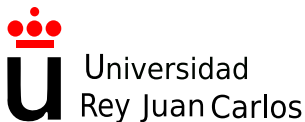


8. Sensores de presión y flujo

Julio Vega

julio.vega@urjc.es



Sensores y actuadores

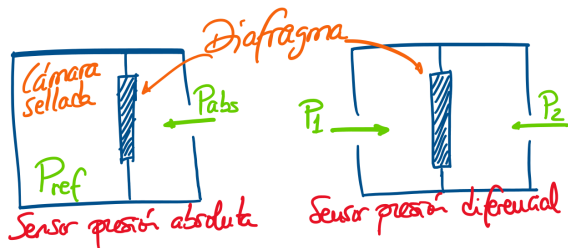


(CC) Julio Vega

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

Contenidos

- 1 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.

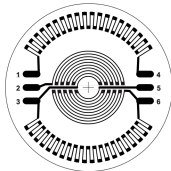
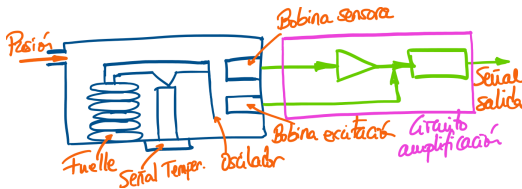


Figura: Figura extraída de Wikimedia Commons

- 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.

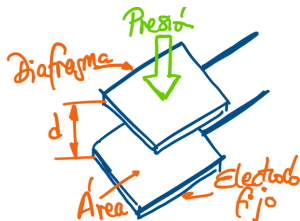
$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{A\rho}} \quad (2)$$

donde:

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

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

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

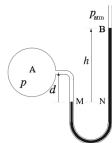


Figura: Figura extraída de Wikipedia

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

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

- Config. básica: tubo de vidrio en U con líquido ($T.^a$ vasos comunic.).

$$\bullet \quad p_A = p_B \Rightarrow \rho_A \cdot g \cdot h_A = \rho_B \cdot g \cdot h_B \Rightarrow \rho_A \cdot h_A = \rho_B \cdot h_B.$$

- 1 rama abierta a atmósfera; otra, a depósito con fluido cuya p medir.

- Fluido contacta con líquido y se alcanza equilibrio \Rightarrow deducir p :

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

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

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

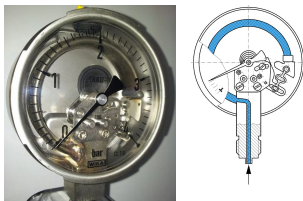


Figura: Figuras extraídas de Wikimedia Commons

- Ya vimos en Sec. 1 el uso de este tubo curvado como elem. sensitivo.
 - Un extremo está cerrado \Rightarrow 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]

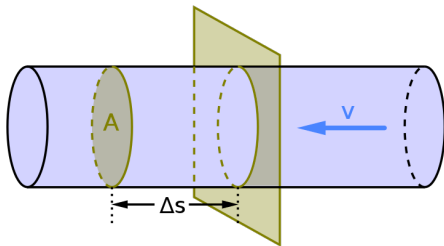


Figura: Figura extraída de Wikimedia Commons

- 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 $[m^2]$

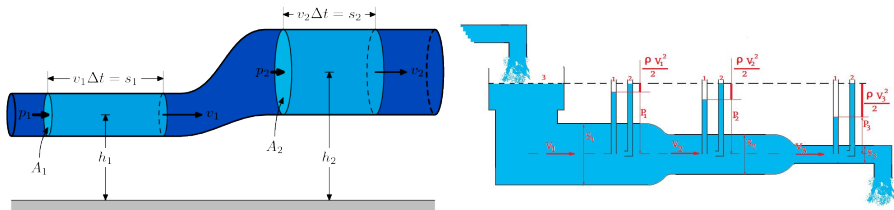


Figura: Extraídas de Wikimedia Commons. (1) Ec. general Bernoulli; (2) $h_1 = h_2$

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

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

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

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 :

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

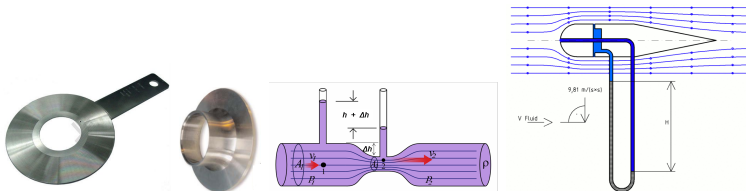


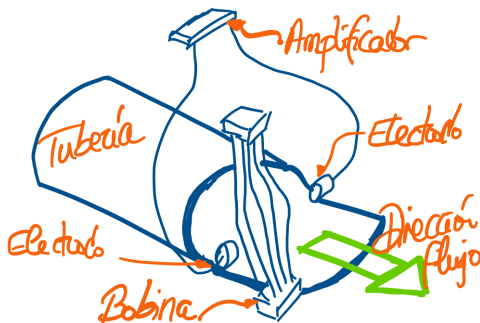
Figura: de cairoinstrumentation.com (1), Wikipedia (2,3,4)

- 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): $\varnothing_{\text{garganta}} \ll \varnothing_{\text{in}} = \varnothing_{\text{out}} = \varnothing_{\text{conducto}}$.
 - Tubo Dall: similar al Venturi, pero \varnothing_{in} sufre reducción drástica.
 - T. Prandtl (4): combina tubo Pitot(mide p_{total})+manómetro(p_{estatica}).
 - Mide $\Delta p = \text{presión dinámica} = p_t - p_e \implies (\text{Ec. Bernoulli})$ saber v y Q .

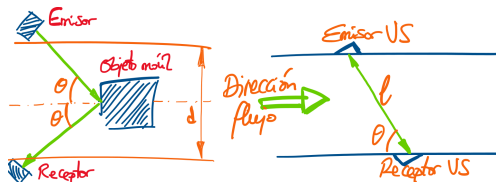


Figura: Figuras extraídas de Wikipedia

- 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. $\Rightarrow V_{inducido} \propto v_{conductor}$.
- En este caso, conductor = fluido \Rightarrow 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 $v_{\text{fluido}} \Rightarrow (\text{Ec. Bernoulli}) \Rightarrow$ conocer Q .
- Basado ppio. tiempo de tránsito: medir t_{onda} entre emisor-receptor.
 - Emisor/receptor se encuentran diametralmente opuestos (θ , Fig. 2).
 - Pros: $v_s = \text{cte.} \Rightarrow \Delta t \propto v \Rightarrow$ cálculos sencillos.
 - Contras: $\Delta t \downarrow \Rightarrow$ 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

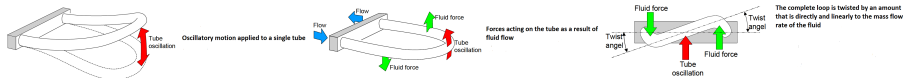


Figura: modificada de original extraída de instrumentationtoolbox.com

- 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 pto. 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]

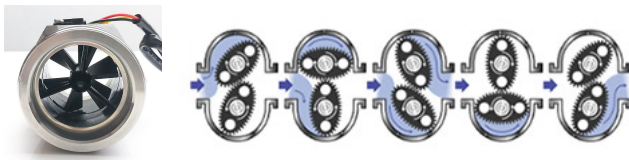


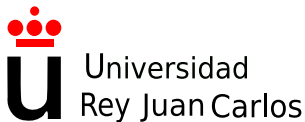
Figura: extraídas de (1) fruugo.es; (2) omega.com

- 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



Sensores y actuadores