

# **SENSORES PARA MEDIR DESPLAZAMIENTO**

**SERGIO BARROS FERNANDEZ**

Los **sensores** utilizados para medir desplazamiento pueden ser de diversos tipos:

- **Sensores resistivos (Potenciómetros)**
- **Sensores inductivos : LVDT, RVDT, Resolvers, Sincroresolvers**
- **Sensores magnéticos: Magnetoresistivos, Efecto Hall**
- **Sensores capacitivos**
- **Sensores ópticos : Encoders**

### **Potenciómetros**

Un Potenciómetro es un dispositivo electromecánico que consta de una resistencia de valor fijo sobre la que se desplaza un contacto deslizante llamado cursor y que la divide eléctricamente

La aplicación mas común de los potenciómetros en instrumentación es como sensor de desplazamiento de tipo resistivo. El movimiento del cursor origina un cambio en la resistencia, el cual puede utilizarse para medir desplazamientos lineales o angulares de piezas acopladas al cursor.

Los potenciómetros pueden usarse para medir diversas magnitudes físicas siempre que se puedan convertir en desplazamiento.

Los elementos resistivos utilizados en los potenciómetros son de diferentes tipos. Se usan principalmente el bobinado que es muy lineal y también el plástico conductor que a parte de la linealidad ofrece una vida muy larga. Pero, existen en el mercado una variedad de elementos resistivos que se utilizan en los potenciómetros. El elemento más popular es el carbón, su mejor característica es el precio pero como inconvenientes tiene las variaciones de temperatura y su vida. El cermet es una combinación de material cerámico y metal que mejora muchísimo las características del carbón. Después se encuentra el bobinado, que sus principales ventajas son el bajo coeficiente de temperatura, su vida mecánica, bajo ruido, alta disipación, y estabilidad con el tiempo. Otro elemento utilizado es el plástico conductor que mejora en todas las características respecto a los demás elementos, pero tiene un precio superior.

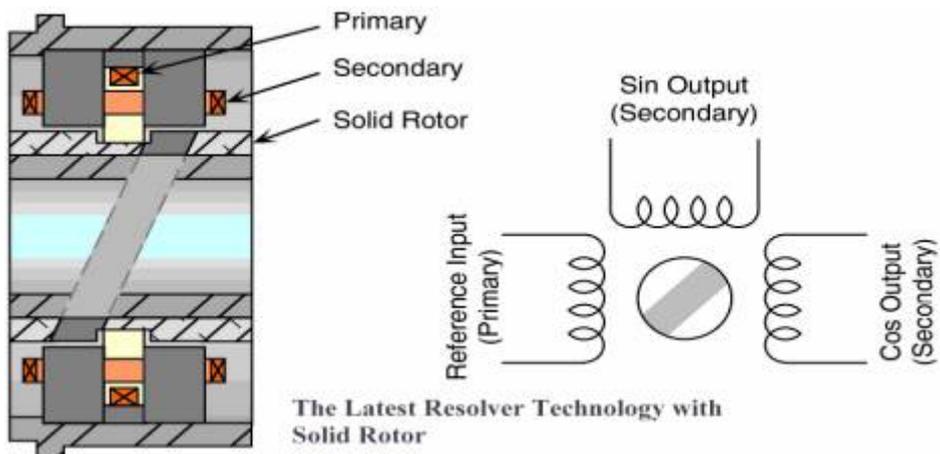
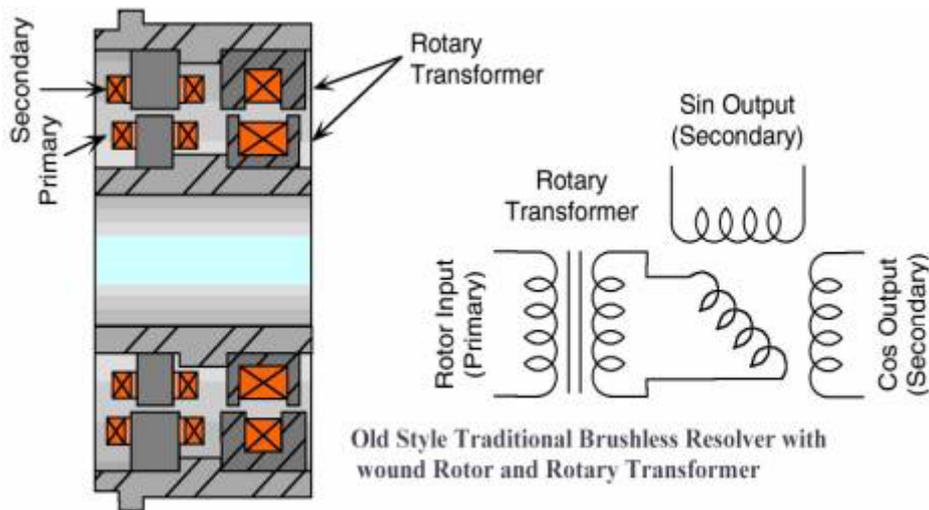
El problema de los potenciómetros es que debido a diversos problemas hayan caído en desuso y hayan sido sustituidos por otro dispositivos mas fiables.

## Sensores inductivos

### 1. Resolvers y Sincroresolvers

Se trata de sensores analógicos con resolución teóricamente infinita. El funcionamiento de los resolvers se basa en la utilización de una bobina solidaria al eje excitada por una portadora, generalmente con 400Hz, y por dos bobinas fijas situadas a su alrededor.

En las siguientes figuras se puede ver la disposición de las bobinas. En la primera en su estilo antiguo y en la segunda con una tecnología mas moderna.

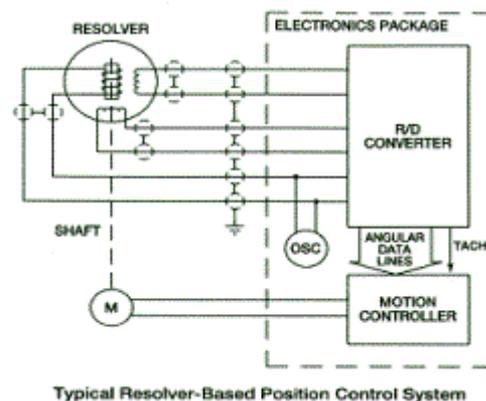
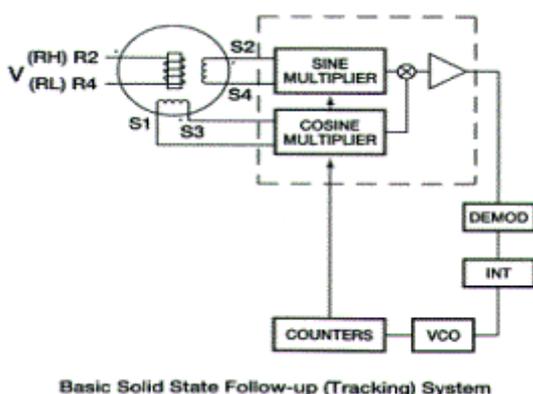
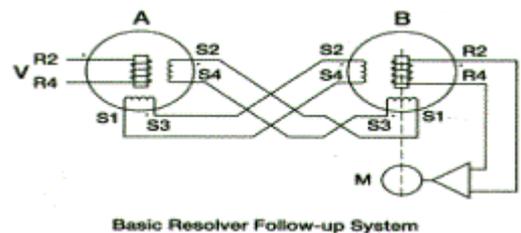
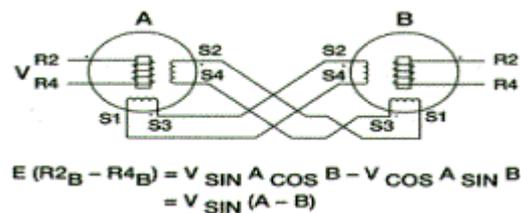
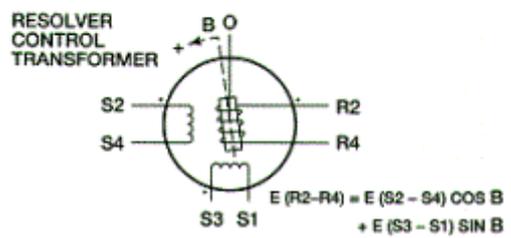
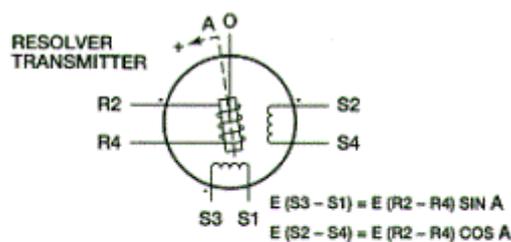


El giro de la bobina móvil hace que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe, consiguiendo que la señal resultante en estas dependa del seno del ángulo de giro. La bobina móvil excitada con tensión  $V_{sen}(wt)$  y girada un ángulo  $\theta$  induce en las bobinas fijas situadas en cuadratura las siguientes tensiones:

$$V_1 = V_{sen}(wt) \sin \theta$$

$$V_2 = V_{sen}(wt) \cos \theta$$

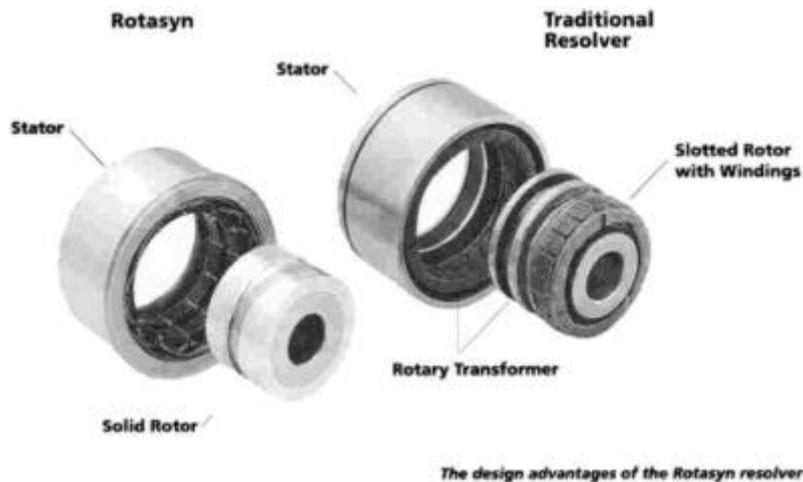
El cambio del llamado formato sincro a formato resolver o viceversa es inmediato, ya que se puede pasar de uno a otro a través de la llamada red de scott, transformador de scott o funcionamiento bidireccional. Para poder tratar el sistema de control la información generada por los resolvers y los sincros es necesario convertir las señales analógicas en digitales. Para ello se utilizan los llamados convertidores resolver/ digital (r/d), que tradicionalmente se basan en dos tipos de estructuras distintas tracking y muestreo (sampling).



Entre sus ventajas destacan su buena robustez mecánica durante el funcionamiento y su inmunidad a contaminación, humedad, altas temperaturas y vibraciones. Debido a su reducido momento de inercia, imponen poca carga mecánica del funcionamiento del eje.

<b>Comparación entre distintos sensores de posición angular.</b>				
	<b>Robustez mecánica</b>	<b>Rango dinámico</b>	<b>Resolución</b>	<b>Estabilidad térmica</b>
Encoder	mala	media	buena	buena
Resolver	buena	buena	buena	buena
Potenciómetro	regular	mala	mala	mala

Dado el carácter continuo de la señal, la resolución de los resolvers es teóricamente infinita. Bien es verdad que depende en la mayoría de las ocasiones de una electrónica asociada, lo que limita la precisión de forma práctica. En cada caso de los codificadores ópticos. El rango dinámico se encuentra más limitado en el caso de los codificadores ópticos la resolución viene limitada por el número de secciones opaco-transparentes que se utilicen.



La exactitud estática, definida como la diferencia entre la posición física del eje y la señal eléctrica de salida, es relativamente alta tanto en los resolvers como en los codificadores ópticos o digitales, no así en los resolvers donde con conversiones R/D adecuadas se puede trabajar con velocidades superiores a las 6000 rpm.

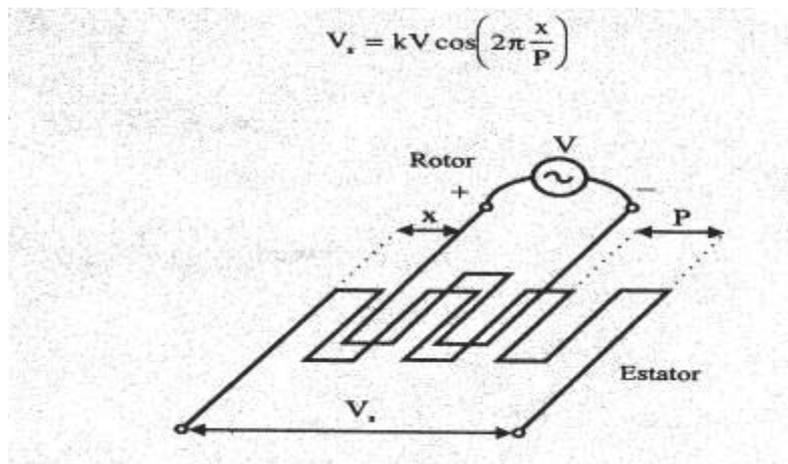
## 2. Transformador diferencial lineal (LVDT)

Entre los sensores de posición lineales destaca el transformador diferencial de variación lineal (LVDT) debido a su casi infinita resolución, poco rozamiento y alta repetibilidad. Su funcionamiento se basa en la utilización de un núcleo de material ferromagnético unido al eje cuyo movimiento se quiere medir. Este núcleo se mueve linealmente entre un devanado primario y dos secundarios haciendo con su movimiento que varíe la inductancia entre ellos.

Los dos devanados secundarios conectados en oposición en serie ven como la inducción de la tensión alterna del primario, al variar la posición del núcleo, hace crecer la tensión de un devanado y disminuirá en el otro. Del estudio de la tensión  $E$  se deduce que esta es proporcional a la diferencia de inductancias mutuas entre el devanado primario con cada uno de los secundarios, y que por tanto depende linealmente del desplazamiento del vástago solidario al núcleo.

Además de las ventajas señaladas, el LVDT presenta una alta linealidad, gran sensibilidad y una respuesta dinámica elevada. Su uso está ampliamente extendido, a pesar del inconveniente de poder ser aplicado únicamente en la medición de pequeños desplazamientos.

Otros sensores lineales que también se emplean con relativa frecuencia son las denominadas reglas ópticas (equivalentes a los codificadores ópticos angulares) y las reglas magnéticas o Inductosyn. El funcionamiento del Inductosyn es similar a la del resolver con la diferencia de que el rotor desliza linealmente sobre el estator (un esquema de su funcionamiento se puede ver en la figura siguiente).



El estator se encuentra excitado por una tensión conocida que induce en el rotor dependiendo de su posición relativa una tensión  $V_s$ .

### **3. Transformador diferencial rotatorio (RVDT)**

Mientras que los LVDT miden desplazamiento lineal, los RVDT miden desplazamiento angular. El máximo rango de medida de posición angular es aproximadamente  $\pm 60^\circ$ . Cuando los RVDT trabajan en el rango de los  $\pm 40^\circ$ , el dispositivo típico tiene un error de linealidad de 0.2% a fondo de escala. Si el desplazamiento angular se mantiene en  $\pm 5^\circ$  el error de linealidad se reduce por debajo del 0.1% a fondo de escala. El eje está soportado por cojinetes de bolas que minimizan la fricción y la histéresis mecánica.

Los transductores LVDT y RVDT son utilizados extensamente en medición y aplicaciones de control de medida de desplazamientos desde micro pulgadas hasta varios pies. Se encuentran en sistemas de metrología, en posición de válvulas, en actuadores hidráulicos. Otras aplicaciones de estos transductores, como células de carga o sensores de presión utilizando LVDT internamente.

## **Sensores magnéticos**

### **1. Sensores magnetorresistivos**

El efecto magneto-resistivo data de 1856, donde Thomson observó este efecto aunque no se encontró ninguna aplicación práctica. Posteriormente con los semiconductores se empezó a utilizar como detectores de movimiento.

Básicamente, los sensores magnetorresistivos (MR) utilizan el efecto magneto-resistivo, que se basa en la propiedad de un material que cambia su resistividad por la presencia de un campo magnético externo. Este efecto se usa principalmente para la medición angular y la velocidad rotacional, donde no se requiera la linealización de la característica del sensor.

La gama de sensores magnetorresistivos de Philips está caracterizada por su alta sensibilidad en la detección de los campos magnéticos, en un amplio rango de temperatura de trabajo, con un 'offset' muy bajo y estable, y con una baja sensibilidad a la tensión mecánica. Por lo tanto, son un excelente medio de medida tanto en desplazamiento lineal como en angular, bajo condiciones ambientales extremas en aplicaciones en automoción o maquinaria (ruedas dentadas, varillas de metal, levas, etc.). Otra aplicación de los sensores magnetorresistivos es la medición de velocidad rotacional.

Un ejemplo donde las propiedades de los sensores magnetorresistivos pueden ser útiles es en las aplicaciones de automoción, tal como detección de velocidad de una rueda para el ABS, en sistemas de control de motores y en detectores de posición para la medición de la posición de un chasis, en la medición de posición de válvulas o de los pedales.

Otro ejemplo, es en la instrumentación y control de equipos, que frecuentemente requieren sensores de posición capaces de detectar desplazamientos en la región de las décimas de milímetro (o a veces menor) y en sistemas de ignición electrónica donde se tiene que poder determinar con gran precisión la posición angular de un motor de combustión.

Debido a su alta sensibilidad los sensores magnetorresistivos pueden medir campos magnéticos muy débiles y son ideales para aplicaciones en brújulas electrónicas, corrección del campo de la tierra y detección de tráfico.

## **2. Sensores de efecto Hall**

Se recordará por la física elemental que el efecto Hall relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través del material. Cuando se utilizan por sí mismos, los sensores de efecto Hall solo pueden detectar objetos magnetizados. Sin embargo cuando se emplean en conjunción con un imán permanente, son capaces de detectar todos los materiales ferromagnéticos. Cuando se utilizan de dicha manera, un dispositivo de efecto Hall detecta un campo magnético intenso en ausencia de un material ferromagnético en el campo cercano. Cuando dicho material se lleva a la proximidad del dispositivo, el campo magnético se debilita en el sensor debido a la curvatura de las líneas del campo a través del material.

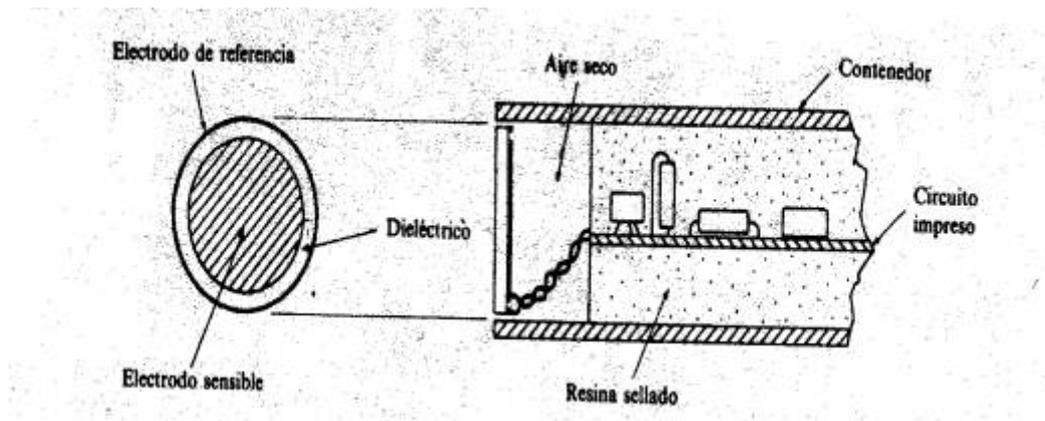
Los sensores de efecto Hall están basados en el principio de una fuerza de Lorentz que actúa sobre una partícula cargada que se desplaza a través de un campo magnético. Esta fuerza actúa sobre un eje perpendicular al plano establecido por la dirección de movimiento de la partícula cargada y la dirección del campo. Es decir, la fuerza de Lorentz viene dada por  $F = q(v \times B)$ , en donde  $q$  es la carga,  $v$  es el vector de velocidad,  $B$  es el vector del campo magnético y  $\times$  es el signo indicativo del producto vectorial.

Al llevar un material ferromagnético cerca del dispositivo de imán semiconductor disminuirá la intensidad del campo magnético, con la consiguiente reducción de la fuerza de Lorentz y, finalmente, la tensión a través del semiconductor. Esta caída en la tensión es la clave para detectar la proximidad con sensores de efecto Hall. Las decisiones binarias con respecto a la presencia de un objeto se realizan estableciendo un umbral de la tensión fuera del sensor.

Además, la utilización de materiales semiconductores permite la construcción de circuitos electrónicos para amplificación y detección directamente en el propio sensor, con lo que se reduce el tamaño y el coste del mismo. El efecto Hall se usa para hacer sensores de desplazamiento, particularmente en aplicaciones de posición y desplazamiento, lineal o rotatorio.

## Sensores capacitivos

A diferencia con los sensores inductivos y de efecto Hall que detectan solamente materiales ferromagnéticos, los sensores capacitivos son potencialmente capaces (con diversos grados de sensibilidad) de detectar todos los materiales sólidos y líquidos. Como su nombre lo indica, estos sensores están basados en la detección de un cambio en la capacidad inducido por una superficie que se lleva cerca del elemento sensor.



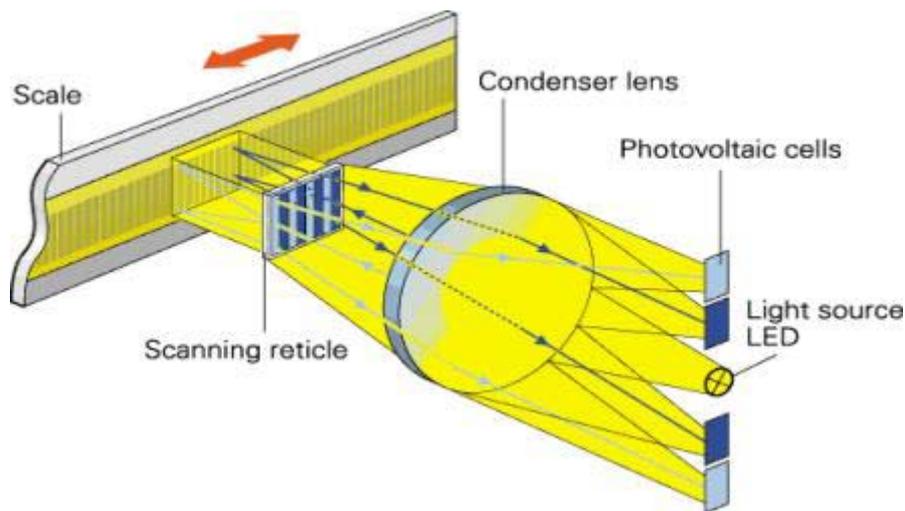
El elemento sensor es un condensador constituido por un electrodo sensible y un electrodo de referencia. Estos electrodos pueden ser, por ejemplo, un disco y un anillo metálicos separados por un material dieléctrico. Una cavidad de aire seco se suele colocar detrás del elemento capacitivo para proporcionar aislamiento. El resto del sensor está constituido por circuitos electrónicos que pueden incluirse como una parte integral de la unidad, en cuyo caso suelen estar embebidos en una resina para proporcionar soporte mecánico y sellado.

## Sensores ópticos (encoders)

Los codificadores ópticos o encoders incrementales constan, en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí de un sistema de iluminación en el que la luz es colimada de forma correcta, y de un elemento fotorreceptor. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco transparente. Con esta disposición a medida que el eje gire se irá generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese cada marca, y llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

Existe, sin embargo, el problema de no saber si en un momento dado se está realizando un giro en un sentido o en otro, con el peligro que supone no estar contando adecuadamente. Una solución a este problema consiste en disponer de otra franja de marcas, desplazada de la anterior de manera que el tren de pulsos que con ella se genere este desplazado 90° eléctricos con respecto al generado por la primera franja.

De esta manera, con un circuito relativamente sencillo es posible obtener una señal adicional que indique cual es el sentido de giro, y que actúe sobre el contador correspondiente indicando que incrementa o disminuye la cuenta que se está realizando. Es necesario además disponer de una marca de referencia sobre el disco que indique que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se ha de empezar la cuenta de nuevo. Esta marca sirve también para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión.



#### **Esquema de funcionamiento del codificador angular de posición Encoder**

La resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco. Un método relativamente sencillo para aumentar esta resolución es, no solamente contabilizar los flancos de subida de los trenes de pulsos, sino contabilizar también los de bajada, incrementando así la resolución del captador, pudiéndose llegar, con ayuda de circuitos adicionales, hasta 100,000 pulsos por vuelta.

El funcionamiento básico de los codificadores o encoders absolutos es similar al de los incrementales. Se tiene una fuente de luz con las lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado y unos fotorreceptores. En este caso, el disco transparente se divide en un número determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos según un código binario cíclico (normalmente código Gray) que queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente.

No es necesario ahora ningún contador o electrónica adicional para detectar el sentido del giro, pues cada posición (sector) es codificado de forma absoluta. Su resolución es fija, y vendrá dada por el número de anillos que posea el disco graduado. Resoluciones habituales van desde  $2^8$  a  $2^{19}$  bits (desde 256 a 524288 posiciones distintas). Normalmente estos sensores se acoplan al eje de un motor. Considerando que en la mayor parte de los casos entre el eje del motor y el de la articulación se sitúa un reductor de relación N, cada movimiento de la articulación se verá multiplicado por N al ser medido por el sensor. Este aumentará así su resolución multiplicándola por N.

Este problema se soluciona en los encoders absolutos con la utilización de otro encoder absoluto más pequeño conectado por un engranaje reductor al principal, de manera que cuando este gire una vuelta completa, el codificado adicional avanzara una posición. Son los denominados encoder absolutos multivuelta.

Esta misma circunstancia originará que en el caso de los codificadores incrementales la señal de referencia o marca de cero, sea insuficiente para detectar el punto origen para la cuenta de pulsos, pues habrá N posibles puntos de referencia para un giro completo de la articulación. Para distinguir cual de ellos es el correcto se suele utilizar un detector de presencia denominado sincronismo.

Cuando se detecta la conmutación de presencia o ausencia de pieza, o viceversa, se atiende al encoder incremental, tomándose como posición de origen la correspondiente al primer pulso de marca de cero que aquel genere.

Los encoders pueden presentar problemas mecánicos debido a la gran precisión que se debe tener en su fabricación. La contaminación ambiental puede ser una fuente de interferencias en la transmisión óptica. Son dispositivos particularmente sensibles a golpes y vibraciones, estando su margen de temperatura de trabajo limitado por la presencia de componentes electrónicos.

## **1. Encoders lineales**

El desarrollo continuo en estos últimos años ha alcanzado un punto donde es posible construir grandes sistemas que pueden proporcionar una mejora significativa en los resultados de mecanizado, así como en la productividad.

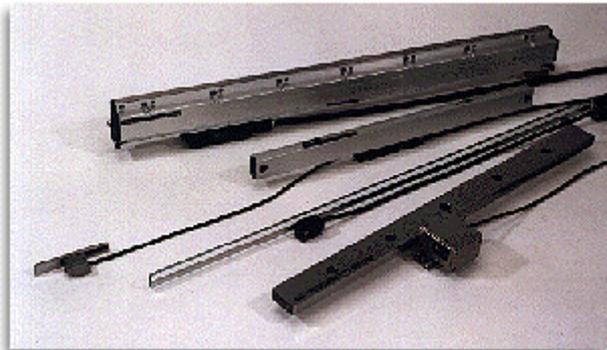
Las posibles aplicaciones para los motores lineales en el metal (industria cortante) se caracterizan por los siguientes tres requisitos:

- La exactitud contorneando a altas velocidades
- La capacidad de aceleración alta en la máquina
- Las velocidades altas permisibles

Los constructores de máquinas están empezando a mostrar un interés fuerte en los motores lineales. Durante años, HEIDENHAIN ha estado desarrollando el encoder lineal para las aplicaciones en los motores lineales en paralelo.

El ingeniero que diseña una máquina con motores lineales debe decidir si es factible incorporar un encoder lineal. Un sistema expuesto se recomienda si el ambiente a la máquina está bastante limpio para asegurar que no hay ninguna amenaza de contaminar el sistema óptico. Sin embargo, si la máquina hace uso de refrigerante y lubricante deben usarse los encoders lineales completamente encapsulados (sellados). Las velocidades generalmente no presentan ningún problema para el encoder lineal sellado en las aplicaciones típicas. La ventaja primaria del encoder lineal sellado es que se montan más rápido, pero la exactitud es menor.

Se encuentran por consiguiente más a menudo los encoders lineales expuestos en las máquinas de precisión, mientras que los encoders lineales sellados se usan ampliamente en las herramientas de las máquinas cortantes de metal.



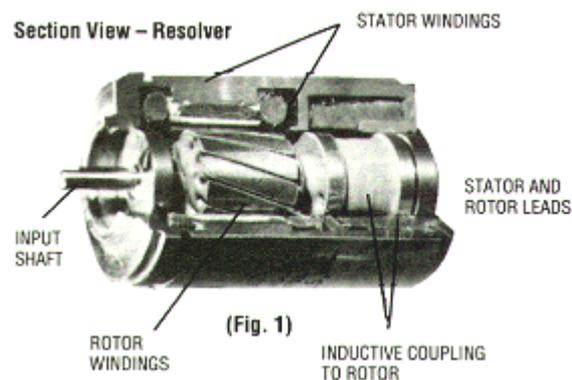
**Encoder lineal usado en máquinas cortantes**

Frecuentemente, el encoder está demasiado fijo a la máquina. En los motores lineales, esto puede producir algún tipo de fallo. A menudo es falsamente supuesto que la falla está en el propio encoder lineal.

Es más, debe asegurarse que el encoder lineal no se encuentre mal sujetado a la máquina, y así evitar situaciones de vibración. En particular, los puntos de vibración máxima deben ser evitados.

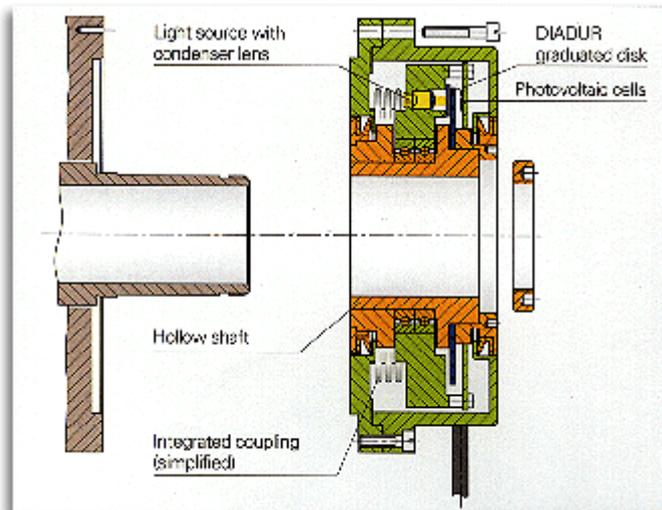
## 2. Encoders rotatorios

Los encoders rotatorios se emplean cuando se necesitan una exactitud y resolución muy altas.



**Encoder rotatorio**

El encoder incremental rotatorio proporciona altas exactitudes. Esto les hace aplicables en sectores como el textil, donde deben sincronizarse estrechamente los cilindros de la impresión para guardar los colores en el registro.



**Encoder incremental rotatorio**

En la figura se puede ver una sección de un encoder en construcción, ilustrándose algunos de los rasgos que contribuyen a la alta exactitud. Se conecta el árbol del motor rígidamente al rotor del encoder, a menudo a través del asiento cónico generalmente preferido. En acoplamientos de este tipo los tornillos se montan de manera que compensen las desviaciones en la excentricidad entre la pestaña del encoder y motor.

Los encoders rotatorios emplean varias técnicas para asegurar altos rendimientos de exactitud. Estas técnicas involucran el uso de acoplamientos rígidos entre el encoder y árbol del motor, la compensación para las temperaturas altas, y la filtración óptica de la forma señalada.

El uso de la interpolación es imperativo para conseguir una buena exactitud. Una manera de garantizar tal calidad, se ha determinado en el uso de filtración óptica en el encoder. Esta filtración consiste en la representación de una integración en los signos recibidos. La exactitud mejora ya que la integración deja fuera las imperfecciones pequeñas en el arranque. La forma de señal se perfecciona usando un método especial para eliminar los componentes señalados a causa de luz diferente.

Las ópticas de encoder pueden soportar temperaturas entre 100 y 120 grados C. En consecuencia, deben llevar las fuentes ligeras especialmente diseñadas para que puedan resistir tales temperaturas. También se regula la intensidad para compensar por alto la caída de temperatura fuera de la sensibilidad de las células fotovoltaicas utilizadas en el encoder. Estas células se seleccionan para que conserven las calidades operando casi idénticas por encima de la temperatura. Esto también promueve la exactitud alta en la interpolación de los signos del encoder.

Otro factor crucial para la exactitud, es el acoplamiento rígido está entre el encoder y árbol del motor. La manera convencional de conectar un encoder a un árbol de motor es con un acoplamiento localizado en el rotor del encoder. El problema es que este acoplamiento comprende un sistema de masa que al alcanzar su frecuencia natural le hace perder estabilidad. Una buena alternativa es localizar el acoplamiento en el lado del estator del encoder. Los acoplamientos del rotor también se pueden compensar para estos efectos, pero puede inducir a errores en la medición de 40° grados en el proceso.