

## *Sensores digitales*

La creciente presencia de sistemas digitales para el tratamiento y presentación de la información en los sistemas de medida y control, hace muy atractivos aquellos sensores que ofrecen directamente a su salida una señal en forma digital, por la simplificación que suponen en el acondicionamiento de señales y su mayor inmunidad a las interferencias electromagnéticas en determinados casos.

Se distingue aquí dos tipos de sensores digitales. Los primeros ofrecen directamente una señal digital a partir de una entrada analógica; este grupo lo forman los codificadores de posición. El segundo tipo es el de los sensores que se basan en un fenómeno físico de tipo oscilatorio, transducido posteriormente por un sensor modulador convencional. Los sensores de este grupo se denominan autoresonantes, de frecuencia variable, o casi digitales, y necesitan un circuito electrónico posterior (un contador) para ofrecer la señal digital deseada. Se diferencia de los osciladores variables en que estos últimos incorporan un sensor modulador en un oscilador, mientras ahora se trata de un oscilador no electrónico del que se mide una de las variables mediante un sensor modulador. Una excepción son los termómetros digitales de cuarzo, que emplean un sensor generador.

Es de destacar que no hay prácticamente ningún fenómeno cuya transducción dé directamente una salida digital. Lo que se hace propiamente es convertir una magnitud analógica de entrada en una señal digital por medio de un sensor, sin necesidad de convertir una tensión analógica en su equivalente digital.

### 5.1 CODIFICADORES DE POSICIÓN

#### 5.1.1. Codificadores incrementales

La medida de posiciones lineales y angulares ha sido hasta el momento el único campo con abundantes desarrollos comerciales de sensores con salida digital, incluso antes de la era del microprocesador. Aun así, un grupo de estos sensores, los denominamos codificadores incrementales, es de tipo "casidigital", pero por razones de afinidad los trataremos aquí.

En un codificador de posición incremental hay un elemento lineal o un disco con poca inercia que se desplaza solidario a la pieza cuya posición se desea determinar. Dicho elemento posee dos tipos de zonas o sectores, con una prioridad que las diferencia, dispuesta de forma alternativa y equidistante, tal como se indica en la figura 5.1. De este modo, un incremento de posición produce un cambio definido en la salida si se detecta dicha prioridad cambiante con la posición mediante un dispositivo o cabezal de lectura fijo. La resolución, de un sensor angular, dada como número de impulsos de salida, es

$$N = \frac{\pi D}{2 X} \quad (1.1)$$

donde D es el diámetro del disco y X la anchura de cada sector codificado.

La simplicidad y economía de esta técnica no admiten duda, pero tiene una serie de inconvenientes que conviene señalar. En primer lugar, la información sobre la posición se pierde en cuanto falta la alimentación del sistema, o simplemente cuando se desconecta, y en presencia de interfaces fuertes. En segundo lugar, es necesario un contador bidireccional para poder tener una salida digital compatible con los elementos de entrada-salida de un ordenador; y en tercer lugar, no permite detectar el sentido de avance si no se dispone de elementos adicionales a los indicados en la figura 5.1. Las propiedades empleadas para la diferenciación de los sectores pueden ser magnéticas, eléctricas u ópticas. La salida básica suele ser en forma de un tren de pulsos con un ciclo de trabajo del 50%.

Una regla o rueda dentada de material ferromagnético dará un impulso de tensión cada vez que pase por delante de una bobina fija dispuesta en un campo magnético

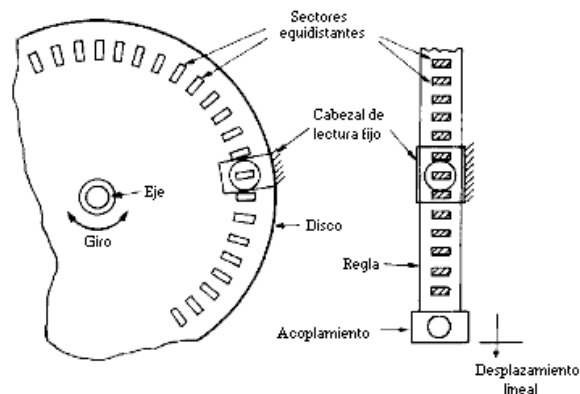


Figura 5.1 Principio de los codificadores de posición incrementales para posiciones lineales y angulares.

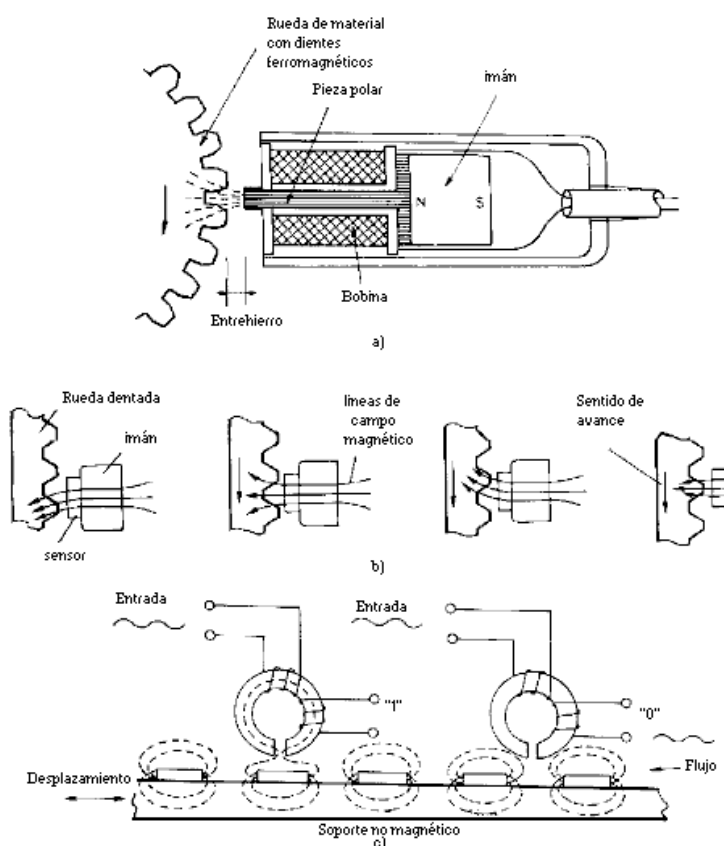


Figura 5.2 Distintos tipos de sensores para codificadores de posición incrementales magnéticos: a) bobina e imán; b) imán y sensor magnetorresistivo; c) núcleo toroidal.

constante (figura 5.2a). La forma de la señal obtenida es casi senoidal, pero ésta se puede recuadrar o simplemente determinar sus pasos por cero. Lógicamente, hay una velocidad mínima y una máxima que determinan el margen de aplicación de este método. La falta de respuesta a velocidades bajas, es una de sus limitaciones principales. En la figura 5.2b se presenta un codificador similar pero con sensor magnetorresistivo. La curvatura de las líneas de campo magnético depende de qué zona de la rueda queda enfrentada al sensor. La salida es independiente de la distancia a la rueda, dentro del margen de medida.

En la figura 5.2c se presenta otro sistema inductivo pero basado en un núcleo toroidal con dos bobinas. Una se emplea para la excitación, con corrientes de 20 a 200Khz, y otra para la detección. En esta última hay dos

estados: "1" cuando se detecta tensión alguna y "0" cuando se detecta una tensión de frecuencia igual a la de excitación. El elemento móvil posee zonas con material magnetizado. de este modo, cuando éste queda delante de la cabeza de lectura la satura porque el flujo que emana del material se suma al creado por la señal de excitación; con el núcleo saturado no se detecta tensión alguna en la segunda bobina ( $e=d\phi/dt$ , y  $\phi$  tiene el valor de saturación, constante): estado "1". Cuando delante de la cabeza de lectura hay una zona que no posee material magnetizado, la segunda bobina detecta una tensión inducida por la primera, estado "0". Una variante de la técnica anterior emplea también material magnetizado, pero el detector es de efecto Hall, magnetorresistivo o de efecto Wiegand.

Los codificadores eléctricos pueden ser capacitivos o de contacto. Los capacitivos emplean una disposición similar al Inductosyn, pero sin apantallamiento eléctrico entre la pista fija y la móvil. De esta forma hay un cambio de capacidad cíclico, con un periodo igual a la distancia entre líneas, que puede ser de 0,4mm. Este sistema es inmune a campos magnéticos. En los codificadores de contacto (Figura 5.3), en el elemento móvil hay sectores conductores (cobre dorado o plateado) y aislantes (melamina) realizados mediante fotograbado, empleándose escobillas del mismo conductor para la lectura. Los inconvenientes de desgaste y pérdida de contacto de éstas en caso de vibraciones, vienen contrarrestados por la obtención de tensiones de salidas que no requieren amplificación, por su menor precio. No obstante, es una técnica cada vez menos empleada en beneficio de las que no requieren contacto alguno.

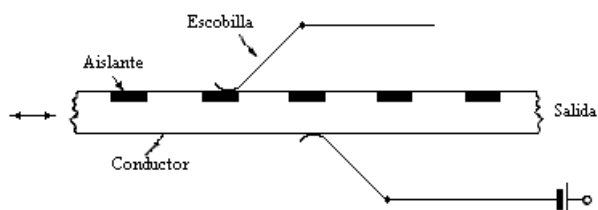


Figura 5.3 Codificador de posición incremental con escobillas y contacto eléctrico.

Los codificadores ópticos pueden estar basados en sectores opacos y transparentes, en sectores reflectores y no reflectores, o en franjas de interferencia. en cualquier caso, en el cabezal de lectura fijo hay siempre una fuente de luz, normalmente un LED infrarrojo, y un fotodetector (LDR, célula fotoeléctrica o fototransistor). Los problemas asociados son relativos a la influencia del polvo ambiental y humo, a la degradación temporal y térmica de las características de los elementos optoelectrónicos y al efecto de las vibraciones sobre los posibles sistema de enfoques.

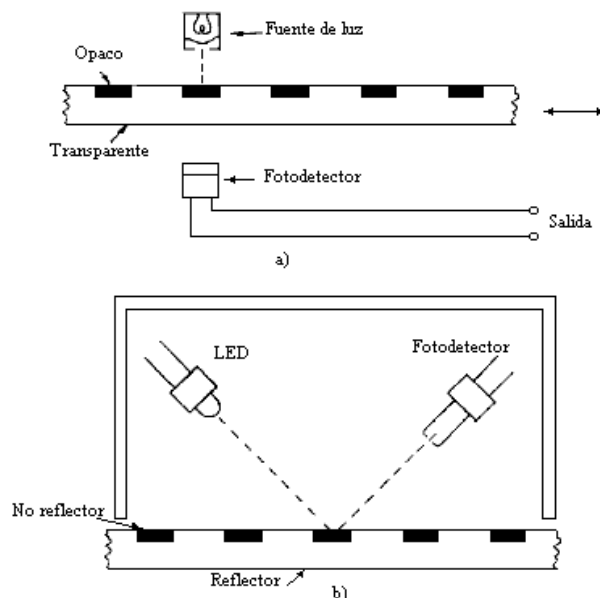


Figura 5.4 Codificador incremental óptico: a) con sectores opacos y transparentes; b) con zonas reflectoras y no reflectoras. Cuando se emplean sectores opacos y transparentes, cromo sobre vidrio, metal ranurado, etc. (Figura 5.4a), el emisor y el detector deben situarse uno a cada lado del elemento móvil. En cambio, cuando se emplean sectores reflectores y no reflectores, por ejemplo acero pulido con surcos grabados en su superficie (Figura 5.4b) el emisor y el detector deben estar del mismo lado. Los discos de vidrio son mas estables, rígidos, duros y planos que los metálicos, pero tienen menor resistencia a los choques y vibraciones.

Los codificadores de franjas de interferencia están basados en las figuras de Moiré. Para producirlas mediante un movimiento lineal se puede emplear una regla fija y otra móvil que tenga una serie de rayas inclinadas una respecto a la otra (figura 5.5). Si la inclinación  $\alpha$  es tal que  $\alpha = p/d$ , cuando hay un desplazamiento relativo de recorrido  $p$  (paso entre líneas) se produce un desplazamiento vertical  $d$  de una franja oscura horizontal. Si la inclinación es  $n$  veces mayor, aparecen  $n$  franjas oscuras horizontales.

Si se trata de un movimiento giratorio, para obtener franjas de interferencia se pueden emplear dos discos superpuestos, uno fijo y otro móvil, que tengan uno  $N$  rayas en dirección radial y el otro  $N+1$ . También se obtienen franjas de interferencia si en ambos hay  $N$  rayas pero están descentradas, o bien  $N$  rayas con distinta inclinación. Si se disponen un emisor y un detector de luz, este detecta una señal casi senoidal con  $N$  ciclos por vuelta si se trata de un codificador angular.

La resolución obtenida con los codificadores incrementales angulares es del orden de 100 a 6000 cuentas/vuelta, que se puede aumentar fácilmente en un factor de 100 en el caso de que el detector ofrezca varias salidas senoidales desfasadas, entonces es posible interpolar entre máximos sucesivos.

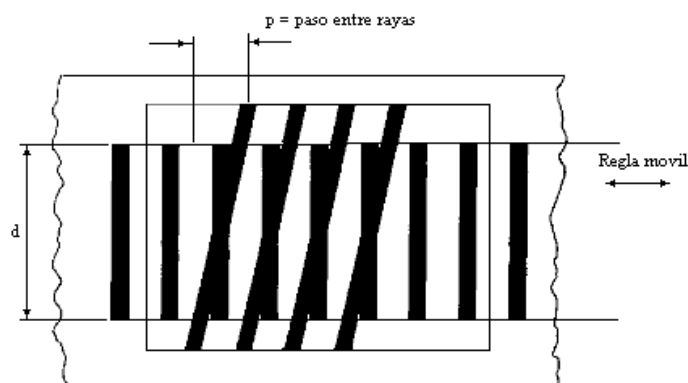


Figura 5.5 Codificador incremental óptico basado en franjas de interferencia. La franja oscura horizontal se desplaza en dirección vertical al deslizar la regla móvil.

Los diámetros van de 25 a 90mm. La vida de los modelos sin contacto es de hasta 2 millones de vueltas. Los codificadores incrementales lineales se emplean para medir posiciones con una resolución de hasta 400 líneas/mm y una exactitud de  $50$  a  $100 \times 10^{-6}$ . Se aplican para situar los cabezales de lectura en discos magnéticos y unidades de cinta magnética de bajo costo, las herramientas en máquinas-herramienta y las plumillas en máquinas de dibujo; para controlar el avance del papel en impresoras, fotocopiadoras, y máquinas de facsímil; y en metrología dimensional. Los modelos angulares pequeños, denominados generadores rotativos de impulsos, sustituyen a los potenciómetros de control usados en los paneles de los instrumentos electrónicos, los cuales ofrecen una vida útil unas 10 veces mayor.

Los codificadores que ofrecen mayor resolución son los ópticos. Dado que en estos viene limitada por el tamaño del fotodetector, una forma de aumentar la resolución consiste en disponer una o varias rejillas fijas entre el elemento móvil y el detector, que tengan zonas opacas y transparentes con el mismo paso (apertura) que el elemento codificado (figura 5.6). De este modo el detector recibirá el máximo de luz cuando todas las rejillas y el elemento codificado móvil estén perfectamente

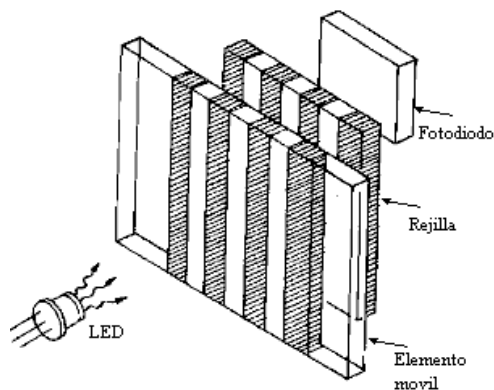


Figura 5.6 Disposición de una rejilla fija para eliminar el campo del fotodetector, ampliando así la resolución.

alineados. Conforme este último se desplace de dicha posición, la luz recibida irá decreciendo hasta alcanzar un mínimo. El fotodetector promedia la señal de más de una rendija, con lo que compensa posibles desigualdades en éstas. Al disponer de una señal continua entre máximos, es posible interpolar.

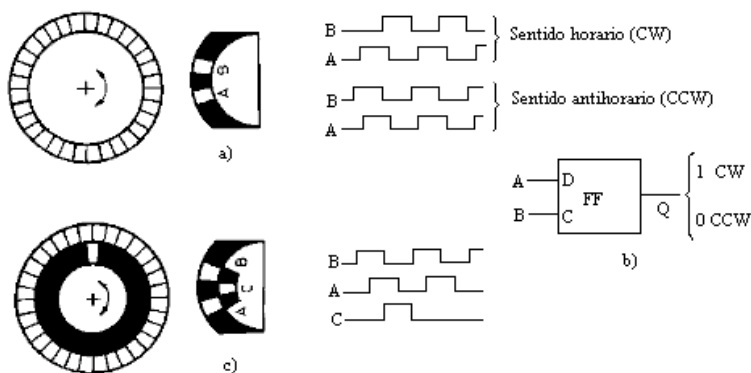


Figura 5.7 Determinación del sentido de avance con codificadores incrementales. a) Mediante dos salidas desfasadas 90°; b) circuito electrónico de salida; c) señal adicional para el posicionamiento absoluto.

Para poder determinar el sentido de avance es necesario añadir otro elemento de lectura y, a veces, otra pista codificada, junto con circuitos electrónicos adecuados. En los codificadores inductivos se añade otra bobina sensora que dé una señal desfasada 90° respecto de la anterior, y un detector de fase que dará una indicación del sentido de giro (figura 5.7a). En los codificadores ópticos y de contacto (eléctricos), se añade una línea de sectores codificados que esté ligeramente desfasada respecto de la primera y con su elemento de lectura correspondiente. en la (figura 5.7b) se presenta un circuito electrónico que permite obtener una señal indicadora del sentido de avance. En los codificadores de franjas de interferencia y en los ópticos de alta resolución se emplean dos conjuntos ópticos que den salidas a 90° uno de otro, y a veces otros dos conjuntos a 180° de los anteriores, estos últimos para aumentar aún más la resolución.

Cuando se dispone de dos señales de salida en cuadratura, se puede duplicar la resolución simplemente haciendo la O-exclusiva entre ellas (figura 5.8a). Con una sola señal también se puede duplicar la resolución derivando y rectificando los

impulsos (figura 5.9b), y recuadrándolos luego. Si estas operaciones se hacen para los dos canales, la resolución se cuadruplica. Para mejorar más la resolución, se puede interpolar entre dos posiciones aprovechando que las tensiones de salida directa de los sensores en cuadratura son casi senoidales; el cociente entre tensiones dará el ángulo de fase. Si las tensiones se digitalizan con 6 bits y se busca en una tabla almacenada en ROM que ángulo corresponde a cada cociente, se obtiene una mejora de resolución de hasta 256.

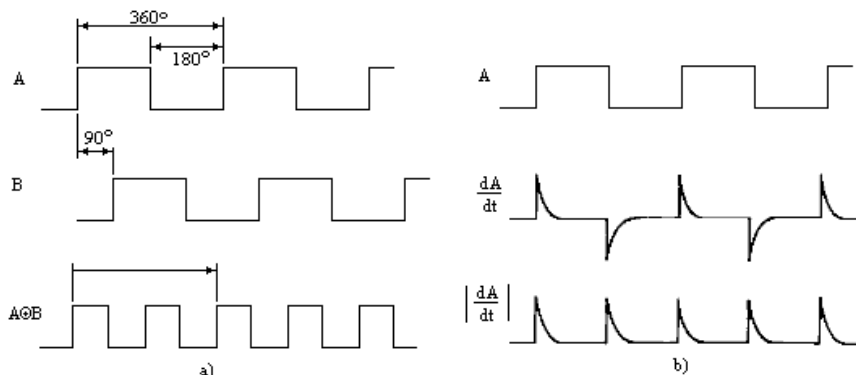


Figura 5.8 duplicación de la resolución en codificadores incrementales a) Empleando dos señales en cuadratura; b) Derivando y rectificando los impulsos.

Para realizar un posicionamiento absoluto, es necesario un contador bidireccional al que se aplican los pulsos de salida del detector. El sentido de la cuenta se determina con la señal que indica el sentido de avance, y la puesta a cero se hace mediante una tercera señal ofrecida por el codificador, consistente en un pulso por cada vuelta (caso de ser giratorio) (figura 5.7c). Esta tercera señal es útil también para situar de nuevo el contador cuando a fallado la alimentación.

Cuando se desea medir una velocidad de rotación, el empleo de un codificador incremental como el descrito puede venir limitado por la velocidad máxima de los circuitos electrónicos si la velocidad de giro es elevada. Para estas aplicaciones hay tacómetros digitales que están basados en el mismo principio, disponen sólo de un sector o a lo sumo unos cuantos, de manera que se obtienen menos pulsos a cada vuelta.

### 5.1.2 Codificadores absolutos

Los codificadores de posición absolutos ofrecen a su salida una señal codificada correspondiente a la posición de un elemento móvil, regla o disco, con respecto a una referencia interna. Para ello, el elemento móvil dispone de zonas con una propiedad que las distingue, y a las que se asigna un valor binario "0" o "1". Pero, a diferencia de los codificadores incrementales, hay varias pistas con zonas diferenciadas y están agrupadas de tal forma que el sistema de lectura obtiene directamente, en cada posición del elemento móvil, el número codificado que da su posición (figura 5.9).

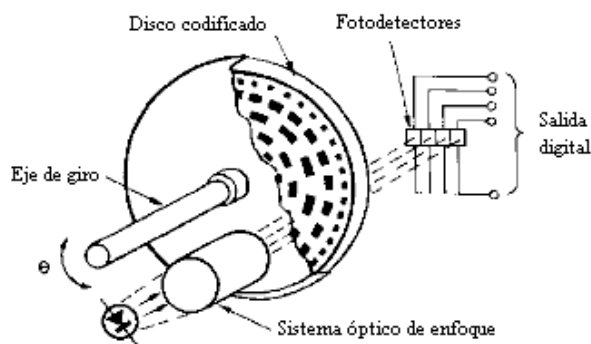


Figura 5.9 Principio de funcionamiento de los codificadores de posición absolutos para movimientos lineales y angulares.

Cada pista representa un bit de salida, siendo la pista más interior la correspondiente al bit de mayor peso. Los tipos de sensores más empleados en este caso son los óptico, con zonas opacas y transparentes y en menor medida, los de contacto, con zonas conductoras y aislantes. Hay conjuntos de fotosensores integrados que facilitan en gran manera la realización del codificador.

Estos codificadores tienen inmunidad intrínseca frente a las interrupciones e interferencias electromagnéticas, pero ello es a costa de unos cabezales de lectura que son mucho más complejos que en los codificadores

incrementales. Esto se debe a que hay tantos elementos de lectura como pistas y a la necesidad de que todos ellos estén bien alineados, de forma contraria, el código ofrecido a la salida puede estar formado por bits correspondiente a dos posiciones contiguas (en particular cuando se produzca la transición de una a otra). El código resultante puede corresponder a una posición muy distante de la real. Si, por ejemplo, se emplea el código binario natural, en un sistema con 8 bits las posiciones 3 y 4 vienen dadas por:

Posición 3 0 0 0 0 0 1 1

Posición 4 0 0 0 0 0 1 0 0

Si los elementos de lectura están un poco desalineados, por ejemplo si los dos primeros están un poco adelantados, al pasar de la posición 3 a la 4 puede que en un instante dado la lectura de salida sea 00 000 000. Una forma de resolver este problema es empleando códigos binarios con distancia unidad en todas las posiciones, es decir, códigos en los que de una posición a la contigua cambie solo un bit. En el código binario natural, si hay N posiciones hay N/2 transiciones en las que cambia mas de un bit.

En el cuadro 5.1 se presenta el paso de cada bit y el aspecto de las zonas codificadas de acuerdo con distintos códigos. El código continuo más empleado en codificadores es el Gray.

Su inconveniente es que si la información hay que mandarla a un ordenador, conviene convertir la salida a código binario. Si el objeto de la medida es sólo la presentación numérica de la posición, hay que convertir la salida a código BCD. Estas conversiones se obvian en el caso de tener el disco codificado directamente en el código de utilización final, pero entonces surge el problema de la ambigüedad. Si la

información se va transmitir en un ambiente ruidoso, el código Gray no permite la detección de errores de transmisión. Otro método para resolver el problema de ambigüedad consiste en disponer un doble juego de cabezales de lectura desplazados entre sí una distancia determinada, empleando luego una regla de decisión para aceptar la lectura de uno u otro sensor para cada pista.

Cuadro 5.10 Códigos habituales en codificadores de posición absoluta.

Número decimal	Binario		Decimal codificado en binario (BCD)				Gray	
	Código	Sectores	Código		Sectores		Código	Sectores
			2ª Década	1ª Década	2ª Década	1ª Década		
	32 16 8 4 2 1	32 16 8 4 2 1	8 4 2 1	8 4 2 1	8 4 2 1	8 4 2 1	31 15 7 3 1	31 15 7 3 1
0	0 0 0 0 0 0		0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0		0 0 0 0	
1	0 0 0 0 0 1		0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 1		0 0 0 0	
2	0 0 0 0 1 0		0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 1 0		0 0 0 1	
3	0 0 0 0 1 1		0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 1 1		0 0 0 1	
4	0 0 0 1 0 0		0 0 0 1	0 0 0 0	0 1 0 0		0 0 1 1	
5	0 0 0 1 0 1		0 0 0 1	0 0 0 0	0 1 0 1		0 0 1 1	
6	0 0 0 1 1 0		0 0 0 1	0 0 0 1	0 1 1 0		0 0 1 0	
7	0 0 0 1 1 1		0 0 0 1	0 0 0 1	0 1 1 1		0 0 1 0	
8	0 0 1 0 0 0		0 0 1 0	0 0 0 0	0 1 0 0		0 1 1 0	
9	0 0 1 0 0 1		0 0 1 0	0 0 0 0	0 1 0 1		0 1 1 0	
10	0 0 1 0 1 0		0 0 1 0	0 0 0 1	0 1 1 0		0 1 1 1	
11	0 0 1 0 1 1		0 0 1 0	0 0 0 1	0 1 1 1		0 1 1 1	
12	0 0 1 1 0 0		0 0 1 1	0 0 0 0	0 1 0 0		0 1 0 1	
13	0 0 1 1 0 1		0 0 1 1	0 0 0 0	0 1 0 1		0 1 0 1	
14	0 0 1 1 1 0		0 0 1 1	0 0 0 1	0 1 1 0		1 1 0 1	
15	0 0 1 1 1 1		0 0 1 1	0 0 0 1	0 1 1 1		1 1 0 1	
16	0 1 0 0 0 0		0 1 0 0	0 0 0 0	1 0 0 0		1 1 0 0	
17	0 1 0 0 0 1		0 1 0 0	0 0 0 0	1 0 0 1		1 1 0 0	
18	0 1 0 0 1 0		0 1 0 0	0 0 0 1	1 0 1 0		1 1 0 1	
19	0 1 0 0 1 1		0 1 0 0	0 0 0 1	1 0 1 1		1 1 0 1	
20	0 1 0 1 0 0		0 1 0 1	0 0 0 0	1 0 0 0		1 1 1 0	
21	0 1 0 1 0 1		0 1 0 1	0 0 0 0	1 0 0 1		1 1 1 0	
22	0 1 0 1 1 0		0 1 0 1	0 0 0 1	1 0 1 0		1 1 1 1	
23	0 1 0 1 1 1		0 1 0 1	0 0 0 1	1 0 1 1		1 1 1 1	
24	0 1 1 0 0 0		0 1 1 0	0 0 0 0	1 1 0 0		1 0 1 0	
25	0 1 1 0 0 1		0 1 1 0	0 0 0 0	1 1 0 1		1 0 1 0	

También se puede disponer una marca en el centro de cada sector, aceptando entonces la lectura del cabezal sólo cuando hay garantía de estar en zona que no es de transición entre las posiciones. Una memoria almacena la última lectura obtenida y se actualiza cuando hay un cambio válido.

La resolución que se obtiene con estos codificadores es de 6 a 21 bits en código Gray (8 a 12 es lo habitual), con diámetros de 50 a 175 mm para los codificadores angulares. El tamaño se indica mediante el diámetro en pulgadas y multiplicado por 10. Para aumentar la resolución, la opción más inmediata es aumentar el número de pistas codificadas, pero el inevitable aumento de diámetro e inercia limita esta solución. El empleo de un

engranaje y otro codificador es una alternativa, aunque la resolución final siempre queda limitada por la obtenible por el primer disco. La señal eléctrica de salida suele ser TTL con colector abierto.

Para aumentar la resolución también se puede emplear el sistema de nonio expuesto para los codificadores incrementales. Para ello se añade una pista adicional, dispuesta en dirección radial, en la parte más externa del disco, tal como se muestra en la figura 5.10a.

La aplicación de los codificadores de posición son relativas a la medida y control de posiciones lineales y angulares con alta resolución. Se emplea así en robótica, grúas, válvulas hidráulicas, mesas de dibujos automáticas (plotters), máquinas herramientas, posicionamiento de cabezales de lectura en discos magnéticos y de fuentes de radiación en radioterapia, radar, orientación de telescopios, etc. También se pueden aplicar a la medida de magnitudes que se pueden convertir en un desplazamiento por medio de un sensor primario adecuado.

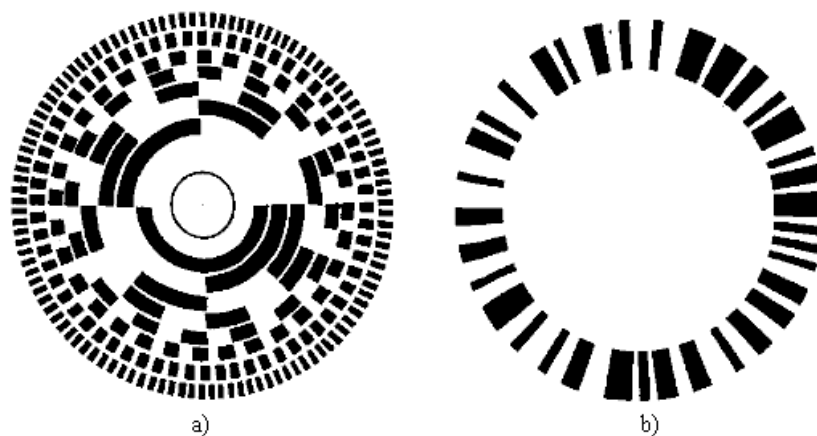


Figura 5.10 a) Discos de un codificador digital que añade una pista externa para aumentar la resolución mediante un sistema de rejillas fijas. b) Codificador absoluto basado en un código pseudoaleatorio.

Por ejemplo, para medidas de nivel con flotador. Los codificadores absolutos son indicados en aplicaciones donde el elemento móvil permanece inactivo durante periodos de tiempo prolongados, por ejemplo antenas parabólicas, o cuando se mueve lentamente. También interesan cuando se desea ahorrar energía, por qué sólo hace falta alimentación cuando se desea información.

## 5.2 SENSORES AUTORRESONANTES

Los sensores basados en un fenómeno físico resonante ofrecen una frecuencia de salida que depende de una magnitud de interés que afecta a la frecuencia de oscilación. Todos requieren un frecuencímetro-contador para medir bien la frecuencia o bien el periodo de oscilación. La elección de uno u otro método depende de la resolución deseada y del tiempo disponible para la medida. Las estructuras resonantes basadas en monocristales de silicio se prestan bien a la realización de circuitos integrados.

En sensores se emplean tanto osciladores armónicos como de relajación. En los primeros hay una energía almacenada que cambia de una u otra forma de almacenamiento, por ejemplo de energía cinética en el movimiento de una masa a energía potencial en la tensión de un muelle. En los segundos hay una única forma de almacenamiento, y la energía almacenada se disipa periódicamente mediante algún mecanismo de puesta a cero.

Es importante observar que si bien la ausencia de convertidor A/D hace innecesaria una tensión de referencia estable para medir la salida de estos sensores, no por ello es posible medir una magnitud absoluta -la frecuencia del oscilador- sin tener otra magnitud de referencia bien conocida, en este caso el oscilador del que se obtiene la base de tiempos del contador con que se mida la frecuencia. Este oscilador de referencia será generalmente de cristal de cuarzo y tendrá derivas con el tiempo y la temperatura.

Las derivas temporales se deben a cambios estructurales en el cuarzo debidos a imperfecciones en la estructura cristalina, a las tensiones mecánicas ejercidas por los soportes sobre el cuarzo, que decrecen con el tiempo, y que varían después de ciclos térmicos; y a los cambios de masa del cristal por absorción o desorción



de contaminantes dentro del encapsulado. La curva de envejecimiento ( $Af/f$ ) es exponencial al principio y lineal al cabo de meses. Por eso los cristales de precisión se dejan envejecer antes de su instalación.

Las derivas térmicas son el fundamento de los termómetros digitales de cuarzo y tienen forma de "S" tumbada. Su valor depende del ángulo de corte. El corte más estable, en un margen de temperatura pequeño, es el de  $35^\circ 13'$ , pero en el margen de 0 a  $50^\circ\text{C}$ , el normal en frecuencímetros, el corte más estable es el AT:  $35^\circ 15'$ . Para mantener al cristal termostataado, se dispone en un horno cuya temperatura sea unos  $20^\circ\text{C}$  mayor que la temperatura de funcionamiento, y tal que el cristal presente una sensibilidad mínima a dicha temperatura.

### 5.2.1 Sensores basados en resonadores de cuarzo

El modelo visto para los sensores piezoeléctricos era válido sólo a baja frecuencia. A alta frecuencia, para un elemento con electrodos metálicos depositados en dos de sus caras, el modelo eléctrico apropiado es el de la figura 5.11a. En ésta,  $L_1$  viene determinada por la masa del cristal,  $C_1$  por la elasticidad o compliancia mecánica,  $R_1$  por la fricción interna (que se traduce en una disipación de calor) y  $C_0$  es la capacidad del soporte del cristal en paralelo con la de los electrodos metálicos, con el material piezoeléctrico como dieléctrico. La presencia de un circuito resonante permite emplear dicho elemento como base de un oscilador. Para un cristal de cuarzo empleado en un oscilador de 32,768 kHz, por ejemplo,  $L_1=4451\text{H}$ ,  $C_1=5\text{fF}$ ,  $R_1=11,2\text{Kohm}$  y  $C_0=1,84\text{pF}$ .

Dado que el cuarzo es inerte, si se emplea un monocristal de gran pureza la estabilidad de la resonancia mecánica a largo plazo es muy alta. La estabilidad a corto plazo depende del factor de calidad  $Q$  (alta rigidez, poca histéresis) y la inductancia equivalente, que son muy elevados. Una estabilidad a corto plazo elevada permite diseñar sensores de alta resolución, mientras que una gran estabilidad a largo plazo significa que se necesitarán menos recalibraciones.

#### 5.2.1.1 Termómetros digitales de cuarzo

Los valores del circuito equivalente de la figura 5.11a dependen de la temperatura. Por lo tanto, la frecuencia de oscilación presenta una deriva térmica. Pero si se emplea un cristal de cuarzo cortado con precisión, la relación temperatura-frecuencia es muy estable y tiene una gran repetibilidad. De esta forma, midiendo la frecuencia de oscilación es posible determinar la temperatura a la que está sometido el elemento. La relación general es donde  $T_0$  es una temperatura de referencia arbitraria ( $25^\circ\text{C}$ ) y los parámetros  $f_0$ ,  $a$ ,  $b$ , y  $g$  dependen de la orientación del corte respecto a los ejes del cristal. El objetivo sería, en principio, lograr  $b, g=0$ , pero no es fácil.

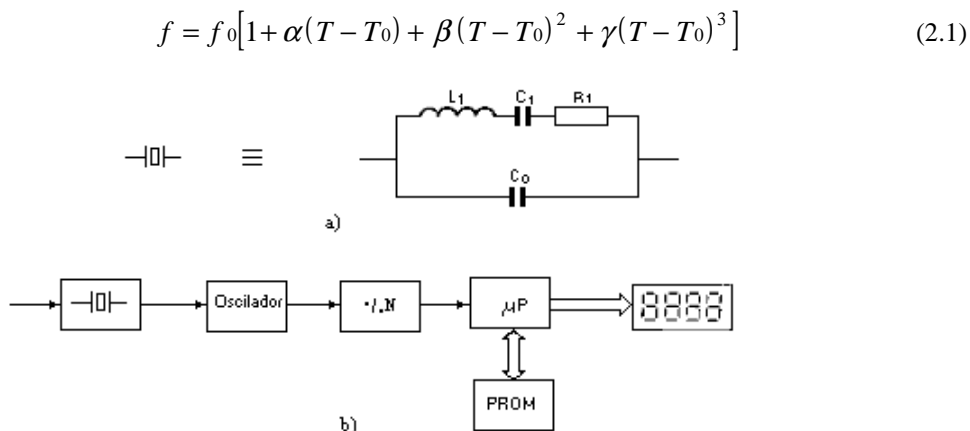


Figura 5.11 a)Circuito equivalente para un material piezoeléctrico con dos electrodos metálicos depositados en dos caras, a alta frecuencia. b)Esquema simplificado de un termómetro digital de cuarzo.

En un elemento concreto que utiliza este principio de medida, en vez de buscar una gran linealidad en la relación temperatura-frecuencia, se persigue tener una gran repetibilidad. Entonces la relación temperatura-frecuencia se determina en 40 puntos del margen de medida, y a partir de ellos se determina la curva de

regresión. Los coeficientes correspondientes se almacenan en una memoria PROM que se suministra con cada sonda particular. En la figura 5.11b se presenta un esquema simplificado del instrumento. La sonda puede estar alejada del instrumento sin problemas de interferencia porque por ella se transmite una frecuencia, no una tensión analógica. La frecuencia del oscilador es próxima a los 28 MHz y la sensibilidad es de 1000Hz/C°. Para evitar el error debido al posible calor conducido a través de los cables de conexión del cristal, se puede aplicar el mismo principio pero emitiendo una señal de uno 28 MHz hacia el cristal; éste vibra y devuelve un eco que es detectado por un receptor. Mediante cristales de masa suficientemente pequeña, es posible medir radiación infrarroja, al ser absorbida elevada temperatura por el cristal.

El termómetro citado tiene un margen de medida de -80 a +250°C, con una exactitud de  $\pm 0,075^\circ\text{C}$ . En la zona de -50 a +150°C, la exactitud es de  $\pm 0,04^\circ\text{C}$ . La resolución alcanzable es de 0,0001°C. La exactitud, resolución, repetibilidad y estabilidad superan lo obtenible con otros tipos de termómetros. La intercambiabilidad de la sonda es total ya que cada una va acompañada con su módulo de calibración específico.

### 5.2.1.2 Micro balanzas basadas en resonadores de cuarzo

Si sobre un cristal de cuarzo dispuesto en un oscilador se deposita una pequeña masa, la frecuencia de resonancia se reduce. Si la frecuencia de oscilación era  $f_0$ , el área del cristal A, su densidad p, y la masa depositada  $\Delta m$ , el desplazamiento de frecuencia viene dado en primera aproximación por la ecuación de Sauerbrey,

$$\Delta f = -f_0^2 \frac{\left(\frac{\Delta m}{A}\right)}{Np} \quad (2.2)$$

donde N es una constante, y se supone que la masa añadida no se deforma durante la oscilación. Para un cristal de cuarzo cortado en dirección AT y resonando en modo flexión, queda  $\Delta f = -2,3 \times 10^6 f_0^2 (\Delta m/A)$ . Se emplean discos de 10 a 15 mm de diámetro y 0,1 a 0,2mm de espesor. La frecuencia de resonancia va de 5 a 20Mhz. Para un sensor de 5MHz, se puede obtener una sensibilidad de 189 ng/(cm<sup>2</sup>Hz).

Este método se aplica a la medida de humedad a base de recubrir el cristal con un material higroscópico que se expone al ambiente cuya humedad se desea medir. El agua absorbida aumenta la masa y reduce la frecuencia de oscilación. Si el cristal se recubre con materiales orgánicos no volátiles específicos en vez de un material higroscópico, se pueden detectar compuestos volátiles específicos en fase gaseosa. Con este método se han podido detectar cambios de masa del orden de nanogramos.

Los osciladores de cristal de cuarzo también se han empleado como monitores económicos de deposición en vacío. Se emplean dos osciladores de reloj comerciales: uno para la detección, con un agujero en su encapsulado, hacia el centro del electrodo de cristal, y el otro oscilador se emplea como referencia. Ambos osciladores se colocan en la cámara de vacío y, de esta forma, se minimiza el efecto de los hilos de conexión al sensor, y se asegura que estarán a la misma temperatura.

### 5.2.1.3 Sensores de fuerza y presión basados en resonadores de cuarzo.

Si una varilla rectangular de cuarzo sujeta por los extremos se excita una vibración longitudinal mediante electrodos depositados en su superficie (figura 5.12a), aprovechando que el cuarzo es piezoeléctrico, la frecuencia de resonancia es,

$$f_0 = 1,02 \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{p}} \quad (2.3)$$

donde t es el grosor de la varilla, l su longitud, e su módulo de Young y p su densidad. Si ahora se aplica una tensión mecánica O a través de los soportes, por ejemplo tal como se muestra en la figura 5.12b, la nueva frecuencia de resonancia es,

$$f = f_0 \left( 1 + 0,54 \frac{\sigma l^2}{E t^2} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

La sensibilidad al esfuerzo aplicado aumenta al hacerse la relación  $l/t$ , pero un valor  $l/t$  grande reduce la rigidez mecánica.

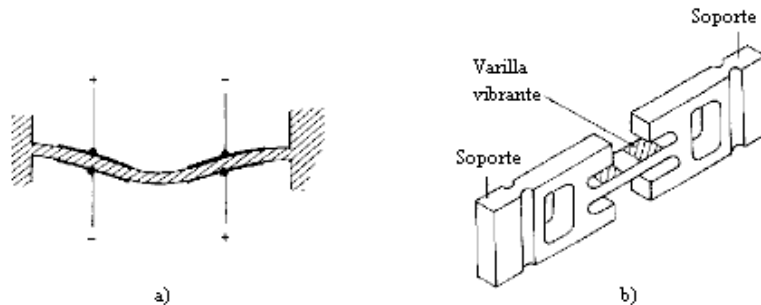


Figura 5.12 Sensor de fuerza basado en un resonador de cuarzo. a) Excitación las vibraciones en modo flexión mediante electrodos superficiales. b) Disposición mecánica para aplicar el esfuerzo a medir.

Para medir presiones, se puede transmitir el esfuerzo mecánico desde un diafragma o fuelle a una varilla de cuarzo, o también emplear directamente un diafragma de cuarzo como resonador. En ambos casos, un cristal similar, próximo pero no sujeto al esfuerzo mecánico, permite compensar los efectos de la temperatura.

### 5.2.2 Galgas acústicas.

La menor frecuencia de oscilación transversal de una cuerda o hilo tenso vibrante viene dada por:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{m}} \quad (2.5)$$

donde  $l$  es su longitud,  $F$  la fuerza mecánica al que está sometido, y  $m$  la densidad longitudinal de masa (masa/longitud). Si la posición de uno de los extremos se hace variable mediante un soporte móvil, el período de oscilación es directamente proporcional al desplazamiento. Si se aplica una fuerza, la frecuencia de oscilación resultante es directamente proporcional. Para la medida de deformaciones, la relación, deducida de (2.5), es:

$$\varepsilon = \frac{4l^2 m}{EA} f^2 \quad (2.6)$$

siendo  $E$  el módulo de Young, y  $A$  la sección transversal del hilo.

La frecuencia de oscilación se mide con un hilo de reluctancia variable, y cae dentro de la banda audible. De ahí el nombre de galgas acústicas. Normalmente se dispone un sistema autooscilante en el que la señal detectada es amplificada y realimentada a un excitador electromagnético. A veces el propio excitador actúa alternativamente como detector (figura 5.13). Para que la frecuencia de oscilación no dependa de las características eléctricas del excitador, el factor de calidad  $Q$  del resonador mecánico debe ser del orden de 1000 o superior.

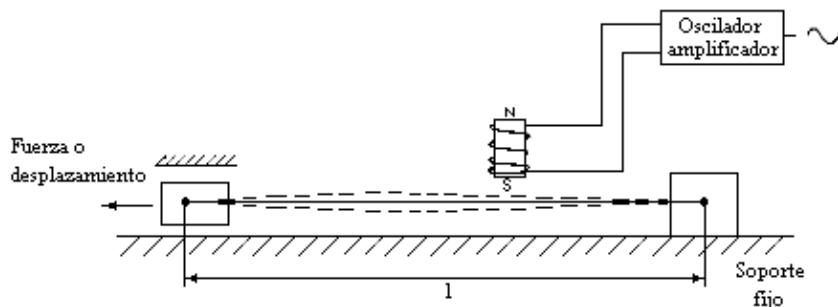


Figura 5.13 Galga Acústica. La vibración transversal es excitada mediante la aplicación de un pulso de corriente a la bobina, que se emplea luego para detectar la frecuencia de vibración.

Dado que interesa que el hilo sea fino, se encierra en una cámara sellada para evitar los ataques químicos y el depósito de polvo en él, que afectaría su masa.

Basándose en este principio, se puede medir cualquier magnitud que provoque un cambio en  $l$ ,  $F$  o  $m$ . De todas estas aplicaciones, una muy habitual es la medida de deformaciones. A diferencia de las galgas resistivas su aplicación no requiere que se trate de un estado plano de deformación. Además, son insensibles a los cambios de resistencia de los hilos de conexión, debidos por ejemplo a los cambios de temperatura. Por otra parte, dado que ésta afectará a la longitud  $l$  del hilo sensor, falsiando la medida, se puede determinar midiendo la resistencia eléctrica del hilo de la bobina, igual que en las RTD. Otras magnitudes que se pueden medir son: presión, fuerza, peso y masa.

Una variante del hilo o cuerda vibrante son las cintas vibrantes. Su menor frecuencia natural de oscilación longitudinal es

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\delta}} \quad (2.7)$$

donde  $l$  es la longitud,  $E$  el módulo de Young y  $p$  la densidad. Se emplea, por ejemplo, para medir la masa de polvo depositado, en un sistema donde el excitador y el detector son ambos piezoeléctricos.

Un sistema algo distinto es el clásico diapasón, que se ha empleado también para medir pequeños cambios de masa, como los debido a los depósitos de polvo. Si, en cambio, se sumerge en un líquido, la frecuencia de vibración depende de su densidad.

### 5.2.3 Sensores basados en cilindros vibrantes.

Si en lugar de un hilo o una cinta vibrante se emplea un cilindro metálico con paredes delgadas (75  $\mu\text{m}$ ) y un extremo ciego, la frecuencia de oscilación dependerá de las dimensiones y material del cilindro, y de cualquier masa que vibre con sus paredes. Utilizando, igual que antes, un excitador electromagnético para mantener la oscilación, se puede medir la diferencia de presión entre las dos caras del cilindro, porque la diferencia de presiones entre ambos lados de las paredes produce una tensión mecánica en éstas. Se puede medir la densidad de un gas porque el gas cerca de las paredes vibra al hacerlo éstas. Para líquidos corrosivos es mejor emplear un cilindro de vidrio o cerámico y el excitador piezoeléctrico, ya que los electromagnéticos no sirven. La aplicación más extendida de este método es, sin embargo, la medida continua de la densidad de líquidos, con una disposición como la indicada en la figura 5.14. Consiste en dos conductores en paralelo, como por los que fluye el líquido, sujetos por cada extremo a una base fija y acoplados al conducto principal, con una junta flexible en cada extremo.

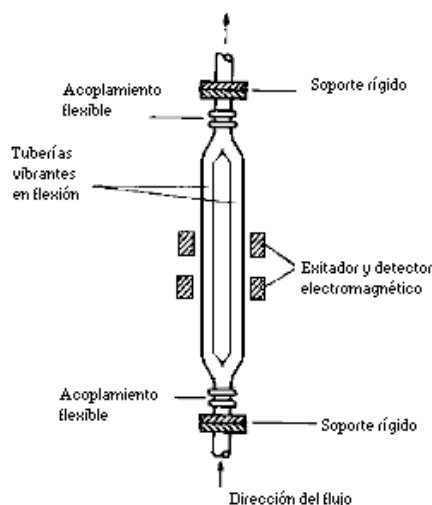


Figura 5.14 Método del tubo vibrante para medir la densidad de líquidos.

Como el volumen es conocido y la frecuencia de oscilación de los dos conductos, que se comportan como un diapasón, depende de la masa, dependerá en consecuencia de la densidad. La relación es de la forma

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \frac{P}{p_0}}} \quad (2.8)$$

siendo  $f_0$  la frecuencia de oscilación de la tubería sin líquido y  $p_0$  una constante que depende de la geometría del sistema. La frecuencia de salida se puede medir, por ejemplo, con un PLL cuyo VCO excita el tubo vibratorio. El filtro de paso bajo que hay entre el comparador de fase y el oscilador, filtra entonces el ruido de alta frecuencia captado por los hilos de conexión.

### 5.2.4 Sensores basados en dispositivos de ondas superficiales (SAW)

Las ondas superficiales en la superficie de un líquido al producir en ella una perturbación, se producen también en las superficies de los sólidos. Lord Rayleigh analizó estas ondas en 1885 y las aplicó a la interpretación de los sismogramas. Aunque estas ondas son distintas en los sólidos que en los líquidos, en ambos casos se atenúan con la profundidad.

Una forma de producir una perturbación en la superficie de un sólido, ciertamente mucho menos convulsiva que los terremotos, consiste en disponer dos electrodos metálicos interdigitados en la superficie de un material piezoeléctrico, como muestra la figura 5.15.

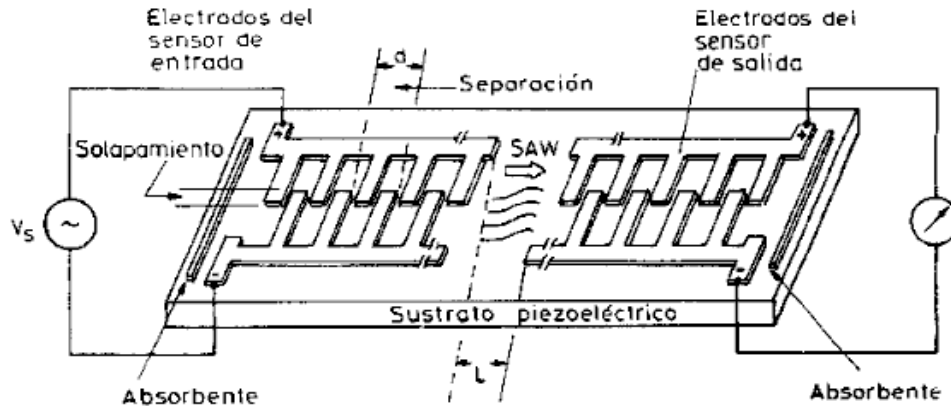


Figura 5.15 Esquema de principio de los filtros de onda de superficie.

Si la distancia entre electrodos es  $d$ , cuando se aplica una tensión alterna de frecuencia  $f$  entre los electrodos, se genera una deformación superficial que se propaga en ambas direcciones en forma de onda superficial y cuando  $v=2fd$ . Otro par de electrodos similar dará una tensión alterna de salida en cuando llegue a él la onda de deformación del material.

Estos dispositivos, conocidos normalmente con el nombre SAW, se emplean profusamente en filtros, osciladores y procesadores de señal a frecuencias superiores a 100 MHz.

La velocidad  $v$  de la onda de superficie depende del estado de deformaciones en la superficie y de la temperatura, por cuanto éstas pueden llegar a afectar a la densidad y las propiedades elásticas del material, aparte de alterar la distancia entre electrodos. Este es el fundamento de la aplicación de estos dispositivos en sensores, con tres tipos básicos: los basados en una acción física sobre todo el sustrato, los que basan en una acción sólo en la superficie, y los que emplean un recubrimiento que es el que experimenta los cambios. Estos últimos se suelen emplear para detectar sustancias químicas que son absorbidas o reaccionan con el sustrato.

Una forma de aplicarlos es la esbozada en la figura 5.16. Consiste en disponer una línea de retardo como la descrita en la figura 5.15 en el lazo de realimentación de un amplificador, formando así un oscilador cuya frecuencia de oscilación depende del estado de deformación de la superficie. El desfase total en el lazo de realimentación es:

$$\phi_T = \phi_0 \pm \delta\phi_0 \pm \phi_{ex} \quad (2.9)$$

donde  $\phi_0=2\pi fL/v$  es el desfase producido por el tiempo de tránsito de la onda desde un par de electrodos al otro;  $\delta\phi_0$  es el incremento de fase producido por la deformación del sustrato y el cambio de temperatura, de haberlo, y  $\phi_{ex}$  es el desfase debido al amplificador y la red de adaptación de impedancias externa.

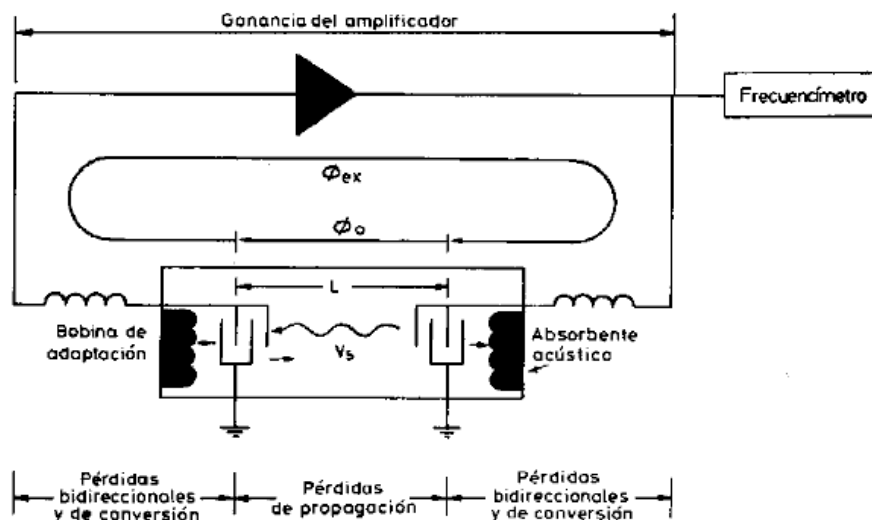


Figura 5.16 Oscilador basado en un dispositivo de ondas superficiales empleado como línea de retardo.

Cuando  $\phi_t = 2n\pi$  y la ganancia del amplificador es mayor que las pérdidas totales en el sistema, éste oscila. Otra forma de utilizar los dispositivos SAW consiste en determinar solamente la variación del retardo en una línea similar a la de la figura 5.15 donde hay un emisor y un receptor. Cualquier cambio en la zona de propagación ( $L$ ) que afecte a la velocidad o a la longitud, puede servir para detectar la magnitud que ha inducido tal cambio. El emisor envía un paquete de ondas que se propaga por la superficie con una velocidad influida por el entorno. Si la señal recibida por el receptor tiene amplitud suficiente, es amplificada y realimentada al emisor. De esta forma aumenta la sensibilidad sin tener que aumentar la longitud del sensor o tener que trabajar con frecuencia fundamental muy alta, como sucedería si se montara un oscilador senoidal. Basándose en sensores SAW, se han realizado sensores para medidas de temperatura, fuerza, presión, caudal y análisis de gases y aceleración. Los materiales piezoeléctricos preferidos son el cuarzo y el  $\text{LiNdO}_3$ . Cuando se desea evitar interferencias, por ejemplo debidas a la temperatura, se puede emplear otro par de electrodos dispuestos en una zona donde la magnitud medida apenas produzca tensiones y, en cambio, si las produce la magnitud interferente. De este modo se tiene un oscilador de referencia que variará de la misma forma que el otro en respuesta a otras señales que no sean la de interés. El caudal de gases, por ejemplo se ha medido con una línea de retardo que se mantiene a una temperatura por encima de la del ambiente, y cuyo enfriamiento depende de la velocidad de convección del gas que fluya sobre ella, cambiando así la frecuencia de oscilación. Para calentar el dispositivo se puede emplear un calefactor externo o se puede añadir al sensor un material con pérdidas acústicas apreciables. En este segundo caso el sensor es más pequeño y por ende más rápido. También se han desarrollado detectores de  $\text{CO}$ ,  $\text{CIH}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{SH}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , hidrocarburos, compuestos orgánicos fosforatos, mediante un agente fijador selectivo depositado sobre la superficie del cristal. El recubrimiento se puede optimizar según interés sensibilidad, selectividad o velocidad de respuesta. Empleando otros recubrimientos, se pueden diseñar sensores de olor. Para detectar vapores de mercurio en gases, se deposita una capa de oro entre los electrodos interdigitados. El mercurio forma una amalgama con el oro, cambiando así la masa de la capa, y con ella el retardo de propagación. Dado su pequeño tamaño, puesto que  $v$  es del orden de 3000m/s, su simplicidad y la posibilidad de fabricar grandes series mediante procedimientos fotolitográficos, estos prototipos se han ido convirtiendo en productos comerciales. En particular su, alta sensibilidad, que permite detectar pequeñas concentraciones de gases, la inmunidad a muchas interferencias eléctricas, al ser la salida en forma de frecuencia, y la compatibilidad con la tecnología planar, ha llevado al desarrollo y comercialización de muchos sensores SAW para gases.

### 5.2.5 Caudalímetros de vórtices (digitales)

La detección de la presencia de oscilaciones en el flujo de un fluido permite obtener también una señal de frecuencia variable, la que depende de la velocidad del fluido. Dichas oscilaciones pueden ser forzadas o naturales.

El método de las oscilaciones forzadas, empleados sobre todo para gases, consiste en colocar en la tubería un conducto acanalado, de tal forma que convierta el flujo en helicoidal con un punto de velocidad máxima que se va desplazando. La frecuencia de paso de este núcleo de baja presión por una zona dada es proporcional a la velocidad y, por lo tanto, al caudal volumétrico, e independiente de la temperatura, presión y humedad del gas. La detección se puede hacer mediante un elemento piezoeléctrico, si se mide presión, o con un termistor si se detectan las fluctuaciones de temperatura asociadas a los remolinos. La frecuencia de la señal de salida varía entre unos 100 y 1000 Hz.

Para los líquidos es más común introducir dentro del conducto un objeto no aerodinámico y, por tanto, no alineado con las líneas de corriente: al desprenderse la capa de flujo en contacto con el objeto, aguas abajo de éste se forman unos torbellinos o vórtices de Karman (figura 5.17). Se detectan normalmente mediante ultrasonidos cuya intensidad queda más o menos atenuada, y también a partir de las fluctuaciones de temperatura o de la fuerza de arrastre sobre el objeto sumergido. Si este tiene el perfil adecuado, se puede lograr que la frecuencia de los torbellinos sea proporcional a la velocidad de flujo. No obstante, siempre hay una velocidad mínima por debajo de la cual la frecuencia de los vórtices se hace irregular. A la vez, cuando mayor sea el diámetro de la tubería, menor es la frecuencia de salida, siendo el límite del diámetro del orden de 350 mm.

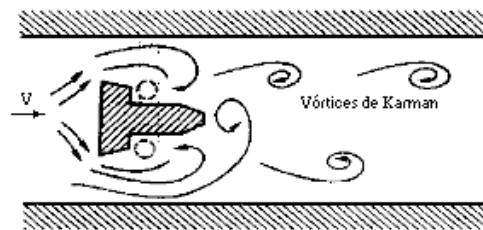


Figura 5.17 Formación de vórtices de Karman al incidir un líquido en circulación sobre un objeto plano.

La buena exactitud de este método (del orden del 0,5 %), junto con su independencia de la viscosidad, densidad, presión y temperatura del fluido, hay llevado a un rápido desarrollo de esta técnica en los últimos años. Sus limitaciones son la elevada pérdida de carga que introducen y su inadecuación para fluidos sucios, abrasivos o corrosivos.