

## Diapositiva 1

### **Sensores electrónicos**

Los sensores electrónicos se pueden diseñar para que detecten distintos aspectos cuantitativos de un determinado sistema físico. Entre estos aspectos se encuentran los siguientes:

- Temperaturas
- Luz (optoelectrónica)
- Campos magnéticos
- Tensión
- Presión
- Desplazamiento y rotación
- Aceleración

### Termistores

Símbolo:



• Consiste en un semiconductor con separación energética  $E_g$  ( $\sim 1\text{eV}$ ) fijado entre dos conductores

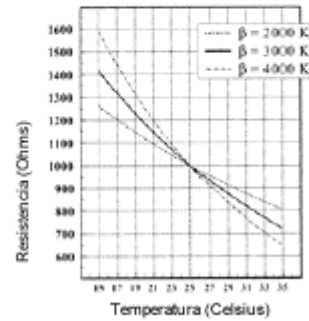
• La dependencia de la temperatura viene dada por:

$$R = R_0 \cdot \exp\left[\frac{\beta}{T} - \frac{\beta}{T_0}\right]$$

donde,

$$\beta = \frac{E_g}{2k}$$

$\beta$  está típicamente entre 3000 y 4000K.

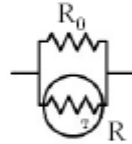


### Termistores 2

- Un problema: Los termistores tienen respuesta térmica a lineal. Para solucionarlo se usan la interpolación por microcomputadora o la linealización en paralelo.

$$R_{Total} = \frac{R_0 R}{R_0 + R} = \frac{R_0}{1 + \exp\left[-\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]}$$

$$= \frac{R_0}{2 - \beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} = R_0 \left[ \frac{1}{2} - \frac{\beta\Delta T}{4T_0^2} \right]$$



donde se considera que  $\Delta T = T - T_0$  es pequeño.

- El contrapunto: la linealización divide por 4 la sensibilidad de  $\beta$ .

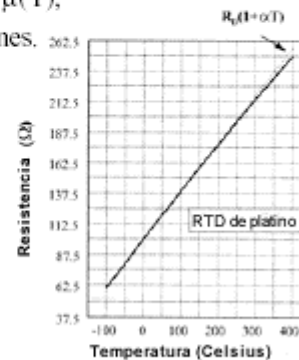
### Detectores de la temperatura de la resistencia

- Los RTD son resistores fabricados con metal casi puro.
- Dado que los electrones se diseminan por el metal, su movilidad  $\mu$ , decrece al aumentar la Temperatura. La conductividad del dispositivo es:

$$\sigma(T) = n \cdot q \cdot \mu(T),$$

donde  $n$  es concentración de electrones.

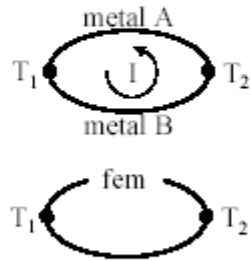
- Lineal en un gran rango de temperatura, pero 10 veces menos sensible que los termistores.



## Diapositiva 5

### Termopares

- Funcionan mediante el efecto Seebeck, que dice que la corriente circulará en un bucle al unir dos segmentos de distintos cables si los dos puntos de unión están a diferentes temperaturas. Estas figuras son una representación de ello.

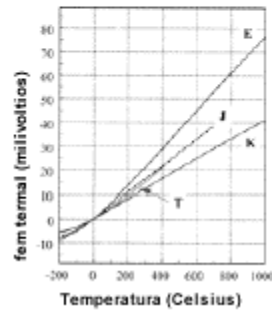


Diapositiva 6

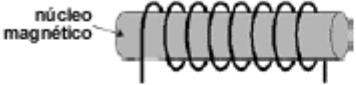
### Clasificaciones de termopares

Los termopares se clasifican mediante la siguiente tabla:

Tipo	Metal A - Metal B	Rango temperaturas (°C)
Tipo E	Cromel - Constantan	-200 to +900
Tipo J	Hierro - Constantan	0 to +750
Tipo K	Cromel - Alumel	-200 to +1250
Tipo T	Cobrer - Constantan	-200 to +350



**Sensores de campo magnético: introducción**



$\therefore B = B_0 + \mu_0 \cdot M$

Magnetización (los dipolos se alinean a lo largo de  $B_0$ )

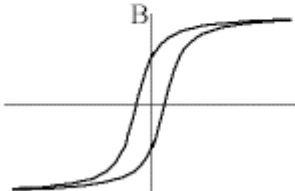
Cable sencillo:

$B_0 = \mu_0 \cdot n \cdot I$

permeabilidad del espacio libre

corriente

n.º de vueltas



$\frac{B_0}{\mu_0} \equiv H$  intensidad magnética

6.071 Sensores electrónicos

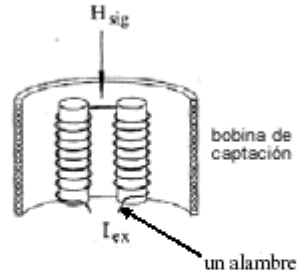
### Sensores de campo magnético: magnetómetros de saturación

- La figura muestra una configuración de válvula de flujo tipo Vacquier.
- Las bobinas centrales son conducidas por una corriente variable con el tiempo  $I_E$ .
- El voltaje que atraviesa la bobina de captación es

$$V_{\text{captación}} = n \frac{d\Phi}{dt}$$

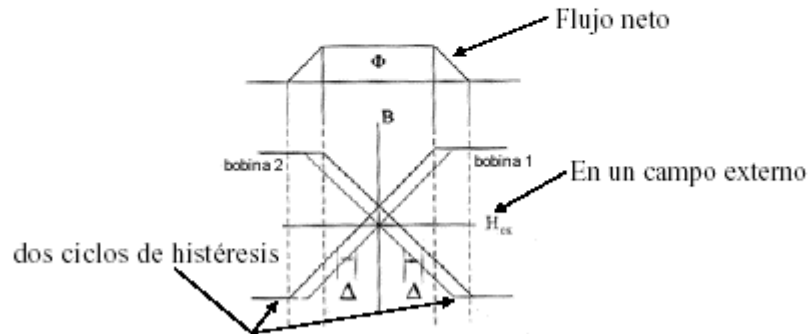
donde  $n$  es el número de vueltas y  $\Phi$  es el flujo magnético.

- Al no haber campo externo ( $H_{\text{sig}} = 0$ ), no habrá flujo a través de la bobina de captación, pues las vueltas van en direcciones opuestas.

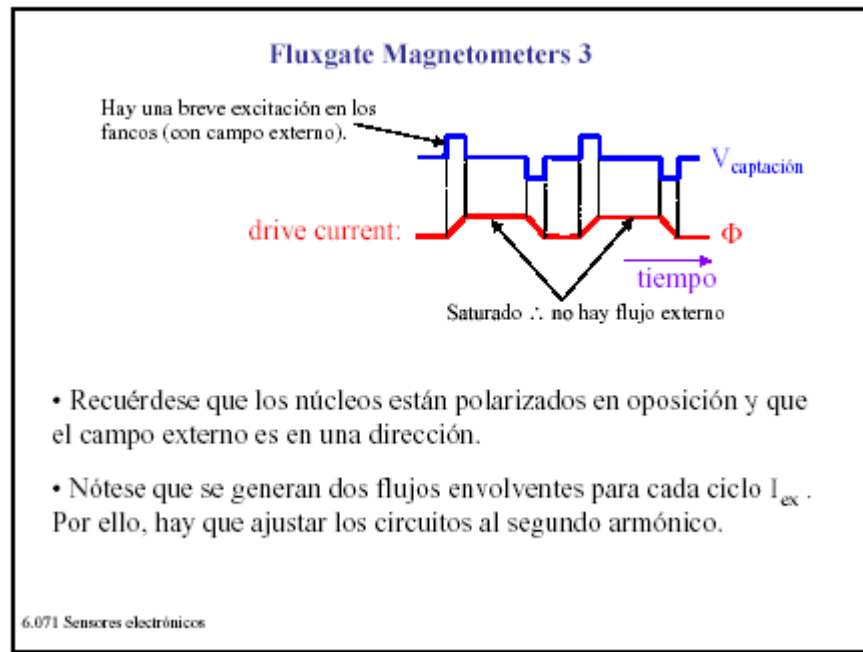


### Magnetómetros de saturación 2

- Cuando hay un campo externo, los ciclos de histéresis (cerrados en la figura para simplificar) se trasladan, alejándose del origen, lo que origina un flujo no nulo para  $H_{ex}$  que no satura ambas bobinas.
- Al oscilar  $I_E$ ,  $V_{captación}$  oscilará en presencia de un campo magnético externo.

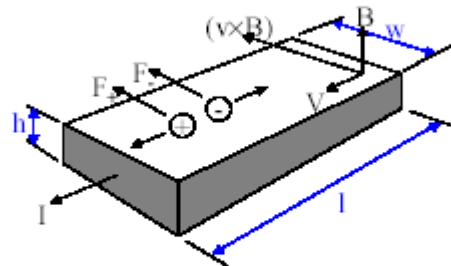


## Diapositiva 10



### Sensores de campo magnético: sondas de efecto Hall

- Es el sensor más utilizado para campos magnéticos.



- En presencia de un campo magnético, las fuerzas de Lorentz empujan a los transportadores hacia arriba, a través de la muestra siguiendo

$$F_L = q(v \times B)$$

Diagrama de la ecuación  $F_L = q(v \times B)$  con flechas que apuntan a los términos: 'carga' apunta a  $q$ , 'campo' apunta a  $B$ , y 'velocidad' apunta a  $v$ .

Así se produce un campo eléctrico transversal  $E_H$ .

### Sondas de efecto Hall 2

- En equilibrio,

$$q|v| \cdot |B| = q|E_H| \Rightarrow |E_H| = |v| \cdot |B|.$$

- Definiendo  $v$  como velocidad de deriva. La corriente de polarización se puede escribir como

$$I = q \cdot (w \cdot l) \cdot v \cdot n \text{ : transportadores de carga negativa}$$

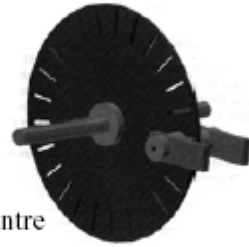
$$I = q \cdot (w \cdot l) \cdot v \cdot p \text{ : transportadores de carga positiva}$$

Así, el voltaje Hall  $V_H (= w \cdot E_H)$  se puede escribir como

The diagram shows two equations for Hall voltage  $V_H$  enclosed in a blue box. The top equation is  $V_H = \frac{B}{q \cdot l \cdot n}$  and is labeled "transportadores de carga negativa". The bottom equation is  $V_H = \frac{B}{q \cdot l \cdot p}$  and is labeled "transportadores de carga positiva". To the left of the box, the text "l = densidad" has arrows pointing to the 'l' in both equations. To the right, the text "n.º de transportadores" has an arrow pointing to the 'n' in the top equation, and "n.º de transportadores" has an arrow pointing to the 'p' in the bottom equation.

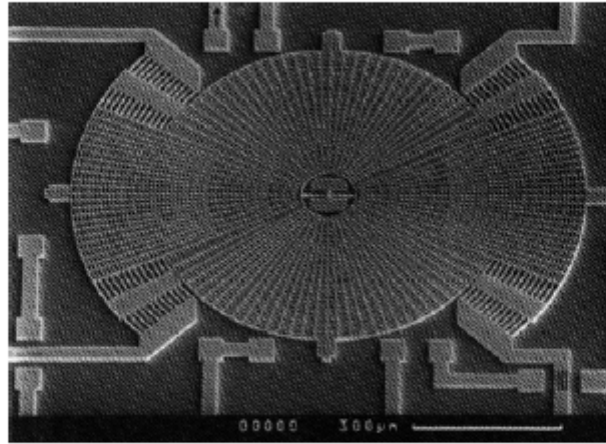
### Codificaciones secuenciales de eje óptico

- Funcionan dividiendo un haz de luz mediante ranuras espaciadas uniformemente en un disco de metal. Un fotodetector detecta el paso de la luz y esa señal se cuenta para determinar la posición angular.
- La configuración de las filas de fotodetectores es tal que cuando un grupo "ve" luz, el otro no la ve. Así, se producen dos señales digitales en cuadratura, lo que permite determinar la dirección de la rotación.
- El diámetro de las ruedas codificadoras es de entre 1 y 2 pulgadas, y poseen entre 500 y 2048 ranuras.
- Una unidad comercial puede medir rotaciones superiores a 10.000 rpms.



Diapositiva 14

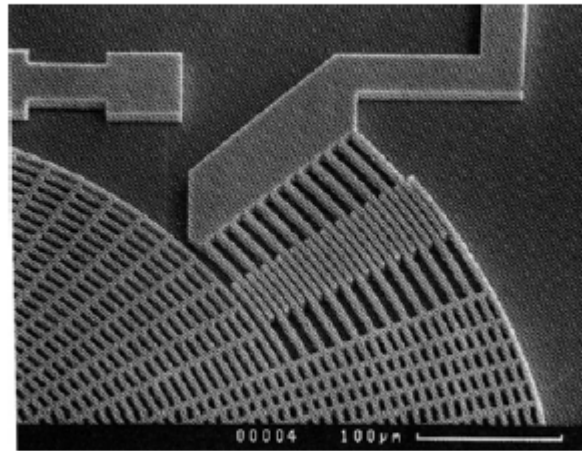
**Sensor micromaquinado de velocidad angular**



6.071 Sensores electrónicos

Diapositiva 15

**Sensor micromaquinado de velocidad angular 2**

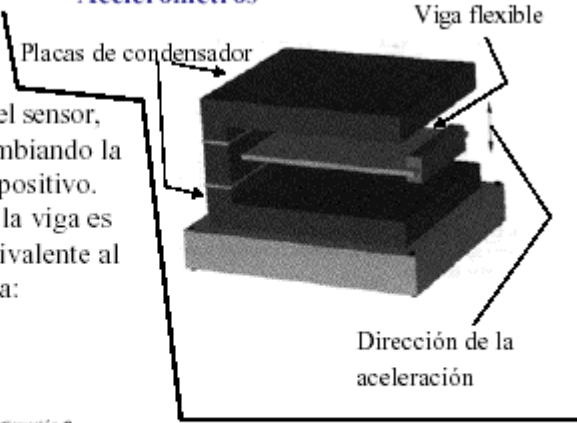



6.071 Sensores electrónicos

Diapositiva 16

**Acelerómetros**

- Cuando se acelera el sensor, la viga se curva, cambiando la capacitancia del dispositivo.
- El movimiento de la viga es mecánicamente equivalente al del siguiente sistema:



6.071 Sensores electrónicos

### Acelerómetros 2

- La ecuación general del movimiento en este sistema es:

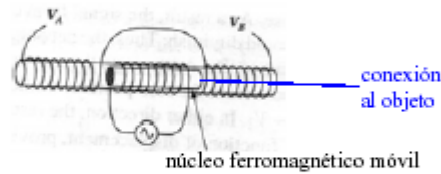
$$M \frac{d^2 y_m}{dt^2} + G \frac{d}{dt} (y_m - y_b) + k(y_m - y_b - L) = -a_b(t)$$

Donde  $y_m$ ,  $y_b$ , y  $L$  son valores de desplazamiento de masa, desplazamiento de base y relajación del muelle, respectivamente  $a_b(t)$  es la aceleración de la base (que es lo que se quiere determinar).

- El sensor leerá la solución a esta ecuación diferencial a partir de la que se tendrá que determinar  $a_b(t)$ . En la práctica se puede hacer mucho más fácil si se conoce algún dato sobre  $a_b(t)$  de antemano. ej:  $a_b(t)$  es constante u oscilante.

### Detectores de desplazamiento: los LVDT

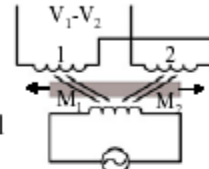
- LVDT son las siglas inglesas de Transformador Diferencial Lineal Variable
- Consta de dos bobinas de captación en cada lado de una bobina de excitación, como se muestra en el siguiente diagrama:

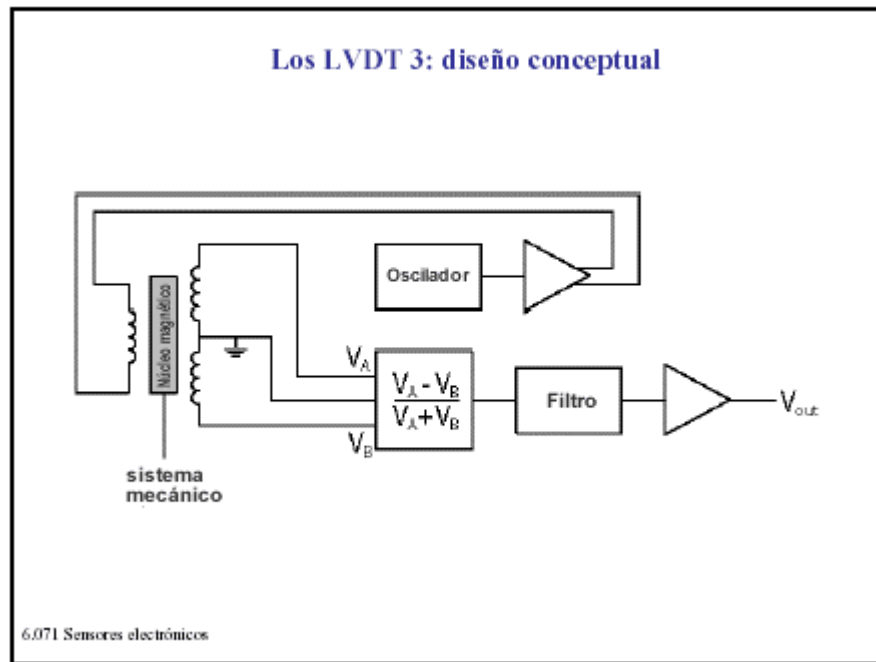


- Las bobinas de captación están enrolladas una opuesta a la otra, por lo que sus FEM se restan.
- El núcleo está acoplado al sistema mecánicamente por una varilla impulsora que extiende uno de los extremos del sensor (no se muestra).

### Los LVDT 2

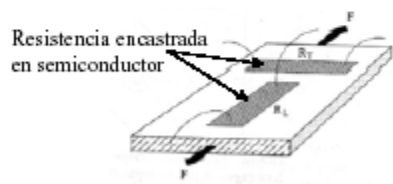
- $V_1 - V_2 = 0$  cuando el núcleo está en la posición central (por diseño).
- $V_1 - V_2$  variará en función de la posición del núcleo magnético debido a los cambios de las inductancias mutuas entre las bobinas de captación y de excitación (ej.: si el núcleo se mueve a la izquierda,  $V_1 - V_2$  aumenta y se hace positivo y viceversa).
- La salida se modulará sobre la corriente oscilante que conduce la bobina de excitación.
- Típicamente, la corriente de conducción oscila a un índice 10 veces superior al del sistema mecánico.
- Estos sensores son instrumentos de precisión, aunque muy reforzados.





### Dispositivos piezoresistentes

- Se fabrican en material semiconductor, como el silicio.
- Las fuerzas aplicadas deforman la red atómica de modo que la corriente puede fluir más fácilmente a lo largo de ciertas direcciones internas.
- La resistividad tendrá una dependencia de tensor del tensor de esfuerzos aplicado. Con una alineación adecuada, el esfuerzo en una dirección de la resistencia causará un cambio en la resistencia en el material en esa misma dirección. La resistencia se puede medir utilizando la siguiente configuración.



$$\frac{\delta R}{R} = \epsilon_l(1 + 2\nu) + \frac{\delta \rho}{\rho}$$

para el silicio,  
dependiente del esfuerzo

### Dispositivos piezoresistentes 2

- Tiene presiones relativas muy grandes, por lo que son muy sensibles
- El esfuerzo real es alineal y, para el silicio, se puede aproximar como

$$\frac{\delta R}{R} = 120\varepsilon + 4\varepsilon^2 : \text{tipo p,}$$

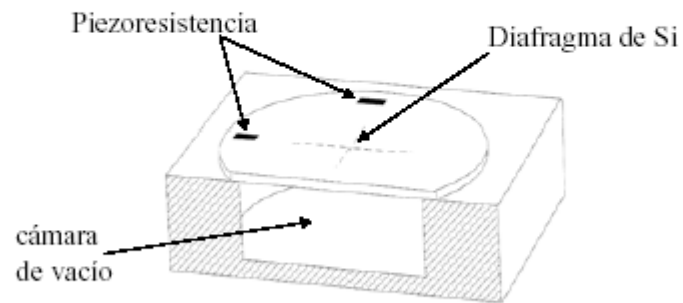
$$\frac{\delta R}{R} = -110\varepsilon + 10\varepsilon^2 : \text{tipo n.}$$

- El esfuerzo máximo permitido para ellos es 10 veces menor que para dispositivos de hoja de metal.
- También muestran fuertes dependencias de la temperatura.

## Diapositiva 23

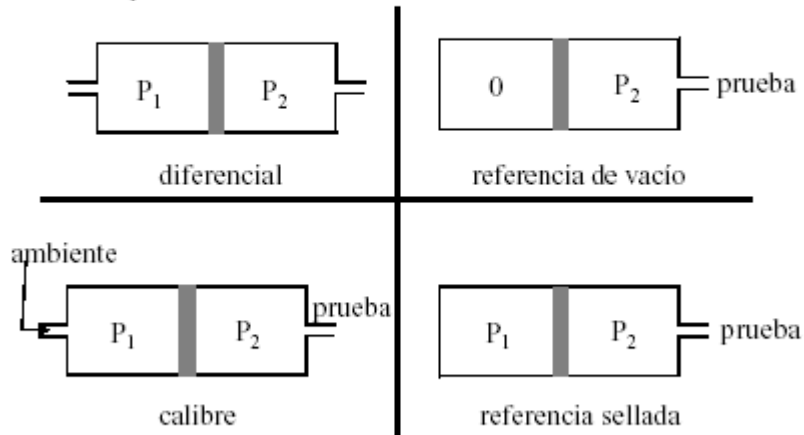
### Sensores de presión

- Los sensores de estado sólido modernos constan de una membrana que se deforma en presencia del gradiente de presión. Esta deformación se mide mediante sensores de esfuerzo de la membrana.



### Clasificaciones de sensores de presión

- Para medir la presión se usan cuatro configuraciones principales de cámara de presión/membrana.



### Película metálica ligada

- En estos sensores, la resistividad no cambia con el esfuerzo aplicado  
ej.:

$$\frac{\delta R}{R} = \varepsilon_l(1 + 2\nu)$$

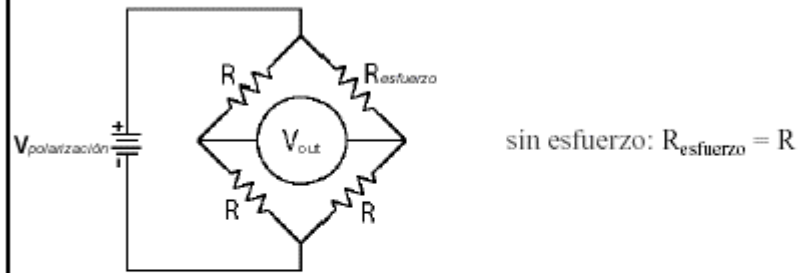
- Se fabrican aplicando el fotograbado a una fina película de aleación metálica para obtener la forma deseada y respaldándola a continuación con una capa aislante de plástico.
- Típicamente, se aplica un ataque químico al metal, dándole un diseño de pliegues para que haya una gran longitud equivalente en una dirección, para aumentar así la sensibilidad.



longitud equivalente = 8L

Diapositiva 26

**Película metálica ligada 2**



$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{polarización}}} = \frac{-\frac{\Delta R_{\text{esfuerzo}}}{R}}{4 + 2 \frac{\Delta R_{\text{esfuerzo}}}{R}}$$

### Película metálica ligada 3

Sensor ligado típico:

sensor de 10mm (tamaño real: 0,5mm)

1-2% esfuerzo

$$\nu = 0.3$$

$$R = 120\Omega$$

Presión relativa = 2

$$\varepsilon_1 = 10^{-5}$$

$$\therefore \Delta R = 2.4 \times 10^{-3} \Omega$$

o a un voltaje de 10V,  $V_{out} = -50\mu V$

### Sensores de esfuerzo

- Define el esfuerzo longitudinal como

$$\varepsilon_L \equiv \frac{\Delta L}{L},$$

- y esfuerzo transversal como

$$\varepsilon_t = -\frac{\Delta W}{W}.$$



El coeficiente de Poisson es el coeficiente negativo de estas dos cantidades

$$\nu = \frac{-\varepsilon_t}{\varepsilon_L}$$

- $\nu = .5 \equiv$  el volumen es constante bajo esfuerzo.
- Típicamente, los metales tienen un coeficiente de  $\nu$  entre  $0.3 \rightarrow 0.4$
- $\nu < .5 \equiv$  el volumen aumenta al estirarlo y disminuye al comprimirlo.

### Sensores de esfuerzo 2

Con resistencia neta

$$R = \rho \frac{L}{A},$$

resistividad

Así, la resistencia cambia con el esfuerzo. Si  $\rho$  no varía, entonces la relación es sencilla

$$\frac{\delta R}{R} = \varepsilon_l(1 + 2\nu) + \frac{\delta \rho}{\rho}.$$

### Extensímetro de resistencia eléctrica

Un importante parámetro de para los sensores es la famosa *Tensión relativa* (G), que se define como

$$G = \frac{\delta R / R}{\delta L / L} = (1 + 2\nu) + \frac{1}{\epsilon_1} \frac{\delta \rho}{\rho}$$