

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Eléctrica**

**IE – 0502 Proyecto Eléctrico**

**Sensores utilizados en la Automatización  
Industrial**

**Por:**

**Adrián Alberto Castro Rojas**

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio**

**Julio del 2008**

# **Sensores utilizados en la Automatización Industrial**

**Por:**

**Adrián Alberto Castro Rojas**

Sometido a la Escuela de Ingeniería Eléctrica  
de la Facultad de Ingeniería  
de la Universidad de Costa Rica  
como requisito parcial para optar por el grado de:

**BACHILLER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Aprobado por el Tribunal:

---

Ing. Jorge Blanco  
Profesor Guía

---

Ing. Guillermo Loría  
Profesor lector

---

Ing. Aramis Pérez  
Profesor lector

## **DEDICATORIA**

A mis familiares y amigos, en especial a mi madre por su apoyo incondicional en todos estos años.

## **RECONOCIMIENTOS**

A la Universidad de Costa Rica y a su personal docente por guiarme durante mi camino de aprendizaje.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>x</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>xi</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>xi</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xii</b>
<b>CAPÍTULO 1: Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1      Objetivos.....	1
1.1.1   Objetivo general .....	1
1.1.2   Objetivos específicos.....	1
1.2      Metodología.....	2
<b>CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico</b> .....	<b>3</b>
2.1      Principios fundamentales.....	3
2.1.1   Transductores y sensores .....	3
2.1.2   Impedancia: .....	4
2.1.3   Exactitud.....	6
2.1.4   Precisión .....	6
2.1.5   Repetibilidad.....	6
2.1.6   Resolución .....	6
2.2      Clasificación de los sensores: .....	7
2.3      Sensores primarios.....	8
2.3.1   Sensores de longitud:.....	9
2.3.2   Sensores de temperatura: .....	13
2.3.3   Sensores de presión: .....	15
2.3.4   Sensores de flujo y caudal: .....	17
2.3.5   Sensores de nivel: .....	22
2.3.6   Sensores de luz: .....	23
<b>CAPÍTULO 3: Sensores resistivos</b> .....	<b>30</b>
3.1      Potenciómetros .....	30
3.2      Galgas Extensométricas:.....	33
3.2.1   Efecto piezorresistivo .....	33
3.2.2   Tipos .....	35
3.3      Sensores resistivos de temperatura.....	36
3.4      Termistores: .....	38
3.5      Magnetorresistencias: .....	40

3.6	Fotorresistencias: .....	41
3.7	Hidrómetros resistivos:.....	43
<b>CAPÍTULO 4: Sensores de reactancia variable y electromagnéticos .....</b>		<b>45</b>
4.2	Sensores capacitivos:.....	45
4.2.1	Condensador variable .....	45
4.2.2	Condensador diferencial:.....	49
4.3	Sensores inductivos .....	50
4.3.1	Sensores de reluctancia variable.....	50
4.3.2	Sensores basados en corrientes de Foucault.....	53
4.3.3	Transformadores lineales.....	56
4.3.4	Transformadores variables. ....	59
4.3.5	Sensores magnetoelásticos .....	62
4.3.6	Sensores de efecto Wiegand.....	63
4.4	Sensores Electromagnéticos .....	65
4.4.1	Sensores basados en la ley de Faraday .....	65
4.4.1.1	Tacogeneradores:.....	66
<b>CAPÍTULO 5: Sensores Generadores. ....</b>		<b>69</b>
5.1	Sensores termoeléctricos (termopares).....	69
5.2	Sensores piezoeléctricos .....	71
5.3	Sensores piroeléctricos .....	74
5.4	Sensores fotovoltaicos .....	77
<b>CAPÍTULO 6: Otros Sensores .....</b>		<b>80</b>
6.1	Codificadores de posición .....	80
6.1.1	Codificadores incrementales.....	80
6.1.2	Codificadores absolutos.....	84
6.2	Sensores autoresonantes .....	86
6.2.1	Sensores basados en resonadores de cuarzo .....	87
6.2.1.1	Termómetro digital de cuarzo.....	87
6.2.1.2	Micro balanzas pasadas en resonadores de cuarzo.....	88
6.2.1.3	Sensores de fuerza y presión basados en resonadores de cuarzo .....	88
6.2.2	Galgas acústicas.....	89
6.2.3	Caudalímetro de vórtices:.....	90
<b>CAPÍTULO 7: Conclusiones y recomendaciones .....</b>		<b>91</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>95</b>
<b>APÉNDICES .....</b>		<b>96</b>
Apendice 1 .....		96
Características de la luz: .....		96
Apendice 2.....		97
Efecto Peltier y el efecto Thompson.....		97

Apendice 3.....	99
Norma IP (Indice de Protección).....	99
<b>ANEXOS.....</b>	<b>102</b>
ANEXO 1.....	102
ANEXO 2.....	103
ANEXO 3.....	104
ANEXO 4.....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Medidor de desplazamiento resistivo .....	9
<b>Figura 2</b> Transductor capacitivo de área variable .....	10
<b>Figura 3</b> Bobinas interconectadas. ....	11
<b>Figura 4</b> Codificador angular .....	12
<b>Figura 5</b> Sensor de temperatura, película de aluminio .....	13
<b>Figura 6</b> Unión bimetal.....	16
<b>Figura 7</b> Manómetro líquido en forma de "U" .....	16
<b>Figura 8</b> Sensor de presión de diafragma metálico .....	17
<b>Figura 9</b> Tubería con cambio de diámetro .....	18
<b>Figura 10</b> Varios diseños de caudalímetros .....	19
<b>Figura 11</b> Tubo Pitot canal abierto .....	20
<b>Figura 12</b> Tubo Pitot canal cerrado .....	21
<b>Figura 13</b> Medidor de caudal que emplea electrodos .....	22
<b>Figura 14</b> Sensores de nivel.....	23
<b>Figura 15</b> Corte transversal de una termocupla .....	25
<b>Figura 16</b> Detector piroeléctrico.....	25
<b>Figura 17</b> Detector de fotones .....	26
<b>Figura 18</b> Detector de fotoconductividad .....	27
<b>Figura 19</b> Sensor fotovoltaico .....	28
<b>Figura 20</b> Circuito equivalente de celda fotovoltaica .....	29
<b>Figura 21:</b> Galga extensométrica.....	35
<b>Figura 22</b> Representación de un PTC y un NTC .....	39
<b>Figura 23</b> Representación de LDR.....	43
<b>Figura 24</b> Resistencia en función de la humedad relativa y diagrama de un hidrómetro resistivo .....	44
<b>Figura 25</b> Arreglos de condensador variable .....	46
<b>Figura 26</b> Condensador diferencial de área variable .....	50
<b>Figura 27</b> <i>Sensor con núcleo ferromagnético de reluctancia variable</i> .....	51
<b>Figura 28</b> Medidor de nivel para metales líquidos .....	55
<b>Figura 29</b> Tacómetro de arrastre .....	56
<b>Figura 30</b> LVDT, estructura básica y diagrama de voltaje inducido en función de la posición. ....	57
<b>Figura 33</b> Transformador variable de desplazamiento angular .....	60
<b>Figura 34</b> Potenciómetro de inducción .....	62
<b>Figura 35</b> Ciclo de histéresis material magnetoelástico .....	63
<b>Figura 36</b> Campo magnético, ciclo de histéresis y voltaje generado en hilo Wiegand .....	65
<b>Figura 37</b> Tacómetro de efecto Faraday con devanado de ardilla .....	67
<b>Figura 36</b> Aplicación de sensores piezoeléctricos.....	74
<b>Figura 37</b> Efecto fotoeléctrico en unión p-n .....	78



<b>Figura 38 Disco y regla para codificadores incrementales .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 39 Método de rejillas superpuestas para incrementar resolución .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 40 Métodos para identificación de sentido de giro .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 41 Diagrama de funcionamiento de codificador absoluto .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 42 Discos codificados para codificador absoluto e incremental respectivamente .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 43 Circuito equivalente de un cristal de cuarzo para altas frecuencias .....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 44 Diagrama del principio del caudalímetro de vórtices .....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 45 Curva corriente/voltaje detector fotovoltaico .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 46 Resistencia relativa de termistores y resistencias térmicas .....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 47 Curva característica de voltaje en función de la corriente.....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 48 Distintos sensores de reluctancia variable .....</b>	<b>105</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> .....	8
<b>Tabla 2 Nomenclatura primer dígito Norma IP</b> .....	100
<b>Tabla 3 Nomenclatura segundo dígito norma IP</b> .....	101

## **NOMENCLATURA**

RTD: (Resistance Temperature Detector) Detector resistivo de temperatura

LDR (Light Dependent Resistors) Resistencia dependiente de luz.

PRT (Platinum Resistance Thermometer) Resistencia terminada de platino.

## **RESUMEN**

El presente trabajo pretende investigar sobre los tipos de sensores empleados en la industria de automatización, por lo que se analizó el funcionamiento de los diversos tipos de sensores existentes. El análisis se dividió en tres partes; principios de funcionamiento, aplicaciones, limitantes y ventajas.

El trabajo presenta un marco teórico con los principales fundamentos necesarios para entender los métodos empleados para translucir magnitudes físicas en parámetros útiles para su interpretación. Dicha parte del trabajo ejemplifica los métodos más comunes en la práctica, así como figuras ilustrativas para procurar un mejor entendimiento de la investigación. Una vez hecho esto, el trabajo divide los sensores en 4 grandes grupos para su análisis: sensores resistivos, sensores de reactancia variable y electromagnéticos, sensores generadores y sensores digitales.

Al final de la investigación, las conclusiones analizan las ventajas de un grupo sobre otro dependiendo de la característica que se requiera, pues según el tipo de variable a medir, de la exactitud, repetibilidad, las condiciones de operación, tipo de señal de salida, etc. así será el tipo de sensor a escoger.

## **CAPÍTULO 1: Introducción**

El siguiente trabajo pretende recopilar información de los diversos sensores empleados en los sistemas de control automático en la industria. El trabajo clasifica los sensores según distintos criterios, como su principio de funcionamiento, el tipo de variable medida o el tipo de salida que entrega. Cada capítulo trata de un grupo distinto de sensores. Estos fueron agrupados según su principio de funcionamiento, para cada apartado se mencionan los distintos tipos de sensores, sus ventajas principales y sus limitaciones, así como las aplicaciones más comunes, ventajas y características de funcionamiento. También compara cada dispositivo con otros que midan el mismo tipo de magnitud empleando diferentes principios físicos para su funcionamiento.

### **1.1 Objetivos**

#### **1.1.1 Objetivo general**

Recopilar y describir los diversos tipos de sensores utilizados en la automatización industrial.

#### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Clasificar los sensores según su principio de funcionamiento, tipos de señal, construcción y variable física medida.
- Describir su funcionamiento.

- Describir las limitantes de estos e indagar cuales son evitables.
- Definir márgenes de operación.
- Describir sus características eléctricas y mecánicas.
- Determinar ventajas de cada tipo en relación a su campo de aplicación.

## **1.2 Metodología**

Para realizar el trabajo se empleó principalmente investigación bibliográfica. Se indagó principalmente sobre los sensores empleados en la industria de la automatización, se investigó sobre la clasificación de estos así como de los principios que hacen funcionar los distintos sensores. Se investigó sobre los principales transductores empleados para transformar variables físicas en otras variables más fácilmente sensibles, además se investigó las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

También el trabajo consistió en ver cuáles son las ventajas y desventajas de cada uno de los sensores mencionados, además se mencionó si las limitantes de cada sensor se pueden evitar ya sea por medios físicos, electrónicos o restringiendo el rango de operación.

También se estudió las clasificaciones de cada uno de los sensores y se citaron ejemplos de ellos, sus aplicaciones y usos más comunes en la industria.

## **CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico**

En el siguiente capítulo se dará una breve descripción de cómo se emplean distintos sensores para medir diversas magnitudes físicas.

### **2.1 Principios fundamentales**

Previo al análisis de los sensores se aclaran conceptos claves:

#### **2.1.1 Transductores y sensores**

Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de un tipo a otro, es decir convierte una magnitud en otra que resulte más apta para el análisis de un fenómeno físico. Los seis tipos de señales más usuales en el control industrial son: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares. El transductor sirve para convertir un tipo de señal en otro, y por lo general suele convertir cualquier señal en eléctrica, esto por el tipo de aplicaciones industriales que se les da. Un transductor ideal es aquel que para producir su señal de salida no disminuye la energía de la señal de entrada, pero en la práctica esto no se da, por lo que es importante que el transductor consuma la menor energía de la señal de entrada para que altere en lo menos posible el fenómeno físico estudiado.

Existen varias ventajas para emplear transductores que conviertan las diversas señales físicas en señales eléctricas, entre ellas está el hecho de que es fácil realizar distintos transductores que conviertan cualquiera de las señales no eléctricas en señales eléctricas. Lo anterior permite extraer poca energía del sistema para medir una variable,

esto porque las señales eléctricas pueden ser fácilmente amplificadas. También es una razón válida el hecho de que además de los dispositivos de amplificación existen gran variedad de dispositivos eléctricos para acondicionar o modificar las señales eléctricas como lo son los diversos circuitos integrados que ya traen dentro de su encapsulado el respectivo transductor.

Finalmente una de las mayores ventajas de emplear transductores que conviertan las distintas señales en señales eléctricas es la facilidad con que estas se pueden transmitir, pues resulta mucho más sencillo transmitir que señales mecánicas o hidráulicas. Además existen muchos medios para almacenar, registrar, procesar y presentar la información electrónica.

Comúnmente se emplea transductor y sensor como sinónimos, pero en realidad un sensor es aquel dispositivo que permite percibir cantidades físicas que no son tan fáciles de percibir y produce una salida transducible, donde la salida del sensor es función de la variable a medir, en cambio un transductor es un medio donde la salida y la entrada no son señales homogéneas, aunque una es función de la otra, estas no son iguales. Generalmente se amplía el término sensor para referirse al transductor de entrada y actuador para referirse al transductor de salida.

### **2.1.2 Impedancia:**

Durante la medición de una variable “a” siempre interviene otra variable “b”, tal que el producto de ambas tiene dimensiones de potencia. De esta manera al medir una fuerza se puede tener una velocidad, de la misma forma que al medir caudal hay una caída



de presión, al medir una temperatura hay un flujo de calor y al medir una corriente eléctrica se tiene una caída de potencial en el sensor.

Se entiende como variable esfuerzo, aquella que debe ser medida desde dos puntos -como el potencial o la presión- y como variable de flujo, aquella que se mide desde un solo punto, como el caudal o la corriente eléctrica. Para el caso de un elemento que se pueda describir de manera lineal, la impedancia de entrada  $Z(s)$ , es definida como el cociente entre la transformada de Laplace de una variable esfuerzo y de la variable flujo asociada. Siendo  $Z(s)$  variante con la frecuencia. Entonces para tener el menor error por carga posible que la impedancia sea la mínima, si “a” es una variable esfuerzo, la impedancia estará definida por:

$$Z(s) = \frac{a(s)}{b(s)} \quad (2.1)$$

La potencia extraída del sistema estará dada por:

$$P = ab \quad (2.2)$$

Como se ve para que la potencia extraída sea mínima, “b” debe minimizarse.

Por eso es que se emplean amplificadores ampliamente para extraer la menor energía posible del sistema, otra opción es solo extraer energía del sistema cuando se produzca un cambio importante en la señal de entrada. Queda claro porque muchos de los

sensores emplean fuentes de alimentación externas para amplificar la señal y así extraer la menor energía del sistema.

### **2.1.3 Exactitud**

Se refiere a que tan cerca del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadístico, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el sesgo más exacta es una estimación.

### **2.1.4 Precisión**

Precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad es la desviación estándar de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella.

### **2.1.5 Repetibilidad**

Diferencia entre varias medidas realizadas en las mismas condiciones de material y de medio ambiente por el mismo operador en un periodo de tiempo corto. Las medidas se efectúan por desplazamiento de la punta y regreso a la posición inicial de manera homogénea. Valor expresado generalmente en micras.

### **2.1.6 Resolución**

Resolución, se refiere al número de bits empleados para representar en un medio discreto una imagen, sonido o magnitud, esta cantidad nos indica con cuánto detalle se puede apreciar la imagen o sonido.

## 2.2 Clasificación de los sensores:

Según su funcionamiento los sensores se pueden clasificar en diversos tipos. Según su aporte de energía se pueden dividir en moduladores (activos) y generadores (pasivos), donde los primeros se caracterizan por utilizar una fuente de energía auxiliar para alimentar la señal de salida y los pasivos donde la energía de la señal de salida es suministrada por la entrada.

Otra clasificación se hace según el tipo de señal a ser sensada la cual puede ser analógica o digital. En los sensores analógicos la salida varía de manera continua, encontrándose la información en la amplitud y algunas veces en la frecuencia. En cambio los sensores digitales proporcionan una salida discreta.

Clasificándolos según la manera de funcionamiento se pueden clasificar en sensores de deflexión o de comparación. En los primeros como su nombre lo indica, trabajan con la deflexión de un material. Es decir la deformación de un material se emplea para medir una magnitud física, este tipo de funcionamiento se puede apreciar en un dinamómetro donde la fuerza aplicada deforma un resorte haciendo esto hasta que la fuerza de recuperación del mismo sea igual a la fuerza aplicada. En cambio en los sensores de funcionamiento por comparación, se busca que la deflexión del material, lo cual se logra con la aplicación de una fuerza opuesta a la aplicada por la fuerza a medir. Este funcionamiento se puede apreciar en las balanzas donde el operario coloca un cuerpo de igual masa al que se mide con el objetivo de encontrar un balance entre ambos pesos que permita mantener el equilibrio. Las medidas obtenidas por los sensores de comparación suelen ser más exactas,

pero en cambio tienen menor respuesta dinámica, es decir una respuesta más lenta que los sensores que usan deflexión.

También pueden ser clasificados según el orden: primero, segundo o de orden superior. Esta clasificación se hace según el número de elementos almacenadores de energía independientes que contenga el sensor.

La tabla 1 muestra un resumen del funcionamiento de los sensores mencionados así como ejemplos de los mismos.

**Tabla 1**

Criterio	Clase	Ejemplo
Aporte de energía	Moduladores Generadores	Termistor Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro Detector de posición
Modo de operación	Deflexión Comparación	Acelerómetro de deflexión Servoacelerómetro

### 2.3 Sensores primarios

Por sensores primarios se entiende todo aquel dispositivo que posibilite obtener una señal transducible a partir de una determinada magnitud física. Algunos de ellos se citan a continuación:

### 2.3.1 Sensores de longitud:

A continuación se explicarán algunos transductores/sensores empleados en la industria en medición de longitudinal.

Un tipo de sensores usados para medir longitud son los sensores de desplazamiento, los cuales tienen la precisión para medir desde unos cuantos micrómetros hasta unos metros. Estos son de dos tipos, ópticos y eléctricos.

Un transductor de desplazamiento eléctrico como el mostrado en la Figura 1 consiste en un potenciómetro el cual está conectado al objeto que se desplaza, el cual al moverse varía la resistencia del mismo y por lo tanto es posible calcular de manera electrónica el cambio de posición que es proporcional a el cambio de posición. Estos se conocen como transductores resistivos de desplazamiento, y pueden medir tanto movimiento lineal como rotacional. Son relativamente económicos, pero como hay muchos efectos negativos debidos a la fricción estos dispositivos no resultan muy precisos.

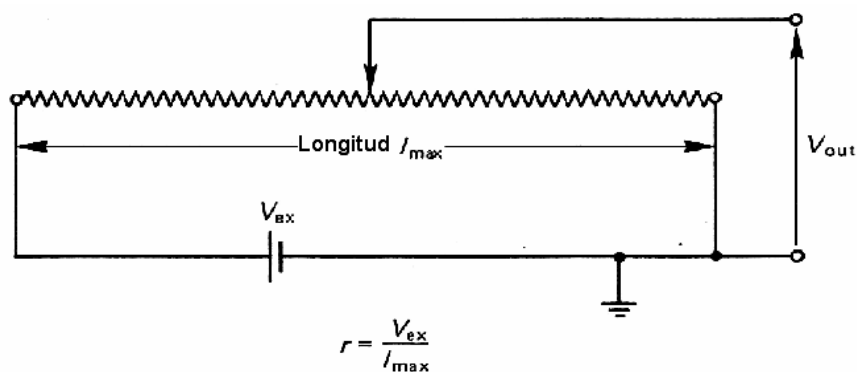
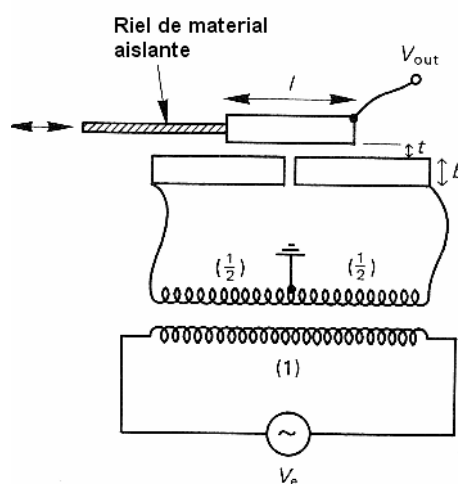


Figura 1 Medidor de desplazamiento resistivo [2]

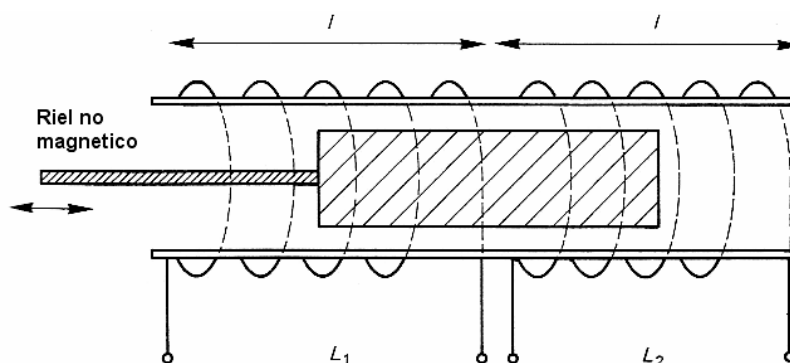
Otro tipo de transductor que se encuentra dentro de la familia de los transductores/sensores de desplazamiento eléctrico, son los sensores capacitivos de desplazamientos. Básicamente se trata de un capacitor al cual se le varia la distancia entre las placas metálicas, lo cual conlleva en un cambio en la capacitancia del dispositivo. Aunque para este tipo de aplicaciones resulta más conveniente no solo emplear dos placas, por lo general se emplean tres pero según la aplicación se puede emplear más placas. La Figura 2 muestra un transductor capacitivo de área variable, en este se trata de tres placas metálicas, dos de las cuales están sujetas y colocadas muy cerca una de otra, una tercera placa esta paralela a las dos placas anteriores y separada una distancia “t” de las mismas. Esta última placa se puede mover siempre de forma paralela y es el movimiento de esta placa el que cambia la capacitancia de todo el conjunto.



**Figura 2 Transductor capacitivo de área variable [2]**

También dentro de la familia de los sensores eléctricos de desplazamiento son los transductores inductivos de desplazamiento. En este caso se trata de cambiar la inductancia en función del desplazamiento, en este caso se puede tratar por lo general de arreglos de bobinas interconectados como si fueran transformadores y lo que se hace es que mueve una barra entre las bobinas para lograr este cambio en la inductancia. La Figura 3 representa dos solenoides interconectados por medio de una barra ferromagnética la cual se desplaza entre los dos solenoides esto varía el voltaje transformado, es decir que el voltaje en las terminales de la segunda bobina es función del desplazamiento de la barra metálica.

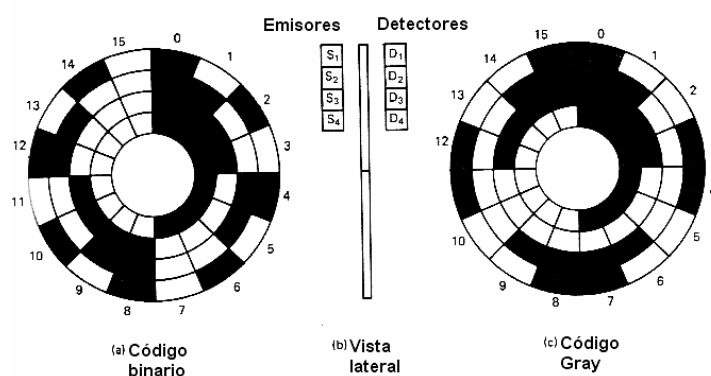
La otra gran categoría de sensores de desplazamiento es la de los ópticos. Este tipo de dispositivo se ha vuelto muy popular en los últimos años, en parte porque la mayoría cuentan con salidas digitales y también porque son inmunes a interferencia eléctrica. El principal tipo de detector óptico de desplazamiento es el que funciona con decodificadores de posición



**Figura 3 Bobinas interconectadas. [1]**

El mostrado en la Figura 4 representa a un codificador angular absoluto. Consiste en un numero de pistas concéntricas que llevan impreso un patrón de secciones opacas y transparentes de tal manera que cada sección representa en código binario una posición que puede ser leída, de esta forma se puede leer el desplazamiento en cualquier dirección. Un problema con este tipo de dispositivos es que algunas veces se presentan errores si se presenta una lectura del código cuando se esta cambiando de una posición a otra. Existe el código Gray el cual permite que estos errores sean lo menor posibles pero igual se requiere codificarlos a binario, lo cual hace mayor el costo de dichos dispositivos.

Otro tipo de dispositivo que funciona con codificador son los codificadores incrementadores de posición los cuales se trata de un disco con una sola pista binaria, las pistas son ranuras en el disco, estas ranuras son detectadas por un arreglo de fotoceldas que alimentan un sistema de conteo digital. Para poder determinar la dirección de rotación, dos fotoceldas son colocadas a un cuarto de ranura de distancia y la fase de las dos señales se invierte cuando la dirección cambia.

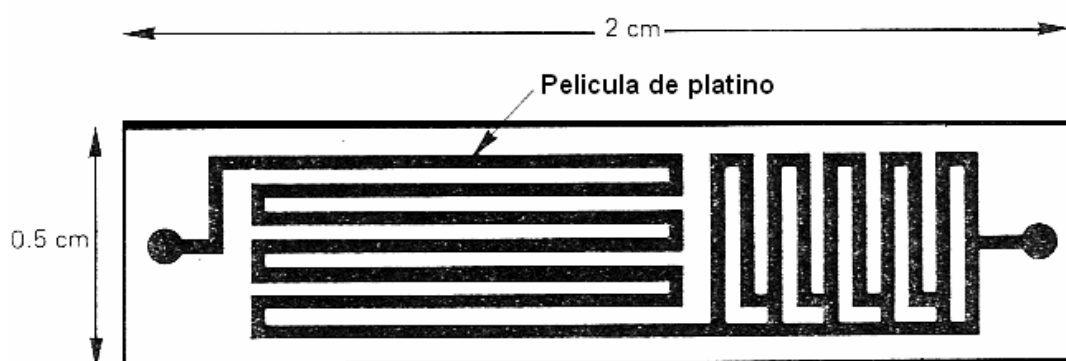


**Figura 4 Codificador angular [1]**



### 2.3.2 Sensores de temperatura:

Un tipo de sensores empleados son los basados en resistencias térmicas, que no son más que metales puestos dentro de distintos encapsulados no conductores como vidrio. Por lo general los metales escogidos son cobre, platino y níquel. La Figura 5 muestra el diagrama de uno de esos sensores basados en una película de platino. La resistencia normal varía entre unos cuantos ohms y kilohms, siendo  $100\Omega$  uno de los valores más comunes.



**Figura 5 Sensor de temperatura, película de aluminio [1]**

Estos dispositivos son usados para temperaturas desde  $-200^{\circ}\text{C}$  hasta  $300^{\circ}\text{C}$  para el caso de los basados en níquel y cobre, en el caso de los de platino pueden llegar hasta los  $900^{\circ}\text{C}$ . Su mayor ventaja es que son bastante estables y se pueden representar de forma lineal. Un defecto es que la sensibilidad es muy corta, pues solo varía alrededor de  $0.4\Omega$  por cada  $^{\circ}\text{C}$  de cambio en la temperatura para los hechos con platino y  $0.7\Omega/^{\circ}\text{C}$  para los basados en níquel.

Otro tipo muy empleado de sensores son los termistores, los cuales consisten en un pequeño semiconductor con forma de placas o discos. Están hechos por lo general de mezclas de distintos óxidos metálicos de cobalto, níquel y manganeso y son por lo general encapsulados en vidrio. La relación entre la temperatura y la resistencia es no lineal.

En este caso la variación de la temperatura es más que para las resistencias térmicas, para el caso del termistor, la resistencia cambia  $1 \text{ K}\Omega/\text{°C}$ . La mayoría de los termistores son tipo NTC, que en inglés significa coeficiente negativo de temperatura, pero también es posible producir del tipo PTC (coeficiente positivo de temperatura). La Figura 46 en el anexo uno, muestra una comparación entre la variación de resistencia con la temperatura de termistores NTC y resistencias térmicas.

Los termistores son más pequeños en masa y mejor respuesta en el tiempo. Aunque son no lineales esta desventaja puede ser compensada por medio de software pues la mayoría de los termistores puede conectarse a un microprocesador, el cual puede procesar de manera efectiva la información obtenida de los termistores. Una de sus desventajas es el hecho de que sus ámbitos de funcionamientos no son muy amplios, pues por lo general van de  $-100\text{°C}$  a  $200\text{°C}$ . Por lo general este tipo de dispositivos son empleados en control de temperatura, donde su no linealidad no es muy importante y su rápida respuesta es de gran utilidad.

Algunos de los sensores de temperatura empleados en la industria funcionan con base a una pieza formada por dos metales con distinto coeficiente de dilatación térmica, los cuales están unidos firmemente, esta pieza es conocida como bimetálica. La idea de emplear estos

dos metales es que al estar expuestos a un cambio de temperatura los metales se expanden o contraen de manera que forman un arco uniforme. Midiendo el radio de la curvatura de este arco es posible determinar la temperatura. La

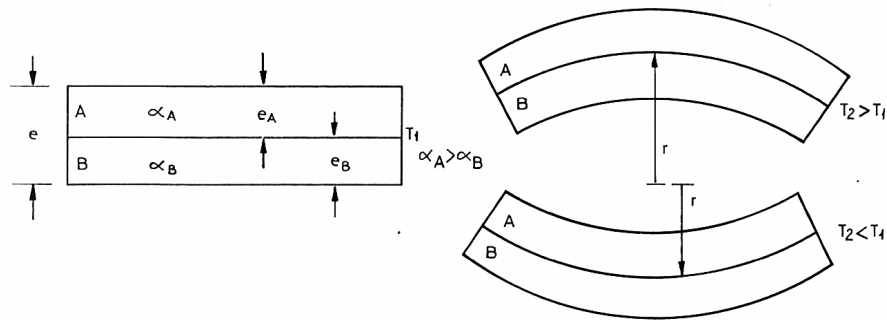
Figura 6 ejemplifica este fenómeno pasando una temperatura inicial  $T_1$  a una temperatura  $T_2$ . Lo común es que dicha unión bimetal emplee metales con similares módulos de elasticidad y espesor similares, por lo que el radio es definido por la siguiente relación:

$$r \approx \frac{2e}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)} \quad (2.3)$$

Se puede apreciar entonces que la curvatura es inversamente proporcional al cambio de temperatura, de esta forma con un sensor de posición o de desplazamiento es posible medir el cambio de temperatura. Por lo general el grosor de las placas varía entre los 3 mm y 10  $\mu\text{m}$ . El ámbito de funcionamiento de estos dispositivos va desde  $-75^\circ\text{C}$  a  $540^\circ\text{C}$ . No solo se emplean como laminas, también se les dispone en hélice, espiral y otras configuraciones y se les mide el desplazamiento o la fuerza.

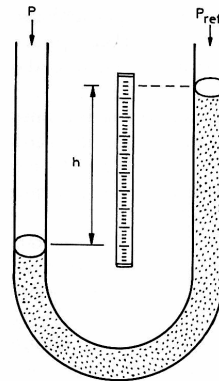
### 2.3.3 Sensores de presión:

La presión es la fuerza por unidad de superficie ejercida sobre un cuerpo. Esta medida es común en procesos que involucran gases y líquidos. Para medirla se compara una fuerza con la otra, por lo general se referencia con la fuerza ejercida por la atmósfera. Se pueden utilizar varios métodos para medir la presión, existen métodos por desplazamiento por ejemplo el barómetro o métodos por deformación.



**Figura 6 Unión bimetálica [2]**

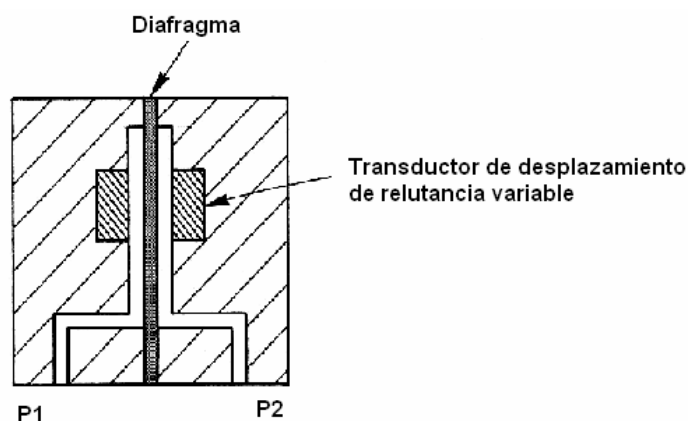
Los manómetros de columna de líquido, como el de la Figura 7, están compuestos por un tubo en forma de "U", el cual por las diferencias de presión entre sus lados desplaza el líquido contenido hacia su parte con menor presión, la cantidad de líquido desplazada es proporcional al número de veces que es mayor una presión con respecto a la otra.



**Figura 7 Manómetro líquido en forma de "U" [1]**

Otra forma de medir la presión y la más común para medir la misma, es utilizando un diafragma. Consiste en una membrana cuya deflexión en su parte central es dependiente de la presión ejercida sobre la misma. La sensibilidad del diafragma aumenta al aumentar

su área y disminuye al aumentar espesor de la misma. La Figura 8 muestra un sensor de presión expuesto a dos presiones distintas, el cual mide las diferencias de presión con base en el desplazamiento del diafragma.



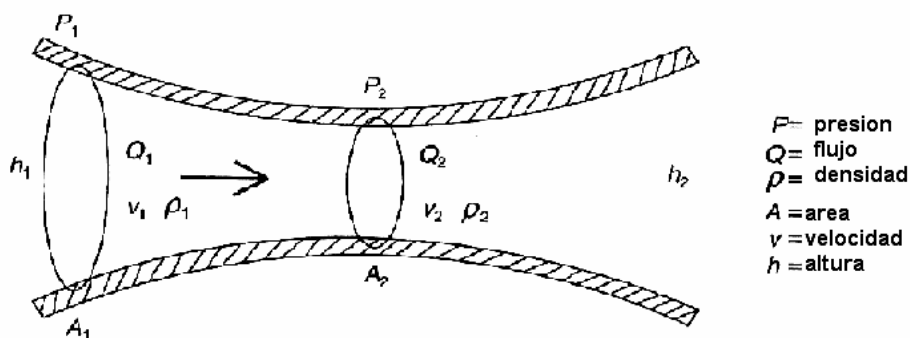
**Figura 8 Sensor de presión de diafragma metálico [1]**

#### **2.3.4 Sensores de flujo y caudal:**

El flujo es el movimiento de un fluido por un conducto abierto o cerrado, mientras que caudal es la cantidad del mismo que fluye por unidad de tiempo por el conducto. El flujo es una medida importante y como tal existen muchas formas de medirlo. Una forma dada como resultado un flujo sectorizado, es decir no solo se obtiene la magnitud del mismo sino también su dirección, y también existen aquellas medidas de flujo donde solo importa la magnitud de dicha unidad.

Una de las maneras más comunes de medir flujo es cambiando el diámetro de la tubería. En la Figura 9 se muestra del diagrama de la tubería y las variables involucradas. La manera de encontrar el caudal es midiendo presión, densidad y velocidad del líquido

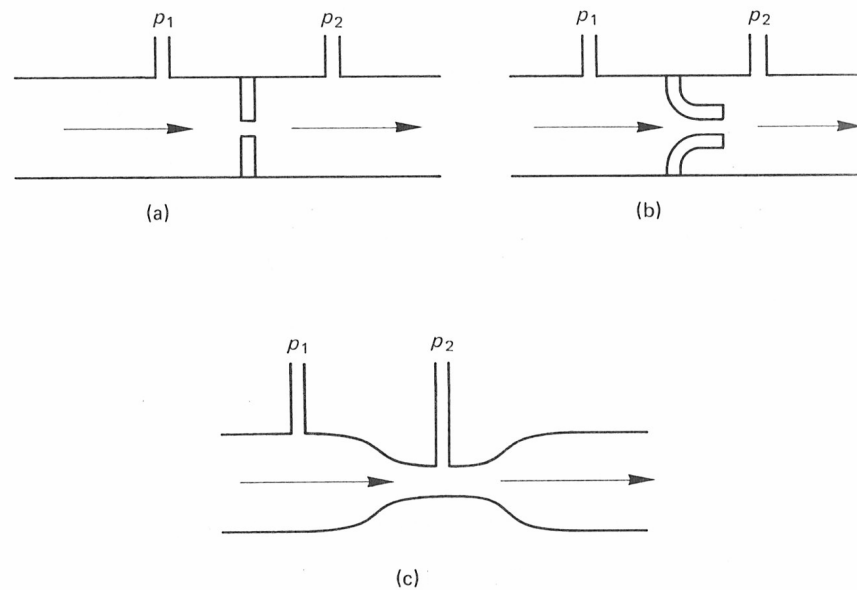
para sectores de distintas áreas en el tubo, teniendo lo anterior el flujo puede ser encontrado por medio de la ecuación de Bernoulli.



**Figura 9 Tubería con cambio de diámetro [1]**

El caso anterior se conoce a nivel industrial como caudalímetro de obstrucción y son ampliamente usados en la industria. Consisten en un tubo al cual tiene una obstrucción la cual produce una caída de presión que es dependiente del flujo en el tubo, en este caso a ambos lados de la obstrucción se coloca un sensor de presión diferencial.

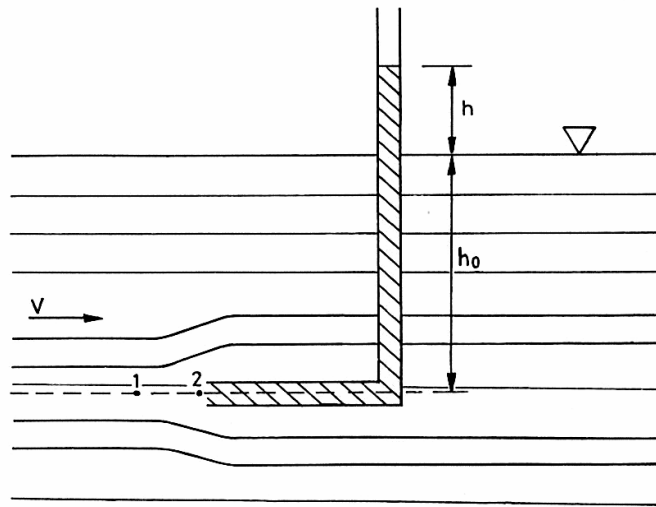
Existen muchos tipos de caudalímetros que utilizan el proceso anterior, la Figura 10 muestra algunos de ellos. En cada caso el volumen por segundo es proporcional a cada pascal de diferencia. Esto puede ser medido fácilmente por un manómetro con diafragma, como los mencionados anteriormente.



**Figura 10** Varios diseños de caudalímetros [2]

Otro tipo de dispositivo simple en su funcionamiento, es el tubo de Pitot. Se puede emplear para medir la velocidad de un fluido en un punto y se utiliza ampliamente en la aviación para medir la velocidad del aire. Existen de canal abierto y de canal cerrado. Uno como el mostrado en la Figura 11 es de canal abierto, como se ve en la figura se tiene un tubo en ángulo recto introducido en un fluido con una parte fuera del fluido. El líquido penetra en dicho tubo y tenderá a subir hacia la superficie para equiparar las presiones a ambos lados del tubo. En el caso anterior la velocidad esta dada por la siguiente relación:

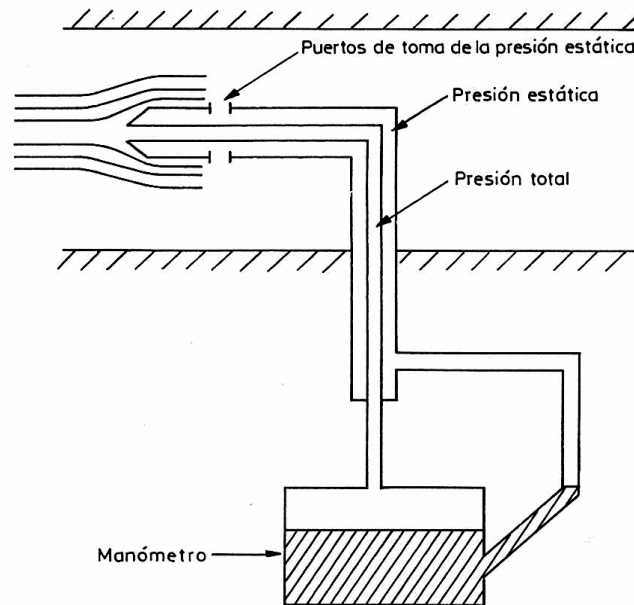
$$v^2 = 2gh \quad (2.4)$$



**Figura 11 Tubo Pitot canal abierto [6]**

Otra configuración del tubo de Pitot es con canal cerrado, tal y como lo muestra la Figura 12, en este caso se debe medir la presión estática con un manómetro y la presión total ( $P_t$ ) mediante un tubo Pitot.

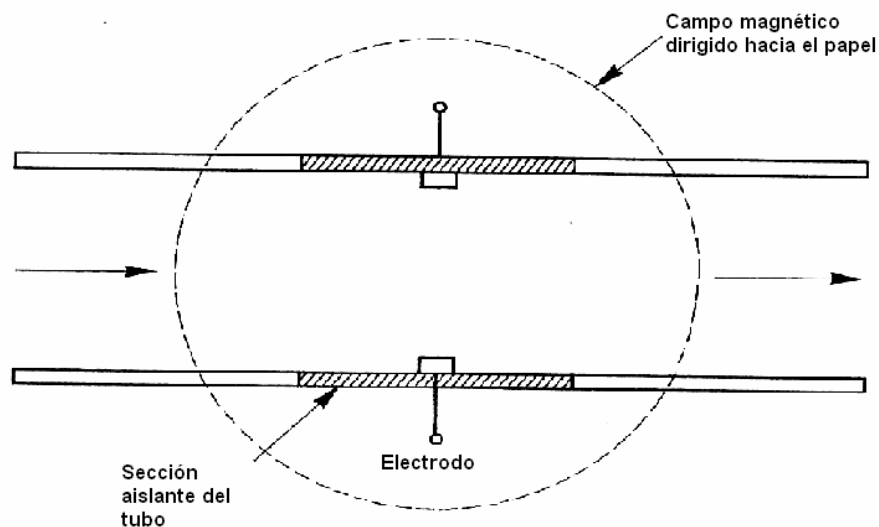




**Figura 12 Tubo Pitot canal cerrado [6]**

También existen otros dispositivos que permiten medir el flujo de manera electromagnética, consta de dos electrodos en una sección del tubo que sea no conductora, como se ve en la Figura 13. Un fuerte campo magnético es aplicado perpendicularmente al plano del diagrama, los iones son desviados según su carga y la velocidad del fluido, y detectados por los electrodos. Dejando de lado la inserción de los electrodos en el tubo, este tipo de sensor es casi el ideal, pues casi no interfiere con el flujo.

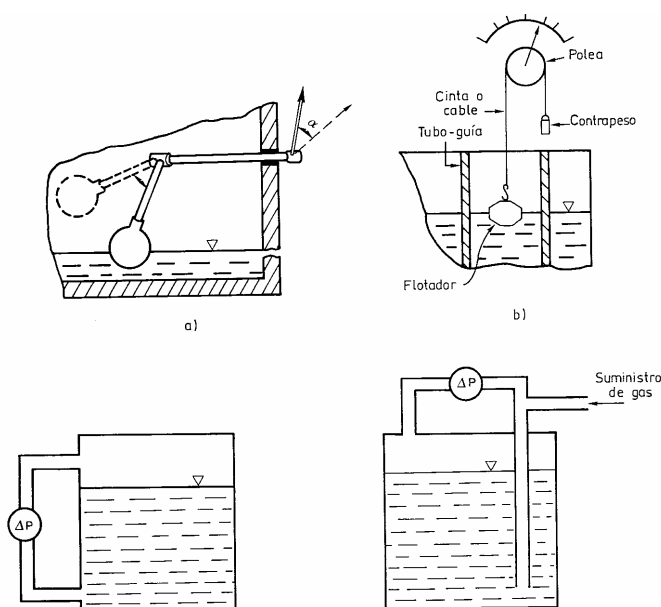
Algunos problemas con el tipo de sensor anterior es que al ser operado por corrientes DC produce polarización y puede reaccionar con el fluido. Por lo anterior puede ser usada una excitación AC, pero los mejores resultados se obtienen a bajas frecuencias.



**Figura 13 Medidor de caudal que emplea electrodos [1]**

### 2.3.5 Sensores de nivel:

La mayoría de estos dispositivos se basan en un flotador que se conecta de diversas formas a sensores de movimiento o también pueden funcionar con base en sensores de presión diferencial. La Figura 14 muestra 4 tipos distintos de sensores de nivel, en Figura 14(a) y Figura 14(b) se trata de sensores basados en flotadores y la Figura 14(c) y Figura 14(d) se trata de sensores por presión diferencial. Para el caso de los sensores que emplean flotadores su funcionamiento es muy fácil de entender con solo ver los diagramas, para el caso de Figura 14 (a), se trata de un flotador el cual por medio de una conexión mecánica convierte el desplazamiento generado por el líquido en una fuerza de torsión la cual puede ser medida por un sensor de par. Para el caso de Figura 14 (b), se trata de una polea con un flotador en un extremo y un contrapeso en el otro, la idea es que al girar la polea, el movimiento de la misma indica el volumen del líquido contenido.



**Figura 14 Sensores de nivel [1]**

### 2.3.6 Sensores de luz:

El término fotodetector es generalmente aplicado a sensores/transductores que cubren el rango de visible y regiones cerca del espectro infrarrojo. Hay muchas aplicaciones para las medidas en estos ámbitos, en especial en el espectro infrarrojo. Para algunas aplicaciones es más importante cubrir la parte del espectro infrarrojo que la visible, como lo es el caso de la Pirometría (determinar de manera remota la temperatura de un cuerpo midiendo la radiación emitida).

Existen básicamente dos tipos principales de fotodetectores, los fotodetectores térmicos y los detectores de fotones. Consisten esencialmente en una pantalla negra que

absorbe toda la radiación incidente en la misma pudiendo detectar luz y calor. El tiempo de respuesta es constante para los detectores térmicos mientras que los detectores de fotones tienen un tiempo de respuesta que es proporcional a la longitud de onda. Esto se da porque los detectores térmicos absorben toda la radiación independientemente de la frecuencia de la misma en cambio los detectores de fotones funcionan bajo el efecto fotoeléctrico el cual hace que el tiempo de respuesta se incremente de manera lineal con la longitud de onda. Esto se debe a que la energía del fotón se describe por la constante de Planck (ver apéndice) antes mencionada la cual describe que a mayor frecuencia mayor energía tiene los fotones lo cual hace que el dispositivo trabaje de manera más eficiente.

Dentro de los fotodetectores térmicos existen dos tipos principales, los que funcionan por medio de una termocupla y los detectores piroeléctricos. Los que emplean una termocupla se trata esencialmente de dos alambres de materiales distintos que pueden ser metales puros o aleaciones de los mismos los cuales están unidos por una pantalla que recoge la luz. La Figura 15 (a) muestra un corte transversal de una termocupla y el Figura 15 (b) muestra la pantalla receptora de luz que por lo general tiene un área de 1 a 10 mm<sup>2</sup>. La pantalla por lo general suele ser una lámina de oro pintada de negro. La pantalla esta sujeta por un anillo aislante y conectado a los alambres antes mencionados. El voltaje generado entre los extremos de los alambre es proporcional a la diferencia de temperatura entre la unión de los alambres y los extremos de estos.

Los detectores piroeléctricos consisten en una pequeña capa de material piroeléctrico que por lo general suelen ser zirconato de titanio con una cubierta de material

metálico, además de una ventana protectora. La Figura 16 muestra el diagrama de un detector piroeléctrico. El zirconato de titanio es un cristal que al ser expuesto a radiación electromagnética de longitudes de onda dentro del espectro infrarrojo produce una diferencia de potencial entre sus extremos. Si se conecta este cristal a un circuito y se mide la corriente generada, esta será proporcional al cambio de temperatura.

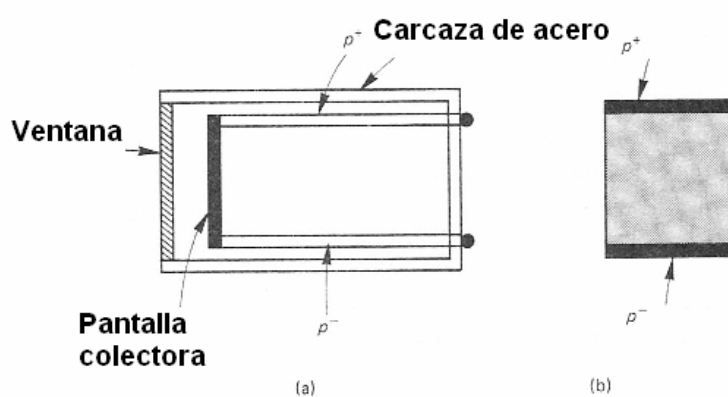


Figura 15 Corte transversal de una termocupla [1]

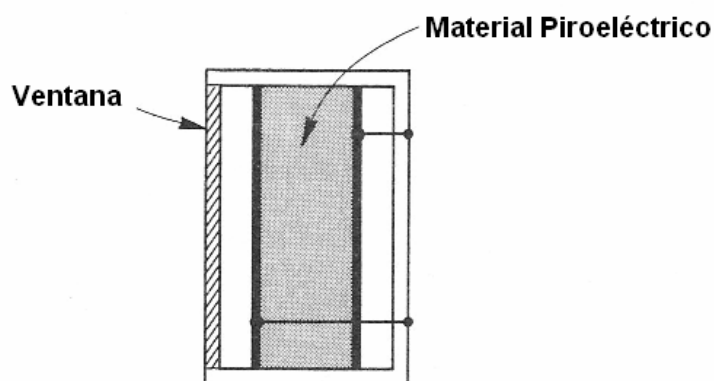
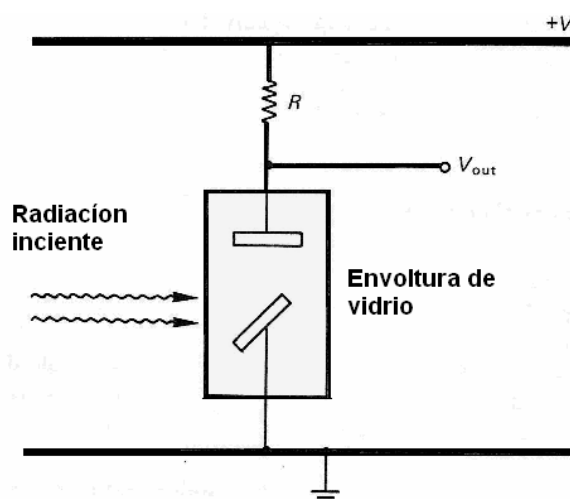


Figura 16 Detector piroeléctrico[1]

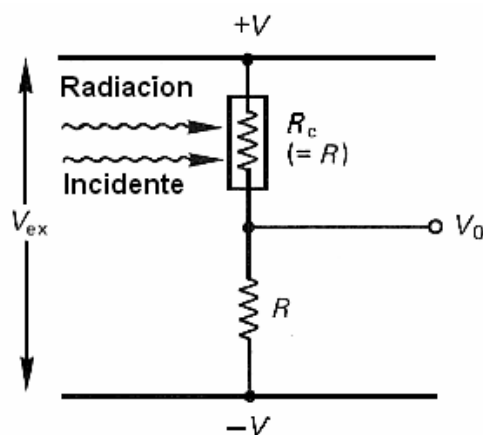
Refiriéndonos ahora a los detectores de fotones en la Figura 17 se muestra un tipo de ellos. Se trata de un detector de fotoemisión, usado en aparatos de radio antes de la invención del transistor y circuitos integrados. El dispositivo emplea un ánodo y un cátodo, el cátodo esta compuesto por un metal que emite electrones cuando es incidido por radiación, dicha corriente fluye a través de una carga resistiva  $R$ , produciendo un voltaje de salida. Por lo general se emplea oxido de cesio y plata para el cátodo. Este tipo de dispositivo tiene la desventaja de ser bastante grande y frágil, además de requerir un voltaje relativamente alto de 100V o más.



**Figura 17 Detector de fotones [2]**

Otro tipo de detectores de fotones son los de fotoconductividad, como el mostrado en la Figura 18. En ella se muestra un detector de fotoconductividad y una forma de emplearlo en un circuito electrónico con el fin de producir una salida "Vo" que depende de la radiación incidente. Estos dispositivos están compuestos por material semiconductor en

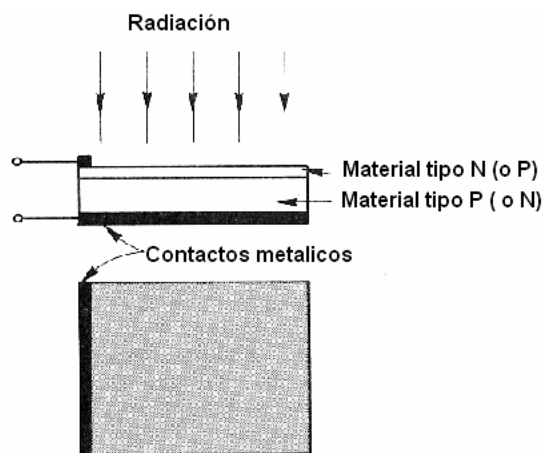
el cual los fotones incidentes causan la excitación de los electrones a través de la brecha energética, llevando a un cambio en la conductividad.



**Figura 18 Detector de fotoconductividad [6]**

Dentro de los detectores de fotones también podemos mencionar a los detectores fotovoltaicos. Estos dispositivos son construidos con materiales similares los usados en dispositivos fotoconductores, pero contienen uniones p-n las cuales tienen el efecto de causar una separación física entre el “hueco” y el electrón cuando es incidido por radiación, lo que genera una corriente eléctrica. En la Figura 19 se muestra un diagrama de estos dispositivos. Dicha corriente se incrementa al aumentar la exposición a la luz. Al estar en la oscuridad el dispositivo se comporta tal como un diodo, aunque tiene una mayor corriente de fuga. La característica típica voltaje/corriente es igual a la de un diodo, pero al estar iluminado toda la curva se mueve hacia abajo una cantidad igual a la corriente  $I_L$ . Este

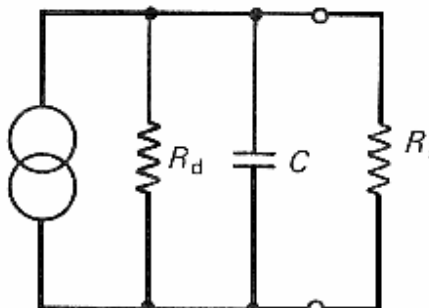
sensor es autogenerador, pues el produce su propia corriente/voltaje aun en la ausencia de una fuente externa de potencia, esta es una característica bien conocida, pues se emplean este tipo de dispositivos en la generación de energía eléctrica en diversas aplicaciones. Ver la curva voltaje/corriente en anexo 1.



**Figura 19 Sensor fotovoltaico [1]**

La eficiencia de estos dispositivos es aproximadamente del 30 por ciento, en la Figura 20 se muestra un circuito equivalente en la cual la corriente generada por luz es dividida entre la resistencia  $R_d$  (la resistencia generada por el comportamiento similar al del diodo) y la carga  $R_1$ .





**Figura 20 Circuito equivalente de celda fotovoltaica [1]**

Estos sensores se producen depositando una delgada capa de material tipo “p” en un sustrato, al cual luego se le aplica otra capa de material tipo “n” formando una unión, como la mostrada en la Figura 19. La mayoría de estos dispositivos están basados en silicio y el área puede ir desde milímetros cuadrados hasta centímetros cuadrados. La capacitancia intrínseca es variable puede ir desde 100 pF hasta 1000 pF, y puede limitar la frecuencia de respuesta. Estos transductores pueden ser operados en modo voltaje o corriente, por lo general se prefiere la corriente pues esta es proporcional a la luz incidente, además por el tipo de circuito la relación de voltaje y corriente no es lineal por lo tanto para medir resulta mas fácil si se mide la corriente.

Los detectores fotovoltaicos son muy usados, como semiconductores son ampliamente compatibles con la mayoría de los circuitos electrónicos. Algunas veces el mismo detector está en el mismo encapsulado que el amplificador, esto hace que el sensor completo venga en un tamaño reducido.

## CAPÍTULO 3: Sensores resistivos

Dado que son muchas las magnitudes físicas que afectan los valores de resistencias de elementos eléctricos, son bastante abundantes los dispositivos que emplean este principio. De ahí que los sensores resistivos se han difundido ampliamente.

### 3.1 Potenciómetros

Básicamente se trata de una resistencia con una parte móvil que suelen ser deslizante o giratoria. Dicho contacto afecta la resistencia entre el mismo y una de las terminales del potenciómetro. La resistencia en un potenciómetro viene dada por:

$$R = \frac{\rho}{A}(l - x) \quad (3.1)$$

donde  $x$  es la distancia recorrida desde un terminal fijo al otro,  $l$  es la longitud total,  $A$  es la sección de área transversal y  $\rho$  es la resistividad propia del material. Desde el punto de vista dinámico este es un sistema de orden cero. Según la ecuación vista anteriormente la relación de la resistencia y el desplazamiento de la parte móvil es lineal, esto se traduce en una serie de simplificaciones que se pueden aplicar a este tipo de dispositivos. Primero se supone que la resistencia es constante a través de todo el recorrido de  $l$ , pero no necesariamente será perfecta, por lo que la linealidad del mismo estará limitada. Luego, también se supondrá que el contacto del cursor da una variación de resistencia continua, es decir que la fricción no afecta el movimiento de dicho contacto, es decir que el contacto no avanza a saltos.

Otra de las simplificaciones que se hacen comúnmente al tratar con estos dispositivos es la de despreciar la inductancia y capacitancia intrínsecas del material. Esto porque su efecto suele ser mínimo y por lo tanto pueden ser despreciadas. Para algunos casos, cuando  $R$  es pequeño si se podría considerar el valor de la inductancia en especial para los potenciómetros que cuentan con una resistencia bobinada. Para valores altos de  $R$  se presenta una capacitancia parásita que puede llegar a considerarse para algunas aplicaciones.

Otro de los problemas de estos dispositivos es la influencia que la temperatura tiene en los mismos, esto porque la resistencia de los mismos es inversamente proporcional a la temperatura ambiente. El problema de este tipo de comportamiento es que aunque el dispositivo se aisle del ambiente por medio de un protector este aun estará expuesto al calor generado por efecto Joule, el cual calentará el dispositivo.

Un factor que limita la representación lineal de este tipo de dispositivos es el rozamiento del cursor y su inercia, las cuales se pueden despreciar si el dispositivo tiene un buen mecanismo de contacto. Como todos los sistemas que tienen fricción se requiere de un torque inicial mayor para lograr que el mismo se mueva, el cual suele ser del doble que el aplicado una vez que cursor está en movimiento, el mismo se reduce al lubricar los contactos.

El último factor a tener en cuenta es que si la aplicación para la cual se esta empleando el potenciómetro requiere de una resolución alta, hay que tener en cuenta el ruido debido a la resistencia del contacto, la cual suele aumentar con el tiempo pues se llena

de polvo, humedad, oxidación y desgaste. Sin embargo todas las desventajas antes citadas podrían despreciarse si se considera que este tipo de dispositivos son de fabricación sencilla duraderos y de bajo costo. La razón por la que son tan empleados estos dispositivos es su elevada exactitud en relación con su precio.

Comercialmente los potenciómetros varían su resistencia con movimientos lineales o circulares. Hay algunos modelos que intencionalmente se fabrican para lograr que su salida no sea lineal al desplazamiento. En algunos esta salida es una función trigonométrica (generalmente sinusoidal) del ángulo de giro del cursor. También se puede conseguir diversos tipos de salida no lineal dependiendo de la forma que como se dispongan los devanados internos.

Antes estos dispositivos se fabricaban con bobinados de un único hilo conductor pero la resistencia del mismo era muy baja y aunque este se hiciera muy fino, esta seguía siendo pequeño, además los materiales empleados eran aleaciones metálicas que producían una gran inductancia y baja resolución pero tenían una gran tolerancia a disipar potencias altas. Para mantener el costo bajo se pasó a fabricarlos con carbono, donde una película de carbono colocada sobre un soporte, la cual puede estar sola o revestida en plástico, además el cursor se hace de aleaciones que contienen aleaciones de metales nobles. Estos poseen gran resolución pero no son buenos disipando potencias grandes.

Si se desea trabajar con potencias grandes, se pueden emplear potenciómetros cuyos elementos resistivos consisten en partículas de metales preciosos colocados con la técnica de película gruesa en una base de material cerámico que generalmente es cermet.

También existen una serie de dispositivos que se elaboran con materiales líquidos o electrolíticos que tienen una disposición especial prevista para medir inclinaciones. Estos dispositivos consisten en un tubo elaborado con vidrio curado y cerrado herméticamente, en este tubo se coloca un fluido conductor, en el que se forma una burbuja de aire. En los extremos del tubo se colocan los electrodos y la burbuja de aire hace contacto con los mismos, a los electrodos se les aplica un voltaje determinado, al variar la inclinación del tubo se cambia la corriente que pasa por los electrodos y por lo tanto la resistencia del mismo.

## **3.2 Galgas Extensométricas:**

### **3.2.1 Efecto piezorresistivo**

Se trata de sensores resistivos los cuales al estar sometidos a un esfuerzo mecánico presentan variación en su resistencia. Dicho efecto fue descubierto por Lord Kelvin en 1856. El cambio de longitud resultante de aplicar una fuerza a una pieza, que para efectos del análisis será unidimensional, viene dada por la ley de Hooke:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dl}{l} \quad (3.2)$$

donde E (módulo de Yang) es una constante del material,  $\varepsilon$  es la deformación unitaria (adimensional) y  $\sigma$  será la tensión mecánica aplicada.

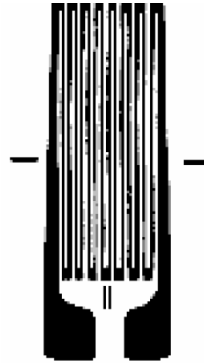
Es entonces evidente que hay una relación entre el cambio de resistencia en el material y la deformación presente en el material producto de una fuerza externa. Si se

conoce la relación entre la deformación y la fuerza que la provoca, es entonces posible saber mediante el cambio en la resistencia obtener una magnitud de la fuerza aplicada en el material. Un resistor empleado de forma que su resistencia sea proporcional a la deformación se le conoce como galga extensométrica.

Este tipo de transductores tienen una gran cantidad de consideraciones que se deben de tener en cuenta al emplear este tipo de dispositivos. Lo anterior no ha impedido que durante mucho tiempo se hayan empleado ampliamente.

Uno de los factores a considerar es que el esfuerzo aplicado no se debe llevar a la galga fuera del margen elástico de deformaciones, el cual no suele ser mas del 4% de la longitud total de la galga. En segundo lugar, la medida del esfuerzo solo será correcta si el esfuerzo es transmitido totalmente a la galga, lo que logra con un adhesivo elástico que sea estable con el tiempo y la temperatura. Añadido a lo anterior la galga debe estar aislada térmicamente del ambiente y también aislada eléctricamente del objeto del que se mide el esfuerzo.

También se parte del hecho que el esfuerzo este aplicado sobre un estado plano de deformaciones y que no hay esfuerzos en la dirección perpendicular a la superficie de la galga. Para procurar que la resistencia de la galga sea despreciable se disponen varios tramos longitudinales y en el diseño se procura que los tramos transversales tengan mayor sección. Ver Figura 21: *Galga* .



**Figura 21: Galga extensométrica [2]**

La temperatura es también una fuente de interferencias, pues afecta la resistividad del metal y el módulo del material. Esto puede causar lecturas erróneas pues sin que haya un esfuerzo aplicado en la galga el valor de la resistencia puede cambiar. Una forma de solucionar esto es colocando otra galga, denominada “pasiva” con iguales propiedades junto a la galga que realiza la medición, solo que la galga pasiva no mide el esfuerzo mecánico, solo se emplea para ver los efectos de temperatura. Una fuente de calor para la galga es el calor que ella misma genera por efecto Joule.

### **3.2.2 Tipos**

Este tipo de sensores se fabrican con diversos materiales, se emplean varios tipos de materiales metálicos conductores, donde es común encontrarse con diversas aleaciones. También se emplean ampliamente los hechos con materiales semiconductores como el germanio y el silicio. Las que emplean un metal tienen la cualidad de tener un bajo coeficiente de temperatura, esto al compensar la pérdida de movilidad de los electrones al incrementar la temperatura con el aumento de su concentración.

### 3.3 Sensores resistivos de temperatura

Los sensores de temperatura que emplean como principio fundamental el cambio de la resistencia eléctrica se les suele llamar RTD (Resistance Temperature Detector). Al ser el platino un material empleado frecuentemente, también se le puede referir a ellos como PRT (Platinum Resistance Thermometer), de estas hay dos tipos principales las Pt100 y Pt 1000 de  $100\Omega$  y  $1000\Omega$  respectivamente

Estos dispositivos fundamentan su funcionamiento en la variación de la resistencia de algún material conductor con la temperatura. Cabe decir que el cambio de resistencia no solo se debe al cambio de temperatura, sino también al cambio de las dimensiones físicas del RTD debido a la elongación o contracción que sufre como consecuencia de la temperatura.

Este tipo de sensores, al igual que todos los otros sensores, tiene ciertas limitaciones, una de ellas, y tal vez la más obvia, es que no se puede medir temperaturas cercanas o superiores a la temperatura de fusión del material del conductor. La otra es que por lo general el conductor no se encuentra a la misma temperatura que se desea medir, es decir que el conductor no debe producir calor, cosa que es casi imposible si al mismo se le hace circular una corriente eléctrica propia del circuito de medición, además del hecho que el encapsulado del mismo dispositivo a veces dificulta que el material conductor se encuentre a la misma temperatura que se desea medir.



Una limitación que también se debe de tomar en cuenta es la presencia de posibles deformaciones mecánicas, esto porque produce un efecto similar al que ocurre dentro de las galgas extensométricas. Este fenómeno es bastante común en sensores que están expuestos a grandes máquinas o que están adheridos mecánicamente a la superficie a medir.

A pesar de estas desventajas estos tipos de sensores cuentan con una alta repetibilidad, estabilidad y exactitud, tendiendo a ser más exactos los fabricados con platino. También cuentan con un bajo costo de fabricación, en especial los fabricados con cobre y níquel. También cuentan con una alta sensibilidad los cambios de temperatura, hasta diez veces mayor que la registrada con un termopar. Otro factor a considerar es que a no ser que se requiera de una medición de alta precisión, por la gran precisión intrínseca de algunos de estos sensores, se puede simplificar el modelo de la resistencia a la siguiente aproximación lineal.

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (3.3)$$

Existe gran variedad de estos, ya sea para medir líquidos, gases o temperaturas superficiales de algún sólido. Su principio de fabricación se divide en dos, los que constan de una película fina hecha con el metal conductor y los que son un hilo bobinado, siendo los últimos más precisos, pero los hechos con una película son mucho más económicos y su calidad realmente no es mucho menor, por lo que los que emplean hilo bobinado son los más empleados.

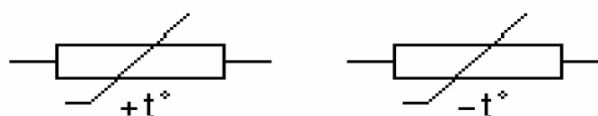
### 3.4 Termistores:

Al igual que los RTD se trata de resistores que cambian su resistencia al variar la temperatura, pero a diferencia de los RTD no basan su funcionamiento en un metal conductor, sino en un material semiconductor. Si su coeficiente de temperatura es negativo se les llama NTD (Negative Temperature Coefficient) para este tipo de material la conductividad aumenta con la temperatura, si es positivo se les llama PTC y su resistencia aumenta con la temperatura. En la *Figura 22* se muestra la representación de cada uno de ellos.

Su funcionamiento se basa en la relación de la temperatura de un material semiconductor con la resistencia del mismo, pues la temperatura varía el número de “portadores” dentro del material. Si el material es PTC adquiere propiedades metálicas en un margen de temperaturas limitado. Si es NTC, la dependencia es de tipo exponencial, representada de la siguiente forma:

$$R_T = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3.4)$$

donde  $R_0$  es la resistencia a una temperatura de referencia, y  $T_0$  es esa misma temperatura en grados Kelvin,  $B$  es la temperatura característica del material.



**Figura 22 Representación de un PTC y un NTC**

En algunos casos resulta más útil medir la relación de la tensión entre los bornes y la corriente aplicada, para este caso se emplea la curva característica de voltaje en función de la corriente, ejemplo de ello es la Figura 47 (Anexo 3). Se puede ver que para corrientes bajas, en los bornes del termistor la tensión es prácticamente proporcional a la corriente, pues el material casi no se calienta, pero al aumentar la corriente, el termistor se ve más expuesto a pérdidas por calentamiento y empieza a generar una temperatura superior a la del ambiente, lo que reduce su resistencia y causa una baja en la caída de tensión. En la gráfica se puede ver que cuando la curva empieza a tener una pendiente casi horizontal es cuando se pierde la relación lineal de corriente y voltaje, esta es la zona de autocalentamiento.

Es precisamente cuando el termistor se encuentra en la zona de autocalentamiento, que es sensible a cualquier efecto que altere el ritmo de disipación del calor. Esta característica es de gran aplicación a la medición de nivel, caudal y vacío, entre otras. Las PTC presentan una variación más ligera con la temperatura, en especial las fabricadas con silicio, inclusive comercialmente se vende ya linealizadas.

### 3.5 Magnetorresistencias:

Funcionan con el principio físico en el cual a un conductor por el que circula una corriente se le aplica un campo magnético, dicho campo magnético hace que la corriente se reduzca al ser desviados algunos electrones de su trayectoria. Ello fue descubierto por Lord Kelvin en 1856, este fenómeno causa que se de un aumento en la resistencia eléctrica en el conductor.

Para la mayoría de los conductores este efecto no es tan importante como lo es el efecto Hall (efecto por el cual una diferencia de potencial aparece en un conductor expuesto a un campo electromagnético), pero para algunos materiales anisótropos, como es el caso de los materiales ferromagnéticos, este fenómeno si es de consideración, pues puede llegar a variar la resistencia hasta un 5%, lo cual resulta útil al medir la intensidad de un campo magnético.

En dichos materiales la relación resistencia/campo magnético por lo general no es lineal, de hecho se describe idealmente con una relación cuadrática, pero gracias a distintas técnicas de polarización se puede linealizar. A pesar de que su resultado puede ser alterado por la temperatura y que necesita linealizar su salida, este tipo de sensores es muy empleado pues como solo se trata de una resistencia y no tiene acumuladores de energía se trata de un sistema de orden cero, lo que es una ventaja al compararlas con el resto de sensores magnéticos, también ventajan al resto de sensores de ese tipo porque ofrecen una mayor sensibilidad, mayor margen de temperatura y un ancho de banda mayor.

Este tipo de dispositivo es bastante barato, se emplea tanto para la medida de campos magnéticos de forma directa como para obtener una medida dependiente de dicho campo. Dentro de la primera aplicación mencionada se encuentran todas aquellas aplicaciones que tienen que ver con audio y lectoras de tarjetas magnéticas, precios codificados magnéticamente y en algunas otras lecturas de información almacenada magnéticamente, otra aplicación es en la medicina, como parte de los sensores de las máquinas de resonancia magnética.

### **3.6 Fotorresistencias:**

Estos dispositivos se fundamentan en el principio por el cual algunos materiales semiconductores al recibir radiación electromagnética cuya longitud de onda corresponde al espectro de luz, hacen variar la resistencia de esta. A este tipo de dispositivos se les llama LDR, por sus siglas en inglés “Light Dependent Resistors”. En su mayoría se trata de semiconductores. Esto se da porque en los semiconductores, la mayor parte de los electrones están en la banda de valencia, pero se comporta como un aislante, pero al aumentar la temperatura, con ella lo hacen la agitación de los electrones y dado que las bandas de conducción y de valencia son próximas, cada vez más electrones saltan a la banda de conducción, lo que le da propiedades conductivas al material, dejando este comportándose como aislante. Si el conductor es dopado, la energía requerida para este salto de los electrones es menor, es decir se da con mayor facilidad.

La energía producto de radiación óptica esta dada por:

$$E = hF \quad (3.5)$$

donde E es la energía aportada por el rayo de fotones, a la constante de Planck y F la frecuencia, al superar esta radiación cierto nivel de energía específico para cada material, se da la energía suficiente para que se de un efecto fotoeléctrico interno, es decir que los electrones se desprenden de la capa de valencia pero aun no tienen la suficiente energía para desprenderse por completo del material. Al suceder esto es que se da un cambio en las propiedades conductivas. Esto solo se aprecia en algunos materiales semiconductores, en el caso de los metales, es tan alta la conductividad que este fenómeno apenas se nota.

Para estos materiales la relación entre resistencia y la iluminación irradiada al fotoconductor viene dada por:

$$R = AE^{-\alpha} \quad (3.6)$$

donde A y  $\alpha$  son constantes intrínsecas a cada material y a como se fabrico, y donde E es la iluminación medida en lux.

Son fácilmente influenciables por la temperatura del medio que puede ser una gran fuente de ruido, lo que llega a afectar su sensibilidad a la radiación incidente, produciendo un ruido en la respuesta que es proporcional a la radiación incidente.

Sin embargo siempre hay que tener en cuenta que su respuesta espectral es estrecha pero la diversidad de materiales con los que están hechos permite cubrir gran parte de la radiación visible e incluso infrarroja y ultravioleta con distintos tipos de fotorresistencias.

Los elementos diseñados para longitudes de onda grande, son más propensos a la temperatura, por lo que se deben de mantener a temperaturas bajas. Los hay de varios tipos de materiales y con ellos distintas respuestas, así como sensibilidad. La *Figura 23* muestra el diagrama de un LDR, así como de su representación típica en diagramas.



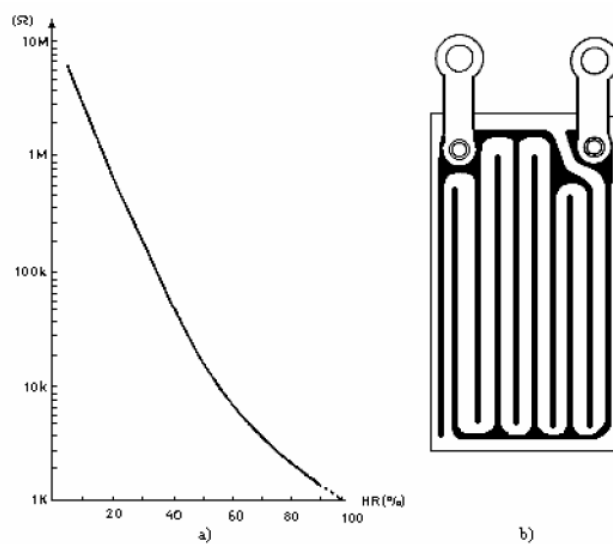
**Figura 23 Representación de LDR [2]**

### **3.7 Hidrómetros resistivos:**

Como su nombre lo dice, se trata de una resistencia que cambia sus cualidades resistivas de forma dependiente de la humedad del ambiente a medir. Por humedad absoluta se entiende como la masa de vapor de agua contenida en un volumen dado de gas. Normalmente se mide como un porcentaje, es decir la humedad relativa, que es la presión de agua necesaria para que halle saturación a una temperatura dada.

Gran parte de los aislantes eléctricos presentan un aumento en su conductividad, al aumentar su contenido de humedad. Si se puede medir la variación de esta resistencia, se puede medir el cambio de humedad. Dado que la relación entre la humedad relativa y la resistencia es no lineal, de hecho es casi exponencial, se mide esta resistencia aplicando una

corriente alterna, sin componente DC. La *Figura 24* (a muestra la relación entre la humedad relativa y la resistencia, y la *Figura 24* (b muestra el diagrama típico de una resistencia.



**Figura 24 Resistencia en función de la humedad relativa y diagrama de un hidrómetro resistivo [1]**



## **CAPÍTULO 4: Sensores de reactancia variable y electromagnéticos**

### **4.2 Sensores capacitivos:**

En este caso se trata de dispositivos en los cuales se relaciona la reactancia con una variable física específica. Por lo general no requieren de contacto físico directo con el sistema a medir. Algunos de ellos son generadores, pero se incluyen como sensores reactivos por la relación entre su entrada y salida.

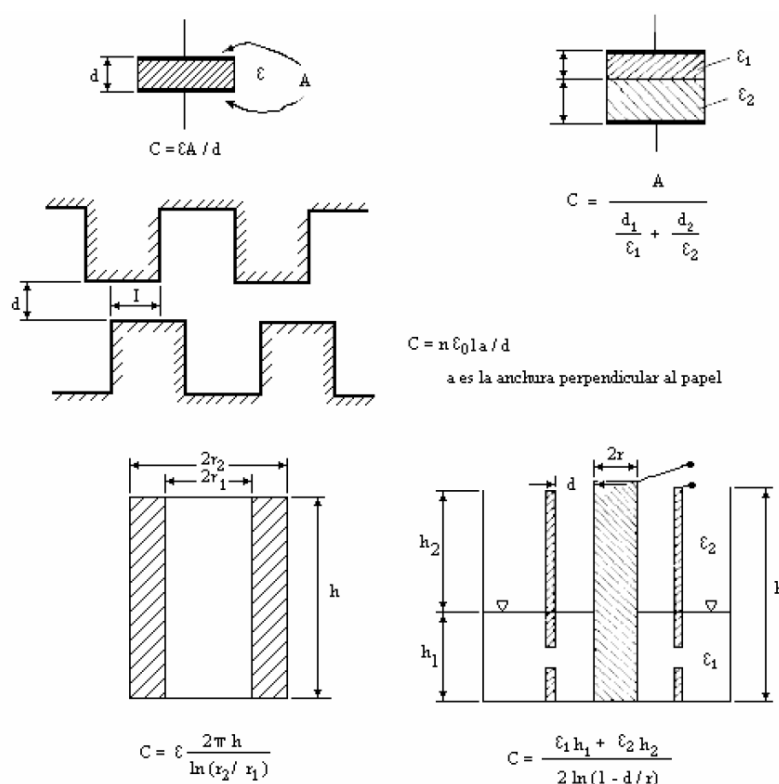
Un problema en general de este tipo de dispositivo es que son intrínsecamente no lineales, pero empleando circuitos integradores o diferenciales se puede lograr una buena linealización. Tal vez su mayor problema es el hecho de que al ser reactivos hay una limitación en cuanto a la frecuencia máxima de su entrada, pues debe ser menor a la frecuencia que la alimenta.

#### **4.2.1 Condensador variable**

Se entiende por condensador (capacitor) a dos conductores separados por un dieléctrico. La carga almacenada entre estas dos placas depende del voltaje aplicado y de la capacitancia, la cual a su vez depende de la forma de las placas y de cómo se separan, además de algunas cualidades propias de cada material. La carga en un condensador esta dada por:

$$Q = C \times V \quad (4.1)$$

Al ser el valor de capacitancia dependiente de la distancia entre placas, así como del arreglo geométrico en que se dispongan estas, es posible variar la carga entre las placas variando la distancia entre las placas o modificando la forma en que estas se interponen unas con otras. En la Figura 25 se muestran algunas formas de condensadores y la capacitancia respectiva.



**Figura 25 Arreglos de condensador variable [1]**

Una aplicación empleada es en la lectura del nivel del tanque, donde el líquido contenido es el dieléctrico de un condensador ubicado en el interior del tanque, en este caso

cualquier cambio en el nivel del tanque afecta la cantidad de dieléctrico y por ende la capacitancia de dicho condensador, de esta manera si se utilizan materiales no permeables se puede obtener una medida bastante precisa.

Otra aplicación es para la medición de temperaturas, pues para los materiales ferromagnéticos si se alcanza una temperatura por encima de cierto punto (temperatura de Curie), la constante dieléctrica esta dada por la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{k}{T - T_C} \quad (4.2)$$

donde  $T_C$  es la temperatura de Curie,  $T$  la temperatura actual y  $k$  es intrínseca al material. En este caso la temperatura, por encima de cierto nivel, logra variar la constante dieléctrica y por ende la capacitancia de algún material ferromagnético.

Este tipo de sensores, al igual que el resto, tienen una serie de limitaciones, la primera de ellas, y talvez la mas predecible, es que por la naturaleza física de su funcionamiento su comportamiento no es lineal, pero aún así, se suelen despreciar ciertas cosas como el efecto de borde en un capacitor de placas paralelas, el efecto de borde tiene un efecto despreciable cuando la distancia entre las placas es menor a la dimensión linear de las placas. De no cumplirse lo anterior la capacitancia se torna menos linear, e incluso hay una fuente de error asociada la cual crece cuando lo hace la distancia.

Un método empleado para linealizar la salida de este tipo de dispositivos basados en un sensor plano el cual funciona variando la distancia entre placas, es midiendo su impedancia, la cual viene dada por:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (4.3)$$

Otro factor a considerar es las cualidades del material dieléctrico, pues primero que todo debe de ser un buen aislante y resistente, además debe de ser el correcto según el tipo de aplicación.

Por la naturaleza del capacitor solo una de sus placas puede ser aterrizada, lo que hace a la otra propensa a errores, esto porque las oscilaciones generadas en la placa no aterrizada producto del circuito de medida, puede llegar a interferir con la medición, por esta razón se debe apantallar electrónicamente al capacitor. Aunque el dispositivo de apantallamiento, por su fabricación, puede causar una capacitancia en paralelo, por lo que hay que diseñar el mismo con cuidado.

Finalmente otra consideración es la alta impedancia de salida que estos presentan, por esto es recomendado colocar un transformador de impedancias, o medir la corriente a través del condensador en vez del voltaje entre placas, esto para poder despreciar la impedancia de entrada.

Pese a lo anterior estos sensores son muy precisos pues la fuerza mecánica para moverlos resulta ser prácticamente despreciable, además de que la fricción producida es mínima. También son bastante estables y de alta reproducibilidad, pues  $C$  no depende de las propiedades de las placas, lo que lo hace casi inmune a la temperatura o el envejecimiento del material de las placas, aunque la dilatación térmica en las placas si es de consideración. También son dispositivos de alta resolución, pues los métodos disponibles

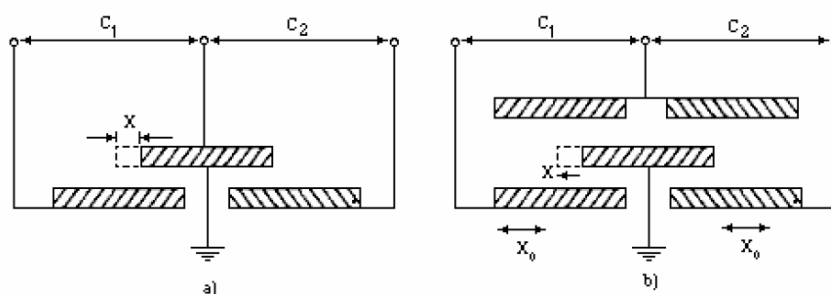
para medir capacitancias son de gran resolución. Lo que hace que se puedan detectar desplazamientos de 0.1nm.

Finalmente aunque se deben proteger de influencias electromagnéticas externas, el sensor capacitivo no las genera, a diferencia de los sensores inductivos también se emplean arreglos de tres o más placas paralelas.

Como se podrá presumir, este tipo de sensores es ampliamente empleado en la medida de desplazamientos lineares y angulares, y de detectores de proximidad. Algunos pueden detectar a través de pared o cartón. Este tipo de sensor se presta bastante para la integración. Además al medir desplazamiento, también pueden medir de manera indirecta magnitudes como la presión, aceleración, la fuerza o par aplicado, algunos sensores de aceleración de silicio están basados en sensores capacitivos.

#### **4.2.2 Condensador diferencial:**

Un condensador diferencial es un arreglo de condensadores que permite una salida más linealizada y mayor sensibilidad. Consiste en un par de condensadores variables que se acomodan de manera que experimenten el mismo cambio pero en sentidos opuestos, es decir que cuando uno aumente su capacitancia el otro la disminuya. Estos se pueden alinear de manera que la distancia entre placas varíe de manera que al aumentar en uno disminuya, en otro aumente, también se puede hacer variando la distancia entre placas, para este caso existen varias configuraciones como las mostradas en la *Figura 26*.



**Figura 26 Condensador diferencial de área variable [1]**

Los sensores capacitivos diferenciales por lo general se emplean para medir desplazamientos más pequeños que los obtenidos con un sensor capacitivo normal, su ámbito de lectura va desde los 10 mm. hasta los  $10^{-16}$ m.

### 4.3 Sensores inductivos

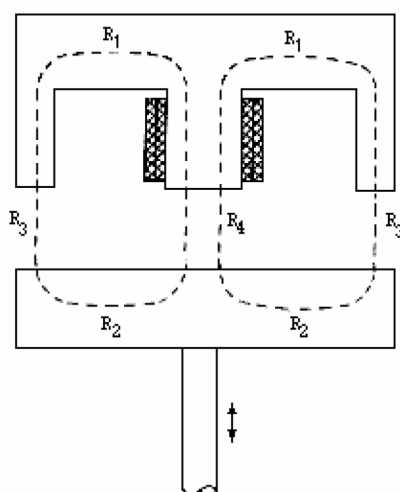
#### 4.3.1 Sensores de reluctancia variable

Se trata de dispositivos básicamente inductivos los cuales por medio de diversos arreglos varían su reactancia, de esta forma cualquier variación en la permeabilidad del material, el número de vueltas o la geometría del núcleo, producen una variación en la reluctancia.

Como su nombre lo dice, estos sensores basan su medida en un cambio en la reluctancia. En la *Figura 27* se observa un circuito magnético el cual presenta una variación en la reluctancia debida a una variación en las dimensiones del núcleo ferromagnético.

Al igual que para todos los sensores antes vistos, este tipo de sensores lleva implícitas una serie de limitaciones, una de ellas es la influencia de los campos magnéticos

parásitos que llegan a modificar el valor de  $L$ , por lo que en la práctica se recomienda colocar una pantalla metálica que bloquee toda interferencia que no sea debida a la variable a medir. Otra desventaja es que la relación de  $L$  y  $R$  no es constante, lo que produce que el flujo magnético disperso sea mayor que el flujo eléctrico disperso en un capacitor, lo que limita el alcance de medida a una longitud determinada, además de producir interferencias en otros dispositivos o circuitos cercanos.



**Figura 27 Sensor con núcleo ferromagnético de reluctancia variable [3]**

Otro factor a considerar es que si el parámetro variable es el largo de alguna parte del dispositivo inductivo, en este caso la relación entre la impedancia y  $L$  será inversamente proporcional, caso contrario a lo que pasa cuando se varia la permeabilidad, en cuyo caso un cambio en esta es proporcional a la impedancia. Esto es importante tenerlo en cuenta para el diseño del circuito al que ira acoplado el inductor.

En este tipo de dispositivos también es necesario tener en cuenta que muchas aplicaciones que emplean este tipo de circuito es que importa también la fase de la tensión de salida final, no solo su amplitud. Y por último hay que recordar, al tratar con dispositivos basados en las propiedades magnéticas de los materiales que los componen, estos no deben sobre pasar la temperatura de Curie. Lo anterior limita el ámbito de temperaturas de trabajo.

También es importante destacar algunas de las ventajas de este tipo de dispositivos. Una de ellas es la casi inmunidad ante la humedad del ambiente, además de otro tipo de fuentes de error producto del ambiente. Además tienen alta sensibilidad y poca carga mecánica. La *Figura 48* (Anexo3) muestra un ejemplo de los distintos tipos de sensores de reluctancia variable así como la manera en que esta es variada. En dicha figura a), b), c) y d) muestran sensores donde la variación de la reluctancia se da por medio de un cambio en el numero de espiras debido a un cambio en el cursor, en e), f) y g) el cambio de reluctancia se debe a un movimiento del núcleo ferromagnético, en h) e i) se debe a una variación del entre hierro y en j) se debe a un cambio de inductancia mutua entre el primario y el secundario.

Los materiales empleados en este tipo de sensores es variado, por lo general se le da atención a el material empleado en el núcleo, ya que depende de la aplicación así deberá ser este. Por ejemplo con un núcleo de aire la frecuencia de trabajo puede ser mayor, pero las variaciones en la inductancia del mismo suelen ser muy pequeñas. En el caso de los núcleos



de materiales ferromagnéticos estos tienden a tener grandes pérdidas si trabajan, en promedio, a más de 20kHz. También deben limitarse las corrientes a menos de 15Vrms.

Las ventajas de emplear materiales ferromagnéticos en el núcleo es que estos no son tan sensibles a interferencias de campos externos como los núcleos de aire, además de ser más sensibles, pues la variación de inductancia es mayor.

Como es de esperarse este tipo de sensores son útiles para medir desplazamientos o distancias en aplicaciones industriales donde el sensor esté expuesto a polvo y vibraciones fuertes, donde por su fabricación son de gran confiabilidad. También pueden medir otras magnitudes físicas cuando estas pueden ser convertidas en un desplazamiento, como los sensores de presión o fuerza.

#### **4.3.2 Sensores basados en corrientes de Foucault**

Una corriente de Foucault es la corriente que se genera en un conductor expuesto a un campo electromagnético, esta corriente se forma con el objetivo de generar un campo magnético que contrarreste al campo al que es sometido el conductor. Es por esta razón que al introducir un metal en el campo magnético generado en el interior de una bobina este hace que se altere la impedancia de la bobina. En general al sacar o introducir un conductor en un campo magnético generado por un inductor se altera la impedancia de este último, este principio es el empleado por este tipo de sensores.

Para que este tipo de sensores funcione se debe cumplir que el espesor del material debe ser bastante mayor en comparación con la profundidad de penetración de las corrientes inducidas. El espesor viene dado por:

$$\delta = (\pi \times f \times \mu \times \sigma)^{-1/2} \quad (4.4)$$

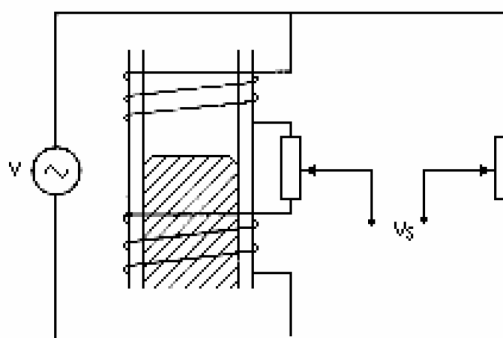
donde  $f$  es la frecuencia de la corriente,  $\mu$  es la permeabilidad del material y  $\sigma$  es la conductividad.

Como puede esperarse la respuesta de este tipo de sensores es no lineal y además al tratarse de un material ferromagnético, este varia sus propiedades con la temperatura por lo que esto cambia su impedancia. Lo anterior se puede evitar si se emplean materiales que sean conductores pero no ferromagnéticos, lo que hace posible que puedan ser empleados a temperaturas por encima de los 600°C y no necesita de un enlace mecánico lo que reduce su carga mecánica.

Existen diversas formas de construir este tipo de sensores, una forma es con una bobina perpendicular a una superficie metálica y otra forma es con un material metálico que se desliza del solenoide. Algunos tipos de sensores basados en corrientes de Foucault se basan en inductancias mutuas para lo que emplean dos inductores, uno activo y otro pasivo y al acercarlos o alejarlos se obtiene el mismo efecto que si se empleara un trozo de material conductor.

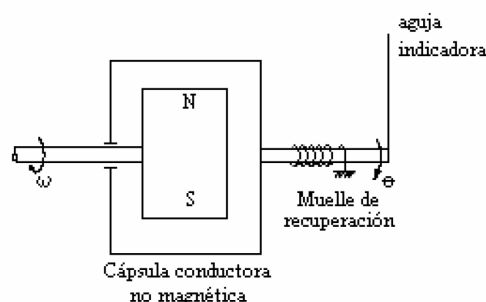
Al igual que para otros sensores que miden desplazamiento este tipo de sensores también puede ser empleado para medir otras magnitudes físicas que pueden ser

convertidas en distancias como proximidad, espesores, aceleración y presión. Pero aparte de estas aplicaciones se puede emplear este tipo de principio para medir otras magnitudes, por ejemplo en la *Figura 28* se muestra un medidor de nivel en recipientes con metales líquidos, este se trata de un tubo de acero poco magnético el cual a su alrededor tiene una bobina la cual cambia de inductancia al aumentar o disminuir la cantidad de liquido en su interior.



**Figura 28 Medidor de nivel para metales líquidos [1]**

Otra aplicación es la mostrada en la *Figura 29*, esta aplicación es un tacómetro, este mide la cantidad de revoluciones por minuto, es decir la velocidad en un eje, este tipo de dispositivos se llaman tacómetros de arrastre y funciona con un imán permanente que accionado por el cuya velocidad deseamos conocer. El imán esta rodeado por una cápsula conductora, al girar produce corrientes de Foucault en la cápsula conductora, no ferromagnética, la cual crea su propia corriente para contrarrestar los campos magnéticos producidos por el imán permanente.



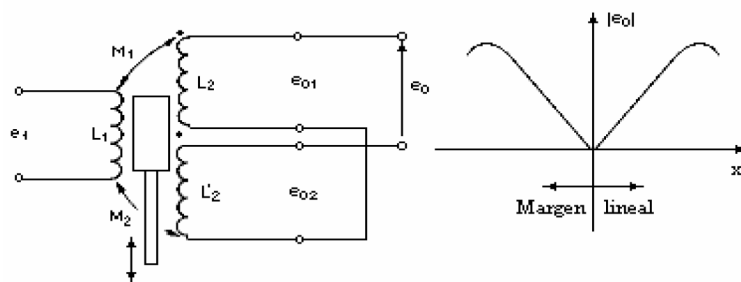
**Figura 29 Tacómetro de arrastre [1]**

### 4.3.3 Transformadores lineales

Este tipo se basa en la variación de la inductancia mutua de dos bobinas que cambia al desplazarse entre ellas un núcleo de material ferromagnético, el cual está unido por medio de un material no ferromagnético al cuerpo al que se desea medir el desplazamiento. El tipo de sensores que emplean este principio se llaman LVDT (Linear Variable Differential Transformer) o transformador diferencial de variación lineal.

Como su nombre lo dice se trata de un transformador, la *Figura 30* muestra un ejemplo clásico de LVDT, el cual al ser alimentado en el primario con una tensión alterna de frecuencia y amplitud constante este producirá una corriente que en ambos inductores es igual siempre y cuando el material ferromagnético se encuentre en el medio, pero al variar la posición de este lo harán las corrientes de cada uno de los devanados secundarios. Estos devanados están dispuestos de manera que si la barra de material ferromagnético no está en posición de equilibrio una de las corrientes secundarias se disminuirá y la otra aumentará,

esto es proporcional al movimiento de la barra. El disponer de dos secundarios posibilita obtener también el sentido de movimiento. En la **Figura 30** se muestra la relación de la corriente inducida con respecto al movimiento de la barra.



**Figura 30 LVDT, estructura básica y diagrama de voltaje inducido en función de la posición. [3]**

De esta forma, a una frecuencia de alimentación del primario, la tensión de salida es proporcional a la diferencia de acoplamiento mutuo entre el primario y cada uno de los secundarios. De analizar este tipo de sensor nos daríamos cuenta de que la salida es el desplazamiento modulado en amplitud, donde la portadora es la frecuencia de entrada del primario y la señal modulada es el desplazamiento.

El comportamiento antes expuesto tiene una serie de limitaciones que es válido señalar; la primera de ellas es que el dispositivo no es perfecto y debido a inductancias parásitas y defectos de fabricación la tensión no es la misma en los secundarios cuando el trozo de material conductor está en su posición central, dependiendo de la calidad del dispositivo esta diferencia puede llegar a ser pequeña e incluso despreciable según el tipo de aplicación, por lo general esta diferencia no sobrepasa del 1% de la mayor tensión registrada en los secundarios.

La segunda limitación es el hecho de que existen armónicos en la señal de salida. Este efecto es provocado debido a condiciones de saturación en los materiales magnéticos y por lo general el tercer armónico de la frecuencia de entrada es el que suele tener más amplitud y suele ser más visible en el neutro. Otro efecto a tomar en cuenta es la disminución de la impedancia del primario a causa de la temperatura. Esto produce que varíe la corriente del primario y con ello la corriente del secundario lo que puede llegar a alterar el resultado, por esta razón se trata siempre que la frecuencia de la señal de entrada al primario sea lo mayor posible, esto porque entre mayor sea la frecuencia para efectos de la impedancia predomina más el efecto de L que el de R.

A pesar de lo anterior este tipo de sensores es bastante usado en la industria por muchas razones, entre ellas que su resolución es superior al 0.1%, además del hecho que las pérdidas por fricción son casi nulas lo que hace que su carga mecánica sea mínima, sobre todo si se compara con un potenciómetro. Al tener poca fricción y emplear mayoritariamente metales conductores tiene pocos dispositivos que puedan fallar, lo que le da un tiempo de vida bastante alto y alta confiabilidad, además de tener un tiempo antes de falla promedio de 228 años.

También, de aislar eléctricamente el sensor (vástago entre los bobinados) y el circuito eléctrico se reduce la energía que se puede disipar dentro del recinto de medida. Esto hace estos sensores aptos para medir en atmósferas de materiales altamente volátiles.

Otro de los factores que los hacen sensores predilectos es su alta repetibilidad, por su simetría, además de sensibilidad unidireccional, alta linealidad, alta resolución (hasta de

0.1 $\mu\text{m}$ ), alta sensibilidad (a altas frecuencias la variación puede ser de 40mV/ $\mu\text{m}$  por cada voltio de alimentación) y respuesta dinámica alta. Por lo general su ámbito de medidas va desde  $\pm 100 \mu\text{m}$  a  $\pm 25 \text{ cm}$ .

Sus aplicaciones como es evidente es en las medidas de desplazamiento y posición, pero por su gran precisión y su agilidad de detección de cero es empleado como detector de cero en servosistemas de alta precisión para aviones y submarinos. También como muchos sensores de desplazamiento se pueden utilizar para medir otras magnitudes que se puedan convertir en desplazamientos.

#### **4.3.4 Transformadores variables.**

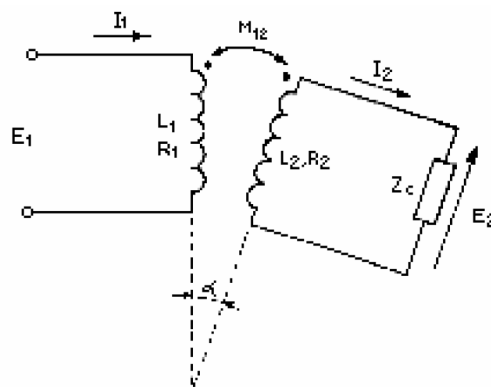
Su principio de funcionamiento se basa principalmente en el cambio de inductancia mutua producida en un transformador al alejar o acercar los bobinados primario y secundario. Este desplazamiento puede ser lineal, angular o según sea la aplicación. El método de emplear este tipo de sensores es parecido al LVDT donde el primario es alimentado con un voltaje alterno de amplitud constante el cual, genera en el secundario una salida de la misma frecuencia pero modulado en amplitud por la separación de los bobinados. Es decir que la amplitud en el secundario es proporcional a la separación producida en los bobinados. Comúnmente el primario es el que se deja fijo y el secundario esta sujeto a la superficie cuyo desplazamiento es de interés medir.

En la *Figura 31* se puede observar un diagrama que ejemplifica este tipo de sensores, en este caso se trata de un transformador de un solo devanado primario y de un

solo devanado secundario. Para el ejemplo el desplazamiento es angular, si se toma el medio como el vacío, la relación de voltajes entre el primario y el secundario esta dada por:

$$E_2 = E_1 K \cos(\alpha) \cos(\omega T) \quad (4.5)$$

donde K es una constante que depende del número de vueltas, y de la corriente y frecuencia de alimentación del primario. Como se puede ver se comprueba lo dicho anteriormente que la salida tiene la misma frecuencia que la entrada y que la amplitud es proporcional al desplazamiento angular entre los devanados.



**Figura 31 Transformador variable de desplazamiento angular [3]**

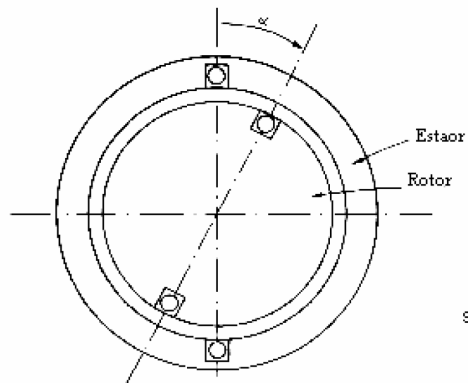
Este tipo de sensores es indicado para medir desplazamientos angulares pues su carga mecánica es muy pequeña, en comparación con los sensores angulares digitales, los cuales para tener gran resolución requieren de discos grandes que proporcionan una carga mecánica mayor. Otro tipo de ventajas es que por su simple diseño y los materiales que emplea, tienen alta tolerancia a altas temperaturas y trabajan bien con humedad, además de resistir choques y vibraciones, por esta razón son empleados en industria pesada y en



aplicaciones tanto aeroespaciales como militares. También por el tipo de señal de salida que generan la señal de salida se encuentra eléctricamente aislada de la salida, lo que disminuye los ruidos y si se trata de un conjunto de un solo bobinado principal y un solo bobinado secundario se pueden aterrizar lo que disminuye aun mas interferencias.

Otro factor a favor de este tipo de dispositivos, es que gracias a que se pueden emplear potencias relativamente altas en comparación con sus equivalentes digitales y que su salida es en corriente alterna, la señal de salida se puede transmitir fácilmente y sin atenuaciones importantes hasta por un par de kilómetros sin la necesidad de repetidores, solo empleando el cable adecuado y al final de la trayectoria esta señal se puede digitalizar. Esto también hace que la salida sea mucho más inmune al ruido de campos electromagnéticos que su contraparte digital.

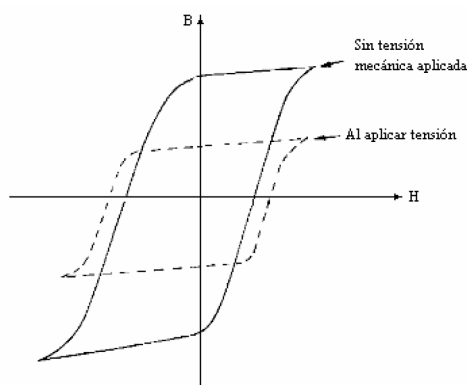
Con este tipo de sensores, se puede también, obtener mayor exactitud que con otro tipo de sensores, por ejemplo posee más del triple que para un codificador óptico incremental. Una aplicación bastante simple de lo visto anteriormente es el mostrado en la Figura 32 donde se muestra un potenciómetro de inducción que se trata de dos bobinados concéntricos, planos, uno fijo y el otro se mueve respecto al primero. Para este caso la relación de voltajes es la misma que para el ejemplo anterior del transformador variable.



**Figura 32 Potenciómetro de inducción [1]**

#### 4.3.5 Sensores magnetoelásticos

Este tipo de sensores basan su funcionamiento en el efecto Villari, descubierto por Joule. Este principio describe los cambios reversibles en las curvas de magnetización cuando se aplica un esfuerzo a un material ferromagnético e, inversamente cuando se realiza un cambio de forma y volumen durante la magnetización. La *Figura 33* muestra una curva de histéresis de un material ferromagnético y el cambio de esta al aplicar una tensión física sobre el material. Esta propiedad se debe a las tensiones mecánicas internas al material ferromagnético impiden que durante la magnetización se formen nuevos dominios magnéticos, esto disminuye la permeabilidad magnética y aumenta la fuerza coercitiva. .



**Figura 33 Ciclo de histéresis material magnetoelástico [3]**

Para simplificar los cálculos se simplifica el modelo suponiendo que la distribución de flujo magnético es constante. Este tipo de sensores se puede emplear para medir el torque generado, esto se logra midiendo el campo cuando se torciona un cilindro de material ferromagnético.

Este tipo sensores los materiales empleados deben de tener buenas cualidades magnéticas y mecánicas, tanto de una como de otra, para ello se emplean son por lo general de dos tipos, materiales cristalinos magnéticamente blandos (ciclo de histéresis pequeño, esto es una ventaja al tratar con corriente alterna) y materiales amorfos (aleaciones de hierro, níquel, cromo, cobalto, silicio, boro, etc.) estos últimos permiten detecta hasta  $0.1\text{N/m}^2$ .

#### **4.3.6 Sensores de efecto Wiegand**

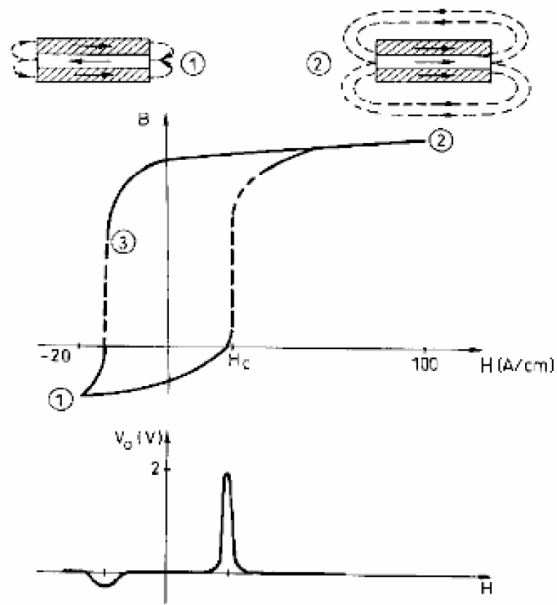
Estos sensores se basan en el efecto Wiegand, el cual funciona gracias a un hilo metálico especial diseñado y patentado por J. R. Wiegand en 1981, este hilo se fabrica aplicando una tensión mecánica a la vez que se le aplica torsión al hilo. Todo esto se hace

mientras se calienta el hilo en un horno a 400°C. Esto produce que el interior del hilo sea magnéticamente blando (ciclo de histéresis pequeño) y su exterior se todo lo contrario (ciclo e histéresis pequeño). Por lo general la fuerza coercitiva de la capa exterior suele ser del doble o un poco más que la interior.

Esta diferencia de propiedades magnéticas en el hilo causa que si este es expuesto a un campo magnético superior a cierta magnitud este genera un pulso electromagnético que suele durar cerca de los 20µs. Todo esto causa que cada vez que el hilo sea expuesto a un campo magnético de cierta intensidad este generara un pulso magnético. Cabe mencionar que este pulso solo se dará cada vez que el material sobrepase dicho límite, una vez sobre pasado este límite el material no emitirá otro pulso hasta que el campo al que esta expuesto descienda dicho limite y lo vuelva a alcanzar o sobrepasar.

La aplicación de este tipo de materiales radica en que si se coloca un solenoide de por ejemplo 1000 vueltas se puede obtener en promedio un pulso de 3V en las terminales del solenoide, el cual tiene la misma duración que el pulso magnético generado por el cable. En la *Figura 34* se muestra un diagrama del campo magnético, en la parte 1) se muestra el hilo cuando este es expuesto a un campo menor que el necesario para producir el pulso, en este caso la parte interna, magnéticamente blanda se alinea con el campo externo, y la parte externa no. En la parte 2) el campo externo iguala o supera al campo necesario para generar el efecto Wiegand, al pasar esto tanto la parte externa como la interna se alinean y se suman junto con el campo externo para producir el pulso. La figura también

muestra el diagrama de campo generado por el hilo vs el voltaje en la bobina alrededor de este.



**Figura 34 Campo magnético, ciclo de histéresis y voltaje generado en hilo Wiegand [1]**

#### 4.4 Sensores Electromagnéticos

Los sensores expuestos anteriormente se pueden modelar como un capacitor o un inductor variables, en este caso los sensores electromagnéticos producen una variación en un campo eléctrico o magnético, sin que esto implique un cambio en la capacitancia o inductancia asociadas.

##### 4.4.1 Sensores basados en la ley de Faraday

La ley de Faraday establece la relación entre el campo magnético y el voltaje generado por el efecto de este en una bobina por efecto de inducción electromagnética. Para que esto suceda el flujo que excita a la bobina debe ser variante con el tiempo, como el caso en el que este es producido por una corriente alterna, o cuando la bobina se aleja y acerca de un imán o cualquier fuente de campo magnético permanente. La relación viene dada por:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.6)$$

Dentro de este tipo de sensores se encuentran varias clasificaciones, según su el tipo de variable medida:

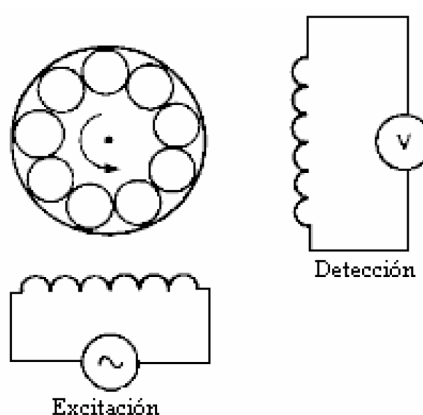
#### 4.4.1.1 Tacogeneradores:

Son básicamente tacómetros cuyo funcionamiento se fundamenta básicamente en el mismo principio que el de una máquina eléctrica (motor/generador). Para el caso de un circuito de  $N$  espiras que gira con respecto a un campo fijo de densidad de flujo  $B$ , la tensión inducida será:

$$e = NBASen\theta \frac{d\theta}{dt} \quad (4.7)$$

como se puede ver el voltaje generado puede ser la salida es una tensión de frecuencia y amplitud variantes, lo que hace de este tipo de disposiciones poco prácticas para sensar una velocidad. Para estos casos es más útil tener una frecuencia constante y una amplitud variable.

Para obtener lo anteriormente planteado se emplea un arreglo similar a la de un motor monofásico con un devanado auxiliar, solo que en este caso el devanado auxiliar será de medida. Lo que se hace es disponer un arreglo como el de la Figura 35, en este ejemplo se alambra el tacómetro igual a un motor de jaula de ardilla solo que en este caso el estator esta unido al eje al cual se desea medir la velocidad y en el devanado de excitación se introduce una corriente de amplitud y frecuencia constantes, esto hace que en el devanado de detección se produzca una corriente con frecuencia igual a la de la corriente de excitación pero la amplitud será dependiente de la velocidad de giro.



**Figura 35 Tacómetro de efecto Faraday con devanado de ardilla [3]**

En este caso la velocidad de giro se convierte en la frecuencia se convierte en la frecuencia moduladora y la frecuencia en el devanado de excitación se convierte en la portadora. Por lo general la frecuencia de excitación se suele, por conveniencia, dejar igual que la frecuencia de alimentación de la red (60Hz). Por conveniencia se recomienda que la frecuencia de excitación se por lo menos diez veces mayor que la velocidad de giro máxima

a medir, esto para poder separar las señales sin necesidad de implementar filtros muy complejos. La sensibilidad de estos dispositivos suele ir de 3 a 10V/1000r/min.

Entre sus problemas esta el hecho de que son sensibles a la temperatura, esto porque se varia la impedancia de ambos devanados como de los materiales en el rotor. Algunos diseños corrigen esto con un termistor linealizado en serie con el devanado primario.



## **CAPÍTULO 5: Sensores Generadores.**

Como su nombre lo indica este tipo de sensores se caracteriza porque puede generar una señal eléctrica sin la necesidad de una fuente de alimentación. Posibilitan la medida de magnitudes físicas como temperaturas y fuerzas, teniendo la cualidad que como son basados en efectos reversibles se pueden usar también como accionadores o en aplicaciones inversas, es decir se pueden usar para generar magnitudes físicas del mismo tipo que las activa. En algunos casos estos sensores se emplean como dispositivos de generación de energía eléctrica como algunos sensores fotovoltaicos que actualmente son bastante empleados como fuente de energía en diversas aplicaciones.

### **5.1 Sensores termoeléctricos (termopares)**

Estos sensores se basan en el efecto Peltier y el Efecto Thompson (ver apéndice), que son efectos reversibles a diferencia del efecto Joule. Se puede ver que las aplicaciones inmediatas de estos sensores es en la medición de temperaturas, pero siempre están dispuestas a una serie de limitaciones. Una de las limitaciones, quizás la más obvia es que la temperatura de medición tiene que estar por debajo de la temperatura de fusión de los materiales empleados en la unión, también es recomendable que el material a medir no reaccione con alguno de los metales.

Otra limitante es que la corriente que circule por el circuito de termopares debe ser mínima, de no ser así la unión produciría calentamiento y el calor de esta sería distinto al

del entorno, lo que insertaría grandes errores en la medición. También se debe procurar que los conductores y los materiales empleados para la unión sean homogéneos, lo que implica tener cuidado de no exponer estos a tensiones mecánicas que puedan afectar el funcionamiento de estos.

Si se desea obtener la temperatura en una de las uniones con el fin de sensor esta es necesario mantener la temperatura de la otra unión a una temperatura constante y conocida, esto para poder medir de forma exacta la temperatura, esto porque cualquier cambio en la unión de referencia es una gran fuente de errores.

A pesar de lo anterior las ventajas de estos sensores es grande, y es por eso que son los más abundantes en la medición de temperaturas hoy en día. También tienen un ámbito de funcionamiento bastante grande, desde  $-270^{\circ}\text{C}$  a  $3000^{\circ}\text{C}$ . También presentan una buena estabilidad con el tiempo y una alta fiabilidad, además de una velocidad de respuesta bastante rápida, esto debido a su pequeño tamaño. Tienen una gran robustez, simplicidad y flexibilidad en su utilización, además de que están disponibles en el mercado de modelos de bajo costo pero siempre manteniendo las buenas cualidades en comparación con el precio de estas. Y por último al no necesitar de fuente de alimentación no son propensas a los efectos de autocalentamiento de los dispositivos que necesitan de una fuente de energía eléctrica para funcionar.

Para efectos de un buen funcionamiento interesa tener una alta resistividad, esto para tener una resistencia alta sin necesidad de contar con una gran cantidad de masa en el sensor, lo que reduciría la sensibilidad del sensor. Para lograr esto se emplean aleaciones

que se componen de algunos de los siguientes materiales en distintas proporciones: níquel, aluminio, cromo, cobre, manganeso, entre otros siendo también empleados el silicio y el germanio. Al igual que otros sensores, es importante proteger el sensor de los daños o interferencias que pueda causar el medio, por eso la mayoría de estos sensores cuentan con una carcasa protectora, normalmente esta resulta ser de acero inoxidable. El espesor de la carcasa en cierta forma limita la velocidad de respuesta y la robustez.

## **5.2 Sensores piezoeléctricos**

Son los sensores para cuyo funcionamiento se emplean materiales piezoeléctricos, estos funcionan bajo el principio piezoeléctrico, donde aparece una polarización eléctrica en el material al deformarse bajo la acción de un esfuerzo. Es un efecto reversible de modo que si se aplica una diferencia de potencial eléctrico entre dos caras del material aparece una deformación en otras dos caras del material. Todos los materiales piezoeléctricos están relacionados con una estructura cristalina (iónica), estos materiales son necesariamente anisótropos. Las propiedades piezoeléctricas se manifiestan en 20 de las 32 clases cristalográficas, aunque en la práctica solo se usan unos pocos. De las 20 clases mencionadas antes solo 10 tienen propiedades ferroeléctricas.

Entre los materiales piezoeléctricos naturales, los más frecuentes para usar en sensores son el cuarzo y la turmalina. Por otro lado las sustancias sintéticas más empleadas son las cerámicas, entre ellas se encuentra muchos monocristales pequeños con gran capacidad.

Las cerámicas piezoeléctricas tienen gran estabilidad térmica y física, se pueden fabricar con un amplio margen de las propiedades de enteros. Una de sus desventajas, quizás la más importante, es su susceptibilidad a envejecer y la sensibilidad térmica de sus parámetros. Las cerámicas más empleadas son los titanatos-circonatos de plomo (PZT), el titanio de bario y el metaniobato de plomo.

La aplicación de estos sensores es amplia en cuanto a detección de magnitudes mecánicas, siempre y cuando se tengan en cuenta algunas de las limitaciones siguientes; primero es que su respuesta no es continua, esto porque aunque su impedancia de entrada es grande, esta no es infinita, y por eso al cabo de algún tiempo la carga drenada será mayor. Otra limitación es la respuesta en frecuencia presenta un pico de resonancia muy fuerte, esto porque al trabajar con variaciones mecánicas el único medio de amortiguamiento es el propio rozamiento interno del material, esto se evita si se miden vibraciones con frecuencia muy por debajo de la frecuencia de resonancia natural del material.

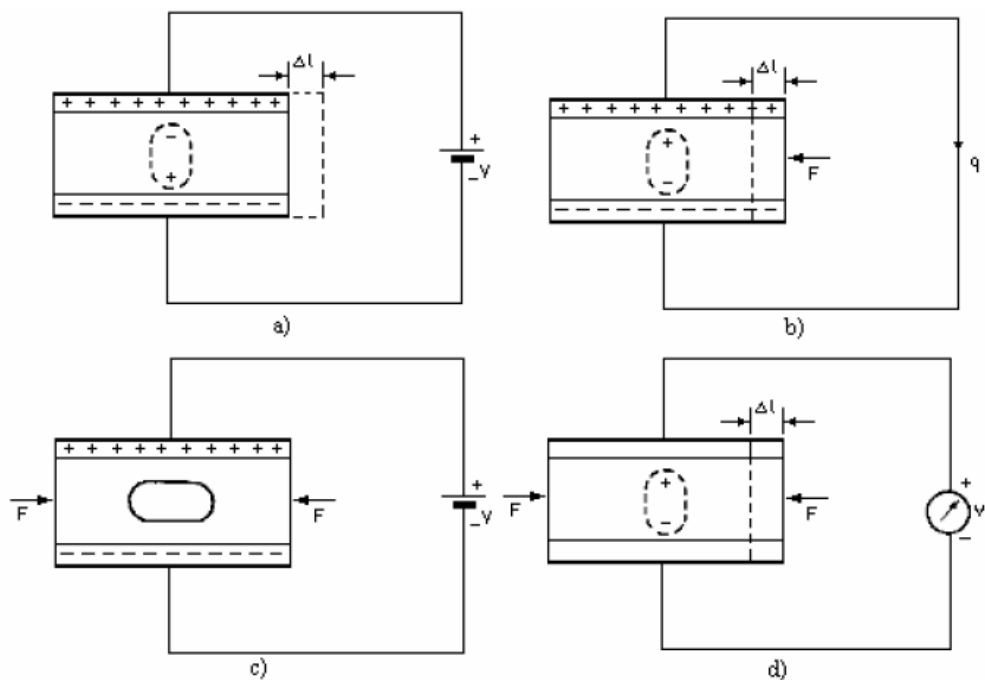
Otra limitación importante es que las propiedades piezoeléctricas de los materiales empleados son sensibles a los cambios de temperatura, además del hecho de que por encima de la temperatura de Curie, todos los materiales dejan de ser piezoeléctricos. Por lo anterior el cuarzo solo se emplea hasta 260°C y la turmalina hasta 700°C.

Por lo general la salida de este tipo de dispositivos necesita de amplificadores pues esta presenta una impedancia muy alta, algunos sensores incluyen internamente el

amplificador, pero esto limita un poco su funcionamiento por que estos dispositivos limitan el margen de temperaturas a las que pueden ser usados estos sensores.

Sin embargo a pesar de las limitaciones estos sensores son ampliamente empleados debido a su alta sensibilidad, siendo en la mayoría de los casos dispositivos de bajo costo. Otra ventaja es su rigidez mecánica, pues por lo general las deformaciones experimentadas son inferiores a 1  $\mu\text{m}$ . Su alta rigidez le otorga un amplio margen de frecuencias de operación. Otra ventaja es su pequeño tamaño.

En la *Figura 36* se muestran varias formas de emplear los sensores piezoeléctricos. En a) se muestra un material piezoeléctrico al que se le aplica una tensión y esta produce un desplazamiento, en b) se aplica una fuerza y se cortocircuitan las placas, lo que da como resultado la aparición de una polarización. En c) la deformación es nula porque aunque se aplica una tensión, externamente se le aplica una fuerza que impide que el material se deforme, esto sirve para medir la fuerza que incide sobre el material. En d) se usa el efecto piezoeléctrico para aumentar la rigidez del material.



**Figura 36 Aplicación de sensores piezoeléctricos [1]**

### 5.3 Sensores piroeléctricos

Este tipo de sensores se basan en el efecto piroeléctrico que fue estudiado por D. Brewster en 1824, este efecto consiste en la aparición de cargas superficiales cuando el material es expuesto a un cambio de temperatura. Si el cambio de temperatura es uniforme en todo el material, el efecto piroeléctrico se describe mediante el coeficiente piroeléctrico, el cual es un vector y está descrito por la siguiente forma:

$$\Delta \bar{P} = \bar{p} \Delta T \quad (5.1)$$

donde  $\Delta T$  es el cambio de temperatura y  $\Delta P$  es la polarización espontánea. Este efecto es útil para la medición de radiación térmica a temperatura ambiente. Para lograr esto se disponen dos electrodos metálicos perpendiculares a la polarización, lo que forma un condensador que actúa como sensor térmico. Cuando el detector absorbe la radiación este cambia de temperatura y con ello produce un cambio en la polarización, lo que produce una carga superficial en las cargas del condensador.

La carga inducida en el material será:

$$\Delta Q = A\Delta P = pA\Delta T \quad (5.2)$$

donde  $\Delta T$  es el cambio en la temperatura a la que fue expuesto el detector, para poder usar esta aproximación se supone que el grosor del detector es suficientemente pequeño para poder suponer que los gradientes de temperatura son despreciables en su superficie.

La tensión obtenida entre las placas será:

$$V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \Delta Q \frac{b}{\epsilon A} = \frac{pB}{\epsilon} \Delta T \quad (5.3)$$

y si la radiación incidente es pulsante y de potencia  $P_i$ , la tensión será:

$$V_0 = R_v P_i \quad (5.4)$$

donde  $R_v$  es la responsabilidad del material, esta constante es proporcional a la fracción de potencia incidente que se convierte en calor y de la constante de tiempo térmica, e inversamente proporcional al calor específico volumétrico y la constante dieléctrica. Como

es de esperarse, al ser un detector de radiación, este tipo de sensores son sensibles al ruido térmico.

Muchos materiales piezoeléctricos son también piroeléctricos, esto porque en ambos casos se trata de materiales anisotrópicos. Hay dos grupos de materiales piroeléctricos, los lineales y los ferroeléctricos. Los primeros tienen la cualidad que no se puede cambiar la polarización a base de invertir el sentido del campo eléctrico. En cambio en los materiales ferroeléctricos no tienen esta limitación.

Al igual que para los materiales piezoeléctricos, los materiales piroeléctricos pierden sus propiedades por encima de la temperatura de Curie, esto limita su margen de temperaturas a las cuales pueden operar. También se ven limitados por algunas interferencias del ambiente como lo son el polvo, vapor de agua, anhídrido carbónico y ozono en el aire, esto porque hacen que la radiación recibida por los detectores difiera de la emitida. Para resolver esto se emplean pirómetros de dos colores (longitudes de onda distintas), funciona dividiendo la radiación proveniente del cuerpo en dos partes iguales y cada una de ellas es filtrada por medios ópticos. La radiación que emerge del filtro óptico es llevada a un detector respectivo de banda estrecha centrada en las mismas longitudes de onda de cada filtro. Si las dos longitudes de onda son suficientemente próximas se puede concluir que la sensibilidad es la misma para cada caso lo que indica si la radiación sensada es la emitida.

Las aplicaciones de estos sensores son variadas, siendo más evidente la detección de radiación térmica a temperatura ambiente. Se puede aplicar este principio para medir



temperatura de un cuerpo sin tocarlo, solo con medir la radiación que este esta emanando (pirómetros), también pueden ser empleados para la medida de la potencia generada por una fuente de radiación (radiómetros), así como en analizadores de IR, detectores de CO<sub>2</sub> y otros gases que absorben radiación IR, detección de IR emitida por el cuerpo humano ( en sistemas de seguridad o de encendido de luces), en termómetros de alta resolución y en detección de pulsos láser de alta potencia.

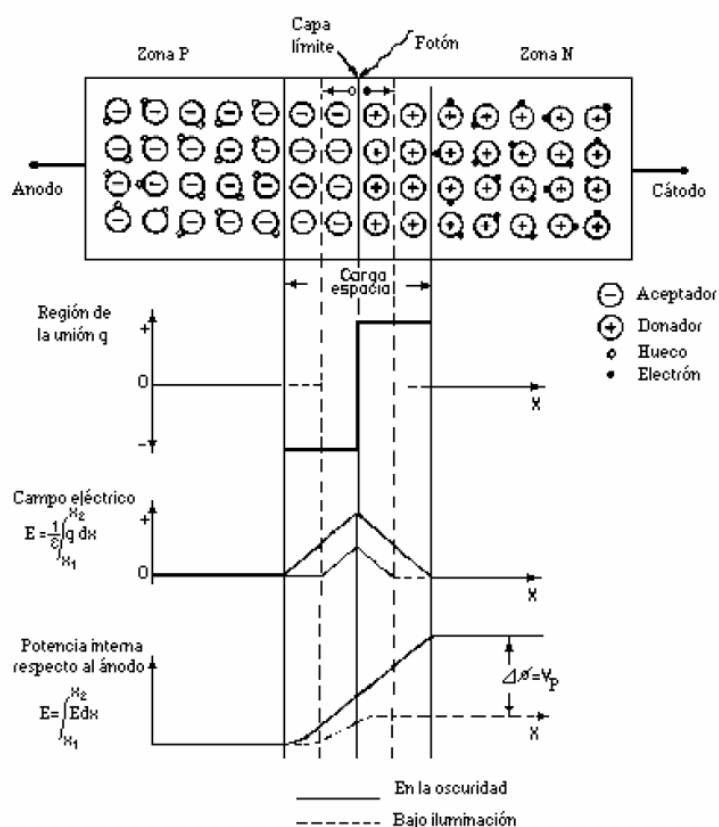
Por su pequeño tamaño y alta sensibilidad a los cambios de temperatura, estos sensores son más rápidos que otros detectores térmicos como termopares o termistores, ya que no es necesario que alcance equilibrio térmico con la fuente de calor.

#### **5.4 Sensores fotovoltaicos**

El efecto fotovoltaico permite obtener una tensión eléctrica que es función de la intensidad de la radiación incidente sobre un material fotoconductor. Esto se da porque se ioniza una zona donde hay una barrera de potencial. Al poner en contacto un semiconductor p con uno tipo n, debido al movimiento térmico algunos electrones pasan de la zona n a la zona p, esto ocasiona que en una banda alrededor de la zona de contacto de los dos materiales sea eléctricamente neutra y esta parte neutra se opone a el paso de los electrones de un material a otro. Esto es similar a lo que pasa en la zona de unión de un Diodo semiconductor.

En los materiales fotoconductores este equilibrio puede ser roto por medio de radiación, visible o no, solo se requiere que la energía supere el ancho de banda bajo la

acción del campo eléctrico en la zona de unión. La *Figura 37* ilustra este proceso. La radiación incidente hace que aumente el número de huecos en el material p, lo que llega a generar un potencial en los extremos del material.



**Figura 37 Efecto fotoeléctrico en unión p-n [1]**

En cuanto a su fabricación, se tiene que emplear un material acorde con la longitud de onda de la radiación a la que se desea que sea sensible. También de acuerdo con las necesidades se añade otra zona de material no dopado entre la unión de los materiales tipo p

y tipo n, esto para los casos en los que se desee mayor rendimiento para longitudes de onda largas, también sirve para mayor rapidez y menor ruido y corriente de oscuridad.

Los detectores fotovoltaicos ofrecen una mejor linealidad que los fotoconductores, además de ser más rápidos y más inmunes al ruido, pero tienen la desventaja de requerir de una amplificación de la señal de salida. Por lo tanto si se aumenta la resistencia de carga la respuesta se hace mas corta y se reduce la linealidad.

Las aplicaciones son variadas, en primer lugar se emplean para detectar luz, pero se pueden usar para detección de humo, detectores de exposición fotográfica, lectoras de tarjetas, pirómetros de infrarrojos, fotómetros de llama, calorímetros, etc.

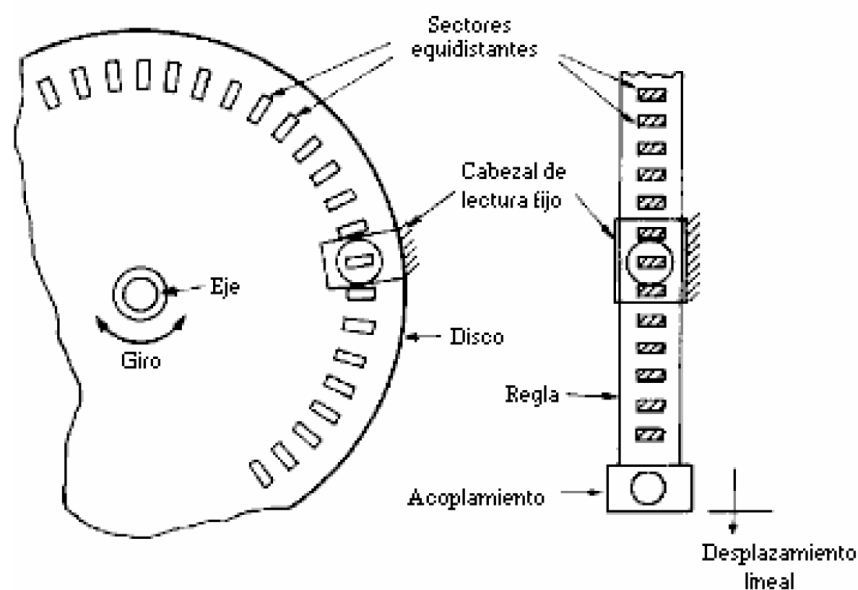
## **CAPÍTULO 6: Otros Sensores**

A continuación se explicará el funcionamiento de algunos sensores de gran utilidad que no pueden ser ubicados en las categorías anteriores.

### **6.1 Codificadores de posición**

#### **6.1.1 Codificadores incrementales**

En este caso se trata de un sensor que emplea un mecanismo que traduce movimiento en vibraciones y luego las vibraciones que son señales cuadradas provenientes de un medio como un opto acople abierto, este desplazamiento es interpretado por un contador digital para contabilizar ya sea el movimiento angular o lineal. En la *Figura 38* se puede apreciar mejor esta disposición, donde la superficie que se desplaza tiene una serie de ranuras las cuales al pasar por un conjunto emisor-receptor crean una vibración. Los medios para generar la vibración pueden ser eléctricos, ópticos o magnéticos. En el caso de un sensor que emplee métodos ópticos estos se tratan por lo general de un LED y un fotorreceptor. Las ranuras pueden ser secciones transparentes en un material opaco o del todo se huecos, también puede tratarse de secciones reflejantes o franjas de interferencia



**Figura 38 Disco y regla para codificadores incrementales [1]**

Este tipo de sensores tienen una resolución limitada por la cantidad de ranuras, el área de estas y la velocidad de conmutación del dispositivo empleado para recibir la luz y convertirla en un tren de pulsos de señales digitales. Para el caso del sensor de movimiento angular, la resolución está dada por:

$$N = \frac{\pi D}{2X} \quad (6.1)$$

donde  $D$  es el diámetro del disco y  $X$  el ancho de cada ranura. La ventaja de estos dispositivos es que son muy simples y de económica fabricación, pero acarrea una serie de limitaciones. Una de estas limitaciones es que una vez que el sistema pierde la alimentación de la fuente de energía y luego la vuelve a recuperar pierde información de la posición actual ya que solo detecta movimiento pero no posición. Otro problema es que no permite

detectar el sentido de avance, el dispositivo podría moverse a la próxima ranura y regresar a la anterior y el sensor detectaría que avanzo dos ranuras pero en realidad se devolvió su posición original.

En el caso de los emisores y receptores ópticos estos tienen los problemas de estar expuestos a fuentes de error como el humo, el polvo y el desgaste de los componentes a causa de factores térmicos o temporales. Además de que algunas de las partes como lentes o demás componentes ópticos son bastante sensibles a las vibraciones.

En el ejemplo anterior se usó medios ópticos para diferenciar la posición pero este método también puede emplear medios magnéticos o eléctricos. Solo que hay que tener otras consideraciones para estos. En el caso de los medios magnéticos, como estos emplean el principio de Faraday de inducción, hay una velocidad mínima de lectura, y desde luego una velocidad máxima. Otra consideración es que la salida de este sistema es una señal con salida senoidal, lo que puede causar errores en el contador, por ello se suele colocar un dispositivo tipo disparador Schmidt en el medio del sensor magnético y del contador.

Para el caso de los que emplean medios eléctricos, estos tienen la ventaja de no requerir de amplificación de la señal de salida y de ser bastante económicos, pero tienen la desventaja de estar expuestos a desgaste por la fricción de las escobillas que emplean para recolectar la información.

Hay algunos métodos para obtener mayor resolución en los contadores incrementales angulares, una de ellas es agrandar el disco para tener una mayor longitud perimetral pero esto condiciona la resolución al tamaño del disco, lo que resulta poco

práctico pues el tamaño del disco se puede volver muy grande, otra solución es colocar dos discos concéntricos sobre puestos y de igual tamaño, solo que uno es fijo y tiene un número de ranuras  $N+1$ , donde  $N$  es el número de ranuras del otro disco, la Figura 39 ejemplifica este método. Ya sea que se emplee alguno de los otros arreglos u otro el número de ranuras puede llegar a ser tan grande como 6000 por vuelta. Y se puede aumentar en un orden de 100 si el sensor acepta varias salidas senoidales desfasadas.

Los diámetros para el caso de los sensores angulares van desde 25 a 90 milímetros y además los lineares pueden llegar a tener hasta 400 ranuras por milímetro. Este tipo de sensores se emplean para posicionar de manera automática piezas con alta precisión como en el caso de los cabezales de lectores ópticos o magnéticos.

Algunos sensores permiten medir el sentido de giro, esto se puede lograr gracias a la inclusión de otro grupo de ranuras pero ubicadas dentro del disco en un sector perimetral de radio menor al perímetro donde se encuentran las ranuras que están ubicadas en el perímetro externo del disco. Esto se logra produciendo varias señales, una que cuenta el desplazamiento en el perímetro externo y otro sensor-receptor que detecte el sentido de giro, con arreglos de flip-flops se puede llegar a interpretar de manera sencilla el sentido de giro, la *Figura 40* ejemplifica la medición del sentido de giro, pero igual tienen el inconveniente que no son sistemas con memoria, así que indican el desplazamiento y el sentido de este pero no pueden decir la posición exacta del disco, solo si este se desplaza, cuánto se desplaza y en que dirección .

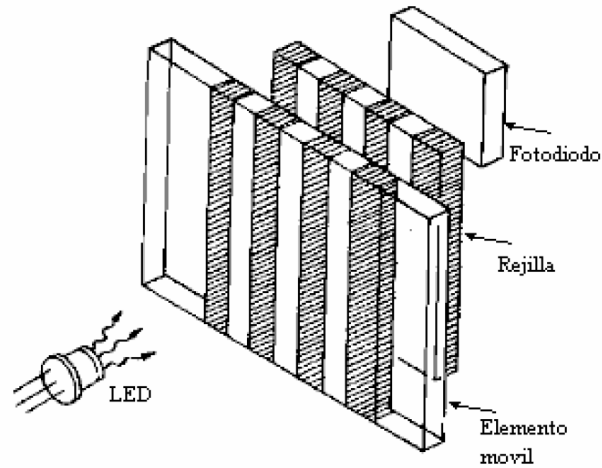


Figura 39 Método de rejillas superpuestas para incrementar resolución [2]

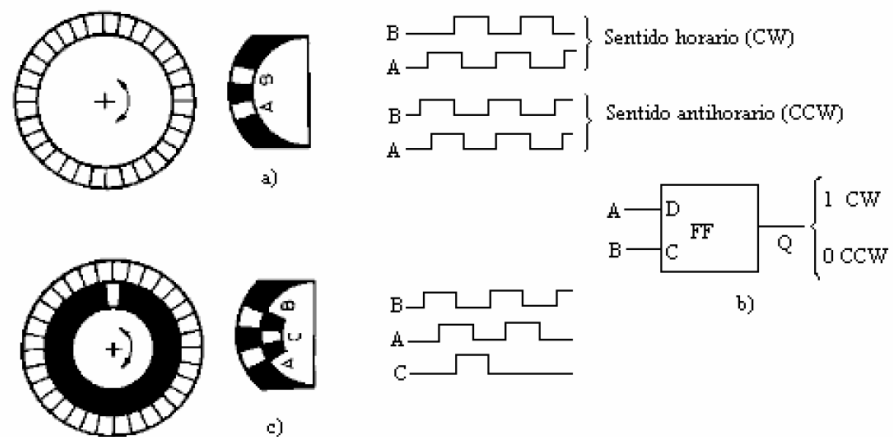


Figura 40 Métodos para identificación de sentido de giro [2]

### 6.1.2 Codificadores absolutos

Estos se basan en el principio de los codificadores incrementales, solo que estos entregan una salida codificada donde cada código representa una posición angular única, lo que permite conocer de manera precisa la posición exacta del disco, pues, dentro de la



exactitud permitida por el disco o la regla, no hay dos posiciones con la misma codificación.

Estos sensores emplean una fuente de emisión, que por ejemplo puede ser un LED, pero emplean múltiples receptores los cuales en el caso de los sensores de movimiento lineal son acomodados de forma transversal a la regla o cinta y para el caso de los sensores de movimiento angular los receptores se acomodan de forma radial, la Figura 41 muestra el diagrama de funcionamiento de este tipo de sensores.

La idea es que en vez de usar una sola pista que genere un tren de pulsos, se acomodan varias pistas, cada una con ranuras de tamaño distinto a las ranuras ubicadas en la otra pista, para el caso de los discos se usa que las ranuras ubicadas dentro de pistas de menor radio sean las de mayor tamaño y las ranuras en las pistas exteriores son de área menor. La *Figura 42* ejemplifica el caso con un par de discos ranurados para medir desplazamiento angular, la *Figura 42 a)* se trata de un disco empleado por un codificador de posición absoluto y *Figura 42 b)* es el disco empleado por un contador incremental. Se puede ver como los discos otorgan a cada ángulo una codificación específica.

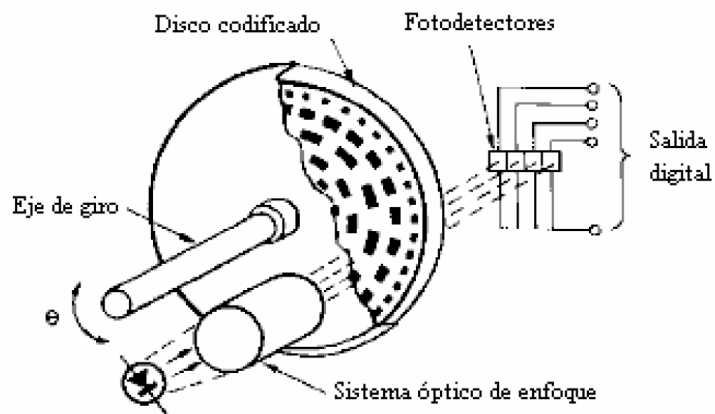


Figura 41 Diagrama de funcionamiento de codificador absoluto [2]

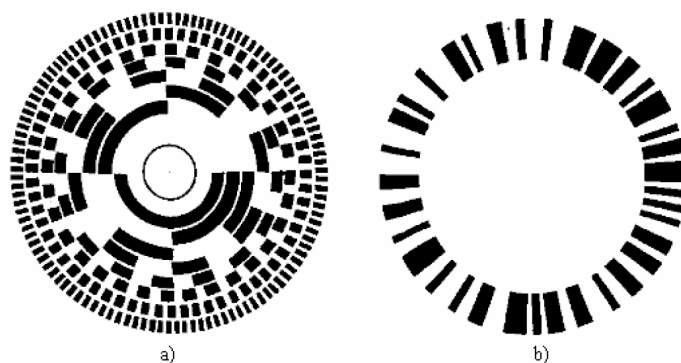


Figura 42 Discos codificados para codificador absoluto e incremental respectivamente [2]

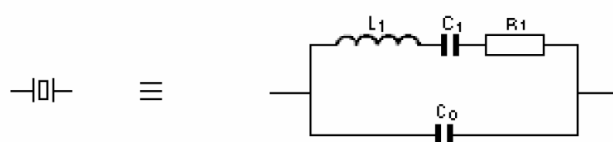
## 6.2 Sensores autoresonantes

Algunos fenómenos físicos se pueden convertir en vibraciones cuya amplitud o frecuencia son funciones de la magnitud que deseamos medir. Para medir estas señales de manera absoluta, es decir que no solo se pueda medir un cambio sino también una posición, es necesario tener un valor de referencia constante tanto en frecuencia como en amplitud,

para lograr esto se emplean circuitos osciladores de referencia, estos suelen ser por lo general elaborados en base a cristales de cuarzo. Este tipo de circuitos osciladores suelen por lo general tener errores asociados a la temperatura y al desgaste envejecimiento.

### 6.2.1 Sensores basados en resonadores de cuarzo

Anteriormente se vio un modelo para cristales de cuarzo donde al estar expuesto a una vibración mecánica esta producía una diferencia de potencial en las placas (electrodos) situadas en el material, este modelo visto es apto para bajas frecuencias, donde la frecuencia medida es bastante menor que la frecuencia de resonancia del material, para frecuencias altas el modelo del cristal es el mostrado por la Figura 43. En esta figura se ve que se modela el sistema como un circuito RCL, donde  $R_1$  es la fricción interna del material,  $C_1$  es la elasticidad mecánica del material,  $C_0$  es la capacitancia creada entre por el cristal y los electrodos paralelos y  $L_1$  es función de la masa del material.



**Figura 43 Circuito equivalente de un cristal de cuarzo para altas frecuencias [1]**

#### 6.2.1.1 Termómetro digital de cuarzo.

Estos sensores emplean el hecho de que la frecuencia de resonancia del cuarzo es afectada por la temperatura, en este caso se hace vibrar eléctricamente el material a la

frecuencia natural, si el corte del cristal es de calidad, la relación frecuencia temperatura deberá de ser estable y con alta repetitibilidad. Para algunos termómetros de cuarzo la variación de frecuencia suele ser de grande por ejemplo para un corte en específico del cristal la variación es de  $1000 \text{ Hz}^{\circ}\text{C}$ . y su frecuencia natural es cercana a los 28MHz. Para evitar los efectos del calentamiento del cristal, en vez de ser alimentado por una señal de corriente directa, se puede alimentar con corriente alterna y el cristal devolverá un eco de la señal. Para cristales de masa muy pequeña es posible detectar hasta radiaciones electromagnéticas.

#### **6.2.1.2 Micro balanzas pasadas en resonadores de cuarzo**

Estas balanzas solo pueden ser empleadas para medir masas muy pequeñas. Estos sensores aprovechan el hecho de que un oscilador disminuye la frecuencia de vibración cuando se le coloca una masa encima, la cual reduce las vibraciones mecánicas internas. La relación masa frecuencia esta dada por:

$$\Delta f = -f_0^2 \frac{\left(\frac{\Delta m}{A}\right)}{N\rho} \quad (6.2)$$

donde N es una constante, A es el área del cristal,  $\rho$  su densidad y  $\Delta m$  es el cambio en la masa total del cristal, es decir la masa que se le coloca encima.

#### **6.2.1.3 Sensores de fuerza y presión basados en resonadores de cuarzo**

Básicamente son sensores los cuales varían la frecuencia de resonancia del cuarzo al exponer a este a tensiones mecánicas, típicamente se emplea un varilla rectangular de

cuarzo la cual esta sujeta a soportes en los extremos. Por medio de un par de electrodos se hace circular una corriente de forma longitudinal por el cuarzo. Esta corriente es continua pero las propiedades del cuarzo generan una señal oscilatoria. Esta vibración es producto de al fuerza aplicada.

### **6.2.2 Galgas acústicas**

Estos sensores se basan en el cambio de la frecuencia natural de resonancia de un hilo cuando es expuesto a una fuerza mecánica. En este caso la fuerza externa a medir se aplica a uno de los lados de la cuerda para medir desplazamiento, el otro extremo se mantiene fijo, la idea es medir por medios magnéticos la frecuencia de oscilación de la cuerda, ya que esta da una relación de fuerza frecuencia muy constante, además que estos sensores son inmunes a los errores por temperatura pues esta no afecta significativamente la frecuencia, en cambio algunos factores ambientales como el polvo o la humedad si, por lo que se recomienda colocar el hilo en una cámara sellada. Dado que estas cuerdas suelen oscilar a frecuencias audibles, de ahí su nombre de galgas acústicas.

Dado que pueden medir desplazamientos muy finos, se emplean para medir deformaciones, pero también se puede medir fuerzas desplazamientos y presiones al igual que otros sensores sensibles al desplazamiento. También tienen la cualidad de que si se sumerge en un liquido puede llegar a medir la densidad de este.

### 6.2.3 Caudalímetro de vórtices:

Se trata de un dispositivo de presión (en este caso digital) ubicado dentro de un tubo. En este caso para lograr relacionar la velocidad de un fluido con una presión se necesita que dentro del tubo se coloque un conducto acanalado que crea vértices dentro del tubo. La utilidad de los vértices es que estos crean en el conducto acanalado donde la presión en ese punto es función de la velocidad con que el fluido está circulando por el tubo. La Figura 44 ilustra este fenómeno, en este caso se muestra un tubo por el que pasa un fluido, en el punto donde se marca con círculos son los puntos para los cuales se cumple la condición antes mencionada, en ese par de puntos la presión generada es función de la velocidad del fluido.

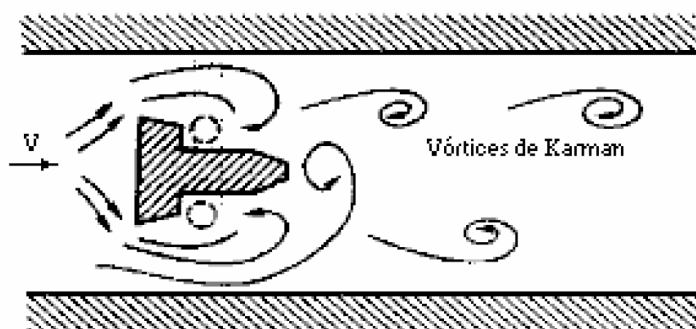


Figura 44 Diagrama del principio del caudalímetro de vórtices [1]

## **CAPÍTULO 7: Conclusiones y recomendaciones**

Al realizar el análisis de los sensores se puede ver que existe prácticamente un sensor para cada magnitud física que resulte de interés para la mayoría de los procesos de automatización empleados en la actualidad. Cabe destacar que gracias a la cantidad de medios para detectar una señal, es posible que exista más de un tipo de sensor para el mismo tipo de variable, por lo que resulta útil analizar las ventajas y desventajas de cada uno de los sensores.

Una de las ventajas que incumbe a todo sensor es el ámbito de temperaturas a las cuales puede operar, para algunos sensores estos rangos son mas amplios que otros, por lo general los sensores electromagnéticos son los que logran medir mayor temperatura. Todo sensor que mida la temperatura por contacto con el cuerpo a medir, deben de medir solo temperaturas por debajo de su punto de fusión. Además para algunos sensores (ferromagnéticos) la temperatura de medición no puede exceder la temperatura de Curie.

Otras desventajas a tomar en cuenta son las frecuencias de las señales de entrada, para el caso de los sensores magnéticos y sobre todo los de principio de Faraday, estos tienen que operar a una frecuencia mínima, para permitir la formación de una corriente inducida. Todos los sensores tienen una frecuencia máxima de detección de la variable de entrada.

Otra limitante que afecta a una gran cantidad de sensores es la influencia del ambiente como el caso de polvo, humedad, temperatura, campos tanto eléctricos como

magnéticos externos y otra infinidad. Lo importante en estos casos es que muchas de estas son fuentes de errores, los cuales pueden llegar a ser ignorados si se cuenta con una carcasa protectora que por lo general son de algún plástico o aleación metálica, las últimas tienen la ventaja de funcionar como escudo para campos tanto eléctricos como magnéticos. Para este tipo de protectores existe la norma de protección de equipos llamada IP (ver Apéndice). Esta norma establece los grados de protección para equipos electrónicos e indica el tipo de protección presente según la numeración, por ejemplo IP 65 quiere decir que están protegidos contra agua y polvo en toda dirección.

Otra consideración es el tipo de señal de salida, últimamente por el auge de los dispositivos digitales es necesario emplear sensores cuya salida sea apta para tales fines, es decir que su salida sea fácilmente convertida en una señal digital

En cuanto a precio hay muchas consideraciones, por lo general los sensores resistivos son los más económicos, pero no son los más duraderos, en cambio los sensores magnéticos y los inductivos tienen un diseño simple que los hace económicos, tal vez no tanto como los resistivos, pero ofrecen la ventaja de tener una vida útil bastante alta, además de soportar vibraciones y tener un tiempo entre fallas muy grande. Para el caso de los sensores digitales, sus precios varían según la exactitud y de su difusión en el mercado.

Otro factor a tomar en cuenta es la carga mecánica. Los sensores de tipo capacitivos e inductivos ofrecen la menor carga mecánica y en general suelen ser muy precisos, en cambio los sensores generadores no son favorables pues requieren extraer energía del



sistema. También los sensores resistivos podrían tener problemas, pues debido a la fricción interna suelen tener alta carga mecánica.

También se pudo ver que aunque hay un auge de los circuitos digitales, por ejemplo para el caso de los sensores que miden la posición del material o de elementos móviles (fines de carrera mediante contactos mecánicos), estos están siendo últimamente reemplazados por sensores de proximidad inductivos, capacitivos y ópticos, esto porque no tienen contacto, lo que disminuye la carga física y la influencia del sensor en el proceso físico.

Otro factor a comparar es la resolución y repetibilidad, la segunda es muy buena en circuitos capacitivos, inductivos, electromagnéticos y en los digitales, el problema de este último tipo de sensores es que su resolución esta limitada por las capacidades de procesamiento. En el caso de los circuitos inductivos y capacitivos, estos tienen una gran resolución, de hecho para medir cambios de posición son de los mejores, además de que poseen poca carga mecánica.

Por último, un factor a considerar es la tolerancia a condiciones industriales donde hay muchas vibraciones, polvo, humedad y temperaturas extremas, en este caso los sensores de reactancia variable funcionan mejor, los magnéticos también funcionan bien pero presentan algunos problemas con temperaturas altas. Este es un factor a considerar pues según la aplicación, la constante fricción afectaría los sensores resistivos o digitales.

Durante la elaboración del trabajo se pudo notar que, los sensores más difundidos son los de pueden medir desplazamiento y longitudes, ya que para la mayoría de las

variables se puede convertir su magnitud en un desplazamiento, cuyo procesamiento es entonces más sencillo.

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros:

1. Pallas Areni, R. **“Sensores y acondicionadores de señal”**, 3 edición, Editorial, España, 1998.
2. Keating, M. J.. **“Sensors and transducers”**, 3 edición, Macmillan, Inglaterra, 2002.
3. Guru, T. **“Maquinas electricas y transformadores”**, 3 edición, Alfaomega, España, 2001.
4. Ogata, K. **“Ingeniería de control moderna”**, 4 edición, Prentice Hall, U.S.A, 1999.

### Páginas web:

5. Modesti, M. **“Sensores industriales”**,  
<http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/>.
6. Carlettu, E. J.. **“Sensores – Conceptos Generales”**, dirección electrónica.  
[http://robots-argentina.com.ar/Sensores\\_general.htm](http://robots-argentina.com.ar/Sensores_general.htm).

## APÉNDICES

### Apendice 1

#### Características de la luz:

La luz es una radiación electromagnética, siendo la luz solo una pequeña parte del espectro electromagnético. La luz también puede ser considerada como paquetes de energía llamados fotones, la energía de los mismos se calcula como  $h\nu$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia. Para radiación visible (luz), la energía por fotón es muy pequeña y la mayoría de sensores solo responden a grandes números de fotones.

La radiación proveniente de un cuerpo caliente, como los filamentos de un bombillo incandescente, se dice que son incoherentes. Esto se dice porque cada átomo emite pulsaciones de radiación en distintas frecuencias, y el total de poder radiante emitido es simplemente la suma de la aportada por cada átomo. Algún efecto de interferencia solo puede ser observado a cortas distancias, un milímetro aproximadamente. Lo anterior también aplica para la luz de dispositivos fluorescentes y para LEDs. En contraste la radiación de un láser es coherente, esto porque gracias a la forma en que la luz se refleja internamente dentro del emisor del láser, los átomos son obligados a trabajar simultáneamente, produciendo una luz en una sola frecuencia y con una longitud de onda resultante muy uniforme, ocasionando que la interferencia se de hasta varios metros de la fuente.

La luz puede ser medida y llamada según la característica que se está midiendo de esta misma. Si se mide por su brillantez es medida en lumen y se le llama flujo lumínico. También se puede clasificar como flujo radiante y se mide en watts. También se puede medir su intensidad lumínica y la unidad es la candela, que es el flujo lumínico por estereorradián. Existen varios tipos de fotodetectores que permiten medir las distintas características antes citadas.

## **Apendice 2**

### **Efecto Peltier y el efecto Thompson**

Fue Thomas J. Seebeck quien en 1822 descubrió que en dos metales distintos con dos uniones a diferente temperatura aparece una corriente eléctrica, es decir se convierte la energía térmica en energía eléctrica, en este fenómeno se da que si bien la corriente es dependiente de la resistencia del cable, la fuerza transversal Electromagnética es constante, esto se pudo explicar luego con el efecto Peltier y el efecto Thompson, pues el efecto Seebeck es una combinación de los dos efectos anteriores.

En 1834 Jean C. A. Peltier descubrió el efecto Peltier, que consiste en el calentamiento o enfriamiento de la unión de dos metales distintos por la que se hace circular corriente. Al invertir el sentido de la corriente se invierte el sentido de flujo del calor. Este efecto es reversible e independiente de la forma y dimensiones de los conductores, pues depende solamente de la composición de los materiales y de la

temperatura de la unión. Curiosamente esta dependencia resulta ser lineal, lo que simplifica aun mas la implementación de estos dispositivos, pues el calor intercambiado por unidad de superficie de la unión es proporcional a la corriente y no al cuadrado de esta como en los dispositivos con unión con efecto Joule.

El efecto Thompson, descubierto por William Thompson (Lord Kelvin) describe la absorción o liberación de calor por parte de un conductor homogéneo con temperatura no homogénea por que el que circula una corriente, en este conductor el calor liberado es proporcional a la corriente y por ello cambia de signo al hacerlo el sentido de la corriente. Se absorbe calor al fluir corriente del punto más frío al mas caliente y se libera calor del mas caliente al mas frío. En otras palabras se absorbe calor cuando el calor y la corriente fluyen en direcciones opuestas.

En el caso de que la corriente empleada sea muy pequeña se pueden despreciar los efectos de calentamiento por efecto Joule, esto permite considerar exclusivamente los efectos termoeléctricos reversibles, para este caso la energía termoelectromotriz producida debe coincidir con la energía térmica neta transformada.

## **Apendice 3**

### **Norma IP (Índice de Protección)**

El índice de protección es un estándar internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional 60529 que clasifica el nivel de protección que provee una aplicación eléctrica contra la intrusión de objetos sólidos o polvo, contactos accidentales o agua. El resultado es el Índice de protección (IP) la explicación a las letras IP es dada la norma CEI 60529, donde se identifica por un código que consiste en las letras IP seguidas por dos dígitos y/o una letra. Los dígitos ("números característicos") indican la conformidad con las condiciones resumidas en las tablas. Cuando no hay índice de protección descrito con arreglo a este criterio, el dígito puede ser reemplazado por una letra X.

### **Primer dígito**

Indica el nivel de protección que provee contra el acceso de elementos peligrosos

**Tabla 2 Nomenclatura primer dígito Norma IP**

Nivel	Protección contra objetos	Efectividad
0	—	ninguna protección contra la intromisión de objetos
1	>50 mm	alguna superficie grande del cuerpo, como espalda o mano, pero no protegido contra la conexión deliberada de alguna parte del cuerpo
2	>12,5 mm	dedos u objetos similares
3	>2,5 mm	herramientas, cables gruesos, etc.
4	>1 mm	mayoría de los cables, tornillería, etc.
5(K)	polvo	la intrusión de polvo no esta completamente garantizada, pero es bastante satisfactoria; protección completa de los contactos
6(K)	polvo fino	ninguna penetración de polvo; protección completa de los contactos

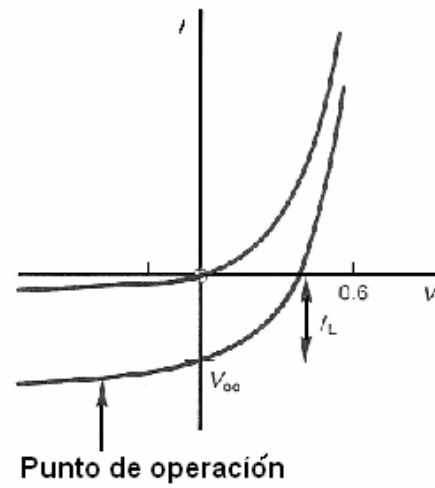


## Segundo dígito

Protección del equipo contra la intrusión perjudicial de agua.

**Tabla 3 Nomenclatura segundo dígito norma IP**

Nivel	Protección contra	Detalles
0	Sin protección	—
1	goteo de agua	El goteo del agua (en gotas verticales que caen) no causará daños en el equipo.
2	agua goteando inclinado 15°	El goteo vertical del agua no causará daños en el equipo cuando el ángulo que forman es menor de 15° desde su posición normal.
3	Agua rociada	Agua que cae en cualquier ángulo superior a 60° desde la vertical no causará daños.
4	Chorro de agua	El agua chorreada hacia la protección del equipo desde cualquier dirección no tendrá efectos dañinos.
5	potente chorro de agua	El agua disparada por una boquilla hacia la protección del equipo desde cualquier dirección no tendrá efectos dañinos.
6	fuerzas de agua	El agua de mar/oleaje o disparada potentemente hacia la protección del equipo desde cualquier dirección no tendrá grandes efectos de daño cuantitativo.
7	Inmersión a 1 m	No tendrá grandes efectos de daño cuantitativo para el equipo su inmersión en agua en condiciones definidas de presión y tiempo (a 1 m de submersión).
8	Inmersión a más 1 m	No habrá daños para el equipo derivados de su inmersión en agua en condiciones definidas por las especificaciones o el fabricante (a más de 1 m de submersión). NOTA: normalmente, esto significará que el equipo está asilado herméticamente. Sin embargo, en ciertos tipos de equipos, esto puede significar que el agua puede penetrar pero solo en una manera que no produce efectos perjudiciales.

**ANEXOS****ANEXO 1**

**Figura 45 Curva corriente/voltaje detector fotovoltaico [1]**

## ANEXO 2

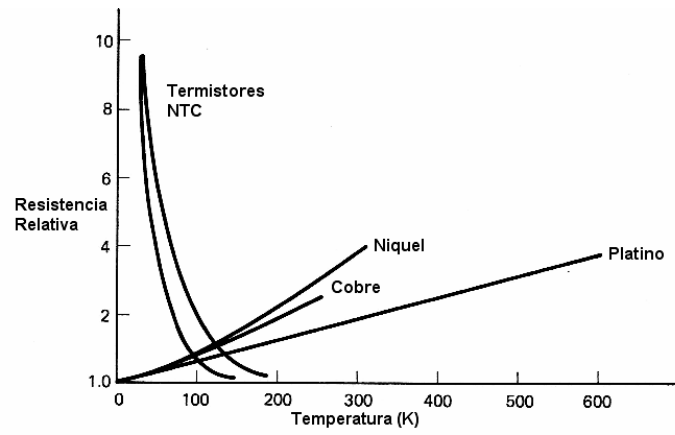


Figura 46 Resistencia relativa de termistores y resistencias térmicas [1]

## ANEXO 3

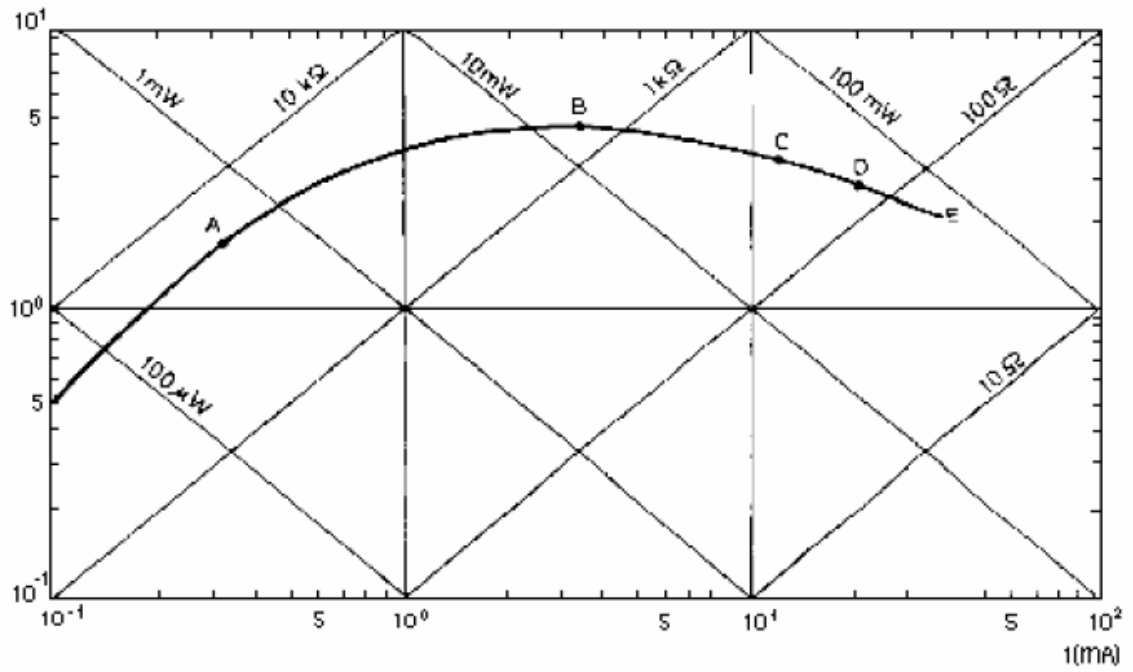


Figura 47 Curva característica de voltaje en función de la corriente [1]

## ANEXO 4

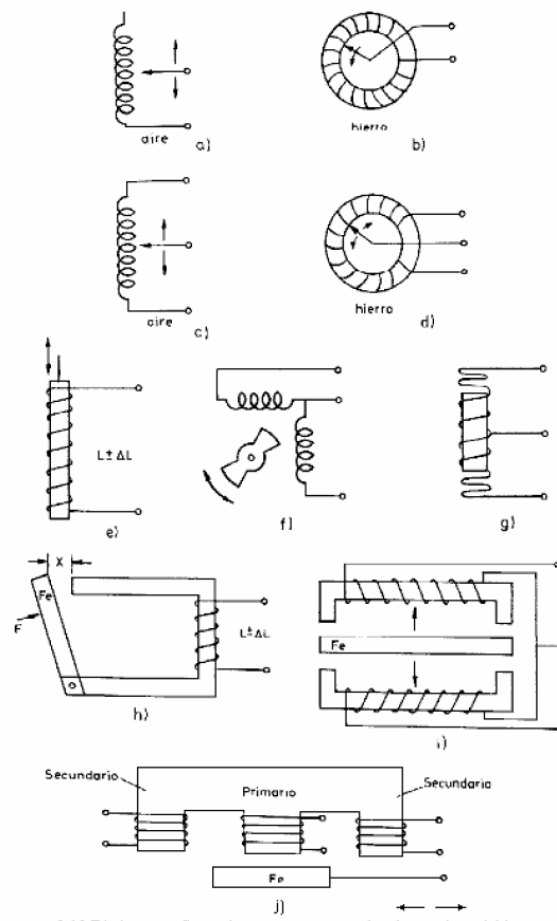


Figura 48 Distintos sensores de reluctancia variable [1]