

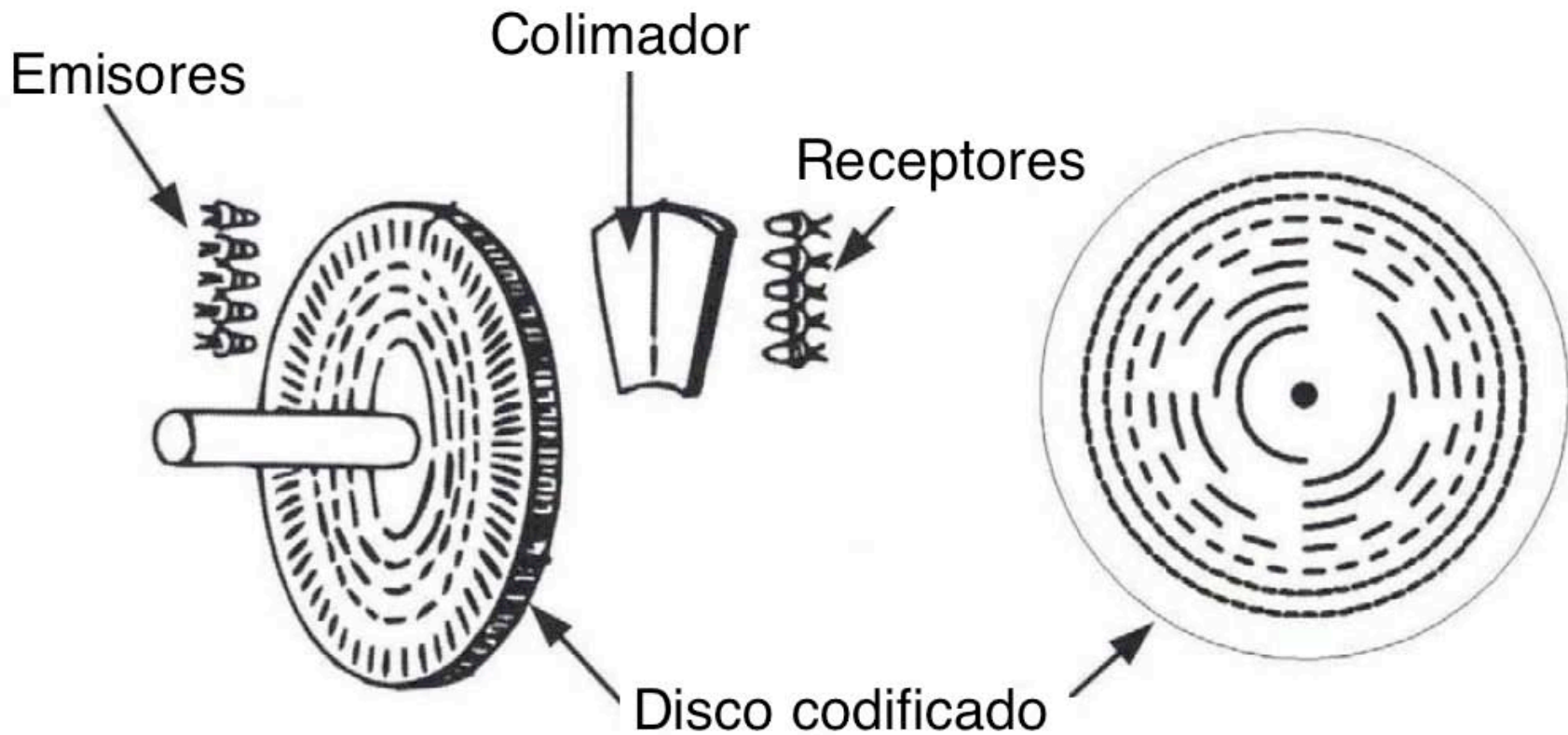
Medición fina de la posición angular.

I. Codificadores rotatorios

1.- Sensores ópticos de ángulo de giro (optical encoders).

Existen tres categorías de sensores ópticos de ángulo de giro, absolutos, semi-absolutos e incrementales. El principio básico de operación es el mismo que el usado en los sensores ópticos de velocidad: hay un disco codificado con áreas que permiten el paso (o la reflexión) de la luz y áreas opacas, y un conjunto de fotosensores genera trenes de pulsos que son función de las áreas que pasan en su campo de acción al girar el disco. El rango de medida son 360° , la salida se repite cíclicamente en cada vuelta.

1.a.- Codificadores ópticos absolutos.



Esquema de un codificador óptico absoluto de 5 bits en código binario puro.

El disco está dividido en n segmentos, los segmentos están numerados secuencialmente del 0 al $n-1$, y las marcas en cada segmento indican, en un código binario, el número secuencial que identifica al segmento. La posición se conoce con $360^\circ/n$ grados de precisión.

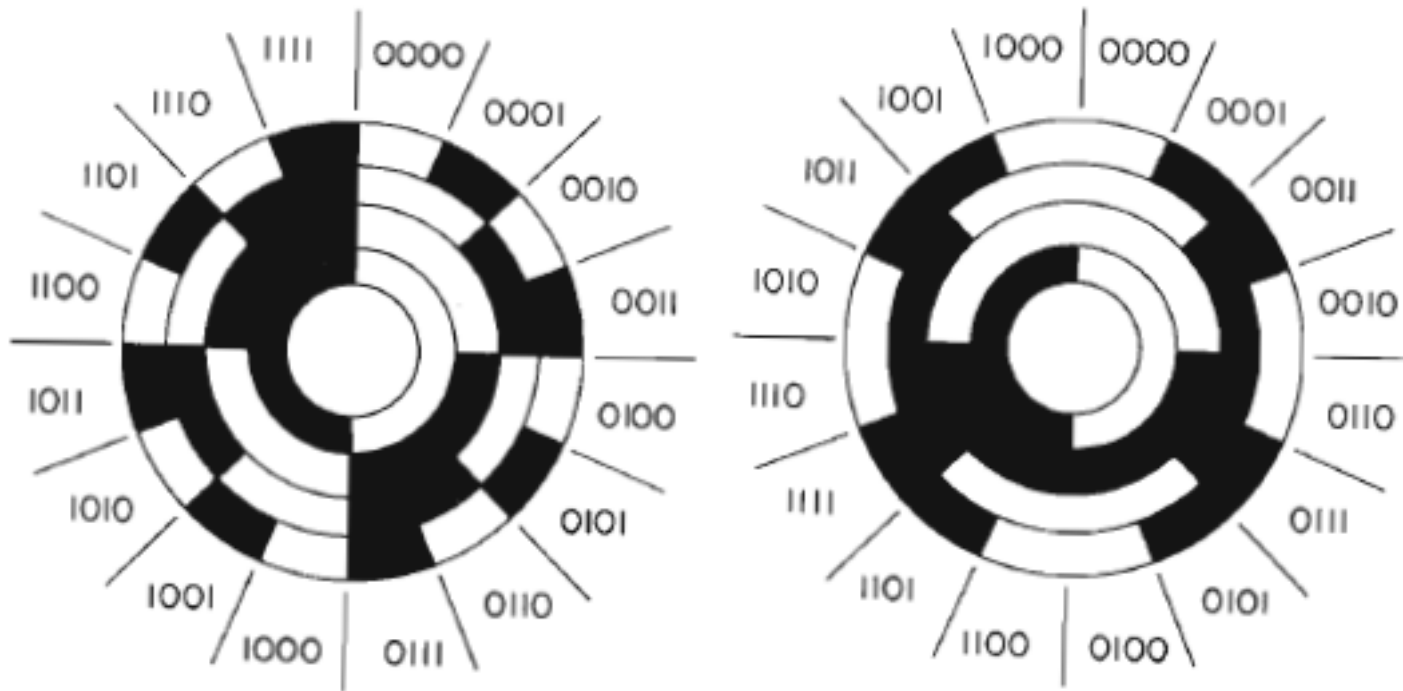
Los codificadores de posición angular absoluta indican en cual posición está el eje dentro del rango $0^\circ-360^\circ$ en el momento de la medición, pero esa lectura se repite cíclicamente en cada vuelta, y por lo tanto la lectura directa del sensor no informa sobre cual es el desplazamiento angular total acumulado desde que se inició el movimiento.

Los segmentos pueden estar codificados en el código binario básico, o en “código Gray”, en el cual entre un número y el siguiente en la secuencia hay un solo bit que cambia de estado, lo que reduce significativamente las posibilidades de errores en la lectura de las posiciones sucesivas.

En el código binario puro de n bits, en una transición entre un número y el siguiente pueden tener que cambiar un número de bits que oscila entre 1 (transición de 0000 a 0001 y viceversa, ver tabla) y n (transición de 1111 a 0000 y viceversa); en la última situación, si el lector no está perfectamente sincronizado y toma el dato cuando ya todos los dígitos están estabilizados, la lectura puede ser transitoriamente errónea de varias maneras distintas (0001, 0010, ...1110, etc.).

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

Codificación de la posición en códigos binario y Grey de cuatro bits.



Discos codificadores ópticos absolutos de 4 bits.
 Izquierda: binario puro. Derecha: Código Grey.



Disco codificado en código Grey de 10bits, con una resolución angular de 0,35°.

Número de bits de resolución digital de la salida del sensor vs. resolución angular de la medida.

Número de bits	Ángulo en radianes	Ángulo en grados
1	3,1415	180
2	1,5707	90
4	0,3927	22,5
8	0,02545	1,4063
10	0,00614	0,3516
12	0,001534	0,008789
16	0,000096	0,00549

El aumento de resolución implica un disco codificado de complejidad creciente; el radio del disco también aumenta para que cada una de las bandas codificadas pueda ser leída sin interferencia de las otras.

El límite práctico de los sensores ofrecidos en el mercado esta en el orden de 10 a 12 bits.

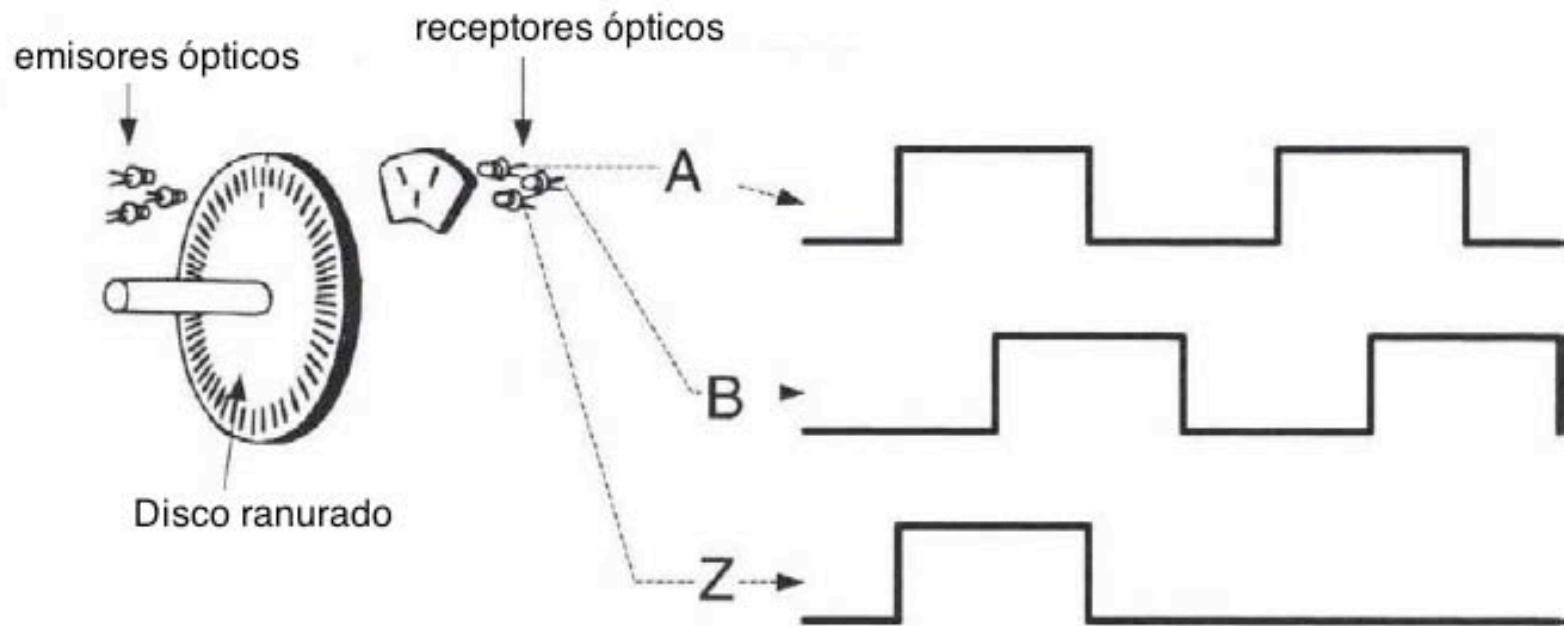
Si el sistema gira mas de una vuelta y es necesario conocer el desplazamiento total acumulado, el número de vueltas debe acumularse en un registro que se incrementa en 360° cada vez que el disco codificado pasa de la lectura máxima a la cero.

Adicionalmente, el proceso de medida debe iniciarse desde una posición conocida, la "referencia de cero", en la cual los registros de movimiento deben inicializarse en cero.

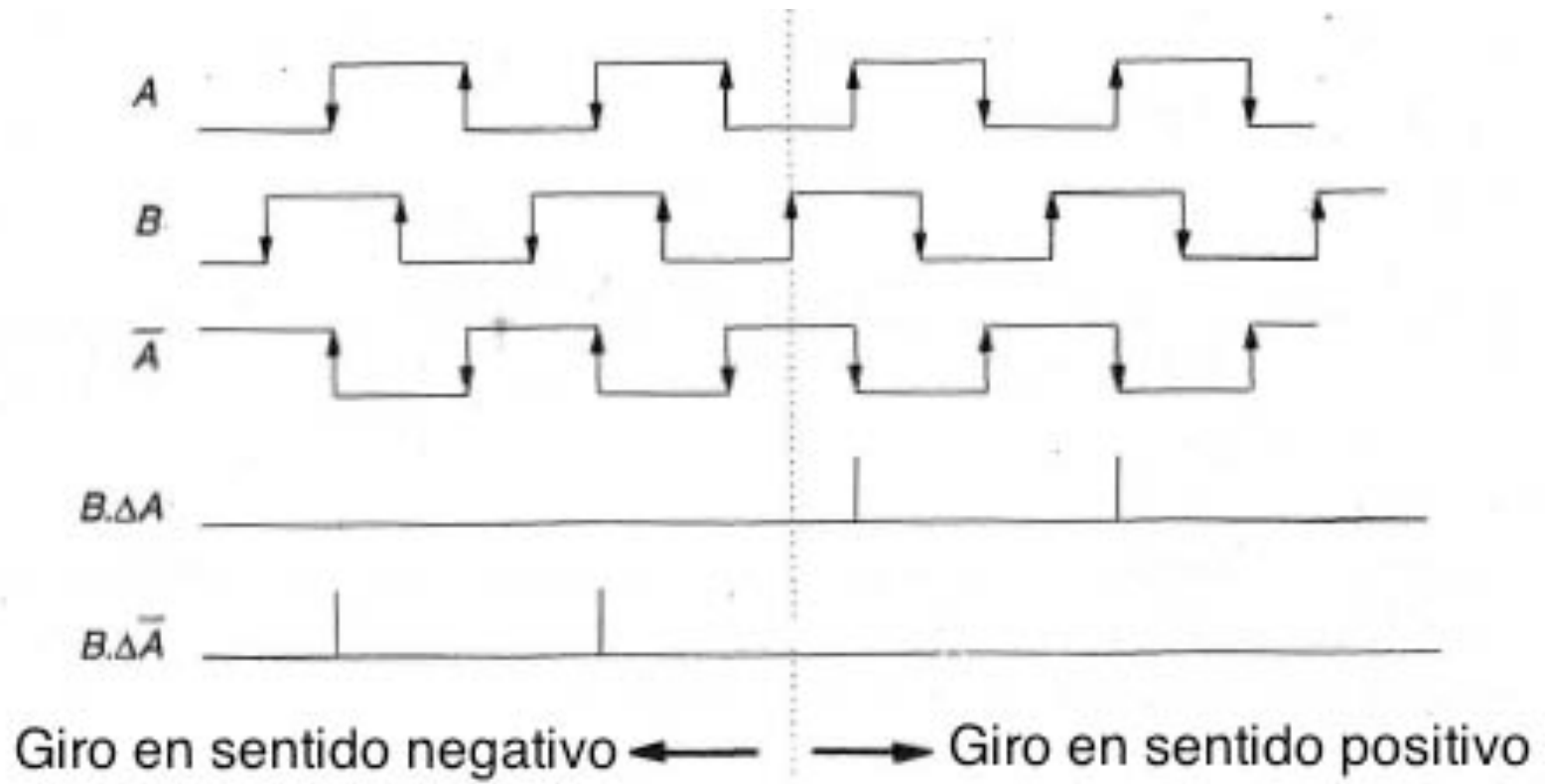
Si el disco codificado no está en la posición cero en ese momento, el proceso se iniciará con un error sistemático de offset mecánico.

1.b.- Codificadores ópticos semi-absolutos

El sensor es idéntico al propuesto como medidor de velocidad con signo de giro, lo que permite emplearlo como un sensor de posición es el manejo de la información generada.



Esquema de operación de un sensor óptico de posición angular semi-absoluto.



Secuencia de pulsos de salida del procesador de velocidad y sentido de giro.

Si hay n marcas en el disco, cada marca está separada $360^\circ/n$ de la anterior, y dado que hay dos canales generando las señales A y B, la separación entre el frente de subida de un pulso del canal A y el frente de subida del pulso subsiguiente en el canal B es $360^\circ/2n$; si además se detectan los frentes de bajada la separación entre cada pulso de un canal y el pulso subsiguiente en el otro es de $360^\circ/4n$.

El algoritmo de cálculo de la posición es el siguiente:

El contador de posición debe llevarse a cero cuando se inicia la operación desde el punto de referencia de origen.

Iniciado el movimiento y conocidas las señales A y B de velocidad y la del indicador de sentido de giro, el proceso es como sigue:

I.- Mientras el indicador de dirección no registra cambio:

1.- Cada uno de los $2n$ pulsos de velocidad producidos en combinación por los canales A y B suma $360^\circ/2n$ al contenido del registro de la posición cercana, si la dirección de giro es positiva, o los resta si es negativa. Si se trabaja con los frentes de subida y bajada, cada pulso agrega $360^\circ/4n$ al contador de ángulo recorrido.

2.- Cada pulso del indicador de vueltas suma 360° al registro indicador de posición lejana, si la dirección de giro es positiva, o los resta si es negativa y en ambos casos limpia el contenido del registro de la posición cercana.

3.- En todo momento la posición exacta es la suma de los ángulos indicados por los registros de posición lejana y cercana.

La posición se conoce con $360^\circ/2n$ de precisión si se trabaja con los frentes de subida, o con $360^\circ/4n$ si se trabaja con los frentes de subida y bajada.

II.-Cuando el indicador de dirección indica cambio, se opera igual, pero se cambia el signo de los correspondientes incrementos.

Si se ignora la señal de vuelta completa se procede a acumular la información de ángulo recorrido en un único registro de posición.

1.c.- Codificadores ópticos incrementales.

Si el disco tiene n ranuras, cada pulso recibido aumenta en $360^\circ/n$ valor del registro de posición; como no hay información sobre el sentido de giro este esquema solo sirve para servosistemas donde el movimiento es en una sola dirección.

La posición se conoce con $360^\circ/n$ de precisión.

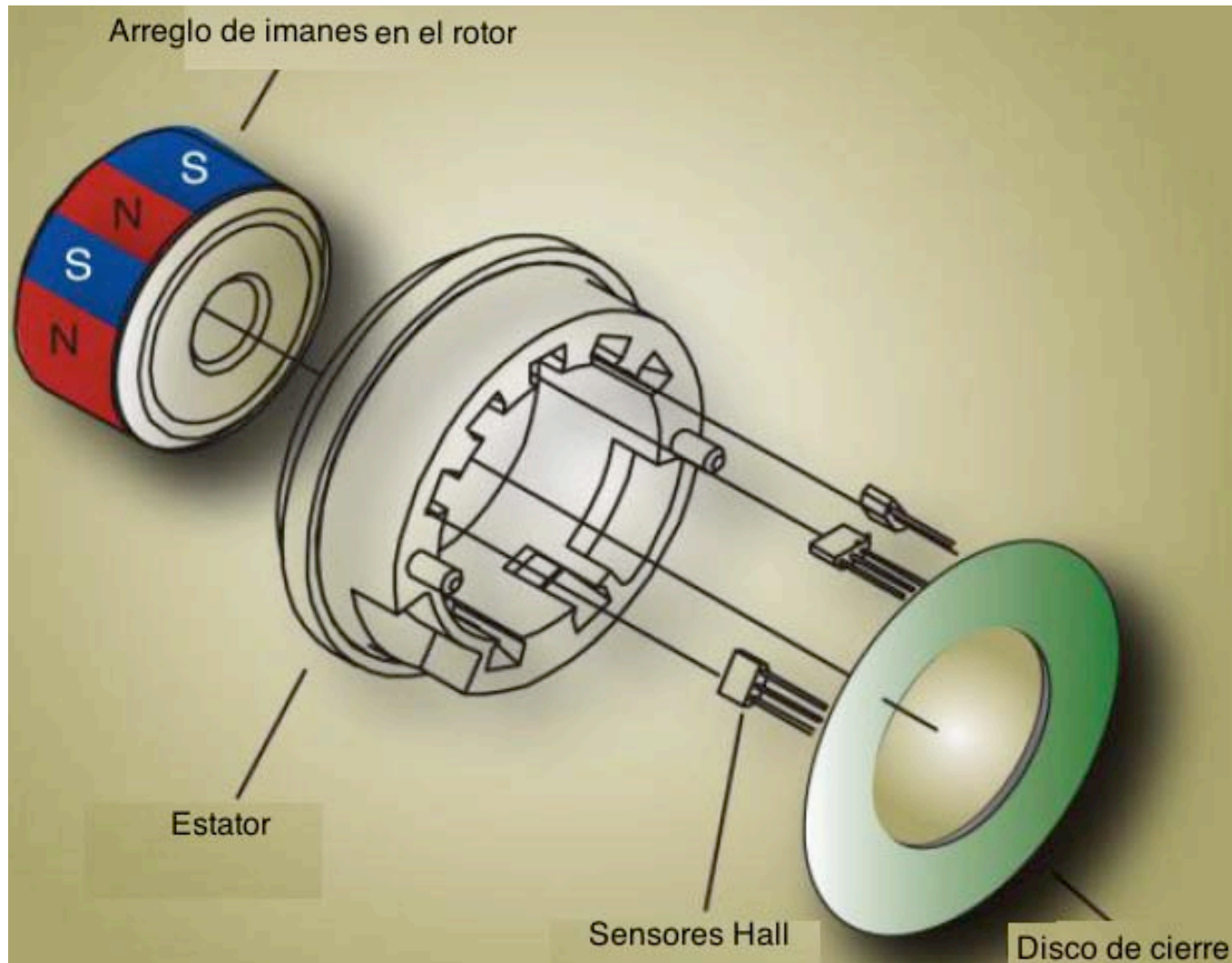
Si se detecta tanto el frente de subida como el de bajada, la posición se puede conocer con $360^\circ/2n$ de precisión.

Comparando los tres métodos, el semi-absoluto ofrece buena resolución con un disco mas simple que el absoluto, y con una complejidad circuital solo un poco mayor que el incremental puro, que no puede trabajar en ambos sentidos del movimiento.

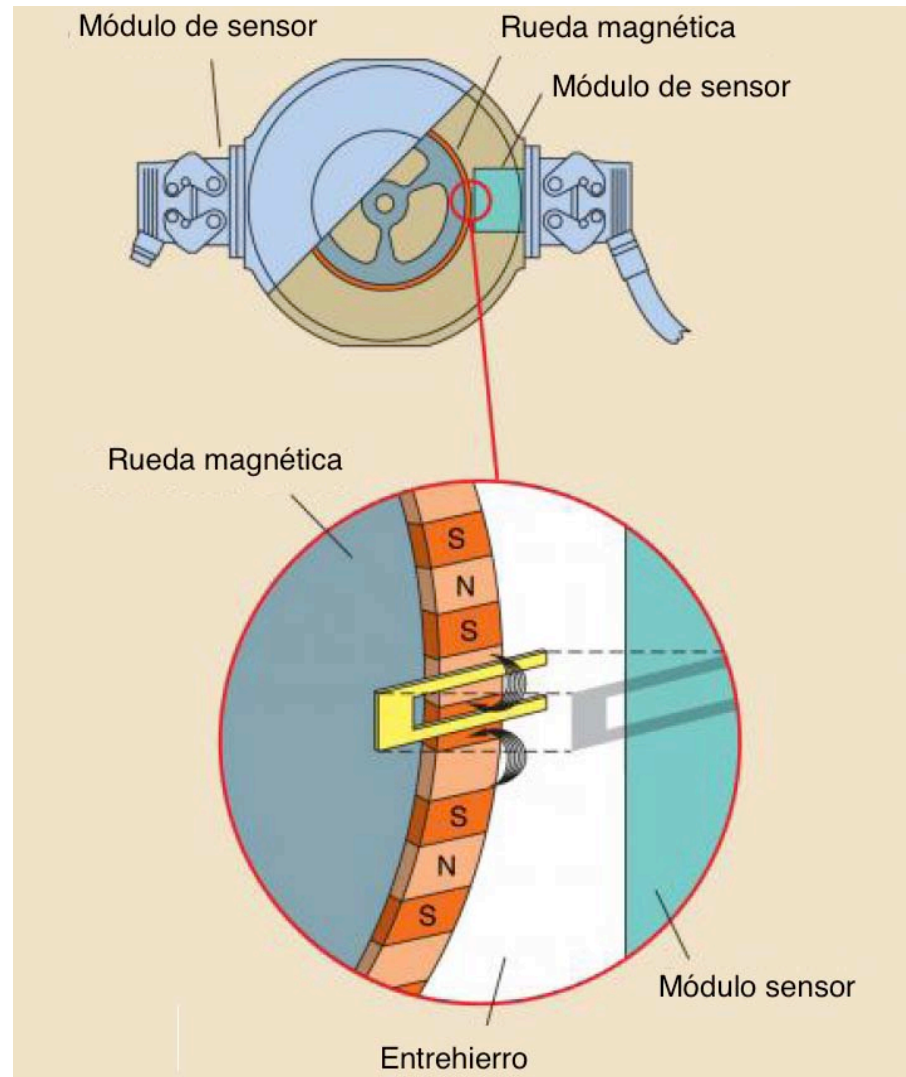
Por otra parte la salida del disco codificado absoluto es una palabra digital que puede ser usada directamente en caso del codificado en binario puro, o después de una simple conversión de código lo que puede facilitar el diseño general del sistema; adicionalmente, en caso de falla el codificador absoluto mantiene la información de la última posición, y el sistema puede arrancar directamente, mientras que en los otros dos casos podría ser necesario proceder a una rutina de inicialización que requiere regresar hasta el punto de origen.

Codificadores magnéticos.

Para ciertos ambientes donde las condiciones (suciedad, temperatura, otras) son inadecuadas para el uso de codificadores ópticos, se pueden emplear codificadores magnéticos que cumplen esencialmente las mismas funciones, pero reemplazando el disco con ranuras por uno con un arreglo de imanes o de dientes salientes. Si se usan imanes, los sensores pueden ser de tipo Hall o de tipo inductivo, si se usan dientes salientes, los sensores son de tipo inductivo.

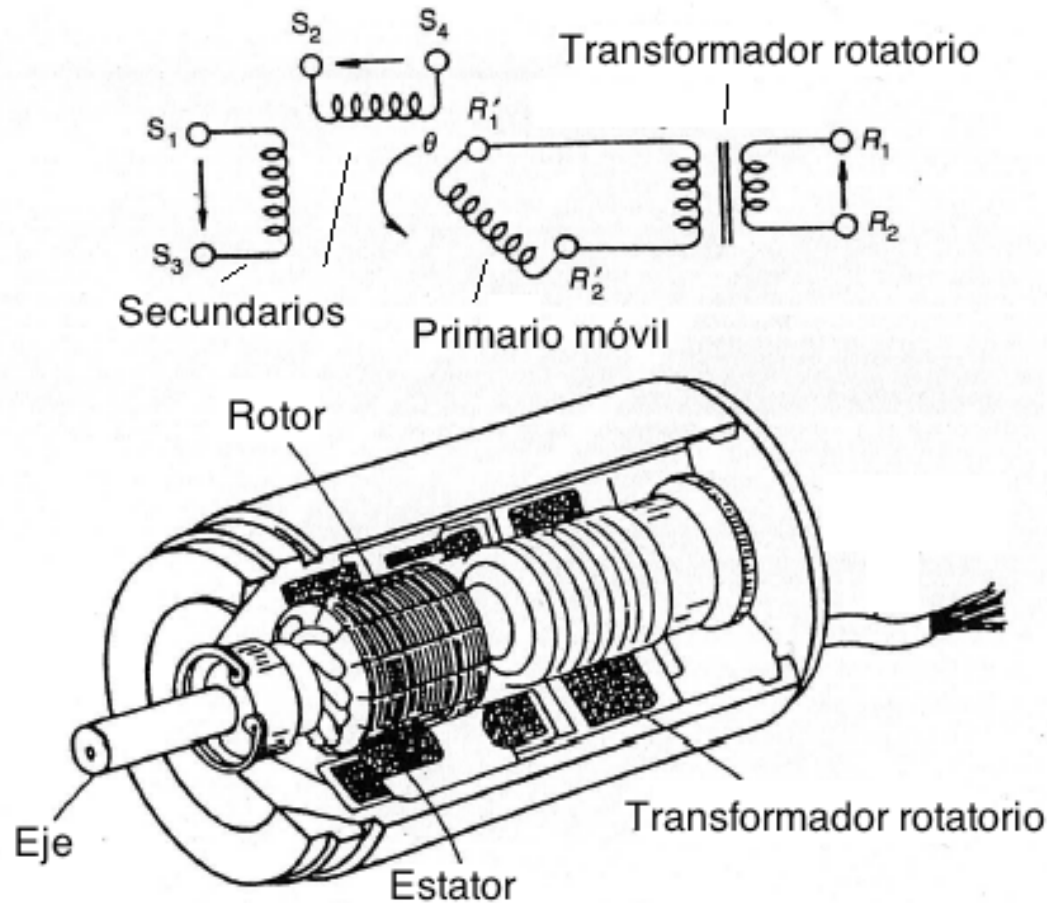


Codificador magnético semi-absoluto con imanes y sensores Hall.



Sensor magnético incremental con imanes y sensor inductivo.

2.-Resolver.



Resolver: Esquema (abajo) y circuito equivalente (arriba)

Un resolver es un dispositivo formado por un estator en el cual hay dos bobinas idénticas colocadas a 90° que sirven como dos secundarios individuales y un rotor en el cual hay otra bobina que sirve como primario del transformador de medición.

Para que el rotor tenga giro libre y no intervengan escobillas, el primario se alimenta con un transformador rotatorio que no interviene en el proceso de medición.

El eje del rotor se conecta al eje cuya posición se desea medir, asegurando coincidencia en la referencia de cero de ambos ejes.

Si la entrada del primario es $V_1 = A \sin(\omega t)$

Las salidas en cada uno de los dos secundarios son:

$$V_{o1} = Ak_1 \text{sen}\theta \text{sen}(\omega t + \alpha)$$

$$V_{o2} = Ak_2 \text{sen}\theta \text{sen}(\omega t + \alpha)$$

Donde k_1 y k_2 son las relaciones de transformación entre el primario y cada secundario (en teoría $k_1=k_2$), α es el error de alineación inicial primario-secundarios y primario-eje de interés y θ es el ángulo a medir.

Si se considera que no hay errores sistemáticos de alineación y los dos secundarios son idénticos, se tiene:

$$V_{o1} = A \text{sen}\theta \text{sen}(\omega t)$$

$$V_{o2} = A \text{sen}\theta \text{sen}(\omega t)$$

El proceso de medición del ángulo θ es el siguiente:

Primero se multiplica V_{o1} por el factor $\cos \phi$, y V_{o2} por el factor $\text{sen} \phi$:

$$V_{o1} = A \text{sen} \theta \cos \phi \text{sen}(\omega t)$$

$$V_{o2} = A \text{sen} \theta \text{sen} \phi \text{sen}(\omega t)$$

Donde ϕ es un valor, inicialmente arbitrario, guardado en un registro.

A continuación se hace:

$$V_{o1} - V_{o2} = A \text{sen}(\omega t) [\text{sen} \theta \cos \phi - \text{sen} \theta \text{sen} \phi]$$

$$V_{o1} - V_{o2} = A \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\theta - \phi)$$

Y se procede a cambiar ϕ hasta que la expresión se anula, en cuyo momento se tiene que el ángulo desconocido θ es igual al valor de ϕ que anula la función diferencia.

El conjunto de operaciones se ejecuta generalmente mediante un circuito analógico-digital dedicado, el conversor Resolver-Digital (conversor R/D), tal como el AD2S90AP.

Este integrado proporciona en su salida tanto la posición angular como la velocidad de giro tanto en formato analógico como digital, con 12 bits de resolución y hasta una velocidad máxima de 375 r.p.s.

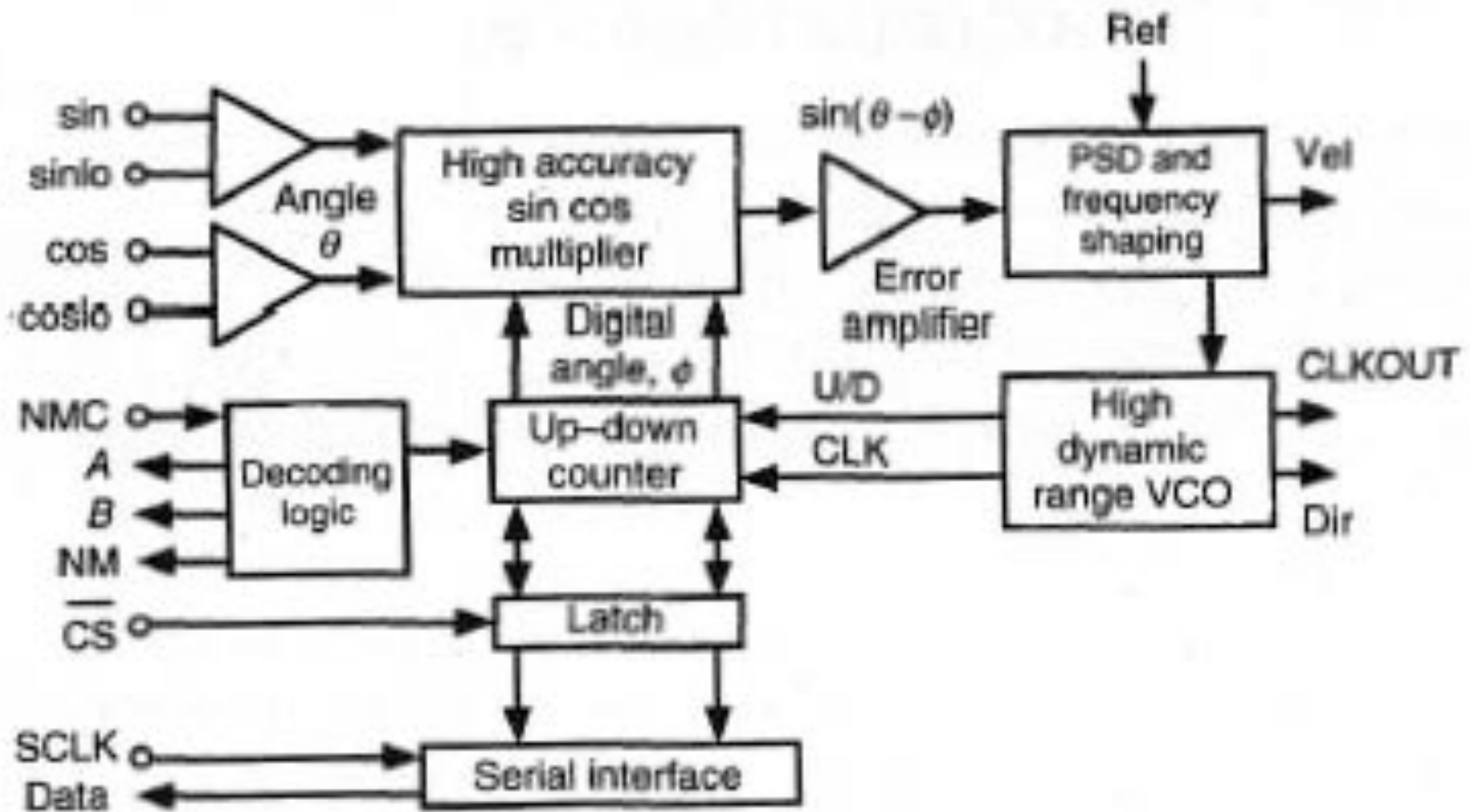


Diagrama de bloques del conversor Resolver/Digital Analog Devices AD2S90AP (cortesía Analog Devices).

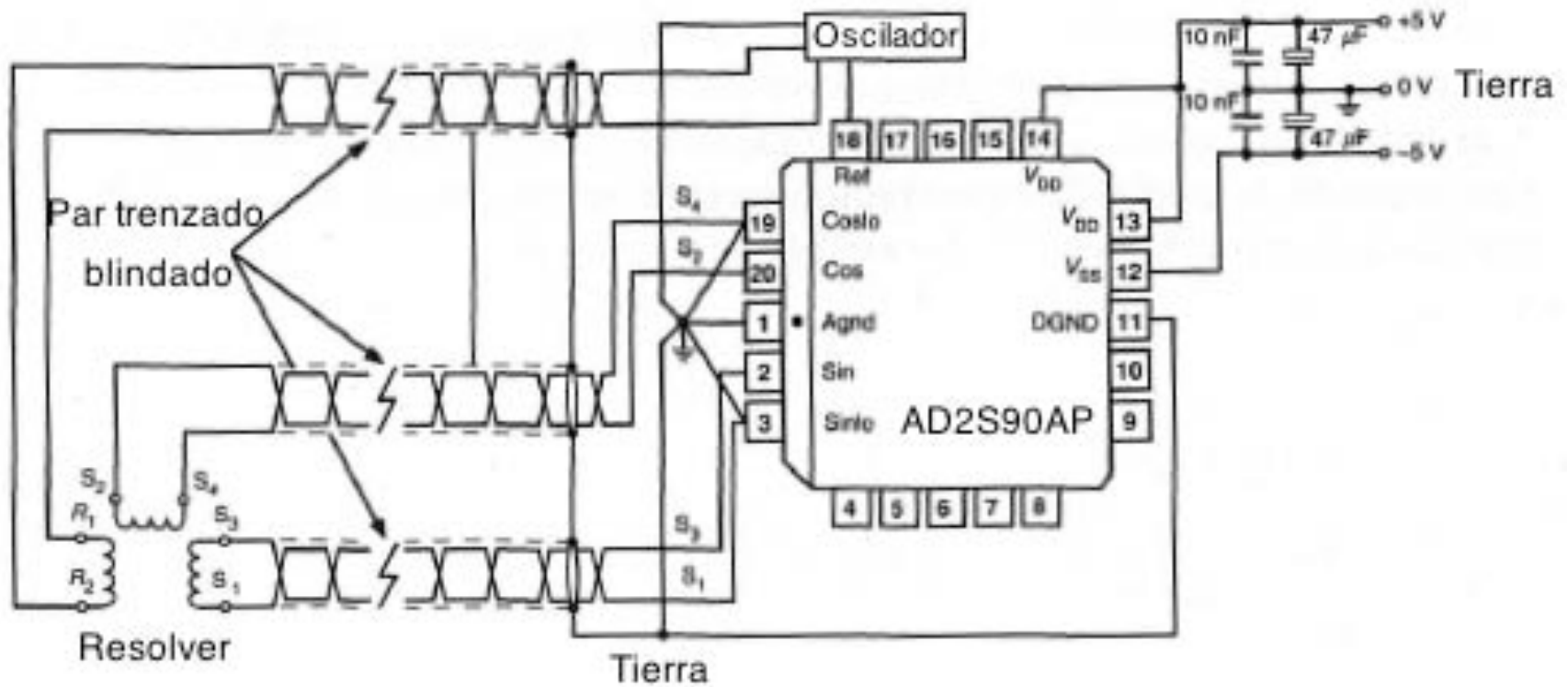
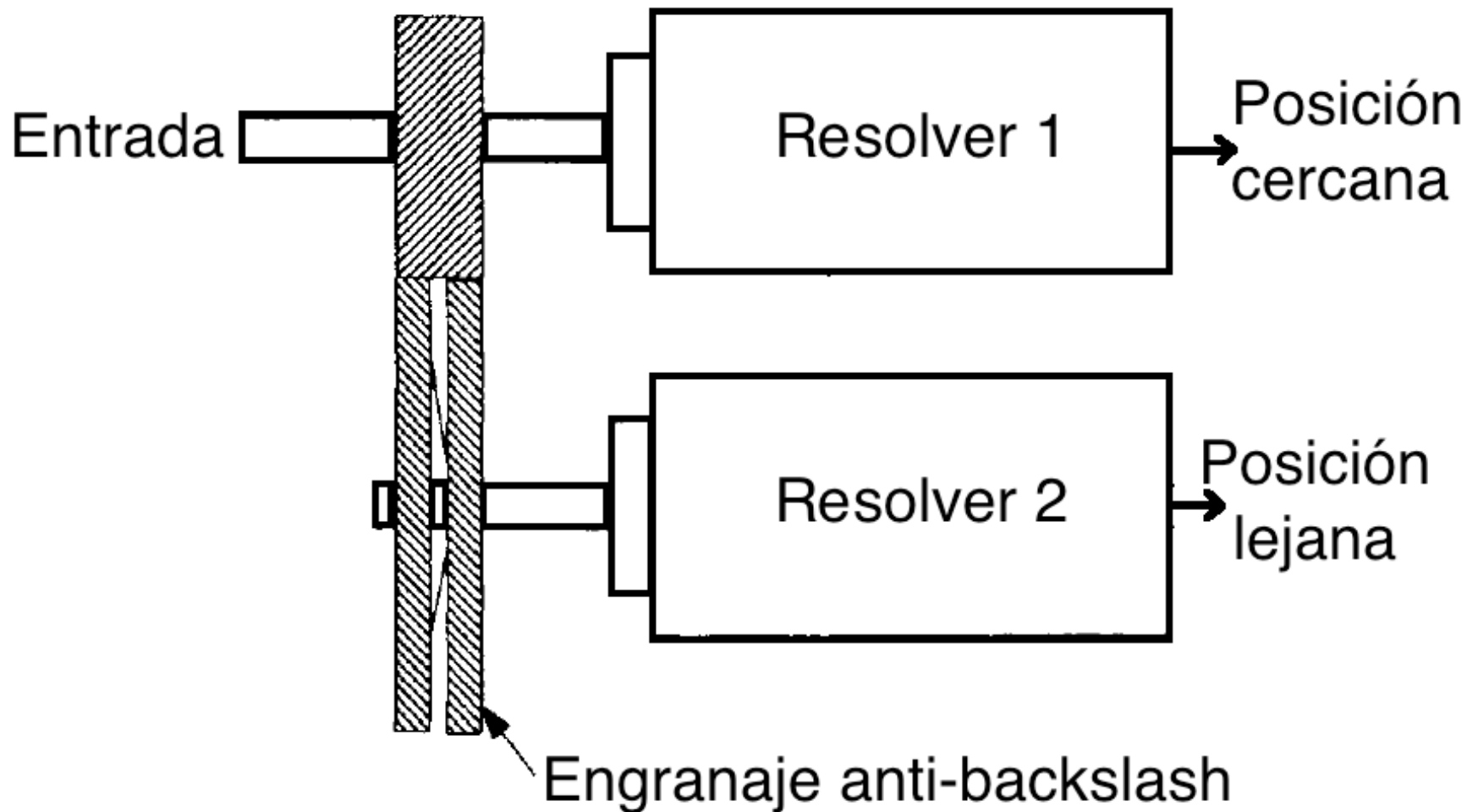


Diagrama de conexión Resolver-Convertor R/D AD2S90AP (cortesía Analog Devices).

El resolver es un medidor absoluto con un rango de 360° , por supuesto la información angular es válida solo en una revolución; si es necesario operar sobre un rango de varias revoluciones, hay dos alternativas:

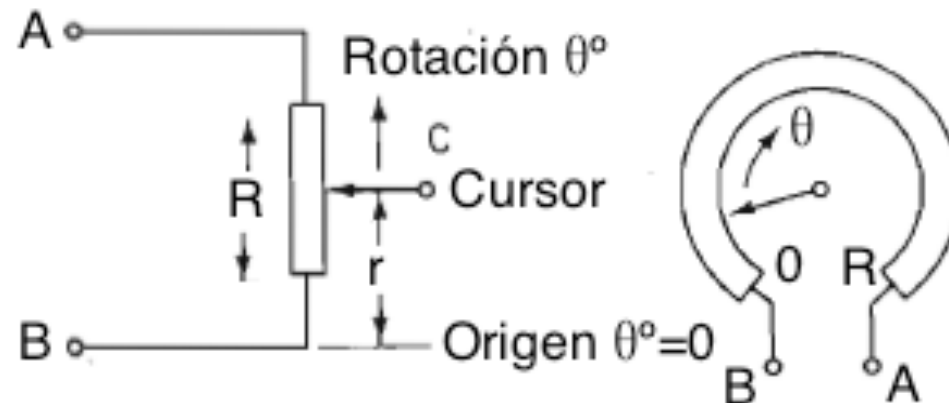
- 1.- Incrementar un contador de vueltas completas cada vez que la señal de salida del resolver regresa a cero.
- 2.- Establecer una jerarquía de resolvers relacionados mediante engranajes, de forma que cada vuelta completa del asociado al eje cuyo desplazamiento angular se desea medir produzca un giro fraccional en el segundo resolver.

Esta solución es evidentemente mas costosa y compleja, pero mantiene la referencia absoluta de posición en caso de interrupciones en la operación normal, lo que puede ser de interés en alguna aplicación crítica.



3.-Sensor resistivo (potenciómetro).

El sensor es un potenciómetro lineal giratorio especialmente diseñado para minimizar el par necesario para mover el cursor y preparado para soportar un gran número de giros de extremo a extremo. para realizar la medición el eje de mando del potenciómetro debe estar conectado al eje cuya posición angular se desea medir de forma sólida que no permita juego entre ambos.



Circuito equivalente y esquema de operación, potenciómetro de una fracción de vuelta.

Dependiendo de la aplicación el potenciómetro empleado puede ser de una vuelta (usualmente limitado a menos de 360°), multivuelta (un número fijo, n , de vueltas, para un rango de $n \cdot 360^\circ$ o de giro continuo, con un rango de 360° , repetitivo).

Los potenciómetros de una vuelta y los multivuelta dan indicación absoluta de la posición, los de giro continuo dan una indicación relativa, ya que los valores se repiten cíclicamente en cada vuelta completa.



Despiece de un potenciómetro de medición de una vuelta.

Asumiendo linealidad perfecta en la distribución del material resistivo en todo el arco de trabajo del potenciómetro y contacto perfecto entre el cursor y el material resistivo, se tiene:

$$\frac{r}{R} = \frac{\theta}{\theta_T}$$

Donde r es la resistencia medida entre el cursor y el origen del desplazamiento (extremo B del potenciómetro), R es la resistencia total, θ es el ángulo de desplazamiento del cursor y θ_T es el ángulo de recorrido total.

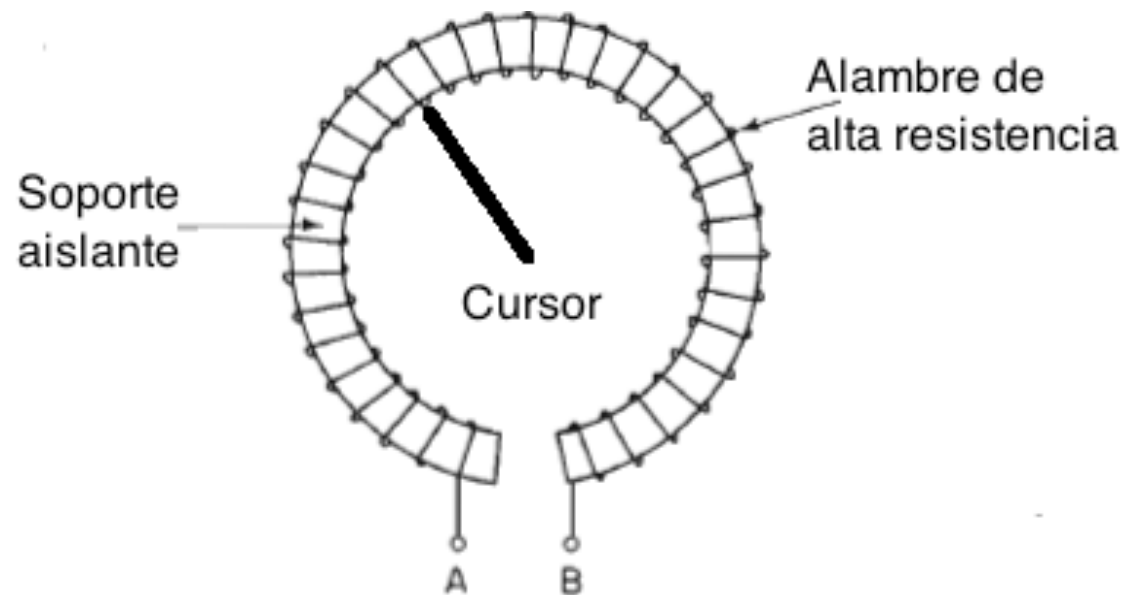
El factor de escala del potenciómetro resulta R_t/θ° Ohm; en los de giro indefinido el factor de escala es $R_t/360^\circ$ Ohm.

En estas condiciones, si se alimenta el potenciómetro con una tensión dc de valor V_i entre A y B, la salida es:

$$V_o = V_i \frac{r}{R} = V_i \frac{\theta}{\theta_T} \Rightarrow \theta = \theta_T \frac{V_o}{V_i}$$

La relación ideal asume que no hay efecto de carga debido a la impedancia de entrada del circuito de medición, lo que se puede asegurar si el cursor del potenciómetro se conecta directamente a un OPAM en configuración seguidor antes de conectarlo a una etapa de ganancia o un conversor A/D.

Desde el punto de vista del material resistivo empleado, los potenciómetros pueden ser de alambre enrollado o de pasta continua; en el primer caso la resistencia está cuantificada dado que el cursor solo puede hacer contacto en algunos puntos del alambre resistivo, y por lo tanto la salida por lo tanto también lo está.



Esquema de contacto de un potenciómetro de alambre

En la práctica tanto los potenciómetros de alambre como los de pasta resistiva tienen irregularidades de fabricación, por lo que no se cumple con exactitud la relación ideal ángulo/resistencia; el fabricante debe proporcionar una gráfica de calibración indicando cual es la máxima desviación posible en el modelo específico considerado.



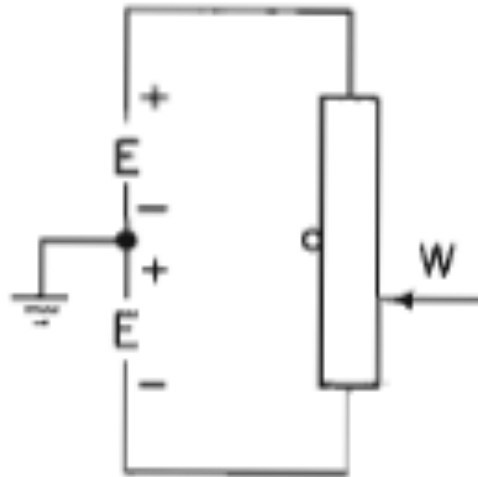
Gráfica de calibración de un potenciómetro de medición.

Otra fuente de error es el efecto del final de carrera sobre la resistencia en los dos extremos, de tal manera que la tensión de salida no sea exactamente 0 cuando el cursor está en el límite

inferior de la carrera, o exactamente igual a la tensión de alimentación cuando está en el límite superior de la carrera.

Estos errores sistemáticos deben ser eliminados mediante sendos potenciómetros de ajuste de precisión conectados en serie con el potenciómetro de medición.

Si el ángulo de desplazamiento a medir puede ser en cualquiera de las dos direcciones a partir de una referencia de cero, lo mas conveniente puede ser alimentar el potenciómetro con una fuente doble de tensión



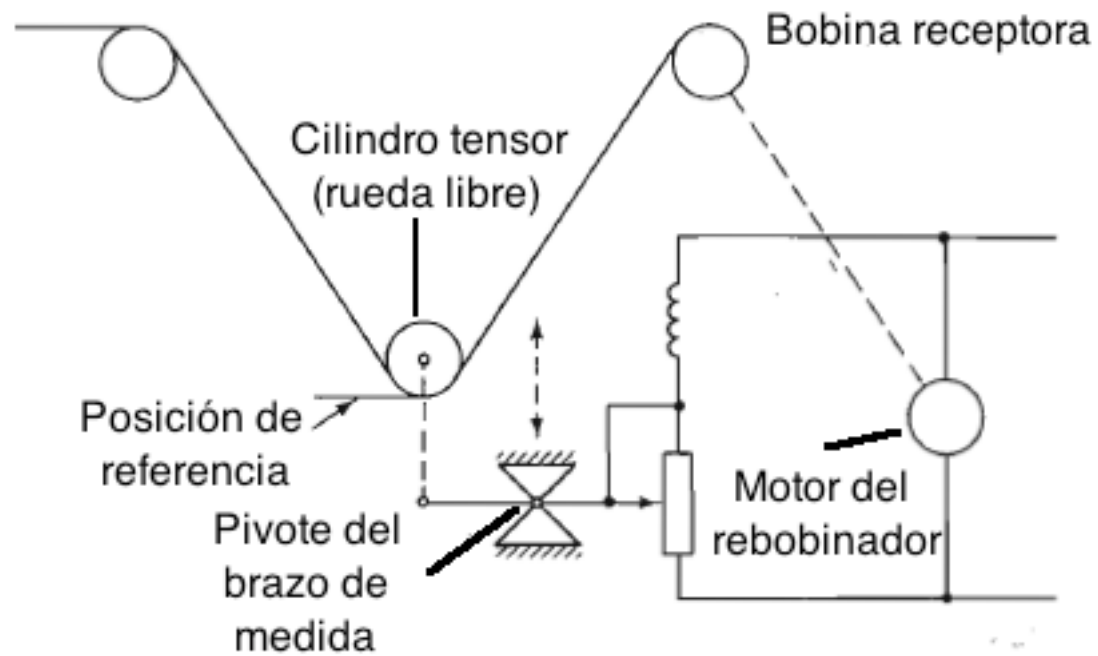
En estas condiciones el potenciómetro se instala de forma que el curso esté en el punto medio de su carrera cuando la eje se encuentra en la posición 0 mecánica, para que la polaridad de la señal de tensión de salida indique directamente la dirección en la cual se produce el desplazamiento.

El roce del cursor sobre el elemento resistivo produce desgaste que puede llegar a producir errores de medición; el sensor potenciométrico es el único que requiere contacto físico entre el elemento móvil y el fijo, lo cual es una desventaja frente a los otros métodos de medición que no dependen de escobillas o cursores; por otra parte el circuito de manejo de la señal de medición es posiblemente el mas sencillo, lo que puede ser una ventaja en ciertas aplicaciones donde el costo sea crítico.

Medición indirecta de fuerza o tensión mecánica.

La medición directa de fuerza o tensión mecánica es complicada, sobre todo en sistemas en movimiento; esto ha llevado al desarrollo de mecanismos que convierten la variable a medir en desplazamiento angular, que se puede medir con gran precisión con cualquiera de los métodos anteriormente descritos; conocida la relación entre la variable a medir y el desplazamiento mecánico producido por esta, la lectura del ángulo proporciona la información necesaria para calcular la fuerza o tensión mecánica que se desea conocer.

Como ejemplo se puede considerar el sistema de medición de la tensión de alimentación en un equipo bobinador.



Esquema del sistema de medición indirecta de la tensión del material en un equipo bobinador

El medidor esta formado por un cilindro tensor que rueda libremente en contacto con el material y está libre para desplazarse en sentido vertical.

El cilindro subirá si la tensión en la cinta del material aumenta, y bajará si disminuye. El equilibrio se establece cuando el peso del cilindro es compensado exactamente por los dos vectores de tensión en la cinta del material a bobinar

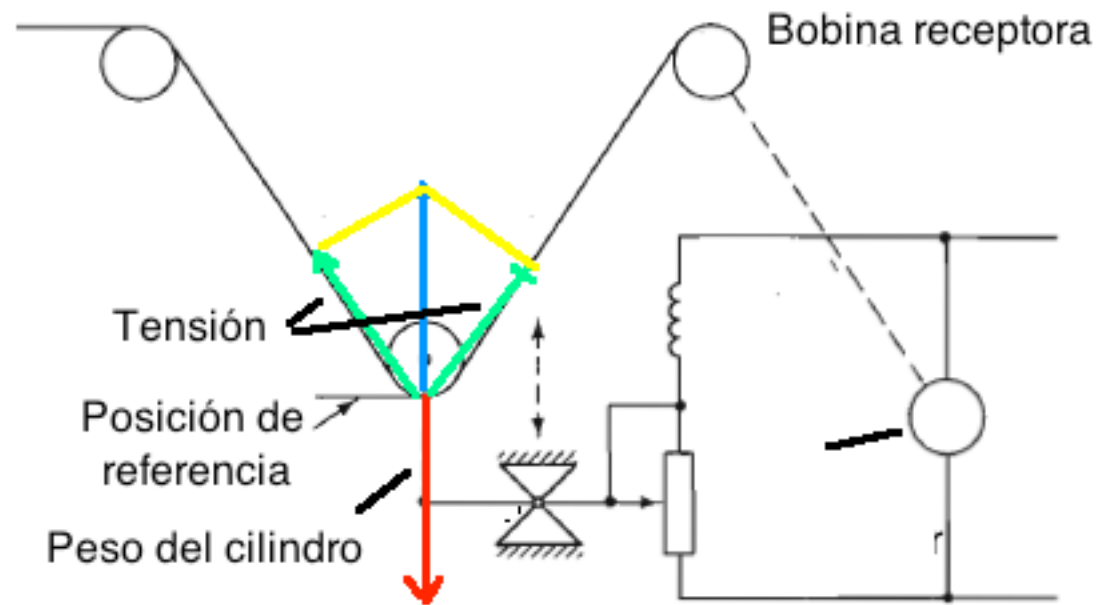


Diagrama vectorial de las fuerzas en el punto de equilibrio, el peso (vector rojo) es exactamente neutralizado por el vector de oposición (vector azul) resultado de la suma vectorial de los vectores de tensión en la cinta del material (vectores verdes).

El movimiento vertical del eje del cilindro tensor se trasmite mediante un arreglo con un brazo y un pivote central a un potenciómetro lineal centrado en la posición de equilibrio, los desplazamientos del cursor son iguales a los del cilindro en magnitud, pero de sentido contrario.