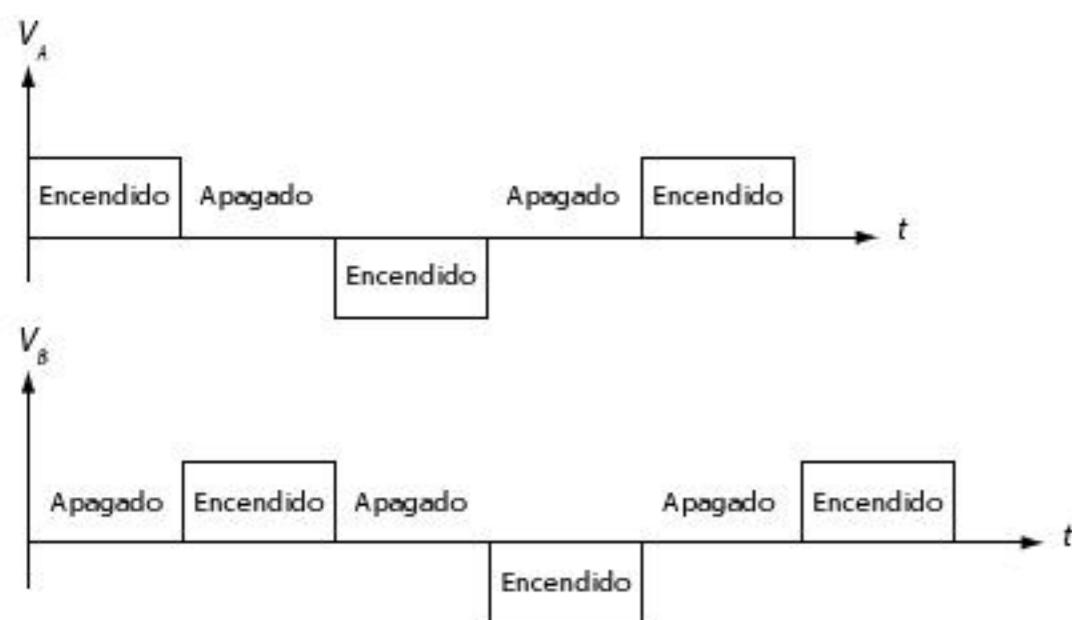
posición de equilibrio. Por último, en la figura 10.11c) se muestra una nueva inversión de la corriente en la fase A, lo que produce un nuevo paso de  $90^\circ$  en sentido horario.



**Figura 10.11** Motor a pasos de dos fases con dos polos.

Ahora bien, cuando por el devanado de la fase A circula una corriente constante, el diente marcado con el número 1 actúa como un polo sur. Esto hace que el polo norte del rotor del imán permanente se alinee con el polo sur del estator. Enseguida, se desactiva la fase A mientras se activa la bobina de la fase B; esto ocasiona un desplazamiento de  $90^\circ$  en sentido contrario al de las manecillas del reloj, para alinear el polo norte del rotor con el diente número 2 del estator. Si se invierte la polaridad de la corriente aplicada y se inicia de nuevo una excitación de la fase A, el rotor gira de nuevo  $90^\circ$  en sentido opuesto al de las manecillas del reloj. Hasta aquí, el motor ha completado media revolución; luego, con la continuación de las activaciones apropiadas, continuará su giro y completará una revolución. En la figura 10.12 se describen las formas de onda de entrada a las fases A y B de un motor a pasos bifásico.

**Figura 10.12** Formas de onda de voltaje.



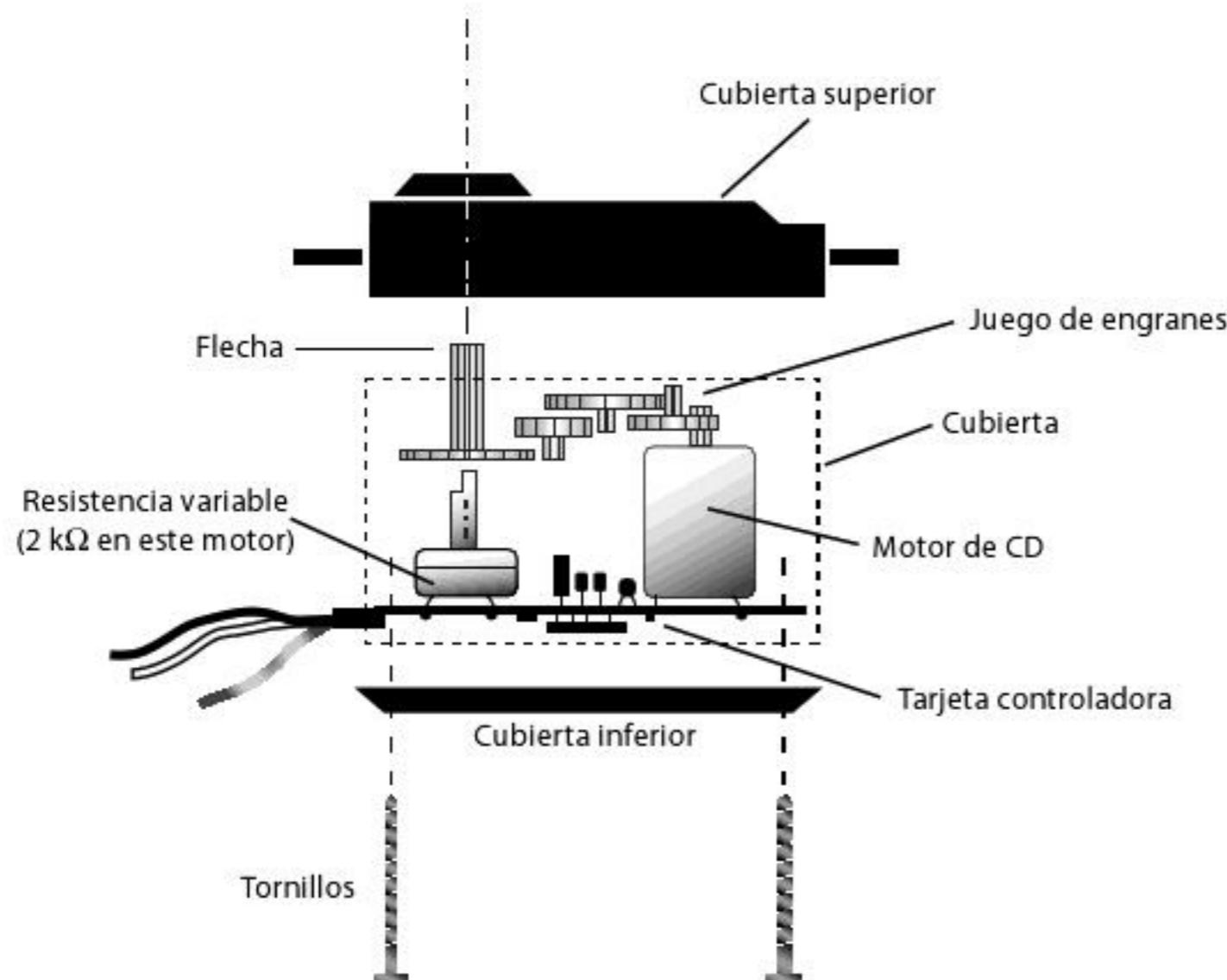
En la tabla 10.2 se indica la secuencia de activación para una revolución completa del motor.

Ciclo	Fase A	Fase B	Posición
+	Activa	No activa	0
	No activa	Activa	90
-	Activa (negativa)	No activa	180
	No activa	Activa (negativa)	270
+	Activa	No activa	360

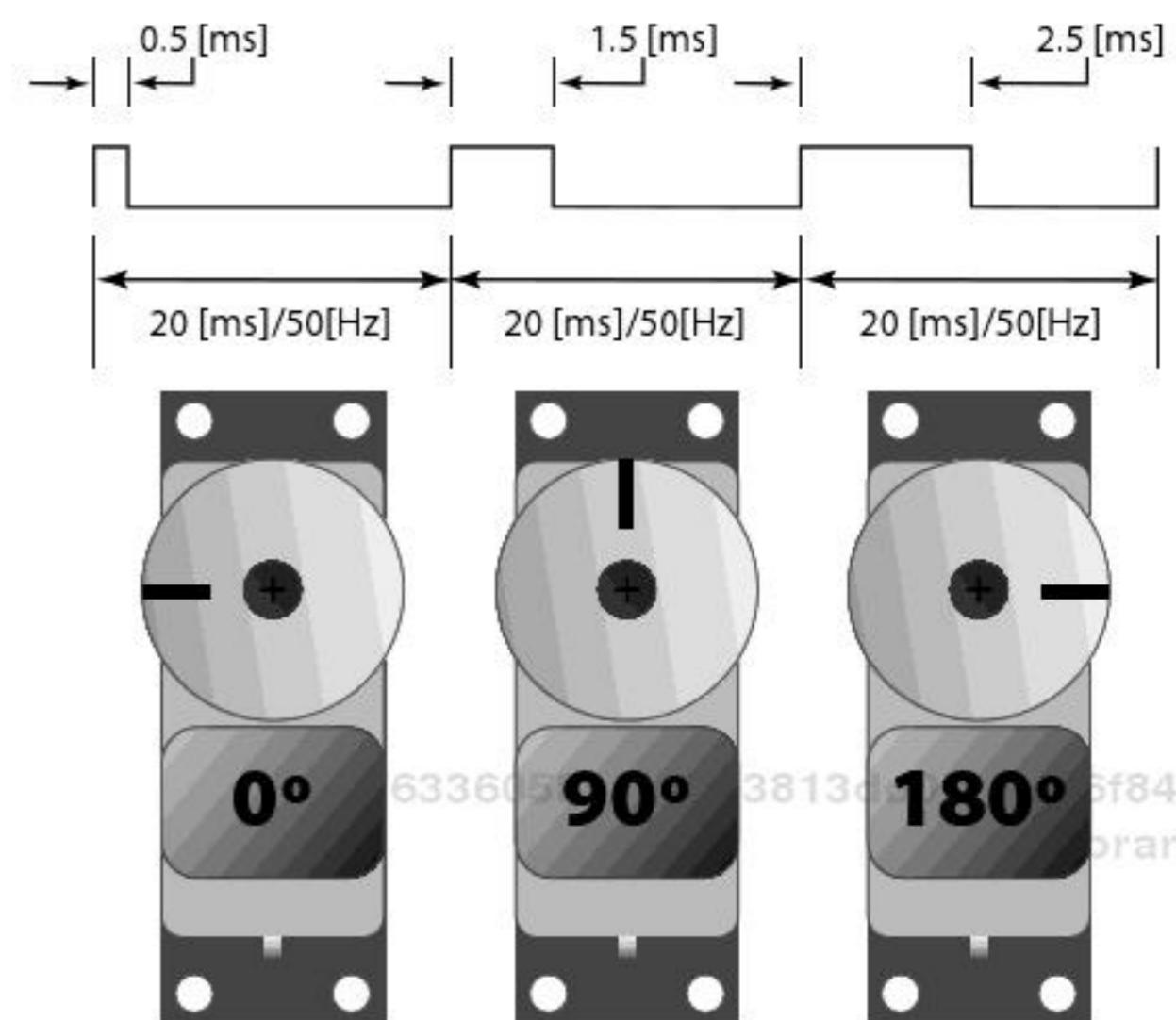
**Tabla 10.2** Secuencia de activación de motor de imanes permanentes

## 10.2 Servomotores

El servomotor es uno de los actuadores más usados en la integración de sistemas. En su interior dispone de un motor con un reductor de velocidad y multiplicador de fuerza, y además cuenta con un circuito de control. En la mayoría de estos actuadores, el ángulo de giro del eje es de  $180^\circ$ , pero puede ser modificado con facilidad para tener un giro libre de  $360^\circ$ , como en el motor de corriente directa. Los componentes del servomotor se aprecian de forma gráfica en la figura 10.13.



**Figura 10.13** Componentes de un servomotor.



**Figura 10.14** Posicionamiento del eje del servomotor.

Es importante destacar que para controlar un servomotor debe aplicarse un pulso de duración y frecuencia específico. Por lo general, los servomotores disponen de tres cables, dos para alimentación  $V_{cc}$  y GND (4.8 a 6 V), y un tercero para aplicar una secuencia de pulsos de control. Depende del ancho del pulso, el circuito interno de control diferencial lleva al servomotor a la posición indicada. En la figura 10.14 se aprecian algunos ejemplos del posicionamiento del eje del servomotor dependiendo del ancho del pulso, donde se logran 0°, 90° y 180° con anchos de pulso de 0.5, 1.5 y 2.5 ms, respectivamente.

En la tabla 10.3 se muestran las características principales de algunas marcas de servomotores.

Fabricante	Duración del pulso (ms)			Frecuencia Hz	Color de los cables		
	Mínima (0°)	Neutral (90°)	Máxima (180°)		Positivo	Negativo	Control
Futaba	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Blanco
Hitech	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Amarillo
Graupner/Jr	0.8	1.5	2.2	50	Rojo	Marrón	Naranja
Multiplex	1.05	1.6	2.15	40	Rojo	Negro	Amarillo
Robbe	0.65	1.3	1.95	50	Rojo	Negro	Blanco
Simprop	1.2	1.7	2.2	50	Rojo	Azul	Negro

**Tabla 10.3** Características de servomotores

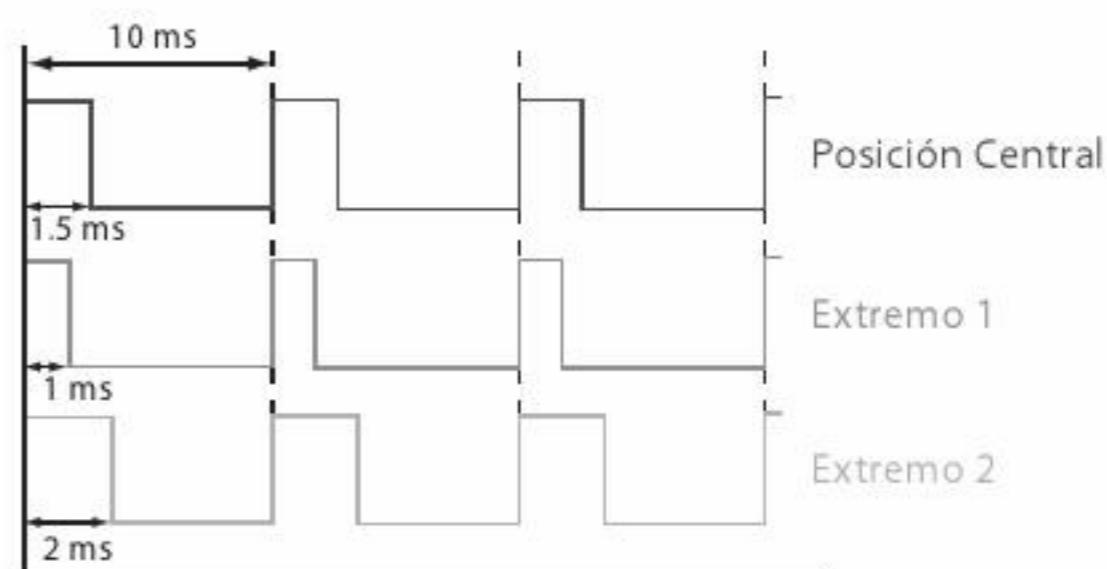
### Funcionamiento del servomotor. Control PWM

La modulación por ancho de pulso, PWM (*Pulse Width Modulation*), es una de las técnicas más empleadas para el control de servomotores. Consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está a nivel alto, manteniendo el mismo periodo, con el objetivo de modificar la posición del eje según se desee.

Para la generación de una onda PWM en una tarjeta Arduino® se dispone de hardware específico. En la figura 10.15 se observa la modulación para diferentes anchos de pulso que utiliza el servomotor.



**Figura 10.15** PWM para recorrer todo el rango de operación del servomotor.



**Figura 10.16** Tren de pulsos para control de servomotor.

El servomotor tiene márgenes de operación que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo. Los valores más generales se corresponden con pulsos de entre 1 ms y 2 ms de anchura, que sitúan al motor en ambos extremos ( $0^\circ$  y  $180^\circ$ ). Es importante hacer notar que valor de 1.5 ms indica la posición central o neutra ( $90^\circ$ ), mientras que otros valores del pulso lo sitúan en posiciones intermedias (véase figura 10.16).

Estos valores suelen ser los recomendados; sin embargo, es posible emplear pulsos menores de 1 ms o mayores de 2 ms, con lo que es posible conseguir ángulos mayores de 180 grados. El factor limitante es el tope mecánico del potenciómetro y los límites mecánicos constructivos.

El periodo entre pulso y pulso (tiempo apagado) no es crítico, e incluso puede ser distinto entre uno y otro pulso; se suelen emplear valores  $\sim 20$  ms (entre 10 ms y 30 ms).

Es importante destacar que para que un servomotor se mantenga en la misma posición es necesario suministrar en forma continua el pulso correspondiente. De este modo, si existe alguna fuerza externa que lo obligue a abandonar esta posición, el esquema de control corregirá el error.

## Ejercicio de aplicación

### Motor de CD

#### Objetivo

Controlar la velocidad de un motor de CD con el uso del Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Motor CD
- 1 potenciómetro de  $10\text{ k}\Omega$
- 1 resistencia de  $330\ \Omega$  y  $1\text{ k}\Omega$
- Optoacoplador 4N27
- Transistor 2N2222
- Fuente de alimentación de 5 V
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

### Desarrollo

#### Descripción del motor de CD

Un motor de CD es un dispositivo que transforma la energía eléctrica de corriente directa (CD) en mecánica; su principio de funcionamiento se basa en la ley de Lorentz.

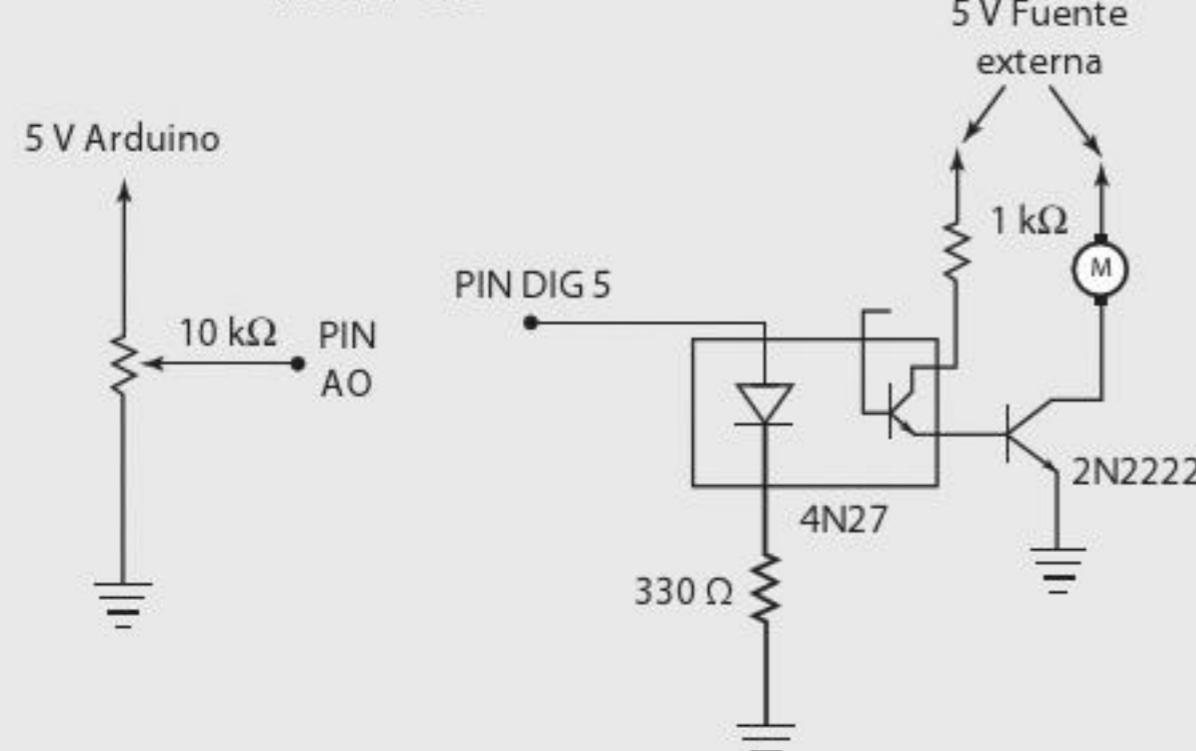
Para controlar la velocidad de un motor de CD se utilizan PWM.



**Figura 10.17** Motor de corriente directa.

### 1. Construcción del circuito

**Motor CD**



**Figura 10.18** Circuito de control de velocidad de un motor de CD.

El control de la velocidad del motor se logra mediante un pulso PWM del pin digital 5 del Arduino®. Para reducir el ruido y evitar dañar al resto del circuito es necesario separar el sistema de control digital del motor, para lo que se emplea un optoacoplador 4N27. A través del LED interno se transmite la señal al transistor, que ya forma parte del otro circuito con su propia fuente. La señal de salida del optoacoplador se amplifica con un segundo transistor 2N2222, esta vez externo, que alimenta al motor.

### 2. Analizar e implementar el código en Arduino Uno®.

Se realiza la lectura y conversión analógica-digital ADC del divisor de voltaje y su escala de 10 bits, que es la resolución del ADC del Arduino®, a 8 bits, para el control del PWM; esta función en Arduino® solo admite un parámetro de entre 0 y 255 (8 bits).

Se imprime el valor de la lectura del divisor en 8 bits.

```
*****Control Motor CD*****
/*
**Puede manipularse la velocidad de un motor
de corriente directa a
**traves de un PWM, variando su frecuencia y
los tiempos alto y bajo
**del mismo.
*/
/**El Arduino generara un pulso PWM, cuyos
parametros seran controlados
**por un potenciómetro lineal. A la salida del
PWM se colocara una
**etapa de potencia
para aislar el sistema digital del analogico
/**(motor) y asi evitar ruido en la linea que
afecte el funcionamiento
**del circuito.
*****
```

```
//Definimos el PIN 5 como la salida del PWM. No
cualquier PIN puede
//funcionar como PWM. En el Arduino UNO solo
los pines 3, 5, 6, 9, 10 y
//11 pueden ser utilizados como PWM
```

```
#define controlMotor 5

void setup()
{
    pinMode(controlMotor, OUTPUT); //Definimos el
PIN 5 como salida
    Serial.begin(9600); //Iniciamos la
comunicacion serie a 9600 baudios
}
```

```
df6336058adf5053813dd00258e6f84c
ebrary
```

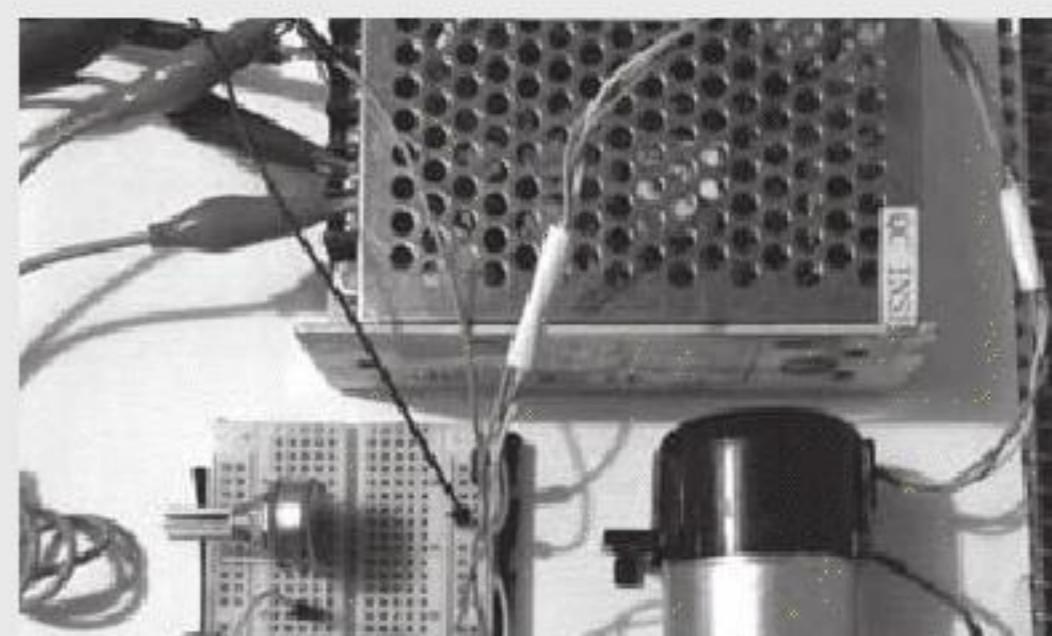
```
voidloop()
{
    intreadMotor = analogRead(A0) / 4; //Hacemos
la lectura analogica
    //del potenciómetro. Dividimos entre 4 para
escalar la variable
    //readMotor de 10 a 8 bits.
```

```
Serial.println(readMotor); //Imprimimos el
valor de readMotor
    analogWrite(controlMotor, readMotor); //Esta
funcion envia un pulso
    //cuadrado de una frecuencia de 490 Hz
aproximadamente (esta frecuencia
    //puede modificarse alterando los registros
TCCR1B y TCCR2B), enviamos
    //el PIN de salida y el valor del ciclo de
trabajo, de 0-255, por
    //ello escalamos la variable readMotor en
dicho rango.
```

```
delay(10); //Un pequeño retardo por
estabilidad
}
```

### 3. Comprobar el funcionamiento

Para apreciar la forma de la señal y cómo varía esta con la posición del potenciómetro, el pulso PWM para el control de la velocidad también se conecta a un osciloscopio.



**Figura 10.19** Montaje físico del circuito para el control de velocidad de un motor de CD.

```
df6336058adf5053813dd00258e6f84c
```

ebrary



**Figura 10.20** El tamaño del PWM varía según la lectura del potenciómetro.

## Ejercicio de aplicación

### Control difuso de la velocidad de un motor de CD

#### Objetivo

Controlar la velocidad de un motor de CD con un potenciómetro con el uso de lógica difusa a través del Arduino Uno®.

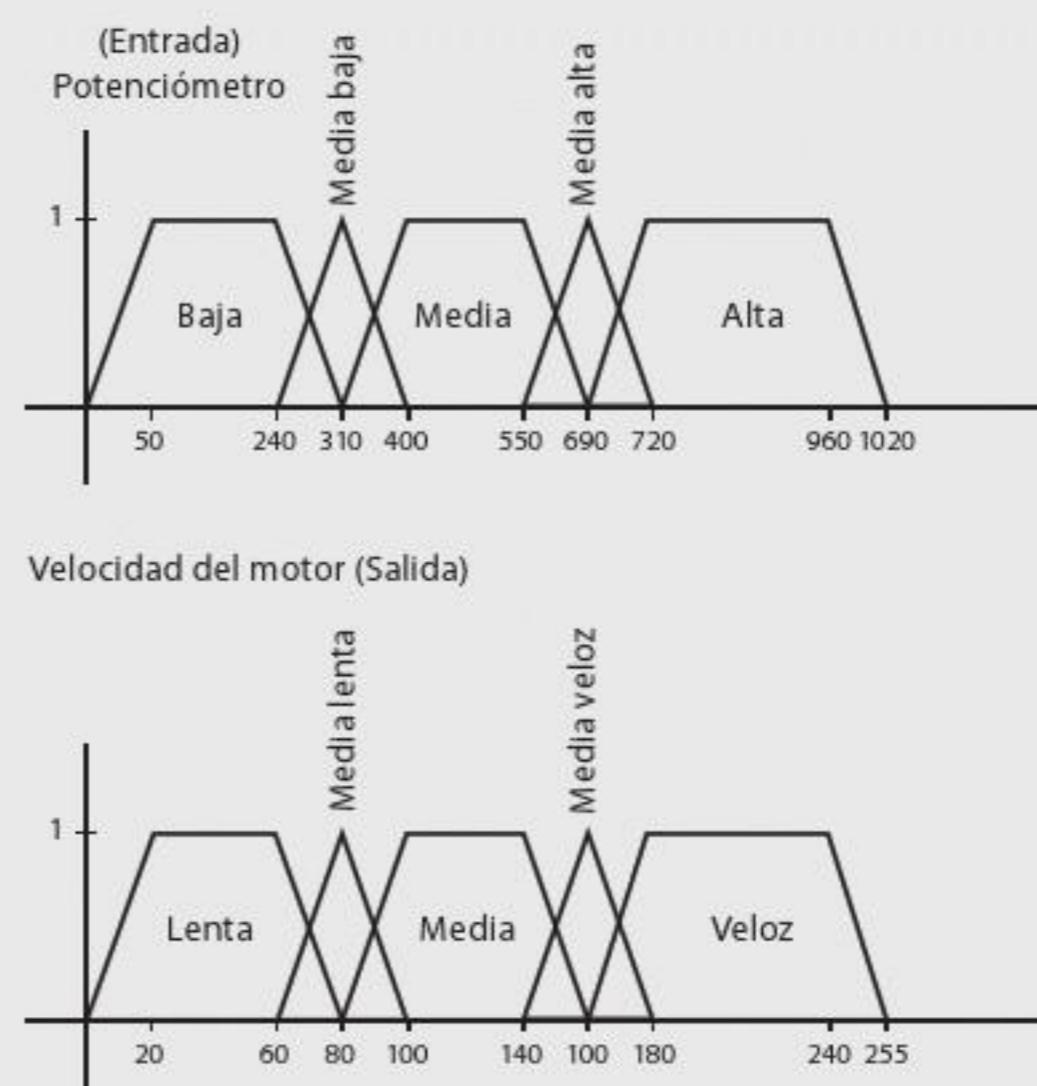
#### Material

- Arduino Uno®
- Motor CD de 18 V con encoder óptico
- 1 potenciómetro de 10 kΩ
- 1 resistencia de 47 kΩ
- Circuito integrado L293D
- Fuente de alimentación de 18.5 V a 3.5 A
- Caimanes
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

##### Control difuso

- Se definen las entradas y salidas del sistema. Para este sistema en particular, la lectura del potenciómetro es la entrada y la salida la velocidad del motor.
- Se definen las funciones de membresía que establecen los posibles valores de entrada y salida del sistema. Para esta práctica, estas funciones se han establecido tal como se aprecia en la figura 10.21. El rango de la lectura del potenciómetro es 0-1023, que corresponde a los 10 bits del ADC. Mientras tanto, el rango de la velocidad corresponde con los valores posibles del PWM del Arduino® de 0-255.



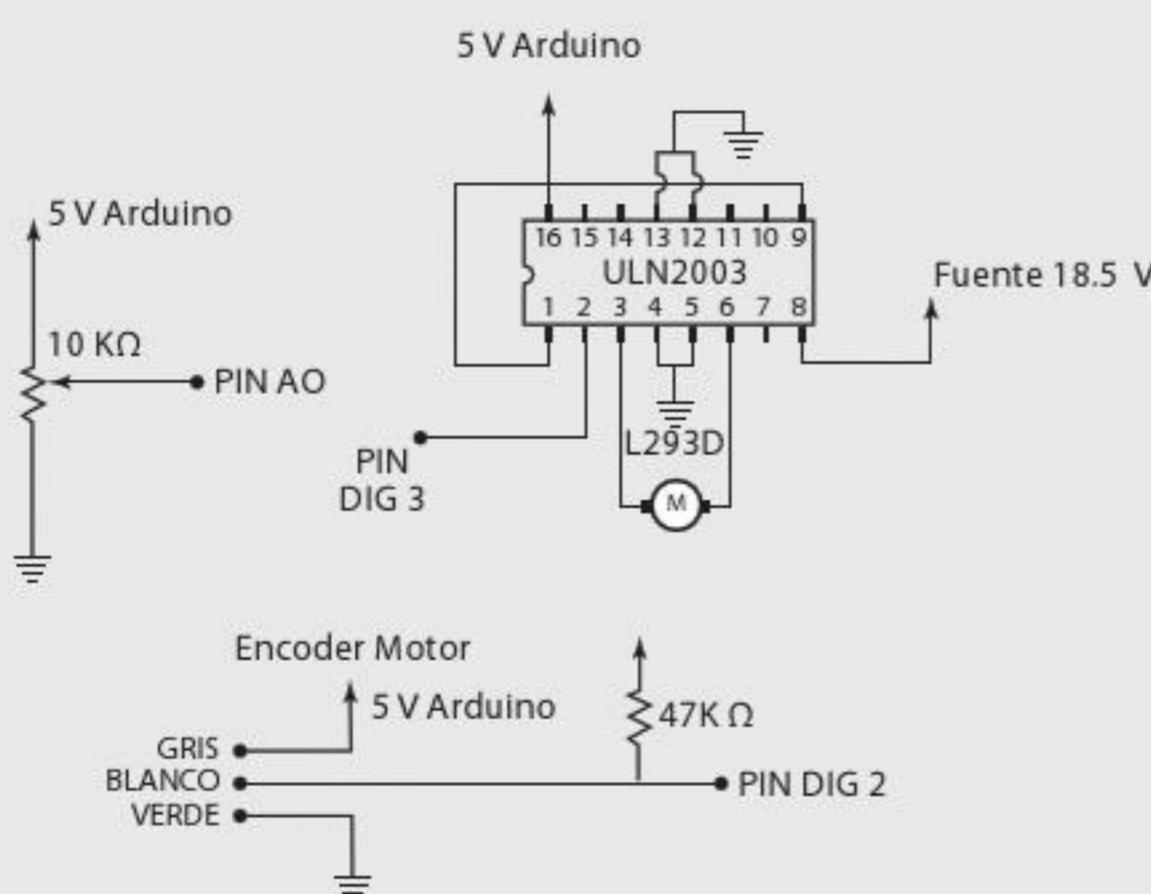
**Figura 10.21** Funciones de membresía del sistema de control.

Se establecen las reglas de inferencia que relacionan las entradas con las salidas del sistema. Para esta práctica, dicha relación es directa; por tanto, se tiene:

IF (entrada)	THEN (salida)
Baja	Lenta
Media baja	Medio lenta
Media	Media
Media alta	Media veloz
Alta	Veloz

- A continuación se realiza la fuzzificación y defuzzificación para obtener un valor a la salida de acuerdo con el valor de entrada.

### 1. Construcción del circuito



**Figura 10.22** Circuito para el control difuso de la velocidad del motor.

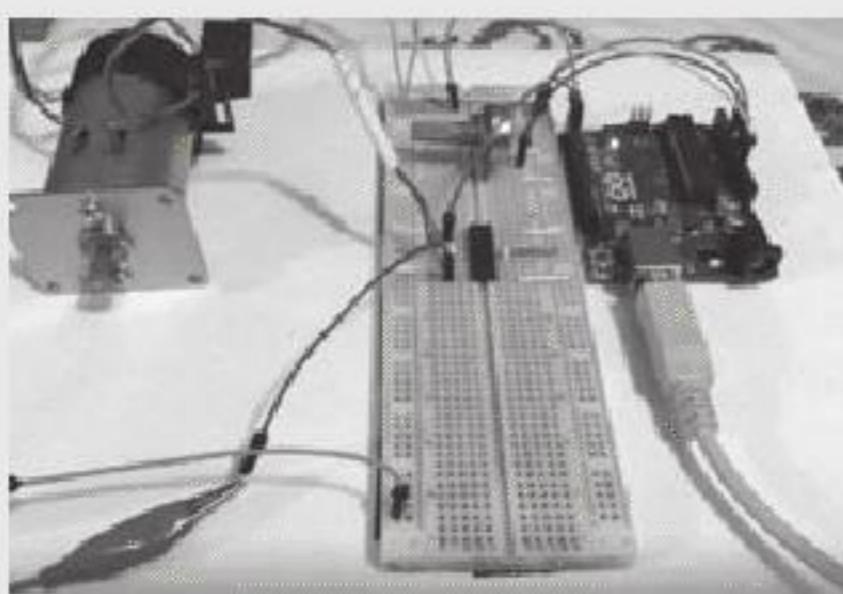
El potenciómetro provee la señal de control del sistema. Entre mayor sea el voltaje del divisor, mayor será la velocidad del motor, como se estableció en las reglas de inferencia.

En el caso del encoder de este motor, que permite registrar su velocidad, las terminales de los cables gris y verde se conectan a 5 V y GND del Arduino®, respectivamente, mientras que la señal del optoacoplador (cable blanco) se conecta al PIN 2 digital. Obsérvese que la señal va acompañada de una resistencia de PULL-UP de 47 kΩ, que define el estado lógico '0' o '1'.

La señal PWM del Arduino® hacia el motor requiere de una etapa de potencia para que aíslle el sistema de control digital del motor y se suministre la energía suficiente para su correcto funcionamiento.

Esta etapa de potencia se logra con el circuito integrado L293D, cuya conexión se aprecia en la figura 10.22.

El montaje físico del circuito de la figura 10.22 se aprecia en la figura 10.23.



**Figura 10.23** Montaje físico del circuito para el control difuso de la velocidad de un motor CD.

### 2. Analizar e implementar el código en Arduino Uno®.

```

//Control difuso de la velocidad de un motor CD

//Para la programacion del control difuso se empleara la libreria eFLL
//que puede descargarse desde el link:
//https://github.com/zerokol/eFLL

//Se incluyen todas las librerias para el control difuso
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzySet.h>

//Se crean instancias de una libreria de objetos
Fuzzy* fuzzy = newFuzzy();

//Se declaran las variables empleadas
int count = 0, readPot, output;
float RPM;

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Se inicia la comunicacion serie a 9600 baudios

    //Se crea la entrada pot del sistema de control. Representa la lectura
    //del potenciómetro configurado como divisor de voltaje. Tiene un rango
    //de 0-1023 (los 10 bits del ADC del Arduino).
    FuzzyInput* pot = newFuzzyInput(1);

    //Se crean las funciones de membresia para la lectura del potenciómetro

    //Funcion trapezoidal para <baja>
    FuzzySet* baja = newFuzzySet(0, 80, 240, 320);
    pot->addFuzzySet(baja); //Se agrega al conjunto difuso

    //Funcion triangular para <media baja>
    FuzzySet* mediabaja = newFuzzySet(240, 320, 320, 400);
    pot->addFuzzySet(mediabaja); //Se agrega al conjunto difuso

    //Funcion trapezoidal para <media>
    FuzzySet* media = newFuzzySet(320, 400, 560, 640);
    pot->addFuzzySet(media); //Se agrega al conjunto difuso

    //Funcion triangular para <media alta>

```

```

FuzzySet* mediaalta = newFuzzySet(560, 640,
640, 720);
pot->addFuzzySet(mediaalta); //Se agrega al
conjunto difuso

//Funcion trapezoidal para <alta>
FuzzySet* alta = newFuzzySet(640, 720, 960,
1023);
pot->addFuzzySet(alta); //Se agrega al
conjunto difuso

//Se agrega el conjunto de la lectura del
potenciómetro al objeto fuzzy
//como entrada al sistema
fuzzy->addFuzzyInput(pot);

//Se crea el conjunto velocidad como salida
del sistema. Esta velocidad
//se representa con el ancho de pulso de un
PWM con un rango de 0-255
FuzzyOutput* velocidad = newFuzzyOutput(1);

//Se crean las funciones de membresía para la
velocidad

//Funcion trapezoidal para <lento>
FuzzySet* lento = newFuzzySet(0, 20, 60, 80);
velocidad->addFuzzySet(lento); //Se agrega al
conjunto difuso

//Funcion triangular para <medio lento>
FuzzySet* mediolento = newFuzzySet(60, 80, 80,
100);
velocidad->addFuzzySet(mediolento); //Se agrega
al conjunto difuso

//Funcion trapezoidal para <medio>
FuzzySet* medio = newFuzzySet(80, 100, 140,
160);
velocidad->addFuzzySet(medio); //Se agrega al
conjunto difuso

//Funcion triangular para <medio veloz>
FuzzySet* medioveloz = newFuzzySet(140, 160,
160, 180);
velocidad->addFuzzySet(medioveloz); //Se agrega
al conjunto difuso

//Funcion trapezoidal para <veloz>
FuzzySet* veloz = newFuzzySet(160, 180, 240,
255);
velocidad->addFuzzySet(veloz); //Se agrega al
conjunto difuso

//Se agrega el conjunto difuso de velocidad al
objeto fuzzy
//como salida del sistema
fuzzy->addFuzzyOutput(velocidad);

//Se construyen las reglas de inferencia que
definen al sistema

```

```

//IF pot = baja THEN velocidad = lento
FuzzyRuleAntecedent* ifPotBaja =
newFuzzyRuleAntecedent();
ifPotBaja->joinSingle(baja);
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadLento =
newFuzzyRuleConsequent();
thenVelocidadLento->addOutput(lento);
FuzzyRule* Regla01 = newFuzzyRule(1,
ifPotBaja, thenVelocidadLento);

fuzzy->addFuzzyRule(Regla01);

//IF pot = mediabaja THEN velocidad =
mediolento
FuzzyRuleAntecedent* ifPotMediaBaja =
newFuzzyRuleAntecedent();
ifPotMediaBaja->joinSingle(mediabaja);
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadMedioLento =
newFuzzyRuleConsequent();
thenVelocidadMedioLento->addOutput(mediolento);
FuzzyRule* Regla02 = newFuzzyRule(1,
ifPotMediaBaja, thenVelocidadMedioLento);

fuzzy->addFuzzyRule(Regla02);

//IF pot = media THEN velocidad = medio
FuzzyRuleAntecedent* ifPotMedia =
newFuzzyRuleAntecedent();
ifPotMedia->joinSingle(media);
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadMedio =
newFuzzyRuleConsequent();
thenVelocidadMedio->addOutput(medio);
FuzzyRule* Regla03 = newFuzzyRule(1,
ifPotMedia, thenVelocidadMedio);

fuzzy->addFuzzyRule(Regla03);

//IF pot = mediaalta THEN velocidad =
medioveloz
FuzzyRuleAntecedent* ifPotMediaAlta =
newFuzzyRuleAntecedent();
ifPotMediaAlta->joinSingle(mediaalta);
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadMedioVeloz =
newFuzzyRuleConsequent();
thenVelocidadMedioVeloz->addOutput(medioveloz);
FuzzyRule* Regla04 = newFuzzyRule(1,
ifPotMediaAlta, thenVelocidadMedioVeloz);

fuzzy->addFuzzyRule(Regla04);

//IF pot = alta THEN velocidad = veloz
FuzzyRuleAntecedent* ifPotAlta =
newFuzzyRuleAntecedent();
ifPotAlta->joinSingle(alta);
FuzzyRuleConsequent* thenVelocidadVeloz =
newFuzzyRuleConsequent();
thenVelocidadVeloz->addOutput(veloz);
FuzzyRule* Regla05 = newFuzzyRule(1,
ifPotAlta, thenVelocidadVeloz);

fuzzy->addFuzzyRule(Regla05);

```

```

//Se activan las interrupciones para medir la
velocidad angular del
//motor.
//Cada que un flanco de subida sea detectado
en el pin digital 2, se
//interrumpe toda actividad para atender a la
funcion conteo().
attachInterrupt(0, conteo, RISING);

}

voidloop()
{
    //Lectura del potenciómetro
    readPot = analogRead(A0);

    //Se indica que la variable readPot representa
    la señal de entrada
    fuzzy->setInput(1, readPot);

    //Se realiza la fuzzificación
    fuzzy->fuzzify();

    //Se realiza la defuzzificación asignando su
    valor final a la variable
    //output
    output = fuzzy->defuzzify(1);

    //Se envia la señal de salida al motor a
    través de un PWM
    analogWrite(3, output);

    //Retardo para el conteo de las RPM. Durante
    estos 100 ms se cuentan
    //todos los pulsos del encoder del motor y se
    calculan las RPM
    delay(100);
    RPM = 9.375*count; //Para la conversión de
    pulsos por cada 100 ms a RPM
    //RPM = 10(convirtiendo a Hz)*60(para
    convertir a minutos)/64(el número
    //de ranuras del encoder).

    Serial.print("Potenciometro: "); //Se imprime
    la lectura del POT, así
    Serial.print(readPot); //como la velocidad en
    RPM medida por el
    Serial.print(" "); //encoder.
    Serial.print("Velocidad: ");
    Serial.print(RPM);
    Serial.println(" RPM");

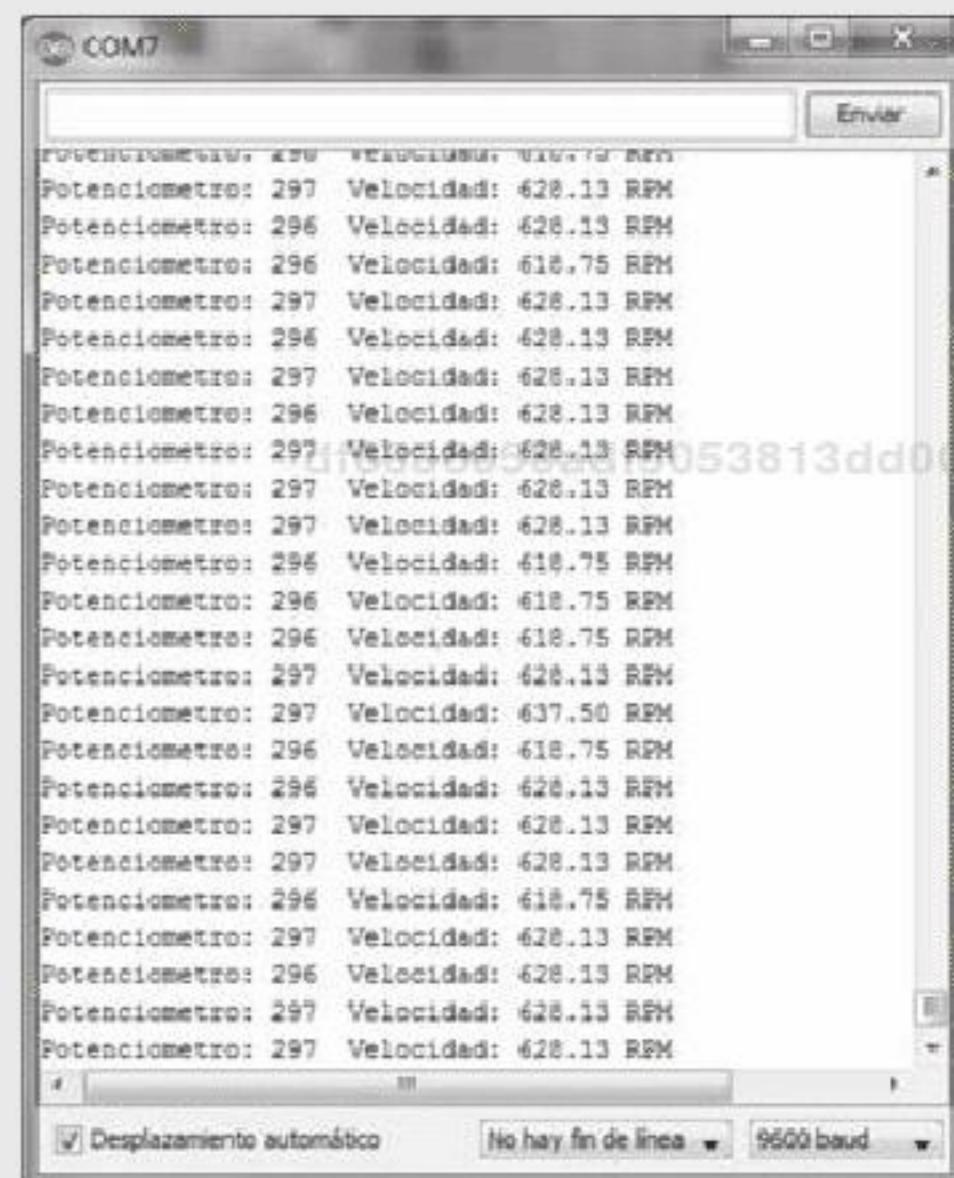
    count = 0; //Se reinicia el contador
}

void conteo()
{
    count++; //Contador para cada una de las
    ranuras del encoder
}

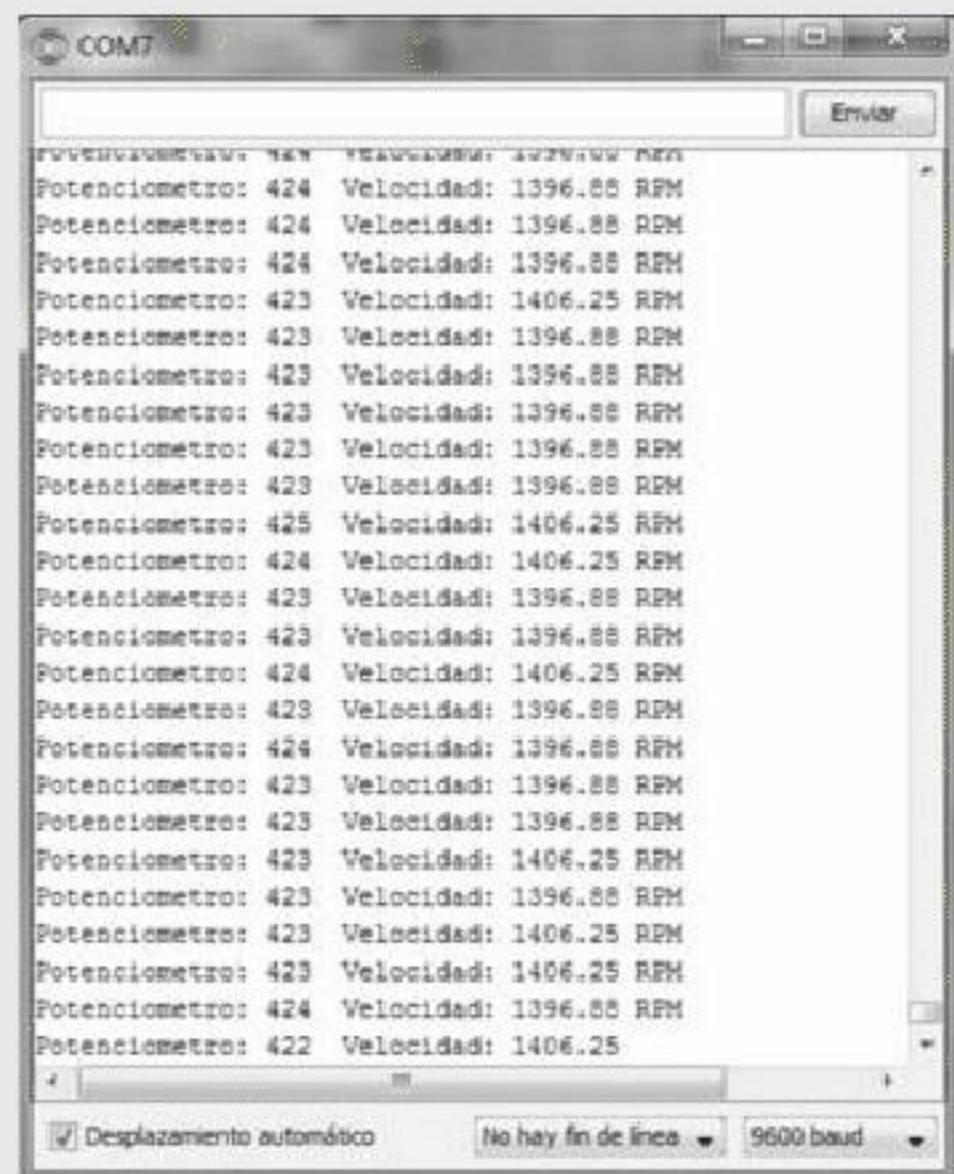
```

### 3. Comprobar el funcionamiento

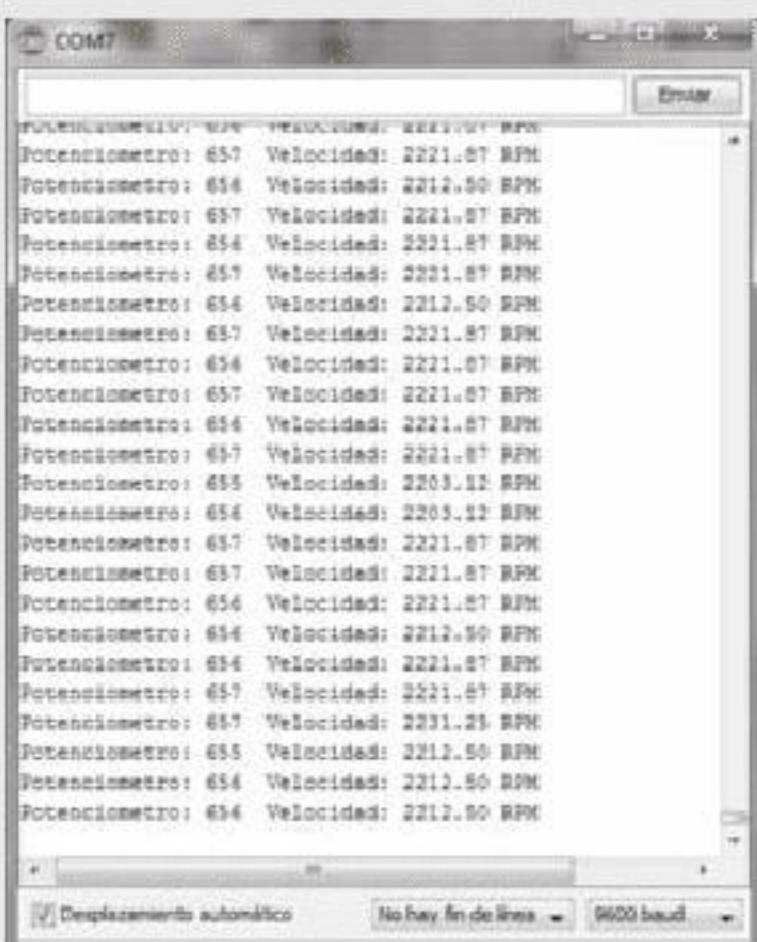
Al variar la posición del potenciómetro y cubrir todo su rango, se puede observar que el motor solo maneja cinco velocidades distintas, las cuales representan las cinco funciones de membresía que se definieron para la salida.



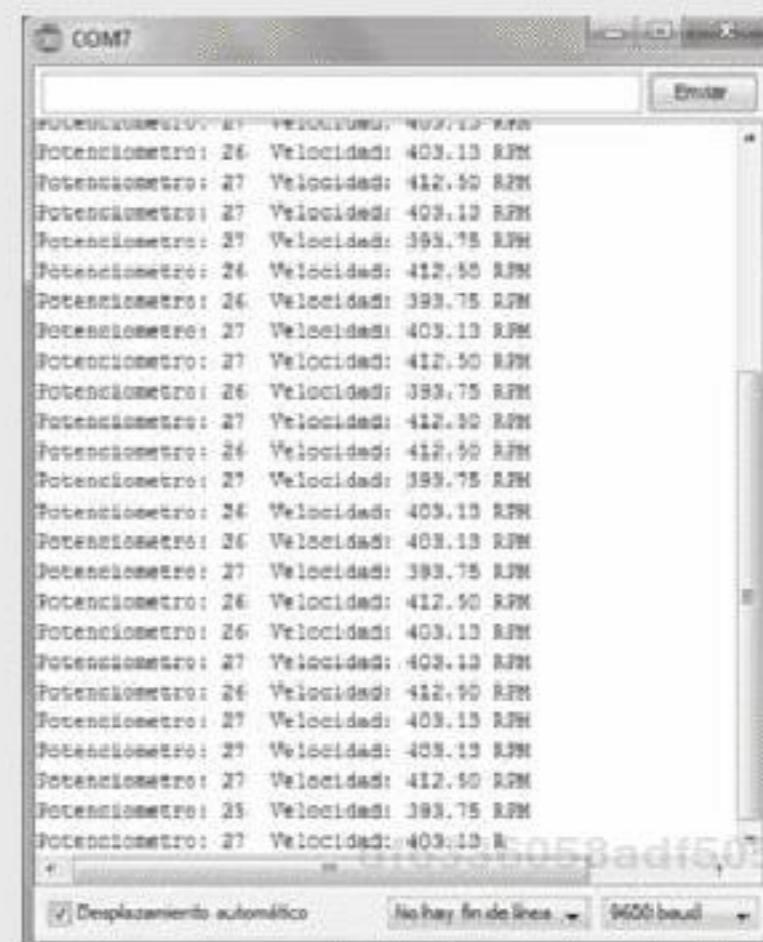
**Figura 10.24** Potenciómetro en 'Media Baja', velocidad del motor 'Medio Lento' a 628 RPM, aproximadamente.



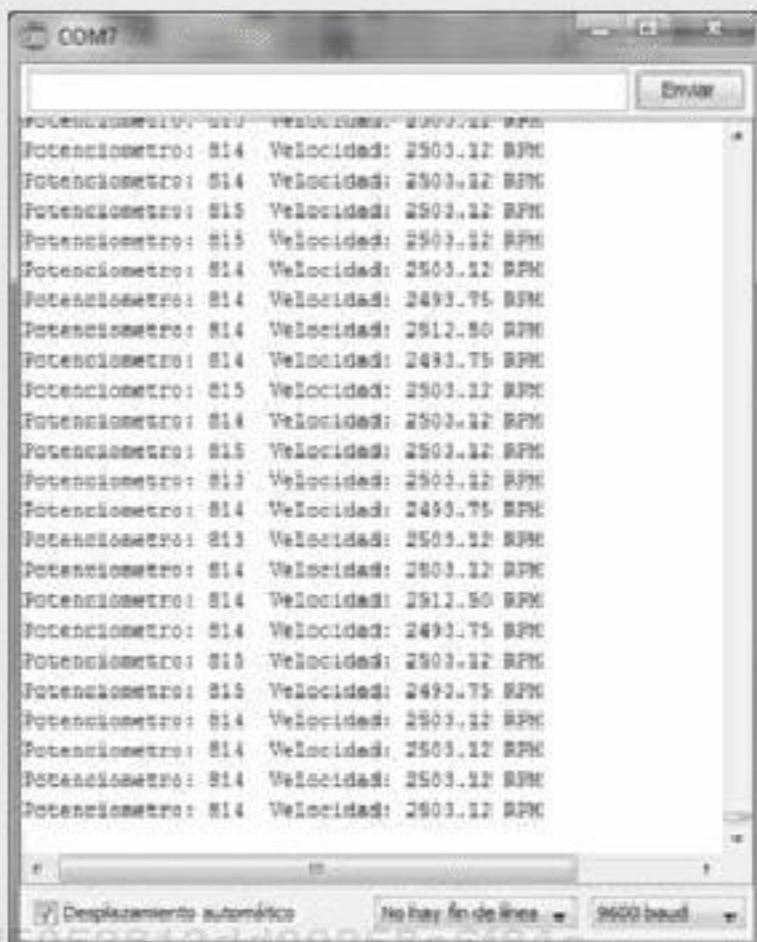
**Figura 10.25** Potenciómetro en 'Media', velocidad del motor 'Medio' a 1400 RPM, aproximadamente.



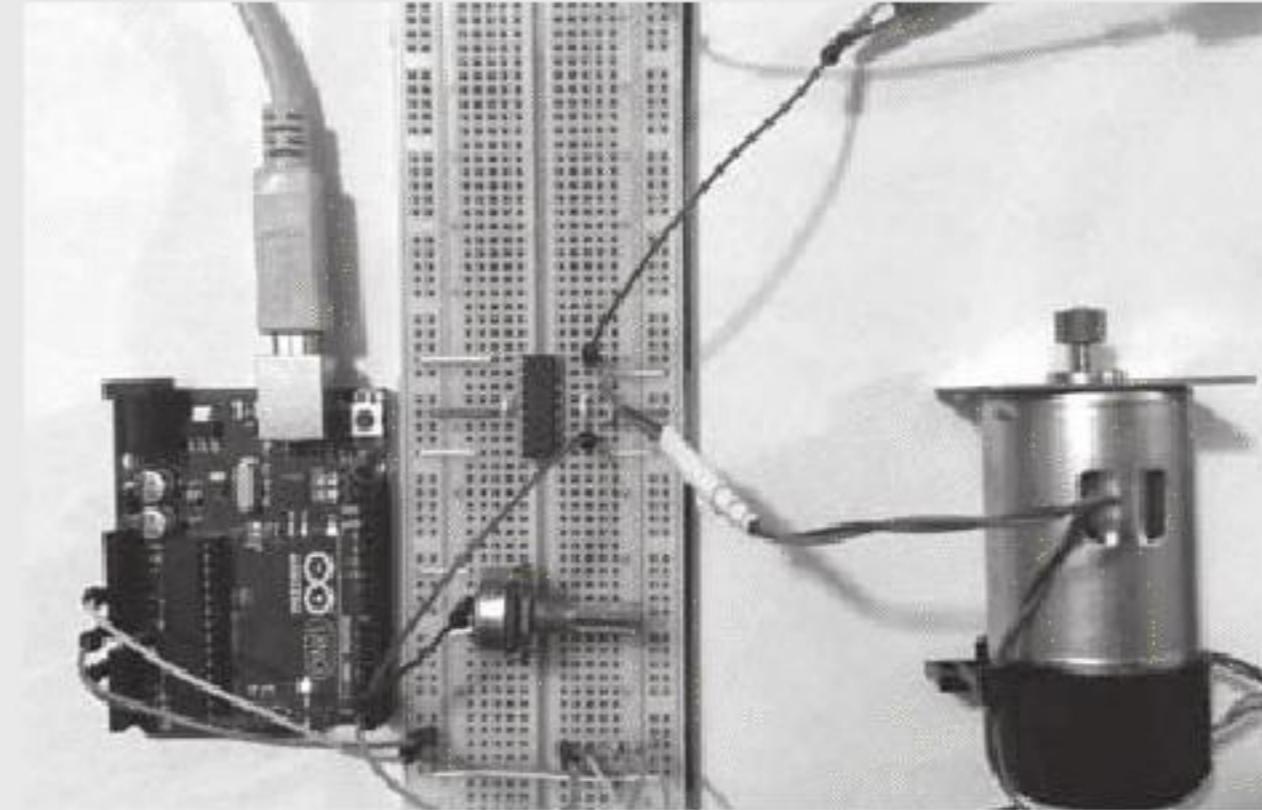
**Figura 10.26** Potenciómetro en 'Media Alta', velocidad del motor 'Medio Veloz' a 2221 RPM, aproximadamente.



**Figura 10.28** Potenciómetro en 'Baja', velocidad del motor 'Lento' a 400 RPM, aproximadamente.



**Figura 10.27** Potenciómetro en 'Alta', velocidad del motor 'Veloz' a 2500 RPM, aproximadamente.



**Figura 10.29** Regulación de la velocidad del motor a través del potenciómetro mediante lógica difusa.

## Ejercicio de aplicación

### Motor paso a paso

#### Objetivo

Controlar la velocidad y el sentido de giro de un motor a pasos a través de Arduino Uno®.

#### Material

- Arduino Uno®
- Motor a pasos unipolar 6 hilos
- Circuito integrado ULN2003
- 1 resistencia de 10 kΩ
- 1 push-button

- 1 potenciómetro de 10 kΩ
- Fuente de alimentación de 5 V CD
- Multímetro
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Alambre calibre 24 AWG
- Protoboard

#### Desarrollo

#### Descripción del motor a pasos

El motor a pasos es un dispositivo electromecánico que se desplaza un paso por cada pulso aplicado. Esta característica permite controlar la posición y velocidad del motor de forma precisa.

ma muy precisa. De manera interna, este tipo de motor está compuesto por dos bobinas, con las cuales, depende de la manera en que sean excitadas, el motor puede realizar un giro horario o antihorario.

Hay dos clases de motores de pasos: bipolares y unipolares. Los motores bipolares tienen solo cuatro terminales y requieren de secuencias de control relativamente complejas para cambiar la dirección del flujo de corriente a través de sus bobinas. Por su parte, los motores unipolares son más sencillos de controlar y están compuestos por seis o cinco terminales, donde una o dos de estas (según el número de hilos) corresponden al común de sus bobinas. Esta práctica consiste en el control de uno de estos motores.

La descripción de terminales para un motor a pasos de 6 hilos (véase figura 10.30) es la siguiente:

#### Común

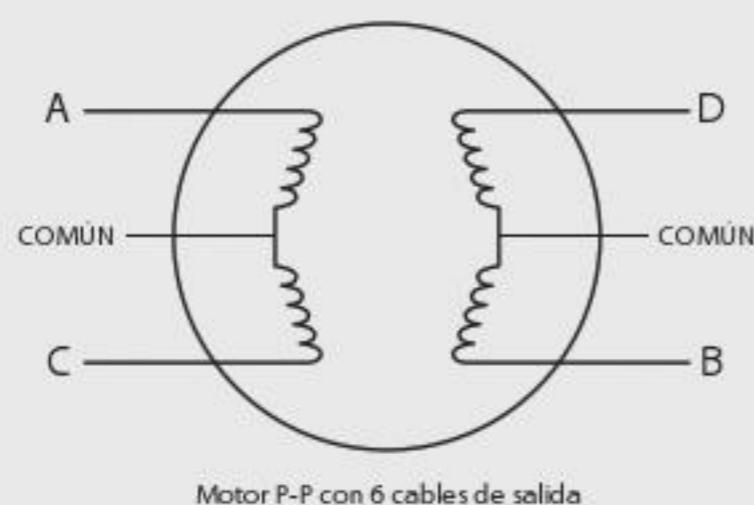
Estos motores cuentan con dos terminales comunes para cada una de sus bobinas.

#### Bobina A-C

Las terminales de la bobina 1 del motor.

#### Bobina B-D

Terminales de la bobina 2 del motor.



**Figura 10.30** Motor a pasos unipolar de 6 hilos.

#### Identificación de las terminales del motor a pasos

En general, los motores a pasos no indican las terminales y comunes de sus bobinas, o bien los colores suelen ser confusos; sin embargo, estas pueden identificarse fácilmente con la ayuda de un multímetro, como se indica a continuación. Primero, se configura el multímetro en modo óhmetro (medir resistencia). Luego, se identifican las tres terminales de cada una de las bobinas del motor; para eso, cualquiera de las puntas del multímetro se conecta a cualquier terminal del motor, mientras que la otra punta se conecta a otra terminal del motor. Si la lectura indica:

- **Resistencia infinita**

Las terminales corresponden a dos bobinas distintas.

- **Algun valor de resistencia**

Se trata de dos terminales de la misma bobina.

Así se prueban todas las puntas para clasificar las terminales que corresponden a una y otra bobina.

Luego, se identifican las terminales comunes de cada bobina y se mide la resistencia entre cada una de las terminales

de cada bobina en las tres combinaciones posibles. Las terminales con la mayor resistencia corresponden a las puntas A-C o D-B del motor; las restantes son los comunes de las bobinas.

Para el motor a pasos empleado (véase figura 10.31), sus terminales son:

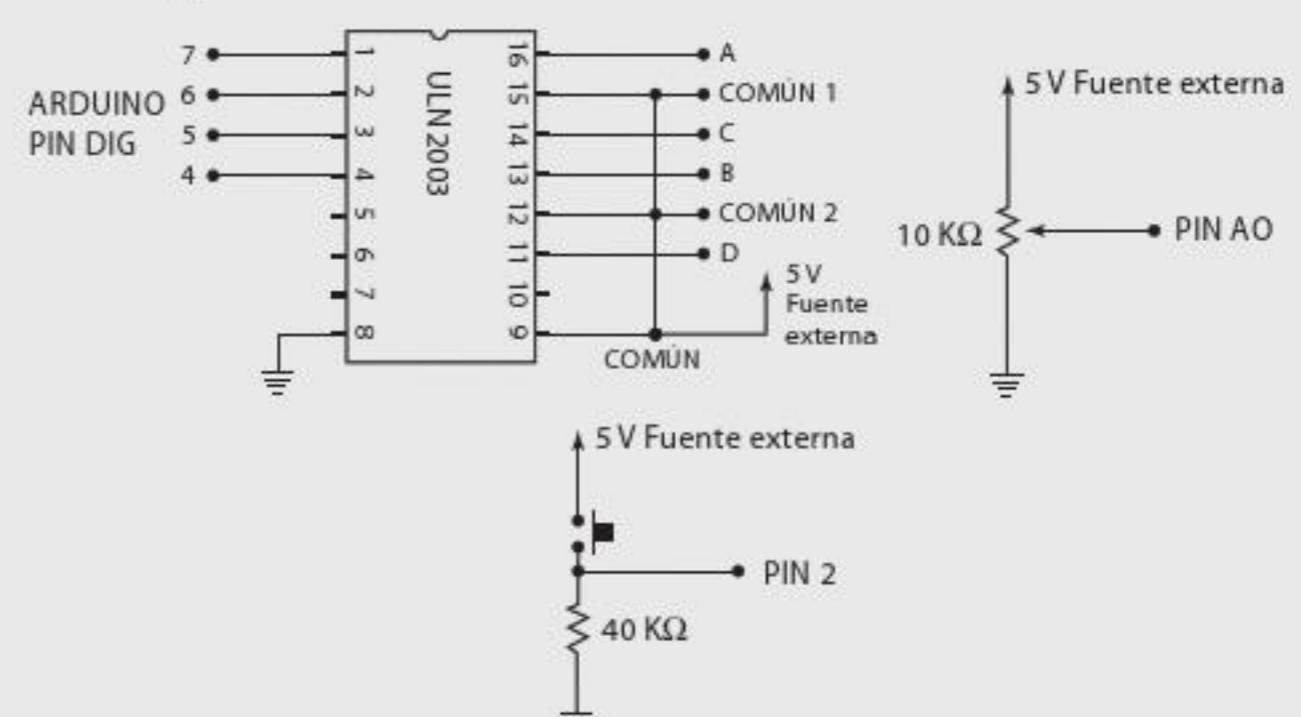
- **Rojo:** Terminal A bobina 1.
- **Blanco:** Común bobina 1.
- **Café:** Terminal C bobina 1.
- **Amarillo:** Terminal B bobina 2.
- **Negro:** Común bobina 2.
- **Azul:** Terminal D bobina 2.



**Figura 10.31** Motor de pasos unipolar de 6 hilos empleado en la práctica.

#### 1. Construcción del circuito

##### Motor a pasos



**Figura 10.32** Diagrama del circuito que controla el movimiento de un motor a pasos unipolar.

Los cuatro pulsos de control para el movimiento del sensor requieren una etapa de potencia para que se aísle el sistema de control digital del motor y se suministre la energía suficiente para su correcto funcionamiento.

Esta etapa de potencia se logra con el circuito integrado ULN2003, cuya conexión se aprecia en la figura 10.32; además, se conecta un potenciómetro configurado como divisor

de voltaje, que permite variar la velocidad del motor, así como un push-button con su resistencia pull-down, que invierte el sentido de giro cada D que se accione.

La secuencia de control para el movimiento del motor conforme a la conexión de la figura 10.32 es la siguiente:

#### Sentido horario

PIN DIGITAL Arduino®	4	5	6	7
PASO 1	1	0	0	0
PASO 2	0	1	0	0

#### Sentido antihorario

PIN DIGITAL Arduino®	4	5	6	7
PASO 1	0	0	1	0
PASO 2	0	0	0	1

## 2. Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

Realizar la lectura y conversión analógica-digital ADC del potenciómetro, pasando de 0-1023 de la lectura a un valor de 1 000 a 30 con la función map(). Este valor representa el tiempo en milisegundos entre una secuencia y otra; así, se define la velocidad del motor, donde los 30 ms es la máxima y 1 000 es la mínima.

Mientras la variable 'sentido' sea 'false', el motor gira en sentido horario con una velocidad definida por el potenciómetro.

Si 'sentido' es 'true', el sentido es antihorario, lo que permite cambiar de sentido es la interrupción promovida por el push-button, que cambia el estado de 'sentido'.

```
*****Motor a pasos*****
/*
**El motor a pasos es un dispositivo
electromecánico que a partir de
una serie de pulsos puede desplazarse en
forma angular una cantidad
**definida de "pasos". Este tipo de motores
se emplea para tareas
**que requieran movimientos muy
precisos, podemos encontrarlos en
**impresoras, proyectos de robótica, etc.
**
**En el siguiente programa controlamos la
velocidad y el sentido de
**giro de un motor a pasos con un
potenciómetro y un push-button,
**respectivamente.
*/
*****
```

```
//El PIN DIG 2 o interrupcion 0. Dedicado al
push-button que cambia el
//sentido de giro
#define sen 0

//Declaracion de las variables empleadas
boolean sentido = false;
intvel = 0;

voidsetup()
{
    for (int i = 0;i < 4;i ++)//Definimos a los
    PINES digitales 4, 5, 6 y 7
    pinMode(4 + i, OUTPUT); //como salidas
    attachInterrupt(sen, camSen, RISING); //
    Se declara el uso de la interrupcion. La
    interrupcion ocurrira cuando se registre un
    flanco de subida por el PIN DIG 2, llamando a
    la funcion camSen.
}

voidloop()
{
    vel = analogRead(A0); //Lectura del
    potenciometro(control de la
    //velocidad)
    vel = map(vel, 0, 1023, 1000, 30); //La
    lectura del potenciometro se
    //convierte en tiempos de retraso entre cada
    secuencia de pasos,
    //regulando asi la velocidad
    if (sentido == false) //Cada que presionemos
    el push-button
    //invertimos el valor de la variable 'sentido',
    //invirtiendo el giro.
    clock();
    else
        anti_clock();
}

voidcamSen()
{
    delay(20); //Antirrebotes. Esperamos 20 ms
    dejando pasar todos los
    if (digitalRead(2) == HIGH) //rebotes y
    volvemos a preguntar por el
    //estado del PIN.
    sentido =~ sentido; //Invertimos el
    valor de la variable
}

//Funcion para el giro horario del motor
voidclock()
{
    on_seq(4); //Enviamos la señal 0001 al
    motor de pasos
    delay(vel); //Esperamos un tiempo definido por
    el potenciómetro
    on_seq(5); //Enviamos la señal 0010 para
    completar la secuencia
    delay(vel);
}
```

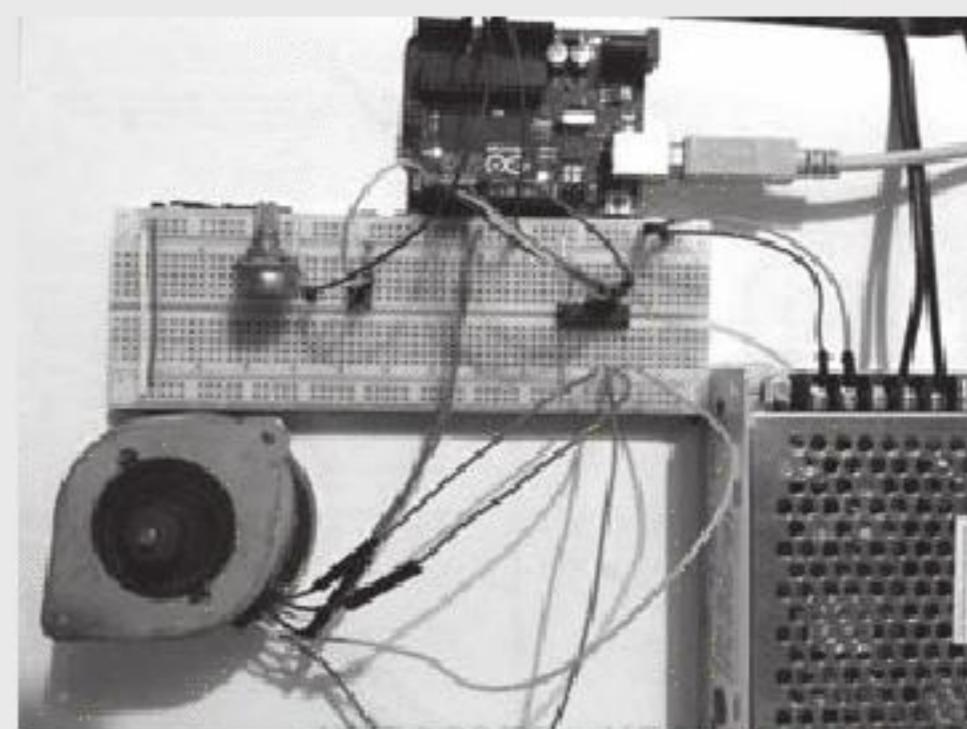
```

//Funcion del giro antihorario
void anti_clock()
{
    on_seq(6);      //Señal 0100
    delay(vel); //Retardo definido por el
    potenciómetro
    on_seq(7);      //Señal 1000
    delay(vel);
}

//Funcion que escribe la secuencia
void on_seq(int pin)
{
    for (int j = 0;j < 4; j++)
    {
        if (j == pin - 4) //Enviamos <1> logico al
        PIN definido por la
        digitalWrite(pin, HIGH); //variable <pin>,
        al resto enviamos <0>.
        else
            digitalWrite(j + 4, LOW);
    }
}

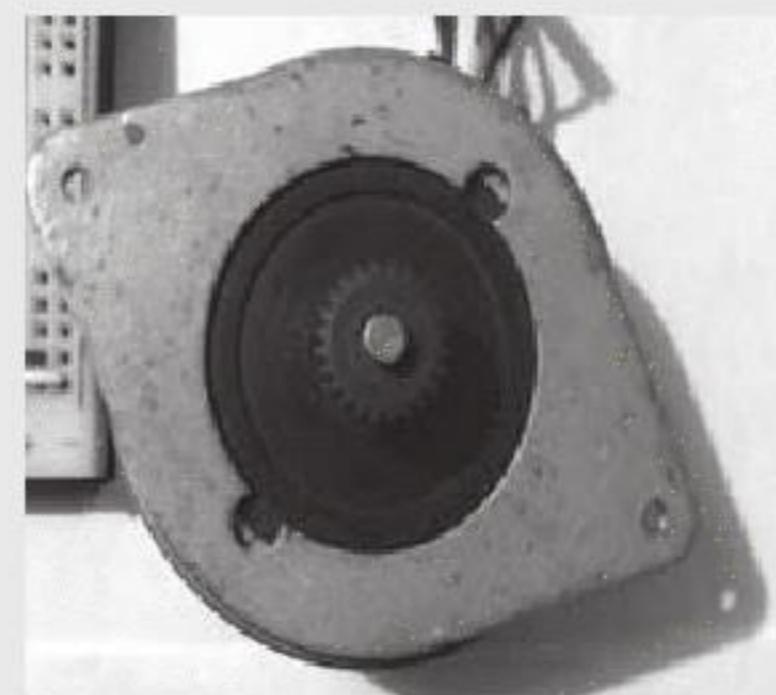
```

### 3. Comprobar el funcionamiento



**Figura 10.33** Montaje físico del circuito para el control de un motor a pasos.

La velocidad de giro del motor puede ajustarse con el potenciómetro y cambiarse el sentido de giro con el push-button.



**Figura 10.34** Motor a pasos unipolar, velocidad regular y sentido horario.

## Ejercicio de aplicación

### Servomotor

#### Objetivo

Controlar la posición de un servomotor con el uso del Arduino Uno®.

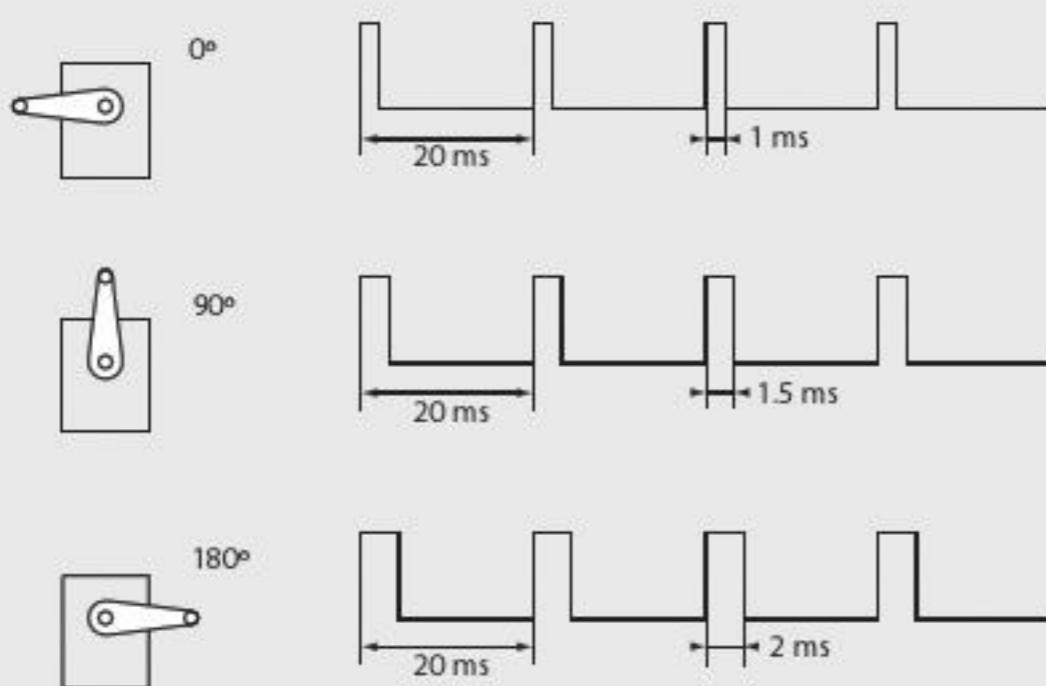
#### Material

- Arduino Uno®
- Servomotor Power HD 3001 HB
- 1 potenciómetro de 10 kΩ
- Fuente de alimentación de 5 V
- Alambre macho-macho calibre 24 AWG
- Protoboard

### Desarrollo

#### Descripción del servomotor

El servomotor es un dispositivo electromecánico que puede colocarse en cualquier posición dentro de su rango a través de un pulso PWM. La mayoría de los servomotores operan con una frecuencia PWM de 50 Hz. La duración del pulso en alto del PWM determina la posición del servomotor. Los tiempos en alto para las posiciones 0°, 90° y 180° se aprecian en la figura 10.35.



**Figura 10.35** Para mantener la posición de 0°, la duración del tiempo en alto es de 1 ms. Para 90° -> 1.5 ms y para 180° -> 2 ms.

La mayoría de los servomotores se basan en los tiempos de la figura 10.35, aunque pueden cambiar de acuerdo con el modelo.

La descripción de las terminales del servomotor Power HD 3001 HB es la siguiente:

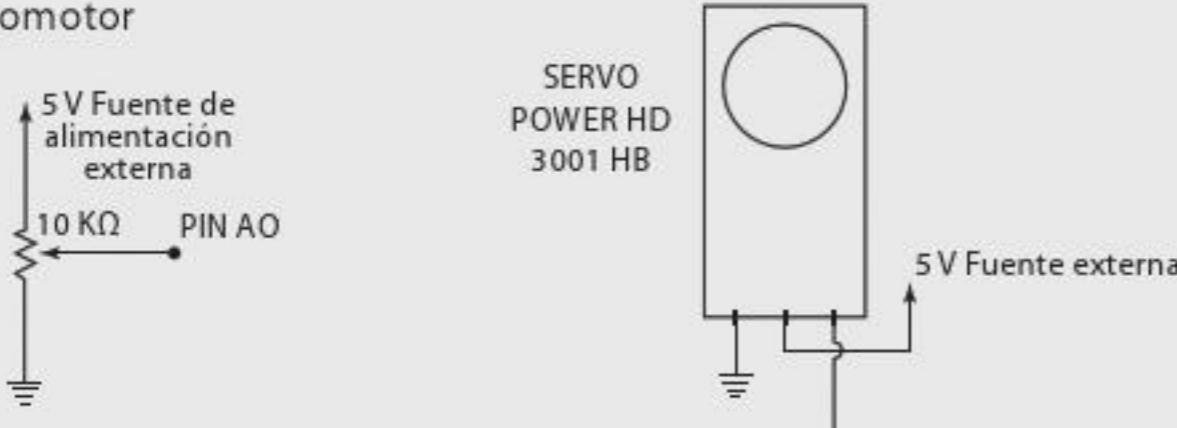
- **VCC (cable rojo).** Voltaje de alimentación de 5 V .
- **GND (cable café).** Voltaje de referencia (tierra).
- **SIGNAL (cable naranja).** Entrada de la señal de control (PWM).



**Figura 10.36** Servomotor modelo Power HD 3001 HB.

### 1. Construcción del circuito

Servomotor



**Figura 10.37** Diagrama del circuito para el control de un servomotor.

El servomotor se conecta en forma directa a uno de los pines digitales del Arduino®, aunque su alimentación está a cargo de una fuente externa de 5 V, que puede entregar la corriente suficiente para su funcionamiento.

El control de la posición depende del voltaje del divisor, siendo 0° un voltaje de 0 V y 180° uno de 5 V.

### 2. Analizar e implementar el código en Arduino Uno®

Crea un objeto tipo servo que controla la posición del motor.

Se realiza la lectura y conversión analógico-digital ADC del divisor de voltaje. Por medio de la función map( ) se escala de 0 a 1023 (lectura del ADC de 10 bits) a una posición entre 0° y 180° (rango de movimiento del sensor). Envía un PWM con un tiempo en alto correspondiente a la posición obtenida por el divisor, mediante el comando 'objeto'. write(posición 0°-180°).

Imprime en el monitor serie la posición angular del servomotor.

```
*****Servomotor*****
/*
/*Un servomotor es un dispositivo
electromecanico que puede colocarse en
/*cualquier posicion a traves de una señal
de control.
/*
/*El siguiente programa controla la posicion
de un servomotor a traves
/*de un potenciómetro. Utilizando para ello
la libreria Servo.h para
/*Arduino.
*****
```

```
//Libreria con los repositorios para el control
//de un servomotor
#include <Servo.h>

Servo servomotor; //Creamos el objeto Servo

//Variables empleadas
intreadPot = 0;

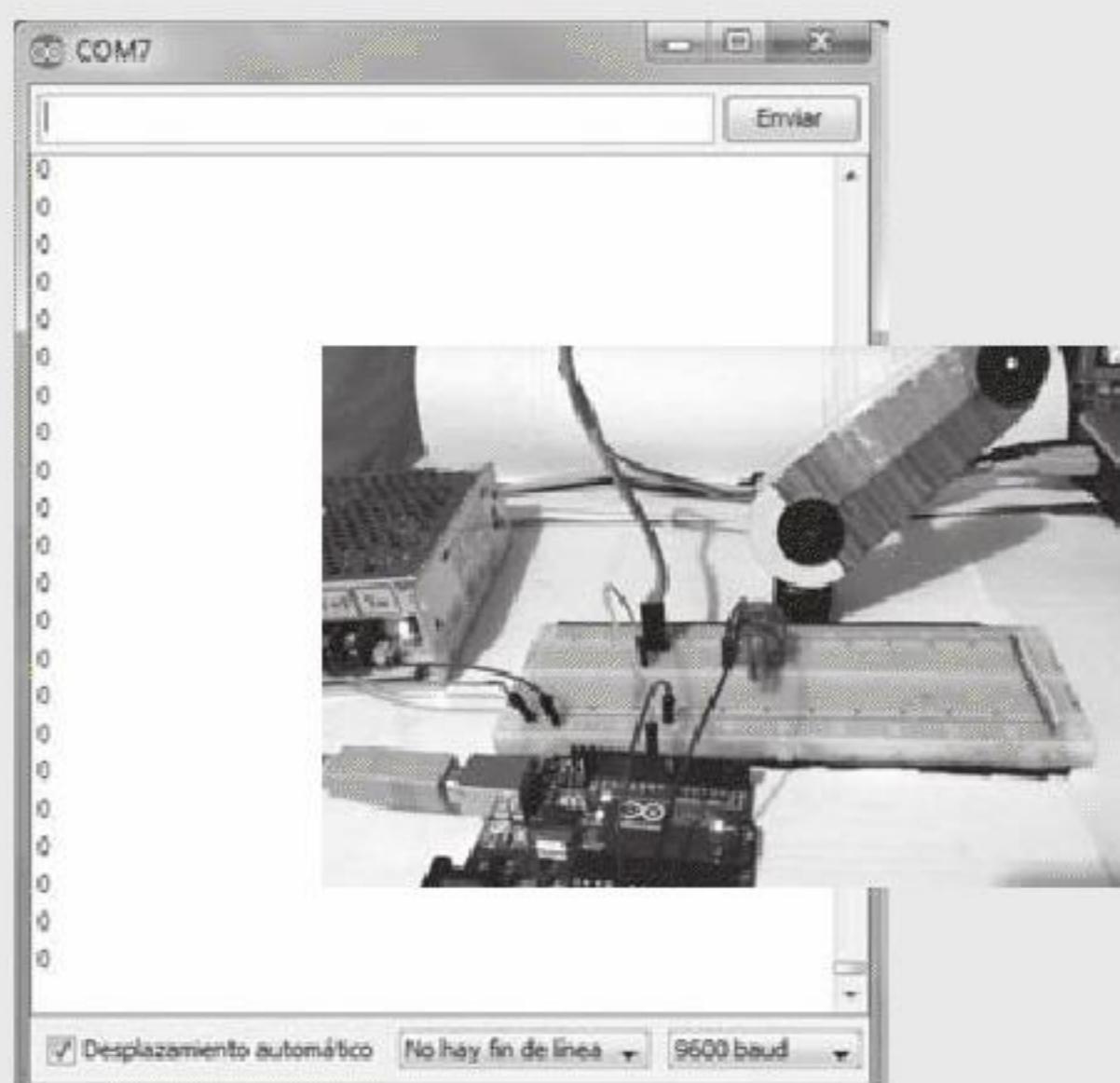
voidsetup()
{
    Serial.begin(9600); //Iniciamos la comunicacion
    serie a 9600 baudios
    servomotor.attach(9); //La señal de control
    sera a traves del PIN DIG 9
}

voidloop()
{
    readPot = analogRead(A0); //Lectura analogica
    del potenciómetro, que
    //indicara la posicion del servomotor.
    readPot = map(readPot, 0, 1023, 0, 180);//
    Escalamos la lectura
    //analogica del potenciómetro a una posicion
    angular para el servomotor
    servomotor.write(readPot); //Enviamos la
    posicion al servomotor
    Serial.println(readPot); //Imprimimos el
    angulo de posicion del
```

```
//servomotor
delay(10); //Controlamos la velocidad del
programa
}
```

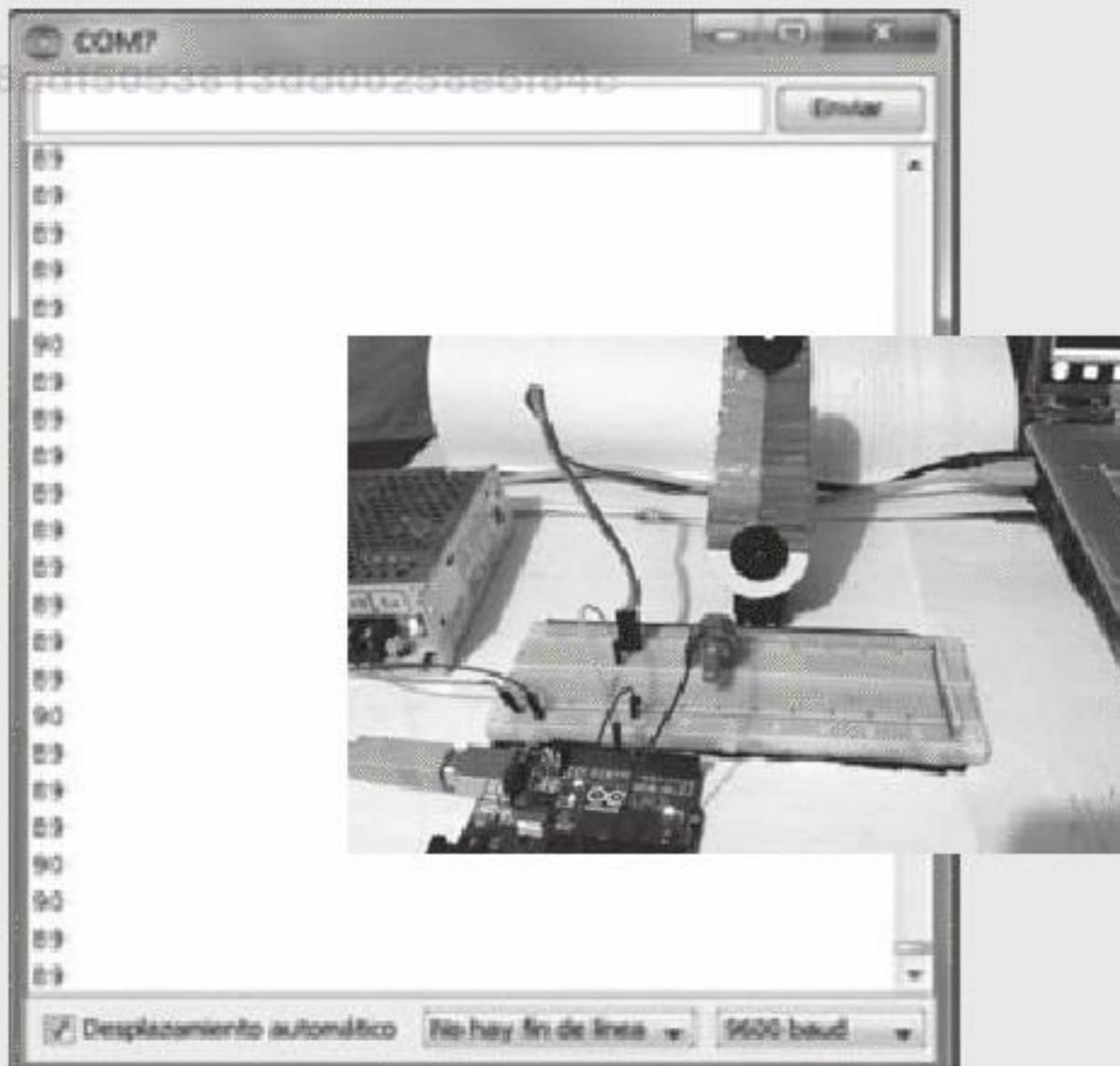
### 3. Comprobar el funcionamiento

#### Servomotor posición 0°



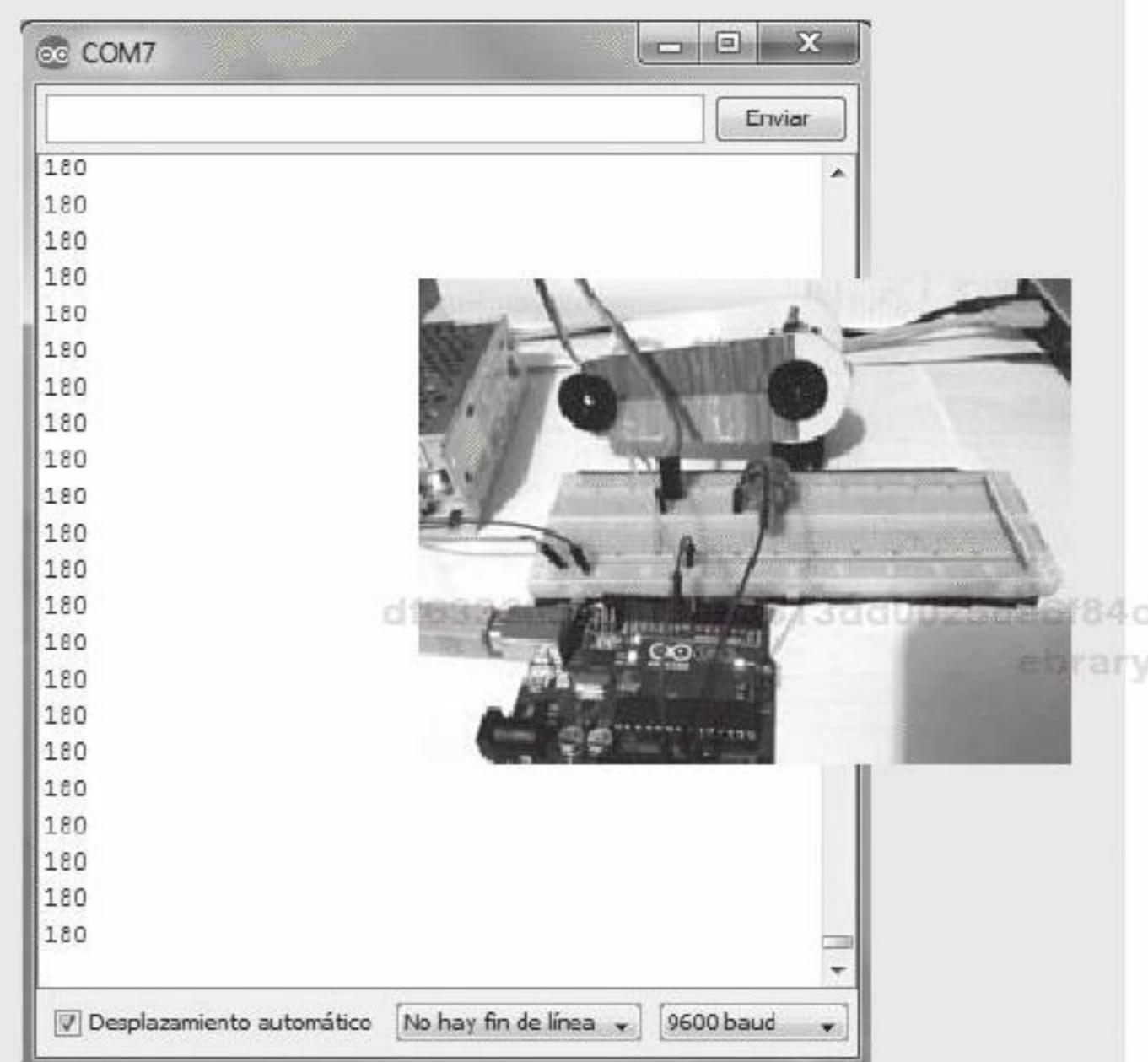
**Figura 10.38** Servomotor en la posición 0°.

#### Servomotor posición 90°



**Figura 10.39** Servomotor en la posición 90°.

#### Servomotor posición 180°



**Figura 10.40** Servomotor en la posición 180°.

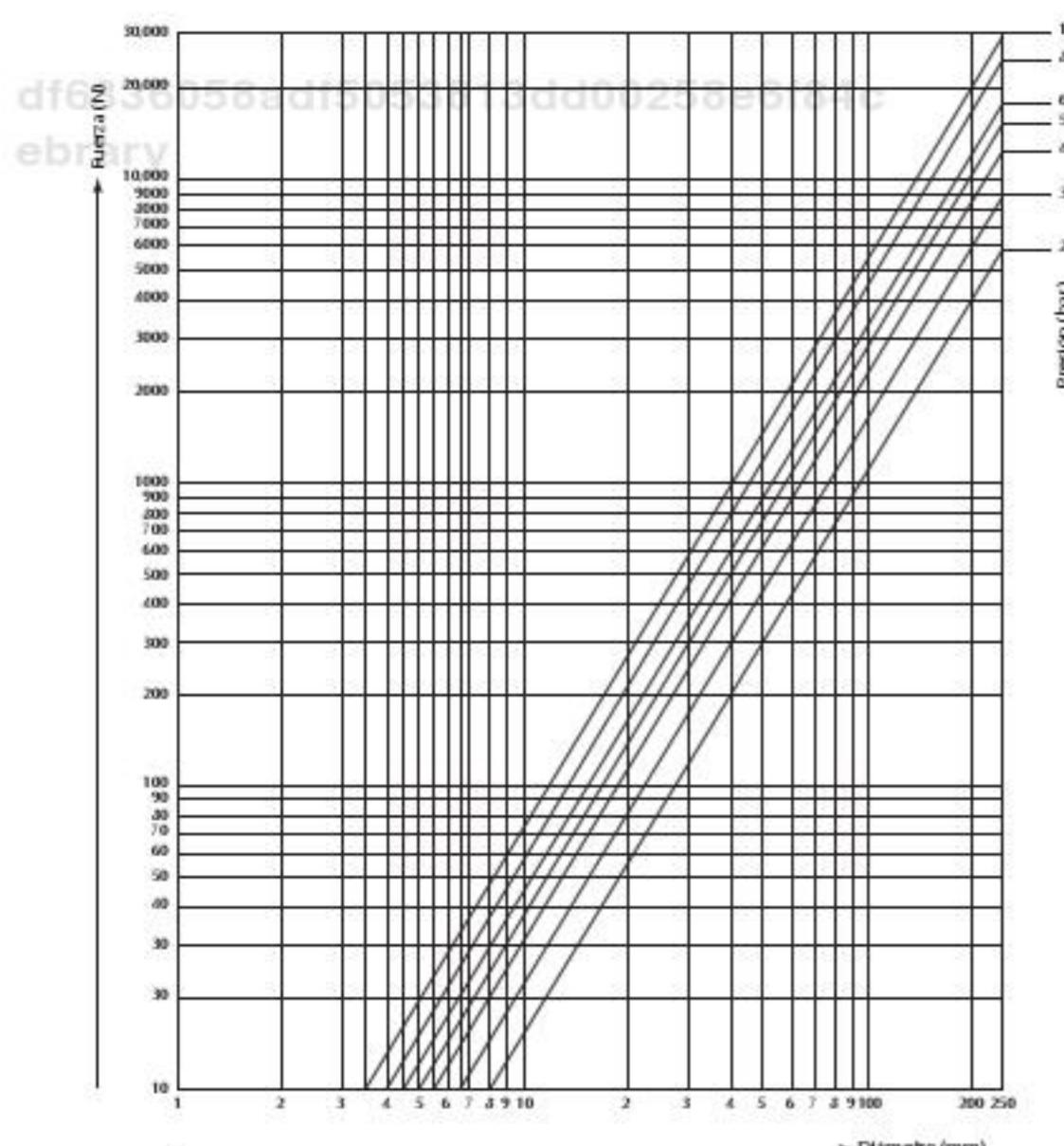
### 10.3 Cilindros neumáticos

En capítulos previos se explica que el aire es una forma de energía mecánica que tiene la ventaja de poder ser almacenada para utilizarse después en la generación de una acción de movimiento; por ejemplo, si se ejerce fuerza sobre el aire contenido en un recipiente cerrado, este se comprime forzando las paredes del mismo, entonces la fuerza que actúa en dirección perpendicular sobre la superficie del recipiente puede aprovecharse para generar el desplazamiento lineal de un eje o vástago. Los dispositivos que trabajan de acuerdo con este principio para generar movimiento lineal se conocen como cilindros neumáticos.

En el capítulo 1 (Introducción) se explica que para la generación de movimiento lineal existen de manera fundamental dos tipos de cilindros: los de simple efecto y los de doble efecto. En general, ambos tipos se fabrican de aluminio anodizado y su vástago de acero cromado de alta resistencia. En la figura 10.41 se muestran los símbolos y la descripción de los dos tipos de cilindros mencionados.

Cilindros	
Símbolo:	Descripción:
	De simple efecto. Retorno por muelle.
	De simple efecto. Retorno por fuerza externa.
	De doble efecto.
	De doble efecto con amortiguador.
	De doble efecto con doble vástago.
	De simple efecto telescopico.

**Figura 10.41** Cilindros de simple efecto y de doble efecto.



#### Fuerza de empuje de un cilindro neumático

La fuerza de empuje del vástago en un cilindro neumático está en función de la presión manométrica y la superficie del émbolo; la expresión  $F(\text{Newton}) = P(\text{bar}) \times A(\text{cm}^2)$  representa dicha relación. Además, es importante considerar las fuerzas de rozamiento, las cuales representan entre 3% y 20% de la fuerza calculada. La determinación de la fuerza estática en los cilindros está dada por la ecuación 10.1 (véase figura 10.42). Nótese el valor de 10 en esta ecuación, el cual está relacionado con las fuerzas de rozamiento.

$$F = 10P\pi r^2 \quad (10.1)$$

donde:

$F$ : fuerza [N]

$P$ : presión [bar]

$r$ : radio del émbolo [m]

En la figura 10.42 se muestra la gráfica que relaciona el diámetro del émbolo, la fuerza generada por el cilindro y la presión.

**Figura 10.42** Fuerza estática en los cilindros.

## Longitud de carrera y pandeo

La longitud de carrera en cilindros neumáticos se define como la distancia que recorre el vástago y constituye un factor importante en la fabricación de cilindros, ya que en las operaciones normales de trabajo los vástagos están sometidos a una fuerza cíclica de compresión, lo que ocasiona que se presente un fenómeno conocido como pandeo, el cual consiste en la deflexión lateral del vástago. El pandeo, a su vez, genera gran cantidad de esfuerzos radiales sobre las partes móviles del cilindro. Es natural que en dicho fenómeno la deflexión lateral adquiera magnitud peligrosa en cilindros de mayor carrera, ya que el esfuerzo mecánico del vástago y de los cojinetes de guía es todavía más grande.

En la figura 10.43 se observa la relación entre diámetro del vástago, fuerza, presión y carrera máxima. En la práctica, independientemente del tipo de montaje, es necesario asegurar que la carrera del cilindro (real) es menor a la carrera máxima permitida.

## Velocidad del vástago en un cilindro neumático

Es claro que la velocidad del vástago del cilindro neumático está en función de la presión del aire y el gasto, además de que influye de manera considerable en el trabajo final. El rango de velocidad del vástago varía desde 0.1 hasta 10 m/s; no obstante, se puede regular con válvulas de estrangulación, antirretorno y escape rápido.

En la práctica existen dos métodos principales para controlar la velocidad del vástago:

- Estrangulación de aire en la alimentación.
- Estrangulación del aire de escape.

### Estrangulación del aire a la entrada

Este método consiste en variar (limitar y aumentar) el aire de entrada al cilindro a través de una válvula reguladora, la cual controla la presión de alimentación; en caso de que existan variaciones en la entrada, la válvula trata de mantener la presión estable. Sin embargo, cuando esta restringe el suministro de aire se producen irregularidades en la velocidad, en especial con pequeñas variaciones de carga. El aire de salida circula sin restricción alguna por el conducto de antirretorno.

### Estrangulación del aire a la salida

El principio de funcionamiento de este método es contrario al de estrangulación del aire a la entrada, ya que en este el aire que se suministra al cilindro no sufre restricción alguna y circula libremente, lo que ocasiona que se genere una alta presión de alimentación; sin embargo, la salida de aire en el cilindro es regulada mediante una válvula; esta diferencia ocasiona el movimiento del vástago en el cilindro. Cabe mencionar que este tipo de método se suele usar en el control de velocidad de los cilindros neumáticos de doble efecto.

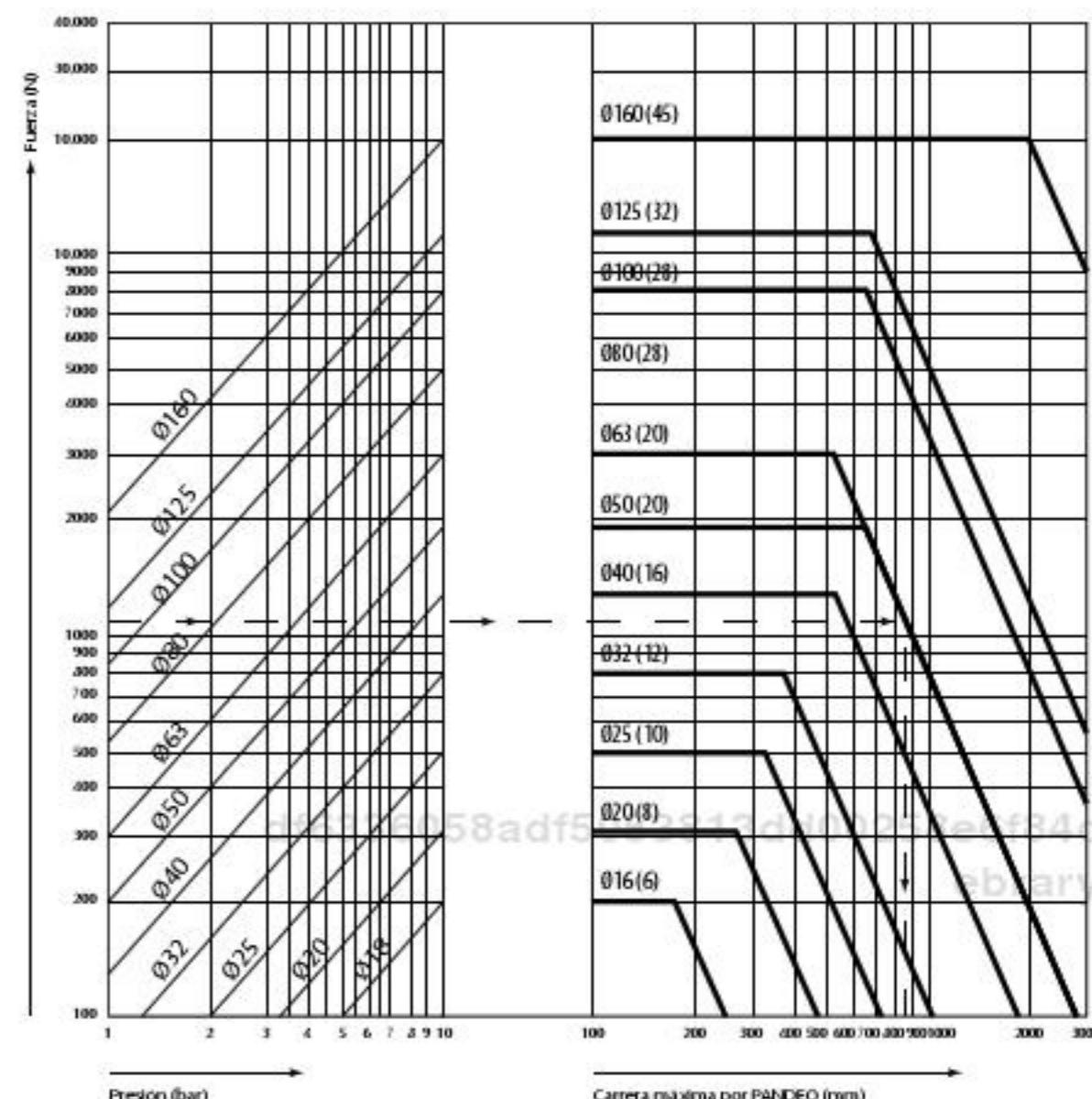
## Consumo de aire

Es crucial conocer el factor de consumo de aire en un sistema neumático, ya que proporciona información para seleccionar el tipo de compresor que deberá suministrar la presión de fluido. El gasto o flujo volumétrico puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = \pi r^2 c n_c P T_c (1e - 6)$$

df6336058ad(10.2)3813dd00258e6f84c

ebrary

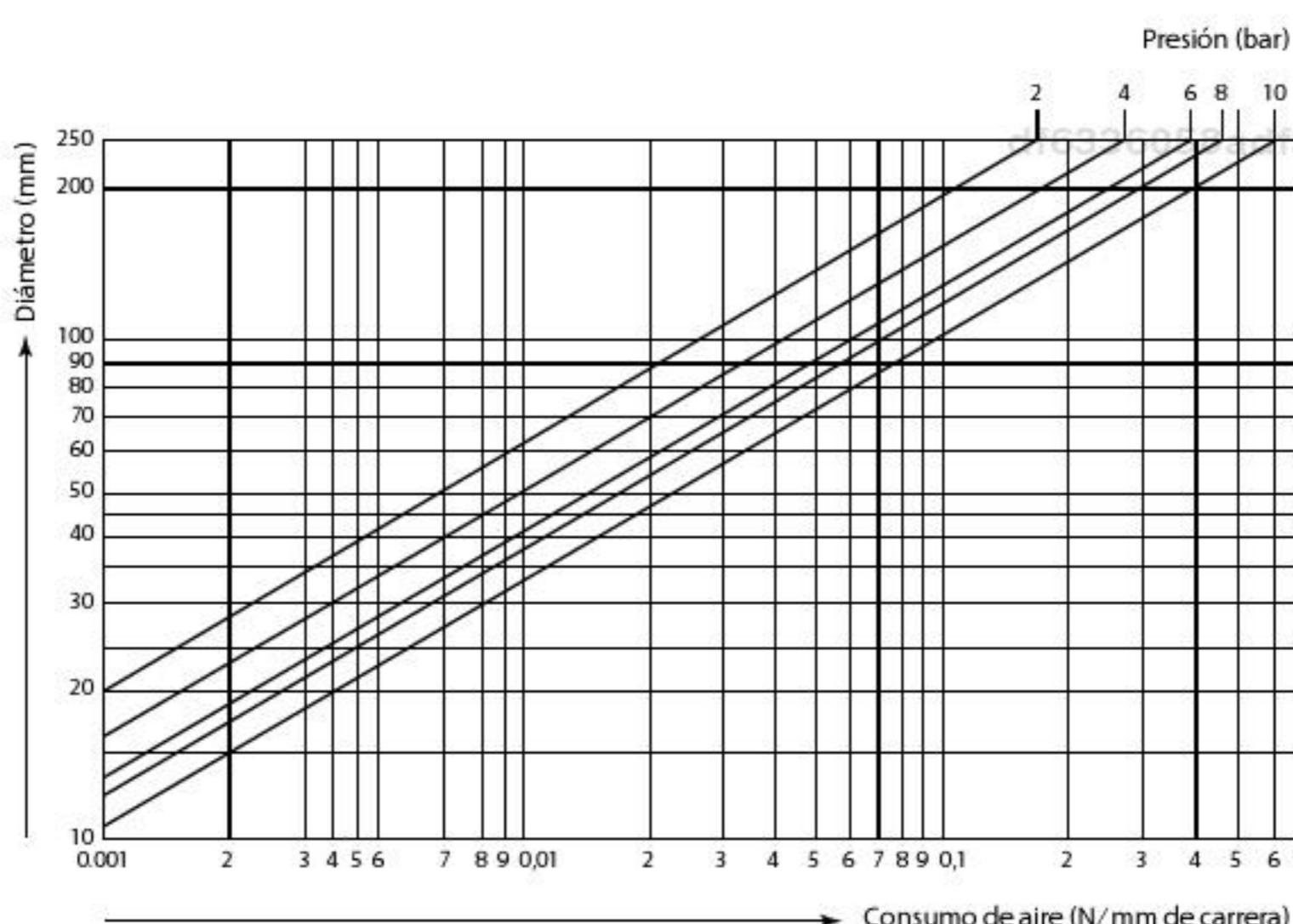


**Figura 10.43** Relación entre diámetro del vástago, fuerza, presión y carrera máxima.

donde:

- $Q$ : flujo volumétrico ( $\text{Nl/min}$ )
- $r$ : radio del cilindro (mm)
- $c$ : carrera del cilindro (mm)
- $n_c$ : número de ciclos completos por minuto
- $P$ : presión absoluta
- $T_c$ : 1 cilindro de simple efecto
- $T_c$ : 2 cilindros de doble efecto

Obsérven la gráfica de la figura 10.44, en la que se pueden establecer los datos del consumo de aire a partir del diámetro del cilindro y de la presión.



**Figura 10.44** Consumo de aire a partir del diámetro del cilindro y de la presión.

## 10.4 Cilindros hidráulicos

De manera análoga al funcionamiento de los cilindros neumáticos, los cilindros hidráulicos pueden convertir la energía almacenada de un fluido a presión en trabajo mecánico de movimiento rectilíneo; en este caso, el fluido que se utiliza con mayor frecuencia es aceite mineral, ya que en general las propiedades de este fluido definen características importantes de su funcionamiento. Por ejemplo, la fuerza del movimiento generado por el actuador tiene un bajo valor de compresibilidad, lo que implica un movimiento suave del vástago, que se ve reflejado en una mayor estabilidad frente a cargas estáticas y es capaz de soportar la presión ejercida sobre una superficie, sin aporte de energía (para mover el émbolo de un cilindro sería preciso vaciar este de aceite). Esta misma propiedad del fluido también es la responsable de que en hidráulica se puedan manipular presiones superiores, lo que permite expandir la fuerza de trabajo y que la elevada capacidad de carga y la relación potencia-peso sean destacables, así como sus características de autolubricación y robustez. Como se hace referencia en el capítulo 1 (Introducción), la energía es transmitida a través de conductos y está en función del caudal y la presión del fluido que circula a través de estos; lo que determina la fuerza de empuje de un cilindro es la presión del fluido, mientras que el caudal del mismo fluido es el que establece la velocidad de desplazamiento del vástago; por otro lado, el trabajo es producto de la combinación de fuerza y recorrido, por lo que cuando este se realiza en un tiempo establecido produce potencia.

De manera semejante que en neumática, en hidráulica existen los cilindros de simple y doble efecto; sus características ya fueron explicadas en el capítulo 1. En la figura 10.45 se muestran los símbolos para los cilindros hidráulicos; obsérvese la similitud con el caso neumático.

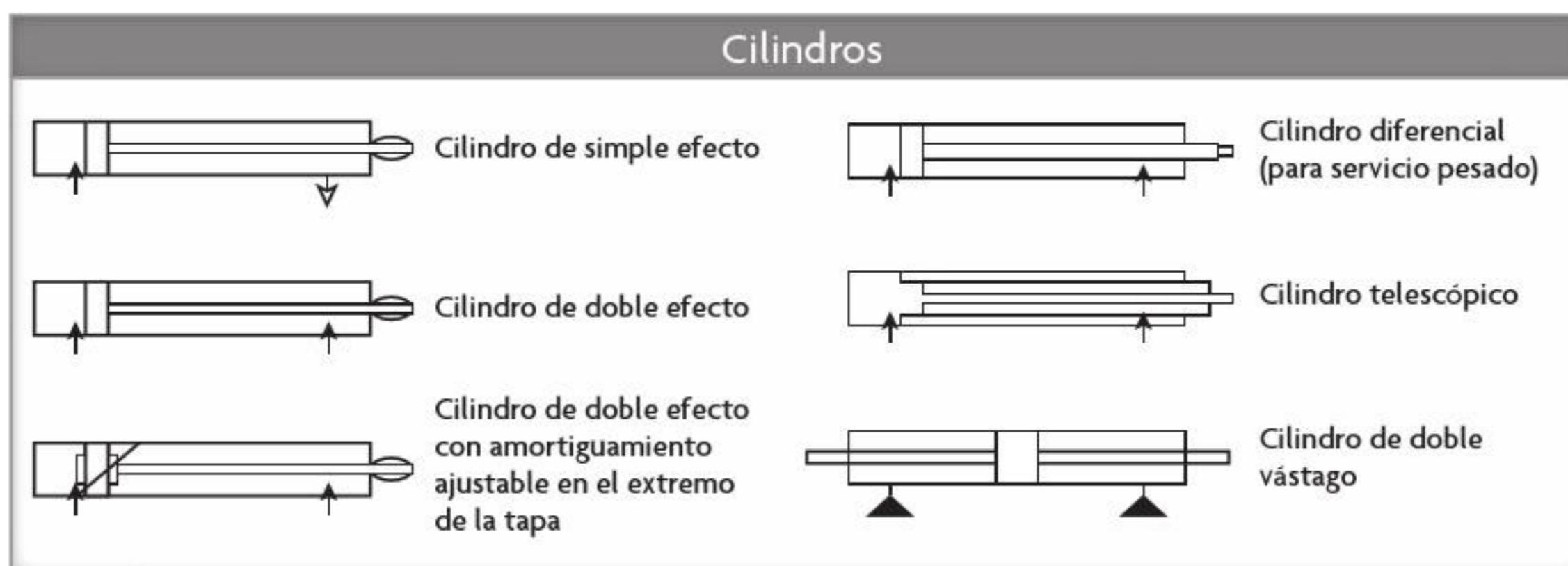


Figura 10.45 Símbolos para los diferentes tipos de cilindros hidráulicos.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

### Fuerza en un cilindro hidráulico

A diferencia del cilindro neumático, donde es trascendente la fuerza de empuje del vástago, en el caso del cilindro hidráulico existen dos fuerzas fundamentales: la fuerza de empuje o salida del vástago y la fuerza de retorno de entrada. Estas fuerzas son función de la presión del fluido, del diámetro interior del cilindro y del diámetro del vástago; las siguientes expresiones matemáticas representan dichas relaciones.

$$F_{\text{salida}} = P(\text{MPa}) \frac{\pi D_c^2}{4} 0.9 = P(\text{bar}) \frac{\pi D_c^2}{40} 0.9$$

donde:

$F$ : fuerza [N]

$P$ : presión de operación (MPa o bar)

$D_c$ : diámetro interior del cilindro (mm)

$d_v$ : diámetro del vástago del pistón (mm)

0.9: coeficiente de rozamiento de rodamientos, juntas y partes móviles del cilindro

Al igual que en el caso del cilindro neumático, aquí también es importante considerar el rozamiento entre los elementos móviles del cilindro, ya que se genera una pérdida considerable de la fuerza teórica calculada; nótese el coeficiente de rozamiento igual a 0.9 incluido en las ecuaciones de fuerza.

La relación entre la carga real y la fuerza teórica de salida del cilindro se conoce como factor máximo de carga; a partir de las ecuaciones de la física del movimiento de los cuerpos, es claro que la velocidad final del vástago del cilindro está en función del factor máximo de carga.

La tabla 10.4 indica la relación entre el factor de carga y la velocidad del pistón.

Velocidad del pistón (mm/s)	Factor máximo de carga
8 a 100	70%
101 a 200	30%
201 a 300	10%

Tabla 10.4 Factor máximo de carga

De la tabla se observa que a una velocidad de carga menor el porcentaje del factor máximo de carga aumenta.

df6336058adf5053813dd00258e6f84c  
ebrary

## Ejemplo

Considérese un cilindro hidráulico con los siguientes parámetros:

- Presión de servicio = 60 bar
- Carga = 3000 N
- Velocidad del vástago = 120 mm/s
- Diámetro del vástago = 30 mm

En la tabla 10.4 se puede observar que a partir de la velocidad del vástago de 120 mm/s se tiene un factor máximo de carga de 30%; sin embargo, el factor de carga es la relación entre la carga real y la fuerza teórica de salida del cilindro, por lo que la fuerza de salida del cilindro es igual a  $3000/0.3 = 10\,000$  N.

Al hacer uso de la expresión para el cálculo de la fuerza de salida del vástago ( $F_{\text{salida}}$ ) se puede calcular el diámetro interior del cilindro  $D_c$  como sigue:

$$D_c = \sqrt{\frac{40 \times F_{\text{salida}}}{0.9 \times \pi \times P(\text{bar})}} = \sqrt{\frac{40 \times 10\,000}{0.9 \times \pi \times 60(\text{bar})}} = 48.5 \text{ mm}$$

De manera comercial se considera un diámetro interior del cilindro de 50 milímetros.

Si la fuerza generada por el cilindro se calcula a partir de  $D_c$ , entonces:

$$F_{\text{salida}} = P(\text{bar}) \times \frac{\pi \times D_c^2}{40} \times 0.9 = 60 \frac{\pi \times 50^2}{40} \times 0.9 = 10\,603 \text{ N}$$

En el caso de que la fuerza del cilindro se refiera a la de entrada del vástago, con la segunda expresión ( $F_{\text{entrada}}$ ) se puede determinar el diámetro interior del cilindro  $D_c$ ; por tanto:

$$\begin{aligned} D_c &= \sqrt{\frac{40 \times F_{\text{salida}}}{0.9 \times \pi \times P(\text{bar})} + d^2} \\ &= \sqrt{\frac{40 \times 10\,000}{0.9 \times \pi \times 60(\text{bar})} + 30^2} = 58.710 \text{ mm} \end{aligned}$$

En este caso, el diámetro interior del cilindro que está disponible en forma comercial es de 63 milímetros.

Si se usa este diámetro comercial de 63 mm para el cálculo de la fuerza de entrada del vástago, entonces:

$$\begin{aligned} F_{\text{salida}} &= P(\text{bar}) \times \frac{\pi(D_c^2 - d_v^2)}{40} \times 0.9 \\ &= 60 \times \frac{\pi \times (63^2 - 30^2)}{40} \times 0.9 = 13\,016 \text{ l} \end{aligned}$$

Obsérvese que en este caso la fuerza de entrada es mayor que 10000 N debido al incremento del diámetro interior.

## Ejercicios propuestos

1. La fuerza de empuje del vástago en un cilindro neumático está en función de la presión manométrica y la superficie del émbolo. Si se tiene una presión 10 bar y el radio del cilindro es de 20 mm, calcule la fuerza de empuje del vástago considerando las fuerzas de rozamiento.
2. Es crucial conocer el factor de consumo de aire en un sistema neumático, ya que proporciona información para seleccionar el tipo de compresor que suministrará la presión del fluido. Considere un cilindro de doble efecto con una carrera de 90 mm, la presión absoluta de 10 bar y el radio del cilindro de 10 mm, y calcule el gasto volumétrico de aire para 3 ciclos por minuto.

3. Tomando como base el programa de aplicación "Servomotor", modifique este para colocar el eje del servomotor de manera automática a una posición de 45° y después de dos segundos a 135°.
4. Tomando como base el programa de aplicación en Arduino® "Motor de CD", modifique este de tal manera que el motor muestre un aumento y una disminución de la velocidad de forma progresiva; utilice un ciclo "for" para generar un efecto repetitivo.
5. Tomando como base el programa de aplicación en Arduino® "Motor paso a paso", modifique este de tal manera que el motor muestre un aumento y una disminución de la velocidad de forma progresiva; utilice un ciclo "for" para generar un efecto repetitivo.



