

Capítulo 5

Sensores para sistemas de control de movimiento

Los sensores de control de movimiento se utilizan para detectar y medir condiciones en una amplia variedad de aplicaciones industriales, desde el posicionamiento preciso de piezas sobre una banda transportadora hasta la coordinación exacta de los movimientos de un robot que ejecuta operaciones de soldadura. Este capítulo introduce a los sistemas de control de movimiento y examina los principales tipos de sensores de posición, desplazamiento, velocidad y aceleración disponibles actualmente para los mismos.

Generalidades

Los sistemas de control de movimiento desempeñan un papel fundamental en la industria. De hecho, el control de movimiento es la esencia de la producción industrial y no puede existir automatización industrial si no existe movimiento, **figura 5.1**. Aunque actualmente se dispone también de sistemas de control de movimiento neumáticos, hidráulicos y de otros tipos, los controles electrónicos, a los cuales nos referiremos en este capítulo, son los más comunes y los preferidos en la industria debido a las numerosas ventajas asociadas con ellos. Por

ejemplo, son muy versátiles y eficientes, no requieren mantenimiento, son limpios y silenciosos, están en continua evolución, etc.

La función de un sistema de control de movimiento es convertir comandos de entrada en movimientos mecánicos controlados. Estos últimos pue-

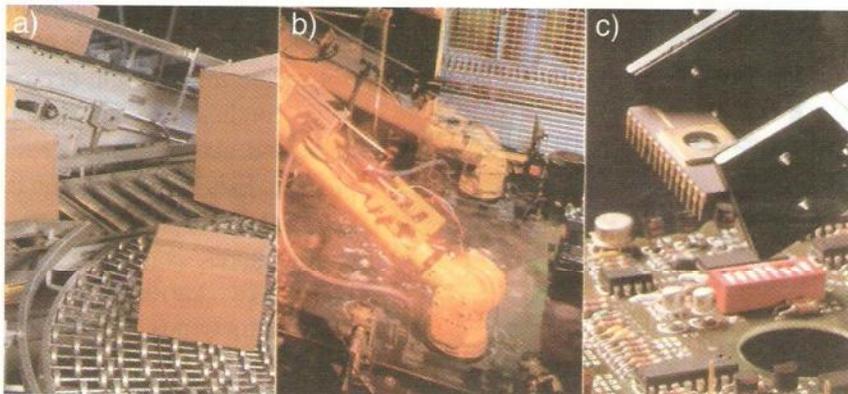


Figura 5.1. Los sistemas de control de movimiento son la esencia de la automatización industrial. En la fotografía se ilustran algunos procesos donde estos sistemas desempeñan un papel clave. (a) Transporte de productos. (b) Robots. (c) Colocación automática de partes.

Sensores para sistemas de control de movimiento

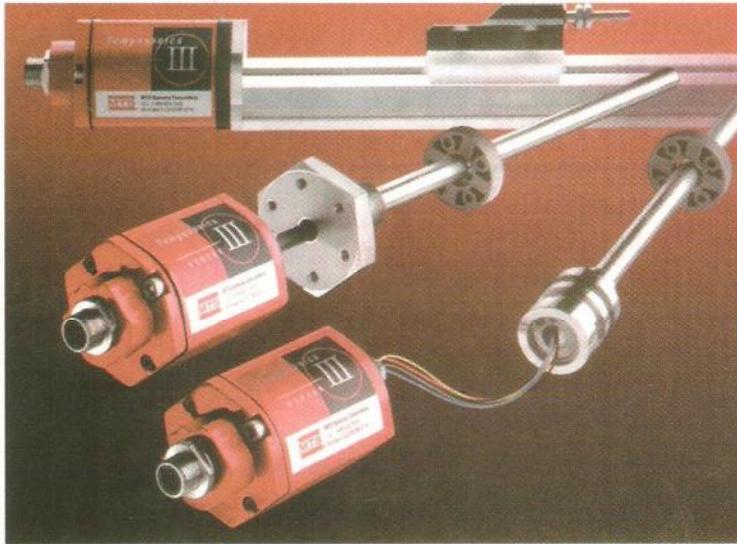


Figura 5.2 Los sensores de movimiento monitorean condiciones de posición, velocidad, aceleración, etc., en un proceso y las realimentan al controlador del sistema en la forma de señales eléctricas. Los mostrados en la fotografía, fabricados por **MTS Systems** (www.mts.com), por ejemplo, detectan cambios de posición con una resolución de 25 micras (0.001"). Los mismos están basados en el efecto **magnetoestrictivo**, consistente en la expansión o contracción de ciertos materiales ferromagnéticos cuando se exponen a un campo magnético

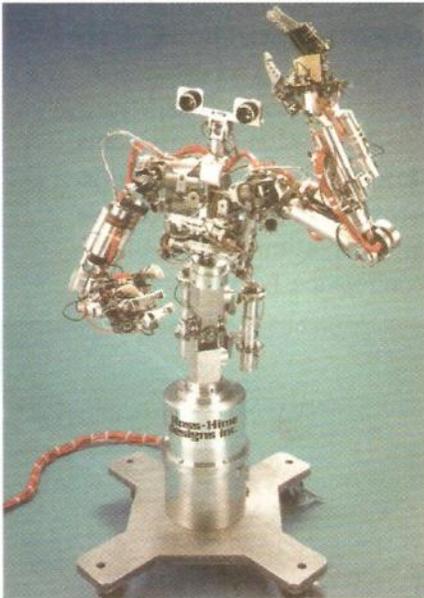


Figura 5.3. Los robots son la máxima expresión de los sistemas de control de movimiento. El mostrado en la fotografía, desarrollado por la NASA para investigación, tiene un rango de movimientos similares a los de la parte superior del torso humano.

den ser lineales, rotatorios o una combinación de ambos. Los comandos de entrada pueden ser proporcionados por un juego de levas o engranajes, un potenciómetro, un PLC, un computador, etc. De cualquier modo, la automatización de una aplicación que involucre movimiento sólo es posible si el sistema de control recibe información acerca de las condiciones de posición, velocidad, aceleración, etc., del proceso. Esta realimentación la suministran dispositivos como codificadores, potenciómetros, LVDTs, etc., varios de los cuales examinaremos en este capítulo, **figura 5.2**.

Antes de proceder al estudio de los principales sensores para sistemas de control de

movimiento, es instructivo conocer qué son estos sistemas, cómo están estructurados y qué papel desempeña la realimentación en los mismos. El tema de los sistemas de control de movimiento es demasiado amplio para pretender un cubrimiento total del mismo. Por esta razón, en este capítulo sólo trataremos, por ahora, los aspectos básicos.

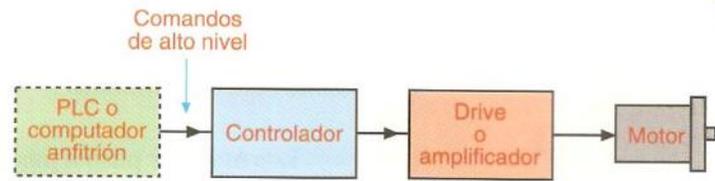
Introducción a los sistemas de control de movimiento

El término **control de movimiento**, en su sentido más amplio, se refiere al control preciso de cualquier cosa que se mueve, desde un robot que realiza operaciones de soldadura en una línea de ensamblaje hasta el sistema hidráulico de una grúa móvil, **figura 5.3**. En nuestro caso específico del control electrónico, nos interesan primariamente aquellos sistemas que trabajan con niveles de potencia dentro de un rango limitado, digamos por debajo de 10 hp (7 kW), y que requieren precisión en uno o más aspectos, por ejemplo la velocidad, la posición, el desplazamiento o cambio de posición, la rata de aceleración/desaceleración, el torque, etc. Estos son los parámetros básicos que maneja un sistema de control de movimiento cualquiera.

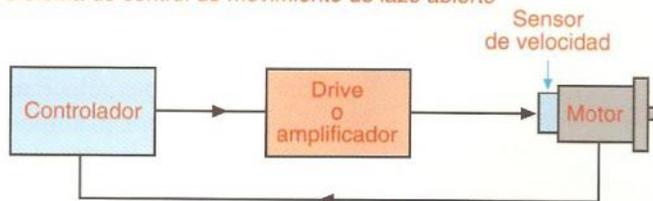
Un sistema de control de movimiento estándar se compone de tres elementos básicos: un

motor, un impulsor o *drive* y un controlador, **figura 5.4**. En algunos casos, el motor puede trabajar en lazo abierto, es decir sin ningún tipo de realimentación hacia el controlador, **figura 5.4a**. En otros, debe hacerlo en lazo cerrado, es decir asociado a algún tipo de sensor de movimiento, **figura 5.4b**. Asimismo, dependiendo de la complejidad de la aplicación, el controlador puede ser un módulo autónomo o consistir en una o más tarjetas que trabajan en línea con un PLC o una computadora personal (PC) y requieren de software especializado para su programación e interface con el usuario, **figura 5.4c**.

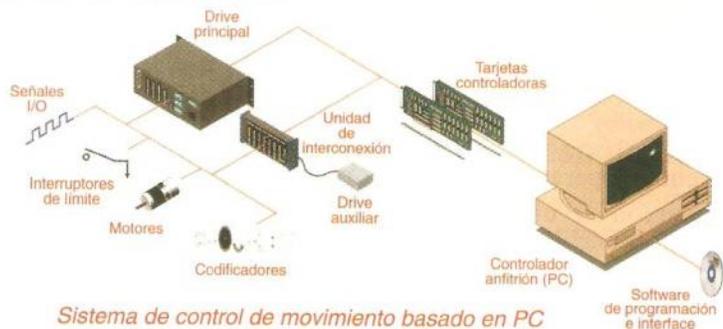
El **motor** es la parte encargada de accionar la carga o dispositivo mecánico que debe ser movido, por ejemplo una máquina pulidora de discos compactos, **figura 5.5**. En este caso, se utilizan tres motores: uno (M1) para girar continuamente el disco a alta velocidad y dos (M2 y M3) para desplazar radialmente, a baja velocidad, las cabezas pulidora y sensora a través de la superficie del disco. Cuando se detecta un punto alto, M2 y M3 deben detenerse mientras la cabeza pulidora elimina el material levantado y M1 gira a una velocidad constante. Esta última, en general, depende de la posición de las cabezas y debe incrementarse a medida que las mismas exploran el disco desde el exterior hasta el centro.



a) Sistema de control de movimiento de lazo abierto



b) Sistema de control de movimiento de lazo cerrado



Sistema de control de movimiento basado en PC

Figura 5.4. Componentes de sistemas de control de movimiento típicos.

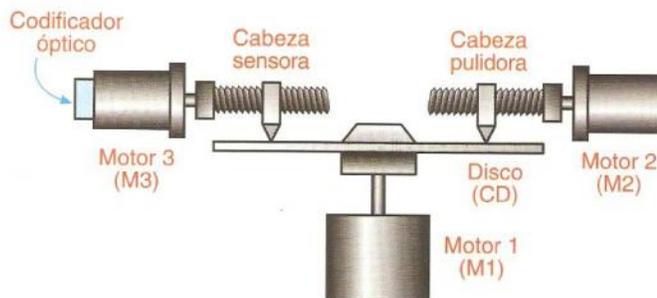


Figura 5.5 Estructura genérica de una máquina pulidora de discos compactos. Típicamente, M1, encargado de girar el disco, es un servomotor sin escobillas, mientras que M2 y M3, encargados de desplazar las cabezas pulidora y sensora, son motores paso a paso, perfectamente sincronizados. El codificador, acoplado a M2 o M3, informa la posición de las cabezas, la cual es utilizada por el controlador de M1 para calcular la velocidad del disco. Esta última es máxima en el centro.

Los principales tipos de motores utilizados en los sistemas de control de movimiento son los motores paso a paso (*steppers*) y los ser-

vomotores, **figura 5.6**. Ambos tipos, cuyo funcionamiento y características se examinan en detalle en el **Capítulo 16** de esta sección

Sensores para sistemas de control de movimiento



b) Servomotor

Figura 5.6 Ejemplos de motores utilizados en sistemas de control de movimiento

del curso, operan mediante la aplicación de una corriente controlada, pulsante o continua, a través de un cierto número de bobinas de alambre orientadas en posiciones específicas. Los campos magnéticos producidos por estas bobinas interactúan con otros creados internamente, generándose como resultado una

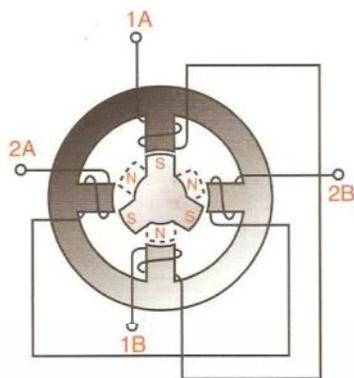


Figura 5.7 Principio de funcionamiento de un motor paso a paso. El modelo mostrado corresponde a un motor híbrido simple de 12 pasos por revolución.

serie de fuerzas de atracción y repulsión que son las causantes del movimiento.

Los **motores paso a paso**, en particular, **figura 5.7**, son dispositivos de movimiento discreto. Los mismos se mueven a posiciones relacionadas directamente con el número de pulsos de control aplicados a la entrada. La rata a la cual se aplican estos pulsos determina la velocidad del movimiento. Este tipo de motores trabajan sobre el principio de la **conmutación**, consistente en el secuenciamiento controlado de las corrientes y tensiones aplicadas a los devanados. A medida que varía el patrón de conmutación, el motor se mueve de una posición discreta a otra, ya sea en pasos completos o en fracciones de pasos (micropasos). Si el patrón no cambia, el motor permanece en su posición.

Los **servomotores**, por su parte, **figura 5.8**, son dispositivos de movimiento continuo. Los mismos giran mientras tengan aplicada una corriente y utilizan señales de realimentación para proporcionar un control preciso de la posición y la velocidad en un ambiente de lazo cerrado. El campo magnético interno es producido por imanes permanentes. Existen servomotores AC y DC. Los más utilizados en sistemas de control de movimiento son los servos DC de escobillas y los servos AC y

DC sin escobillas. También se dispone de servomotores y motores paso a paso **lineales**, los cuales no giran, sino que se mueven en línea recta.

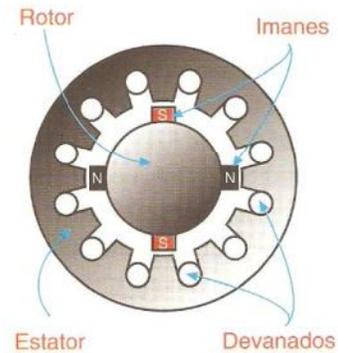


Figura 5.8 Principio de funcionamiento de un servomotor DC sin escobillas. En este caso, la parte rotatoria o rotor se convierte en un imán permanente, mientras que los devanados de campo se colocan en la parte fija o estator.

Un servomotor trabajando en lazo abierto rota o se mueve descontroladamente a medida que se le aplica potencia. Por esta razón, los sistemas de servomotor requieren una señal de realimentación para garantizar que el posicionamiento del motor y el mantenimiento de la velocidad se realicen de una manera confiable y precisa, siguiendo las trayectorias de movimiento especificadas por el usuario. La realimentación la proporciona típicamente un **codificador**, **figura 5.9**, montado directamente en el eje del motor o acoplado mecánicamente a él. Los codificadores se examinan más adelante en este mismo capítulo. La realimentación es opcional en sistemas de motores paso a paso.



Los dispositivos de realimentación, en general, proporcionan señales que llevan datos de posición y velocidad al controlador de movimiento. Estas señales son convertidas en el controlador en valores cuantificables que representan una posición o una velocidad, es decir un cambio de posición sobre un período fijo de tiempo. En el caso de sistemas que controlan movimiento en varios ejes, cada eje tiene señales de realimentación separadas.

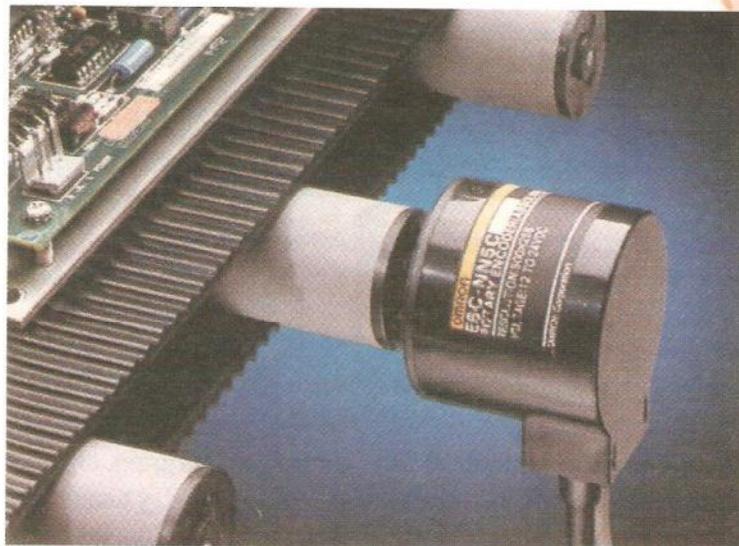


Figura 5.9. Ejemplo de un codificador óptico

Los **impulsores** o *drives*, figura 5.10, son amplificadores electrónicos que toman las señales de control de bajo nivel generadas por el controlador y las convierten en señales de potencia apropiadas para impulsar el motor o motores conectados a los mismos. Los *drives* se diseñan específicamente para operar con un tipo particular de motor. En consecuencia, un *drive* para un motor paso a paso, por ejemplo, no puede usarse para impulsar un servomotor DC de escobillas, y viceversa. Los *drives* deben incluir una o más fuentes de alimentación para proporcionar las corrientes y tensiones demandadas por el sistema, tanto en condiciones normales, como durante las fases de arranque y aceleración del motor.

En la figura 5.11 se muestra como ejemplo la estructura genérica de un *drive*

para motores paso a paso. Los pulsos de paso y la señal de dirección, provenientes del controlador, son recibidas por un circuito lógico y convertidas en un patrón de formas de onda adecuado para excitar los devanados del motor a través de un juego de interruptores de potencia de estado sólido.

Se requiere un pulso para que el motor se mueva un paso en la dirección especificada, de modo que pueden ser necesarios desde 200 hasta 100,000 o más pulsos para producir una revolución completa. En el caso de un motor de 400 pasos/revolución operando a 25,000 rpm, por ejemplo, esto implica que la frecuencia de los pulsos debe ser de 750kHz.

El **controlador** es una parte esencial de cualquier sistema de control de movimiento porque es el que determina finalmente la tarea real realizada por el motor o motores del mismo. El controlador fija la velocidad, la posición, la dirección, la ace-



Figura 5.10. Ejemplo de driver para servomotores y/o motores paso a paso

Sensores para sistemas de control de movimiento

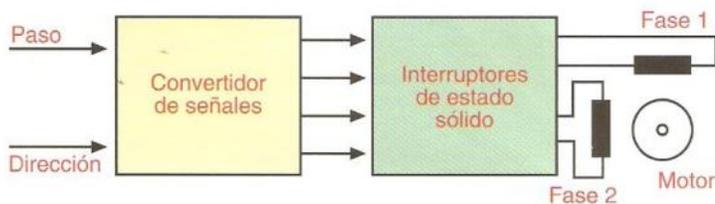


Figura 5.11 Elementos de un drive de motores paso a paso

leración, y otros parámetros relacionados con la operación realizada por el motor. La salida del controlador, que se conecta a la entrada del *drive*, puede consistir en un voltaje análogo, un juego de señales de paso y dirección, o una combinación de ambas. La mayoría incluye entradas y salidas adicionales que les permiten también ocuparse de otras funciones en una máquina.

La función de control puede ser realizada por un controlador autónomo (*standalone*) o estar distribuida entre un

controlador anfitrión, digamos un PLC o un PC, y una unidad esclava. Esta última la constituyen una o varias tarjetas que residen en el PC, se comunican con él a través de un bus estándar y aceptan comandos de alto nivel, **figura 5.12**. Un controlador operando en conjunción con varios *drives* y motores puede manejar coordinadamente movimientos en dos o más ejes, constituyendo lo que se denomina un **sistema multiaxial**. Una variante son los **sistemas multiplexados**, en los cuales se gobiernan varios motores con un sólo controlador y un sólo *drive* sobre una base de tiempo compartido.

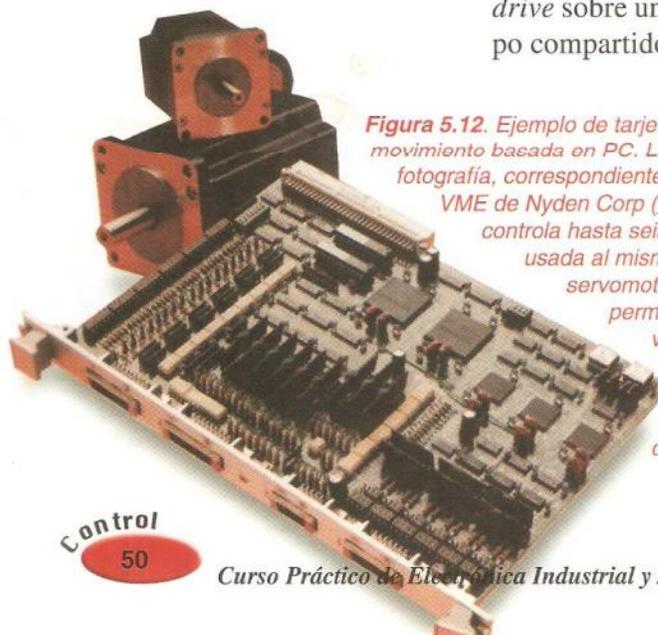


Figura 5.12. Ejemplo de tarjeta de control de movimiento basada en PC. La mostrada en la fotografía, correspondiente al modelo PG106 VME de Nyden Corp (www.nyden.com), controla hasta seis ejes, puede ser usada al mismo tiempo con servomotores y *steppers* y permite configurar varios tipos de perfiles de movimiento, tanto básicos como complejos.

La firma **National Instruments** (www.natinst.com), por ejemplo, ofrece dos grandes series de tarjetas controladoras de movimiento, basadas en PC, denominadas **FlexMotion** y **ValueMotion**. Los controladores **FlexMotion**, en particular, se utilizan para aplicaciones avanzadas que implican secuencias de posicionamiento coordinadas hasta en seis ejes. Los controladores **ValueMotion**, por su parte, se utilizan en aplicaciones de propósito general que involucran hasta cuatro ejes. Ambos tipos disponen de una amplia variedad de herramientas de software para el desarrollo de aplicaciones en Windows, **figura 5.13**. Esto es aplicable, en general, a cualquier tarjeta moderna de control de movimiento.

Adicionalmente, las tarjetas de control de movimiento modernas ofrecen una amplia variedad de modos de operación que proporcionan características funcionales y operacionales a un alto nivel simplificando la solución de todo tipo de problemas. Algunos de los modos más importantes se representan simbólicamente en la **figura 5.14** y se explican a grandes rasgos en el recuadro "**Para saber más**" de la página 52. El modo de funcionamiento deseado es una consideración muy importante en la selección del controlador, junto con el tipo de mo-

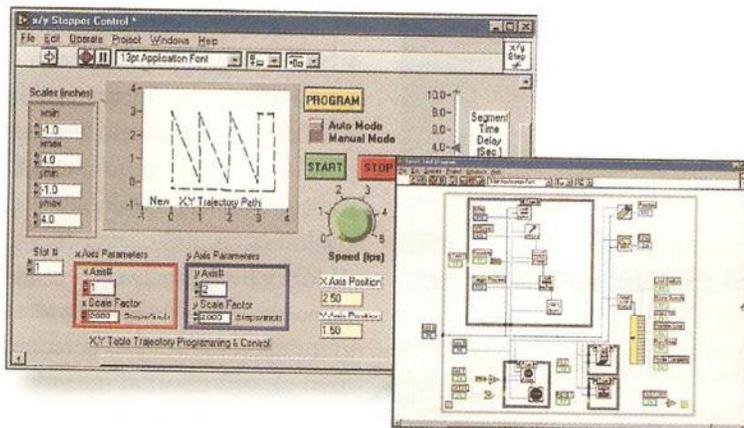


Figura 5.13. Las tarjetas de control de movimiento modernas disponen de una gran variedad de herramientas de software para el desarrollo de todo tipo de aplicaciones. Estas incluyen, entre otras opciones, librerías de **instrumentos virtuales (VIs)**, como las mostradas en la ilustración, ejemplos de programas en C, Visual Basic, LabWindows, LabView, etc., y librerías de funciones con enlaces dinámicos (DLLs) capaces de proveer comunicación directamente con proyectos en C y Visual C++.

tor o motores requeridos, el número de ejes de movimiento que deben ser controlados, la dependencia del PC anfitrión, etc.

Sensores de posición. Codificadores incrementales

Los sistemas de control de movimiento manejan cuatro tipos de variables: posición, velocidad, aceleración/desaceleración y torque. La **posición** se refiere a la localización física de un objeto con respecto a un punto de referencia, la **velocidad** a la rata cambio de la posición y la **aceleración/desaceleración** a rata de cambio de la velocidad. El **torque** o **par** es una medida de la fuerza rotacional necesaria para mover o acelerar un objeto, o mantenerlo frenado o girando a una velocidad determinada. Por aho-

ra, nos enfocaremos en las técnicas de medición y control de posición y velocidad. Los sistemas de control de aceleración, torque y otras variables mecánicas relacionadas se examinan en el **Capítulo 6**.

Tanto la posición como los cambios de posición (**desplazamientos**) son ítems de interés primario en muchos procesos. Las líneas de ensamble automatizadas que utilizan robots, por ejemplo, demandan el posicionamiento preciso de partes. De igual modo, el fresado, torneado y taladrado de piezas en una máquina de control numérico, así como el movimiento del cabezal en un *drive* de disco duro, requieren la medición y el control exacto de la posición. Adicionalmente, la medición de variables como presión, peso, nivel, temperatura, etc., requieren mu-

chas veces su conversión a un desplazamiento equivalente antes de ser convertidas a señales eléctricas mediante sensores de posición.

Existen varios tipos de sensores de posición y desplazamiento, tanto angular como lineal. Los más utilizados en sistemas de control de movimiento, y a los cuales nos referiremos principalmente en este capítulo, son los codificadores ópticos, los potenciómetros y los transformadores diferenciales lineales (LVDTs). También se dispone de otras estructuras de sensores de posición magnéticos, ópticos, capacitivos, etc., como los codificadores magnéticos, los sincros, los resolucionadores (*resolvers*) y los transductores de desplazamiento lineal, entre otros.

Los **codificadores ópticos**, **figura 5.14**, son dispositivos electromecánicos basados en la utilización de un disco o rotor



Figura 5.14. Codificadores ópticos

Sensores para sistemas de control de movimiento

ranurado, acoplado a un eje, que se mueve entre una fuente de luz y un detector. A medida que gira el disco, un patrón de áreas transparentes y oscuras impreso en el mismo habilita o inhibe selectivamente el paso de luz hacia el detector, produciéndose como respuesta una señal digital que puede ser fácilmente

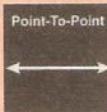
interpretada por el controlador de movimiento del sistema y utilizada para corregir la posición de un objeto o llevarlo de un punto a otro.

En la **figura 5.15** se ilustra el principio de funcionamiento de un codificador óptico rotatorio. Típicamente, la fuente de

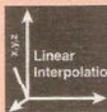
luz es un LED infrarrojo o láser y el detector un fototransistor o un fotodiodo. El disco, también llamado **gratícula**, puede ser de plástico, Mylar, vidrio o metal. Para mejorar la resolución del conjunto, se utiliza una fuente de luz colimada y se coloca una máscara estacionaria entre la gratícula rotatoria y el detector.

Para saber más

Modos de operación de los controladores de movimiento



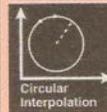
Modo punto a punto. Cada eje se programa independientemente con los parámetros del perfil de movimiento deseado. Los valores de la velocidad, la aceleración, la desaceleración, la posición del objetivo, etc., se cargan con prioridad al comando de arranque.



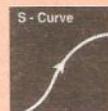
Modo de interpolación de vector lineal. Se pueden asignar ejes a un espacio vectorial. El control de movimiento de los ejes sigue exactamente el camino vectorial deseado, a los valores programados de los vectores de velocidad, aceleración y desaceleración. Los espacios vectoriales pueden contener uno, dos o tres ejes y se pueden sincronizar múltiples espacios vectoriales. También se pueden secuenciar y mezclar perfiles de movimiento para conseguir una transición más uniforme.



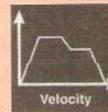
Modo maestro/esclavo o engranaje electrónico. Se puede configurar cualquier eje o conjunto de ejes para correr a una relación de velocidad determinada con respecto a cualquier eje maestro. El eje maestro puede ser únicamente la realimentación del codificador, o un motor bajo control de lazo cerrado. Estos modos se usan, por ejemplo, en bobinadoras de alambre, cuchillas rotatorias, etiquetado de alta velocidad, etc.



Modos de interpolación circular, esférica y helicoidal. Los parámetros de movimiento que describen arcos, vectores de velocidad y aceleración/desaceleración, radio, ángulo de arranque, y ángulo del objetivo se cargan antes de comenzar el movimiento. Para interpolación helicoidal, se carga también la altura del objetivo (Z), mientras que para interpolación esférica se especifican dos ángulos de arranque y dos de objetivo. El movimiento acelerará hacia la velocidad vectorial mientras sigue el camino indicado por los ángulos y la altura del objetivo.



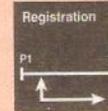
Modos de curva S de aceleración y desaceleración. Proporcionan completa flexibilidad en el control de perfiles para suavizar el movimiento y eliminar las sacudidas de sistemas mecánicos. El grado de pendiente de la curva S en un perfil de movimiento es controlado por factores de suavizado separados para la aceleración y la desaceleración.



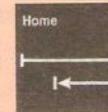
Modo de perfilado de velocidad. Proporciona una aceleración programada por el usuario a una velocidad objetivo deseada, la cual es exactamente mantenida hasta que se carga un nuevo valor de velocidad de objetivo. Usted puede cambiar la velocidad sobre la marcha.



Modo de trote (jog). Se puede programar cualquier eje para correr a una determinada velocidad, llamada **velocidad de trote (jogging)**, usando valores cargados de aceleración, desaceleración y dirección. Cuando se proporciona un comando de arranque, el motor corre a la velocidad de trote hasta que se actualiza un parámetro sobre la marcha o se suministra un comando de parada.



Modo de registro. Se utiliza para capturar la posición exacta durante las transiciones de una señal de entrada de alta velocidad. Así se elimina la latencia y se proporciona un control preciso del motor a altas velocidades. Los valores de posición de entrada capturados son automáticamente combinados con un movimiento de registro. El nuevo movimiento puede ser completado automáticamente.

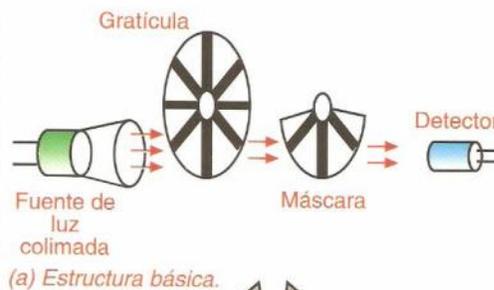


Modo home. Se usa durante la calibración y la inicialización del sistema. Se ejecuta a través de unos comandos que controlan el movimiento para buscar el interruptor de home y un pulso índice opcional. Este último proviene generalmente del codificador de realimentación. Una vez localizado, el sistema se mueve a la posición de offset del índice.

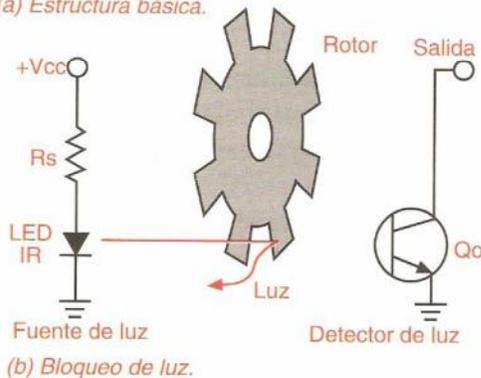
Los codificadores ópticos rotatorios pueden ser **incrementales** o **absolutos**. Los primeros generan un pulso cada vez que el eje gira un tramo definido, mientras que los segundos proporcionan una palabra o código digital de salida para cada posición del eje. También se dispone de **codificadores ópticos lineales**, los cuales determinan la posición de un brazo que se mueve paralelo a un eje.

En la **figura 5.16** se muestra la estructura básica de un codificador óptico incremental rotatorio. Su principal elemento es un disco ranurado, acoplado a un eje, el cual gira entre la fuente de luz y el detector. Esta disposición básica produce a la salida del detector una señal con un nivel DC (*offset*) dependiente de la temperatura, lo cual hace el sistema poco confiable en muchas aplicaciones.

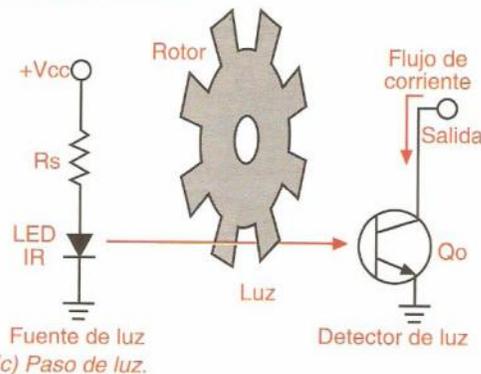
Para solucionar este inconveniente, en la práctica se utilizan realmente dos fotodetectores, dispuestos de modo que produzcan dos señales o **canales** en cuadratura, es decir con una diferencia de fase de 90° entre ellas, **figura 5.17**. Esta característica permite multiplicar la resolución del codificador y es muy útil para determinar la dirección de rotación del eje.



(a) Estructura básica.



(b) Bloqueo de luz.



(c) Paso de luz.



Código de pistas del disco
(d) Forma de onda de salida

Figura 5.15 Principio de funcionamiento de un codificador óptico rotatorio.

Adicionalmente, muchos codificadores incrementales incluyen un tercer canal llamado **marcador**, **índice** o **canal Z**, el cual entrega un pulso por cada revolución y se utiliza para establecer la posición cero o de referencia.

El disco de un codificador óptico incremental, **figura 5.18**, es generalmente de vidrio o metálico y posee una serie de marcas o ranuras posicionadas de una forma muy precisa. La cantidad de marcas o ranuras define la **resolución** o número de pulsos por revolución (ppr) del sistema. Naturalmente, entre mayor sea el diámetro del disco, mayor es el número potencial de pulsos por revolución que pueden acomodarse.

En la mayoría de los casos, los discos de los codificadores incrementales incluyen dos pistas de marcas o ranuras en cuadratura (canales A y B), las cuales producen dos ondas cuadradas desfasadas 90° entre sí. Estas últimas se utilizan para determinar la dirección del movimiento. Por ejemplo, si el canal B adelanta al canal A, el eje está girando en sentido antihorario (CW).

La detección en cuadratura permite también minimizar los errores debidos a vibraciones y duplicar o cuadruplicar la resolución del codificador. Mediante esta técnica, ilustrada en la **figura 5.19**, una sola marca o ranura en cuadratura equivale a dos o cuatro pulsos. Por tanto, un codifica-

Sensores para sistemas de control de movimiento

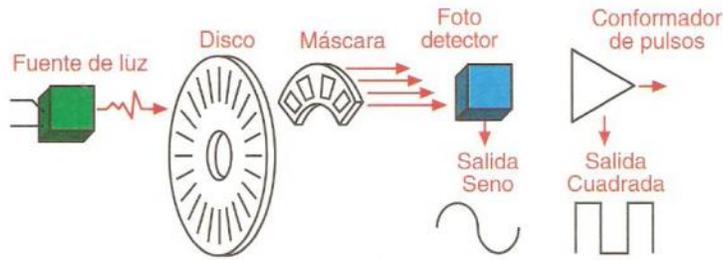


Figura 5.16 Estructura de un codificador óptico incremental rotatorio

dor con una resolución original de 1,000 ppr se convierte en uno de 2,000 o 4,000 ppr.

En adición a los canales en cuadratura y de marca normales, muchos codificadores incrementales entregan también sus señales complementarias,

figura 5.20. Esta característica es útil para detectar la inducción de pulsos de ruido.

Además de su aplicación básica como sensores de posición, los codificadores incrementales pueden ser también utilizados como sensores de

velocidad. La información de velocidad se deriva midiendo el intervalo de tiempo entre pulsos o contando el número de pulsos dentro de una base o período dado de tiempo. En ambos casos, el codificador actúa como un tacómetro de precisión, dependiendo esta última de la perfección de los flancos del disco codificador y/o la exactitud de la base de tiempo externa.

Considérese, por ejemplo, un disco de 4,000 ppr acoplado al eje de una máquina que gira a 1680 rpm (28 rps). En este caso, la frecuencia de los pulsos de salida del codificador es simplemente $28 \times 4,000 = 112,000$ Hz o pps. Si se utiliza una base de tiempo de 15 ms asociada a un contador decimal, el número de pulsos registrados durante este lapso sería, por tanto, $112,000 \times 0.015 = 1680$. Esta cifra (1680) es numéricamente igual a la velocidad, en revoluciones por minuto, de la máquina.

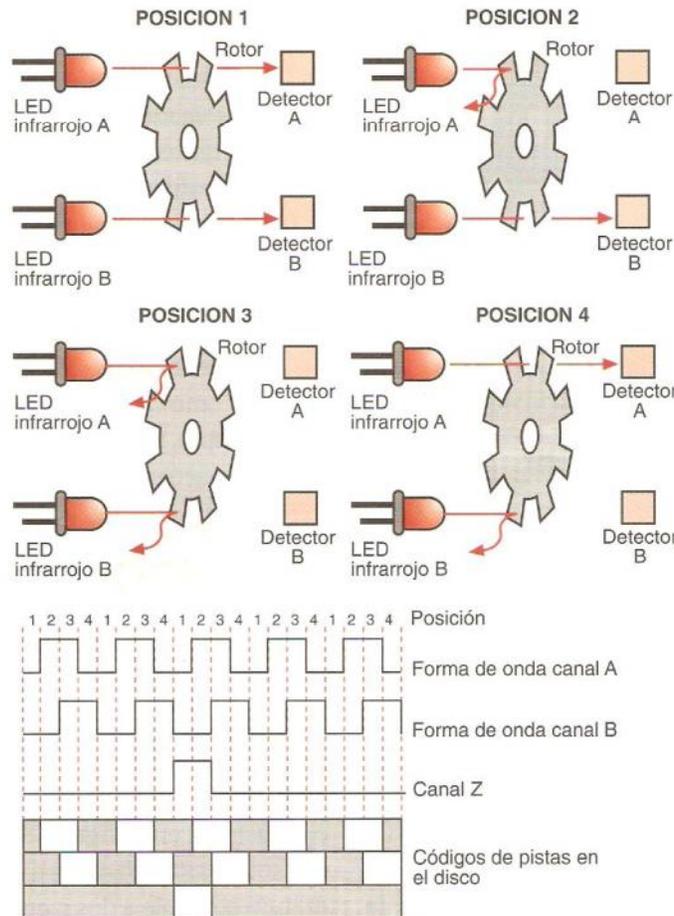


Figura 5.17 Canales de salida en cuadratura en un codificador incremental

Codificadores absolutos

Los codificadores absolutos son dispositivos sensores de posición relativamente sofisticados que proporcionan un código digital de salida para cada posición del eje impulsor del disco. Por tanto, no requieren de un pulso de marca (Z) ni de dispositivos de conteo y sincronización externos para

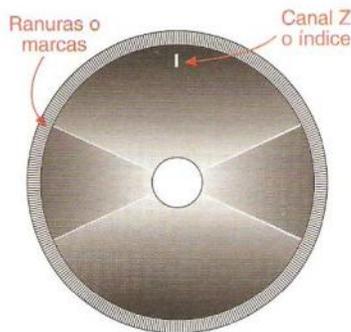


Figura 5.18 Estructura de un disco de codificador incremental

determinar la posición del mismo. Esta característica los hace particularmente adecuados en aplicaciones de control de movimiento y de procesos donde las fallas en el suministro de potencia son frecuentes, y en situaciones donde es difícil o imposible establecer un punto de referencia.

Los codificadores absolutos son muy similares en su estructura interna a los codificadores incrementales. Las principales diferencias radican en la construcción del disco, el número de pistas o canales de salida requeridos y la complejidad de la electrónica utilizada. El disco, **figura 5.21**, generalmente metálico, está constituido por varias pistas concéntricas, cada una asociada a una fuente de luz y a un detector

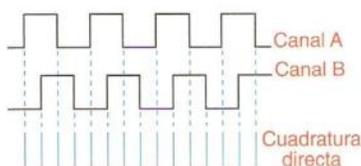


Figura 5.19 Cuadruplicando la resolución de un codificador

independientes. La posición del eje se identifica mediante el patrón de 1's y 0's generado en cada punto. Este patrón es único para cada posición e independiente de los de las demás posiciones.

El número de pistas determina la **resolución**, es decir la cantidad de información de posición que puede ser derivada del disco. Por ejemplo, si el disco tiene 10 pistas, la resolución del codificador sería de 1,024 ppr (posiciones por revolución).

El código de posición proporcionado por el disco es generalmente binario, BCD, gray o una variante de este último. En la **figura 5.22** se muestra como ejemplo una salida binaria de cuatro bits. En la práctica, son comunes las configuraciones de 8 y 16 bits. Estos formatos facilitan la interface directa con PLCs y tarjetas PC.

La resolución de un codificador absoluto puede ser incrementada acoplando mediante engranajes uno o más discos absolutos al disco de alta resolución primario. El sistema así constituido se denomina un **codificador absoluto multivuelta**, **figura 5.23**.

Por ejemplo, si a un disco primario de 10 pistas, es decir con una resolución de 1,024 ppr, se le engrana un segundo

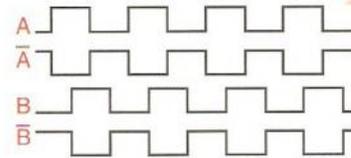


Figura 5.20 Señales de salida complementarias

disco de tres pistas con una relación de 8:1, entonces el codificador así formado tiene ahora una resolución de 8,192 ppr, equivalente a una rotación absoluta de 8 vueltas del eje. Un tercer disco de las mismas características proporcionaría una resolución de 65,536 ppr (64 vueltas de posición absoluta), un cuarto disco una resolución de 524,288 ppr (512 vueltas), y así sucesivamente.

Los codificadores absolutos ofrecen algunas ventajas notables con respecto a los codificadores incrementales. En primer lugar, al estar la información de posición del eje grabada mecánicamente en el disco codificador, no la pierden en caso de una falla en el suministro de

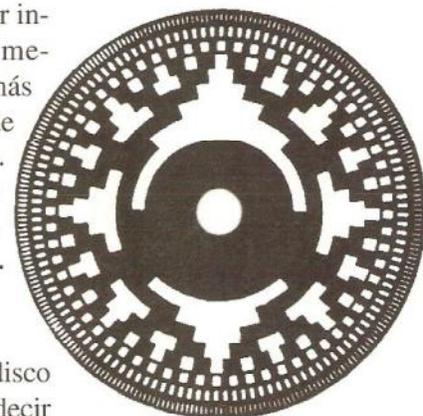


Figura 5.21 Estructura de un disco de codificador absoluto

Sensores para sistemas de control de movimiento

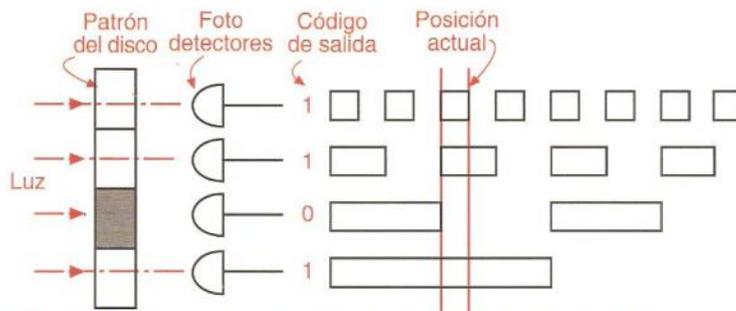


Figura 5.22 Señales de salida de un codificador absoluto de 4 bits

potencia y pueden leerla inmediatamente se restablezca este último. Por la misma razón, pueden operar confiablemente en ambientes eléctricamente ruidosos.

Los codificadores absolutos tampoco necesitan referirse a un punto de referencia para determinar la posición del eje puesto que siempre conocen esta información. En máquinas con múltiples ejes o que no pueden invertir su sentido de rotación, esta característica es de vital importancia porque no siempre es posible establecer un punto de referencia.

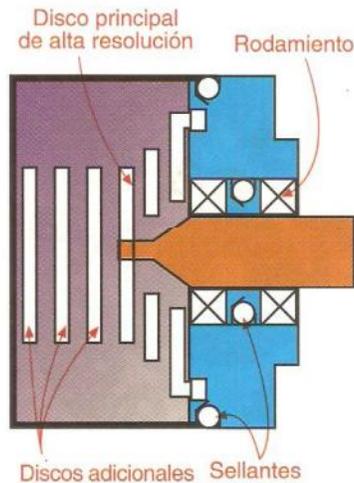


Figura 5.23 Codificador absoluto multivuelta

Adicionalmente, los codificadores absolutos no presentan las limitaciones de velocidad impuestas por el contador de un sistema incremental debido a que no necesitan de dispositivos de conteo ni la observación continua de la posición del eje o la carga. Por tanto, pueden operar a muy altas velocidades, superiores a 100 kHz.

De todas formas, los codificadores incrementales son una excelente opción en aplicaciones donde el costo es un factor importante y el retorno a un punto cero conocido después de una falla en el suministro de potencia no es un problema. Los codificadores absolutos se reservan para aplicaciones más críticas o cuando se requiere transferir la información de posición directamente decodificada a una computadora u otro tipo de controlador.

Para más información sobre otros aspectos prácticos relacionados con el uso de codificadores ópticos, se remite al lector al **Capítulo 4** de la sección de **Actividades Prácticas**.

Potenciómetros

Los **potenciómetros**, figura 5.24, son sensores de posición relativamente simples formados por un elemento conductor de resistencia fija y uniforme, alimentado con un voltaje AC o DC constante y sobre el cual se desliza un cursor metálico. Este último es accionado por el eje de movimiento del sistema o el objeto bajo medición, de modo que a cada posición corresponde un voltaje equivalente entre el cursor y cualquiera de los extremos.

Son generalmente del tipo rotatorio, con un grado de libertad de 330°, aunque también existen potenciómetros de carrera lineal. Por ejemplo, si se aplican 10V entre los extremos de un potenciómetro rotatorio y se obtiene una lectura de 4V entre el extremo de referencia y el cursor, entonces el eje ha girado exactamente 132° desde el origen.

Los potenciómetros tienen la reputación de ser imprecisos debido, entre otros, a los siguientes factores:



Figura 5.24 Potenciómetro rotatorio de acoplamiento magnético

- El desgaste ocasionado por el movimiento del cursor sobre el elemento resistivo, así como la acumulación de residuos procedentes de fricción y oxidación, y las variaciones de temperatura, afectan directamente la resistencia. Estos problemas han sido resueltos con el desarrollo de nuevos materiales, incluyendo ciertos plásticos conductores que no se desgastan ni oxidan.



Figura 5.25 Inclínómetros o potenciómetros de medición de inclinación

- La fuerte dependencia del voltaje de salida (V_o) del voltaje aplicado (V). En este caso, cualquier variación en V afecta directamente a V_o . Por esta razón, muchas veces se prefiere medir la relación V/V_o en lugar del voltaje V_o . Este método se denomina **ratiométrico** y tiene la ventaja de entregar una salida que sólo depende del ángulo girado por el cursor.

Los potenciómetros, como veremos más adelante, se utilizan también como transductores primarios para sensar presión, nivel, y otras variables físicas. Asimismo, mediante disposiciones especiales, pueden ser utilizados como **inclinómetros**, es decir medidores de ángulos de inclinación, **figura 5.25**. Algunos de estos dispositivos utilizan como elemento resistivo un fluido electrolítico, contenido en un tubo de vidrio y dentro del

cual se forma una burbuja de aire. Otros, por su parte, consisten en un sustrato vertical que soporta un resistor y un conductor concéntricos. Este último guía una bola metálica que hace las veces del cursor y permanece en posición vertical. En ambos casos, al inclinar el tubo o el soporte, cambia la resistencia entre el electrodo central y los de los extremos.

Transformadores variables

Los **transformadores variables**, cuyo principio de funcionamiento se ilustra en la **figura 5.26**, miden desplazamientos o cambios posicionales variando la posición relativa de uno o más devanados secundarios con respecto al devanado primario. Cuando esto se hace, varían el acoplamiento magnético y la inductancia mutua entre ambos devanados, y por tanto la tensión inducida en el secundario. Esta última es proporcional al coseno del ángulo de inclinación. Con respecto a los codificadores y los poten-

ciómetros, los transformadores variables ofrecen las siguientes ventajas:

- Por su baja masa inercial, imponen menos carga mecánica al eje de giro.
 - Por su construcción más robusta, soportan mejor los choques, las vibraciones y las altas temperaturas.
- Pueden transmitir información analógica de posición a distancias hasta de 2 km.

Las ventajas inherentes de los transformadores variables han llevado al desarrollo de diversas configuraciones físicas, siendo una de las más simples el llamado **potencióme-**

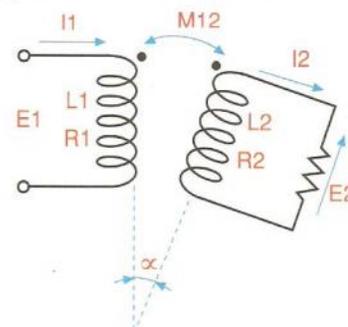


Figura 5.26 Principio de funcionamiento de un transformador variable

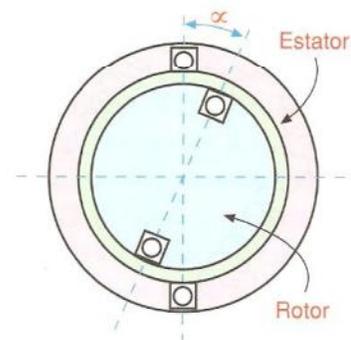


Figura 5.27 Potenciómetro de inducción

Sensores para sistemas de control de movimiento

tro de inducción, figura 5.27, formado por dos devanados planos concéntricos, uno fijo (estator) y otro móvil (rotor), cada uno con su propio núcleo ferromagnético. Al alimentar cualquiera de ellos con una tensión AC, en el otro se induce una tensión proporcional al coseno del ángulo de inclinación entre los mismos. Otras estructuras importantes de transformadores variables son los sincros, los *resolvers* y los *inductosyn*.

Los **sincros**, por ejemplo, **figura 5.28,** constan de un estator cilíndrico y un rotor en forma de H que gira solidario al eje cuya rotación se va a medir. El estator posee tres devanados dispuestos a 120° entre sí y conectados en estrella, y el rotor uno o tres devanados. Al aplicar una tensión AC al rotor, se inducen en las bobinas del estator tres tensiones en fase, diferenciadas únicamente por su envolvente. La amplitud de esta última es proporcional, respectivamente, a

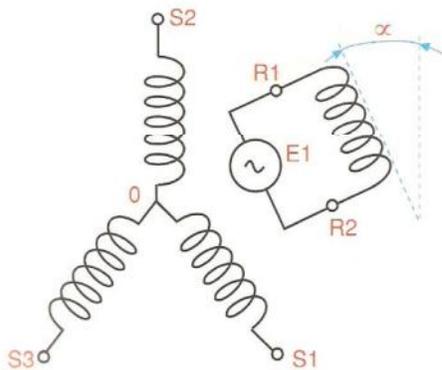


Figura 5.28 Transformador trifásico sincrónico o sincro

$\text{sen } \alpha$, $\text{sen } (\alpha + 120^\circ)$ y $\text{sen } (\alpha + 240^\circ)$, siendo α el ángulo de inclinación del rotor. En un caso típico, la tensión AC aplicada al rotor es del orden de $26\text{V @ } 400\text{ Hz}$. Otros valores usuales de voltaje y frecuencia son 11.8V , 115V , 50 Hz , 60 Hz y 2600 Hz .

Los **resolvers** o **resolucio- nadores, figura 5.29,** son similares en su construcción a los sincros, excepto que sus devanados están dispuestos formando un ángulo de 90° tanto en el estator como en el rotor. Nuevamente, a medida que gira el eje, cambia la posición relativa entre los devanados del rotor y el estator, lo cual causa que varíe la amplitud o el desplazamiento de fase de la señal inducida en el secundario. A partir de esta información puede deducirse la posición angular del eje, utilizándose para ello varios métodos, siendo los más comunes el seguimiento ratiométrico y la digitalización de fase. La estructura mostrada en la **figura 5.29** corresponde al primer caso.

Observe que cuando la bobina del rotor está en la posición $\alpha = 0^\circ$, la misma queda paralela a la bobina coseno y perpendicular a la bobina seno. Por tanto, la tensión inducida en la primera es máxima y en la segunda es cero. A medida que el rotor se mueve de la posición de 0° hacia la

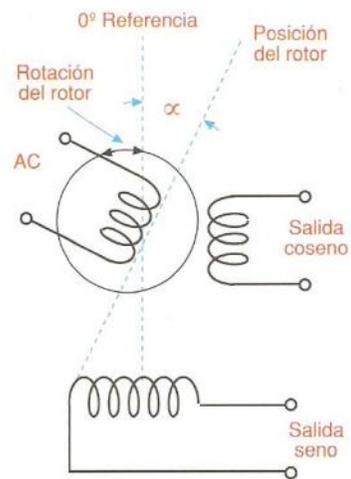


Figura 5.29 Principio de funcionamiento de un resolver de seguimiento ratiométrico

posición de 90° , se induce progresivamente menos voltaje en la bobina coseno y más en la bobina seno. Del mismo modo se analizan las otras posiciones. Por tanto, cualquier valor de α entre 0 y 360° está determinado por una combinación única de formas de onda producidas en las bobinas seno y coseno. Procesando estas señales mediante un convertidor A/D apropiado puede determinarse la posición absoluta.

En un **resolver de digitalización de fase, figura 5.30,** hay dos devanados en el rotor a 90° y dos devanados en el estator, también a 90° . El dispositivo opera sobre el principio de que un desplazamiento de fase entre una señal de referencia fija y el voltaje inducido en el rotor es una medida directa de la posición del eje de movimiento. A uno de los devanados del estator se apli-

ca una señal de 10 Vpp, 20 kHz, conocida como RPO (*Reference Phase Output*), y al otro una señal idéntica desfasada 90°, conocida como QPO (*Quadrature Phase Output*). A medida que gira el eje, cambia la posición del rotor y por tanto la magnitud y la fase del voltaje inducido por los devanados RPO y QPO. Procesando estas señales a través de circuitos electrónicos apropiados, se obtiene una indicación de posición absoluta.

Finalmente, el **inductosyn**, figura 5.31, es un transformador variable especialmente diseñado para medir posición lineal en forma directa. Consta de dos pistas conductoras de circuito impreso de cierta longitud (desde 25 cm hasta 36 m) que siguen un patrón regular, similar a un tren de pulsos cuadrados. Una de las pistas, llamada **escala**, es fija, mientras que la otra, llamada **deslizador**, es móvil, se alimen-

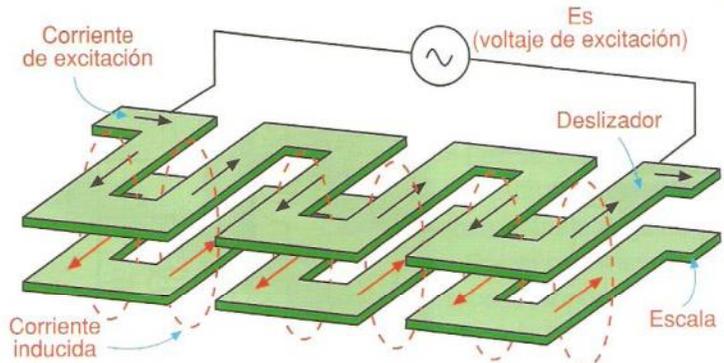


Figura 5.31 Principio de funcionamiento de un Inductosyn

ta mediante una tensión AC y se desplaza paralelamente a la primera. La tensión inducida en el deslizador depende de la posición relativa de un circuito respecto al otro, siendo máxima cuando ambos coinciden. El deslizador es movido por el objeto bajo medición, digamos el carro de una máquina herramienta.

Transformadores diferenciales de variación lineal (LVDTs)

Otra forma muy común de medir desplazamientos lineales, desde menos de 100 mm hasta más de 50 cm, es utilizando un **LVDT** (*Linear Variable Differential Transformer*), figura 5.32. Este dispositivo basa su operación en la variación de la inductancia mutua entre un primario y cada uno de dos secundarios cuando se desplaza en su interior un núcleo ferromagnético, accionado por el objeto bajo medición. Al aplicar un voltaje alterno a la bobina primaria, en las bobinas secundarias, conectadas

en antiserie, se induce un voltaje cuya magnitud y fase dependen, respectivamente, de la posición del núcleo y de la dirección del movimiento.

Si el núcleo está perfectamente centrado, los voltajes inducidos en ambos secundarios son idénticos y se cancelan. Por tanto, el voltaje de salida neto es cero. A medida que el núcleo se mueve hacia arriba, aumenta el voltaje inducido en el secundario 1 y disminuye el inducido en el secundario 2. Como resultado, el voltaje de salida tiende a estar en fase con el voltaje de entrada. Igualmente, a medida que el núcleo se mueve hacia abajo, aumenta el voltaje inducido en el secundario 2 y disminuye el inducido en el secundario 1. Por tanto, el voltaje de salida tiende a estar en oposición de fase con el voltaje de entrada. Los LVDTs, como veremos en capítulos posteriores, son también muy utilizados como transductores primarios para la medición de fuerza, presión y otras variables mecánicas.

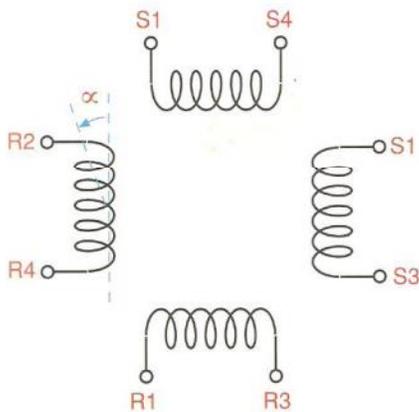


Figura 5.30 Principio de funcionamiento de un resolver de digitalización de fase

Sensores para sistemas de control de movimiento

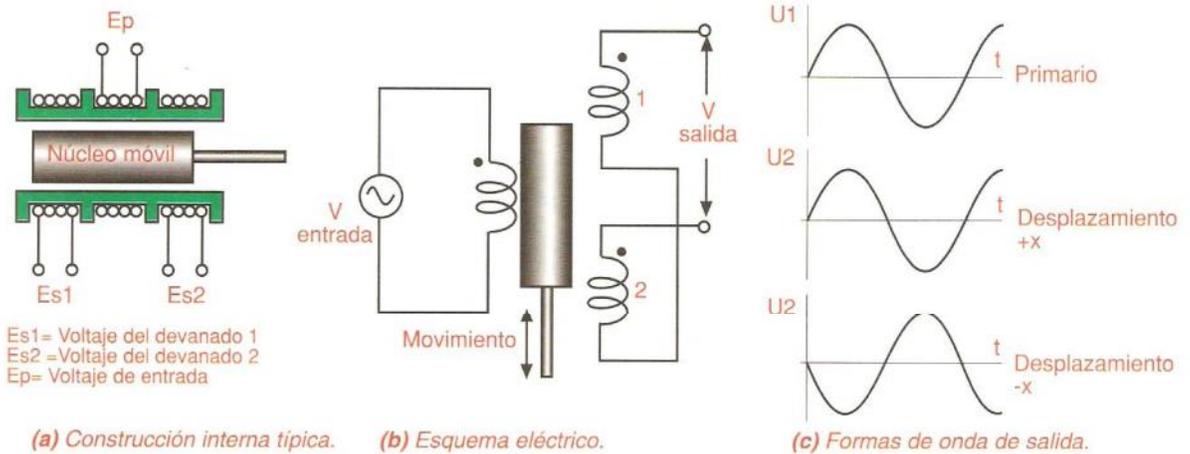


Figura 5.32 Transformador diferencial de variación lineal (LVDT)

Sensores de velocidad. Tacómetros

La medición y el control de velocidad son parte fundamental de muchos servomecanismos industriales. Por esta razón, se han desarrollado varios tipos de sensores, análogos y digitales, que convierten información de velocidad en señales eléctricas equivalentes. Los sensores digitales están generalmente basados en codificadores ópticos o captadores inductivos, mientras que los análogos lo están en los mismos principios de los generadores o dinamos. De cualquier modo, su comportamiento dinámico

depende fuertemente del acoplamiento con el eje del movimiento. Este acoplamiento debe ser flexible, pero sin permitir holguras o juego libre.

Los transductores de velocidad reciben el nombre genérico de **tacómetros**. En los mismos, la velocidad puede estar representada por la magnitud o la frecuencia de un voltaje generado. En la **figura 5.33** se muestra como ejemplo el principio de funcionamiento de un **tacómetro de rotor dentado**, la estructura más común de tacómetro de frecuencia. El mismo posee un rotor con varios dientes de material ferromagnético, y un

estator constituido por un imán permanente con una bobina de alambre enrollada a su alrededor. A medida que gira el rotor, los dientes se aproximan y alejan sucesivamente del imán, induciéndose en la bobina un tren de pulsos de frecuencia proporcional a la velocidad.

Otras estructuras comunes de tacómetros son la **dínamo tacométrica**, el tacómetro de rotor de metal no magnético, el tacómetro de campo rotatorio de AC y el tacómetro fotoeléctrico. Los dos primeros son de magnitud y los dos últimos de frecuencia. La **dínamo tacométrica**, por ejemplo, es esencialmente un generador DC donde el campo lo establece un imán permanente montado en el estator, y el voltaje de salida, obtenido en el devanado del rotor, es directamente proporcional a la velocidad angular de giro del eje. La polaridad de este voltaje, a su vez, indica la dirección del movimiento.

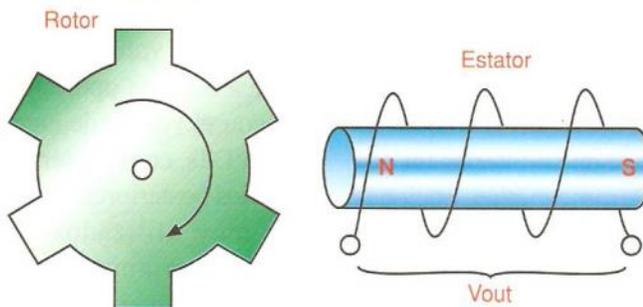


Figura 5.33 Principio de funcionamiento de un tacómetro de rotor dentado

