
SENSORS DE CABAL

Mesura del cabal

Volum o massa que circula per unitat de temps

- SI: m^3/s o Kg/s
 - Altres: L/h o Kg/h
 - En països anglòfons:
 - UK gal/h \approx >20% US gal/h
- $3600 \text{ L}/\text{h} = 791,88 \text{ UK gal}/\text{h} = 951,02 \text{ US gal}/\text{h}$

Classificiació dels sensors de cabal

Mesuren el cabal d'un fluid, gas o líquid, que circula per una canonada

Aquesta mesura permet controlar els fluxos de càrrega, productes finals o intermedis, en les unitats de producció i magatzem

Classificació segons el muntatge en planta:

- Intrusius: contacte directe amb el fluid
- No intrusius: més fàcil d'instal·lar i mantenir

Classificació dels sensors de cabal

– Mesura de cabal volumètric

- Deprimògens

- Placa orifici
- Venturímetre
- Tobera
- Tub Pitot
- Tun Annubar

- D'àrea variable

- Rotàmetre

- Proporcional a la velocitat

- Ultrasons
- Electromagnètic
- Vòrtex
- Turbina

- Desplaçament positiu

- Amb engranatges
- De disc pla

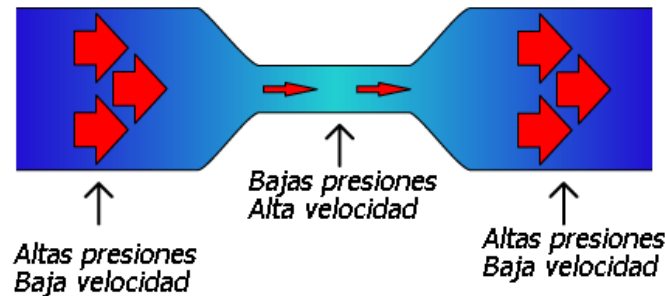
– Mesura de cabal màssic

- Tèrmic
- Coriolis

Sensors deprimògens

El flux d'un fluid augmenta la seva velocitat i redueix la seva pressió quan circula a través d'una canonada més estreta

Si en la canonada hi ha un element d'estrangulació, es produeix una diferència de pressions que és proporcional al cabal del flux

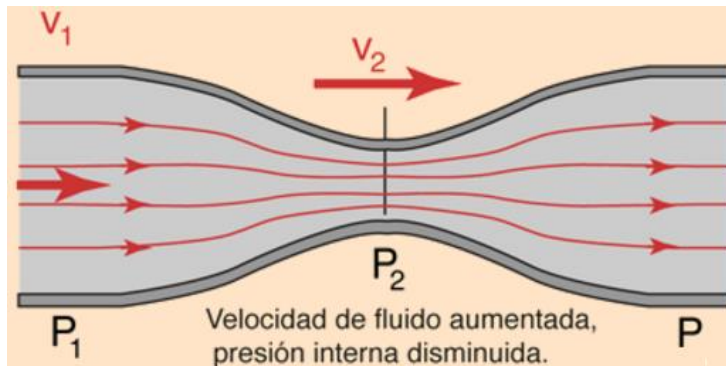


Sensors deprimògens

– Principi de Bernoulli

Tot fluid ideal en moviment en l'interior d'un sistema tancat té una energia constant, així com la massa:

- Cinètica: velocitat
- Potencial: alçada
- De flux: pressió



$P < P_1$, degut a pèrdues de càrrega

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$s_1 v_1 = s_2 v_2$

Energia de presión	Energia cinètica unidad volumen	Energia potencial unidad volumen
-----------------------	--	---

- v : velocitat de flux
- ρ : densitat del fluid
- g : acceleració gravitatòria, $9,81 \text{ m/s}^2$
- h : alçada respecte punt de referència
- P : pressió del fluid
- s : secció de canonada

Sensors deprimògens

– Principi de Bernouilli

Per a un fluid incompressible que circula a través d'una canonada amb una obstrucció:

$$Q = K \sqrt{\Delta P}$$

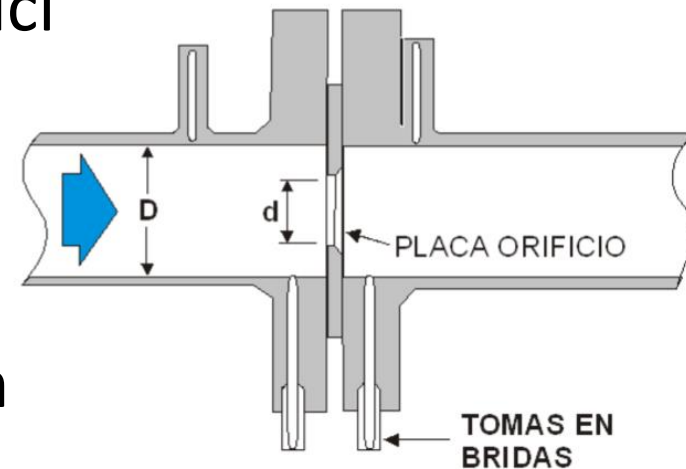
- ΔP : diferència de pressions
- K: ct de proporcionalitat del sensor específic del muntatge
- Q: cabal volumètric (m³/s)

Sensors deprimògens

– Placa orifici o diafragma

Consisteix en una placa metàl·lica (acer) amb un forat. L'aresta de l'orifici cal que sigui molt aguda per aconseguir la màxima precisió en la mesura

Les preses de pressió es realitzen, en la paret de la canonada, als dos costats de la placa. El seu muntatge es realitza entre brides d'un tram recte de canonada.



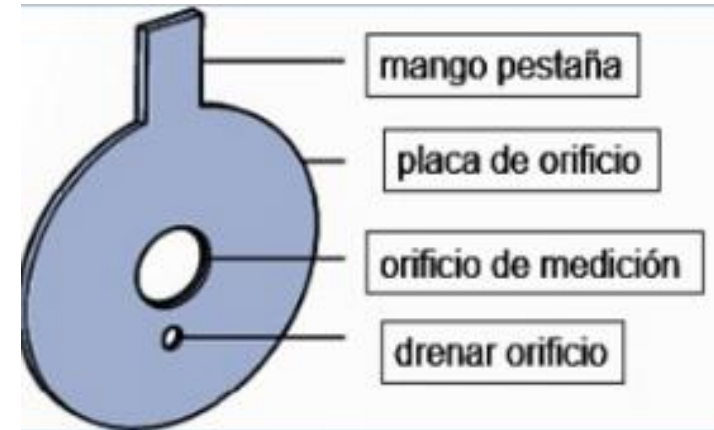
Sensors deprimògens

– Placa orifici o diafragma

Segons les característiques del fluid, el forat es troba:

- Concèntric: per a gasos o líquids nets i vapor de baixa velocitat.

En el cas d'arrossegar petites quantitats de líquids o el líquid està proper a l'evaporació, es fa un orifici addicional de drenatge per dalt o per baix, segons interès

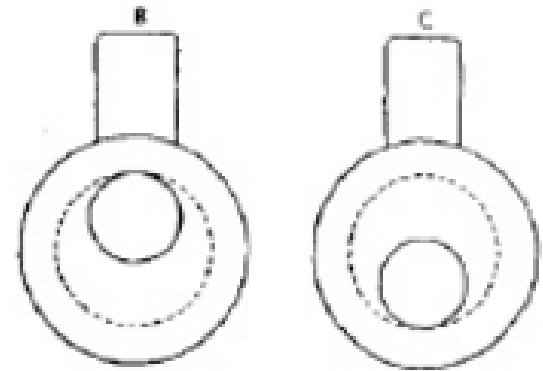


Sensors deprimògens

– Placa orifici o diafragma

Segons les característiques del fluid, el forat es troba:

- Excèntric: per a líquids amb quantitats considerables de gasos (part superior) o per a gasos amb quantitats de condensats (part inferior).

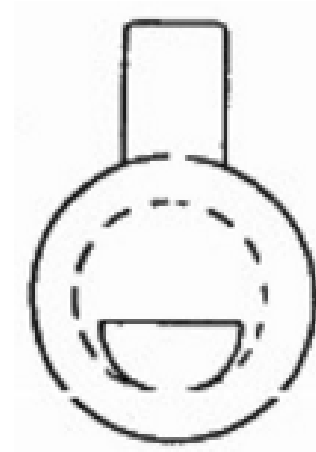


Sensors deprimògens

– Placa orifici o diafragma

Segons les característiques del fluid, el forat es troba:

- Segmentat: per a gasos i líquids amb molts sòlids, de manera que s'evita la sedimentació de sòlids a l'entrada.



Sensors deprimògens

– Placa orifici o diafragma

- Dels sensors més usats en la indústria
- Baix cost, facilitat d'instal·lació i manteniment
- Cost independent de la llargada de la canonada o rang de mesura
- Grans pèrdues de pressió
- Desgast per fricció del fluid
- Precisió $\pm 1-2\%$

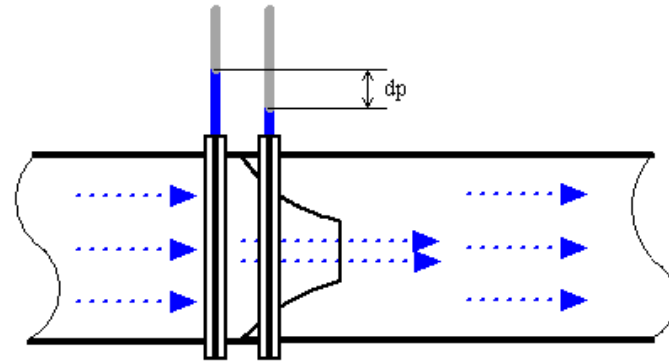
<https://www.youtube.com/watch?v=6LR00d6HRPg>

Sensors deprimògens

– Tobera (Nozzle)

Millora que permet la reducció de les pèrdues de càrrega i la disminució de la sedimentació

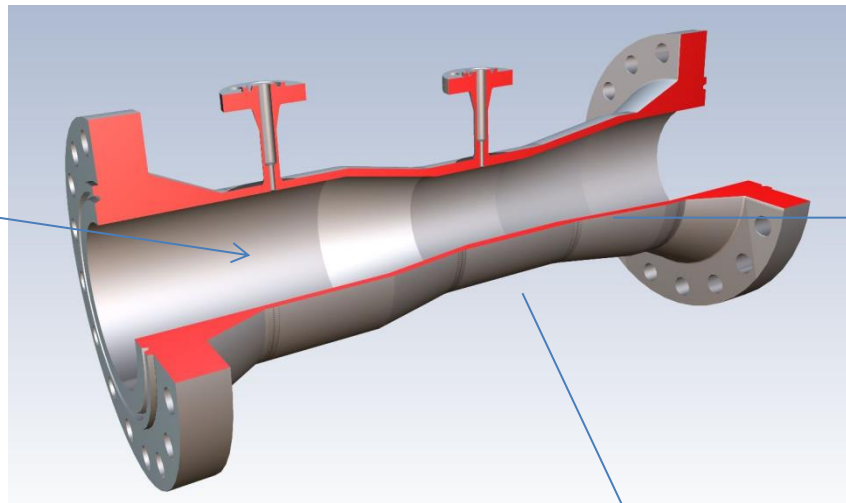
- Mesura cabals 60% majors que el diafragma
- Millora la mesura de fluids en dos fases o líquids viscosos
- 8/16x més car
- Precisió: 0,95-1,5%



Sensors de primògens

– Venturímetre

Conus convergent:
Angle d'entrada: 21°



Conus divergent:
Angle sortida: $7-15^\circ$
Menys pèrdues de càrrega

Gola

<http://www.emcocontrols.com/353/venturi-tube-type-kvr>

Sensors deprimògens

– Venturímetre (Venturi tube)

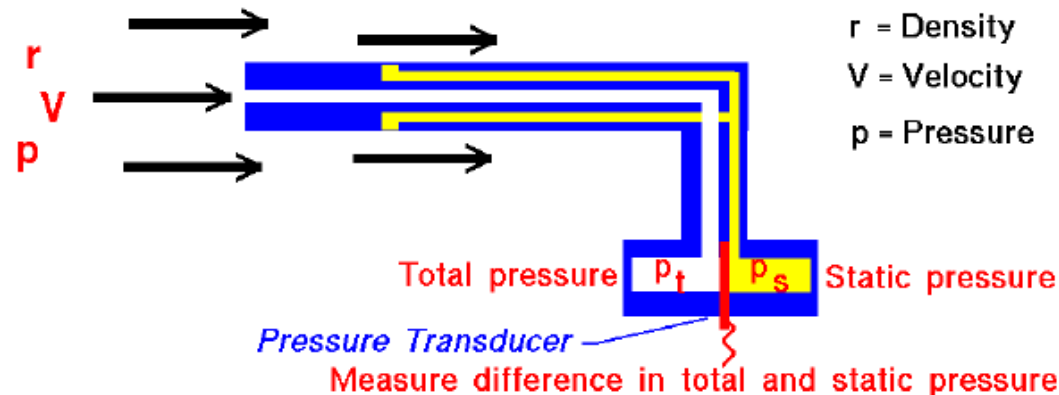
- La mesura de pressió es realitza en el primer conus i en la gola
- Mesura cabals 60% més ràpids que els sensors de diafragma o tobera
- Apte per a mesurar cabals de líquids amb alt % de sòlids
- Cost: 20x superior al diafragma
- Pes i dimensions superiors
- Precisió: $\pm 0,75\%$

https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_effect

Sensors deprimògens

– Tub Pitot

Mesura la velocitat del fluid en un punt de la conducció, en saber la secció del tub, es coneix el cabal.



Bernoulli's Equation :

static pressure + dynamic pressure = total pressure

$$(p_s + r \times \frac{V^2}{2}) = p_t$$

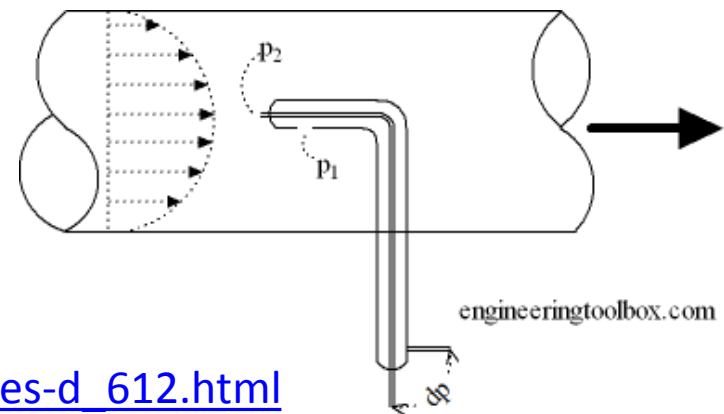
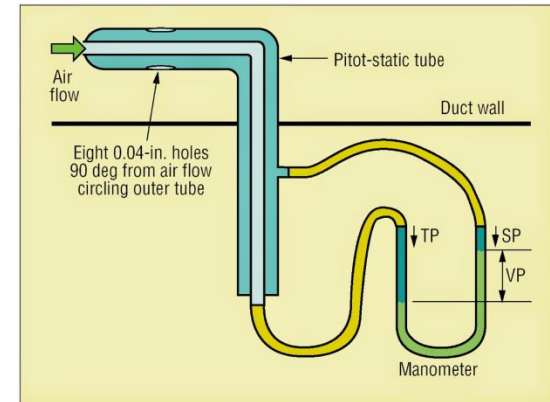
Solve for Velocity :

$$V^2 = \frac{2(p_t - p_s)}{r}$$

Sensors de primògens

– Tub Pitot

- Mesura grans cabals de fluids nets
- Baix cost
- Precisió 1,5-4%
- **Obstruccions**
- **No uniformitat de velocitats:**
 - $V_{\text{màx}}$: centre
 - $V_{\text{mín}}$: parets



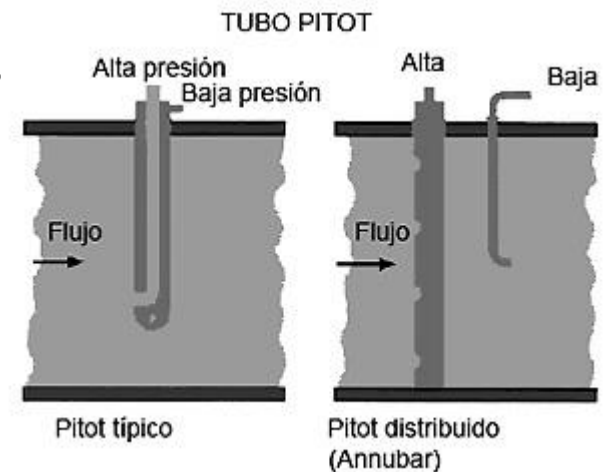
http://www.engineeringtoolbox.com/pitot-tubes-d_612.html

Sensors deprimògens

– Tub Annubar

Variant del tub Pitot, permet mesurar la velocitat mitja al llarg del diàmetre => cabal més precís

- Precisió: ± 1 - ± 3 %
- Cabals petits i grans de fluids nets
- No mesura perfils de velocitat



<https://www.youtube.com/watch?v=AbBDMQ7fHS4>

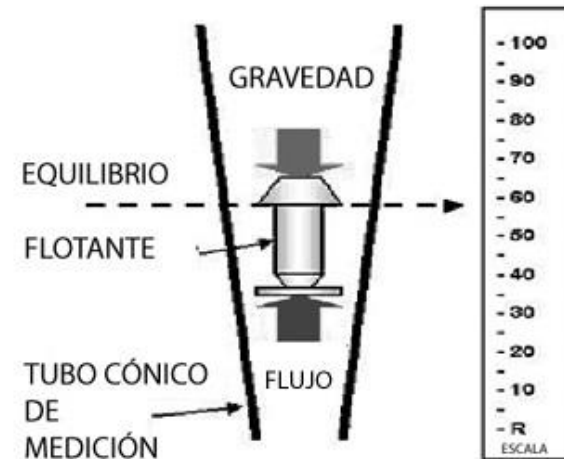
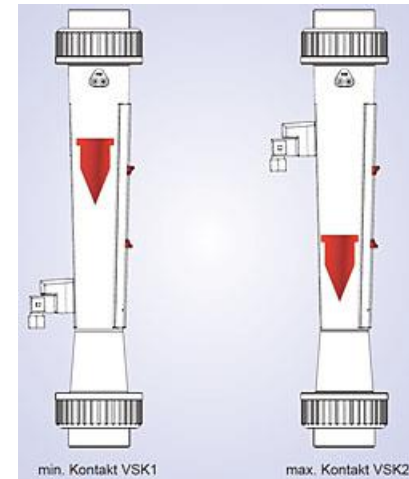
Sensors d'àrea variable

- **Rotàmetre**

La mesura es basa en el desplaçament vertical d'un flotador en l'interior d'un tub troncocònic vertical amb una boca de menor diàmetre en la part inferior

- Mesura cabals de gasos i líquids

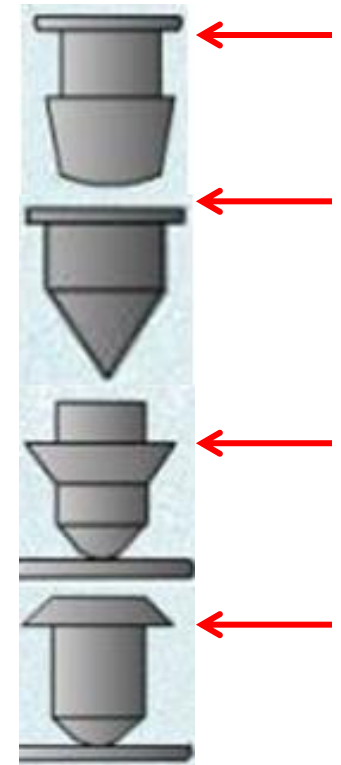
<https://www.youtube.com/watch?v=HnoQ0WsoBmA>



Rotàmetres

– Formes dels flotadors:

- **Esfèrics:** cabals petits amb poca precisió
Influència considerable a la viscositat
- **Cilíndrics amb contorn pla:** cabals medis i alts
Influència mitja a la viscositat
- Cilíndrics amb contorn sortint:
Permet reduir la influència a la viscositat
- Cilíndric amb contorn sortint a contraflux
Presenta la menor influència a la viscositat



Rotàmetres

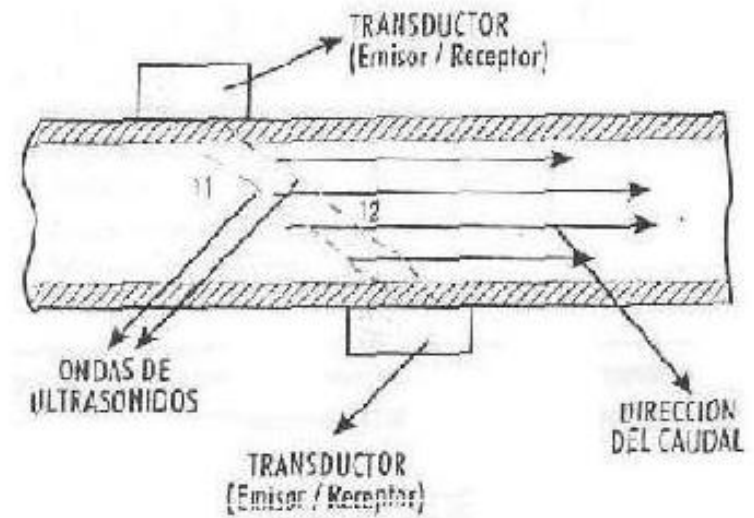
- Escala quasi lineal
- Resistència a corrosius
- No necessita trams rectes
- Dependència a la temperatura (calibratge/correcció)
- Dependència a la viscositat del fluid
- No apte per a fluids amb sòlids en suspensió

<https://www.youtube.com/watch?v=B3Py2uBAeTU>

<http://es.krohne.com/es/dlc/videos/>

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **ULTRASONS**
- $t_1 - t_2 = K$ velocitat del fluid
- Quan $t_1 - t_2 = 0$, no hi ha moviment de fluid
- Cal saber la velocitat de propagació de l'ona ultrasònica en el fluid



t_1, t_2 : temps de trànsit

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **ULTRASONS**

- Amb fluids homogenis la mesura és independent de la P, T, conductivitat i viscositat
- Útil en un ampli rang de diàmetres de canonades
- No té parts mòbils
- No és invasiu, no hi ha pèrdues de càrrega
- La canonada cal que estigui completament plena
- El líquid no ha de contenir >1% gas

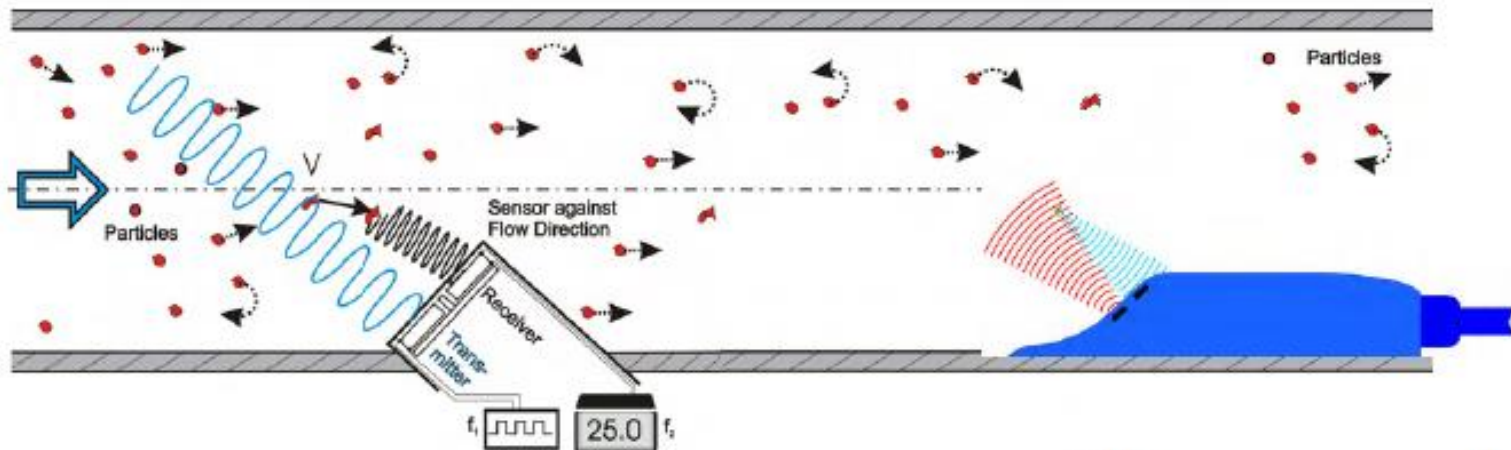
SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **ULTRASONS**

- Els transductors es poden col·locar a l'exterior o interior de la canonada
- Transductors interiors:
 - Major precisió
- Transductors exteriors:
 - ideals per a mesurar líquids agressius o a alta P
 - El material de la canonada ha de ser conductor d'ultrasons

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **ULTRASONS- Efecte Doppler**
 - Cabals amb fangs i barreges gas-líquid



<https://www.youtube.com/watch?v=3MNWPSdVuxI>

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **VÒRTEX**

Un **vòrtex** és un flux giratori, a voltes turbulent, de fluid en forma d'esprial. És a dir, és un flux turbulent en rotació esprial amb trajectòries de la corrent tancades

La intrusió d'un cos de cara plana en el corrent d'un fluid provoca un fenomen de la mecànica de fluids, vòrtex o remolins de Von Karman

<https://www.youtube.com/watch?v=TYzbQUW0vS0>

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **VÒRTEX**

A mesura que el fluid passa a velocitat baixa per un cos de cara plana és capaç de seguir el contorn del cos, però si la velocitat augmenta el líquid se separa en capes entorn del cos intrús i genera remolins

Els remolins apareixen alternativament a un costat i a l'altre del cos estrany, circulant en sentit horari i antihorari.

https://www.youtube.com/watch?v=V2u6m_QLFKo

<https://www.youtube.com/watch?v=Hbbkd2d3H8>

https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_shedding

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **VÒRTEX**

- La freqüència dels remolins és proporcional a la velocitat del fluid
- Pèrdua de càrrega mínimes
- Mesura de líquids, gasos i vapor
- Independent de temperatura, pressió i viscositat
- No té parts mòbils
- Precisió $\pm 1\%$
- Vibracions poden afectar a la mesura (evitar parts mecàniques a prop)

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **ELECTROMÀGNÉTIC**

Llei d'inducció de Faraday:

Quan un conductor es mou a través d'un camp magnètic es genera una tensió elèctrica , perpendicular al camp magnètic i al vector de velocitat, proporcional a la velocitat del conductor.

$$E = K \cdot B \cdot l \cdot v$$

E: tensió generada pel conductor

K: constant de proporcionalitat

l: longitud del conductor

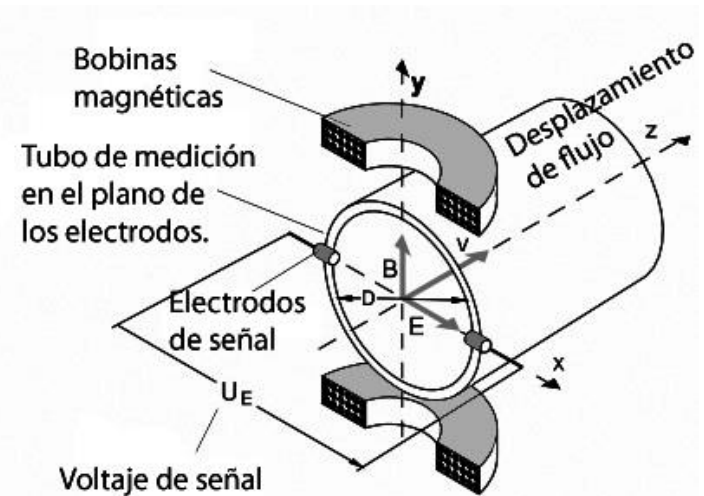
v: velocitat del conductor

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **ELECTROMÀGNETIC**

En el cas del sensor, el fluid és el conductor i el voltatge és el senyal mesurat

La tensió es capta mitjançant dos elèctrodes situats en la superfície interna de la canonada. El camp magnètic B es crea a partir d'una bobina



SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **ELECTROMÀGNÉTIC**

Problema: E depèn de la T i conductivitat del fluid

Solució: Es mesura una nova tensió de referència (E_r) en les bobines, que depèn de l'alimentació, T i conductivitat del fluid i és independent de la velocitat

La comparació entre E i E_r permet una tensió que sols depèn de la velocitat del fluid

<https://www.youtube.com/watch?v=YTEGxgDgTW0>

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **ELECTROMÀGNETIC**

- Fluids polars, amb conductivitat $\geq 5 \frac{mS}{cm}$,
- Mesura independent de densitat i viscositat
- Líquids fangosos i corrosius
- Canonada plena
- No hi ha parts mòbils
- Precisió $\pm 0,1\%$
- **Molt car, no apte per a canonades amb diàmetres grans**

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **TURBINA**

El fluid entra en el sensor i fa girar un rotor amb múltiples aspes, muntat perpendicularment al moviment del fluid, a una velocitat proporcional a la del fluid

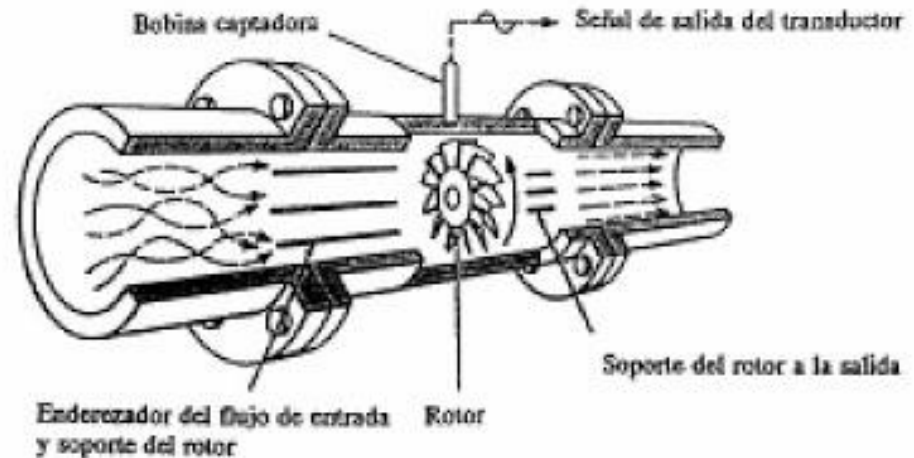
La velocitat es determina mitjançant un detector magnètic format per un imant permanent i una bobina

El pas dels àleps del rotor per davant del detector interromp el camp magnètic generat per l'imant, la qual cosa produeix una tensió en la bobina (Faraday). La freqüència amb que es genera aquesta E és proporcional a la velocitat .

SENSORS PROPORCIONALS VELOCITAT

- **TURBINA**

- Líquids i gasos de baixa viscositat
- Precisió $\pm 0,3\%$



<https://www.youtube.com/watch?v=IVzhu5jCx5w>

Sensors desplaçament positiu

Aquests sensors mesuren el cabal comptant el nombre de volums que omplen una cambra de volum constant.

Parts bàsiques:

- Cambra: plena d'un volum constant del fluid
- Desplaçador o element mòbil: mou el fluid
- Mecanisme indicador o registrador: compta el nombre de revolucions

Sensors desplaçament positiu

El pas del fluid a través del mesurador fa girar les parts mòbils que correspon a una quantitat fixa i coneguda del líquid. Un detector de proximitat permet determinar la freqüència de rotació

Cabal= freqüència x volum

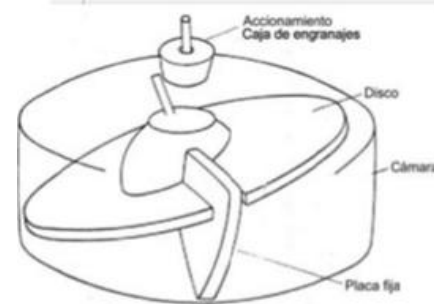


Sensors desplaçament positiu

- La precisió depèn dels espais entre les parts mòbils i la cambra, que permeten que el fluid circuli sense generar moviment
- Ús domèstic
- Elevades pèrdues de càrrega
- Impossible mesurar cabals petits o fluids amb sòlids en suspensió

Sensors desplaçament positiu

- Tipus
 - D'engranatge:
 - 30 – 66000 L/min
 - $\pm 0,5 \%$
 - De disc giratori:
 - Aigua i oli
 - Cabal màxim: 600 L/min
 - Precisió: $\pm 1\% - \pm 2\%$



<https://www.youtube.com/watch?v=2GKEZurTQ28>

SENSORS MÀSSICS

- **TÈRMIC**

Principi de transferència de calor entre dos cossos que es troben a diferents temperatures

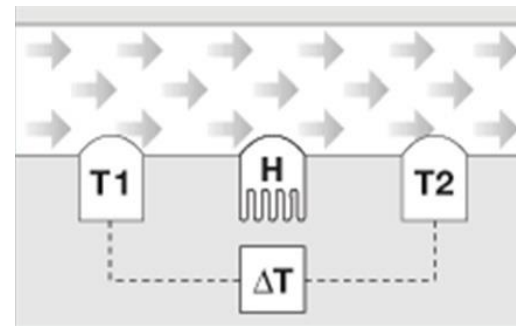
Calor absorbit per una massa:

$$Q = m \cdot c_e (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}})$$

Q: calor transferit

M: massa del fluid

C_e: calor específic



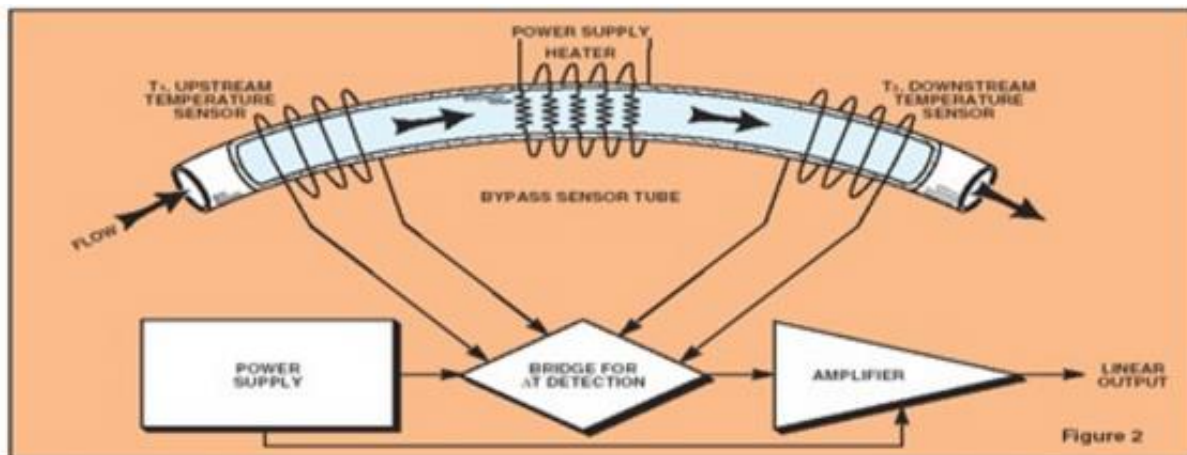
SENSORS MÀSSICS

- TÈRMIC

Format per dos sensors de T i una font de calor

La diferència de T es pot relacionar amb el cabal

A major cabal, menor diferència



SENSORS MÀSSICS

- **TÈRMIC**

- Líquids i gasos, inclús a baixa pressió
- Solució econòmica per canonades de grans diàmetres
- Apta per a conduccions rectangulars
- Precisió $\pm 1\%$

<https://www.youtube.com/watch?v=rDUnk4rxkwo>

SENSORS MÀSSICS

- **Efecte CORIOLIS**

Un objecte de massa m que es mou sobre el radi d'un disc que gira a una velocitat angular constant tendeix a accelerar-se amb respecte el disc segons el sentit del moviment , si s'allunya o s'apropa l'eix de gir

<https://www.youtube.com/watch?v=Gr0tD6Kob3w>

https://www.youtube.com/watch?v=mcPs_OdQOYU

SENSORS MÀSSICS

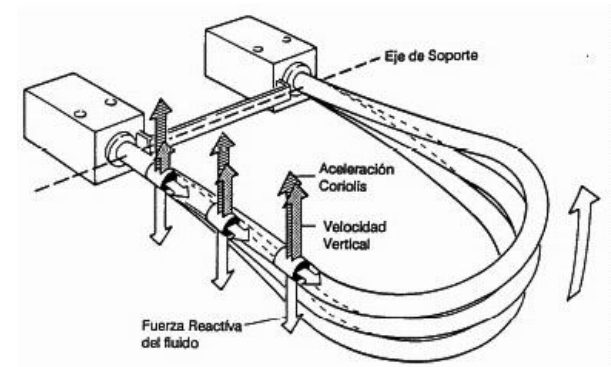
- **CORIOLIS**

Format per un o dos tubs en U, per on circula el fluid.

Dos sensors, un a cada extrem, mesurant el desplaçament en els tubs

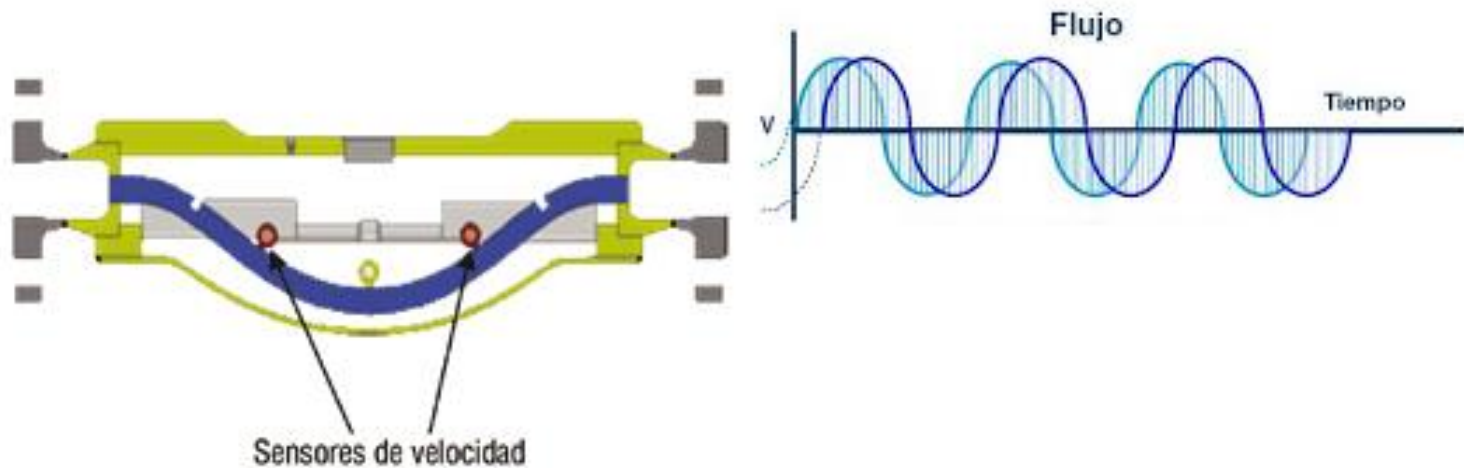
La forma en U permet que el sentit del moviment i velocitat del fluid en el sensor d'entrada sigui oposat al de sortida.

La rotació es reemplaça per la vibració del tubs



SENSORS MÀSSICS

- **CORIOLIS**



El desfasament és proporcional al cabal màssic

SENSORS MÀSSICS

- **CORIOLIS**

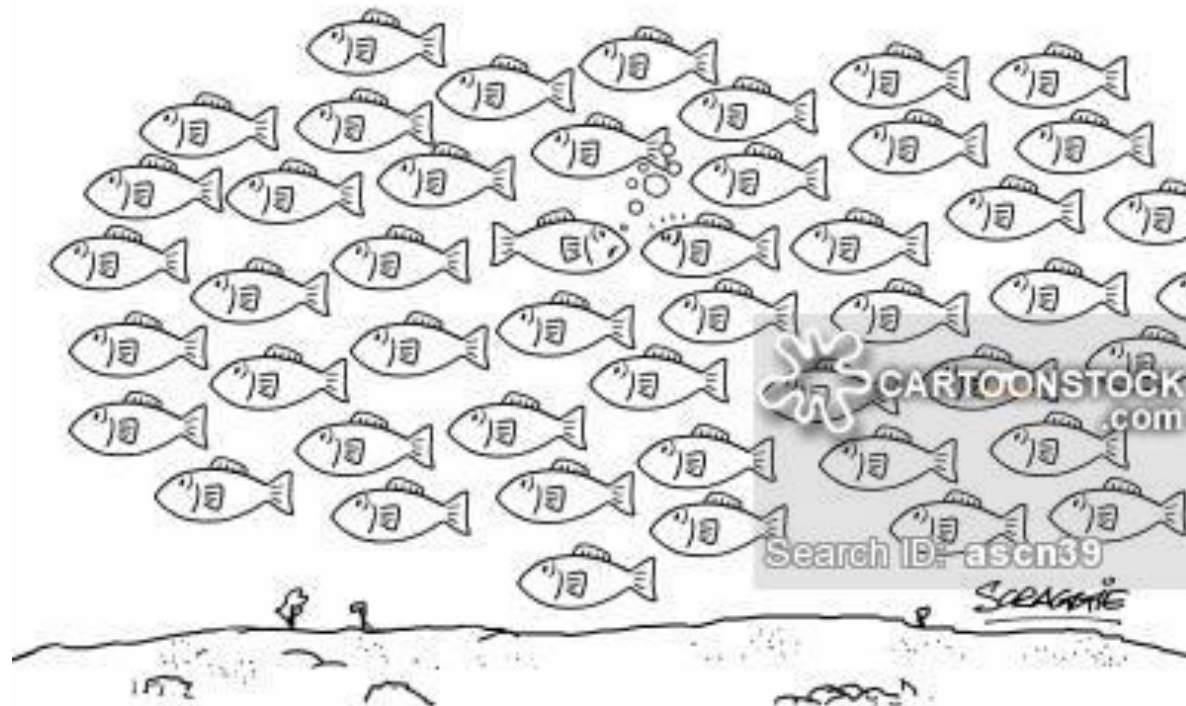
- Mesura independent de les característiques del fluid
- Tot tipus de fluids en un ampli rang de temperatures
- El sensor més precís
- No necessita trams rectes de conducció
- Car
- Sensible a vibracions

<https://www.youtube.com/watch?v=T89G4Ht09Jw>

CUADRO 8.1
Aplicaciones de los caudalímetros

	Líquidos limpios	Líquidos corrosivos	Líquido viscoso	Líquidos apolares	Fluidos criogénicos	Lechada	Gases limpios	Gases sucios	Líquidos corrosivos	Vapor
Caudal volumétrico										
Diafragma	☞☞	☞	♣	☞☞	☞☞	♣	☞☞	♣	☞	☞☞
Tobera	☞☞	☞	♣	☞☞	☞☞	♣	☞☞	♣	☞	☞☞
Venturímetro	☞☞	☞	♣	☞☞	☞	♣	☞☞	♣	☞	☞☞
Tubo Pitot	☞☞	♣	♣	☞☞	☞	♣	☞☞	♣	☞	☞☞
Tubo Annubar	☞☞	☞	♣	☞☞	☞	♣	☞☞	♣	☞	☞
Rotámetro	☞☞	☞	☞	☞☞	☞	♣	☞	♣	♣	♣
Engranajes	☞☞	♣	☞	☞☞	☞☞	♣	♣	☞☞	♣	♣
Ultrasónicos	☞☞	☞☞	☞☞	☞☞	☞☞	☞☞	♣	♣	♣	♣
Electro-magnéticos	☞☞	☞☞	☞☞	♣	♣	☞☞	♣	♣	♣	♣
Vórtex	☞☞	☞☞	☞	☞☞	☞☞	☞	☞☞	☞	☞	☞☞
Turbina	☞☞	☞	☞	☞☞	☞	♣	☞☞	♣	☞	☞
Caudal másico										
Térmico	☞	♣	☞	☞	♣	♣	☞☞	☞	☞	♣
Coriolis	☞☞	☞☞	☞☞	☞☞	☞☞	☞	☞☞	♣	☞☞	☞

☞☞: Adecuado; ☞: Uso con limitaciones; ♣: No adecuado



"Look, rules are meant to be broken, aren't they?"

<https://www.youtube.com/watch?v=Bljj3Qcmbf4>

<https://www.youtube.com/watch?v=ureGelZPi3o>