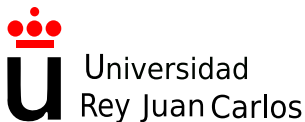


## 7. Sensores de fuerza, torque y deformación

Julio Vega

[julio.vega@urjc.es](mailto:julio.vega@urjc.es)



Sensores y actuadores



(CC) Julio Vega

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC BY-NC-SA**.  
Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en  
cualquier medio o formato; y (b) adaptar: remezclar, transformar  
y crear a partir del material. El licenciador no puede revocar estas  
libertades mientras cumpla con los términos de la licencia.*

# Contenidos

- 1 Conceptos: fuerza, torque, deformación
- 2 Sensor piezorresistivo
- 3 Sensor piezoeléctrico

- $\exists$  sensores para medir fuerzas o deformaciones basados en fenómeno:
  - Piroeléctrico, capacitivo, óptico, ultrasónico y magnético.
- Veremos los más empleados: piezorresistivos (a) y piezoeléctricos (b).
  - (a)  $\Delta \text{deformación} \Rightarrow \Delta R$ ; (b)  $\uparrow \text{presión} \Rightarrow \uparrow V$ .
- La unidad de medida de la fuerza en el S.I. es el Newton ( $N$ ).
  - Una fuerza es considerada + si genera una tensión sobre un cuerpo.
    - Por contra, la fuerza es considerada - si comprime un cuerpo.
- La unidad de medida del torque en el S.I. es el Newton-metro ( $Nm$ ).
  - El torque es + si se aplica en *counterclockwise* (- en *clockwise*).
- Las deformaciones son adimensionales;  $\nexists$  ninguna unidad.
  - Deformación normal: cuando la deformación es  $\perp$  a un plano.
  - Deformación cortante: si la deformación es  $\top$  a un plano.

- Ppio.: transductor de fuerza o deformación a señal eléctrica.
- El +usado: galga extensiométrica, basada en ppio. lord Kelvin (1856):
  - La  $R$  de metal o semicond. varía cuando es deformado por una fuerza.
  - 1.<sup>a</sup> vez usado en 1930 para medir deformaciones (Simmons y Ruge).
- Factor de galga (GF): correlación entre deformación y  $\Delta R$ :

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_x} \implies R = R_0 \cdot (1 + GF \cdot \varepsilon_x) \quad (1)$$

donde:

$R_0$  : resistencia inicial de la galga [ $\Omega$ ]

$\Delta R$  : variación de la resistencia debido a deformación [ $\Omega$ ]

$\varepsilon_x$  : deformación longitudinal ( $= \frac{\Delta L_x}{L_x}$ ) [*adimensional*]

$GF$  : suele ser 2 para la mayoría de las galgas [*adimensional*]

- Módulo elastic. o de Young ( $E$ ) refleja rigidez material [ $Pa$ ]:  $E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}$ .
  - Donde  $\sigma_x = \text{esfuerzo}_x = \frac{F_x}{A}$  y  $\varepsilon_x = \text{deformacion}_x = \frac{\Delta L_x}{L_x}$ .

- El comportamiento de galga se ve alterado por factores ambientales.
- El principal factor es la temperatura, que dilata/contrae el material.
  - Para contrarrestar: circuito acondiciona/ o con galga autocompensada.
- Material de fabricación: metal o semiconductor (SC).
  - SC:  $GF > \text{metálicas} \implies \text{sensor } \uparrow\uparrow \text{ sensitivo y pequeño.}$ 
    - Dvtjas.:  $\downarrow$  robustez y  $\uparrow$  sensible a cambios de temperatura.
  - Metal: las + usadas por su robustez (frente a las semiconductoras).
    - Fabricación: sustrato aislante y flexible, con un patrón de alambrado.
    - Diámetro alambre +usado  $\approx 0,025mm$ . Longitud =  $[0,25mm, 15cm]$ .
    - Aleaciones + usadas: constantán (Cu+Ni), karma (Cr+Ni).
    - Constantán tiene sensibilidad lineal en gran rango de deformaciones.

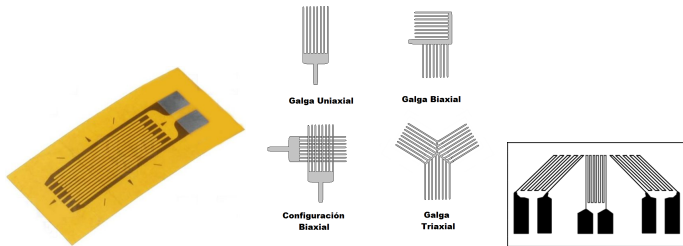
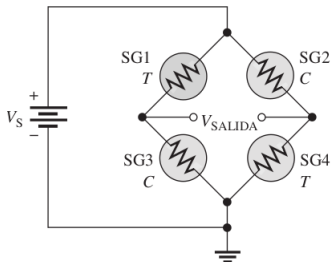
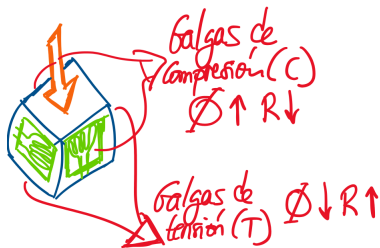


Figura: Imágenes extraídas de (a) sensoricx.com y (b,c) Wikipedia

- Para medir, las galgas se montan sobre el elemento a medir.
  - Las marcas (Fig. izda.) son para alinearla con el elemento.
- La galga es mucho más sensible a deformaciones en dirección vertical.
  - Si se extiende vertical/, los canales se hacen más largos y estrechos.
- Configuración de la/s galga/s depende de direc. deformación a medir.
  - Uniaxial: si es en un solo eje, se usa alambrado largo y angosto.
  - Roseta de deformación (c): +usada, 3 galgas a 45°. Mide todas direc.



- Composición de galgas para conocer fuerza aplicada sobre un cuerpo.
- Es un cubo con cuatro galgas en las paredes  $\perp$  a superficie apoyo.
  - Al aplicar carga sobre cara superior se deforman las cuatro galgas.
- Galgas en caras opuestas, misma orientación; contiguas, rotadas  $90^\circ$ .
  - Dos galgas miden  $\Delta L_{\text{cuerpo}}$  en direcc.  $\perp$  a superf. y, las otras dos,  $\parallel$ .
    - Registran (C) compresión ( $\downarrow R$ ) vs. (T) elongación superficie ( $\uparrow R$ ).
- Cada galga se conecta como brazo resistivo de puente de Wheatstone.

$$V_{\text{SALIDA}} = V_S \frac{SG_3^C}{SG_3^C + SG_1^T} - V_S \frac{SG_4^T}{SG_4^T + SG_2^C} \quad (2)$$

[Ej.: Configuración de celda de carga como circuito puente Wheatstone]





Figura: Imgs. (A) kalascale.com, (B,C,D) disglobal.co y (E,F) directindustry.es

- Celda de columna o celda de lata (Fig. A): 16+ col. con 2 galgas/col.
  - Galga axial (mide  $\Delta L_{columna}$ ) y galga transversal ( $\Delta grosor$ ).
  - Rango medición= 22kg – 200Tm con  $R \approx 350\Omega$  y  $V_{in}^{CC} = [10 - 15]V$ .
- Celda de viga (Fig. B): un extremo fijo a superf. y otro libre (carga).
  - Rango medición= 10kg – 50Tm con  $R \approx 350\Omega$  y  $V_{in}^{CC} = [5 - 20]V$ .
  - Las galgas miden deformación cortante, aunque  $\exists$  otras variantes:
    - Viga doble (C): extremos fijos y carga central (rangos = viga simple).
    - Viga en S (D): trabaja en compresión o tensión. Rango medición:
      - 10kg – 10Tm con  $R \approx 350\Omega$  y  $V_{in}^{CC} = [10 - 15]V$ .
      - En cantiléver(E): galgas en ranura pasante miden deflexión (rangos=S).
- Celda de plataforma (F):  $\approx$  cantiléver con  $\uparrow$  ranura y hecha de Al.
  - $\downarrow$  capacidad: 2,5kg – 2Tm con  $R \approx 350\Omega$  y  $V_{in}^{CC} = [10 - 20]V$ .



Figura: Imágenes extraídas de digikey.es

- Compuestos por polímero flexible + tinta sensible a presión (círculo).
- El área de detección es considerada un único punto (círculo).
  - Para obtener mediciones fiables, aplicar  $F$  uniformemente en círculo.
- FlexiForce:  $t_{\text{respuesta}} < 5\mu s$ . Rango medición =  $[4,4 - 440]N$ .
- FSR:  $t_{\text{respuesta}} \approx \text{Flexiforce}$ . Rango medición =  $[1 - 100]N$ .
- Para acondicionar la salida se suele usar circuito amplif. inversor.
  - Es un sensor resistivo  $\Rightarrow V_{\text{out}}$  cambia  $\propto R_{\text{sensor}}$ .
  - Para medir  $\uparrow$  cargas:  $\uparrow$  área<sub>deteccion</sub> y  $\downarrow V_{\text{in}}$  o  $\downarrow$  ganancia<sub>amplif.</sub>.
  - Medir  $\downarrow$  cargas: necesaria  $\uparrow$  sensibilidad  $\Rightarrow \uparrow V_{\text{in}}$  o  $\uparrow$  ganancia<sub>amplif.</sub>.

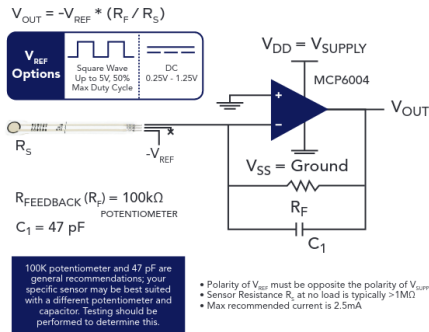


Figura: Imagen extraída de Flexiforce A201 datasheet

- Specs. FlexiForce A201 en circuito con *OpAmp MCP6004*:
  - Resistencia en lazo de realimentación:  $R_F = R_{FEEDBACK} = 100k\Omega$ .
  - Alimentación del sensor:  $V_{REF} = 5V(V_{50\%}^{CA})$  o  $= [0,25 - 1,25]V(V^{CC})$ .
- Especificaciones *OpAmp MCP6004* según su *datasheet*:
  - Alimentación del OpAmp:  $V_{SUPPLY} = V_{DD} = [1,8 - 6]V$ .
  - Chip CMOS usado con rango  $V_{in} = V_{DD} + 300mV$  a  $V_{SS} - 300mV$ .

[Recordar Anexo de Tema 4 sobre la simbología del voltaje.]

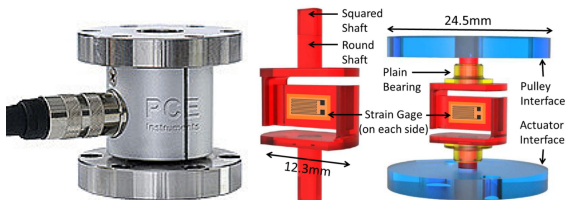


Figura: Izda. de pce-instruments.com; dcha. de *Investigating Remote Sensor Placement for Practical Haptic Sensing with EndoWrist Surgical Tools*, A. Spiers

- El torque aplicado sobre eje se puede medir por métodos de medición:
  - Indirectos: si caract. del actuador que genera torque son conocidas.
    - E.g. midiendo el voltaje y/o la corriente de operación del actuador.
  - Directos: con sensor de torque, que puede ser estático o dinámico.
- Veamos métodos de medición directos: sensor de torque est./din.

- Estático: el de la Figura 5, con celda de carga en cantiléver.
  - Tiene eje para acoplar sensor al actuador o sistema a medir. Fórmula:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (3)$$

donde:

$\gamma$  : (gamma) deformación cortante, angular o de cizalladura

$\tau$  : (tau) esfuerzo cortante [ $Pa = \frac{N}{m^2}$ ]

$G$  : módulo de elasticidad tangencial o de rigidez o cortante [ $Pa$ ]

- Si  $G$  de material desconocido  $\implies$  calcularlo según fórmula:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

donde:

$E$  : Módulo elastic. o de Young ( $E$ ) refleja rigidez material [ $Pa$ ]:  $E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x}$ .

$\nu$  : (nu) coef. Poisson [*adim.*], propio de cada material ( $= -\frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{longitudinal}}$ )

*[Ejercicio para practicar: estiramiento y estrechamiento de cable de cobre]*

- Con esfuerzo cortante ( $\tau$ ) se puede saber el torque que lo generó:

$$T = \frac{\tau}{r} J \quad (5)$$

donde:

$T$  : torque aplicado [ $Nm$ ]

$r$  : radio del eje [ $m$ ]

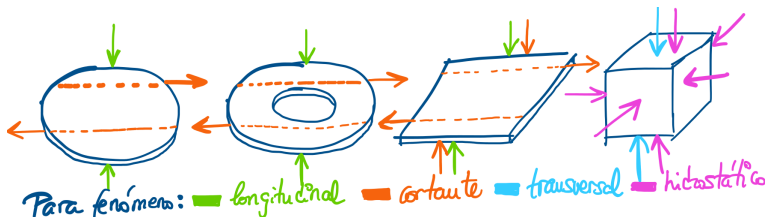
$J$  : momento polar de inercia (MPI) del eje [ $m^4$ ]

- 1.<sup>a</sup>/3 ley Newton, ley inercia: todo cuerpo tiende a mantener reposo.
  - A menos que se obligue a cambiarlo porque se aplique fuerza sobre él.
- MPI: capacidad de cuerpo para oponerse a torsión alrededor de eje.
  - $\uparrow$  masas alejadas del centro de gravedad  $\implies \uparrow$  MPI.
  - $\downarrow$  masas o cerca del centro de gravedad  $\implies \downarrow$  MPI.
- Rango med.=  $[0,03 - 271000] Nm$  con  $R = 350\Omega$ ,  $V^{CC} = [10 - 20] V$ .
- Usos principales:
  - Realizar pruebas de sistemas rotacionales.
  - Medir par de apriete de tornillos en sistema que requieren precisión.



Figura: Figura extraída de directindustry.es

- Tienen un eje con libertad de rotación sobre el que se montan galgas.
- Este sensor se coloca entre el actuador y la carga que se desea mover.
- Pueden medir además velocidad y ángulo mediante encoder interno.
  - Muy cómodo para relacionar par con la posición donde se produce este.
- Rango med.=  $[0,06 - 565000] Nm$  con  $R = 350\Omega$ ,  $V^{CC} = [10 - 20] V$ .
- Tipos: con escobillas (CE) o sin escobillas (SE) (*aka brushless*).
  - CE: pueden medir  $\uparrow$  valores de par, pero a  $\downarrow$  vel.
    - Al transmitir la señal por escobillas, estas meten mucho ruido a  $\uparrow$  vel.
  - SE: transmisión de señal se realiza mediante un sistema de telemetría.
    - Lo que permite obtener señal más limpia a mayor velocidad de rotación.



- Ventajas frente a los piezorresistivos (PRs):
  - Más compactos.
  - Sensitividad independiente del volumen; solo depende del material.
    - +Usados: cuarzo, sulfato o tantalio de litio, polímero ferroeléctrico.
  - Poseen  $\uparrow$  frec. natural  $\Rightarrow$  muy útiles en mediciones dinámicas.
- Desventajas de los piezoeléctricos (PEs):
  - PRs: +estables y comportam. +lineal  $\Rightarrow$  +útiles en medic.  $\uparrow$  precisión.
- Fenóm. PEs: (L)ongitudinal, (C)ortante, (T)ransversal, (H)idrostático.
  - Geometría circular, anillo o placas cuadradas: explotan fenóm. L y C.
    - $V_{out}$  medido sobre la misma cara sobre la que se aplica la carga.
  - Geometría eje circular, prisma regular, cilindro o viga a flexión: T.
    - $V_{out}$  medido sobre caras no cargadas, aplicando carga transversal.
  - Geometría de prisma regular: se explota el fenómeno H.
    - Carga y  $V_{out}$  en todas las caras: las tres direcciones (x, y, z).



- Sensitividad independiente del volumen; solo depende del material.
- Si consideramos nula la deformación volumétrica del material:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

$\sigma$  : esfuerzo normal resultante [ $Pa$ ]

$F$  : fuerza aplicada [ $N$ ]

$A$  : área de material piezoeléctrico [ $m^2$ ]

- Si electrodos conectados al material PE están en cortocircuito  $\Rightarrow$ 
  - $\Rightarrow$  campo eléctrico del material PE = 0  $\Rightarrow$  densidad flujo eléctrico:

$$D = C_{pz}\sigma \Rightarrow D = \frac{C_{pz}F}{A} \Rightarrow DA = C_{pz}F \Rightarrow q = C_{pz}F \quad (7)$$

$D$  : densidad de flujo eléctrico [ $\frac{C}{m^2}$ ,  $C = \text{Coulombs}$ ]

$C_{pz}$  : coeficiente piezoeléctrico [ $C/N$ ]

$q$  : carga eléctrica existente entre los electrodos del sensor,  
considerando que estos tienen la misma área  $A$  que el material PE.

- De la ecuación anterior,  $q = C_{pz}F$ , vemos que  $\exists$  relación  $\propto q - F$ .
  - Esta relación de  $\propto$  está definida por  $C_{pz}$ , propio de cada material.



Figura: Imagen extraída de hbm.com

- Este sensor con forma de disco es de los más usados.
- Disco ext. de acero y, dentro, dos anillos PEs separados por electrodo.
  - De este electrodo se toma la lectura de salida del sensor: fenóm. long.
- Rangos medición=  $[5kN, 1MN]$ . Rigidez del sensor=  $[1, 100] \frac{kN}{\mu m}$ 
  - La rigidez es un factor muy importante en estos sensores.
    - $\downarrow$  rigidez  $\implies$  poder leer fuerzas pequeñas, aunque rango  $\uparrow$ .

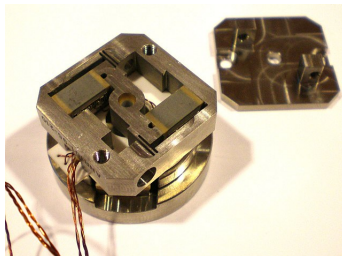


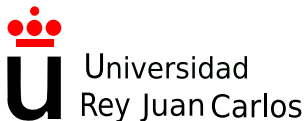
Figura: Imagen extraída de Wikimedia Commons

- Se montan en un disco elementos sensitivos al fenóm. cortante.
- Los PEs se alinean para que su eje sensitivo sea tangente al disco.
- Los PEs se conectan en paralelo para que su salida sea  $\propto$  torque.
- Tipos: din. y est., al igual que los sensores de torque piezorresistivos.
- Uso principalmente en aplicaciones dinámicas:
  - Medir fuerza de corte en maquinaria o herramientas.
  - Medir par y fuerza de las ruedas de un vehículo en marcha.

## 7. Sensores de fuerza, torque y deformación

Julio Vega

[julio.vega@urjc.es](mailto:julio.vega@urjc.es)



Sensores y actuadores