

CAPITULO VII

SENSORES

Un sensor convierte una señal física de un tipo en una señal física de otra naturaleza. Por ejemplo una termocupla produce un voltaje que está relacionado con la temperatura, así mismo en una resistencia metálica se aprovecha el fenómeno de variación de la resistencia con la temperatura para producir una señal de voltaje que sea proporcional a la temperatura.

La diferencia entre los dos ejemplos está que para el caso de la termocupla se produce un milivoltaje producto de la unión de dos materiales a una determinada temperatura, en el segundo ejemplo la pura resistencia por si sola no puede hacer la conversión a voltaje sino que requiere de un circuito y de una fuente de alimentación. En el primer caso tenemos al elemento sensor sólo, en el segundo a el elemento sensor más un circuito, en este segundo caso la unión de los dos constituye el transductor. Tanto en el caso de la termocupla como de la resistencia metálica se necesitan etapas adicionales de acondicionamiento como amplificación y filtraje de la señal.

7.1 Características de los sensores

Cuando se diseñan sistemas de adquisición de datos con computadora, hay aspectos a cerca de los sensores que es necesario tener en cuenta:

- La naturaleza de la señal que el sensor – transductor genera: voltaje, rango de amplitud, respuesta en frecuencia, precisión necesaria, determinan el tipo de acondicionamiento de señal, convertidor A/D y cualquier otro hardware a utilizar.
- La influencia de las señales de ruido así como los efectos de carga del hardware de adquisición de datos sobre el sensor.

- La calibración del sensor con respecto a la variable física. Si la respuesta del sensor a los cambios de la variable física es lineal o no. Una calibración mal hecha va a producir mediciones erróneas.
- La interdependencia entre los distintos componentes del sistema de adquisición de datos, por ejemplo un sensor muy bueno, con un pobre convertidor A/D no sirve de casi nada.
- La **precisión** del sensor, esto es la capacidad de medir el mismo valor repetidas veces en idénticas condiciones.
- El **tiempo de respuesta** del sensor, es decir, el tiempo requerido para responder a un cambio brusco de la variable que está siendo sensada.
- El **coeficiente de temperatura** del sensor, el cual viene dado por el cambio que se produce en la respuesta del sensor debido al cambio en la temperatura a la cual se encuentra, por ejemplo el aumento en las corrientes de fuga y el voltaje offset de un amplificador, el aumento de la corriente en la oscuridad de un fotodiodo.
- La **histéresis** de un sensor, la cual se define como la dependencia de la salida del sensor de la respuesta anterior. Esta es muy común en sistemas magnéticos y mecánicos.

Existen varias formas de clasificar los sensores, por ejemplo se pueden clasificar por el principio físico de funcionamiento (inductivo, capacitivo, termoelectrico o resistivo etc.), por la variable física medida (temperatura, presión, posición etc. por la capacidad de generar energía (activos) o de necesitar de un circuito de excitación (pasivos). En este trabajo se estudian los sensores de acuerdo al tipo de variable física medida.

7.2 Sensores de temperatura

Entre los sensores más comunes empleados para medir temperatura con instrumentación electrónica se tienen: RTDs, termistores, sensores de circuito integrado (IC) y termocuplas.

- **Detector de resistencia metálica (RTD)**

El detector de resistencia metálica RTD, es uno de los sensores más precisos de temperatura. Se caracteriza por su excelente estabilidad, usualmente es utilizado para medir temperaturas de 0 °C a 450 °C.

La resistencia metálica es de alambres finos o de películas de metales. Su resistencia varía en forma directamente proporcional con la temperatura. Ellas son fabricadas de metales como cobre, plata, oro, tungsteno y níquel, no obstante el platino es el material más comúnmente usado. El platino presenta una excelente estabilidad y la más alta resistividad con respecto a los otros metales.

Entre las desventajas de las RTDs de platino (Pt100) se pueden mencionar: 1- su alto costo, por lo que hacer instrumentación con ellas es caro; 2- debido a su baja resistencia (100 Ω a 0 °C) y sensibilidad (0.4 $\Omega/^\circ\text{C}$), los alambres de conexión es uno de los principales problemas, la vía para minimizarlo es usar el esquema de medición con 4 alambres; 3- en el sistema de medición con 4 alambres, dos alambres llevan y traen la corriente proveniente de una fuente de corriente constante y otros dos alambres se emplean para la conexión del instrumento de medición de voltaje, convertidor A/D en un sistema de adquisición de datos por computadora; 4- la corriente de excitación constante produce una disipación de potencia en la RTD, lo cual le genera calentamiento que incrementa adicionalmente su temperatura que no es posible de detectar cuando se hace la medición de temperatura, una forma de reducir este error usar una corriente de excitación lo más pequeña posible.

- **Termistor**

Un termistor es un semiconductor hecho de dos óxidos metálicos unidos dentro de una pequeña bola, disco u otra forma y recubierto con epóxido o vidrio.

Hay dos clases de termistores los que presentan un coeficiente negativo de temperatura (CNT), cuya resistencia disminuye con la temperatura y coeficiente positivo con la temperatura (CPT) cuya resistencia aumenta con la temperatura. Los termistores CNT son los más usados para medición de temperatura. Valores comunes de termistores son 2252 Ω , 5000 Ω y 10000 Ω . Un termistor de 5000 Ω tiene aproximadamente una sensibilidad de 200 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ a la temperatura ambiente, comparada con 0.4 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ de la Pt100, la sensibilidad del termistor es bastante más alta.

Los termistores se pueden emplear para medir temperaturas hasta de 300 $^{\circ}\text{C}$. Debido a que los termistores tienen una resistencia alta, la resistencia de los conductores que llevan la corriente no afecta la exactitud de las mediciones. Mediciones con dos alambres es adecuado en circuitos con termistores.

Ya que la resistencia es bastante alta, la corriente de excitación debe ser pequeña para evitar el auto calentamiento que afecte la exactitud de la medición.

• Sensor de circuito integrado IC

Los sensores de circuito integrado se fundamentan en la característica de la unión $p-n$ de los semiconductores. Están formados por circuitos integrados sobre un chip, el cual presenta una salida lineal y proporcional a la temperatura. Se consiguen sensores IC que presentan salidas en voltaje analógico y en forma digital. Por estar hechos a base de silicio, su rango de temperatura está limitado aproximadamente a los 150 $^{\circ}\text{C}$.

Una de las principales ventajas de los sensores IC es su fácil interface. Entre las desventajas se tienen: el limitado rango de temperatura, la necesidad de alimentación y el auto calentamiento.

• Termocuplas

El funcionamiento de una termocupla se basa en el principio físico de la unión de dos alambres de metales diferentes que produce una diferencia de potencial en los dos extremos que no se encuentran en contacto que es función de la temperatura a la cual se encuentra la unión. Este principio se llama *efecto Seebeck*, en memoria a Thomas Seebeck quien lo descubrió en 1821. El voltaje producido en la unión es no lineal con respecto a la temperatura, bastante pequeño (del orden de los milivoltios).

Varios tipos de termocuplas existen. Ellas se identifican mediante letras mayúsculas que indican su composición de acuerdo a las convenciones establecidas por el American National Standards Institute (ANSI). Por ejemplo una termocupla tipo J está hecha de la unión de cobre-constantan.

Una diferencia fundamental entre los sensores de temperatura mencionados anteriormente y la termocupla es la necesidad que se tiene de una referencia para hacer mediciones absolutas con ella.

Veamos el siguiente ejemplo: en la figura 7.1 se muestra una termocupla de hierro - constantan que se encuentra conectada al instrumento de medición (tarjeta de adquisición de datos TAD) a través de alambres de cobre. En este circuito existen tres uniones diferentes: J1, J2 y J3. La unión J1 genera un voltaje proporcional a la temperatura que se está midiendo. Las uniones J2 y J3 tienen sus propios voltajes Seebeck. El amplificador de instrumentación de la TAD va a medir el voltaje generado por todas estas uniones. Para determinar la temperatura de la unión J1, se necesita conocer los voltajes de las uniones J2 y J3 para restárcelos al total y poder conocer el voltaje de la unión J1. Esto es lo que se conoce como compensación de la unión fría.

Tradicionalmente la referencia ha sido 0°C, lo cual se logra manteniendo la unión de referencia bajo hielo a 0°C. Bajo estas condiciones, si la temperatura se

encuentra sobre 0°C , un milivoltaje positivo aparece a la salida del circuito abierto de la termocupla; si es menor a 0°C el milivoltaje de salida es negativo, y cuando la referencia y la unión en la cual se mide la temperatura están a 0°C la salida de la termocupla es de 0 milivoltios. Aunque este método es bastante exacto, no es el más práctico. Una manera más práctica consiste en medir la temperatura de la unión de referencia, directamente con un sensor de temperatura, tal como un termistor o un sensor de circuito integrado IC. Este proceso de *compensación de la unión fría* puede simplificarse aprovechando algunas de las características de las termocuplas.

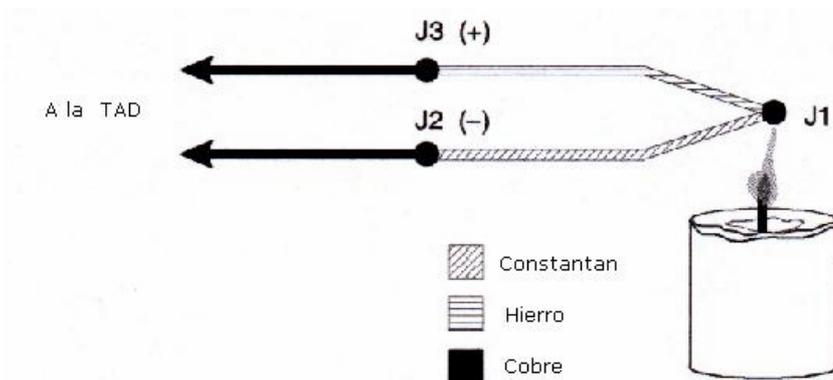


Figura 7.1. Termocupla Hierro - Constantan

De acuerdo a la Ley de los Metales Intermedios el circuito de la figura 7.2 es similar al circuito anterior de la figura 7.1. En el circuito de la figura 7.2 un trozo de alambre de constantan se ha insertado antes de la unión J3 dando origen a una unión más J4.

En el circuito de la figura 7.2 las uniones J2 y J4 son del mismo tipo (cobre – constantan); ya que ambas se encuentran a la misma temperatura y en direcciones contrarias se cancelan.

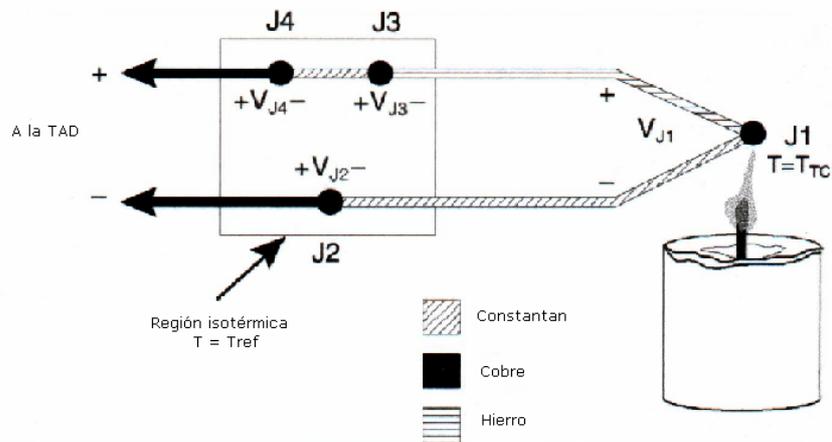


Figura 7.2. Termocupla con inserción de conductor extra en región isotérmica

Las uniones J1 y J3 son del mismo tipo, pero están en direcciones contrarias, por lo que sus voltajes tienen signos opuestos. La unión J3 se encuentra a la temperatura de referencia y J1 a la temperatura que se está midiendo. De lo anterior se desprende que el voltaje medido por la TAD va a ser igual al voltaje de la temperatura medida menos el voltaje de la temperatura de referencia o lo que es igual el voltaje de la temperatura medida es igual al voltaje medido por la TAD más el voltaje de la temperatura de referencia.

Utilizando la relación anterior y midiendo la temperatura de referencia con un sensor se obtiene el voltaje de la temperatura medida y de él ya sea por las tablas de termocuplas o por los polinomios del National Institute of Standards and Technology (NIST), la temperatura. En la Tabla 7.1 se muestran los coeficientes de los polinomios para los diferentes tipos de termocuplas.

La termocupla es uno de los sensores más populares para medir temperatura. A diferencia de los otros sensores de temperatura, ella no requiere de fuente de alimentación ya que es auto generadora de potencia; son económicas y fáciles de construir debido a que son básicamente la unión de dos alambres. Existe una variedad de ellas en el mercado en un amplio rango de temperaturas. Se identifican por letras siendo las más populares J, K y T.

Las termocuplas presentan algunos inconvenientes. Debido al bajo voltaje que generan y a su baja sensibilidad requieren de una instrumentación muy exacta, y de otro sensor para realizar la compensación de la unión fría. Por otro lado las termocuplas son menos estables que los otros sensores de temperatura.

	Tipo de termocupla $(T = a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_nv^n)$					
	E	J	K	R	S	T
Range	0° to 1,000 °C	0° to 760 °C	0° to 500 °C	-50° to 250 °C	-50° to 250 °C	0° to 400 °C
a_0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
a_1	1.7057035E -2	1.978425E -2	2.508355E -2	1.8891380 E-1	1.84949460E -1	2.592800E -2
a_2	-2.3301759E -7	-2.001204E -7	7.860106E -8	-9.3835290E -5	-8.00504062E -5	-7.602961E -7
a_3	6.5435585E -12	1.036969E -11	-2.503131E -10	1.3068619E -7	1.02237430E -7	4.637791E -11
a_4	-7.3562749E -17	-2.549687E -16	8.315270E -14	-2.2703580E -10	-1.52248592E -10	-2.165394E -15
a_5	-1.7896001E -21	3.585153E -21	-1.228034E -17	3.5145659E -13	1.88821343E -13	6.048144E -20
a_6	8.4036165E -26	-5.344285E -26	9.804036E -22	-3.8953900E -16	-1.59085941E -16	-7.293422E -25
a_7	-1.3735879E -30	5.099890E -31	-4.413030E -26	2.8239471E -19	8.23027880E -20	
a_8	1.0629823E -35		1.057734E -30	-1.2607281E -22	-2.34181944E -23	
a_9	-3.2447087E -41		-1.052755E -35	3.1353611E -26	2.79786260E -27	
a_{10}				-3.3187769E -30		
Error	±0.02° C	±0.05° C	±0.05° C	±0.02° C	±0.02° C	±0.03° C

Tabla 7.1. Coeficientes de Polinomios NIST

7.3 Instrumentación en sensores de temperatura

- Detectores de resistencia metálica (RTD)

Típicamente una fuente de corriente constante de alta precisión se usa como fuente de excitación de una RTD. Debido a que la resistencia de la RTD es pequeña, la conexión de 4 alambres es la más recomendada, para evitar el error introducido por la caída de voltaje en la resistencia de los conductores que transportan la corriente. En la figura 7.3 se muestra esta conexión.

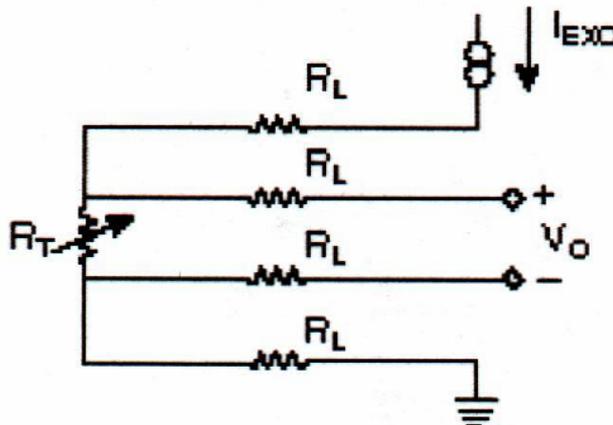


Figura 7.3. Conexión de 4 alambres en RTD

En esta conexión un par de conductores transmite la corriente de excitación hasta la RTD, y otro par lleva el voltaje medido en la resistencia hasta el instrumento de medición, acondicionamiento de señal y tarjeta de adquisición de datos son necesarios para hacer instrumentación virtual con RTD. La corriente de excitación debe ser bastante pequeña para evitar errores debido a auto calentamiento de la RTD. Igualmente ya sea a nivel del módulo de acondicionamiento o de la TAD se requiere de un amplificador de instrumentación de ganancia alta.

La relación entre resistencia y temperatura para conductores viene dada por:

$$R_T = R_0(1 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n) \quad (7.1)$$

donde

R_T = resistencia a la temperatura de T °C

R_0 = resistencia a 0 °C

$a_1 \dots a_n$ son constantes

El número de constantes depende del material, el rango de temperatura y la exactitud requerida.

Una expresión lineal aproximada para rangos de 0 a 100 °C es:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (7.2)$$

donde α se denomina coeficiente de temperatura del material, el cual se determina a partir del ajuste lineal de la curva de R vs T del conductor. Para la resistencia de platino Pt-100 se tiene $\alpha = 0.003911$ °C⁻¹.

Una expresión más exacta viene dada por:

$$R_T = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3] \quad (7.3)$$

donde R_0 es la resistencia de la RTD a 0°C y A , B y C son los coeficientes Callendar – Van Dusen, cuyos valores se muestran en la tabla 7.2

Estándar	Coefficiente de Temperatura (α)	A	B	C*
DIN 43760	0.003850	3.9080×10^{-3}	-5.8019×10^{-7}	-4.2735×10^{-12}
American	0.003911	3.9692×10^{-3}	-5.8495×10^{-7}	-4.2325×10^{-12}
ITS-90	0.003926	3.9848×10^{-3}	-5.870×10^{-7}	-4.0000×10^{-12}

* Únicamente para temperaturas por debajo de 0 °C. $C = 0.0$ para temperaturas por encima de 0 °C.

Tabla 7.2. Coeficientes de Callendar-Van Dusen para RTDs

• Termistor

Para alimentar un termistor, lo más común es usar una fuente de corriente constante. De manera alterna una fuente de voltaje y un circuito serie formado por el termistor y una resistencia de precisión para producir un divisor de voltaje. En la figura 7.4 se muestran los dos esquemas.

Ya que la resistencia del termistor es elevada (ej. 5000 Ω), conexiones de 4 alambres podrían usarse pero no son necesarias para evitar los errores debidos a las resistencias de los alambres que conducen la corriente, como si ocurre en el caso de la RTD. Al igual que en la RTD la corriente de excitación debe ser pequeña para evitar errores por auto calentamiento del termistor y se debe emplear amplificador de instrumentación con ganancia elevada.

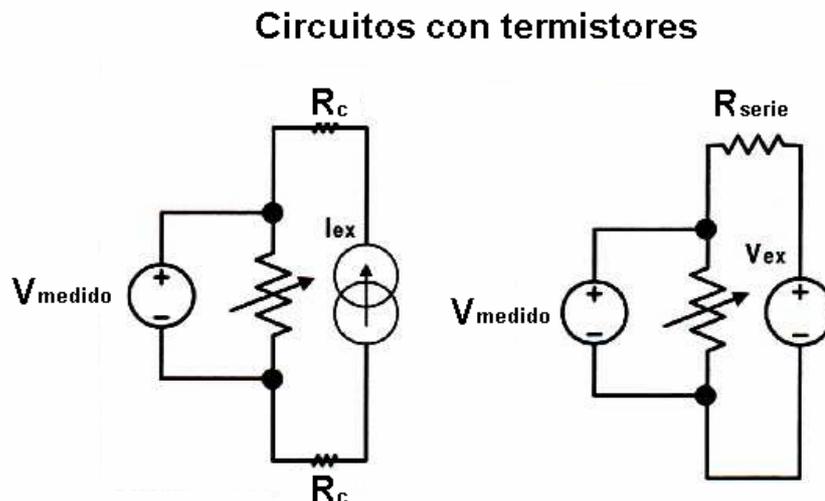


Figura 7.4. Circuitos de excitación con termistor

La relación entre resistencia y temperatura en un termistor viene dada por:

$$R_T = R_{T_0} \exp[\beta(1/T - 1/T_0)] \quad (7.4)$$

donde T es la temperatura en $^{\circ}\text{K}$, T_0 la temperatura de referencia en $^{\circ}\text{K}$ y β es el coeficiente de temperatura del material. De esta expresión se puede notar la caída fuerte de la resistencia del termistor con la temperatura. Una expresión más exacta está dada por:

$$1/T = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (7.5)$$

donde A , B y C son constantes empíricas determinadas a partir de la curva R vs T tomando tres pares de valores y resolviendo un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas.

• Sensor de circuito integrado IC

Todo sensor de circuito integrado IC necesita de fuente de alimentación. Un sensor de IC, como el LM35, tiene sensibilidad de $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Se debe usar un amplificador con ganancia alta para conseguir la mejor resolución. Los sensores de IC son susceptibles de auto calentamiento. Especial cuidado debe ser tomado durante el montaje del sensor sobre el objeto a sensar, de manera que pueda disipar el calor y evitar que el IC pueda calentarse más que el objeto.

• Termocupla

Ya que el voltaje generado por una termocupla es muy pequeño ($\sim 50 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$), se debe usar un amplificador con la ganancia lo más alta posible. Adicionalmente se debe emplear un convertidor A/D con una alta resolución para conseguir mejor resolución a nivel del instrumento digital virtual.

La termocupla también requiere como ya se mencionó de un circuito de compensación de la unión que se encuentra a la temperatura de referencia, el cual incluye a un sensor que puede ser un termistor o un sensor de circuito integrado IC con su respectivo circuito eléctrico.

Como parte del acondicionamiento a emplear para todos los tipos de sensores de temperatura, estaría el uso de filtros pasa bajas para rechazar las señales de ruido provenientes de las líneas de potencia (60 Hz) y por otro lado evitar el efecto alias, problema siempre presente en los sistemas muestreados, como se verá más adelante en el Capítulo IX

7.4 Sensores para medición de presión y fuerza

Tensión es la cantidad de deformación de un cuerpo a causa de una fuerza aplicada a él. Más específicamente, la tensión (ε) es definida como el cambio fraccional en la longitud del cuerpo.

Es importante tener presente que la tensión ocurre en la dirección paralela como perpendicular a la fuerza aplicada. La tensión principal, es aquella producida en la dirección de la fuerza, y viene dada por $\varepsilon = \Delta L/L$, y la tensión transversal, es la producida en la dirección perpendicular a la fuerza aplicada y viene dada por $\varepsilon_T = \Delta W/W$. En la figura 7.5 se ilustran estas relaciones.

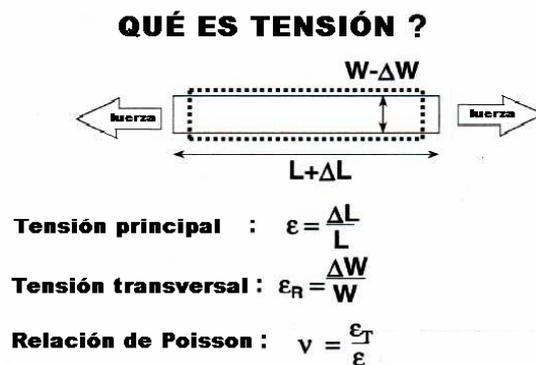


Figura 7.5. Tipos y relación entre tensiones

La relación entre las dos tensiones se denomina relación de Poisson $\nu = \epsilon_T/\epsilon$ y depende del material. Por ejemplo la relación de Poisson es 0.285 para el acero y 0.32 para el aluminio. La unidad de ϵ es adimensional, usualmente por lo pequeña que es, se expresa tomando la palabra del inglés en microstrain ($\mu\epsilon$). Un microstrain representa una deformación una parte en un millón. Un valor de 10000 microstrain representa una deformación del 1%.

• Galga Extensométrica

Una galga extensométrica consiste de un alambre muy fino, o más comúnmente un papel metálico arreglado en forma de rejilla como se muestra en la figura 7.6. Esta forma de rejilla permite aprovechar la máxima cantidad de material de la galga sujeto a la tensión a lo largo de su eje principal.

La rejilla se encuentra pegada a un apoyo delgado, el cual se encuentra unido a la superficie del objeto sometido a tensión, fuerza o presión. Por lo tanto la tensión experimentada por el objeto es transmitida directamente a la galga extensométrica, la cual responde con cambio lineal en su resistencia eléctrica. El parámetro que define la sensibilidad de una galga se conoce como factor de galga GF, y es definido como el cociente entre el cambio fraccional de la resistencia eléctrica y la tensión ϵ . En la figura 7.7 se aprecia el cálculo del factor de galga. El factor de galga al igual que la tensión ϵ es adimensional.

Qué es una galga extensiométrica?

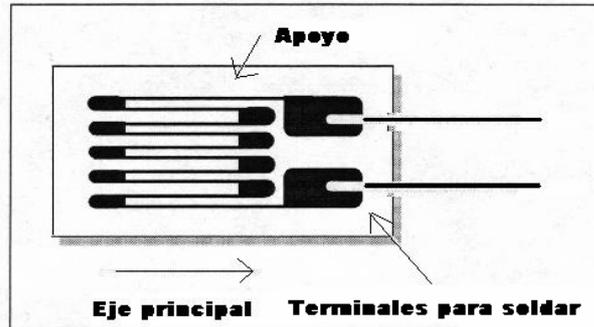


Figura 7.6. Galga extensométrica

Sensibilidad de las galgas

Factor de galga :

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

- GF = 2 Para la mayoría de las galgas
- 3500 $\mu\epsilon$ (.35 %) \Rightarrow $\Delta R/R = .7\%$

Figura 7.7. Cálculo del factor de galga

El circuito más comúnmente empleado con galgas es el circuito puente. En la figura 7.8 se muestra la conexión de un circuito puente con una galga. La galga es colocada en una de las ramas del puente. La resistencia en la rama inferior se selecciona de manera que sea igual a la resistencia de la galga cuando no está siendo sometida a tensión. ($R_G = R_3$). Las dos resistencias restantes del puente se escogen iguales ($R_2 = R_1$). En la figura 7.8 también se observa la fórmula que permita determinar la tensión ϵ a partir de el factor de galga FG del voltaje de alimentación E_I y del voltaje de salida E_O . Esta expresión busca cancelar el error por desbalance inicial del puente.

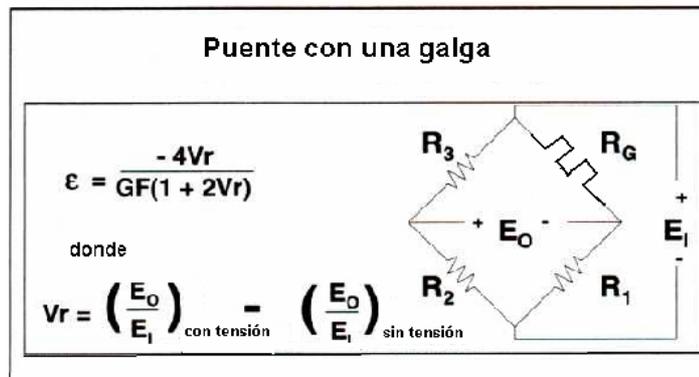


Figura 7.8. Circuito puente con una galga

El puente con una galga no tiene compensación por cambio en el valor de la resistencia de la galga por aumento de su temperatura debido al paso de la corriente de la eléctrica.

Las otras dos configuraciones empleadas son el puente con dos galgas y cuatro galgas.

En el puente con dos galgas, éstas son colocadas en dos ramas adyacentes. Si la localización física y la fuerza aplicada al cuerpo bajo prueba es tal que una de las galgas recibe compresión y la otra extensión de la misma magnitud, la salida del puente es el doble de la del puente con una galga. Similarmente, la salida del puente es cero si la resistencia de las dos galgas cambia en la misma cantidad. Por lo tanto el puente con dos galgas presenta compensación al cambio de las resistencias por temperatura. Otra característica del puente con dos galgas es que su salida es lineal, lo cual no ocurre en el puente con una galga. En la figura 7.9 se muestra esta configuración.

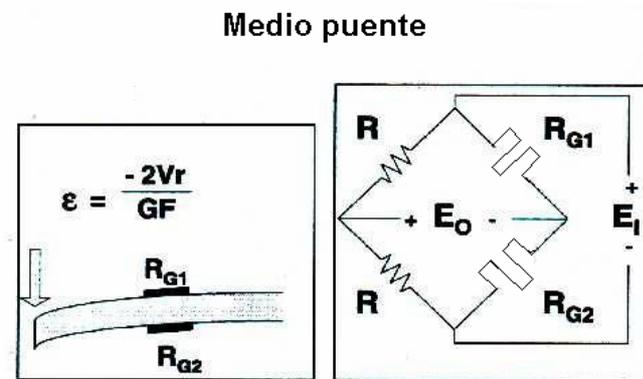


Figura 7.9. Circuito puente con dos galgas

En el puente con 4 galgas, como el mostrado en la figura 7.10, las galgas que se encuentran en ramas opuestas son tensionadas de manera semejante y las otras dos lo son en sentido contrario, esto es: si unas son extendidas las otras son comprimidas. El voltaje de salida es el doble del valor de la salida del puente con dos galgas., al igual que éste su salida es lineal y presenta auto compensación a los cambios en las resistencias de las galgas por temperatura.

Puente con 4 galgas extensiométricas

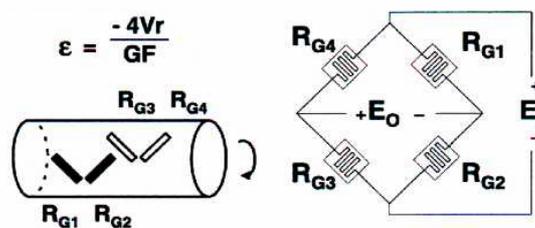


Figura 7.10. Puente con 4 galgas extensométricas

Tres características importantes tiene la instrumentación con galgas extensométricas: el circuito puente, el balance y la amplificación

El diseño del circuito puente, como ya se ha mencionado, consiste en la selección de las resistencias que van en las ramas del puente, las cuales normalmente en los circuitos con una y dos galgas se seleccionan iguales entre sí.

El balance consiste en eliminar la desviación en la salida del puente en condiciones iniciales, en otras palabras equilibrar el puente. Esto se puede lograr colocando un potenciómetro en una de las ramas y ajustarlo hasta conseguir voltaje cero en la salida o corrigiendo este error de desviación inicial por software, empleando las fórmulas mostradas anteriormente para cada uno de los puentes.

Un amplificador de instrumentación de ganancia alta es necesario ya que el voltaje de salida de un puente con galgas es bastante pequeño.

La vía más simple de corregir la variación de resistencia de la galga por temperatura es usando puentes con dos o cuatro galgas. En la figura 7.11 se muestra una configuración de dos galgas en donde una de ellas está en sentido perpendicular a la dirección de la tensión denominada comúnmente “dummy” por lo que no está sometida a la tensión, sino que su función es compensar el cambio de resistencia por temperatura en la galga activa. En este tipo de compensación de temperatura, es importante tener presente de que si existe fuerza en la dirección de la galga “dummy”, la medición de la tensión en la dirección de la galga activa tendrá error.

Compensación de temperatura

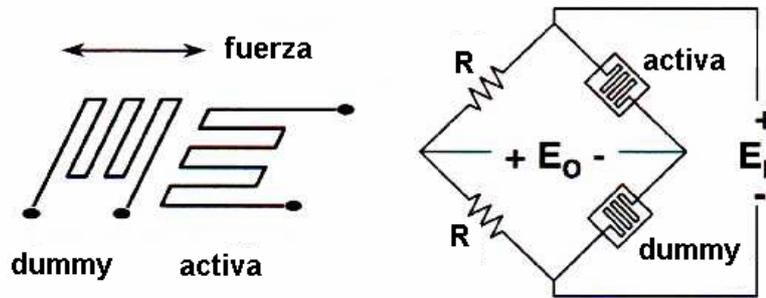


Figura 7.11. Compensación de temperatura en galgas

La resistencia de los conductores puede afectar grandemente la exactitud de las mediciones en un puente con galgas. Aún siendo la resistencia de los conductores más pequeñas que las resistencias del puente, por tener el cobre un coeficiente de temperatura que es casi dos veces el coeficiente de las galgas, es recomendable hacer mediciones con tres alambres, como la mostrada en la figura 7.12 para minimizar el efecto de los conductores.

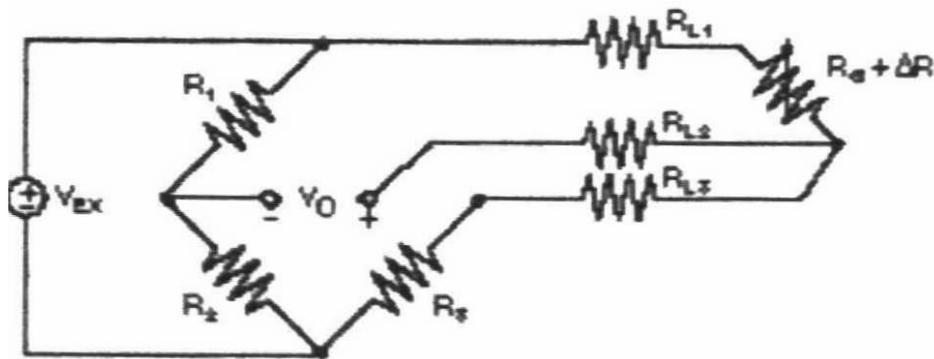


Figura 7.12. Circuito de tres alambres para puente con una galga

7.5 Sensores para medición de desplazamientos lineales

- **Transformador de Voltaje Diferencial Lineal (LVDT)**

Un dispositivo usado frecuentemente para medir desplazamientos lineales lo constituye el LVDT. El mismo consiste de un transformador diferencial con un primario y dos secundarios conectados en serie pero en oposición de manera que sus flujos magnéticos tiendan a cancelarse como se indica en la figura 7.13. El núcleo del transformador se desplaza sin roce de tal forma que el número de enlaces de flujo comunes entre el primario y alguno de los secundarios depende de la posición del núcleo móvil.

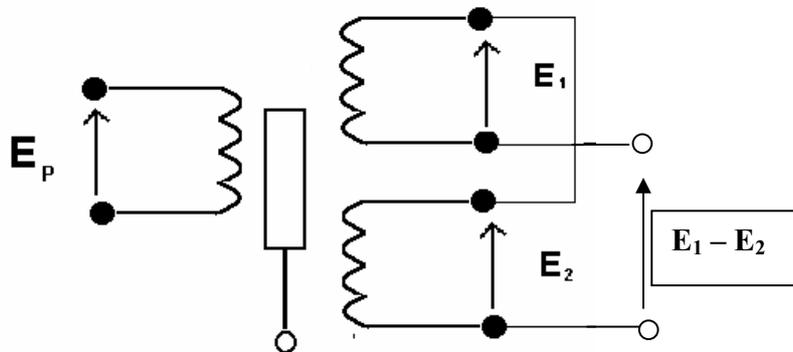


Figura 7.13. Diagrama de un LVDT

El voltaje de salida (r.m.s) viene dado por la diferencia de E_1 y E_2 y para pequeños desplazamientos el voltaje de salida se puede considerar como:

$$V_o = k.x \quad (7.6)$$

donde:

$$V_o = \text{voltaje de salida}$$

k = constante que depende de las características
del transformador

x = desplazamiento

Un circuito que permite utilizar el LVDT como transductor de desplazamiento de ilustra en la figura 7.14.

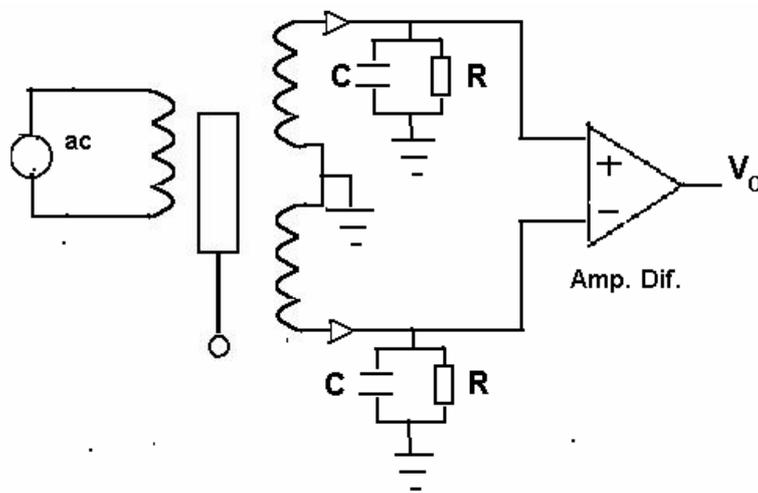


Figura 7.14. Circuito rectificador para sensor LVDT

El circuito formado por el diodo, la resistencia R y el condensador C , constituye un detector de envolvente para la señal en cada uno de los secundarios del transformador. Esta señal es proporcional a la tensión inducida en el secundario respectivo, por lo que a la salida del amplificador diferencial se tendrá una señal proporcional a la diferencia de los voltajes en los secundarios, por lo tanto proporcional al desplazamiento.

Entre las ventajas del LVDT se tienen su precisión, debido a la ausencia de fricción, ya que el núcleo de hierro móvil no hace contacto. Por ser un sensor robusto es adecuado para usar en medios duros. Finalmente la resolución del LVDT puede ser

considerada infinita porque su operación está basada en un principio analógico como lo es el desplazamiento.

• Sensor Capacitivo Diferencial de Desplazamientos

Este sensor es una buena alternativa para la medición de pequeños desplazamientos con gran precisión. El mismo está formado por tres discos metálicos dispuestos en planos paralelos y alineados por sus ejes. Los dos externos están fijos y el del medio está mecánicamente acoplado al dispositivo cuyo desplazamiento se desea medir. El sistema forma entonces un circuito de dos condensadores variables conectados en serie con valores que vienen dados por:

$$C_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{d+x} \quad C_2 = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{d-x} \quad (7.7)$$

donde ϵ es la permitividad relativa del material, ϵ_0 la permitividad del vacío de magnitud 8.85 pFm^{-1} , A el área de las placas.

Cuando la distancia entre la placa móvil y una de las fijas se incrementa en una cantidad x , la distancia de la placa móvil a la otra placa se reduce en la misma cantidad, como se observa en la figura 7.15. La misma figura muestra un circuito puente de corriente alterna que puede ser empleado para la medición de desplazamiento con este tipo de transductor.

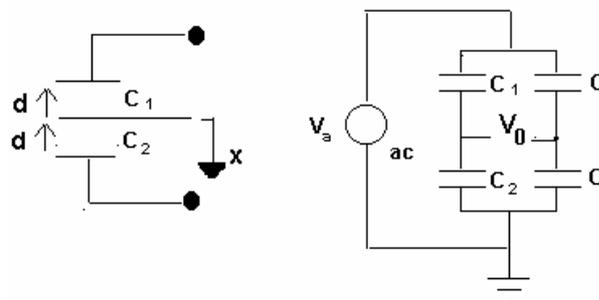


Figura 7.15. Circuito y sensor capacitivo de desplazamiento

El voltaje de salida se encuentra relacionado con los parámetros del sistema de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_o = \frac{V_a}{2d} x \quad (7.8)$$

Las limitaciones de este transductor están dadas por la linealidad de la impedancia capacitiva ante de la distancia, es decir la distancia entre las placas debe ser muy pequeña en comparación con el diámetro de las placas.

- **Sensor de desplazamiento de reluctancia diferencial**

En la figura 7.16 se muestra un sensor de reluctancia diferencial, el mismo consta de una armadura que se mueve entre dos núcleos de hierro idénticos, separados una distancia fija $2a$.

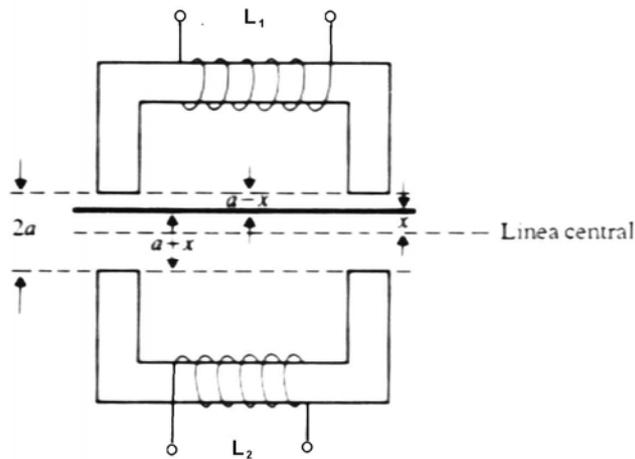


Figura 7.16. Sensor de reluctancia diferencial

El sistema forma dos inductancias en serie cuyos valores vienen dados por:

$$L_1 = \frac{L_0}{1 + \alpha(a - x)} \quad L_2 = \frac{L_0}{1 + \alpha(a + x)} \quad (7.9)$$

donde L_0 , es la inductancia del circuito magnético a desplazamiento 0, y α una constante. Los valores de L_0 y α dependen de la geometría del núcleo, permeabilidad del material etc. La relación entre L_1 y L_2 y el desplazamiento es no lineal; pero si el sensor se incorpora a un puente de corriente alterna como el mostrado en la figura 7.17, entonces la relación entre el voltaje de salida del puente y el desplazamiento x es lineal y viene dada por:

$$V_0 = \frac{V_s \alpha x}{2(1 + \alpha a)} \quad (7.10)$$

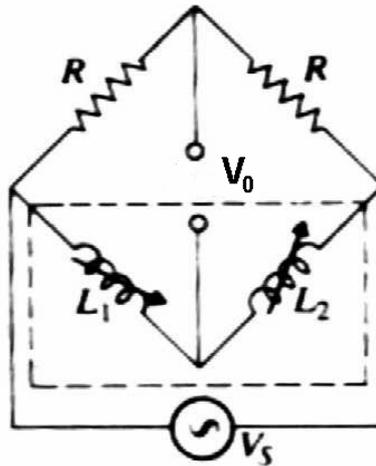


Figura 7.17. Circuito de excitación para sensor de reluctancia diferencial

Entre las principales desventajas de los sensores de reluctancia se encuentra la histéresis propia a todo elemento magnético, la necesidad de excitación. Por otro lado entre las ventajas se tiene que la resolución de un sensor magnético es infinita.

Todos los circuitos para sensores de desplazamiento estudiados, corresponden a sistemas de medición modulados en amplitud, en donde la amplitud de la señal de excitación es modulada por la señal física medida. Los distintos sistemas de medición serán estudiados en el próximo capítulo de acondicionamiento de señal.

7.6 Sensores para medición de desplazamiento rotacional

Un sensor desplazamiento rotacional convierte un movimiento rotacional en una señal eléctrica. Entre los sensores más populares para este tipo de mediciones se encuentran los potenciómetros y los codificadores digitales.

• Potenciómetro

Un potenciómetro es una resistencia variable formada por un contacto deslizante que se mueve sobre una resistencia cuando el potenciómetro rota.

El potenciómetro requiere de una fuente de voltaje o corriente. La salida va a ser un voltaje proporcional al desplazamiento angular y a la alimentación, por lo que la exactitud y estabilidad de la salida va a depender del voltaje o corriente de entrada. Seleccionar un valor alto de resistencia del potenciómetro es recomendable porque disminuye el auto calentamiento y por lo tanto el error en la medición.

Por otro lado siempre que se pueda, se debe medir en forma diferencial para evitar lazos de tierra (tierras a diferente potencial) que puedan producir error en la medición. Igualmente se debe filtrar la señal para reducir el ruido y eliminar el efecto alias en la señal muestreada.

Entre las ventajas del potenciómetro se pueden mencionar: buena linealidad, bajo costo, sencillez del circuito, nivel salida alto. Entre las desventajas se tienen: desgaste del contacto, la presencia de histéresis, muy sensible al ambiente, muy sensible al ruido, la exactitud depende de la fuente y limitada resolución.

• Codificadores digitales

Un codificador digital es un dispositivo que convierte desplazamientos lineales o rotacionales en una señal digital.

Tres pueden ser los principios de operación de un codificador digital: eléctrico, óptico o magnético. Un codificador eléctrico tiene un funcionamiento similar al potenciómetro, un cursor y un disco montado sobre un eje. El disco está formado por sectores conductores y no conductores, los cuales van a generar el código. Al rotar el disco se genera un tren de pulsos. Estos codificadores presentan los mismos problemas que los potenciómetros.

El codificador óptico consiste de un disco que rota, una fuente de luz y un fotodetector. El disco tiene un patrón de sectores opacos y de sectores transparentes. Al rotar el disco, se interrumpe el paso de luz hacia el fotodetector, generándose un tren de pulsos.

Entre las ventajas de estos codificadores se tienen: alta resolución (hasta 16 bits), no hay contacto por lo tanto no existe desgaste, alta velocidades de operación (> 10000 rpm). Entre las desventajas se pueden mencionar: la necesidad de alimentación para la fuente de luz y para el foto detector, la sensibilidad a las vibraciones, a la humedad y al polvo.

Un codificador digital magnético, consiste de una rueda dentada de material ferroso y una pieza metálica que contiene un imán permanente y el elemento sensor. La rueda dentada se encuentra montada sobre un eje que rota. Al girar la rueda, los dientes alteran el flujo magnético emitido por el imán permanente, causando que el campo aumente o disminuya. Estos cambios del campo son captados por el elemento sensor, el cual genera la señal digital.

Pueden existir dos tipos de elemento sensores: uno basado en el efecto Hall y otro en reluctancia variable. El sensor por efecto Hall, utiliza un dispositivo semiconductor, por el cual se hace pasar la corriente, que ante la presencia o ausencia

del campo magnético perpendicular va a producir una señal de voltaje, en forma de un tren de pulsos.

El sensor de reluctancia variable consiste simplemente de una bobina. La presencia del campo magnético va a inducir un voltaje en la bobina, al disminuir el campo el voltaje inducido también disminuye, esto da origen a una señal digital en forma de tren de pulsos.

Entre las ventajas de codificador digital de efecto Hall se pueden nombrar: el bajo costo; la ausencia de contacto debido a su principio magnético de funcionamiento; no es sensible a factores ambientales como la humedad, el polvo, el calor lo cual lo hace al igual que el codificador de reluctancia variable muy apropiado para medios inflamables y explosivos. Entre las desventajas del codificador de efecto Hall está su baja resolución (típicamente de 60 – 240 ppr) y la necesidad de alimentación para la corriente.

Entre las ventajas de los codificadores de reluctancia variable se tienen: la no necesidad de alimentación ya que él genera su propio voltaje; al igual que los codificadores de efecto Hall no presentan contacto y no es sensible a los factores ambientales, lo cual los hace ideales para ser usados en ambientes peligrosos. Entre la principal desventaja se tiene que no puede funcionar a baja velocidad, ya que por principio de funcionamiento requiere de la variación de flujo para que haya voltaje inducido en la bobina. Igualmente su resolución es menor que la del codificador de efecto Hall (típicamente 60 ppr).

Existen dos posibilidades de instrumentación para los codificadores digitales: los contadores/temporizadores más entradas-salidas digitales y los conversores de frecuencia a voltaje.

Contadores temporizadores con entradas-salidas digitales es adecuado para medición de velocidades bajas (0 – 15 cuentas por segundo). Instrumentos de frecuencia

a voltaje cuando se requiera medición continua de velocidad (ej. medición de flujo, medición de velocidad).

En los sistemas de acondicionamiento analógico de señal de CD o CA en amplitud, existen tres elementos fundamentales a saber: la amplificación, el filtrado y la multiplexación. Por otro lado en todos los circuitos de acondicionamiento sea analógicos o digitales es necesario tener presente los aspectos relacionados con el blindaje, aislamiento y aterramiento.

7.7 Sensor para medición de velocidad angular (tacogenerador)

El tacogenerador es un sensor electromagnético de reluctancia variable. Consta de una rueda dentada de material ferromagnético (unida al eje rotatorio) y una bobina enrollada en un imán permanente (figura 7.18). La rueda se mueve cerca del polo de la bobina, produciendo que el flujo de la bobina cambie con el tiempo, lo cual induce una fuerza electromotriz en la bobina (fem).

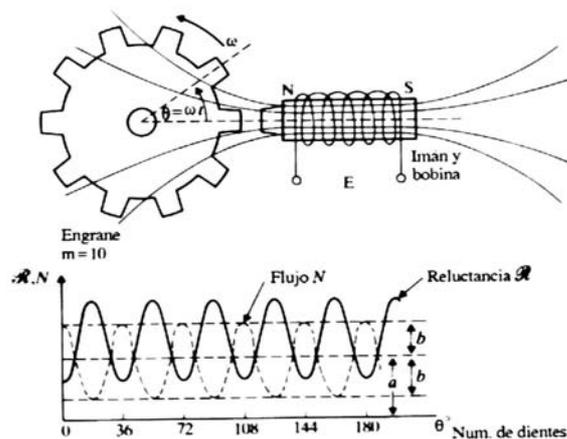


Figura 7.18. Sensor de velocidad angular de reluctancia variable

La fem de acuerdo a la Ley de Faraday viene dada por

$$E = -\frac{dN}{dt} \quad (7.11)$$

donde N es el flujo magnético que atraviesa la bobina. La figura 7.18 muestra la naturaleza alterna del flujo, el cual será máximo cuando la reluctancia \mathfrak{R} entre la bobina y la rueda dentada sea mínima, lo cual ocurre cuando un diente de la rueda está frente al polo de la bobina y disminuirá cuando el diente de la rueda se aleja del polo, ya que aumenta la reluctancia del circuito. De lo dicho anteriormente se tiene que el flujo en la bobina puede aproximarse por la relación:

$$N = a + b\cos(m\theta) \quad (7.12)$$

donde a es el flujo medio, b es la amplitud de la variación de flujo y m es el número de dientes que tiene la rueda. Sustituyendo la ecuación (7.12) en la ecuación (7.11) y teniendo en cuenta que $\theta = \omega_r t$ se obtiene:

$$E = -\frac{dN}{dt} = -\frac{dN}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dt} \quad (7.13)$$

$$\frac{dN}{d\theta} = -bm \operatorname{sen} m\theta \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (7.14)$$

$$E = bm\omega_r \operatorname{sen} m\omega_r t \quad (7.15)$$

La fuerza electromotriz E es una señal cuya amplitud y frecuencia son proporcionales a la velocidad angular (ω_r) de la rueda. La amplitud ω_r puede ser obtenida de la amplitud o de la frecuencia de la señal. Normalmente es preferible hacerlo de la frecuencia debido a que ella es menos alterada por el ruido y la interferencia. Como señal modulada en frecuencia por la velocidad angular (ω_r), ésta puede ser medida haciendo medición digital de frecuencia o mediante conversión de frecuencia a voltaje, empleando luego un convertidor A/D para realizar la adquisición de los datos con la PC.