

Instrumentación I: *Sensores mecánicos*

Juan J. Rojas

Instituto Tecnológico de Costa Rica
30 de septiembre de 2025



Deformación unitaria (strain)

Cambio en longitud respecto a la longitud original al aplicar una fuerza

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

donde:

ε es la deformación unitaria, adimensional,

ΔL es el cambio en la longitud después de aplicar la fuerza, y

L_0 es la longitud original antes de aplicar la fuerza

Esfuerzo (stress)

Presión interna en un material

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde:

σ es el esfuerzo en Nm^{-2}

F es la fuerza en N, y

A es el área transversal en m^2

Módulo de elasticidad (Young module)

Relación entre esfuerzo y deformación en una dirección. Usando esto podemos escribir la Ley de Hooke

$$\sigma = E \varepsilon$$

donde:

σ es el esfuerzo en Nm^{-2}

E es el módulo de elasticidad en Nm^{-2} , y

ε es la deformación unitaria, adimensional,

Sensibilidad a la deformación en un resistor

En algunos metales y semiconductores la resistencia cambia al ser deformados. Tomando en cuenta que:

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

donde: ρ es la resistividad del material en $\Omega \text{ m}$, L es la longitud en m y, A es el área transversal m^2

Si aplicamos el logaritmo y derivamos, obtenemos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL/A}{L/A}$$

con esto podemos ver que el cambio total tiene una contribucion debido al cambio en la resistividad (efecto piezorresitivo) y otra debido a cambios en la geometría del resistor

Efecto dominante según el material

Respecto a la ecuación:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL/A}{L/A}$$

- En los metales el efecto dominante es el cambio en la geometría del resistor
- En los semiconductores el efecto dominante es el cambio en la resistividad del material

Galgas extensométricas

Si integramos los efectos piezorresistivo y geométrico, obtenemos la relación entre la resistencia y la deformación aplicada:

$$\frac{dR}{R} = S_s \varepsilon$$

donde:

S_s es la sensibilidad o factor de galga, adimensional

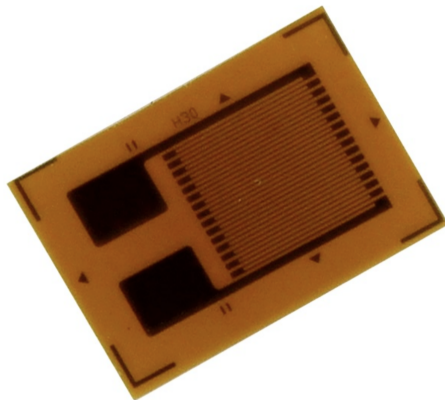
ε es la deformación unitaria, adimensional, y

R es la resistencia en Ω

Galgas extensométricas: metálica, tipo lámina

Parámetro	Valor
Modelo	BF350-3 AA
Resistencia	350 Ω
Material base	Fenólico
Espesor	32 μm
Material res.	constantán
Resistencia aisl.	10 k Ω
Sensibilidad (g)	2,1 \pm 1 %
Coefficiente transv	0,4 %
Deformación max	2,0 %
Tamaño (mm)	7,1 \times 4,5
Temp. oper.	-30°C ~ +80°C

[Hoja de datos](#)

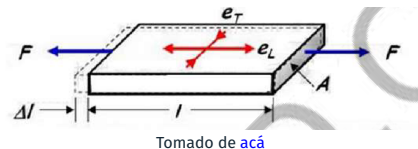


Galgas extensométricas: metálica, tipo lámina

La galga BF350-3 AA tiene una sensibilidad S_s de 2,1 y un coeficiente transversal k_t de 0,4 %, esto significa que la deformación trasversal ε_t también afecta la resistencia medida.

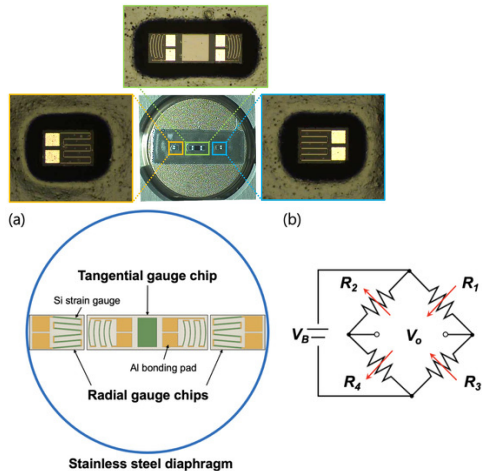
$$\frac{dR}{R} = S_s(\varepsilon_l + k_t \varepsilon_t)$$

idealmente el coeficiente transversal debe ser lo menor posible, en su defecto, se debe corregir la medición.



Galgas extensométricas: semiconductor

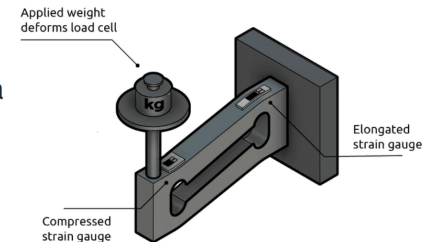
Parámetro	Valor
Resistencia	$\sim 10 \text{ k}\Omega$
Material base	SiO
Espesor	$10 \mu\text{m}$
Material res.	Si
Sensibilidad (g)	103 c/u
Tamaño (μm)	15×300



Han, Ji-Hoon, Sung Joon Min, Joon Hyub Kim, and Nam Ki Min.
2023. "Reciprocating Arc Silicon Strain Gauges" *Sensors* 23, no. 3:
1381. <https://doi.org/10.3390/s23031381>

Celdas de carga

- Convierte la deformación mecánica aplicada sobre un elemento elástico en una señal eléctrica proporcional.
- Las más comunes utilizan galgas extensiométricas adheridas al elemento elástico.

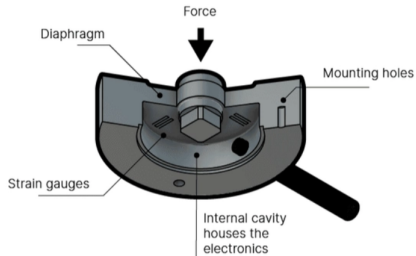


Tomado de [acá](#)

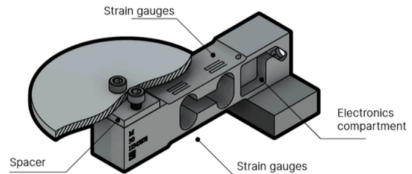
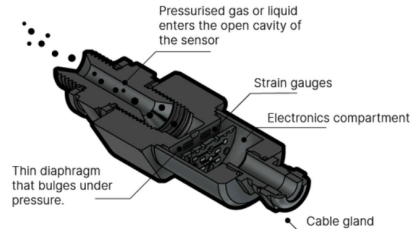
Celdas de carga: aplicaciones

Algunas aplicaciones comunes de las celdas de carga:

- Medición de fuerza y peso
- Medición de presión y nivel



Tomado de [acá](#)



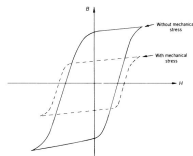
Sensores magnetoelásticos

- La inducción magnética **B** y el campo magnético **H** están relacionados por:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

donde μ es la permeabilidad magnética del material en H/m

- En un sensor magnetoelástico se mide la diferencia en la permeabilidad magnética del material al ser sometido a una fuerza externa



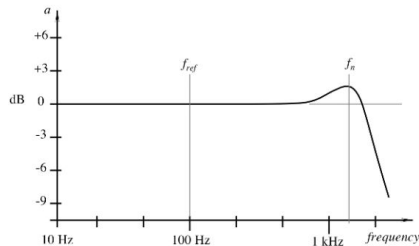
Tomado de [1]



Tomado de [acá](#)

Acelerómetros

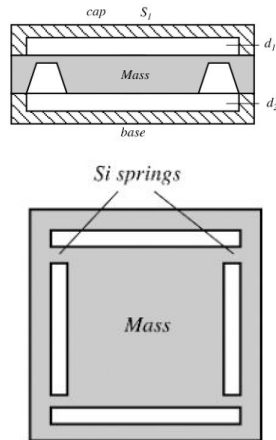
- La vibración es un fenómeno mecánico dinámico en el que existe un movimiento oscilatorio periódico en torno a una posición de referencia
- En algunos casos se puede medir aceleración no vibratoria como la que se obtiene en un impacto o un movimiento lineal
- Los sensores que se utilizan para medir aceleración consisten en un sistema masa resorte amortiguado
- El acelerómetro debe ser usado en la parte plana de su curva de respuesta, lejos de su frecuencia natural



Tomado de [2]

Acelerómetros capacitivos

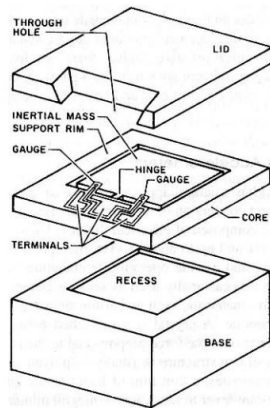
- Estos sensores consisten de una placa estática y otra placa que esta conectada a una masa inercial, estas dos placas forman un capacitor
- La membrana es a su vez la masa inercial, cuando se mueve modifica la capacitancia y esto se relaciona con la aceleración
- Típicamente se integran dos capacitores en un solo sensor para incrementar la precisión
- A la derecha se muestra su fabricación como sensor MEMS en silicio, con dos capacitores, uno entre la masa el *cap* y otro entre la masa y la *base*



Tomado de [2]

Acelerómetros piezoresistivos

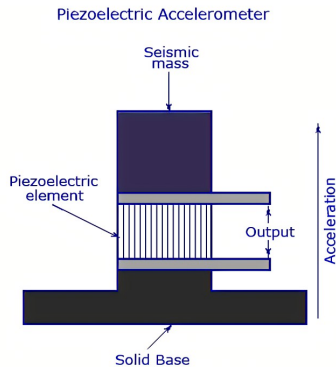
- Estos sensores consisten en galgas extensométricas que miden la deformación en los resortes del sistema masa-resorte
- Su precisión es mucho mayor cuando son microfabricados (MEMS)
- A la derecha se muestra su fabricación como sensor convencional, cuando la aceleración se aplica sobre el eje sensible la masa inercial gira en torno a la bizzagra, al mismo tiempo las galgas experimentan deformación que se relaciona con la aceleración experimentada por la masa inercial



Tomado de [2]

Acelerómetros piezoeléctricos

- Estos sensores consisten de un cristal piezoeléctrico intercalado entre la base y la masa inercial, la fuerza producida por la masa en el piezoeléctrico produce una señal eléctrica entre los electrodos
- Es un sensor directo, la energía mecánica se convierte directamente en energía eléctrica
- Los materiales más comunes son los materiales cerámicos piezoeléctricos como el titanato de bario, el circonato-titanato de plomo (PZT) y la metaniobita de plomo

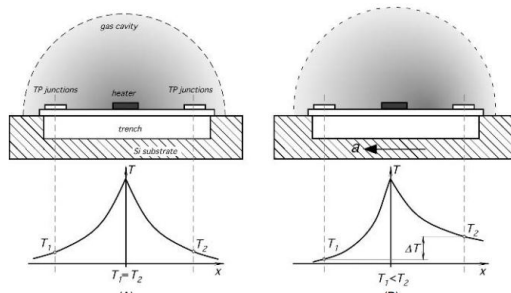


www.InstrumentationToday.com

Tomado de [aquí](#)

Acelerómetros de gas caliente

- Estos sensores usan un gas caliente como masa inercial
- El gas se calienta en el centro del sensor y se mide la temperatura en dos extremos equidistantes, los cambios de temperatura entre los extremos representan aceleración de la masa de gas, pues sin aceleración la distribución de la temperatura debe ser uniforme
- Estos sensores son microfabricados (MEMS)



Tomado de [2]

Sensores de presión

- Utilizan un diafragma que se deforma ante de la presión aplicada
- La deformación del diafragma se puede medir con galgas extensiométricas, sensores capacitivos, sensores piezoeléctricos o sensores piezorresistivos



Tomado de [acá](#)

Referencias

- [1] R. Pallas-Areny y J. G. Webster, *Sensors and signal conditioning*. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors*. Springer International Publishing, 2016.