

SENSORES Y ACTUADORES

GRADO EN INGENIERIA DE ROBOTICA SOFTWARE
(FUENLABRADA)

Transparencias de los temas de la asignatura
Material docente en abierto de la Universidad Rey Juan Carlos



©2024 Julio Vega Pérez

Algunos derechos reservados.

Este trabajo se entrega bajo licencia CC-BY-SA 4.0.

ÍNDICE

1. Introducción	3
2. Acondicionadores de señal	37
3. Sensores de velocidad, posición y aceleración	65
4. Sensores de color, luz y visión	86
5. Sensores de nivel y proximidad	107
6. Sensores de temperatura y humedad	122
7. Sensores de fuerza, torque y deformación	146
8. Sensores de presión y flujo	166
9. Actuadores eléctricos	187

1. Introducción

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyc



Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.

Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Variables y magnitudes físicas
- 3 Transductores
- 4 Principios de transducción
- 5 Sensores
- 6 Actuadores

- Toda la historia: obtener energía de la naturaleza y transformarla.
 - Ha propiciado el desarrollo tecnológico.
 - Y los métodos actuales de conversión de energía.
 - En sistema integral, variables físicas son observadas y cuantificadas.
- Desde creación de máquinas automatizadas: SyA fundamentales.
 - En estos sistemas que requieren interfaz con mundo real.
 - E.g., usuario ingrese un dato, medir una variable física, realizar acción.

- Variable física: representación de un parámetro de un fenómeno físico.
- Magnitud física: resultado de cuantificar un atributo físico.
 - Asignando números a estos a través de una variable/constante física.
- Sistema de ingeniería moderno: sensor + CPU + actuador.
 - Sensor: dispositivo que permite cuantificar una variable física.
 - Actuador: según magnitud de la variable medida, realiza una acción.
 - Funcionamiento basado en el llamado *principio de transducción*.

- Convierten una variable física en otra que tiene un dominio diferente.
- Forman parte de un sensor o de un actuador. Diferencias:
 - Transductor: simplemente cambia el dominio de la variable.
 - Sensor: vierte una salida útil para usarse de entrada en una CPU.
 - Actuador: ejecuta acción determinada por la CPU.
- Simplificación: convierten variable física medida a señal eléctrica.
 - Pero no siempre es así; e.g.: báscula electrónica vs. báscula mecánica.
- Corolario: convierten variable física en...
 - ...movimiento, presión, flujo, señal eléctrica, etc.

- De entrada: se usa como parte de un sistema de sensado.
 - Se usa para medir una variable física cuya salida es usada por CPU.
- De salida: se usa como parte de un sistema de actuación.
 - Convierte la señal dada por la CPU en acción tangible en entorno.
 - E.g., movimiento de un motor, activación de una válvula.
- Para realizar su función se basan en algún principio de transducción.
 - Principio físico de transformación de energía.

Conceptos

- Piezorresistividad: relación entre resistencia eléctrica y deformación.
 - Material piezorresistivo: (1) material en reposo (átomos en equilibrio).
 - (2) Si sufre deformación, movimiento átomos, modifican su resistividad.
 - Resistencia vs. resistividad de un material.
 - Resistencia: depende del volumen del material a tratar.
 - Resistividad: caract. intrínseca relacionada con colocación de átomos.

Coefficiente de resistividad

- Uso: material se conecta en forma de resistencia en circuito.
 - Al aplicar d.d.p. se mide voltaje entre terminales del material.
 - D.d.p. cte. = voltaje entre terminales varía si se deforma el material.
 - E.g., sensor de presión.
- Coeficiente de resistividad (π):

$$\pi = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{E\varepsilon} \quad (1)$$

donde:

$\frac{\Delta\rho}{\rho}$: cambio de resistividad

E : módulo de Young [$\frac{N}{m^2}$]

ε : deformación

Resistencia de un material

- Si material piezorresistivo se deforma, cambia su resistencia eléctrica.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

donde:

R : resistencia del material [Ω]

ρ : resistividad [$\frac{MC \cdot \Omega}{pie}$] *Explicación unidades siguiente diapo. y ejerc.*

l : longitud [pie]

A : área de sección transversal [MC]

- El cambio de resistencia se obtiene a partir de:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

- Otra forma de medir el efecto piezorresistivo: el factor de deformación.

$$GF(\text{Gauge Factor}) = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (4)$$

Calibre de alambres/láminas estadounidense

- En inglés, AWG (*American Wire Gauge*): n.º refer. de calibres.
- Para especificar espesor de elem. metálicos como alambres o láminas.
- Establecido en 1857. Entonces, rango $\varnothing = [0,46 - 0,005]in$
 - \exists 39 saltos entre \varnothing , cuyo factor dif. = $\sqrt[39]{\frac{0,46}{0,005}} = \sqrt[39]{92} = 1,1229$.
 - $\varnothing_{AWG=6} = 0,1620in \implies \varnothing_{AWG=5} = \varnothing_{AWG=6} * 1,1229 = 0,1819in$
- Años después, rangos $> 0,46in$ siguen sistema inglés de medida *Mil*.
 - Para diámetros: $1Mil = \frac{1}{1000}pulg. \implies 1000Mil = 1pulg.$
 - Para áreas: *MC* = Mil Circular = área del círculo con $\varnothing = 1Mil$.
 - $A = d^2$, donde *A*: área de sección transversal [*MC*], *d*: \varnothing [*Mils*]
 - Múltiplos: $1KCMil$ (o *MCM* o *KCM*) = $1000MC$.

[Ejercicio: manejo de calibre AWG y la sección transversal de un alambre]

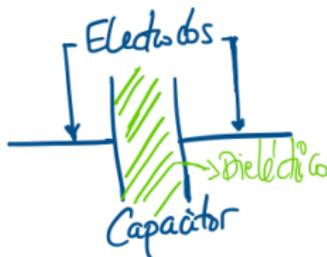
[Ejercicio: area de sección transversal de un alambre]

Grandes ventajas frente al piezorresistivo

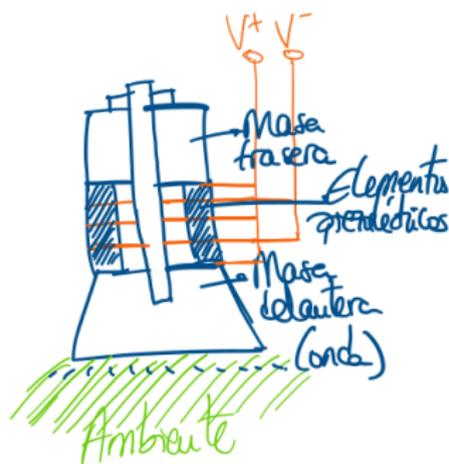
- Resolución infinita.
- Bajo consumo de energía.
- Detecta casi cualquier tipo de material.
- Baja dependencia a la temperatura.
- Fácilmente aislable de ruido de campos eléctricos.
- Aunque también tiene alguna desventaja.
 - Requiere de circuitos de lectura muy especializados.
 - Acoplamiento difícil (en fábrica) entre circuitos y estructura capacitiva.

Funcionamiento

- Según el tipo.
 - Sensor de proximidad: medir cambio de capacitancia...
 - ...inducido por el movimiento relativo entre sensor y objeto.
 - Sensor inerciales: desplazamiento de estructura móvil frente a una fija.
- Para utilizar el principio de transducción capacitivo se necesita...
 - ...estructura formada por uno o varios capacitores o condensadores.
 - Capacitor: formado por dos electrodos (o placas) y medio dieléctrico.



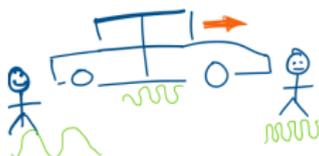
- Se da en materiales que con presión generan carga eléctrica (y vcsa.).
 - Piezoelectricidad: electricidad derivada de la presión.
- Se basa en el cambio de polarización del material debido a la presión.
- Estos materiales son un subconjunto de los ferroeléctricos.
 - Ferroeléctricos: polarización neta incluso sin campo aplicado.
- Empleados comúnmente en los sónares (figura).



- Onda ultrasónica: aquella por encima de la frecuencia audible.
- Vs. electromagnéticas: -atenuación en metales y cuerpo humano.
 - Muy usado en el área médica, detección metales y caracterizar material.
- Vs. electromagnéticas (EM): +lenta (US: $300 \frac{m}{s}$ vs. EM: $1000000 \frac{m}{s}$).
 - US se detecta más fácilmente y depende del medio propagador.
 - +++Vel.: sólidos y metales. ++Vel.: líquidos. +Vel.: gaseosos.
- Ppio. basado en conversión de e. mecánica de onda en otro tipo.
 - Si rebota en objeto, tres partes: absorbida, reflejada y transmitida.

Efecto Doppler y transd. piezoeléctrico. Aplicaciones

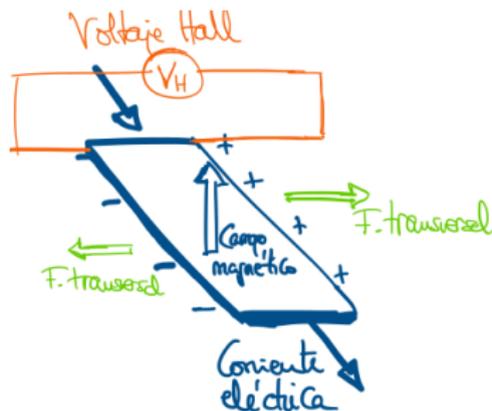
- US se basa en efecto Doppler: aparente cambio en frec. de onda...
 - ...debido a mvto. entre emisor de onda y receptor (+cerca = +frec.).



- Además del efecto, transd. US necesitan transd. piezoeléctrico (PE).
 - Onda mecánica excita (comprime/tensa) al PE, y produce señal electr.
 - Configuraciones sensor US: emisor y receptor contiguos o enfrentados.
- Aplicaciones de los transductores ultrasónicos:
 - Diagnóstico médico.
 - Sonar (*Sound Navigation and Ranging*).
 - Detección de fallas (grietas, fisuras, etc.) en metales.
 - Mecanizado, soldadura y limpieza.

Basado en el efecto Hall

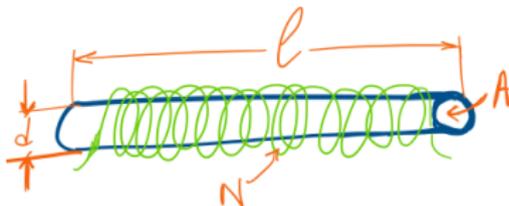
- Corriente I en presencia de campo magnét. B , surge F . transversal...
 - ...que busca equilibrar el efecto de ese campo, produciendo tensión V_H .



- Ventaja ppal.: inmune a suciedad o agua, excepto ruido magnético.
- Desventaja: corriente I calienta material, cambiando propiedades.
- Usos: en industria automotriz ppalmente.
 - Sensor de posición.
 - Detección de arranque de motor.
 - Cierre de puertas.

Basado en la ley de Faraday

- Si existe corriente en un conductor, se genera campo magnético.
- Inductancia (L) del conductor: capacidad para almacenar energía EM.
 - Por ello, en este ppio. se necesita inductor = bobina + núcleo.



- Estos transd. se usan mucho, dada su implementación de bajo coste.

Ecuación de inductancia

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (5)$$

donde:

L : inductancia [H , henrio]

N : número de vueltas

l : longitud del núcleo [m]

A : área de sección transversal [m^2]

μ : permeabilidad absoluta del medio [H/m]

Basado en corrientes de Foucault

- Si alrededor de bobina hay material conductor, impedancia cambia...
 - ...generando en ese material el fenómeno de corrientes de Foucault.
 - También llamadas corrientes de Eddy o corrientes de remolino.
- Uso (poca influencia de ruido, suciedad): detectar objetos metálicos.

Efecto Joule

- Si la corriente aumenta, los portadores de carga colisionan.
 - Estas colisiones son apreciables en forma de calor disipado.
- Efecto Joule: calor producido por una corriente sigue esta fórmula.

$$Q = I^2 R t \quad (6)$$

donde:

Q : calor [J , *joules*]

I : corriente eléctrica [A]

R : resistencia eléctrica [Ω]

t : tiempo [s]

- Fotón: partícula elemental de luz o “cuanto de energía EM”.
- Efecto fotoeléctrico: incide un fotón en un material y este emite e^- .
 - Ppio. transd. FE: conversión de luz a señal eléctrica.
 - Depende de energía de fotón y energía requiere material para emitir e^- .
 - Energía fotón depende de su long. onda: -long. = +energía.
- Ventajas: alta sensibilidad, apto para todo tipo de ambientes.
 - Usos: medir dimensiones, desplazamientos, deformaciones, torque, etc.

- Idea: generar señal eléct. manipulable a partir de actividad química.
 - Dependiendo del fenómeno químico, así se lleva a cabo el proceso.
- Afectados por temperatura o concentración de diversos componentes.
- Lado receptor no debe reaccionar químicamente a fenómeno a medir.

- Si material tiene resistencia eléctrica es porque se opone a corriente.
 - No confundir este ppio. (A) con el piezorresistivo (B).
 - A = se basa en cambio resistencia presente; B = cambio de resistividad.
 - A = depende cuánto material presente; B = fenómeno cambia resistiv.
- Resistencia de material (R) depende del volumen de este.
 - Vs. resistividad = característica intrínseca depende de su naturaleza.

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{V}{I} \quad (7)$$

donde:

R : resistencia eléctrica [Ω]

ρ : resistividad [Ωm]

l : longitud del material [m]

A : área del material [m^2]

V : voltaje [V]

I : corriente eléctrica [A]

- Sensor siempre hace uso de transductor, además con salida útil.
 - Transductor: cambia dominio de variable física medida.
- Salida suele ser señal eléctrica (dominio +usado), analógica o digital.
- Clasificación: lo +común, según variable a medir o ppio. transducción.
 - Nosotros los estudiaremos clasificados según la variable física a medir:
 - De posición, velocidad y aceleración.
 - De nivel y proximidad.
 - De humedad y temperatura.
 - De fuerza y deformación.
 - De flujo y presión.
 - De color, luz y visión.
 - De gas y pH.
 - Biométricos.
 - De corriente.

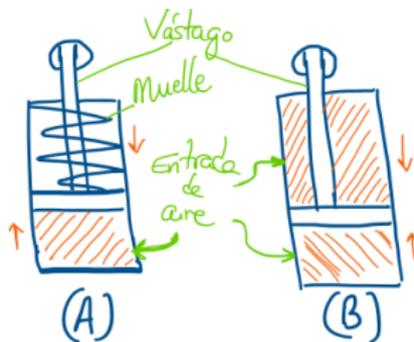
- Sensitividad: entrada mínima requiere para provocar salida detectable.
- Rango: intervalo [*min.*, *max.*] que puede medir.
- Precisión: grado de repetitividad; mismo valor medido = misma salida.
- Linealidad estática: desviación comportamiento curva fábrica vs. real.
- Offset: desplazamiento en eje *Y* de curva de salida bajo condiciones.
- Resolución: cambio más pequeño en variable que puede registrar.
- Error estático: error (humano) cometido en la lectura del sensor.

- Tiempo de respuesta: entre cambio en variable y el sensor lo registra.
- Histéresis: capacidad del sensor para seguir la curva de salida ideal.
- Linealidad dinámica: capacidad del sensor para seguir curva de salida.
- Error dinámico: debido a cómo se usa sensor (e.g. cargas inducidas).

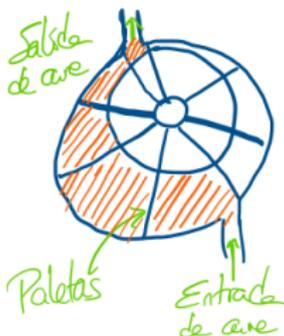
- Tendencia en electrónica: reducción de tamaño y minimizar costes.
 - Sensor inteligente: integrar funciones de varios dispositivos en uno.
- Sensor MEMS (Sist. Micro-Electro-Mecánico), compont. tamaño μm .
 - Núcleo: (sensor o actuador) + transductor.
 - Tecnologías usadas: PolyMUMPs, SOI MEMS, LIGA, CMOS-MEMS.
- Los sensores de estado sólido son un ejemplo de sensor MEMS.

- Dispositivo que genera fuerza sobre elemento y cambia su estado.
 - Y todo ello mediante la transformación de energía.
- Clasificación:
 - Por tipo de energía empleada: neumático, hidráulico y eléctrico.
 - Por tipo de movto. generado: lineal y rotatorio.

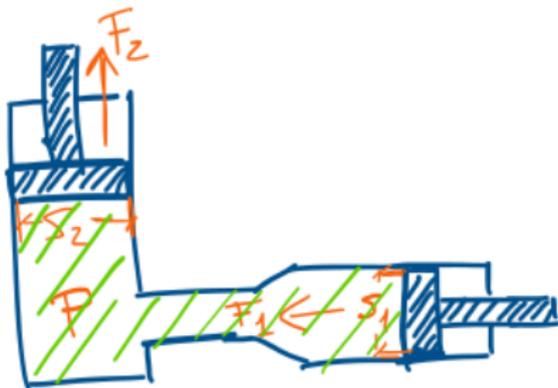
- Transforma E acumulada en aire compdo. en trabajo mecánico (W).
 - Presión de aire comprimido en recipiente se usa para generar fuerza.
- Cilindro neumát.: induce mvto. lineal (A efecto simple o B doble).



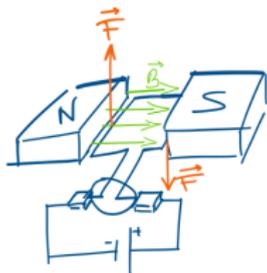
- Motor neumát.: induce mvto. rotación.



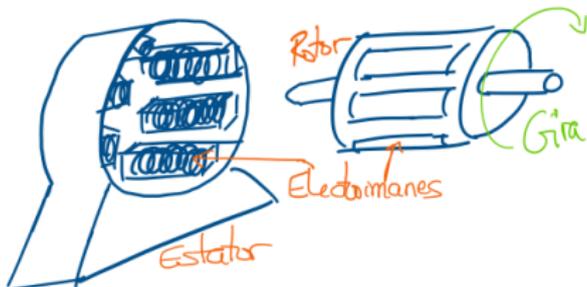
- Semejante a neumático; ambos transforman E almacenada en fluido.
 - Hidrául.: el fluido a presión es aceite mineral por tubos y mangueras.
 - Se basan en Ppio. Pascal: $P = \frac{F}{S}$
 - $P_1 = \frac{F_1}{S_1}$, $P_2 = \frac{F_2}{S_2}$; $P_1 = P_2$; $F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}$
- Aceite poco compresible = poco error posición y soporta +presión.
 - Presión de aire comprimido en recipiente se usa para generar fuerza.
- Inconvenientes: fugas por alta presión, instalaciones +complejas.
- Cilindro hidrául. similar a neumát. (y se puede usar la gravedad).



- Transforma la energía eléctrica en energía mecánica.
 - Los más usados; es +fácil disponer de electricidad que de compresor.
- Conductor en campo magnético se induce dzmto. ppclar. al campo.
 - Por ello, actuador eléct. formado por varios hilos (espiras)
 - Mayor fuerza de movto. circular en el eje (rotor) del actuador.



- Se componen de rotor (parte móvil) y estator (parte fija).



Tipos

- Motor de CC: requiere flujo eléctrico de corriente en un sentido.
 - $Vel_{rot.} = K \cdot V_{in}$. Al variar V_{in} , se varía velocidad del eje.
- Motor de CA: requiere flujo eléctrico que cambia de dirección.
 - Velocidad depende de la frecuencia de operación de V_{in} .
 - Motor paso a paso de imán permanente: estator es imán permanente.
 - En ausencia de electricidad, el eje del motor permanece en posición.
 - Motor paso a paso de reluctancia variable: estator son bobinas.
 - En reposo no existe par motor; el motor gira con libertad.
 - Motor paso a paso híbrido: combina cualidades de los dos.

1. Introducción

Julio Vega

julio.vega@urjc.es



Sensores y actuadores

2. Acondicionadores de señal

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyC

 Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

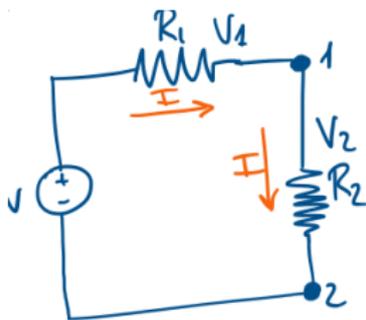
La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.

Contenidos

- 1 Acondicionadores de señal
- 2 Circuitos divisores
- 3 Circuitos de puente
- 4 Circuitos amplificadores
- 5 Circuitos convertidores
- 6 Filtros
- 7 Puentes, amplificadores y convertidores de alterna

- Sensor (transductor) cambia dom. variable física y vierte dato útil.
- Dato general/ necesita acondiciona/ para ser interpretada correcta/.
- Acondicionador de señal: circuito adecúa salida del sensor. Procesos:
 - Amplificación: aumentar magnitud de señal (e.g. $5 - 10mV$ a $0 - 5V$).
 - Linealización: convertir señal no lineal en señal con compto. lineal.
 - Filtrado: despreciar componentes no deseadas de una señal.
 - Conversión: de señal continua o analógica a discreta o digital.
 - Raspberry necesita un DAC (Dig-Ana-Conv) si queremos señal analog.
 - Aislamiento eléctrico: interrumpir paso de señal entre entrada-salida.
 - General/ la entrada se convierte a señal óptica o magnét. como salida.
 - Excitación: requerida por muchos sensores para su funcionamiento.
 - Sens./act. con ppio. trans. reluctancia variable necesitan señal AC.

- Circuitos divisores: +sencillos para acondicionar sensores resistivos.
 - Contra vs. circuitos puente: alta sensibilidad a variaciones corriente.
- Divisor de voltaje: permite distintos niveles de V con una fuente.

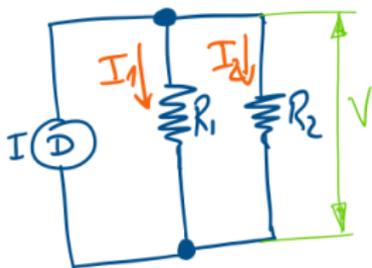


- Ley de mallas de Kirchhoff: $V = IR_1 + IR_2$; $I = \frac{V}{R_1 + R_2} \implies L. Ohm$:

$$V_1 = IR_1 = \frac{V}{R_1 + R_2} R_1; V_2 = IR_2 = \frac{V}{R_1 + R_2} R_2 \quad (1)$$
- Vemos que cociente que multiplica V es < 1 , así V_1 y V_2 son $< V$.
- Usos: como auxiliares para medición con sensores resistivos.
 - Si se mantiene resistencia fija se puede saber el valor de la otra (Ohm).
 - Al medir voltaje sobre el divisor se puede saber resistencia del sensor.

[Ejercicios: Kirchhoff, circuitos divisores de voltaje]

- Similar al de voltaje; diferencia: resistencias ahora en paralelo...
 - ...y en lugar de fuente de tensión, tenemos fuente de corriente.
 - Circuito electrónico necesita fuente energía: de tensión o de corriente.
 - Fuente tensión: tiene $R_{interna}$ pequeña; corriente: $R_{interna}$ enorme.
 - Ideal: $F_{tensión}$ con $R_i = 0$; $V = cte.$ o $F_{corriente}$ con $R_i = \infty$; $I = cte.$
 - Corolario: $F_t : V = cte.(R \uparrow \Rightarrow I \downarrow)$; $F_c : I = cte.(R \uparrow \Rightarrow V \uparrow)$

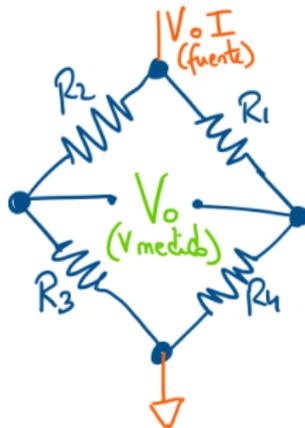


$$V_2 = V_1 = V_T = I_1 R_1 = I_2 R_2 = IR = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}; I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

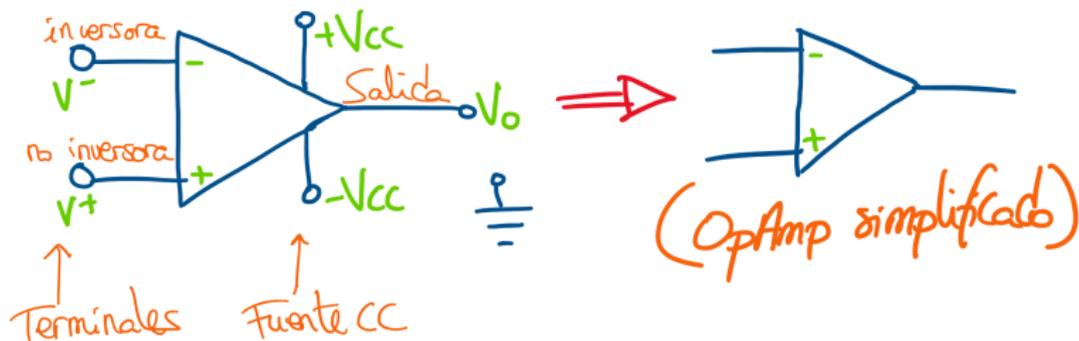
- Vemos que corriente del circuito se divide entre las dos resistencias.
- Uso: similar al de voltaje, que se usan más (preferible medir voltajes).

- Usados para obtener lectura de sensores resistivos y piezorresistivos.
 - E.g.: galgas extensiométricas, fotorresistencias.
- Se valen de variaciones de resistencia de los sensores y divisores de V .
 - Cambio resist. sensor implica cambio de V . entre terminales circuito.
- Ventaja (vs. circuito divisor): sensible a variaciones $< 1\% R_{nominal}$.
- Puentes de Wheatstone: +usados para acondic. señal salida sensor.
 - En realidad es como dos divisores de V , con $V_o = V_{o_{1-4}} - V_{o_{2-3}}$.
 - Uso: si se cambia una R por un sensor, para medir cambios de este.



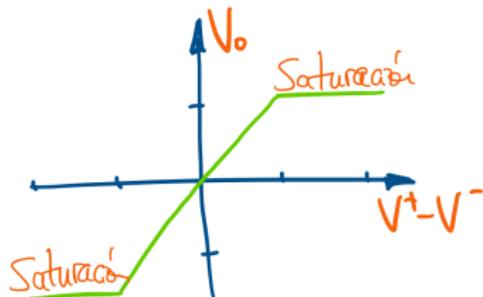
$$V_o(V_{out}) = V \frac{R_1}{R_1 + R_4} - V \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (4)$$

- Presentan muchas configuraciones = muchas aplicaciones.
- Nos centraremos en basados en amplificador operacional (*OpAmp*).
 - Es un circ. amplif. que se presenta normal/ en forma de circ. integrado.

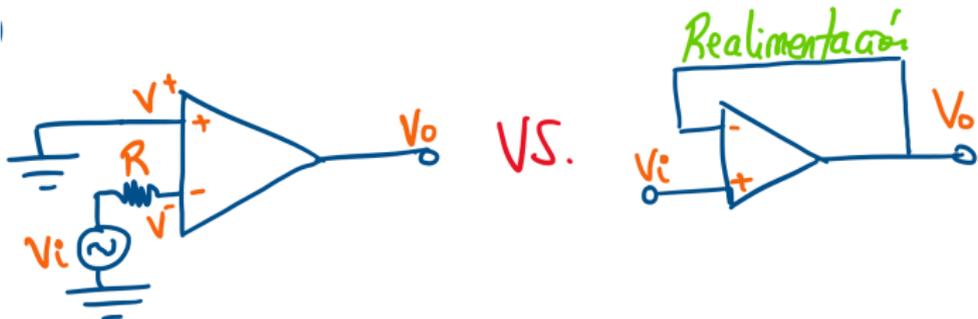


- Posee dos entradas, inversora (V^-) y no inversora (V^+) y una salida.
- Para funcionar necesita dos conexiones de alimentación ($+V$ y $-V$).

- Ganancia ∞ : tener cualquier V_o . Pero V_o acotado por fuente.
 - (Gan.: magn. adimensional = $\frac{out}{in} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{I_o}{I_i}$ (belio, decibelio (dB))
- Ganancia nula: $V^+ = V^- \implies ganancia_{salida} = 0 \implies V_o = 0$.
- V nulo entre entradas: si V^+ o V^- conectada tierra, otra = V .
- V de *offset* nulo: si $V_o = V_{in}$ (ganancia = 1). Normal/ $[1e^{-6}, 1e^{-3}]$.
- Impedancia ∞ de entrada: $I_{V^+} = I_{V^-} = 0A$. Normal/ $[1e^{-12}, 1e^{-6}]A$.
 - Imped. (Z): oposición del circuito a corriente cuando se aplica tensión.
- Z nula en salida: \forall carga \nexists caída de V . Normal/ $< 1\Omega$.
- Respuesta lineal en F : ganancia amplif. cte. aunque frec. entrada no.
- Transferencia de V : relación entre V_o y la diferencia $V^+ - V^-$.
 - Si $|V^+ - V^-|$ es pequeño, el ampl. operac. se comporta de forma lineal.
 - Si $V^- \gg V^+$, amplif. saturado: amplitud $V_o =$ valor máx. = $-V_{cc}$.
 - Si $V^+ \gg V^-$, amplif. saturado: amplitud $V_o =$ valor máx. = $+V_{cc}$.

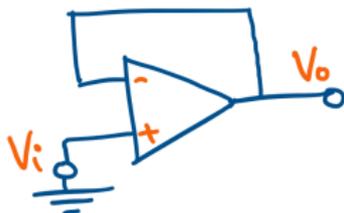


- Se emplean en circuitos acondicionadores, para sensores y actuadores.
 - Amplificación, atenuación, filtrado, linealización, comparación señales.



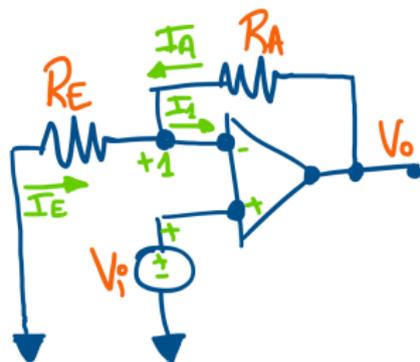
- Configuraciones: lazo abierto o lazo cerrado (con realimentación).
 - Con realim.: hay conexión entre salida y entrada del mismo circuito.
- Dada versatilidad y uso extendido, nos centraremos en lazo cerrado.
 - En lazo hay compntes. para compto. resistivo, reactivo, (no)lineal.
 - Hace que las configuraciones posibles en lazo cerrado sean mayores.
 - Además, con realim., ganancia en circuito amplific. puede controlarse.
 - Permite trabajar con diferencias $|V^+ - V^-|$ grandes antes de saturar.
 - El circuito es poco sensitivo a variaciones de ganancia propia.
 - E.g.: $\sim t.^a \implies \sim ganancia_{amplif.} \not\Rightarrow \sim ganancia_{circuito}$.

Seguidor o amplificador de ganancia unitaria



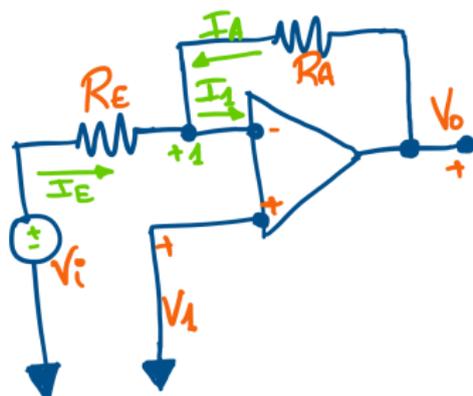
- Configuración más sencilla de conexión de amplif. operac. con realim.
- Debe su nombre, *seguidor*, a que $V_o = V_i \implies$ no amplifica entrada.
 - Y *amplif. ganancia unitaria* (1), porque $V_o = V_i \implies \frac{V_o}{V_i} = 1$.
- Muy usados; gran impedancia entrada anula efectos de carga (EC).
 - EC: cambios en V de circuito cuando carga conectada a este cambia.
- Perfectos como 1ª etapa acondiciona/, pues aíslan V_o respecto a V_i .

No inversor



- Aquí ya se incluyen otros componentes en el lazo de realimentación.
- Se conecta fuente de V a terminal V^+ , que tendrá V_i .
 - Considerando amplif. operac. ideal, también hay V_i en V^- .
- Sea lazo V_o , R_A , $nodo_1$, R_E y tierra, tenemos circ. divisor de voltaje.
 - Sabemos que: $V_i = V_o \frac{R_E}{R_E + R_A} \implies ganancia = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_E + R_A}{R_E} = 1 + \frac{R_A}{R_E}$.

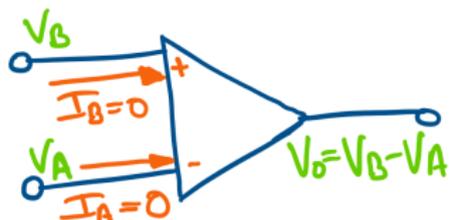
Inversor



- Similar a anterior, pero fuente de V se conecta en terminal inversora.
- Cálculo de ganancia, aplicamos Kirchhoff sobre $nodo_1$: $I_1 = I_E + I_A$.
- Considerando amplif. ideal, corrientes en ambos terminales son nulas.
 - Por tanto: $I_1 = 0 = I_E + I_A$, donde $I_E = \frac{V_i - V_1}{R_E}$ y $I_A = \frac{V_o - V_1}{R_A}$.
- Además, $V^- = 0$ (ideal); por tanto, $V_1 = 0 \implies I_E = \frac{V_i}{R_E}$; $I_A = \frac{V_o}{R_A}$.
 - Sustituyendo en fórmula inicial: $\frac{V_i}{R_E} + \frac{V_o}{R_A} = 0 \implies \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_A}{R_E}$.
- Corolario: el amplif. inversor cambia el signo del voltaje de entrada.

Otros

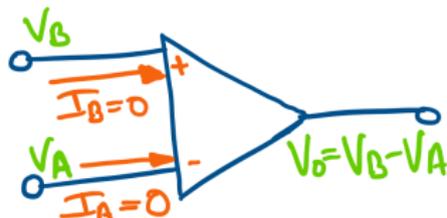
- Sumador: circ. amplif. inversor con varias entradas a un mismo nodo.
 - Su función: suma los voltajes de esas entrada al terminal.
- Diferencial: se obtiene la diferencia $|V^+ - V^-|$.
 - Vtja vs. lazo abierto: control de ganancia para evitar saturación.
- Integral: incluir resistencia en entrada y capacitor en lazo.
- Derivador: incluir resistencia en lazo y capacitor en entrada.
- Logarítmico: incluir diodo en lazo y resistencia en entrada.
- Antilogarítmico: incluir diodo en entrada y resistencia en lazo.
- De instrumentación: para medir pequeñas \sim de V cuando hay ruido.



- Se usan fundamental/ como comparadores de voltaje.
- Se aplican dos voltajes, V_A y V_B en la entrada.
 - Si $V_A = V_B \implies V_o = 0$.
 - Si no, amplif. satura ya que $gan_{circ.} = gan_{ampl.} = \infty$ (ideal).
- Inversor/no-inversor (V en terminal y otro a tierra) = ampl. difer.
 - Ampl. difer. compara dos V vs. inv./no-inv. compara V con 0.

- Linealización de puentes resistivos para medición con galgas.
 - Baja Z evita efectos de carga al conectar el puente a UCP.
- Leer sensor alta Z ($M\Omega$): fotodiodos, piezoeléctr., det. humo.
- Medición de posición: lineal (LVDT) o angular (encoder).
 - LVDT = Transductor de Desplazamiento Lineal Variable.
 - Objetivo: amplificar valores salida para ser leídos con facilidad.
- Uso termocuplas; amplificación ayuda a compensación de unión fría.
 - O termopar: transductor hecho por 2 metales, genera V bajísimo (mV).

- Def. CC: transforma un tipo de señal de entrada a otro en salida.
- Def. ADC: acopla señal A. con circuito D. (e.g. microcontroladora).
 - Procesos: t continuo $\rightarrow t$ discreto, cuantización amplitud señal.
- Conocer: v muestreo, resol., ancho banda para correcto tto. señal.
 - v muestreo, según t^a muestreo, debe ser $= 2 \times$ frec. máx. señal A.
 - Resol.: determinada por el número de bits (e.g. 16b.) del convertidor.
- Ej. básico: amplif. difer. lazo abierto (o comparador) = ADC de 1 bit.
 - En entradas puede haber señales analógicas, si $V_A \neq V_B$ amplif. satura.
 - Si una entrada es referencia, la otra puede ser > 0 o < 0 (¡ya digital!).

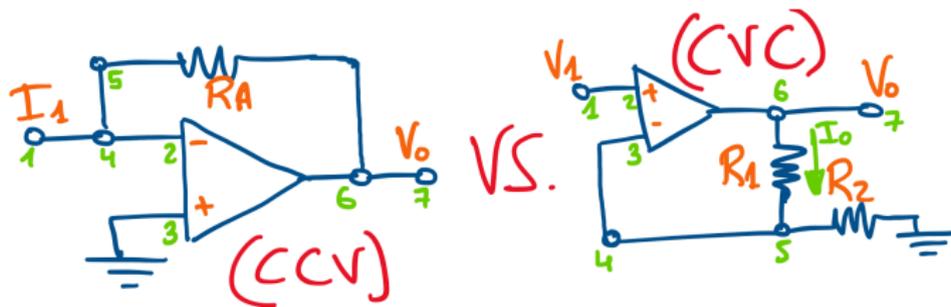


- Otros: ADC aprox. sucesivas, ADC flash, ADC integrador, ADC $\sigma - \delta$.

- Def.: reconstruir señal analógica a partir de datos binarios.
 - En un DAC siempre se pierde información y \exists desfase.
- Procesos: almacenar señal, restituir amplitud, establecer correlación.
- Requerimientos DAC = ADC.
- Usos: punto de *unión* entre sist. dig. y otros elem. de sistema.
- Tipos: DAC resist. ponderadas, DAC R-2R, DAC termóm., DAC $\sigma - \delta$.

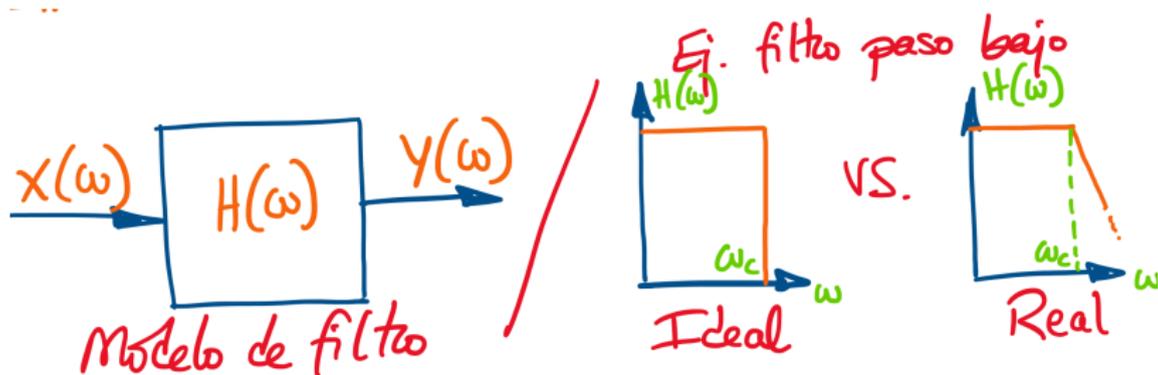
- CVF: producen señal periódica con frecuencia \propto a V de control.
 - Pueden producir señales cuadradas, triangulares o sinusoidales.
- CFV: convierte señal entrada en tren pulsos de ampl. cte.; el pulso...
 - ...es diferenciado, rectificado, promediado para obtener $V_o \propto$ frec.
 - Suelen usarse como circuitos integrados comerciales (e.g. encoders).

- Emplea amplif. operac. y usa ley Ohm para lectura $\propto I$ o V .
- CCV: convierte señal corriente pequeña ($> 0,01\mu A$) a $V \propto$.
 - $V_o = -I_1 R_A$
- CVC: lee un V de entrada en forma de corriente \propto .
 - $V^+ = V^-$ (ampl. operac. ideal) $\implies I_o = \frac{V_1}{R_2}$.



- Aplicaciones de estos circuitos en los sistemas de sensado.
 - Lectura de sensores basados en efecto fotoeléctrico.
 - Como fuente de voltaje controlada por corriente.
 - Para medir corriente, se puede conectar CCV y luego voltímetro.

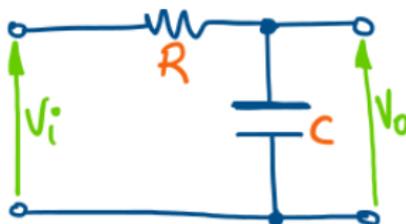
- La respuesta de un filtro depende de los elementos que lo componen.
 - Tiene 1 entrada y 1 salida, donde solo aparece parte de frec. entrada.
 - Se elimina una parte frec. de señal a partir de la *frec. de corte*.
 - Función de transferencia $H(\omega) = 1$ (permite paso)/ 0 (impide paso).
 - Real/ lo que ocurre es que el filtro atenúa las frecuencias no deseadas.



- Z de elem. pasivos (capacitores, inductores) depende de F_{fuente} .
 - Valor y conexión de estos elem. ayudan diseñar filtro c/paso selectivo.
- Clasif.: según componentes que lo constituyen y su respuesta en frec.

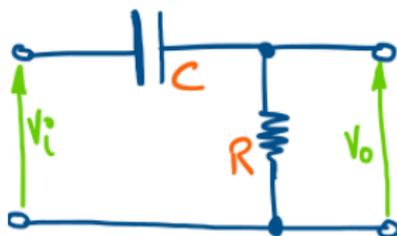
- Pasivos: solo elem. pasivos: resist., capacit. e induct. No amplifican.
- Activos: no usan induct. pero sí *OpAmp*. Sí amplifican señal.
- De capacidades conmutadas: usan capacit. conmut. en vez de resist.
 - Los valores de resist. se consiguen variando la frec. de conmutación.
- Digitales: realizan la función de filtro mediante algoritmos numéricos.

Filtro paso bajo



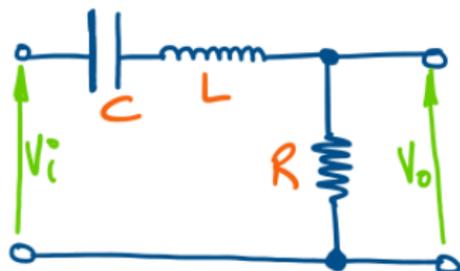
- Atenúa según factor de escala frec. (ω) $>$ a la de corte del filtro.
- El circuito de la figura puede ser un filtro paso bajo pasivo. Análisis:
 - Si $\omega = 0 \implies Z_{capacitor} = \infty \implies V_o = V_i$ (=circ. abierto).
 - Si $\omega \uparrow \implies Z_{capac.} \downarrow \implies V_o < V_i$ (=circ. divisor V entre R y $capac.$).
 - Si $\omega = \infty \implies Z_{capac.} = 0 \implies V_o = 0$ (=cortocircuito).
- Uso: e.g. dirigir frec. $\downarrow\downarrow$ de señal de audio a *subwoofer*.

Filtro paso alto



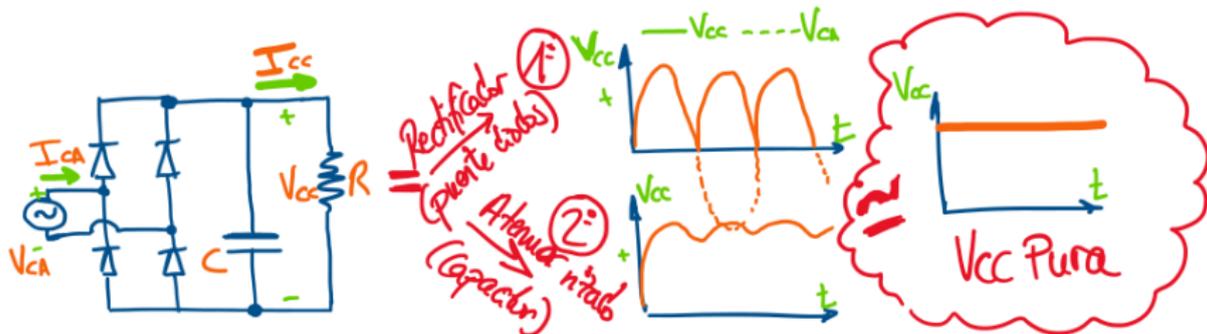
- Permite paso de frec. $>$ a la de corte y atenúa las frec. $<$ corte.
- El circuito de la figura puede ser un filtro paso alto pasivo. Análisis:
 - Si $\omega = 0 \Rightarrow Z_{capac.} = \infty \Rightarrow V_o = 0$ (=cortocircuito).
 - Si $\omega = \infty \Rightarrow Z_{capac.} = 0 \Rightarrow V_o = V_i$ (=circ. abierto).
- Uso: e.g. dirigir frec. $\uparrow\uparrow$ de señal de audio a *tweeter*.
- Corolario: su comportamiento es complementario al filtro paso bajo.

Filtro paso banda



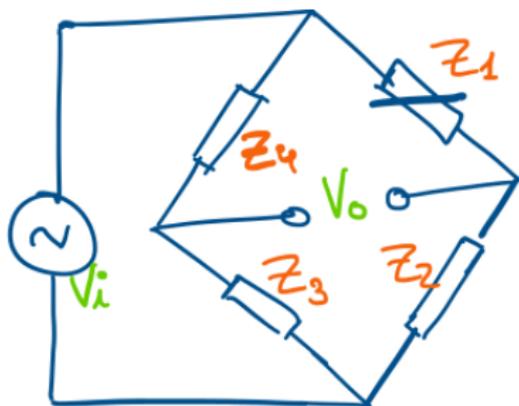
- Permite paso de frec. dentro de rango $[min, max]$ determinado de frec.
- El circuito de la figura puede ser un filtro paso banda. Análisis:
 - Si $\omega = 0 \implies Z_{capacitor} = \infty \implies V_o = 0$ (=circ. abierto).
 - Si $\omega \uparrow \implies Z_{cap.} = X, Z_{ind.} = Y \implies V_o = W$ (=circ. divisor de V).
 - Si $\omega = \infty \implies Z_{inductor} = \infty \implies V_o = 0$ (=circ. abierto).
- En estos filtros se da el fenómeno *frecuencia central del filtro*.
 - Como $Z_{cap.}$ es $-$, cuando $Z_{cap.} = Z_{ind.} \implies Z_{total} = 0 \implies \omega_o = \omega_j$.

- Para cuando necesito usar señales de CA y CC en un mismo sistema.
- CA-CC: necesita circ. rectificador de onda y capacitor en paralelo.
 - Real/: 1º atenuar magnitud señal CA (220 V) con transformador.



- CC-CA: usan transistores que activan-desactivan V_{cc} controlada/.
 - Circuitos comunes: *push-pull*, medio puente, puente completo.

- Puentes de alterna: circuitos para acondicionar señal de sensores...
 - ...de reactancia variable, como un *LVDT* (cargas inductivas).
- El puente se excita con señal de V o I alterna (debido a cargas ind.).



- Solo elemento 1 tiene impedancia variable = sensor que se desea leer.
 - El resto son resist. fijas con su correspondiente impedancia (Z).

2. Acondicionadores de señal

Julio Vega

julio.vega@urjc.es



Sensores y actuadores

3. Sensores de velocidad, posición y aceleración

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

The logo for GSyc, consisting of the letters 'G', 'S', 'y', and 'C' in a stylized, blue, sans-serif font. The 'y' is lowercase and has a unique shape.The logo for Universidad Rey Juan Carlos, featuring a stylized 'U' with a crown on top. The crown has three red dots. To the right of the 'U' is the text 'Universidad Rey Juan Carlos' in a black, sans-serif font.

Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

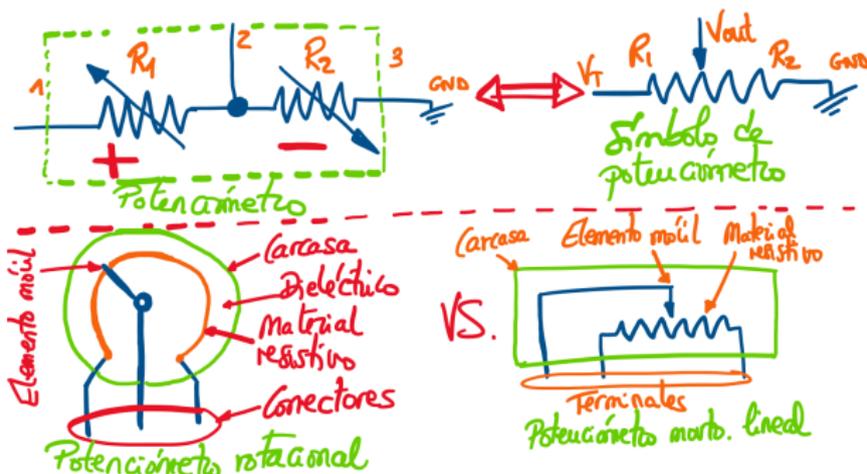
Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.

Contenidos

- 1 Potenciómetro
- 2 Encoder
- 3 Tacogenerador
- 4 Transformador diferencial de variación lineal (LVDT)
- 5 Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)
- 6 Acelerómetro
- 7 Giroscopio
- 8 Magnetómetro

- Def.: transductor entre posición de objeto y cambio de resistencia.
- Se utilizan normal/ con voltaje en CC, y constan de tres terminales.
 - Uno en cada extremo y el 3.º recorre el cuerpo del elem. resistivo.
 - R entre terminal móvil y cada res. fija varía según mvto. elem. móvil.



- Si elem. móvil se mueve en sentido $+$ $\implies R_{1-2} \downarrow, R_{2-3} \uparrow$.
- Si elem. móvil se mueve en sentido $-$ $\implies R_{1-2} \uparrow, R_{2-3} \downarrow$.
- Para saber en qué punto está el elem. móvil, se usa un divisor de V .

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_T \quad (1)$$

- Bobina: presentan una bobina alrededor de un material dieléctrico.
 - Recordemos, dieléctrico = material que no conduce electricidad.
 - Baja resolución, pues mín. intervalo = dist. cada vuelta bobina.
- Carbono: resist. hecha de carbono y arcilla por la que pasa deslizador.
 - Mejor resolución, pues la superficie es continua y, además, suave.
- Plástico: resis. de carbono cubierta de película de plástico conductor.
 - Más suave que anterior, pero peor funcionamiento con altas T^{as} .
- Metálico: aleación metálica sobre un cerámico = más duradero.
- Cermet (*metal cerámico*): = durabilidad y \downarrow dependencia T^a .



Figura: Imágenes extraídas de Mouser Electronics

- Lineal: un deslizador para controlar un solo canal (A).
- Lineal dual: un deslizador controla 2 potenciómetros = 2 canales (B).
- Lineal dual con desl. eléctricamente ajustable (ajustar resistencia).
- Rotacional una vuelta: lineal o logarítmico, giran $3/4$ de vuelta.
- Rotacional multivuelta: ↑ precisión pero ↑↑ acopla/ mecánico (C).
- Rotacional con eje dual: 2 potenciómetros con 1 misma perilla (D).
- Rotacional con eje ajustable eléctricamente.

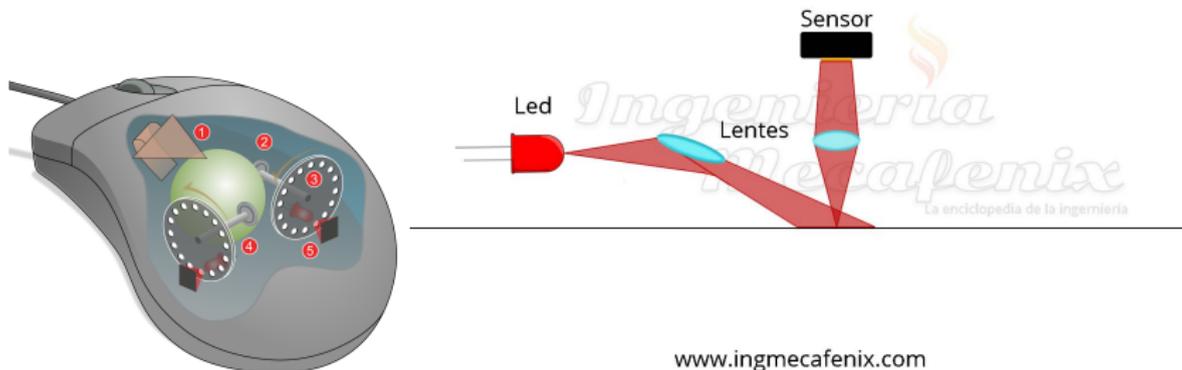
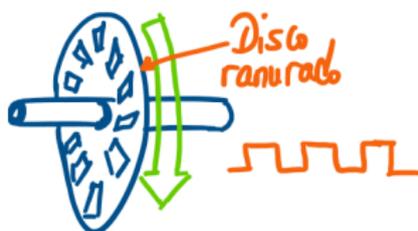


Figura: Imágenes extraídas de Wikipedia y www.ingmecafenix.com

- Def.: convierte mvto. rotacional o lineal a señal digital equivalente.
 - También denominados tacómetros o codificadores de posición.
- Son sensores + usados para medición de sistemas rotacionales.
- Actual/ mayoría son ópticos o magnéticos (vs. antigua/, mecánicos).



- Compuesto por 2 elem. optoelectrónicos = emisor de luz y receptor.
 - Normal/ emisor = fotodiodo, receptor = fototransistor.
- Cuando disco gira, se genera señal alternante cuya frec. \propto vel. eje.
- Cálculo posición muy delicada. Saber sentido giro no es sencillo.

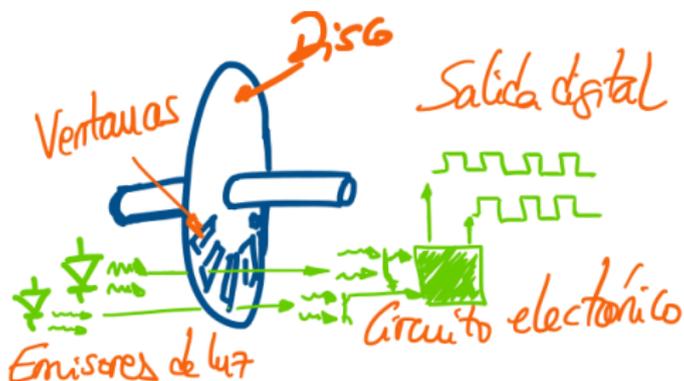
$$res = \frac{\pi D}{2a_r} \quad (2)$$

donde:

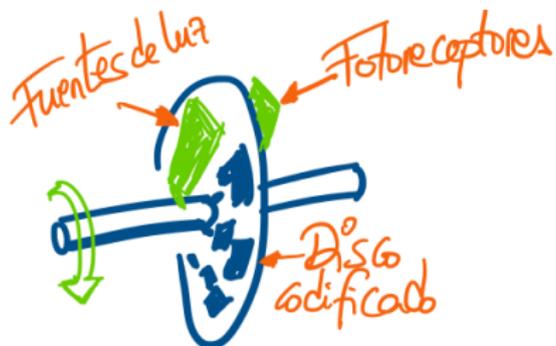
res : resolución del encoder

D : diámetro del disco

a_r : ancho de cada ranura

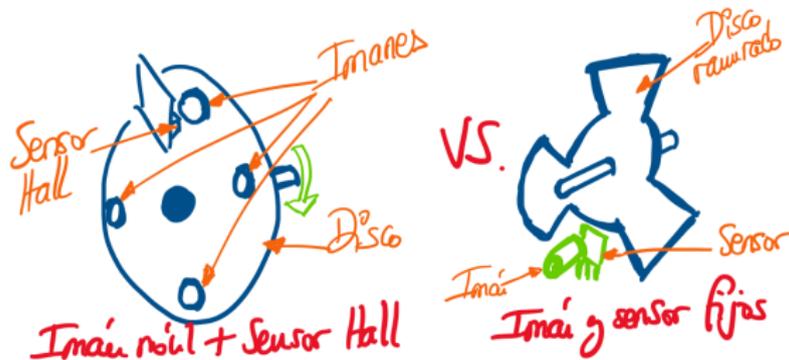


- Se requiere al menos dos pares emisor-receptor con desfase $+1/4$.
 - Así, señal desfasada $1/4$ o $3/4$ (entre pares) según sentido giro.
- Además, suelen incluir muesca adicional para indicar vuelta completa.
 - Permite conocer posición inicial en caso de fallo electrónico puntual.
 - Y saber n° pulsos en 1 vuelta \implies vel. angular, pos., sentido giro.

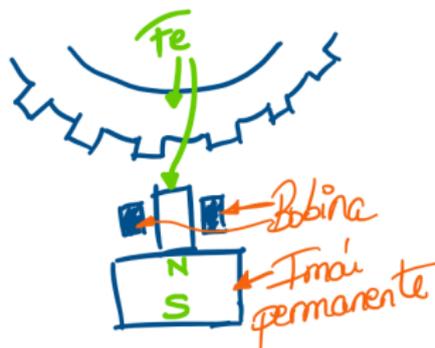


- Disco tiene varias bandas concéntricas codificadas en código Gray.
 - A cada banda le corresponde un par emisor-receptor = 1 bit (0/1).
- Gray vs. binario: Gray solo cambia un bit en cada transición.
 - Muy útil para mecanismos no digitales, donde transiciones lentas.
- Ventaja: posición del eje siempre es conocida, no se pierde.
- Desventaja: baja resolución, dificultad de lectura (vs. increment.).
- Ejemplos:
 - Código Gray de 2 bits: 00 01 11 10.
 - Código Gray de 3 bits: 000 001 011 010 110 111 101 100.

[Ejercicio: aplicación del código Gray quebrado a un encoder absoluto]



- = óptico: correlaciona cambio posición o velocidad con señal digital.
- Con sensor basado en Principio de efecto Hall. Recordemos:
 - Corriente I en presencia de campo magnét. B , surge F . transversal...
 - ...que busca equilibrar el efecto de ese campo, produciendo tensión V_H .
- Dos configuraciones según imán en eje o fijo:
 - Imán en eje + sensor Hall fijo: si enfrentados \implies cambio estado.
 - Información de vel. eje dada por frecuencia de ese cambio de estado.
 - Imán y sensor fijos + disco ranurado: si en ranura \implies cambio estado.
- Difíciles de implementar, pues sensor $\uparrow\uparrow$ sensible a ruido magnético.



- Def.: sirve como transductor entre vel. eje y voltaje \propto .
- Genera salida de voltaje analógica (vs. encoder, salida digital).
 - Valor V depende de vel. rotación eje (ferromagnét.) en campo magnét.
 - Cuando rueda dentada gira, se induce V en bobina según ley Faraday:

$$V = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (3)$$

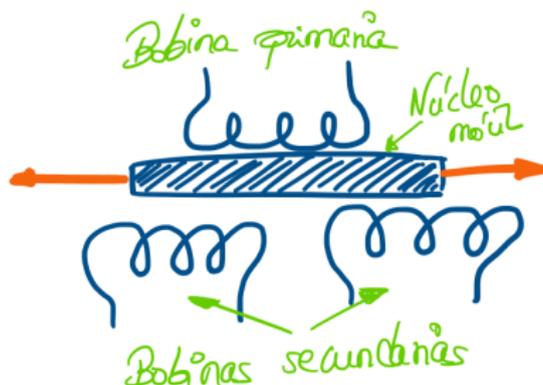
donde:

V : voltaje inducido (también se suele denominar fem)

N : número de vueltas en la bobina

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$: variación del flujo magnético en el tiempo

— : por Ley de Lenz (polaridad fem se opone a cambio que lo produjo)



- Def.: se basa en el ppio. de transducción de inductancia variable.
- Mide desplazamiento lineal, tienen resolución ∞ y $\uparrow\uparrow$ robustez.
- Incorpora tres bobinas: una primaria (1^a) y dos secundarias (2^as).
 - Y núcleo: relaciona mvto. lineal con variación de induct. de bobinas.
- Requiere de voltaje en CA, aunque fabricantes ofrecen *pack* para CC.
- Funcionamiento: bobina 1^a recibe CA (V_{in}) \implies (inducción) 2^as .
 - $V_{out} = |V_{2a} - V_{2b}| \implies$ Si núcleo en centro, $V_{out} = 0$.
 - $V_{out} \propto$ mvto. núcleo: izda. = $V_{2a} \uparrow$ y $V_{2b} \downarrow$ (y vcvsa.).
- Dvtajas.: fabricación compleja e instalación costosa.
 - Bobinas envueltas en 4^a de plástico+fibra vidrio, para evitar ruido.
 - Requieren osciladores, V frec. 60 Hz, filtros, amplif. CC y CA, etc.

- Creado en 1970 por Dpto. Defensa USA; y para público gral. en 1995.
 - Frec. señal público gral. (1575,42MHz) \neq militar (precisión cm.).
- Obtiene: alt., lat. y long., vel., hora UTC, fecha, $n.^{\circ}$ sats. visib.
- Para funcionar requiere de los siguientes tres segmentos:
 - Seg. de espacio: *constelación* = cjto. satélites. Al inicio había 24.
 - Seg. de control: oficinas que mantienen sistema. Central en Colorado.
 - Seg. de usuario: cualquier receptor GPS capaz de recibir la señal.
- Funcionamiento: mediante triangulación, ≥ 3 peticiones a sats.
 - Receptor: petición a satélite y compara hora petición vs. recepción.
 - Distancia a tal satélite \approx diferencia horas = tarda llegar señal.
- Otros GNSS:
 - Galileo (UE + ESA), de creación, gestión y uso civil.
 - Desde 2016, 2 frecs. = gratuito ($\approx m.$) o pago ($\approx cm.$).
 - GLONASS, desde 2007, por $M.^{\circ}$ de Defensa de la Federación Rusa.

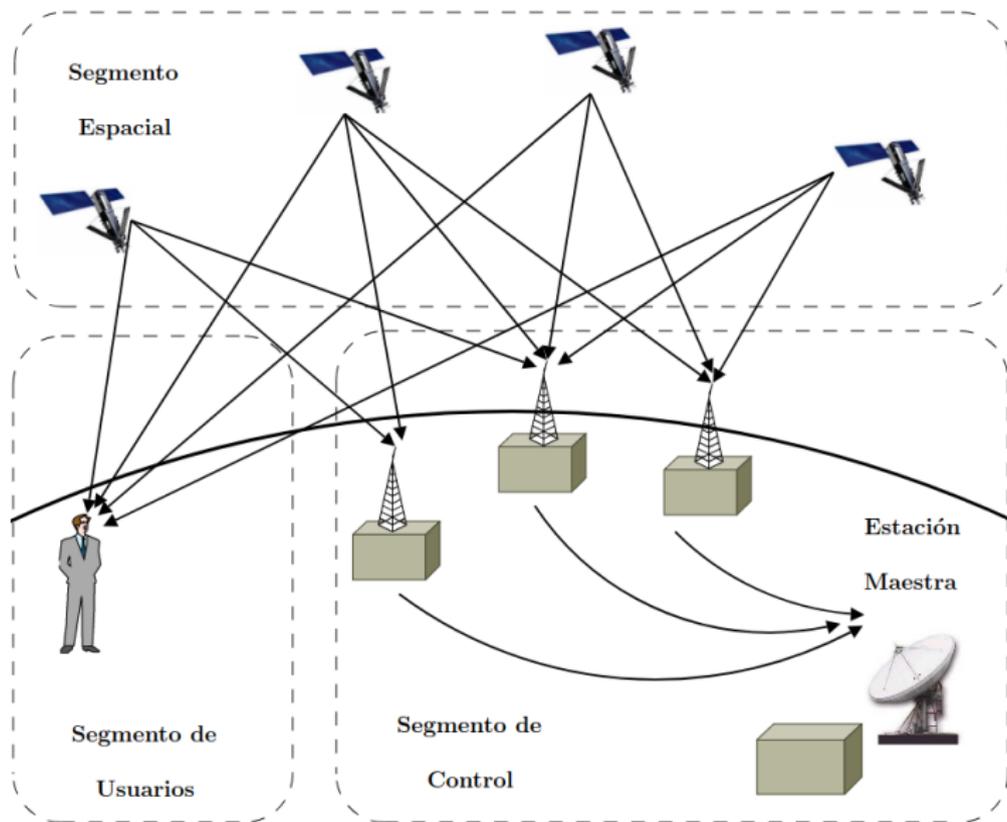


Figura: Imagen extraída de *Prototipo de una tarjeta para el control y localización vehicular utilizando mensajes SMS*, Ph.D. Benítez Olivo

- Basado ppio. transducción piezorresistivo, piezoeléctrico o capacitivo.
 - Piezorres.: si material se deforma cambia su resistencia eléctrica.
 - PE: material bajo presión cambia su polaridad \implies genera corriente.
 - Capacitivo: capacitor varía capacitancia con objeto en medio.
- Genera salida \propto al *input* (impulso o inclinación).
 - Masa móvil interna se desplaza (\propto a $F_{aplicada}$) al percibir acel. externa.
 - Siguiendo la 2ª Ley de Newton ($F = ma$) y Ley de Hooke (elasticidad).
- Config. estática: para saber inclinación y vibración de un objeto.
- Config. dinámica: para saber la acel. traslacional en un sistema.
 - E.g. *airbag*: cuándo activar bolsas aire por fuerte desaceleración.
- Acel. capacitivo: los +usados; fácil montaje y \downarrow depend. T^a .
 - Analógico: por cada g aplicada, el sensor incrementa $\times V_s$ a la salida.
 - *Fuerza g*: acel. de la Gravedad sobre objeto. ($1g = G = 9,8 \frac{m}{s^2}$).
 - Digital: se observa \uparrow o \downarrow el valor digital dado por sensor.



Figura: Imagen extraída de Mouser Electronics

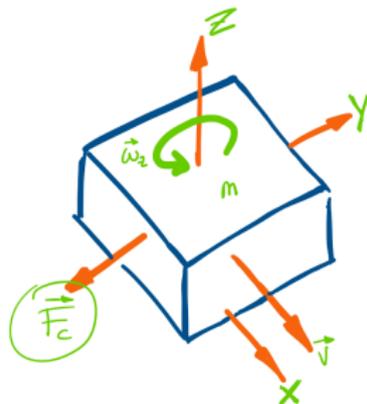
- Inclinación se mide relacionando gravedad y desplzmt. masa móvil.
- Muy empleados en dispositivos electrónicos: mandos, móviles, etc.
- Aceleración del sensor $\left(\frac{m}{s^2}\right) = a = \frac{9,81 \cdot X_s}{X_G}$

donde:

X_s : valor actual del sensor, dado en voltios o en digital.

X_G : valor dado por el sensor en posición de G .

- Sensor inercial que relaciona la rotación relativa con un voltaje.
- Basado [efectos fuerzas de Coriolis](#) presentes en mvto. rotacional.
 - Objeto se acelera al moverse sobre radio de disco en rotación.
 - Imagen: efecto observado de esfera en mvto. sobre plato en rotación.
 - Izda.: observado externa/. Dcha.: pto. observación solidario a plato.
- +usado: estado sólido (MEMS), que presentan simetría en rotación.
 - Una masa (m) se mueve dentro de chip a velocidad \vec{v} .
 - Al chip se le aplica momento de fuerza, este gira a vel. angular $\vec{\omega}$.
 - Esta unión de mvtos. rotac. y lineal genera $\vec{F}_{Coriolis} \perp$ a eje mvto.
 - $\vec{F}_{Coriolis} = \vec{F}_c = -2m(\vec{\omega} \times \vec{v})$.



- Cuantifica la intensidad y dirección de un campo magnético.
 - Brújula electrónica = magnetómetro + acelerómetro en un mismo chip.
- Principios de transducción + usados: ef. Hall, fuerza Lorentz, piezorresistivo.
 - F. Lorentz: F ejerce campo electromagnét. sobre partícula cargada.
- Uso muy extendido en dispositivos móviles:
 - Encender/apagar pantalla al alejar/acercar imán (abrir/cerrar funda).
 - Brújula electrónica o geomagnetómetro: mide campo magnét. Tierra.
 - Detector de metales (Ni , Fe , acero), cables en pared, etc.

3. Sensores de velocidad, posición y aceleración

Julio Vega

julio.vega@urjc.es



Sensores y actuadores

4. Sensores de color, luz y visión

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyC

 Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.

Contenidos

- 1 Introducción
- 2 IRLED, sensores fotodiodo y fototransistor
- 3 Fotorresistencia o LDR (*Light Dependent Resistor*)
- 4 Sensor de color
- 5 Sensor de visión
- 6 Anexo

- Veremos todos los sensores que miden variables físicas mediante luz.
- Luz muy eficiente para medir dist., T^a , comp. química, color, etc.
- Luz compuesta por fotón, o llamado “cuanto de luz” por A. Einstein.
 - Fotón: partícula elemental de luz o “cuanto de energía EM”.
- Energía presente en luz tiene dualidad onda-partícula.
 - A pesar de que su masa es nula, tiene comporta/ corpuscular (CC).
 - CC: elemento se considera partícula elemental que compone un objeto.
 - E.g. efecto fotoeléctrico: incide fotón en material y este emite e^- .
- Luz se usa general/ para referirse al espectro electromagnético.
 - Espectro EM: representación de cuánta energía contiene una onda EM.
 - Energía fotón/ondaEM depende de su long. onda: -long. = +energía.
- Para medición de variables físicas, luz se considera un haz (no onda).

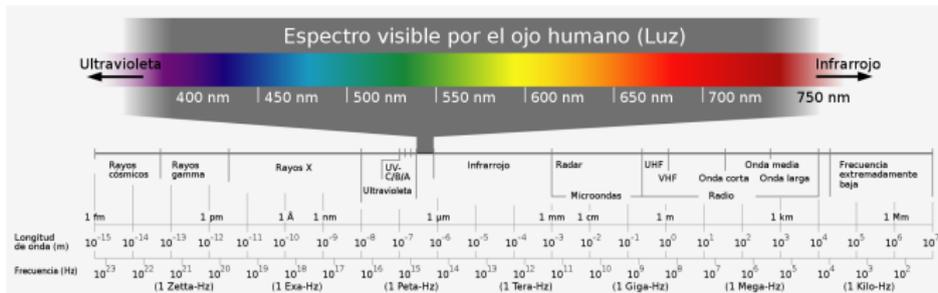
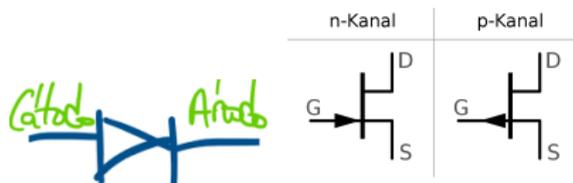


Figura: Imagen extraída de Wikipedia



- Diodo: SC (unión PN) en el que la corriente fluye en un solo sentido.
 - SC tipo P : tienen impurezas aceptoras; generan $\uparrow\uparrow$ portadores huecos $^+$.
 - SC tipo N : tienen impurezas donoras; generan $\uparrow\uparrow$ portadores e^- .
 - La conducción se produce en polarización directa (P a V^+ y N a V^-).
- Transistor: SC controlado por I y del que se obtiene $I_{amplificada}$.
 - Unipolar: transistor de efecto campo (FET, *Field Effect Transistor*).
 - El canal de un FET es dopado para producir un SC tipo N o uno tipo P.
 - Tres terminales: puerta (*Gate*), drenador (*Drain*) y fuente (*Source*).
 - Si V^+ entre $D - S$ y conectando G a $S \implies \exists$ corriente (de drenador).
 - Si V^- en G (tensión de estrangulamiento) $\implies \nexists$ corriente en canal.
 - Variantes: JFET (\cup PN), CMOS (\cup MOSFET $_{n/p}$), IGBT, TFT.
- Uso. Diodo: convertir CA en CC o rectific. Trans.: amplif. y regulador.
- El silicio y el germanio son los materiales semiconductores +comunes.

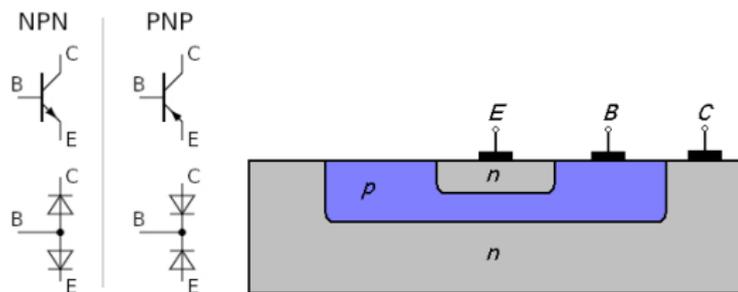
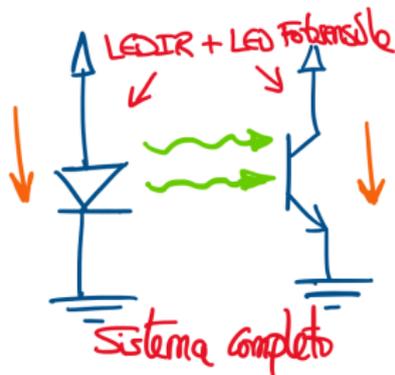


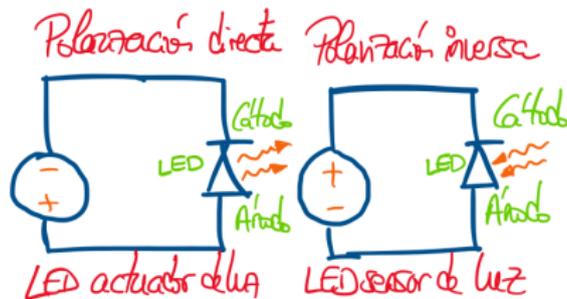
Figura: Imágenes extraídas de Wikimedia Commons

- BJT (*Bipolar Junction Transistor*): 2 uniones PN muy cercanas.
 - Permite, además de controlar I entre sus terminales, $\uparrow I$ y $\downarrow V$.
- I producida por mvto. de portadores de dos polaridades: h^+ y e^- .
- Tres terminales: emisor (directa, $\downarrow R$), base y colector (inversa, $\uparrow R$).
 - E $\uparrow\uparrow$ dopado (=comporta como metal), emite portadores de carga.
 - $I_C = \beta I_E \iff$ base es alimentada por fuente de corriente continua.
 - β : Beta del transistor = factor amplificación o ganancia entre I_C e I_B .
- Tipos: PNP (E=P, B=N, C=P) y NPN (E=N, B=P, C=N).
 - NPN: el +usado, pues movilidad de $e^- > h^+$ en los SC $\implies I \uparrow$.
- Usos: en electrónica analog., aunque tb en dig. (TTL, BiCMOS).

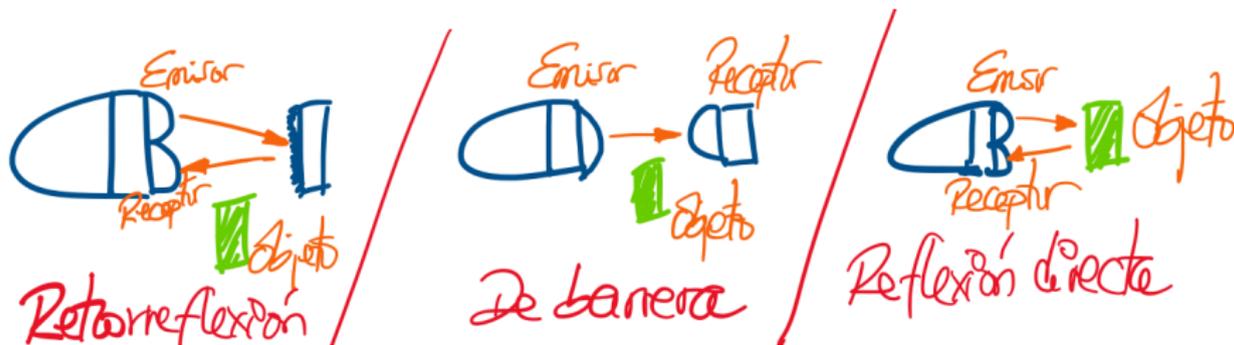
- Consumo en modo estático muy bajo (veremos en Sección CMOS).
- Gran capacidad de integración dado su \downarrow tamaño (e.g. CMOS).
 - Tamaño ($\frac{1}{2}\mu$) \ll al transistor bipolar.
 - Ad+, circuito hecho con MOSFETs no necesita $R_s \implies \downarrow$ tamaño aún.
- Controlados por $V \implies \uparrow\uparrow$ *Impedancia*_{entrada}.
 - Dada su $\uparrow\uparrow R_{entrada}$ y $\downarrow\downarrow R_{salida} \implies$ muy usado en amplif. (e.g. audio).
- $\uparrow\uparrow v_{conmutacion}[\eta S] \implies$ muy usados en apps. \uparrow frec. y \downarrow potencia.



- Este sistema es muy empleado en los encoders y sist. de presencia.
 - Emisor de luz y elem. fotosensible detectan cambio de estado.
- IRLED emite luz en espectro infrarrojo cuando se polariza en directa.
 - Cuando $V+$ se aplica a ánodo (-) y cátodo (+) a toma de tierra.

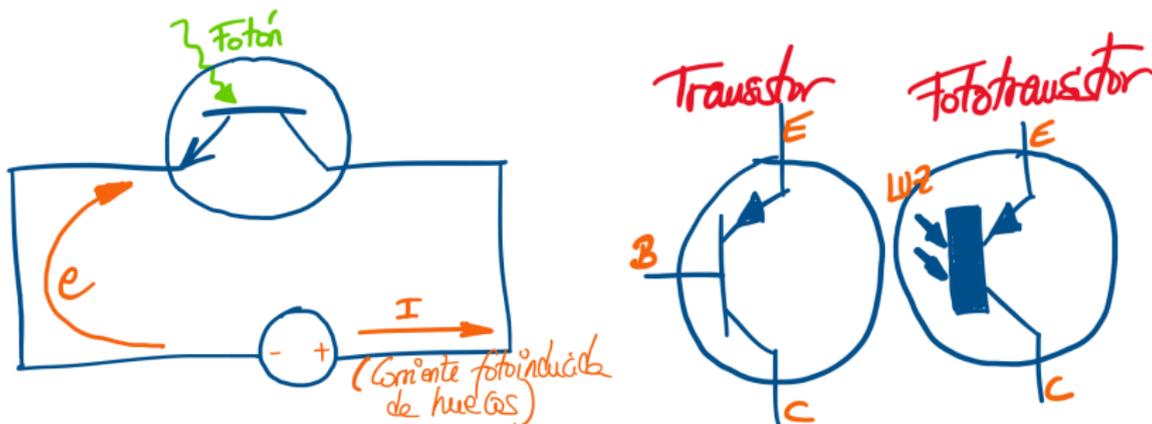


- Aplicaciones diversas: detectar/medir presencia/distancia objeto.
 - Objeto reflectante, ranuras transparentes/opacas en encoder óptico.
 - Y calibrando el sistema: distancia a objeto, intensidad de color.

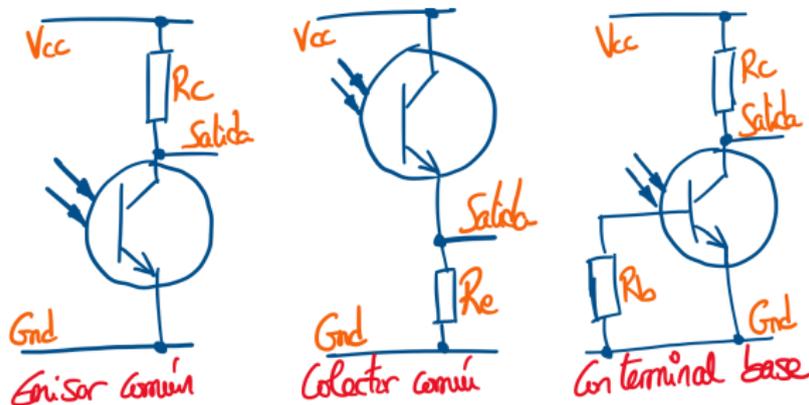


- Configuraciones del IRLED + elemento fotosensible:
 - De retroreflexión: emisor+receptor en un lado, reflectante en otro.
 - De barrera: emisor y receptor en lados opuestos (encoder, presencia).
 - De reflexión directa: emisor+receptor en un lado, reflexión en objeto.

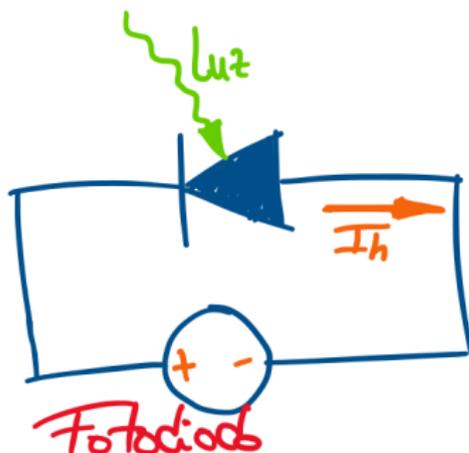
- IRLED es fuente de luz, se necesita elemento fotosensible detección.
 - Elem. fotosensible puede ser: fotodiodo o fototransistor.
- Fototransistor: transductor entre luz y señal eléctrica.
 - Convierte energía contenida en fotón en par electrón-hueco (e^- , h^+).
 - Hueco: no es partícula, sino la falta de electrón \Rightarrow carga +.



- Al conectar fuente de V en circuito base-emisor-colector...
 - ...se busca que la unión base-emisor se polarice en inversa...
 - ...para que, al percibir luz en la base, se genere $I_{\text{fotoinducida}}$.

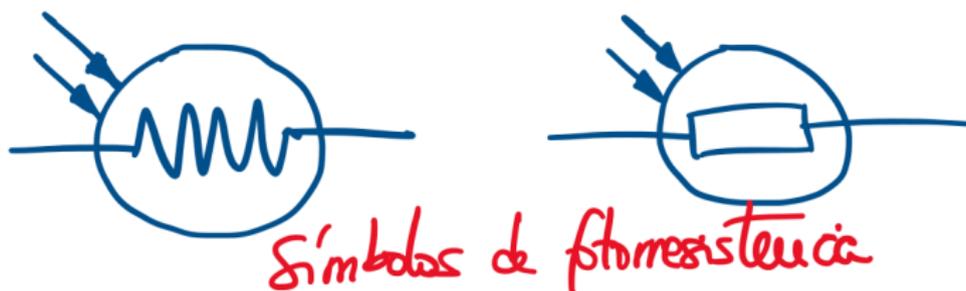


- **Emitor común:** generar cambio en señal eléctrica, de alto a bajo.
 - Conectar colector a fuente de V a través de resistencia de carga.
 - Emisor se conecta a tierra, y V_{out} se mide en colector.
 - Uso: como amplif., de la I generada en base, por presencia de luz.
- **Colector común:** cambia de bajo a alto en presencia de luz en base.
 - Emisor se conecta a tierra a través de resistencia de carga.
 - Colector conectado a fuente de V^+ ; V_{out} se mide en emisor.
- **Con terminal base:** cuando se desee \uparrow o \downarrow nivel luz permisible...
 - ...que provoque cambio de estado en el fototransistor.



- Dispositivo óptico semiconductor (SC) con propósito=fototransistor.
- En directa (P a V^+ y N a V^-) es como diodo común (unión PN).
 - *Corriente de oscuridad*: I que circula por diodo gracias a fuente V .
 - Cuando diodo se expone a luz, incremento de I despreciable (≈ 0).
- En inversa, *corriente de oscuridad* ≈ 0 . Con luz, incremento $\uparrow\uparrow$.
 - e^- generados por efecto fotoeléctrico fluyen hacia V^+ (Fig. dcha.).
 - O, dicho de otro modo, se genera un flujo de huecos I_h hacia V^- .

- Tipos:
 - PN: fue el 1º. \downarrow rendimiento \implies mejorado por nuevos con = ppio.
 - PIN: incluye material P , N e I (SC Intrínseco = puro, sin impurezas).
 - De avalancha: \uparrow ganancia \implies se usa solo en sitios con \downarrow irradiación.
 - Schottky: basado en diodo Schottky. Ideal para aplicac. en \uparrow frec.
- Modos de operación de un fotodiodo:
 - Fotovoltaico: operar al fotodiodo como una fuente de corriente.
 - Fotoconductor (conv. luz-voltaje): se aplica V en inversa en fotodiodo.



- Elemento resistivo cuya magnitud de su resistencia es \propto luz.
- Transductor entre luz incidente y resistencia eléctrica a la salida.
- Usos: sistemas de control ilumin. alumbrado, fotografía, pantallas.
 - También como sensor de presencia, forma e, incluso, color.
- Ppio. físico: al incidir luz, $\uparrow n^{\circ}$ pares $e^{-} - h^{+}$ libres...
 - ...para conducción $\implies \downarrow$ la resistividad del material.
 - Si conectamos esta resistencia a batería \implies varía I_{circuito} .
- Ef. fotoeléctrico: \downarrow iluminación $\implies R_{LDR} \uparrow$, y v_{cvsa} .

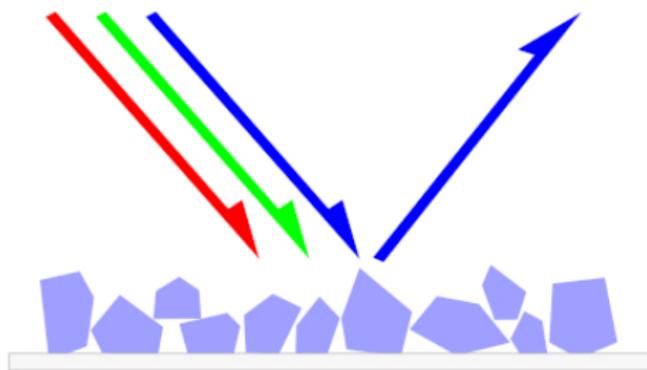
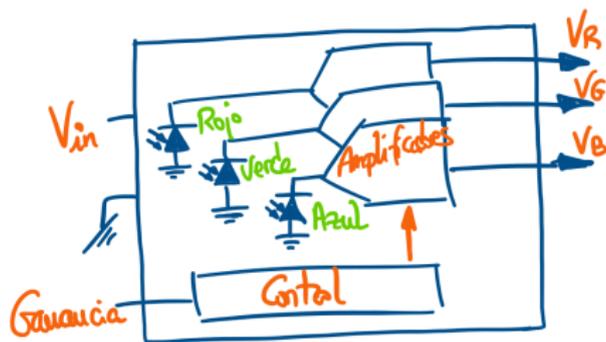


Figura: Imagen extraída de Wikipedia

- El color que percibimos se debe a la long. de onda reflejada en objeto.
 - E.g. percibir azul: objeto absorbe todas long. onda excepto azul.
- Ojo humano puede absorber algunas long. de onda y otras las rechaza.
- Sensores basados en: filtros de color o en irradiación/reflexión luz.
 - Usos: ajuste color impresora, sist. control según color, videojuegos.



- Sensor de color basado en filtros de color:
 - Es lineal; proporciona V_{out} directa/ \propto irradiación.
 - Tres salidas/canales/fotodiodos, cada uno con filtro de color R,G,B.
 - E.g. con objeto azul, V_B es mayor que V_R y V_G .
 - Normal/ se añade pin de ganancia para calibrarlo según luz ambiente.
- Sensor de color basado en irradiación de fuente de color fija:
 - Incluye luz propia, que se hace incidir sobre objeto a detectar.
 - Además de un elemento fotosensible para medir I de luz reflejada...
 - ...lo que supone una gran dvtaja.; ha de ser calibrado para cada color.
 - Tipos: luces (R,G,B) compactadas en LED RGB, o tres ledes separados.
 - Ppio.: al incidir luz azul sobre objeto azul, este la refleja intensa/.

- Para obtener información del entorno mediante captura de imágenes.
 - Imágenes pueden ser en color, escala de grises, monocromático, etc.
 - Imágenes compuestas por píxeles; cada uno obtenido por celda unitaria.
 - Celdas se basan en efecto fotoeléctrico: convertir luz en corriente.
- Celdas compuestas por sensores de estado sólido cuya tecnología es:
 - CCD: + extendido hasta aparecer CMOS.
 - SuperCCD: optimización del CCD para mejorar sensibilidad.
 - CMOS: + extendido actual/ por facilidad y < coste de fabricación.
 - Foveon X3: CMOS marca Foveon, no realiza interpolación de colores.
- Uso extendido: teléfonos, coches, cámaras, seguridad, robótica con IA.

- CMOS = Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.
- Usado por mayoría de circuitos integrados ($\mu Proc$, memorias, etc.).
- Formado por la unión de transistores $pMOSFET$ y $nMOSFET$.
 - MOSFET = *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor*.
 - Configurados para que, en reposo, $E_{consumida} = I_{parasitas}$ (solo).
 - (p-n)MOS con p en *modo enriquecimiento*: si $p = 1 \implies n = 0$.
 - nMOS: D conectada a tierra ($V_{SS} = 0$) $\implies \nexists I_S \implies V_{DD}^{salida} = 0$.
 - pMOS, por contra, sí está en estado de conducción $\implies V_{DD}^{salida} = 1$.
- Corolario: C (de CMOS) se debe al modo de trabajo Complementario.
 - Cuando un transistor está encendido, el otro está apagado (y vcvsa.).

- Historia: < 60s, lógica se solía implementar con transist. bipolares.
 - NPN (E=N,B=P,C=N) +usado; movilidad $e^- > h^+$ en SC $\implies I \uparrow$.
 - Entonces, $V_{CC} = V^+$ (C=Colector) y $V_{EE} = V^+$ (E=Emisor).
- En > 60s se empezó a usar el tr. unipolar (FET), y los voltajes son:
 - V_{DD} : alimentación positiva (**D**rain \cong agotar \cong va de + \rightarrow -).
 - V_{SS} : alimentación negativa (**S**ource \cong fuente,nacimiento \cong - \rightarrow +).
- Con CMOS no tiene sentido. Tiene canales N y P complement. (T.4).
 - Formado por unión de p MOSFET y n MOSFET ¡en igual $n.^{\circ}$!
 - Por tanto, si $n.^{\circ} P = n.^{\circ} N \implies V_{DD}$ no es más + que V_{SS} .
 - Pero, por razones históricas, V_{DD} y V_{SS} se siguen usando así.
- Corolario: V_{CC} y V_{EE} para tr. bipolares; V_{DD} y V_{SS} para unipolares.
 - En la práctica, $V_{CC} \cong V_{DD}$ y $V_{EE} \cong V_{SS}$.

- *Letter Symbols for Semiconductor Devices* (IEEE Std. 255-1963)
- Símbolos en mayúscula: máximo (pico), media (CC) (e.g. I, V, P).
- Símbolos en minúscula: para valores instantáneos (e.g. i, v, p).
- Subíndice mayúsc.: valor de CC y valor inst. total (e.g. i_C, p_C).
- Subíndice minúsc.: valores de CA (e.g. i_c, I_c, v_{eb}, P_c).
- Se duplica subínd. alimentación tensión para evitar ambigüedad.
 - Ejemplos, los que hemos visto: $V_{CC}, V_{DD}, V_{EE}, V_{SS}$.
- Tres subínd. alimentación tensión: indica el terminal de referencia.
 - V_{CCB} : voltaje en Colector, con la Base como referencia.
 - V_{CC} : voltaje en Colector, con toma de tierra como referencia.
 - ¿Y si, p. ej., dispositivo tiene dos Bases? No podríamos usar V_{BB} .
 - Se especificaría V de Base 1 a Base 2 así: V_{B1-B2} .
 - Más interesante, ¿cómo poner V de Base de Disp. 1 a Base de Disp. 2?
 - En este caso, la sintaxis no es quizás tan obvia: V_{1B-2B} .

4. Sensores de color, luz y visión

Julio Vega

julio.vega@urjc.es



Sensores y actuadores

5. Sensores de nivel y proximidad

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyc

 Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.

Contenidos

- 1 Ultrasonidos
- 2 Sensor resistivo
- 3 Sensor óptico
- 4 Sensor inductivo
- 5 Sensor capacitivo
- 6 Reed switch (interruptor de lengüeta)
- 7 Efecto Hall

- Ultrasonido: cuando $frec. > frec. \text{ audible oído humano } (\approx 20\text{KHz})$.
- Basada en efecto Doppler, pues onda es atenuada por objeto a medir.
 - Y es la medición de esa atenuación (por receptor) la clave del sensor.
- El núcleo del sensor es un material piezoeléctrico.
 - Recordemos, piezoelectricidad: V_{out} debido a F_{in} o F_{out} debido a V_{in} .
 - Onda us. generada por deformación del material, que es excitado (V_{in}).
- Funcionamiento: emisión cíclica de onda de $\uparrow\uparrow$ frec. y $\downarrow\downarrow$ duración.
 - Onda se propaga por medio hasta ser reflejada en objeto y volver eco.
 - Circuito acondiciona/ determina periodo entre emisión y recepción:

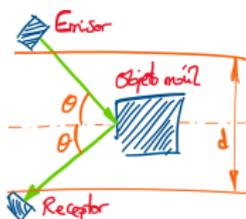
$$d = \frac{1}{2} v_s t \quad (1)$$

donde:

d : distancia del emisor-receptor al objeto [m]

v_s : velocidad del sonido

t : tiempo transcurrido [s]



- E. Doppler: cambio aparente de frec. onda al rebotar en objeto móvil.
- El cambio de frec. es \propto vel. relativa del emisor reflector:

$$\Delta f = f_e - f_r + 2f_e \frac{v}{v_s} \cos\theta \quad (2)$$

f_e : frecuencia emitida

f_r : frecuencia recibida

θ : ángulo entre velocidad y dirección de propagación

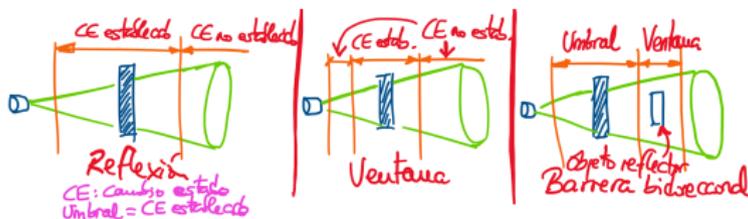
v_s : velocidad del sonido

v : velocidad del objeto o fluido

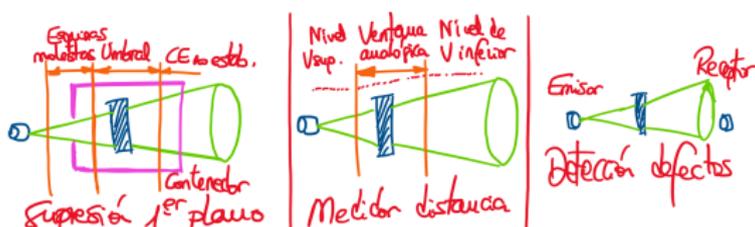
Δf : diferencia de frecuencias

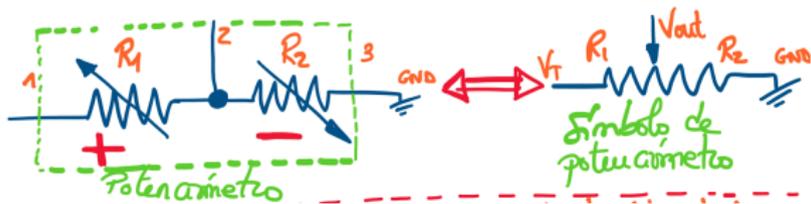
- Respecto al tiempo que tarda desde emisor hasta llegar a receptor:

$$t = \frac{(d/\text{sen}\theta)}{v_s + v\text{cos}\theta} \quad (3)$$

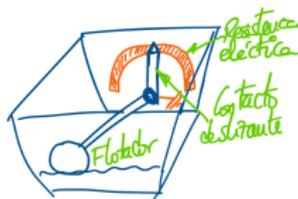


- Reflexión: similar a sensor de presencia convencional (ópt., magnét.).
- Ventana: tiene cambio de estado cuando objeto dentro de ventana.
- Barrera bidirecc.: como anterior, y requiere objeto reflector en ventana.
 - Útil para objetos de difícil detección; e.g. superficies irregulares.
- Supresión 1^{er} plano: como ventana pero evita esquinas indeseables.
 - E.g. líquido en botella, pues medición afectada por boca de botella.
- Medidor dist.: se diseña ventana cuyos límites corresponden a V o I ...
 - ...medido en receptor. Esta salida es, en general, analógica.
- Det. defectos: emisor-receptor enfrentados, detectar defectos objetos.
 - Deben ser finos, no aislantes ni absorbentes: hojas, láminas, cartones.





- Uso como transductor entre cambio resist. y nivel llenado líquido.
 - En Tema 3 lo vimos para medición de pos. angular: potenciómetro.



- Ahora, elem. móvil es un flotador situado en contenedor.
 - Se suele usar pot. rotacional, aunque también se podría con lineal.
 - Al \uparrow nivel en contenedor \implies cambio de resistencia.
 - Si elem. móvil se mueve en sentido $+$ $\implies R_{1-2} \downarrow, R_{2-3} \uparrow$.
 - Si elem. móvil se mueve en sentido $-$ $\implies R_{1-2} \uparrow, R_{2-3} \downarrow$.
 - Para saber en qué punto está el elem. móvil, se usa un divisor de V :

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_T \quad (4)$$

- Para uso como medidor prox. se suele emplear modo reflexión directa.
 - Intensidad señal en receptor depende de proximidad de objeto a emisor.
 - Recordemos las configuraciones y aplicaciones que vimos en Tema 4.
- Lo más habitual es configurar el fototransistor en modo activo.
 - Medir cambio de V según intensidad luz recibida por elem. fotosensible.
 - En este modo se debe cumplir la siguiente condición:

$$V_{CC} > R_L \cdot I_C \quad (5)$$

donde:

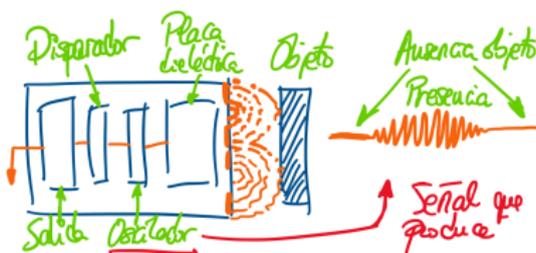
R_L : resistencia de carga

I_C : corriente del colector

V_{CC} : voltaje de alimentación

- Ppio.: la inductancia de una bobina cambia en presencia de conductor.
- La bobina está colocada como parte de un circuito de puente.
- Sensor autoinducido, pues conductor cambia L equiv. de ese circuito.
- Además de bobina+núcleo, sensor requiere de estos componentes:
 - Circ. oscilador: induce campo magnét. emitido por sensor ($I_{Faucault}, T.1$).
 - Circ. detector: percibe cambio amplitud de ese campo \rightarrow señal acond.
 - Circ. acondiciona/: genera salida sensor = cambio estado bajo \rightarrow alto.
- Vtja.: no requieren contacto con objeto a detectar $\implies \downarrow$ desgaste.
- Dvtja.: solo sensitivos a conductores, y dist. det. según conductor.

- = sensores US, detecta casi cualquier material (conductor o no).
- Usado como sensor nivel y proxim., generan un campo electrostático.
 - C. electrost.: influencia de cargas sobre el espacio circundante.
 - VS. sensores inductivos de proxim. (que generan campo electromag.).
 - Depende direcc. propagación y afecta a partículas cargadas eléctrica/.
 - Formado por dos electrodos dispuestos como discos concéntricos.
 - Si objeto aproxima, altera campo electrost. y capacitancia circuito.
 - Cambio capacit. \implies cambio estado \implies activa circuito oscilador.
 - Osc. dispara circ. activador \implies salida: cambio estado bajo \rightarrow alto.



- Alteración campo electrost. diferente objeto conductor o dieléctrico¹.
 - ¹ \downarrow conduct. (aislante) y forma dipolos eléctricos bajo campo eléctrico.
 - Todo material dieléctrico es aislante, pero no al revés.
 - Capacitancia \propto cte. dieléctrica \implies \uparrow cte. dieléct. \implies \uparrow detección.
 - Cte. dieléct. líquidos \ggg sólidos \implies Uso: nivel líquido en botes.
 - Dvtjas.: + costosos que inductivos y - distancia detección que ópticos.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (6)$$

donde:

C : capacitancia [F]

ε_0 : permitividad relativa del vacío [$\frac{F}{m}$]

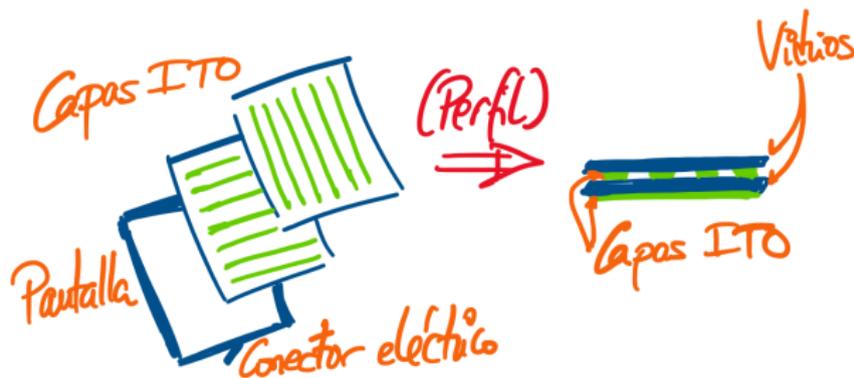
ε_r : permitividad relativa del medio

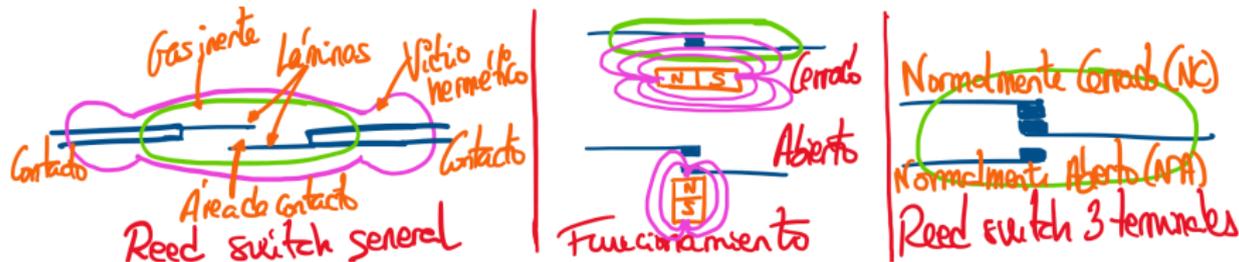
A : área de solape de los electrodos [m^2]

D : distancia entre los electrodos [m]

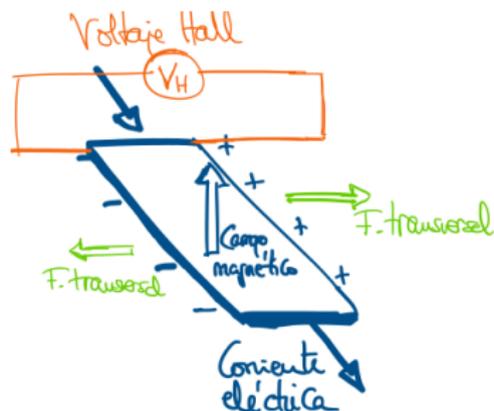
- + área de solape y + próximos unos con otros $\implies \uparrow$ capacitancia.
- Si placa conductora como uno de los electrodos se forma capacitor...
 - ...parásito (C_0) entre electrodo y ambiente (aire es el dieléctrico).
- Al acercar el otro conductor, se forma un capacitor llamado C_T .
 - E.g. touch: capacitores conectados en paralelo $\implies \uparrow$ capacitancia.

- Diferencia con convencionales: input = capacitancia cuerpo humano.
- Muy usados en pantallas táctiles, *smartphones*, ordenadores, *tablets*.
- Capa de aislamiento eléctrico (cristal) + recubrimiento conductor.
 - Placa conductora: sirve como un electrodo del capacitor o botón táctil.
 - General/ de ITO (*Indium Tin-doped Oxide*, óxido de estaño indio).
- Cuando conductor (dedo humano) se acerca, se forma capacitor C_T .
- Según res. en cada pos. de placa, se tiene un valor de capacitancia.
 - Al tocar una zona \Rightarrow \uparrow su capacitancia \Rightarrow conoce posición (x,y).
 - Considerando panel HD (640×480), con 2 capas ITO formando matriz.
 - \uparrow calidad \Rightarrow mejor respuesta. Incluso hay *multitouch*.





- Transductor entre un campo magnético y un contacto mecánico.
- Incluye 2/3 láminas ferromagnét. atraídas al inducir campo magnét.
 - Según dirección de campo, el contacto mecánico se abre o cierra.
 - Se cierra si eje polo magnét. \parallel eje switch. Se abre si están \perp .
 - Si es de 3 terminales, tiene 2 contactos: uno NA y otro NC.
- Láminas son de Ni-Fe y están en gas inerte (N), protegidas del medio.
- Vtjas.: \downarrow coste y funciona/ sencillo (vida \approx billones conmutaciones).
- Dvtjas.: $\uparrow T.^{\circ}$ conmutación bajo \rightarrow alto \implies malo tareas \uparrow frec.



- Se requiere campo magnét. (imán permanente) y placa conductora.
- Ppio.: convertir campo magnét. en voltaje (voltaje Hall).
 - Corriente I en presencia de campo magnét. B , surge F . transversal...
 - ...que busca equilibrar el efecto de ese campo, produciendo tensión V_H .
- Formado por amplif. V y cir. comparador, emite señal cambio estado.
 - Cuando obj. se acerca $\implies V_H \implies$ se amplifica \implies bajo \rightarrow alto.
 - Uso como sensor prox.: acoplar imán a objeto; si se acerca $\implies V_H$.
 - Si obj. ferromagnét., se usa imán cerca; campo debilita si obj. acerca.
- Usos: sensores en automóviles, alarmas puertas/ventanas, encoders.

5. Sensores de nivel y proximidad

Julio Vega

julio.vega@urjc.es



Sensores y actuadores

6. Sensores de temperatura y humedad

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyc

 Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.

Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Termistor
- 3 Termopar o termocupla
- 4 Sensor de temperatura resistivo (RTD)
- 5 Sensor de temperatura basado en diodos semiconductores
- 6 Pirómetro: medidor de temperatura a distancia
- 7 Sensor de humedad

- Definiciones de temperatura:
 - Energía calorífica que indica la intensidad de calor de un objeto.
 - Medida promedio de la energía cinética de las partículas de la materia.
 - Energía asociada a los movimientos de las moléculas del sistema.
- Escala de $T.^a$: relación continua entre la propiedad termométrica...
 - ...de una sustancia específica y la temperatura.
 - E.g.: agua contenida en tubo \rightarrow prop. term. = presión del vapor.
 - Estándares: Fahrenheit, Celsius, Kelvin, Rankine.
- Las propiedades físicas de los cuerpos suelen variar con temperatura.
 - E.g.: densidad, solubilidad, dureza, elasticidad, área, volumen.
 - Dispositivos que sensan $T.^a$ aprovechan material del que están hecho.
 - E.g.: radiación emitida, cambio resistividad o volumen del material.
- Categorías de transductores que convierten $E.^a$ térmica en otro tipo:
 - Termómetros: de líquido (alcohol y mercurio) en vidrio y bimetalico.
 - Sistemas termales: líquidos orgánicos, vapor orgánico, gas y mercurio.
 - Termoeléct.: termistor, termopar, bulbo de resist. eléct. y pirómetro.
 - Relacionan variación de $E.^a$ térmica con variación \propto señal eléctrica.
 - Basados en propiedades eléctricas de conductores y semiconductores.

- NTC vs. PTC: Coeficiente de Temperatura Negativo vs. Positivo.
- Resistencia hecha con semiconductor sensitivo a variaciones de $T.^a$.
- Varía su valor resistivo según los cambios de la energía térmica.
- Semiconductor NTC, si $\uparrow T.^a \implies \downarrow Res_{electr.}$ (inversa metal puro).
 - Los de coeficiente de $T.^a$ positivo (PTC) actúan = metales.

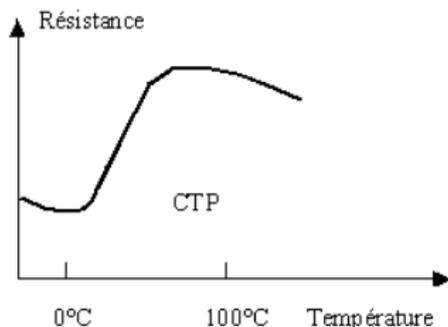
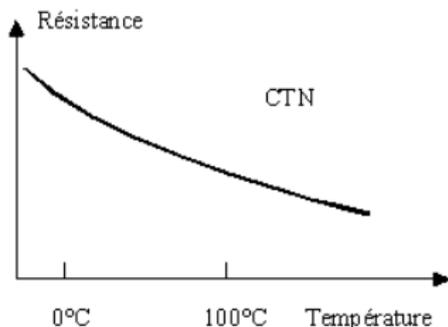


Figura: Imagen extraída de Wikimedia Commons

- La función que relaciona la R con la T en los NTC es exponencial:

$$R_{NTC} = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

donde:

R_{NTC} : resistencia del termistor NTC a $T = T$ en Kelvin [Ω]

T_0 : temperatura de referencia [K], normal/ 298K (25°C)

R_0 : resistencia de referencia; R_{NTC} a $T = T_0$ [Ω]

β : constante de la NTC, según composición y fabricación [Ω]

T : temperatura que se está intentando medir [K]

- Debido a que la circulación de corriente calienta el dispositivo.
 - Esto conlleva un error de $\pm 0,3^{\circ}C$ en rango $[0 - 50]^{\circ}C$.
 - A partir de A, los efectos del autocalentamiento son más evidentes.
 - Con $I \downarrow \downarrow$ (antes de A) \approx Ley de Ohm: R no varía; $V \propto I$.

$$P_{NTC} = \delta_d (T - T_{amb}) \quad (2)$$

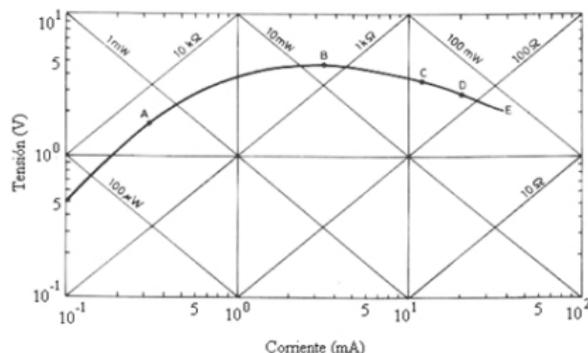
donde:

P_{NTC} : potencia consumida por termistor NTC [W]

T : temperatura de trabajo [K]

T_{amb} : temperatura ambiente [K]

δ_d : cte. disipación de calor $[\frac{W}{K}]$ dada por fabricante (para el aire).



- Configuraciones comunes en circuitos electrónicos:
 - Medidor de corriente.
 - Regulador de tensión.
 - Control de temperatura.
- Ventajas:
 - Rápido.
 - Alta sensibilidad.
 - Implementación fácil.
 - Bajo coste.
- Desventajas:
 - No lineal.
 - Rango de temperaturas limitado.
 - Requiere fuente de corriente.
 - Autocalentamiento.

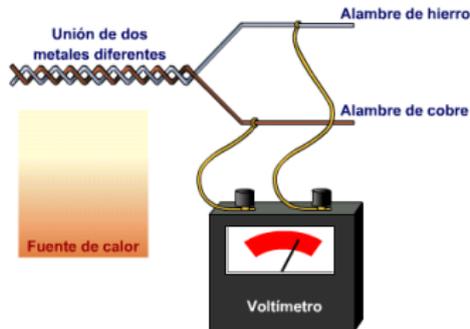
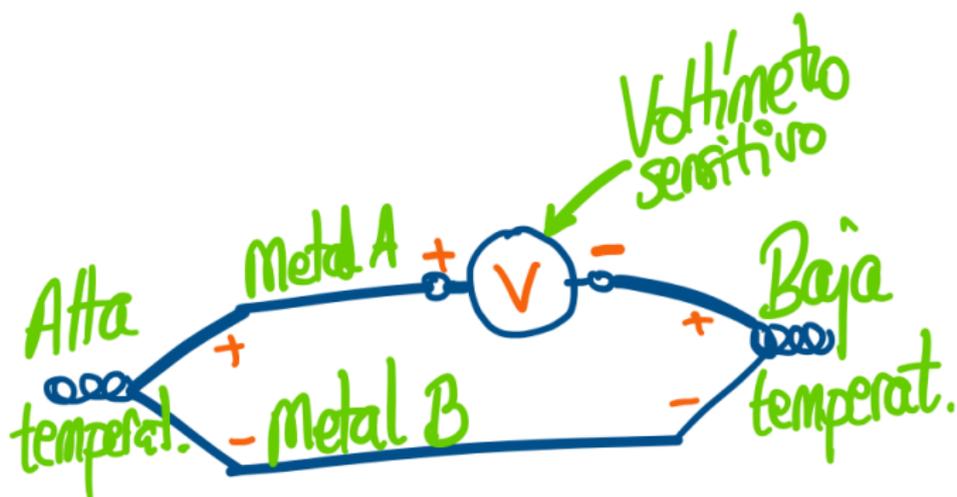


Figura: Imagen extraída de Wikimedia Commons

- Es uno de los dispositivos más usados en la industria para medir $T.^a$.
- Está formado por dos conductores; uno hace de + y otro de -.
- Fenómeno Thomas Seebeck. Con estas condiciones se genera I :
 - Dos conductores metálicos con propiedades \neq , enrollados en bucles.
 - Bajo una fuente de calor, las $T.^a$ s de estos bucles serán \neq .
- Fenómeno Seebeck se basa en otros dos fenómenos de la física:
 - Peltier: se absorbe/libera calor al circular I por la unión de dos...
 - ...metales distintos, pues \exists desbalance de energía de los e^- libres.
 - Thomson: se absorbe/libera calor al circular I por metal homogéneo...
 - ...sometido a gradiente de $T.^a$.



- Si se abre circuito $\implies \exists$ fuerza termoelectromotriz: $e_{AB} = \alpha T$.
 - Esta fuerza depende del tipo de conductores y de $\Delta T (A - B)$.
 - $\alpha =$ coef. Seebeck = ΔV producido por ΔT_{AB} (\implies F.E.M. [V/mV]).
- En cada bucle, ΔT genera dos V (V_A, V_B) con polaridades opuestas.
 - Así, V_{Bucle} necesaria para conducir corriente es: $V_{Bucle} = |V_A - V_B|$.

- Ley de circuito homogéneo (LCH):
 - En circuito con un conductor metálico homogéneo no se puede...
 - ...percibir una corriente eléctrica por el efecto único de la T .^a.
- Ley de los metales intermedios:
 - Si en circuito formado por varios conductores $T = cte. \implies \sum_e = 0$.
- Ley de las temperaturas sucesivas:
 - En circuito con tres conductores (A, B, C): $e_{AC} = e_{AB} + e_{BC}$.

- Para leer correcta/ $V_{Seebeck}$ no se hace directa/ sobre termopar.
 - Al conectar voltímetro, cables crean una nueva unión termoeléctrica.
 - E.g.: termopar cobre-constantán y cables voltímetro también de cobre:
 - a) Se tendrá una unión cobre-cobre $\implies \nexists e$ (según LCH).
 - b) Otra unión cobre-constantán con V no deseado \implies error lectura.
 - Solución: saber V generado por unión de termopar a $T.^a$ conocida.
 - E.g.: a 0°C (inmerso en agua con hielo), esta será unión de referencia.
 - Según el uso, \exists diversas combinaciones o tipos de calibraciones:
 - T: cobre (+) y constantán (aleación 60% cobre + 40% níquel) (-).
 - Rango de operación: $0^\circ - 350^\circ\text{C}$ ($> 350^\circ\text{C}$ Cu oxida). Cu y Ni baratos.
 - J: Fe (+) y constantán (-). Rango $< 700^\circ\text{C}$ ($> 700^\circ\text{C}$ Fe oxida). Barato.
 - K: 90% Ni + 10% Cr (+) y 94% Ni + 2% Al + 3% Mn + 1% Si (-).
 - Rango $< 1200^\circ\text{C}$. Muy usado en industria de fundición. Coste elevado.
 - R: aleación 87% platino + 13% sodio (+) y alambre de platino (-).
 - Rango $< 1500^\circ\text{C}$. Muy usado en la industria. El + caro, por platino.

- Ventajas:
 - Implementación simple y fácil.
 - Bajo coste.
 - Amplio rango de temperaturas.
- Desventajas:
 - No lineal.
 - Bajo voltaje.
 - Requiere referencia.
 - Baja estabilidad.
 - Baja sensibilidad.

- Opera = termistor coeficiente $T.^a$ positivo = metales: $\uparrow T \implies \uparrow R$.
- Función que relación la resistencia del RTD y la $T.^a$:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (3)$$

donde:

R_0 : resistencia a la temperatura de referencia T_0 [Ω]

ΔT : desviación de temperatura respecto a T_0 ($\Delta T = T - T_0$) [Ω]

α : coeficiente de temperatura del conductor a $0^\circ C$

- Tipos de fabricación: de bobina o alambre y de película delgada.
- Materiales: platino (Pt), níquel, níquel-hierro, cobre y tungsteno.
 - El + usado: Pt, por su estabilidad, exactitud y amplio rango de T .^a
 - E.g.: sensor Pt100 o Pt1000 presentan $R = 100\Omega$ o $R = 1000\Omega$ a 0°C .
 - Dvtja.: Pt tiene \downarrow resistividad \implies necesaria bobina-Pt para $\uparrow R$.
 - Hace que su precio, volumen y masa sea $>$ termopar y termistor.

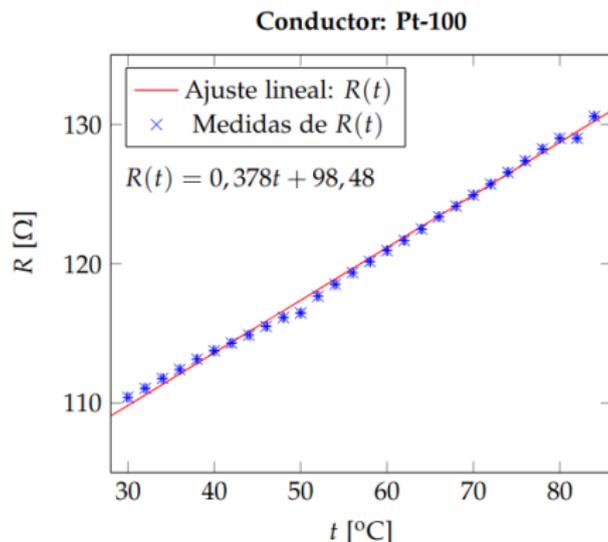


Figura: Imagen extraída del artículo *Variación de la resistencia de un conductor y un semiconductor con la temperatura*, J. Estévez

- Ventajas:
 - Alta estabilidad.
 - Alta precisión.
- Desventajas:
 - Coste elevado.
 - Lento.
 - Requiere fuente de corriente.
 - Poco cambio en la resistencia.
 - Medida con puente (4 conductores).

[Ej.: Configuración del sensor RTD como circuito puente Wheatstone]

- Es aplicación más simple de las uniones semiconductoras en sensores.
 - T.4: *fordiodo*_{directa} ($P-V^+$ y $N-V^-$) = diodo común (unión PN).
 - Uso diodo: dejar fluir corriente en un solo sentido, cuya respuesta es:

$$I = I_S \left(e^{(V_D/nV_T)} - 1 \right) \quad (4)$$

donde:

I : intensidad de la corriente que atraviesa el diodo [A]

V_D : diferencia de tensión entre sus extremos [V]

I_S : corriente de saturación ($\approx 10^{-12}A$)

n : coeficiente de emisión según fabricación (rango [1 – 2])

V_T : voltaje térmico ($\approx 25,85mV$ a $T.^a$ ambiente ($20^\circ C$))

$V_T = \frac{kT}{q}$: $k =$ cte. Boltzmann; $T = T.^a$ unión PN; $q =$ carga de e^- .

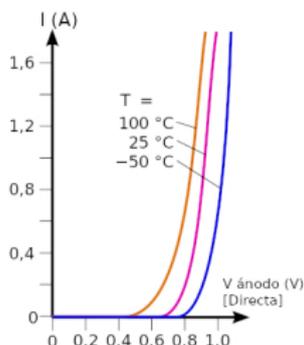


Figura: Imagen modificada de original extraída de Wikipedia

- Diodo presenta gran variación de curva $V - I$ por gradiente de T .^a
 - Por tanto, sirve para medir T .^a. Necesario hacer buena calibración.
- En directa tiene un coef. T .^a $\approx 2,3mV/^\circ C$, y variación \simeq lineal.
 - Por tanto, se debe mantener corriente básica de excitación estable.
 - Para ello, usar *fuentes*_I cte. o R conectada a *fuentes*_V estable.
- Corolario: al usar un diodo, podemos tomar en consideración que...
 - ...los cambios de T .^a pueden representarse como variaciones de V .

- LM35 de Texas Instruments.
 - Precisión = $\pm 1^{\circ}C$ en rango = $[-55, +150]^{\circ}C$.
 - Salida lineal $\approx 10mV/^{\circ}C$.
 - Opera con rango entre 4 – 30V de alimentación.
 - Bajo autocalentamiento.
- TMP36 de Analog Devices.
 - Precisión = $\pm 2^{\circ}C$ en rango $[-40, +125]^{\circ}C$.
 - Alta precisión: la precisión indicada es ¡sin ser calibrado!
 - Salida lineal similar al anterior.
 - Bajo voltaje: opera con rango entre 2,7 – 5,5V de alimentación.

- Usa visión para detectar variaciones del ancho banda de radiación...
 - ...emitida por algún objeto sólido bajo la acción de la temperatura.
- Cada color incandescente tiene asociado una temperatura.
 - Rango de temperatura de objeto detectable = $[700, 1300]^{\circ}\text{C}$.
- Compara radiación filamento (f , lámpara) de referencia vs. obj. (o).
 - Fig.: $T_f < T_o \parallel T_f = T_o \parallel T_f > T_o$.



Figura: Imagen extraída de Wikimedia Commons

- Tiene lente de fluoruro de calcio que concentra radiación de objeto.
- Se envía radiación a *termopila* (cjto. termopares en serie).
- Su funcionamiento se basa en la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T_e^4 \quad (5)$$

donde:

E : energía emitida por la superficie de un cuerpo negro [W/m^2]

T_e : temperatura efectiva o temperatura absoluta de la superficie [K]

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$)

- La humedad = $n.^{\circ}$ moléculas de agua [H_2O] presentes en sustancia.
 - Su magnitud es $\propto n.^{\circ} [H_2O]$ absorbidas en tal sustancia.
 - E.g. en atmósfera, se refiere a $n.^{\circ} [H_2O]$ (vapor) en aire.
- Este sensor se basa en capacidad absorción de algunos materiales...
 - ...y que altera sus propiedades físicas, químicas y biológicas.
- H. absoluta $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$: relación entre $n.^{\circ} [H_2O]$ en sustancia y volumen.
 - Cambios $T.^a \rightarrow$ cambios densidad sustancia \rightarrow cambios humedad.
 - E.g. aire: $\downarrow T.^a \implies$ condensación vapor $\implies \uparrow$ h. abs.
- H. relativa (%): relación entre $n.^{\circ}[H_2O]$ en gas y $n.^{\circ}[H_2O]$ que este...
 - ...contendría en estado de saturación sin producirse condensación.
 - Por tanto, cuando humedad real = máx. posible \implies h. rel. = 100 %.
- H. específica: relación entre masa de agua y masa de sustancia seca.
 - E.g. para el aire = masa vapor de agua (kg.) / masa aire seco (kg.).



Figura: Imagen extraída de Mouser

- Formado por dos electrodos que determinan la humedad en sustancia.
- Al inicio el circuito está abierto, los electrodos no están conectados.
- Al insertarlos en sustancia, esta hace de R que los une eléctrica/.
- Corriente que pasa por electrodos depende de humedad de sustancia.
 - \uparrow humedad \implies \uparrow conductividad \implies \uparrow flujo de corriente.
- Puede incluir potenciómetro para calibrar humedad de referencia.
 - El estado digital de su salida es bajo si $h.$ detectada = $h.$ referencia.

6. Sensores de temperatura y humedad

Julio Vega

julio.vega@urjc.es



Sensores y actuadores

7. Sensores de fuerza, torque y deformación

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyc

 Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga 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) Δ deformación $\implies \Delta R$; (b) \uparrow presión $\implies \uparrow V$.
- 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.^a vez usado en 1930 para medir deformaciones (Simmons y Ruge).
- Factor de galga (GF): correlación entre deformación y ΔR :

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

donde:

R_0 : resistencia inicial de la galga [Ω]

ΔR : variación de la resistencia debido a deformación [Ω]

ε_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 $\approx 0,025\text{mm}$. Longitud = $[0,25\text{mm}, 15\text{cm}]$.
 - Aleaciones + usadas: constantán (Cu+Ni), karma (Cr+Ni).
 - Constantán tiene sensibilidad lineal en gran rango de deformaciones.

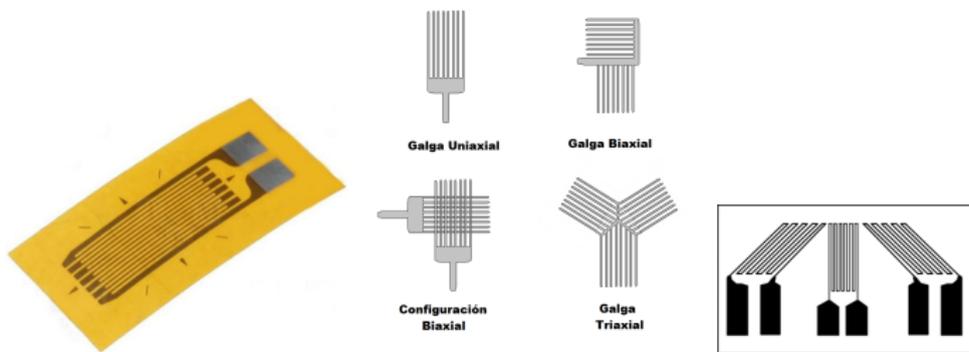
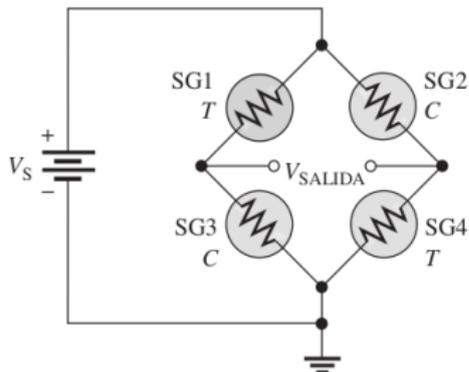
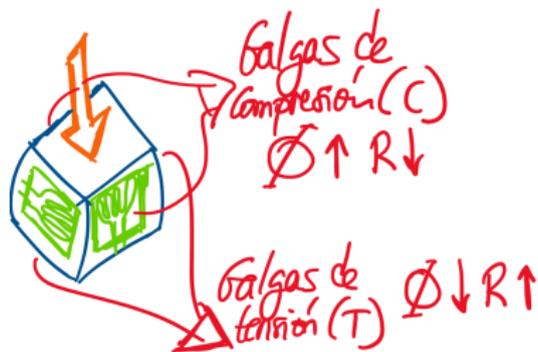


Figura: Imágenes extraídas de (a) sensoricx.com y (b,c) Wikipedia

- 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° .
 - Dos galgas miden ΔL_{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): 1 ó + col. con 2 galgas/col.
 - Galga axial (mide $\Delta L_{columna}$) y galga transversal ($\Delta grosor$).
 - Rango medición = 22 kg – 200 Tm 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 = 10 kg – 50 Tm 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:
 - 10 kg – 10 Tm 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: 2,5 kg – 2 Tm 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: $t_{respuesta} < 5\mu s$. Rango medición = $[4,4 - 440]N$.
- FSR: $t_{respuesta} \approx Flexiforce$. Rango medición = $[1 - 100]N$.
- Para acondicionar la salida se suele usar circuito amplif. inversor.
 - Es un sensor resistivo $\implies V_{out}$ cambia $\propto R_{sensor}$.
 - Para medir \uparrow cargas: \uparrow área_{deteccion} y $\downarrow V_{in}$ o $\downarrow ganancia_{amplif.}$.
 - Medir \downarrow cargas: necesaria \uparrow sensibilidad $\implies \uparrow V_{in}$ o $\uparrow ganancia_{amplif.}$

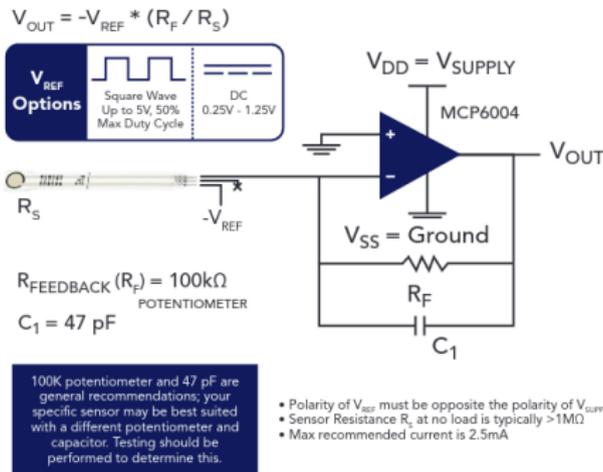


Figura: Imagen extraída de Flexiforce A201 datasheet

- 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.]

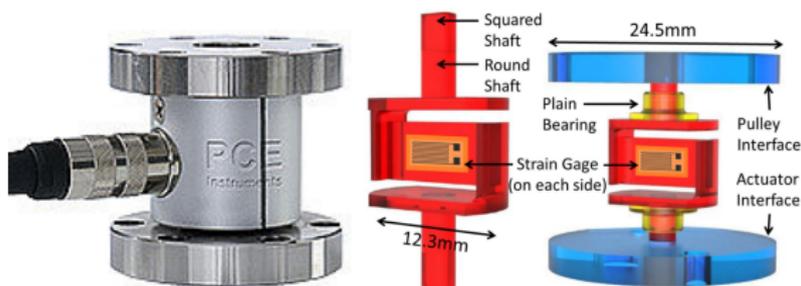


Figura: Izda. de pce-instruments.com; dcha. de *Investigating Remote Sensor Placement for Practical Haptic Sensing with EndoWrist Surgical Tools*, A. Spiers

- 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:

γ : (gamma) deformación cortante, angular o de cizalladura

τ : (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]: $E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x}$.

ν : (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 (τ) 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]

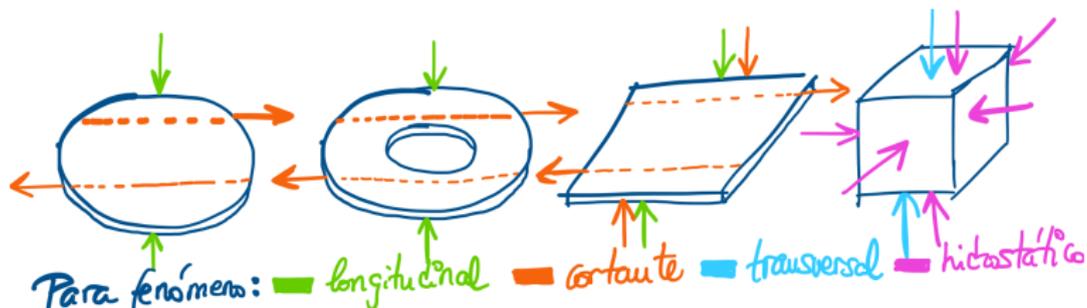
J : momento polar de inercia (MPI) del eje [m^4]

- 1.^a/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 \implies muy útiles en mediciones dinámicas.
- Desventajas de los piezoeléctricos (PEs):
 - PRs: +estables y comportam. +lineal \implies +útiles en medic. \uparrow precisión.
- Fenóm. PEs: (L)ongitudinal, (C)ortante, (T)ransversal, (H)idroestático.
 - 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:

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

σ : esfuerzo normal resultante [Pa]

F : fuerza aplicada [N]

A : área de material piezoeléctrico [m^2]

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

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

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

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 .

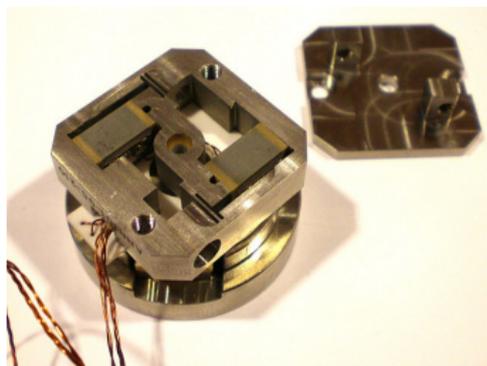


Figura: Imagen extraída de Wikimedia Commons

- 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



Sensores y actuadores

8. Sensores de presión y flujo

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyc

 Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

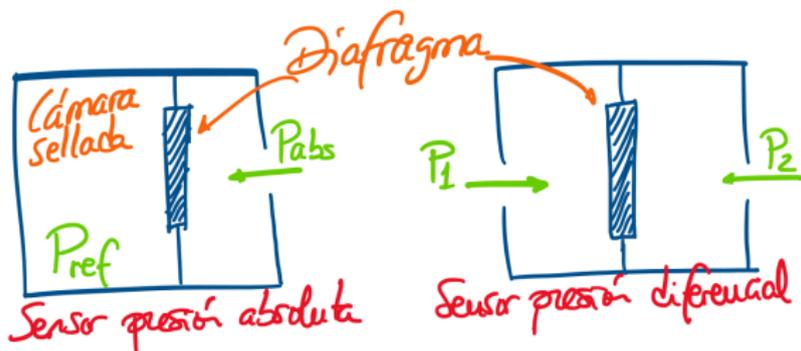
*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.

Contenidos

- 1 Sensor de presión
- 2 Tipos de sensores de presión según ppio. transducción
- 3 Sensor de flujo
- 4 Tipos de sensores de flujo según ppio. de operación



- Sensor presión: transductor entre fuerza aplicada y señal eléctrica.
 - Por tanto, sensor presión = una aplicación de los sensores de fuerza.
 - La diferencia: sensor de presión incorpora diafragma para medir F .
- Normal/ sensor presión usa presión barométr. como valor referencia.
 - Ud. SI presión = Pa , pero al tratar presión barom. se usa *bar* o *atm*.
 - $1bar = 0,9869atm \iff 1atm = 1,01325bar$
 - $1bar = 100000Pa \iff 1mbar = 1hPa(1hPa = 100Pa)$
- Tipos \cong sensor humedad (T.6): absoluto, diferencial y relativo.
 - Presión absoluta: incluyen cámara sellada con $P_{ref} = P_0 = \text{vacío}$.
 - P. difer.: funciona por diferencia presiones $P_{ref} = P_1$ y $P_{detectada} = P_2$.
 - P. relativa \cong p. diferencial, con P_{ref} = presión atmosférica.

- Usa el ppio. de transducción resistivo mediante tubo de Bourdon.
 - Cuando \uparrow presión del interior del tubo \implies tiende a enderezarse.
 - Y este movimiento se transmite a la parte móvil de un potenciómetro.

$$V = V_S \frac{R}{R_0} \quad (1)$$

donde:

V : tensión entre terminales del potencióm. por cambio de presión [V]

R : resistencia debida a un cambio en la presión [Ω]

R_0 : resistencia debida a P_{ref} (vacío, p. atmosf., u otra) [Ω]

V_S : voltaje de alimentación [V]

- Vtjas.: bajo coste, no requiere amplif., robusto y versátil.
- Dvtjas.: presenta \uparrow histéresis (H) y es $\uparrow\uparrow$ sensitivo a vibraciones.
 - H: tendencia material a conservar alteración en ausencia estímulo.

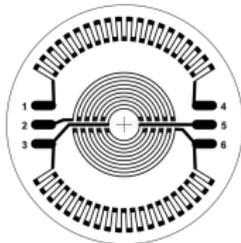
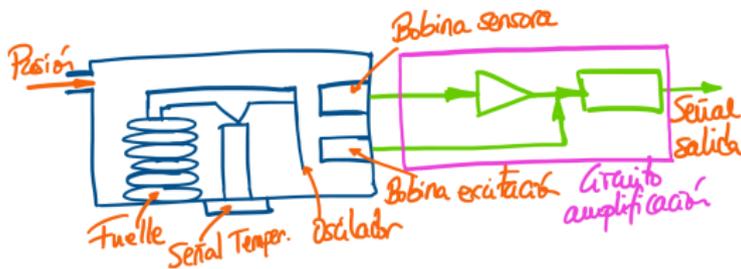


Figura: Figura extraída de Wikimedia Commons

- En este ppio. de transducción se usan materiales piezorresistivos.
 - Con estos materiales se configura una galga extensiom. cuya labor...
 - ...es detectar cambio de presión y traducirlo en cambio de resistividad.
- Tipos de galgas:
 - Metálicas (Fig.): formada por red resistiva en puente Wheatstone.
 - +: ↓ coste, resistente vibraciones. -: ↓ GF .
 - Fina película: es el diafragma sensitivo a presión. Grosor = GF .
 - +: ídem metálicas. -: no soporta ↑↑cargas eléctricas (fina película).
 - μ Electrónica: la usada para su implementación. Sensor = sustrato.
 - Normal/ silicio monocristalino tipo N + piezorresistencia tipo P.
 - +: ↓ coste, ↑ GF , ↓↓ tamaño sensores $\approx 1mm^2$. -: ↑ dependencia T .^a
 - Alambre: que se coloca bien tenso en superficie detectora de presión.
 - Poco usadas por: ↑ sensibilidad a vibración y ↑ fragilidad.

- Material piezoeléctrico transforma esfuerzo aplicado a un voltaje.
 - Placa PE de A conocida colocada de manera normal a F ejerce presión.
- Configuraciones:
 - Colocar dos discos de material PE interconectados. Buena resolución.
 - Superponer, con las polaridades opuestas, dos láminas de material PE.
- Ventajas:
 - Facilidad para fabricación en tamaño reducido.
 - Incluso posibilidad de fabricar en proceso de microelectrónica.
 - \uparrow ancho de banda.
 - \downarrow sensibilidad a la vibración.
- Desventajas:
 - \uparrow sensibilidad a la temperatura.
 - No apropiado para medir presión estática, pues $\downarrow V$ generado por PE.
 - Requiere de circuitos de acondicionamiento de señal robustos.



- Fuelle encargado de captar presión, que traduce en vibración oscilador.
- Para evitar cambios de P por T .^a, incluyen normal/ sensor de T .^a.
- Bobina excitadora: induce campo en oscil. y este en bob. medición.
 - Requiere que oscilador esté fabricado en material ferromagnético.
 - Vibración depende del material, densidad, mód. Young, longitud, etc.
- Circuito amplif.: transforma señal bobina medición en señal de voltaje.

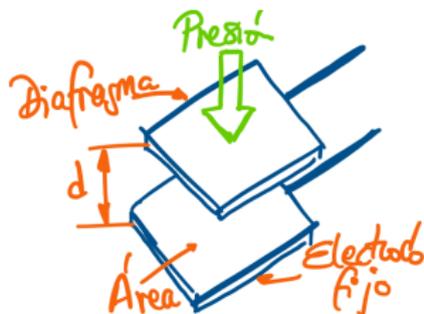
$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{A\rho}} \quad (2)$$

donde:

f : frecuencia de vibración del oscilador [$\text{Hz} = \frac{1}{s}$], L : longitud [m]

F : fuerza que le imprime el fuelle [$N = \frac{\text{kg}\cdot m}{s^2}$]

ρ : densidad ($= \frac{m}{V}$) del oscilador [$\frac{\text{kg}}{m^3}$], A : área de \emptyset transversal [m^2]



- Transducción entre fuerza ejercida sobre diafragma de A conocida...
 - ...y dpzmtto. de uno de los electrodos que forman capacitor variable.
- Recordar: condensador, formado por 2 placas separadas por el vacío.
 - Si se introduce dieléctrico entre placas, capacitancia \uparrow 1 factor: ϵ_r .

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \implies + \text{dielectrico} \implies C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (3)$$

donde:

C : capacitancia del capacitor según su geometría [F , Faradio]

d : distancia entre electrodos [m^2]

ϵ_0 : permitividad del vacío [$\frac{F}{m}$]

ϵ_r : permitividad relativa del medio [$\frac{F}{m}$]

A : área de solape [m^2]

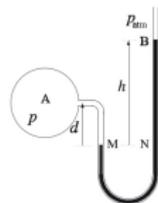


Figura: Figura extraída de Wikipedia

- Funciona calculando la diferencia de presión fluido vs. atmosférica.
 - Presión líquido en recipiente (hidrostática) $p = \rho \cdot g \cdot h$. Demo:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{P}{S} = \frac{m \cdot g}{S} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S} = \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot g}{S} \implies p = \rho \cdot g \cdot h \quad (4)$$

- Config. básica: tubo de vidrio en U con líquido ($T.^a$ vasos comunic.).
 - $p_A = p_B \implies \rho_A \cdot g \cdot h_A = \rho_B \cdot g \cdot h_B \implies \rho_A \cdot h_A = \rho_B \cdot h_B$.
- 1 rama abierta a atmósfera; otra, a depósito con fluido cuya p medir.
 - Fluido contacta con líquido y se alcanza equilibrio \implies deducir p :

$$p = p_{atm} + \rho_m g h - \rho g d \implies (si \rho \ll \rho_m) p = p_{atm} + \rho_m g h \quad (5)$$

ρ_m : densidad líquido del manómetro (agua, aceite, mercurio) $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

ρ : densidad fluido del depósito cuya presión se quiere medir $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

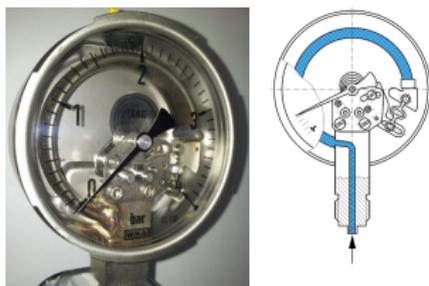


Figura: Figuras extraídas de Wikimedia Commons

- Ya vimos en Sec. 1 el uso de este tubo curvado como elem. sensitivo.
 - Un extremo está cerrado \implies la presión se aplica por el otro extremo.
 - Cuando \uparrow presión, tubo tiende a adquirir sección circular y enderezarse.
- En este caso, elem. móvil conectado a aguja (en vez de potencióm.).
 - El mvto. de esa aguja refleja la presión ejercida sobre una escala.

[Ejercicio: cálculo de presión en manómetro con resorte como indicador]

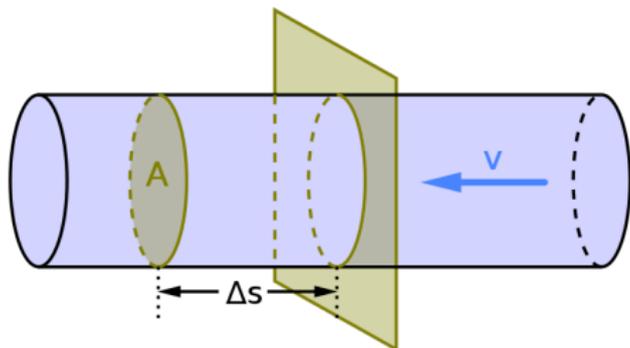


Figura: Figura extraída de Wikimedia Commons

- Flujo: cantidad de sustancia que pasa por una sección en un instante.
- Tipos detección líquido/gas: flujo volumétrico, vectorial, flujo másico.
- F. volum. se calcula conociendo área del conducto y velocidad fluido:

$$Q = \frac{\text{volumen}}{t} = \frac{A \cdot \Delta s}{t} \implies \left(v = \frac{\Delta s}{t}\right) \implies Q = A \cdot v \quad (6)$$

donde:

Q : flujo volumétrico $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

v : velocidad de la sustancia $\left[\frac{m}{s}\right]$

A : área del conducto $[m^2]$

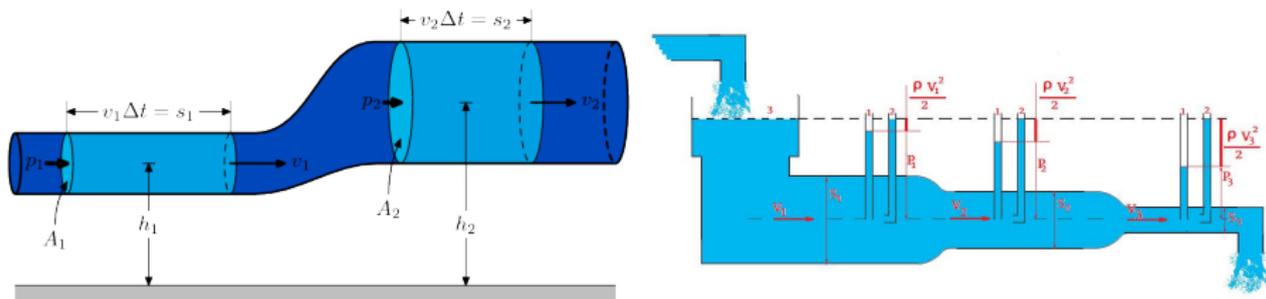


Figura: Extraídas de Wikimedia Commons. (1) Ec. general Bernoulli; (2) $h_1 = h_2$

- Conocida Δp en conducto \implies se puede saber dirección flujo.
 - El flujo siempre irá de la zona de mayor presión a la de menor.
- Con Δp + ec. Bernoulli \implies se puede conocer las velocidades.
 - Ppio./Ec. Bernoulli: describe comportamiento fluido en corriente.
 - Para conocer relación entre presiones y velocidades, se supone $h_1 = h_2$.

$$\frac{v^2 \rho}{2} + p + \rho gh = cte. \implies \frac{v_1^2 \rho}{2} + p_1 + \rho gh_1 = \frac{v_2^2 \rho}{2} + p_2 + \rho gh_2 \implies (7)$$

$$\implies (h_1 = h_2) \implies \frac{v_1^2 \rho}{2} + p_1 = \frac{v_2^2 \rho}{2} + p_2 \quad (8)$$

p_x : presiones [Pa]; h_x : alturas [m]; ρ : densidad [$\frac{kg}{m^3}$]; v_x : vel. [$\frac{m}{s}$]

- Lo anterior solo válido cuando la sección en ambos puntos es igual.
- Si sección conducto $\sim \implies$ necesario recurrir a ecuación continuidad:
 - \forall flujo incompresible fluye en conducto de $S \sim \implies \forall$ pto., $\dot{m} = cte.$
- F. másico (\dot{m}): cantidad masa que pasa por sección en un instante:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot S \implies \rho \cdot v_1 \cdot S_1 = \rho \cdot v_2 \cdot S_2 \implies v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \quad (9)$$

donde:

ρ : densidad [$\frac{kg}{m^3}$]; v : velocidad [$\frac{m}{s}$]; S : sección m^2

- Corolario: si $S_2 < S_1 \implies v_2 > v_1 \implies$ (Ec. 8) $\implies p_2 < p_1$
- Al aplicar Ec. 9 en Ec. 8 se obtiene v en un pto. según Δp :

$$p_1 - p_2 = \frac{v_2^2 \rho}{2} - \frac{v_1^2 \rho}{2} \implies (Ec.9) \implies p_1 - p_2 = \frac{v_2^2 \rho}{2} - \frac{\left(\frac{v_2 \cdot S_2}{S_1}\right)^2 \rho}{2} \quad (10)$$

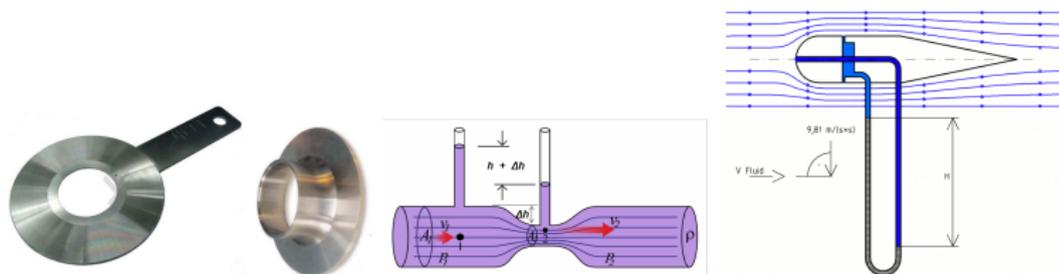


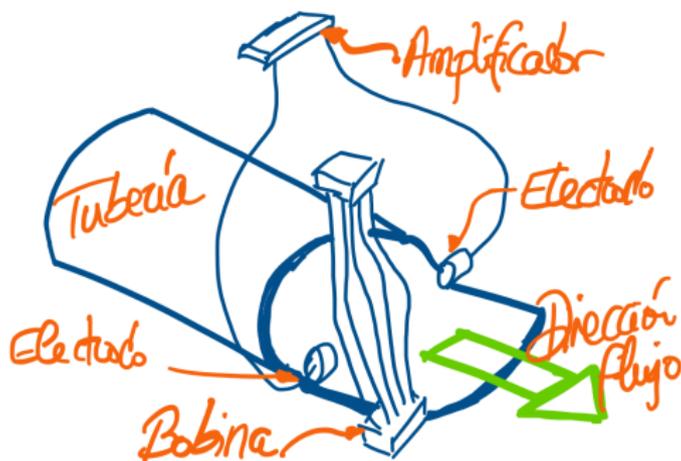
Figura: de cairoinstrumentation.com (1), Wikipedia (2,3,4)

- Medir p antes/después de obstructor conocido para calcular flujo.
- Tipos:
 - Placa de orificio (1): el +sencillo y +barato. Variante: tobera (2).
 - Tubo Venturi (3): $\varnothing_{garganta} \ll \varnothing_{in} = \varnothing_{out} = \varnothing_{conducto}$.
 - Tubo Dall: similar al Venturi, pero \varnothing_{in} sufre reducción drástica.
 - T. Prandtl (4): combina tubo Pitot(mide p_{total}) + manómetro($p_{estatica}$).
 - Mide $\Delta p = \text{presión dinámica} = p_t - p_e \implies$ (Ec. Bernoulli) saber v y Q .

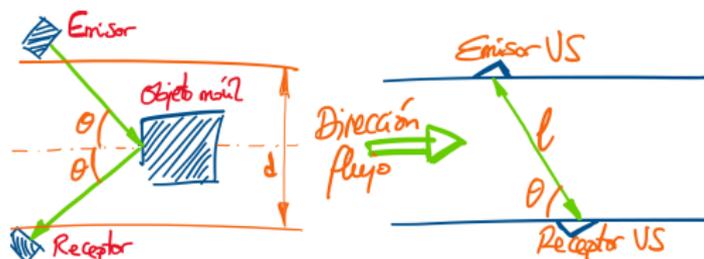


Figura: Figuras extraídas de Wikipedia

- Igual que ppio. anterior, usa obstructor, pero se varía área y $p = cte$.
- Se llaman caudalímetros de área variable: el +usado es el rotámetro.
- Tubo cónico con flotador empujado hacia arriba por $F_{arrastre}$...
 - ...y hacia abajo por $F_{gravedad}$, hasta alcanzar un punto equilibrio.
- Tubo suele ser vidrio: permite escala y leer directa/ mvto. flotador.
 - Para $p \uparrow \uparrow$ se usa metal, y mvto. medido por otro sensor.
- Es el mecanismo usado tb. en los respiradores de medicina (Fig. 3).



- Se basa en ley inducción Faraday (ver T.1 y T.3, tacogenerador).
 - Conductor se mueve \perp a campo magnét. $\implies V_{inducido} \propto v_{conductor}$.
- En este caso, conductor = fluido \implies necesario medir v_{flujo} .
 - Vemos que $V_{inducido}$ es independiente de p , T .^a o viscosidad fluido.
 - Pero sí es necesario que fluido a medir tenga una conductividad alta.
- Compuesto por 2 sistemas: generar campo magnét. (1) y medir (2).
 - 1: bobina + fuente de excitación (CC o CA).
 - 2: 2 electrodos (\perp eje bobina) que miden $V_{inducido}$ + amplificador.
 - Y aislante, para evitar que $V_{inducido}$ se disipe en tubería (conductor).



- Basado en efecto Doppler: medir atenuación frec. emitida-recibida.
 - Ya lo estudiamos en T.1, para piezoeléctricos, y en T.5 con detalle.
 - Emisor/receptor US, cuya onda ($\approx 1\text{MHz}$) no \perp dirección flujo.
 - Sensor US mide $v_{\text{fluido}} \implies (\text{Ec. Bernoulli}) \implies$ conocer Q .
- Basado ppio. tiempo de tránsito: medir t_{onda} entre emisor-receptor.
 - Emisor/receptor se encuentran diametralmente opuestos (θ , Fig. 2).
 - Pros: $v_s = \text{cte.} \implies \Delta t \propto v \implies$ cálculos sencillos.
 - Contras: $\Delta t \downarrow \downarrow \implies$ difícil implementación.

$$\Delta t = \frac{2l \cos \theta}{v_s^2} \quad (11)$$

donde:

v_s : vel. sonido [$\frac{m}{s}$]; v : vel. fluido [$\frac{m}{s}$]; l : dist. emisor-receptor m

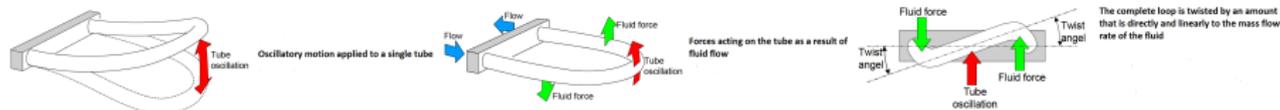


Figura: modificada de original extraída de instrumentationtoolbox.com

- Basado efectos fuerzas de Coriolis presentes en mvto. rotacional.
 - Objeto se acelera al moverse sobre radio de disco en rotación (T.3).
- Permite medir directa/ flujo másico (importante industria química).
- Son precisos y poco sensitivos a factores externos, pero son caros.
- Fcto.: pasar flujo por manguera flexible que oscila continua/.
 - Generándose $f_{Coriolis}$ que actúan sobre partículas del fluido...
 - ...y estas provocan que manguera se tuerza respecto a ptos. anclaje.
- Se usan sensores proximidad cuyo $\Delta t_{registro}$ y \dot{m} se relacionan así:

$$\dot{m} = \frac{k_s}{8r^2} \Delta t \quad (12)$$

donde:

k_s : rigidez del sistema; r : radio manguera [m]

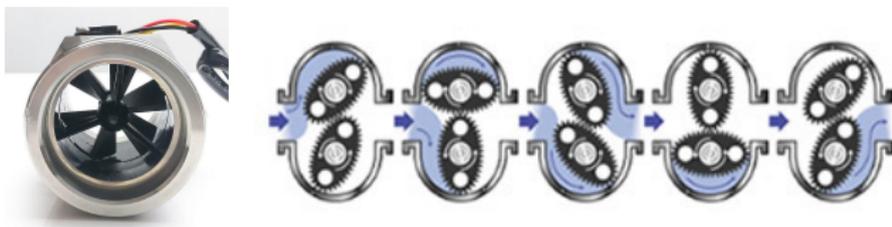


Figura: extraídas de (1) fruugo.es; (2) omega.com

- Sensor de turbina (1): fluido f pasa por turbina $t \implies \omega_t \approx \propto v_f$
 - Y se mide ω_t (vel. angular turbina) normal/ con encoder magnét.
- Sensor dpzmt. positivo: mide Q desplazando $V' s_{fluido}$ conocidos.
 - Flujo continuo mueve las poleas \implies cámaras llenan/vacían de fluido.
 - $V_{camaras}$ es conocido \implies conociendo rpm poleas \implies saber Q .
 - Es el mecanismo usado, p.ej., en los contadores de casa (Fig. 2).
- Sensor de vórtice: tras pasar fluido por objeto genera vórt. Karman.
 - La frecuencia con que aparecen estos vórtices es $\propto v_{fluido} \propto Q$.
 - Contar vórtices: sensor presión, capacitivo, piezoeléctrico o US.

8. Sensores de presión y flujo

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyC

 Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores

9. Actuadores eléctricos

Julio Vega

julio.vega@urjc.es

GSyc

 Universidad
Rey Juan Carlos

Sensores y actuadores



©2024 Julio Vega Pérez
Algunos derechos reservados.

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC-BY-SA 4.0**.*

Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (b) adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

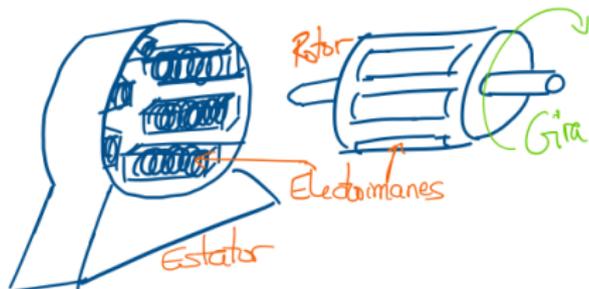
La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.

Contenidos

- 1 Introducción
- 2 El motor eléctrico
- 3 Motor de CC
- 4 Motor de CA



- Las magnitudes físicas también pueden transformarse a otras...
 - ...con propiedades que permitan interactuar con el entorno.
- Y estas, al final, se reflejan como un cambio en el estado del sistema.
- Variables involucradas con estas magnitudes: fuerza, pos., vel., acel.
- Actuator: dispositivo que realiza la transformación de las magnitudes.
 - Clasificación según funciona/: eléctricos, hidráulicos, neumáticos.



- Transforma la energía eléctrica en energía mecánica.
 - Una dinamo hace lo opuesto: transforma movimiento en electricidad.
- Se compone de rotor o armadura (parte móvil) y estator (parte fija).
 - Rotor: proporciona la fuerza que actúa sobre la carga mecánica.
 - Estator: proporciona el magnetismo necesario para inducir la *fem*.
 - Al rotor también se le denomina inducido y, al estator, inductor.
- Ppio.: conductor en campo magnético se induce dzmto. \perp al campo.
- Clasificación: normal/ según el tipo de energía eléctrica que emplean.
 - Motor de CC: requiere flujo eléctrico de corriente en un sentido.
 - Motor de CA: requiere flujo eléctrico que cambia de dirección.



Figura: extraídas del libro *Máquinas eléctricas*. Reacción del inducido

- A: flujo magnético generado por polos del motor ($I_{armadura} = 0$).
- B: flujo producido por la corriente de armadura.
- C: flujo mag. resultante (A+B) por efecto de reacción de armadura.
- La *fem* o V inducido (Fig. A) sigue la ley de Faraday (T3):

$$fem = V_{inducido} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

donde:

N : número de vueltas en la bobina

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$: variación del flujo magnético en el tiempo

— : por Ley de Lenz (polaridad *fem* se opone a cambio que lo produjo)

- $\sum fem$'s producidas en las espiras genera par de fuerzas de motor:

$$T_i = K\Phi_p I_a \quad (2)$$

T_i : par inducido o interno [Nm]

K : constante que depende de la máquina

Φ_p : flujo por polo [Wb, Weber] Otras unidades: T (Tesla), Gs (Gaus).

I_a : corriente de la armadura o de inducido [A]

- Al moverse motor, las bobinas de la armadura sufren variación de Φ .

- $\Delta\Phi$ induce en estas $fem = -V_{aplicado} \implies$ f. contraelectromotriz (E_a):

$$E_a = K\Phi_p\omega \quad (3)$$

ω : velocidad angular de la armadura [rad/s.]

- Aplicando ley de Ohm: $I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a}$

R_a : resistencia de la armadura [Ω]

V_a : voltaje aplicado a los terminales de la armadura [V]

- La potencia absorbida por el motor (la que necesita para trabajar):

$$P_{absorbida} = V \cdot I_{total} \quad (4)$$

- El rendimiento del motor es la relación entre P_{util} y $P_{absorbida}$:

$$\eta = \frac{P_{util}}{P_{absorbida}} \cdot 100 \quad (5)$$

- Normalmente, la potencia útil se calcula según la expresión:

$$P_{util} = f_{cem} \cdot I_{rotor} \quad (6)$$

- Esta P_{util} es el resultado de restar a la $P_{absorbida}$ todas las $P_{perdidas}$:
 - Pérdidas en el cobre: las de los conductores del inductor + inducido.
 - Pérdidas en el hierro: las de campos magnéticos + corrientes parásitas.
 - Pérdidas mecánicas: las debidas a rozamientos + ventilación.

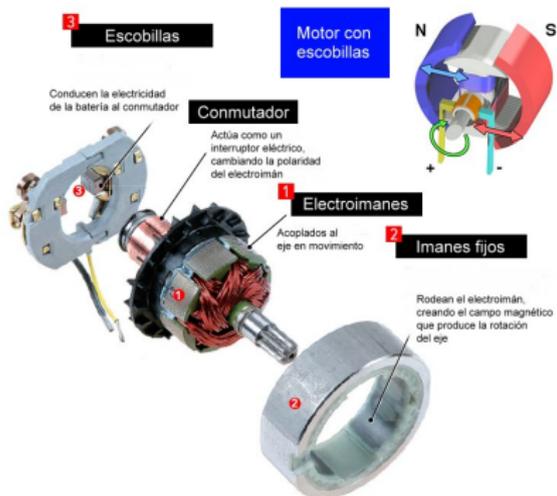
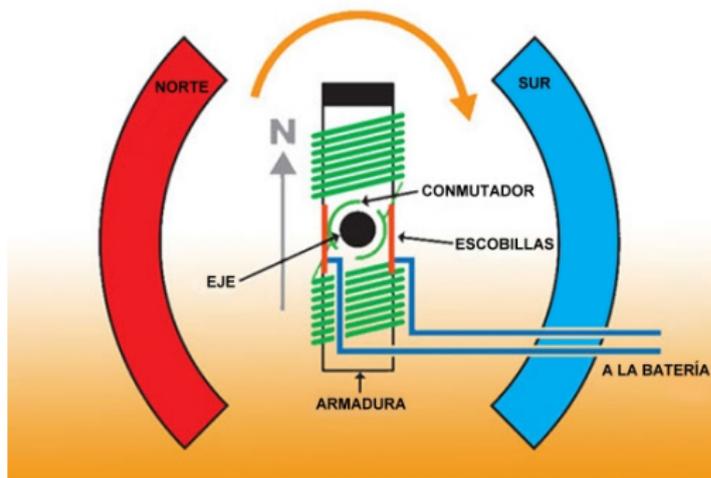


Figura: extraídas de *demaquinasyherramientas.com*

- Al aplicar I a los devanados del motor, se crea campo magnético.
- Este campo temporal se repele/atrae por polo N/S perma/ (estator).
- De este modo se produce una fuerza que hace que el eje (rotor) gire.
- Continua/ se aplica corriente a diferentes grupos de devanado.
 - Se mantiene atracción/repulsión electromotriz que hace girar al rotor.
 - Ejerciendo el colector como conmutador entre los diferentes devanados.

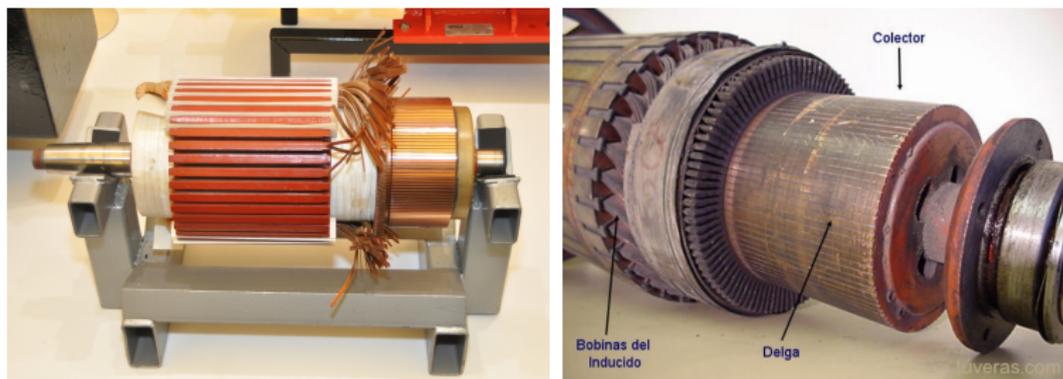


Figura: extraídas de Wikimedia y *tuveras.com*

- Si necesario F_{dzmto} . $\uparrow \uparrow \implies$ usar varios juegos de espiras.
 - Por ello, lo habitual es que el colector esté formado por varias delgas.
- A este conjunto de espiras se le conoce como devanado del motor.
- El torque es proporcional a la corriente que circula por su devanado...
 - ...y al flujo magnético Φ de los imanes del motor: $M = k \cdot I \cdot \Phi$.

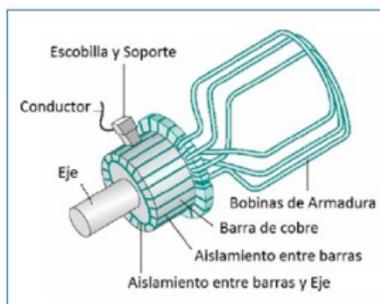
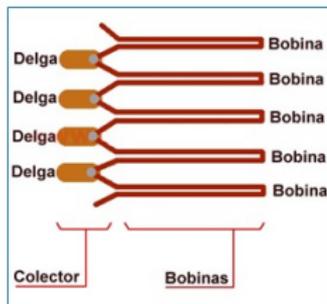


Figura: extraídas de *tecnologiamediola.com*

- Delga: cada una de las láminas (normal/ Cu) instaladas en colector.
 - Aisladas entre sí y conectadas eléctrica/ a cada bobina del rotor.
- Colector: anillo de delgas concéntrico y solidario con eje del rotor.
 - Recolecta el V aplicado al motor y se transfiere mediante escobillas.

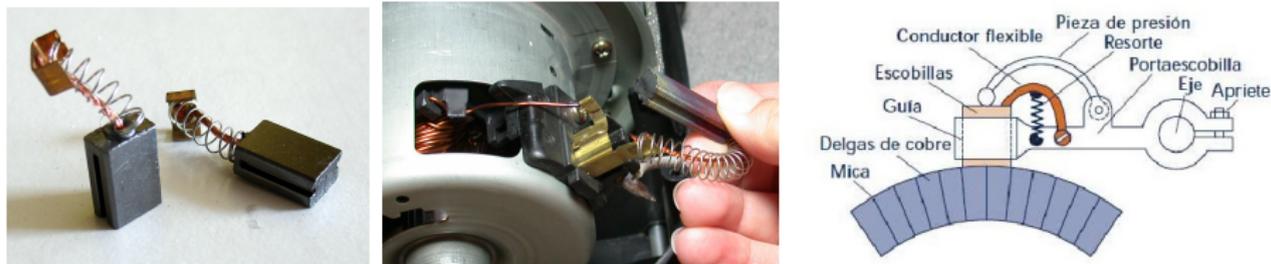


Figura: extraídas de Wikimedia (a,b) y *tecnologiariola.com* (c)

- Establecen la conexión eléctrica entre la parte fija y la móvil.
- Mediante un resorte hacen presión sobre las delgas correspondientes.
- Con forma de bloque (¡no filamentos!), y hechas de grafito (carbón).
 - Composición molecular del carbón en forma de grafito, como un libro.
 - Muy fácil ir retirando sus capas \implies buen material para fricción.
 - No buen conductor, pero manipulable eléctrica y química/ para serlo.
- Problemas: rozamiento, \downarrow rendimiento, calor, ruido, mantenimiento.
 - Solución: sin escobillas (o *brushless*), que se valen de la electrónica.

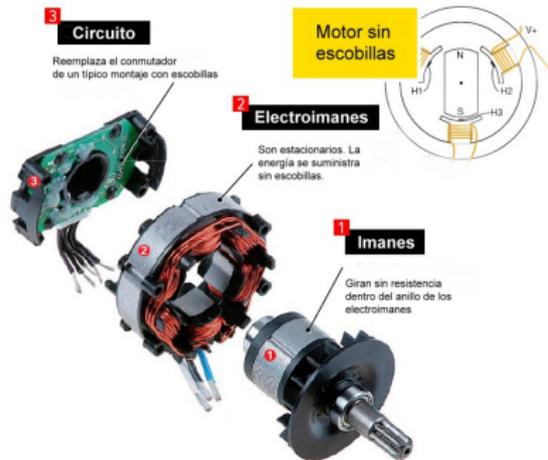
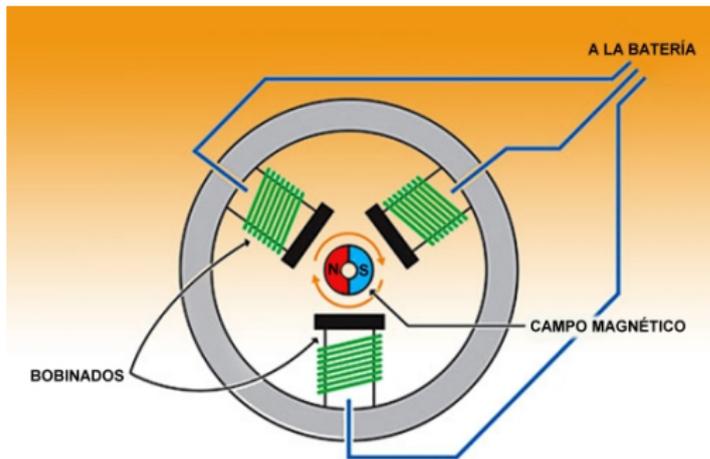


Figura: extraídas de demaquinasyherramientas.com

- Aparecen los controladores ESC (*Electronic Speed Controller*).
 - Permiten cambiar polaridad de los bobinados y así controlar el giro.
 - Control sencillo por PWM, usando microcontroladoras (RPI, Arduino).
- +: ↑rendi/, eficientes, duraderos, compactos, ↓manteni/. -: +caros.
- Fcto. inverso: devanados en estator, e imán permanente en rotor.
 - 3 bobinas (polos), al energizar 2/3 polos se induce campo...
 - ...en estas que es atraído/repelido por el imán del rotor.

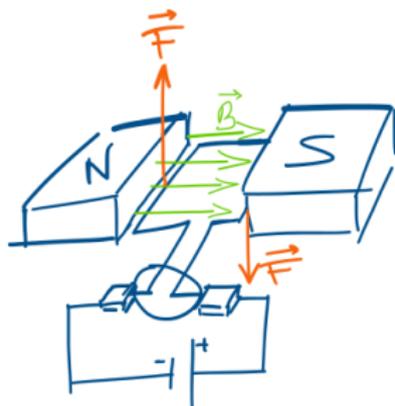


Figura: Motor CC con rotor formado por una bobina de una sola espira

- El funcionamiento de todo motor de CC se basa en la F de Lorentz.
- $Vel_{rot.} = K \cdot V_{in}$. Al variar V_{in} , se varía velocidad del eje.
- Espiras están dispuestas en la armadura y recorridas por corriente I .
 - Bajo influencia de campo magnét. generado por polos N/S del motor.
 - Entonces, según [ppio. Lorentz](#), se generan F 's que mueven armadura.
 - F. Lorentz (T3): F ejerce campo electromag. sobre partícula cargada.

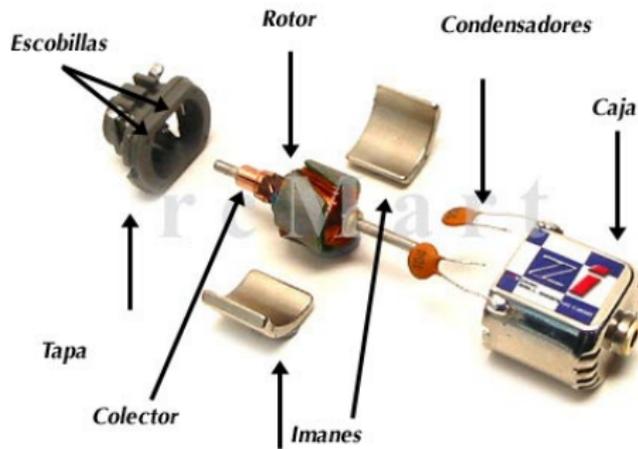


Figura: extraída de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- El flujo magnét. es fijo y sólo se puede variar la I dada al motor.
- Motor muy barato y de giro estable.
- Se usa en elementos simples y/o de bajo coste, como juguetes.

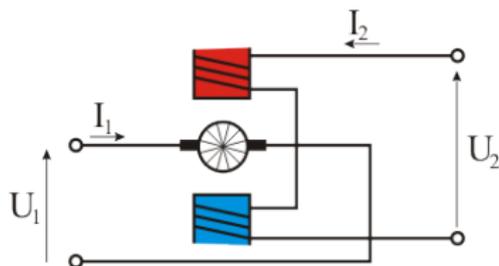


Figura: extraída de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- La excitación se produce mediante electroimanes.
- La corriente dada a estos (I_2) es independiente de la dada al rotor (I_1).
- Así, la velocidad y el momento a generar se regulan bien.

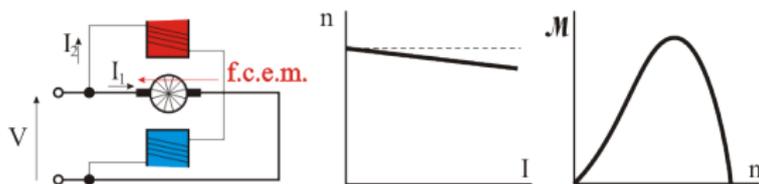


Figura: extraídas de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- La excitación está en paralelo con circuito de alimentación del rotor.
- Al estar paralelo, cada bobinado consume intensidad independiente.
 - La energía a suministrar al circuito del motor es la suma de ambas:
 - $I_1 = \frac{V - f_{cem}}{R_1}$; $I_2 = \frac{V}{R_2} \implies I_{total} = I_1 + I_2$
- Corriente inductora I_2 es cte. \implies campo magnético inductor tb. cte.
 - Podemos operar para obtener relación velocidad de giro e intensidad:
 - $f_{cem} = K\Phi\omega = V - I_1 \cdot R_1 \implies \omega = \frac{V - I_1 R_1}{K\Phi}$
- Vel. (ω o n) varía muy poco aunque varíe el voltaje V (Fig. B).
- \ddagger par motor (M) cuando $\omega = 0$; esto es, en el arranque (Fig. C).
 - Sol.: en arranque, embrague desconecta mecánica/ la carga del motor.
- Izda. C: inestable; ante frenazo, $M^{t+1} < M^t \implies$ no puede vencerlo.
- Dcha. C: estable; ante frenazo, $M^{t+1} > M^t \implies$ puede vencerlo.
- Usos: aplicaciones con vel. rotac. estable, e.g. rotativas periódicos.

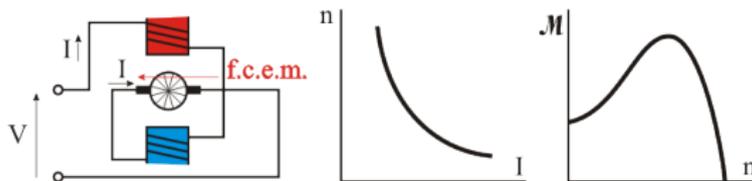


Figura: extraídas de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- La excitación está en serie con circuito de alimentación del rotor.
- Corriente dada al motor pasa por los dos bobinados: $I = \frac{V - f_{cem}}{R_1 + R_2}$.
 - Corriente que pasa por las bobinas inductora no es cte.
 - Varía con la velocidad de giro, ya que la f_{cem} también lo hace.
 - $f_{cem} = K\Phi\omega = V - I \cdot (R_1 + R_2) \implies \omega = \frac{V - I \cdot (R_1 + R_2)}{K\Phi}$
- Vel. (ω o n) varía mucho cuando hay cambio en alimentación (Fig. B).
- \exists par motor (M) cuando $\omega = 0$; esto es, en el arranque (Fig. C).
- La zona inestable que teníamos con shunt, ahora ya no lo es tanto.
- Usos: aplicaciones donde se necesite gran par de arranque (ascensor).

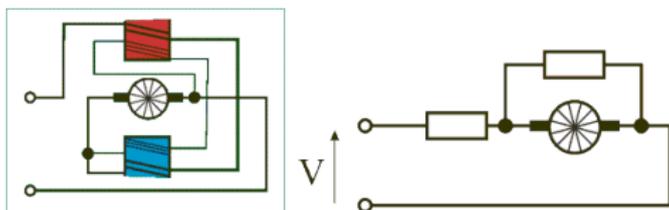
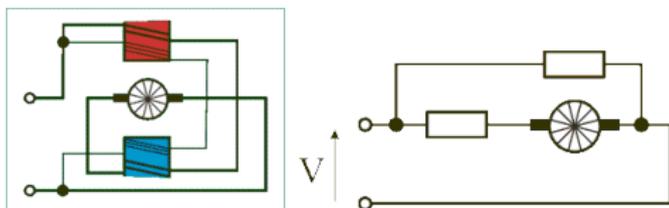


Figura: extraídas de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- Se aprovechan las ventajas de los motores serie y shunt.
- La excitación tiene dos juegos de bobinas:
 - Una en serie con el inducido y otra colocada en paralelo.
- La disposición de los bobinados da lugar a dos configuraciones:
 - (A) compound corta (Figs. arriba) y (B) compound larga (Figs. abajo).
 - A: inductor shunt en \parallel con inducido; el conjunto en serie con inductor.
 - B: inductor shunt en \parallel con conjunto inducido + inductor en serie.



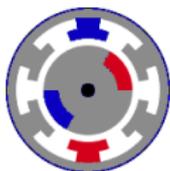


Figura: extraída de *Recursos Docentes* de la JA. Motor CA trifásico

- Un motor de CA se basa en obtener un campo magnético giratorio.
- Síncrono: dentro del campo mag. hay electroimán que gira a ω vel.
- Asíncrono: dentro del campo hay bobinado sometido a inducción.
 - Por ello tb. se le denomina de inducción, pq aparece la f. de Lorentz.
- El giro es más lento en el motor asíncrono, de ahí el nombre.
- Según alimentación, motor CA es monofásico (A) o trifásico (B).
 - L=fase (llega I); N=neutro (I a fuente); TT=toma tierra (derivación).
 - A: fase + neutro + toma de tierra. Empleada en hogares ($V = 230V$).
 - B: 3 fases + neutro + tt. Empleada en la industria ($V_{max} = 380V$).
- Los conceptos y partes del motor son similares a un motor de CC.

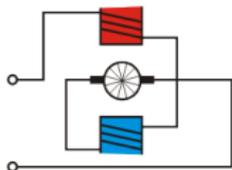


Figura: extraída de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- En CA, fcmtto. basado acopla/ campos magnét. girando al unísono.
- Para acopla/ bobinas rotor unidas a delgas, en serie con bob. inductor.
- Un par de escobillas aplican la corriente al rotor.
- Este motor denominado motor universal, muy usado en electrodom.
- Como hemos visto, el motor puede funcionar tanto en CC como en CA.
- A la inversa, funciona como dinamo; la corriente recogida por colector.
 - Dinamo vs. alternador: el 1.º genera corriente en CC; el 2.º en CA.

Problema del arranque en los motores síncronos

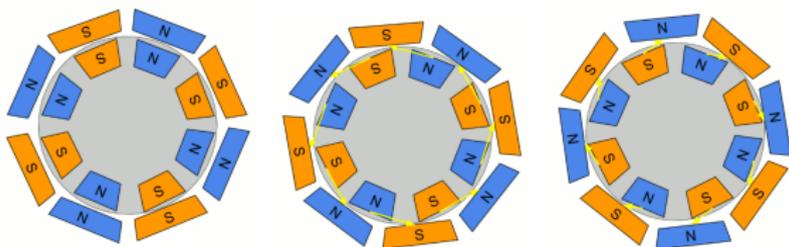


Figura: extraída de *automatismoindustrial.com*

- Ningún motor síncrono puede arrancar por sí solo, \nexists par de arranque.
 - $\omega_{rotor} = 0$, pero campo mag. estator se mueve a *vel. de sincronismo*.
- Al arrancar, polos opuestos rotor y estator tienden alinearse (Fig. A).
 - Pero, al girar estator y rotor parado, F_{giro} varía en cada desplace/:
 - Una vez es en sentido antihorario (Fig. B) y, otra, en horario (Fig. C).
- El resultado es una fuerza de giro o par de giro nulo (no se mueve).

Soluciones al arranque en los motores síncronos

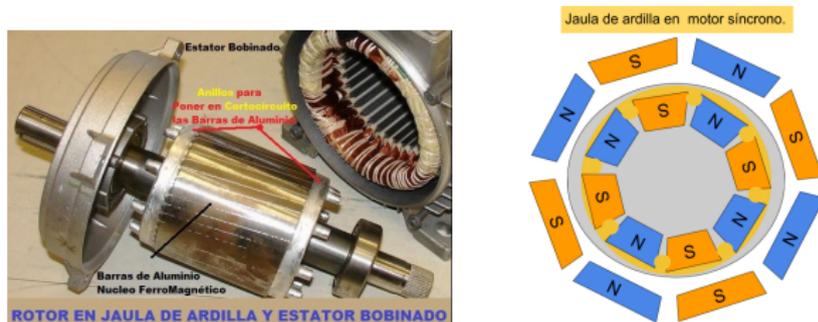


Figura: extraídas de *automatismoindustrial.com*

- A) Emplear motor auxiliar para llevar al rotor a vel. de sincronismo.
- B) Rotor de jaula de ardilla (que también se emplean en asíncrono).
 - Cilindro en eje con barras conductoras (Al, Cu) unidas por anillos.
 - Inclinación mejora el arranque y disminuye el ruido (Fig. A).
 - En arranque rotor sin CC \implies se comporta como asíncrono (Fig. B).
 - Cuando rotor alcance vel. sincronismo, se alimenta con CC y entonces:
 - 1) Se produce el acoplamiento entre polos del rotor y estator.
 - 2) En jaula $\neq I$; espiras del rotor ya no ven campo magnético variable.

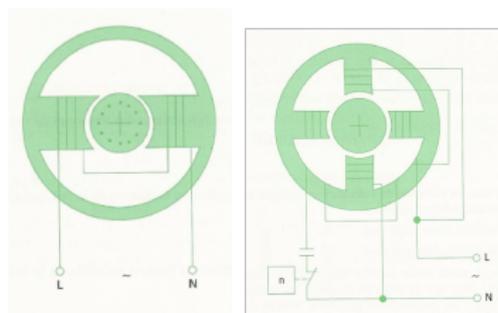


Figura: extraídas de *automatismoindustrial.com*

- Estator genera campo magn. giratorio gracias a 2 pares de bob. \perp .
- Aunque llamado monofásico, necesario par bob. auxiliar al arrancar.
 - Un motor estricta/ monofásico no tendría par de arranque (Fig. A).
- El par ppal. se conecta a CA, generando un campo magnét. oscilante.
 - Este par crea flujo alterno pero de direcc. cte. $\implies \nexists$ giro rotor.
- En el par aux. intercala condensador para desfasar CA 90° (Fig. B).
 - Por tanto, campo magnét. generado por este par tb. desfasado 90° .
- Motor muy simple, sin colector ni escobillas; rotor de jaula de ardilla.

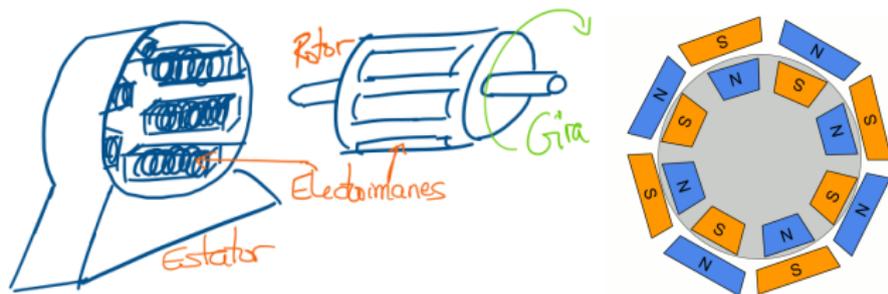


Figura: B extraída de *automatismoindustrial.com*

- Fcmt. similar a monofásicos: se obtiene campo magnét. giratorio.
- Estos motores no son muy usados por lo complejo de su alimentación.
 - Rotor es un electroimán (alimentado por CC) e inductor por CA (fases).
- Rotor gira =vel. que campo magnét. del estator (vel. de sincronismo):

$$\omega = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (7)$$

donde:

f : frec. red eléctrica donde conectado motor [Hz] ($ES = 230V, 50Hz$)

p : números de polos del motor; P : pares de polos del motor ($P = \frac{p}{2}$)

ω : velocidad de sincronismo (vel. angular o rpm del motor)

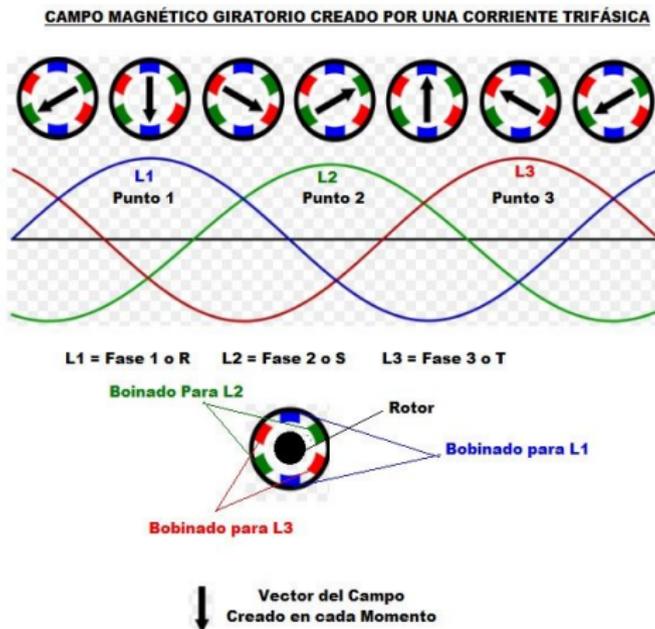


Figura: extraída de *areatecnologica.com*

- Funcionamiento similar a los motores monofásicos de inducción.
- Conectar cada bobina a línea de I trifásica para obtener campo girat.
- Rotor normal/ de jaula de ardilla, aunque también \exists de tipo bobinado.

Conexión en estrella

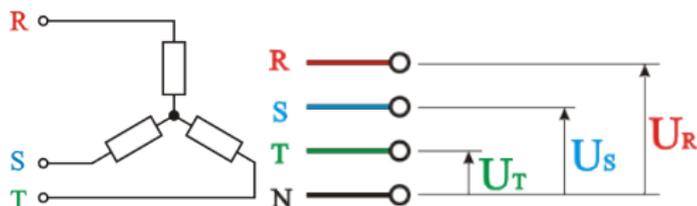


Figura: extraídas de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- Los tres cables de fase permiten dos tipos de conexiones en inductor.
- Un extremo de las tres bobinas se junta (centro imagen).
 - Cada extremo libre se conecta a cada cable de fase (R , S , T).
- La tensión que recibe cada bobina es la tensión de línea entre 3.
 - Cada una recibe la tensión U_R , U_S , U_T , que suele ser de 220V.
- Por cada bobina circula una $I =$ a la que circula por cada conductor.

Conexión en triángulo

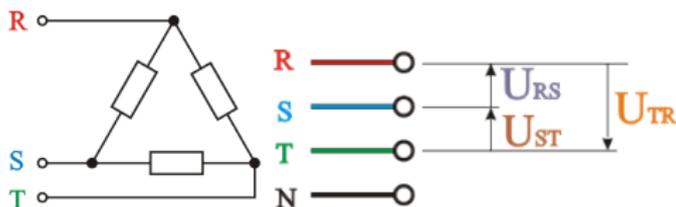


Figura: extraídas de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- Cada extremo de bobina unido al de la siguiente (no se usa neutro).
- Cada bobina sometida a la tensión de línea U_{RS} , U_{ST} , U_{TR} (380V).
- La I de cada bobina es = a la que circula por cada conductor entre 3.

Ventajas

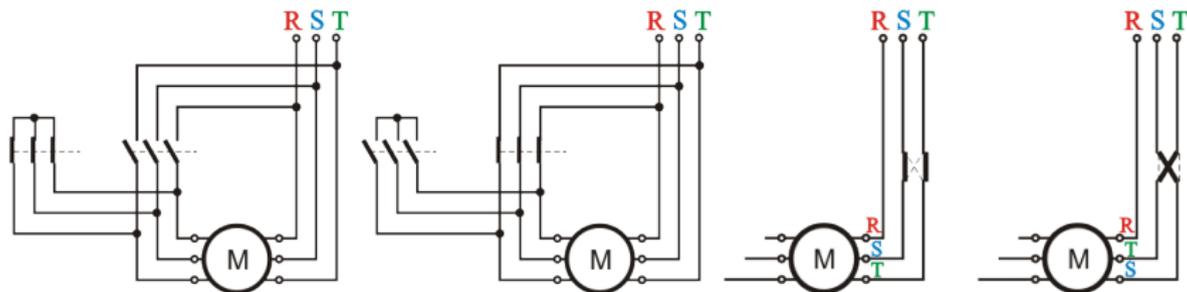


Figura: extraídas de *Recursos Docentes* de la Junta de Andalucía

- Arrancador estrella-triángulo: dos relés accionados por temporizador.
 - A: Arrancar motor a baja tensión (220V) por conexión en triángulo.
 - B: Al girar, conectar en estrella para tener toda la potencia (380V).
- C,D: Fácil inversión giro, simple/ conmutar 2/3 fases (válido \forall tipo).

9. Actuadores eléctricos

Julio Vega

julio.vega@urjc.es



Sensores y actuadores