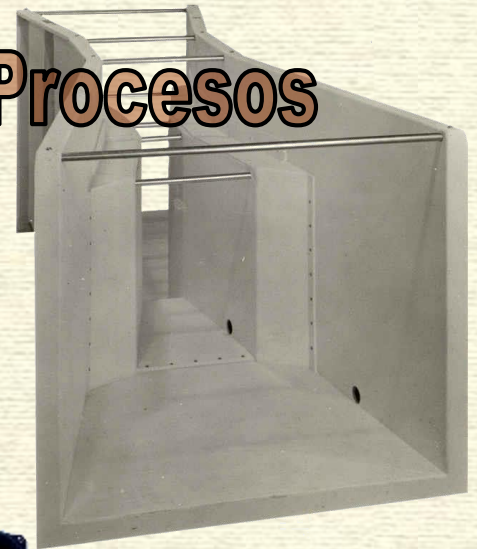


# Instrumentación Industrial de Procesos



## TEMA 5

# ELEMENTOS DE CAUDAL

2da. Parte



Departamento de Ingeniería de Procesos  
y Gestión Industrial

## TEMA 5: MEDICIÓN DE CAUDAL DE FLUIDOS



La variable caudal, tipos. Perfil de velocidades, factores que determinan el régimen de flujo, fluidos no newtonianos, distorsiones. Características especiales de caudalímetros: amplitud de rangos, totalización. Elementos diferenciales convencionales, de geometría fija y de flujo crítico. Medidores de área variable y de desplazamiento positivo. Caudalímetros a turbina, oscilatorios, electromagnéticos y ultrasónicos. Medición de caudal másico: directos, inferenciales, térmicos y con corrección por densidad. Caudalímetros para canales abiertos. Selección de caudalímetros: especificación y procedimiento.



# TIPOS DE CAUDALÍMETROS (Norma BS-7405)

• Convencionales de presión diferencial

• Otros tipos de presión diferencial

• De desplazamiento positivo

• Rotatorios

• De Área variable

• Oscilatorios para fluidos

• Electromagnéticos

• Ultrasónicos

• Másicos directos e indirectos

• Térmicos

• Otros para fluidos en ductos cerrados

• De canal abierto

• Para sólidos



# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

En una segunda categoría de medidores de presión diferencial (según la clasificación de la Norma BS 7405) están aquellos dispositivos que tienen una geometría fija y que por fenómenos hidrodinámicos, distintos al grupo anterior, infieren caudal a partir de la medición de diferencia de presiones.



A este grupo pertenecen el **Tubo de Pitot**, **Pitot Promediante**, **Medidor de Impacto**, **Cono en "V"** y el **de codo**.

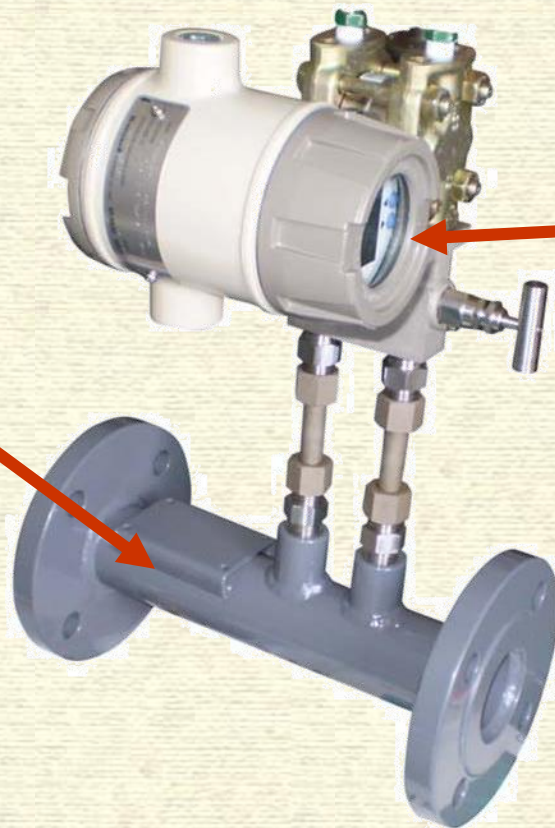


# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Igual que los medidores anteriores, estos dispositivos son **elementos primarios** que requieren de un elemento secundario que es un **transmisor de diferencia de presión** que puede generar una señal estándar.

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

Elemento  
primario  
(diferencial)



Elemento  
secundario  
(Transmisor)

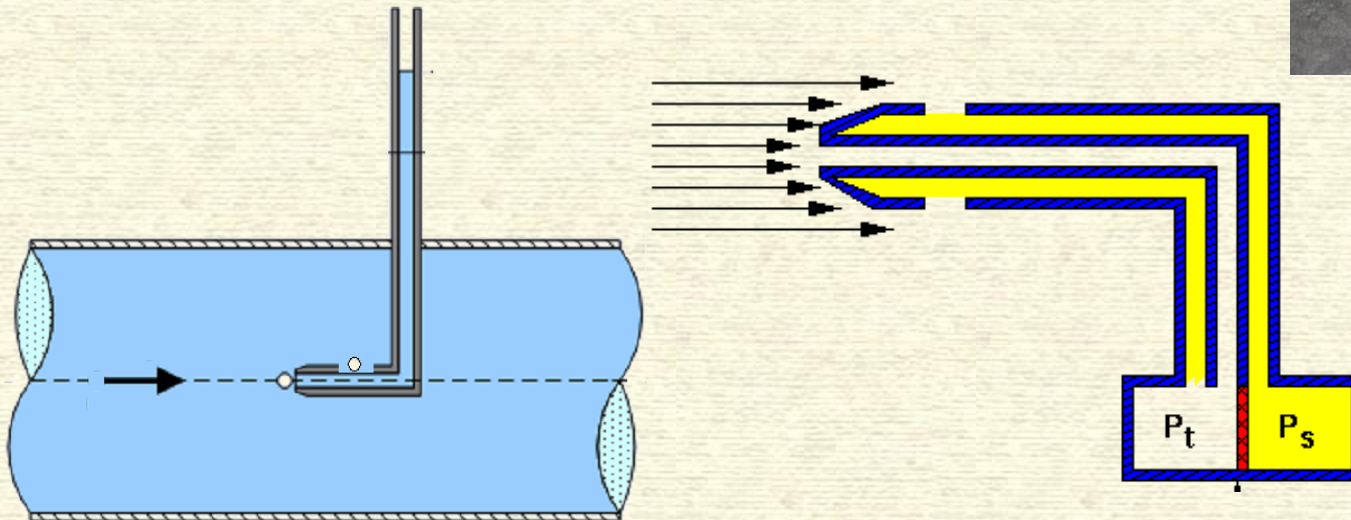
Como la **señal primaria no es lineal** con respecto al caudal, se deberá caracterizar la señal de salida en el transmisor.

# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## tubo de Pitot (Tubo de Prandtl)

Es uno de los dispositivos más antiguos para medir caudal (velocidad del fluido). Consiste en un tubo con un orificio enfrentado a la corriente (punto estanco) y otro ubicado en la zona de circulación normal.

Ambas tomas se comunican con recintos separados. La diferencia de presión entre ambos es proporcional al cuadrado de la velocidad en el punto de impacto (estanco).





# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Tubo de Pitot

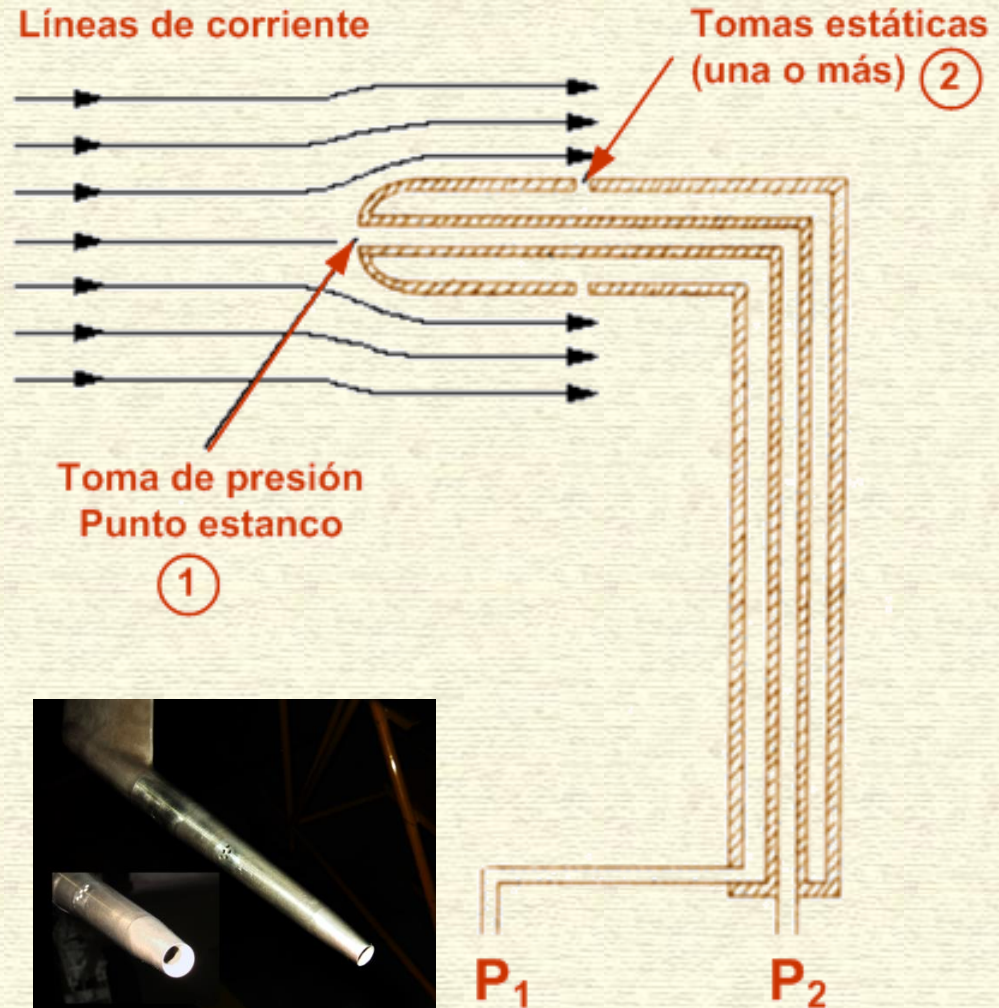
Aplicando el Teorema de Bernoulli en los puntos 1 y 2

$$\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{1}{2} v_2^2 + \frac{P_2}{\rho_2}$$

Velocidad nula  
(zona estanca)

Con lo que se puede inferir la velocidad (puntal en la toma) a partir de la diferencia de presión:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$



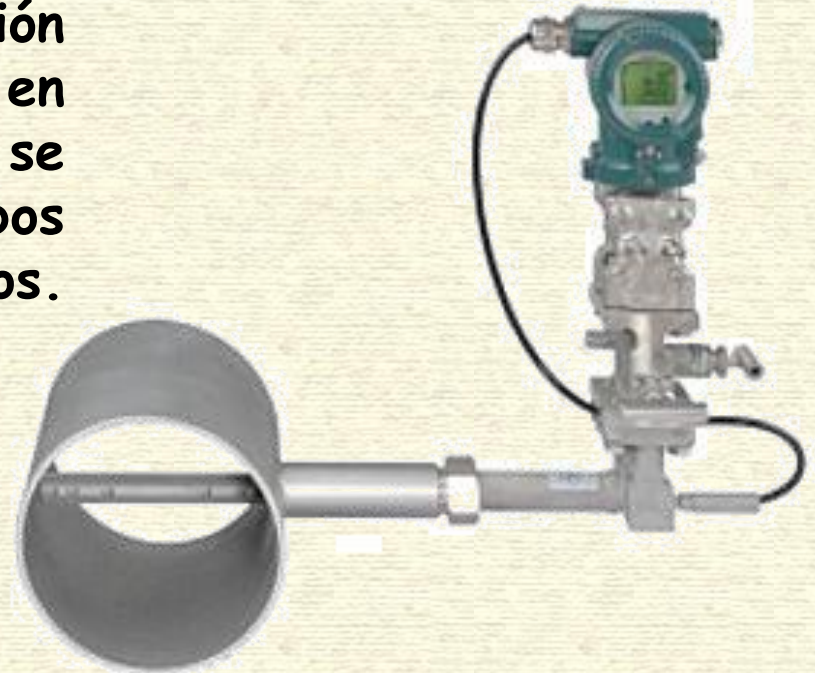
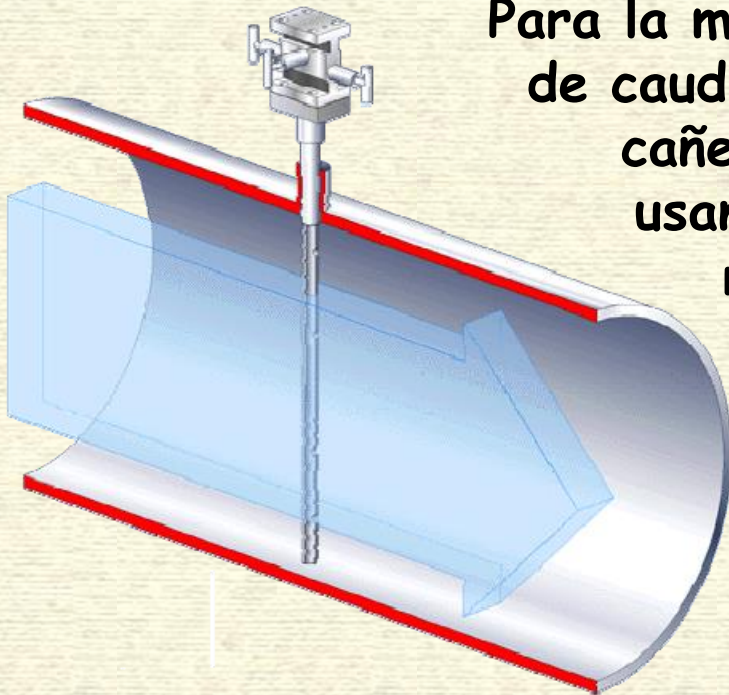
# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Tubo de Pitot

La forma tradicional de los Tubos de Pitot se usan mucho en túneles de viento, en anemómetros y para registro de velocidad de aviones.



Para la medición de caudales en cañería, se usan tubos rectos.

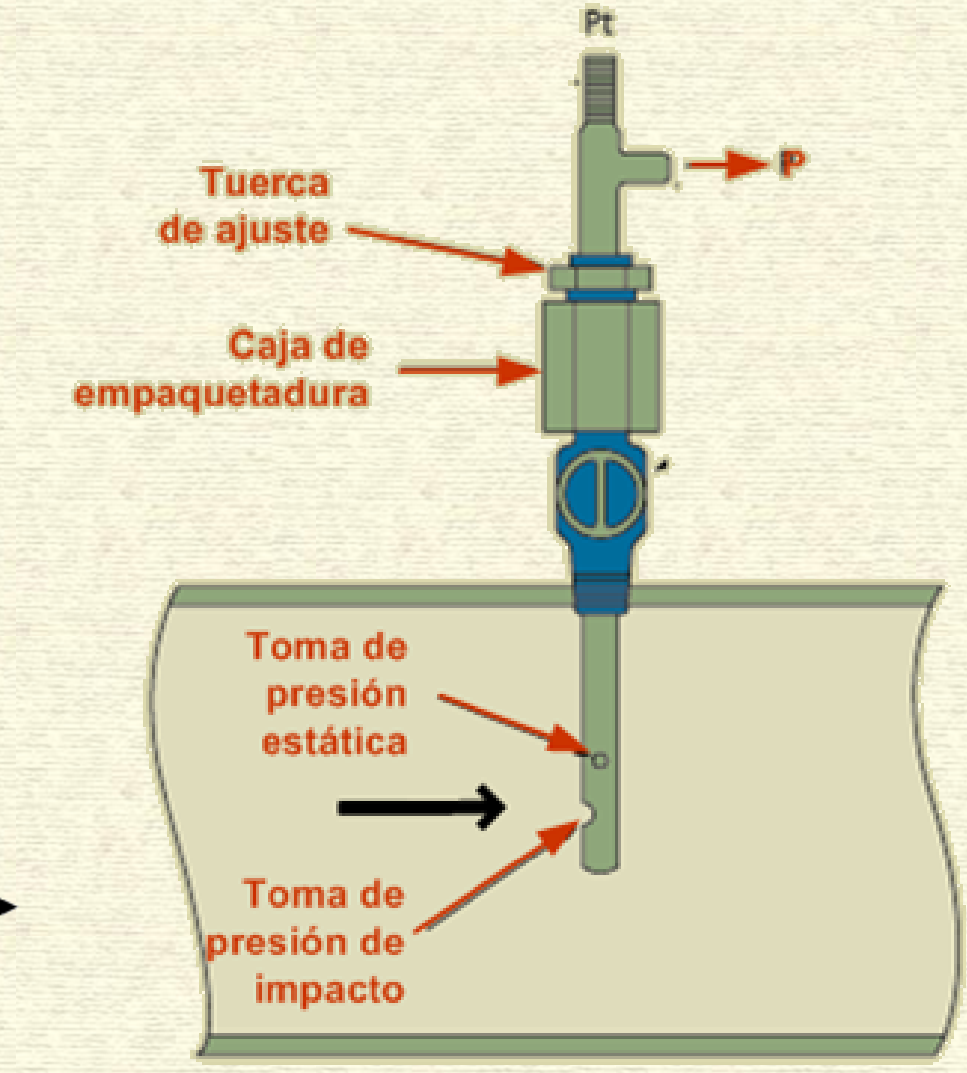
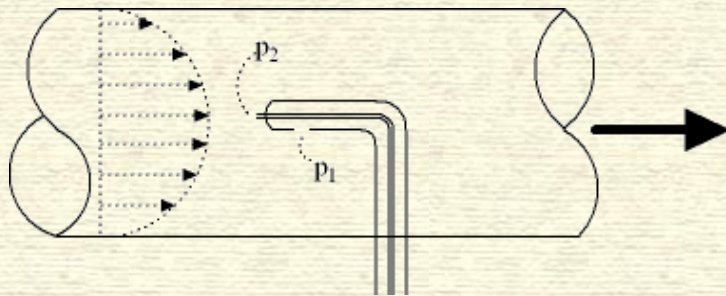




# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

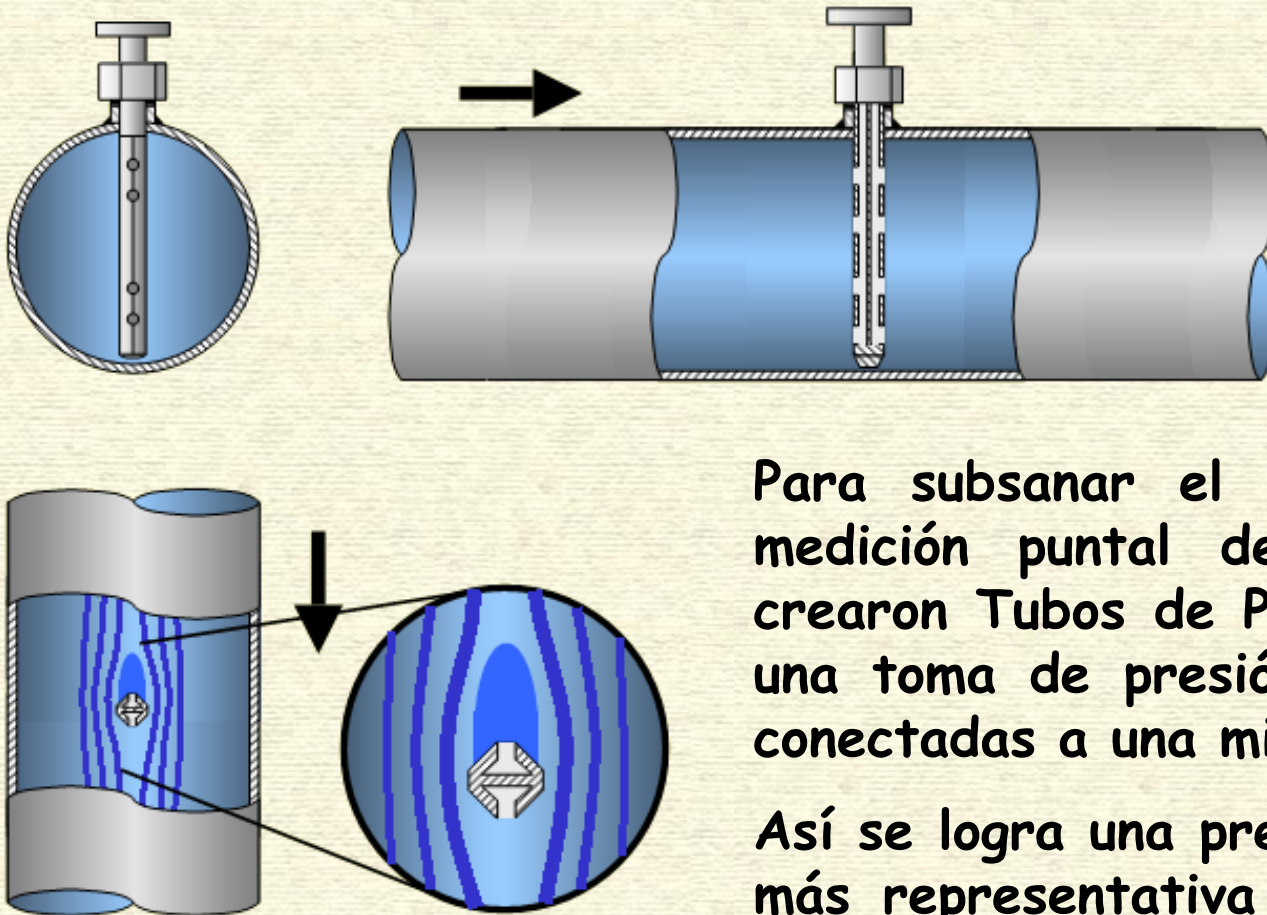
## Tubo de Pitot

La principal limitación en la medición de caudal radica en que mide la **velocidad en un punto**, que puede no ser representativo de la velocidad media de acuerdo al perfil de velocidades.



# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Tubo de Pitot Promediante (Annubar)



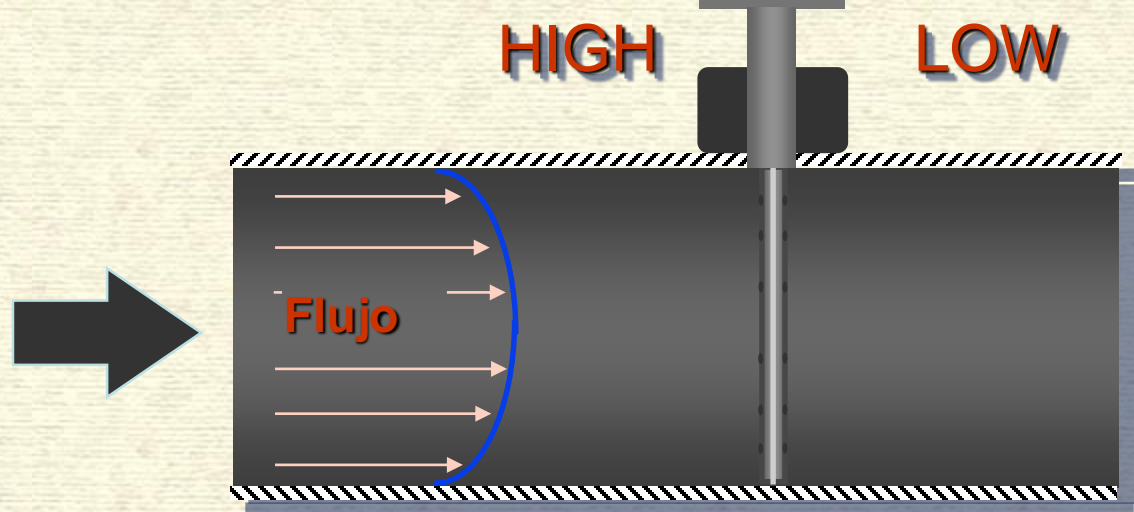
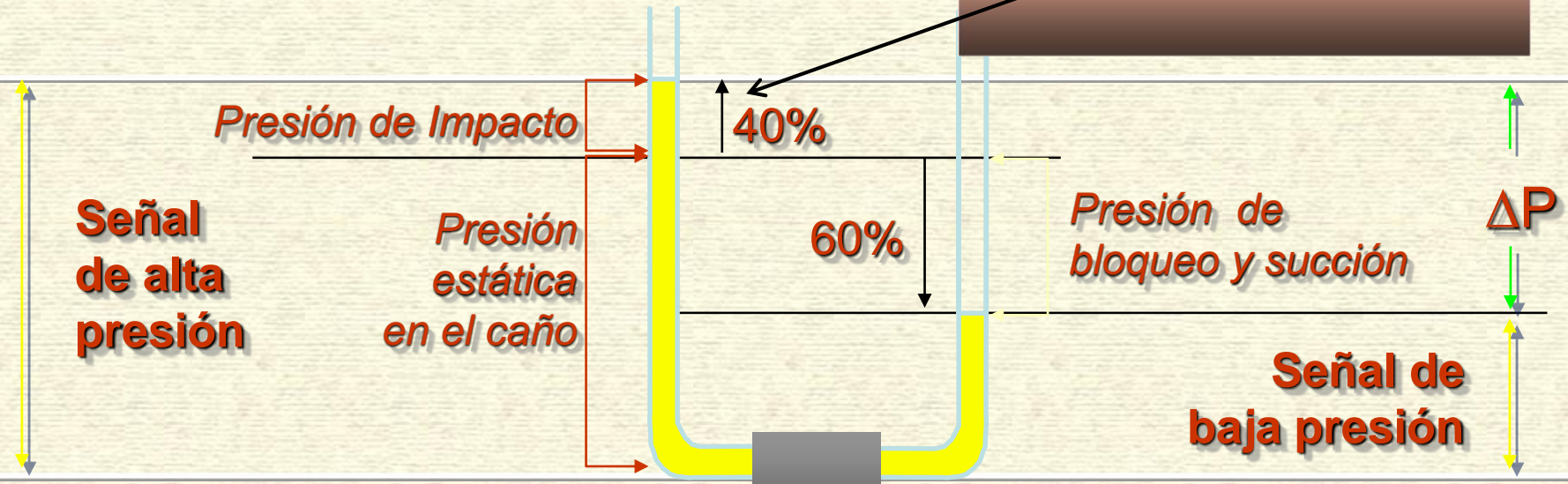
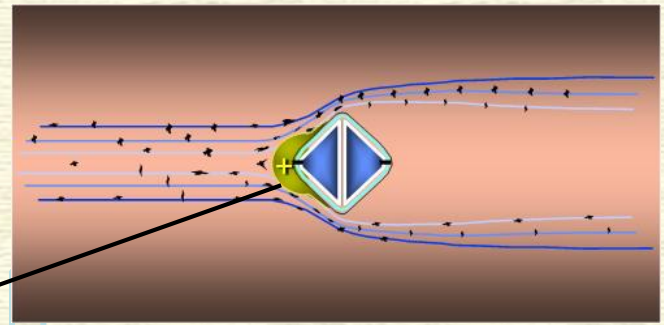
Para subsanar el problema de la medición puntal de velocidad, se crearon Tubos de Pitot con más de una toma de presión de impacto y conectadas a una misma cámara.

Así se logra una presión ponderada, más representativa de la velocidad media del fluido. Este dispositivo se conoce como **Tubo de Pitot Promediante**.



# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Tubo de Pitot Promediante



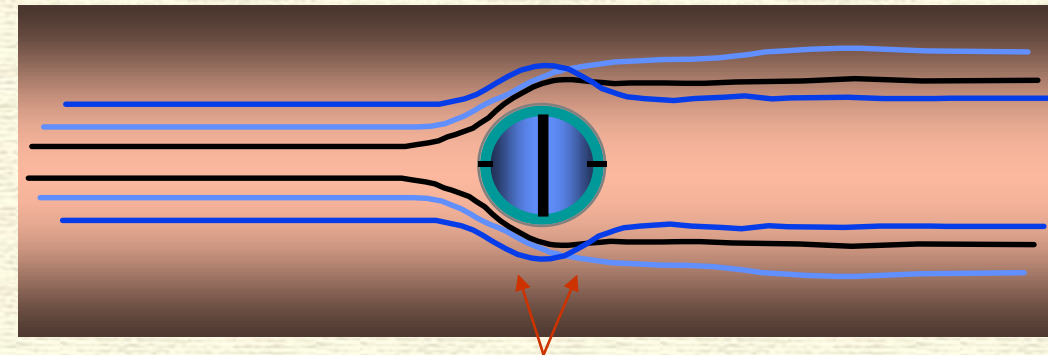
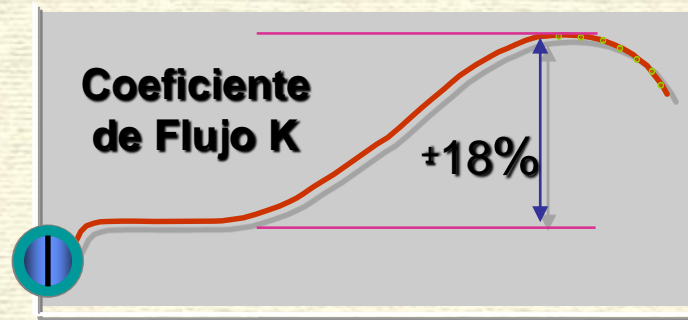
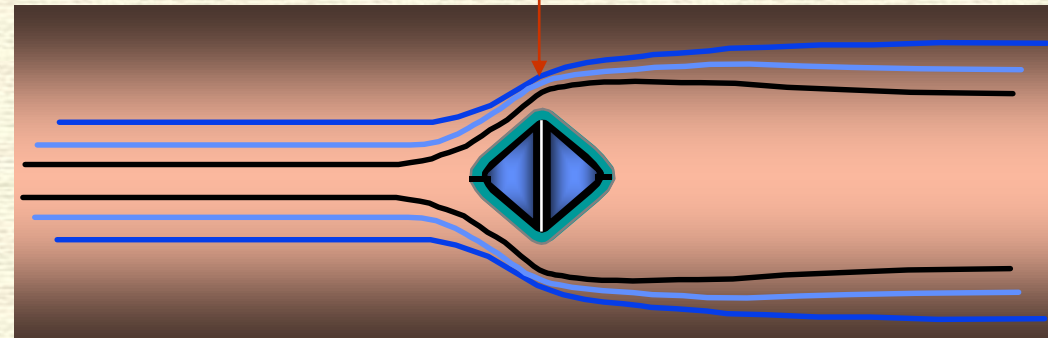
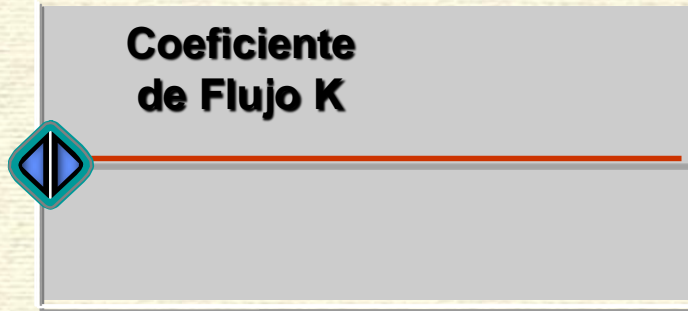
# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## tubo de Pitot Promediante (Annubar)

Los tubos se construyen con sección **circular** o en forma de **diamante**. Estos últimos con mucha mejor performance.

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

*Punto fijo de separación*



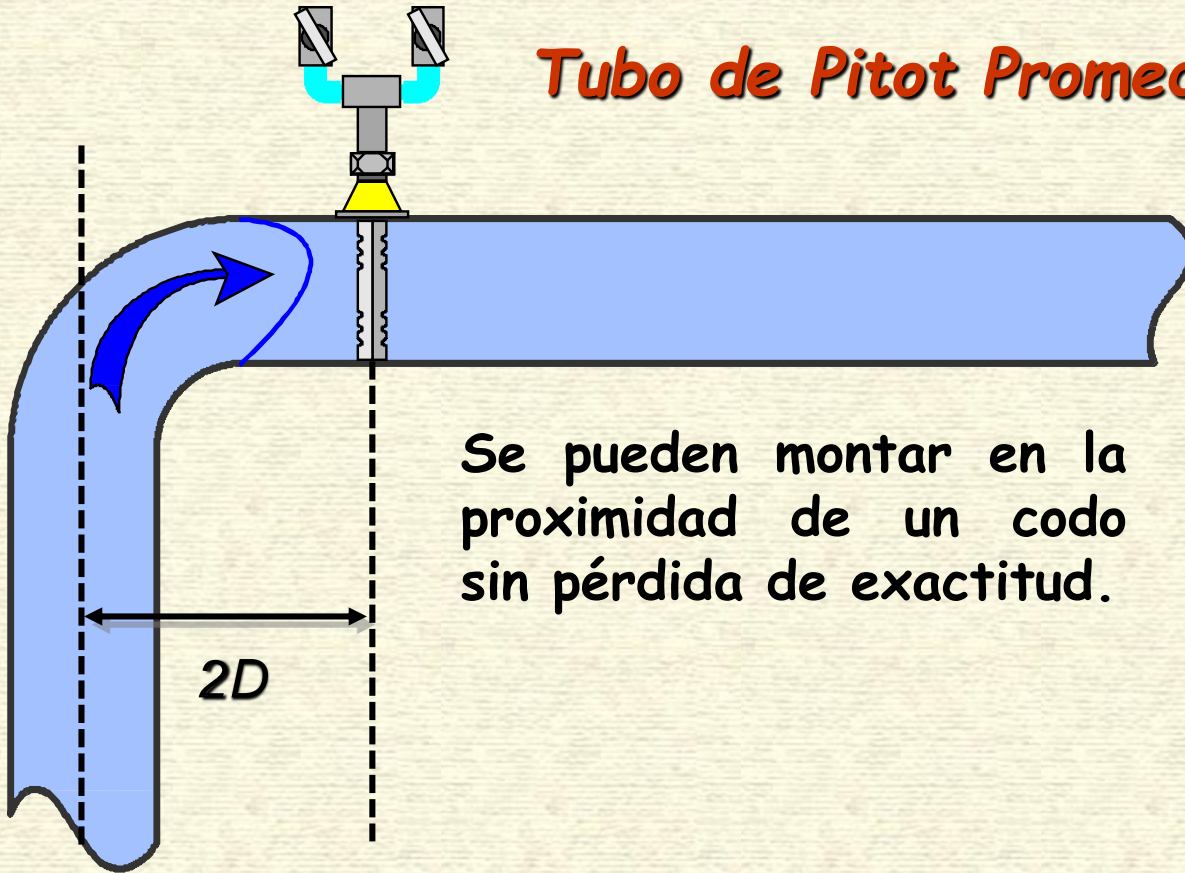
Número de Reynolds

*Punto variable de separación*



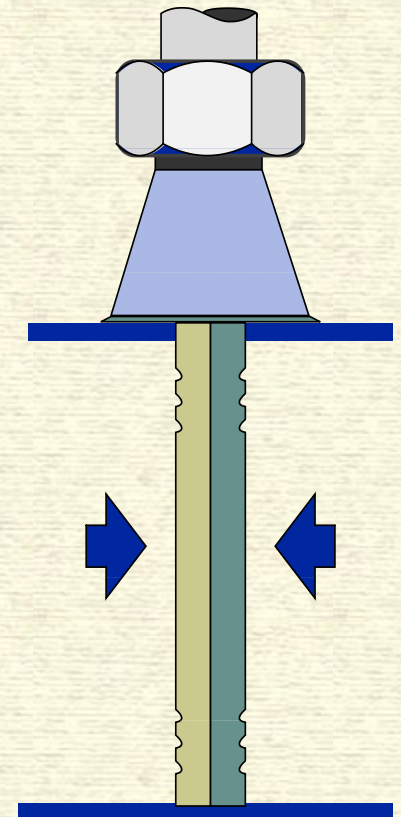
# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## tubo de Pitot Promediante (Annubar)



Se pueden montar en la proximidad de un codo sin pérdida de exactitud.

Hay modelos que son para medición bi-direccional



# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

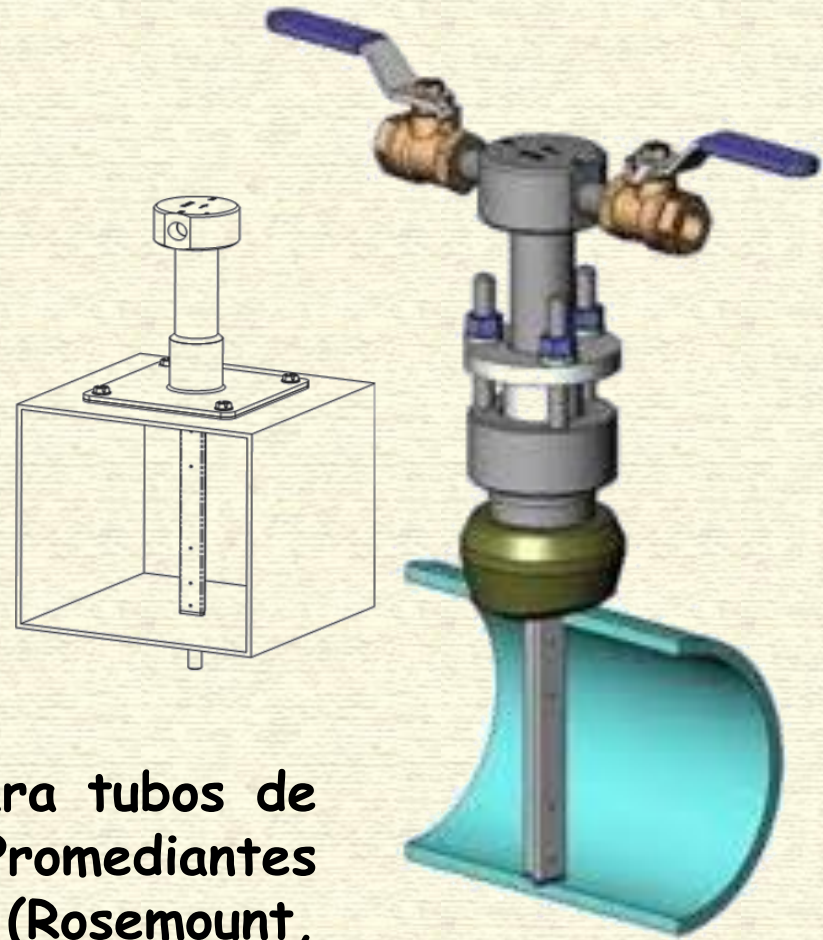
## tubo de Pitot Promediante (Annubar)

Tienen 2, 4, 6 u 8 orificios, dependiendo del diámetro.

El Pitot Promediante tiene una mayor exactitud ( $\pm 0.9\%$ ) que el común ( $\pm 2$  a  $3\%$ ) y un turndown importante (alrededor de 10:1).

Se construyen también para ductos de sección rectangular.

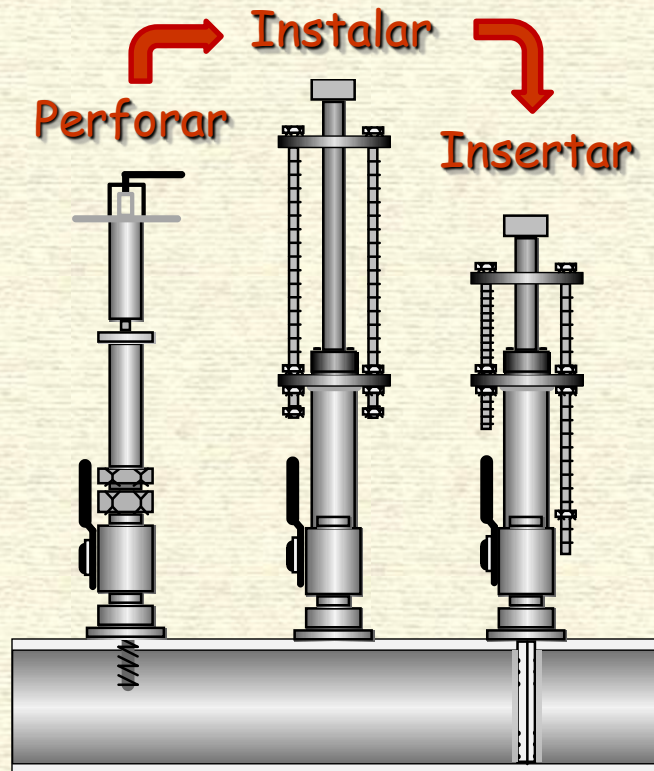
No hay estándares aceptados para tubos de Pitot. En particular, los Pitot Promediantes son tecnologías propietarias (Rosemount, ABB, etc.).



# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## tubo de Pitot Promediante (Annubar)

La **pérdida de carga permanente** de estos dispositivos es **relativamente baja** (diez veces menos que una placa de orificio), por que son muy útiles en la medición de gases y vapores.



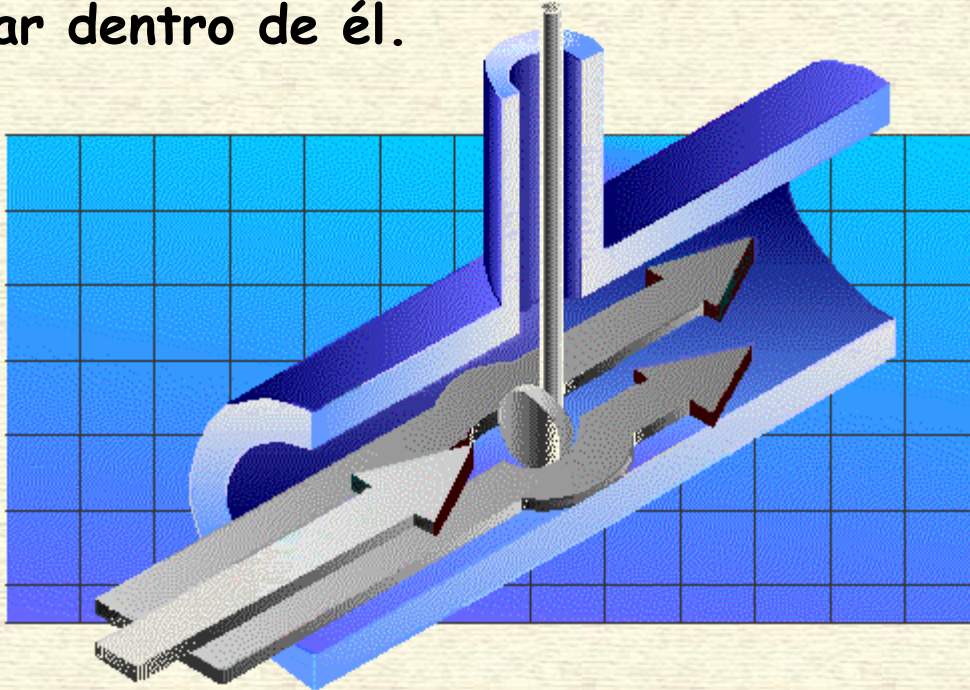
Estos son caudalímetros de **inserción**. Pueden ser instalados sin desmontar la cañería. (**hot taps**)



# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Medidor de impacto (Taget)

Los medidores de impacto consisten en un blanco (circular, rectangular, etc) colocado en el centro de la cañería sobre la que impacta el fluido al circular dentro de él.



Los caudalímetros de impacto se pueden usar para gran variedad de líquidos, gases y vapores, incluyendo suspensiones de viscosidad media.

# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Medidor de impacto (Taget)

La fuerza que produce el impacto del fluido sobre el blanco viene dado por:

$$F = C_D A \rho \frac{v^2}{2g}$$

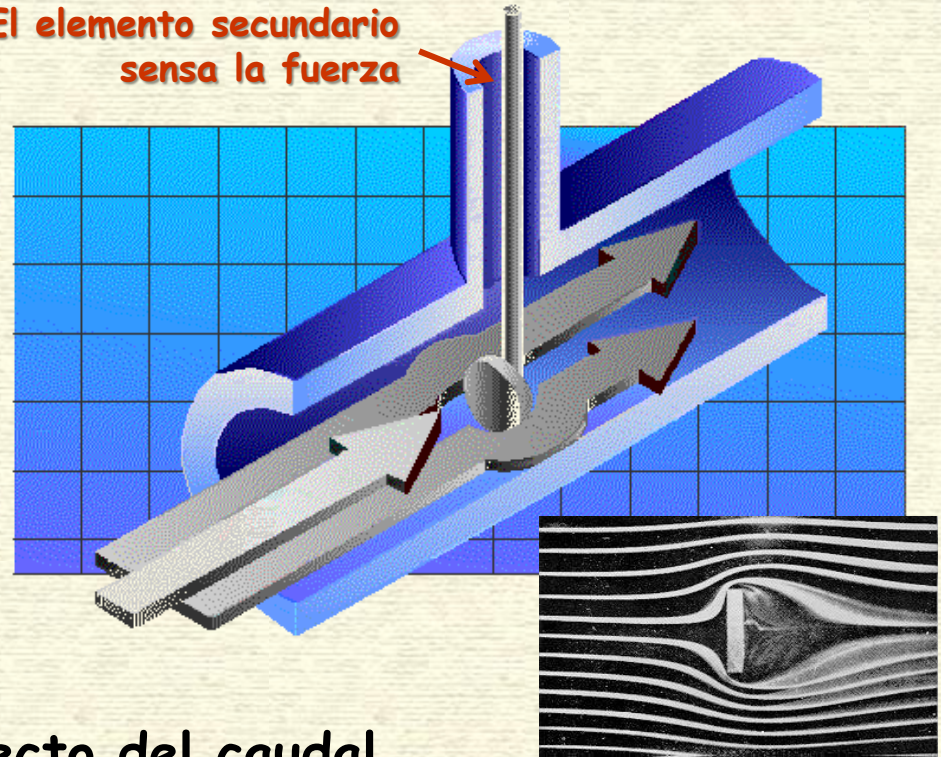
El transmisor transforma la fuerza en una señal estándar, de modo que:

$$Q = k \sqrt{F}$$

La salida es cuadrática respecto del caudal.

La exactitud varía entre  $\pm 1 \%$  y  $\pm 5 \%$  R, dependiendo del fabricante. La rangebilidad (turndown) está entre 10:1 a 15:1. Puede trabajar con NRe relativamente bajos (hasta 100).

El elemento secundario  
sensa la fuerza

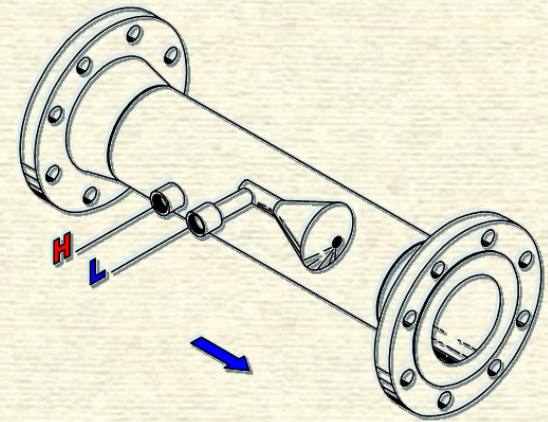
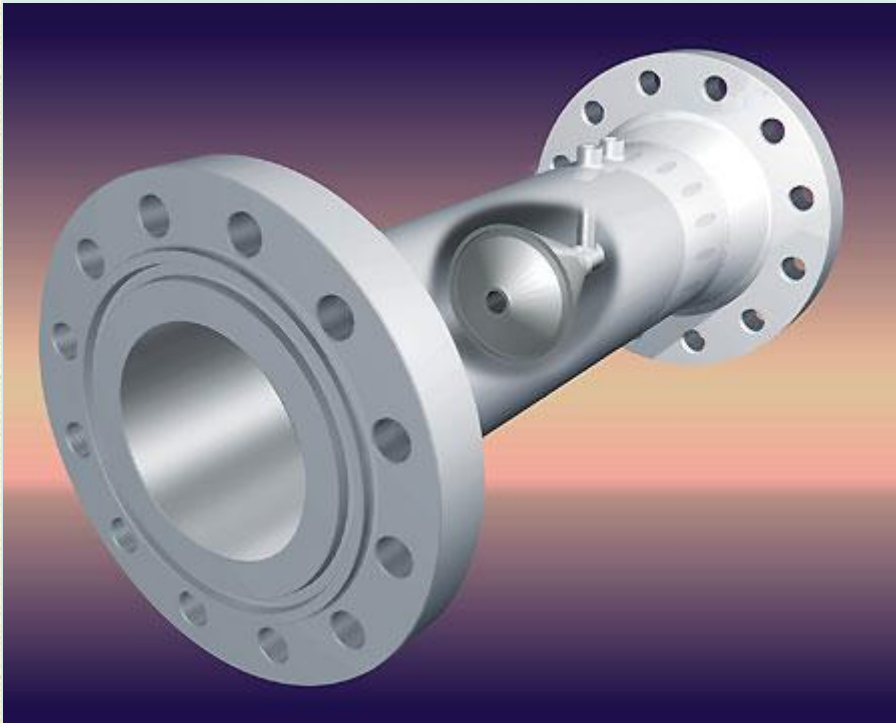




# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Caudalímetro con cono en V (V-cone)

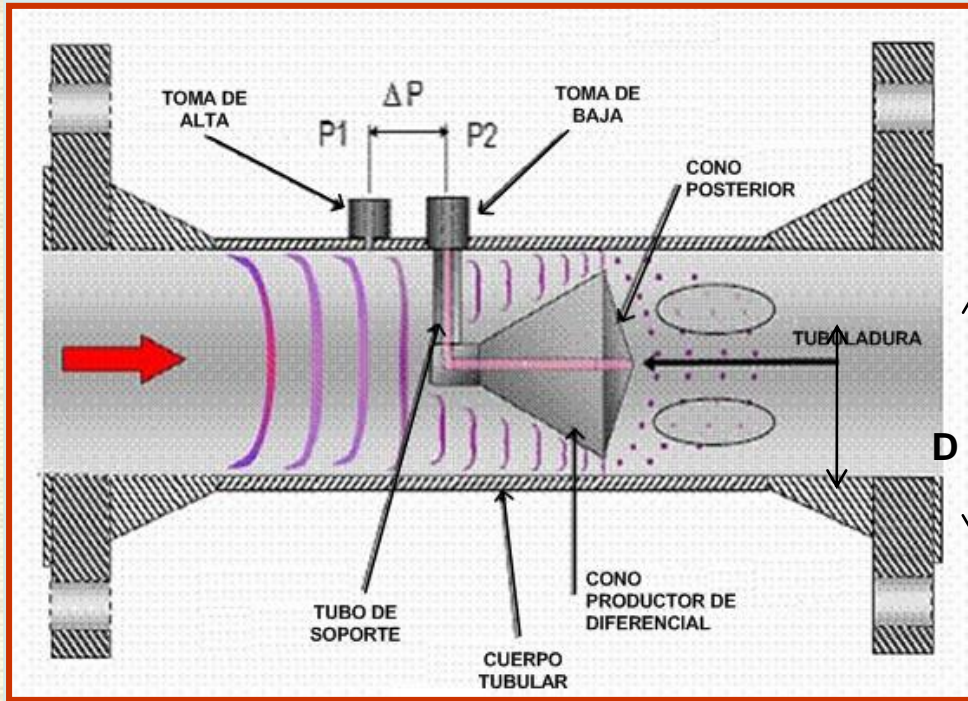
En este tipo de caudalímetro utiliza el mismo principio físico que otros medidores de presión diferencial: el teorema de conservación de la energía del flujo de fluidos a través de una tubería (Bernoulli). Se trata de una tecnología patentada de medición de flujos (McCrometer).



El dispositivo consta de un cono central en el interior del tubo y dos tomas ubicadas en zonas de condiciones hidrodinámicas bien definidas.

# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

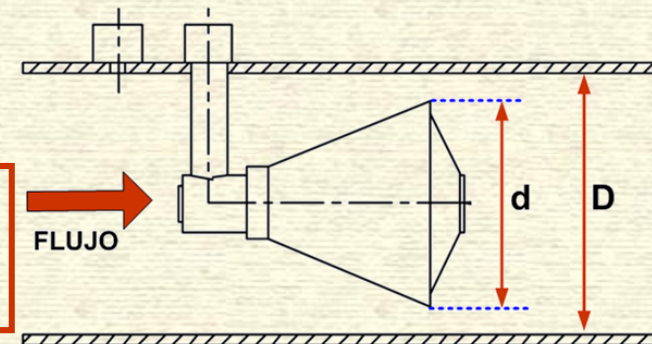
## Caudalímetro con cono en V (V-cone)



El cono interactúa con el fluido, modificando su perfil de velocidad para crear una región de baja presión inmediatamente aguas abajo del cono. La diferencia entre la presión estática de la línea (P1) y la presión aguas abajo del cono (P2) se vincula con la velocidad media de flujo. Las ecuaciones de diseño son similares a las de placas.

El diferencial aumenta y disminuye en forma exponencial con la velocidad del flujo. Cuanto mayor sea el estrechamiento de la sección transversal (mayor **beta**), mayor será la presión diferencial.

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}$$

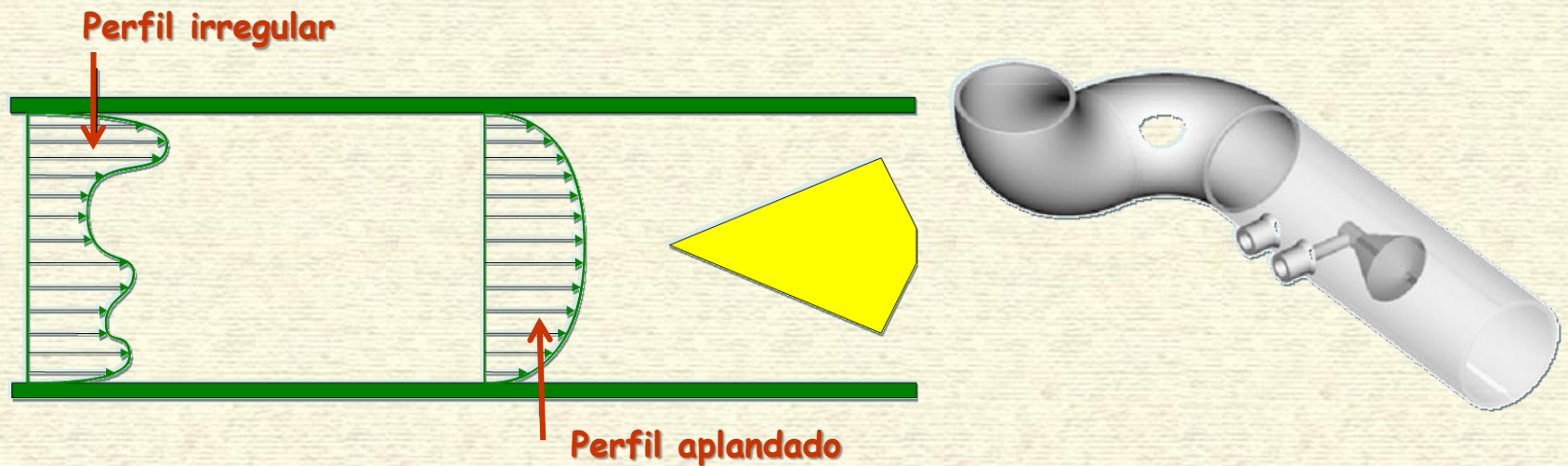




# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Caudalímetro con cono en V (V-cone)

Accesorios (codos, válvulas, reductores, etc.), bombas y derivaciones distorsionan el perfil de velocidades y causan errores en los dispositivos diferenciales. Para resolver este problema, el Cono en V-Cone modifica el perfil aguas arriba transformándolo en un perfil bien desarrollado.



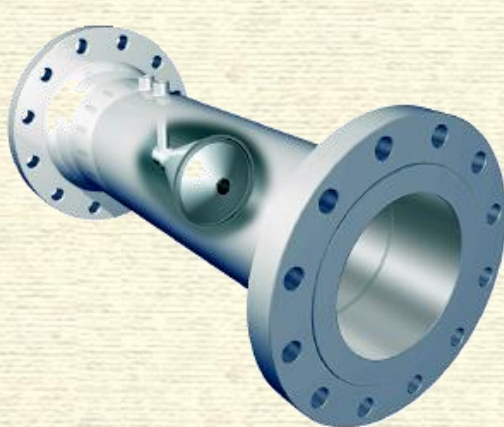
El medidor se puede colocar mucho más cerca de los accesorios. Se recomienda dejar de cero a tres diámetros de cañería recta aguas arriba y de cero a un diámetro aguas abajo del dispositivo.

# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

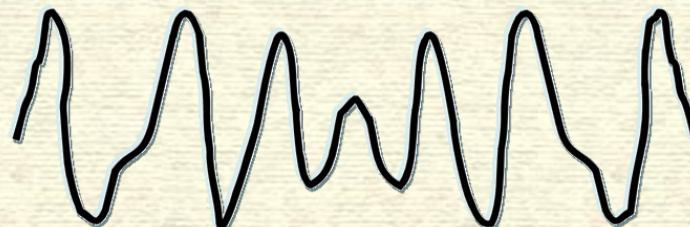
## Caudalímetro con cono en V (V-cone)

La **precisión** del elemento primario puede ser de hasta  $\pm 0.5\%$  **Span** (en el nivel de la instrumentación secundaria). El turndown es alto: 10:1.

Las placas de orificio y otros dispositivos similares producen fluctuaciones debido a vórtices que se forman inmediatamente después del dispositivo. Estos vórtices producen señales de alta amplitud y baja frecuencia, mientras que en el cono en V los vórtices son menores y la señal presenta fluctuaciones de baja amplitud y alta frecuencia.



Señal estacionaria de un Cono en V



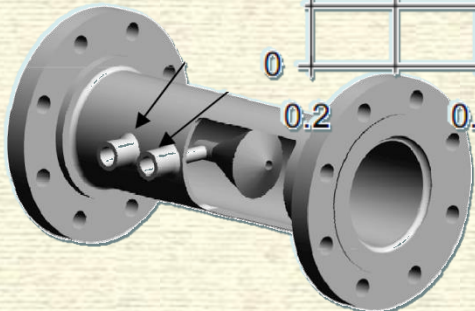
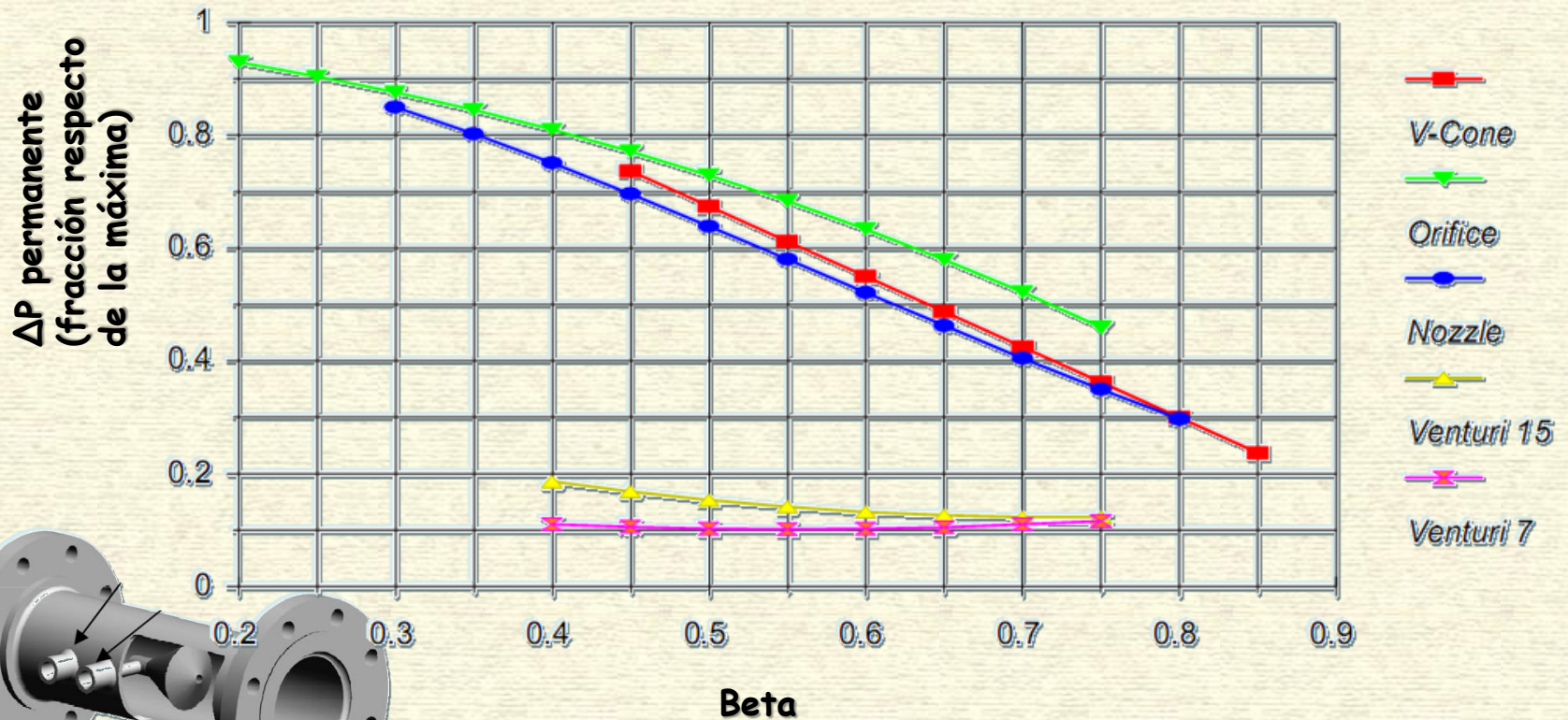
Señal estacionaria de un a Placa de orificio



# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Caudalímetro con cono en V (V-cone)

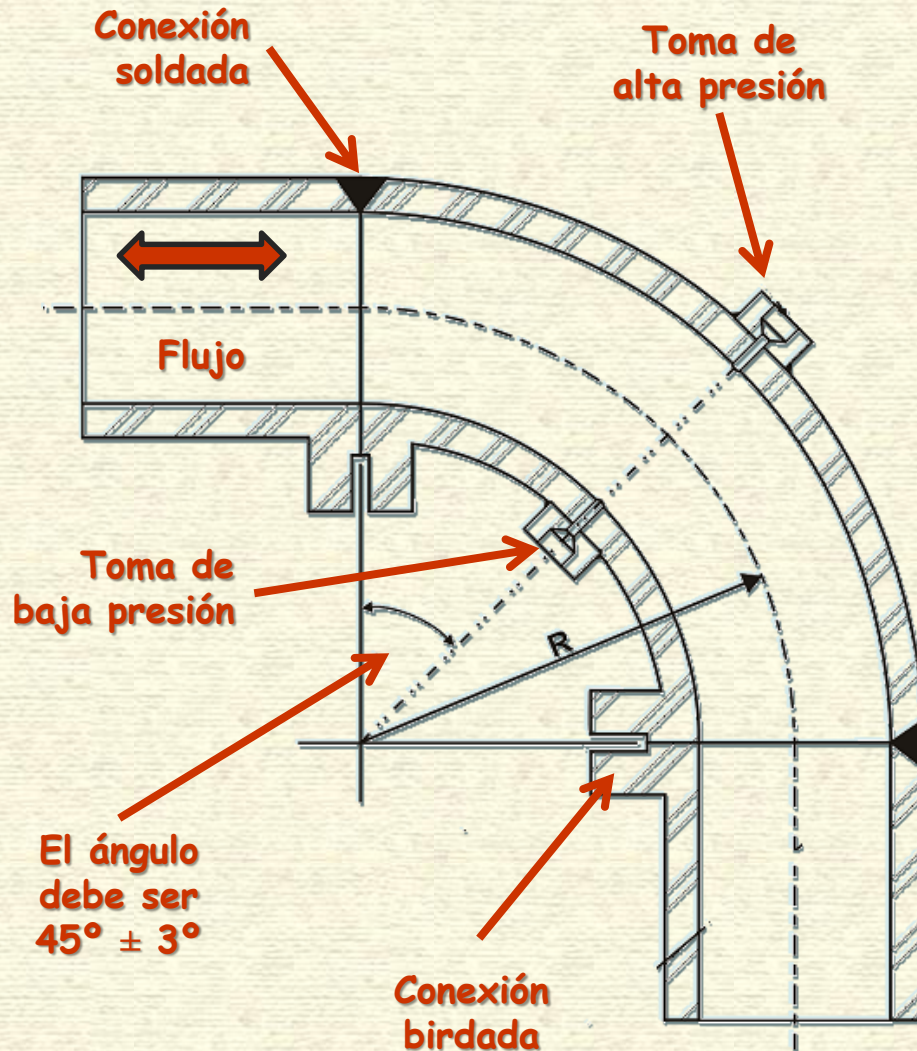
Al no producirse impacto abrupto contra una superficie, la pérdida de presión permanente es inferior a la de un medidor de placa orificio, pero superiores a dispositivos tipo Venturi





# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Caudalímetro de codo



Al circular un fluido por un codo, se produce un cambio de dirección en el flujo generando una diferencia de presión resultante de la fuerza centrífuga. Esta diferencia es proporcional al cuadrado de la velocidad media del fluido.



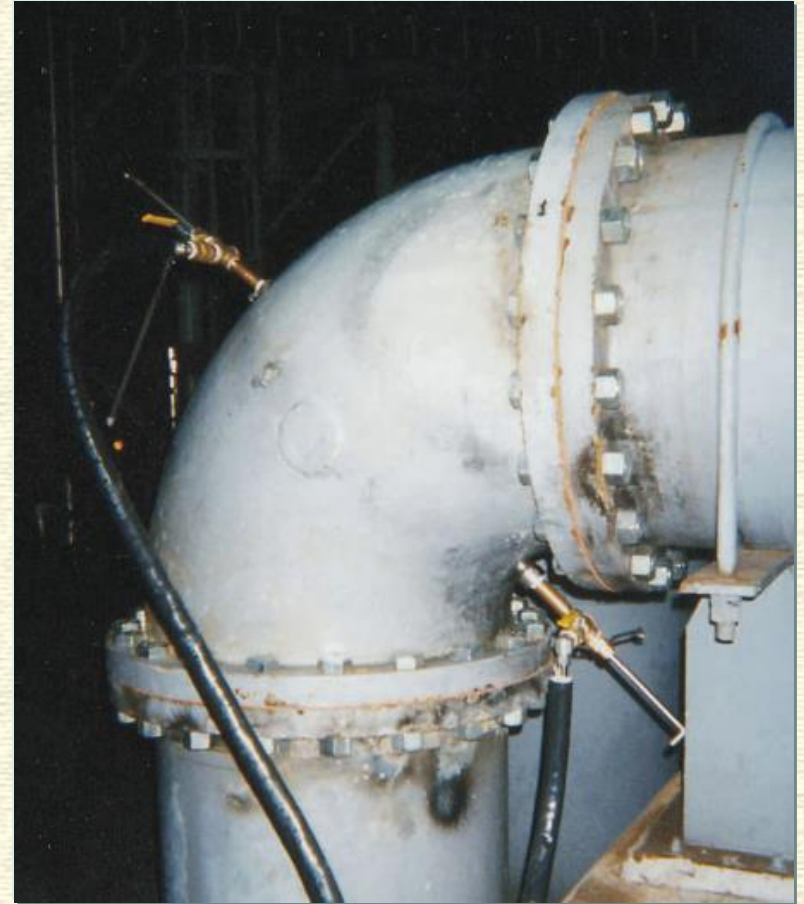
# OTROS MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

## Caudalímetro de codo

Como en las plantas de procesos se dispone de codos, el costo de estos medidores es muy bajo. Sin embargo la **exactitud es muy pobre** (por encima de  $\pm 4\%$  Span), por lo que se debería usar sólo cuando no se pueden emplear otros dispositivos por razones de espacio o económicas.

Hay un estándar publicado por ASME. El procedimiento de diseño es análogo al de placas.

Se requiere que en  $NRe$  sea superior a 50000. Los diferenciales son mucho menores que los producidos por los otros dispositivos de la familia. Son bi-direccionales.





# TIPOS DE CAUDALÍMETROS (Norma BS-7405)

• Convencionales de presión diferencial

• Otros tipos de presión diferencial

• De desplazamiento positivo

• Rotatorios

• De Área variable

• Oscilatorios para fluidos

• Electromagnéticos

• Ultrasónicos

• Másicos directos e indirectos

• Térmicos

• Otros para fluidos en ductos cerrados

• De canal abierto

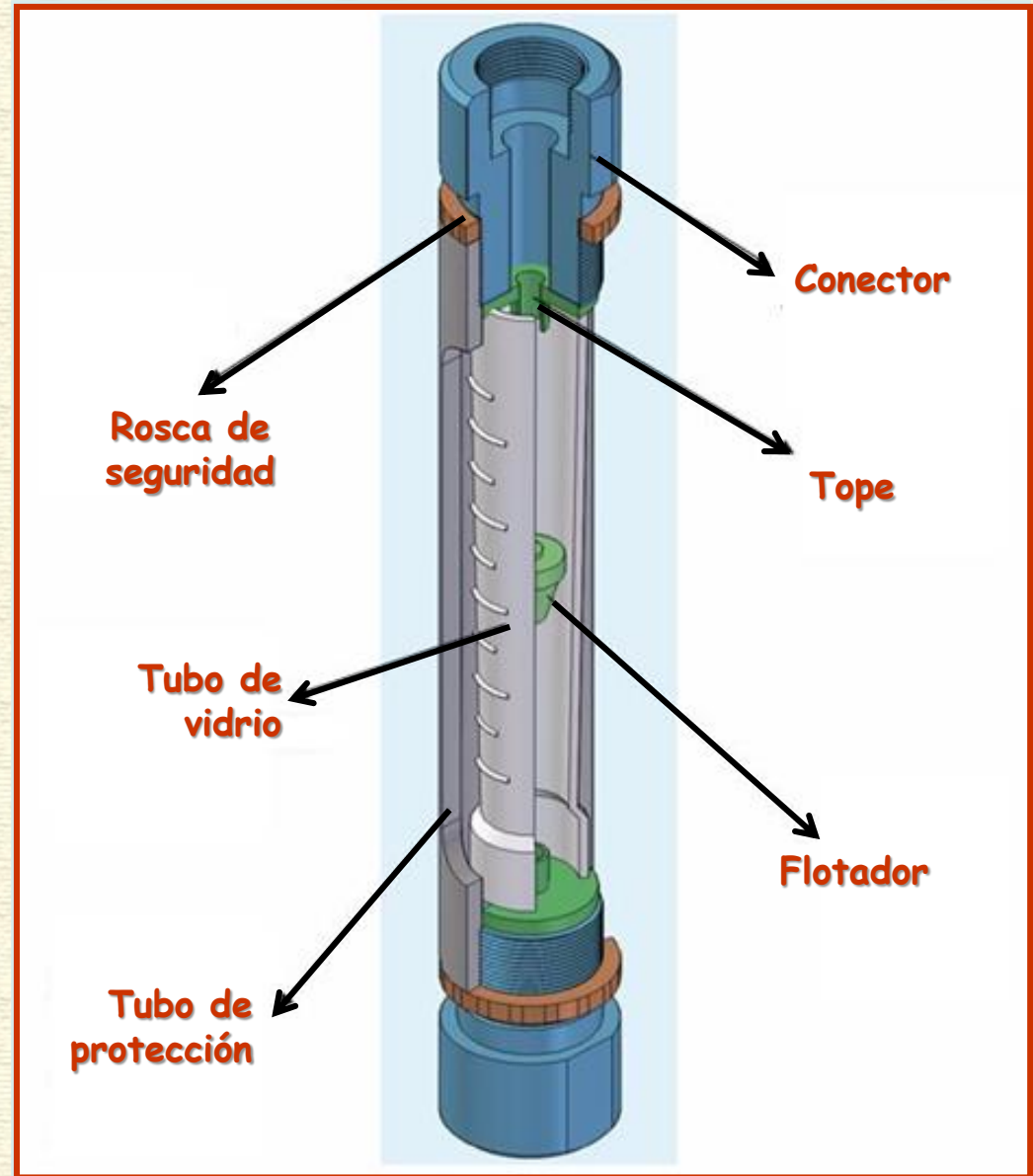
• Para sólidos



# MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE (rotámetro)

Los rotámetros son medidores simples y baratos para aplicaciones con gases y líquidos. Tienen una exactitud en torno del 2 % Span. Es ideal en aplicaciones industriales y de laboratorio donde se precisa solo indicación local.

Consta de un tubo tronco cónico vertical en que se desplaza un flotador. La posición en la que permanece el flotador depende del caudal.





# MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE (rotámetro)

El fluido entra por la parte inferior del tubo y hace que el flotador suba hasta que el área anular entre él y la pared del tubo sea tal, que fuerza de arrastre sea suficiente para equilibrar el peso efectivo del flotador.

En equilibrio:

$$\text{Peso} = \text{Empuje} + \text{Arrastre}$$

$$\rho_F V_F g = \rho_L V_F g + C_D A_F \rho_L \frac{v^2}{2g}$$

La velocidad del fluido es constante



# MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE (rotámetro)

La velocidad vale: 
$$v = g \sqrt{\frac{2V_F(\rho_F - \rho_L)}{C_D A_F \rho_L}}$$

Cuando el caudal aumenta, el área anular  $A$  debe aumentar y el flotador se posiciona más arriba

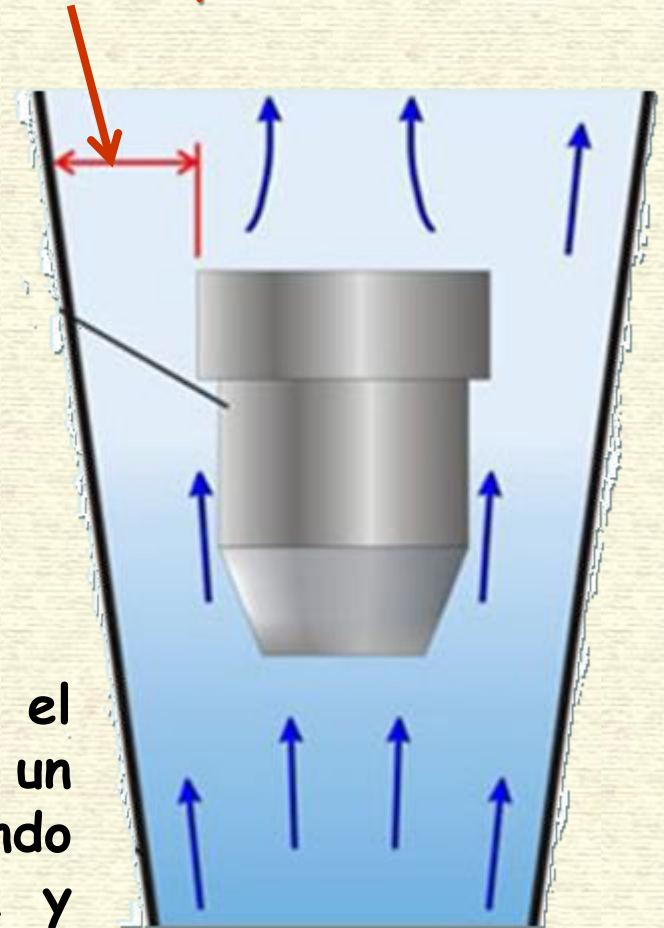
El caudal que circula será:

$$Q = v A = g A \sqrt{\frac{2V_F}{C_D A_F}} \sqrt{\frac{\rho_F - \rho_L}{\rho_L}}$$

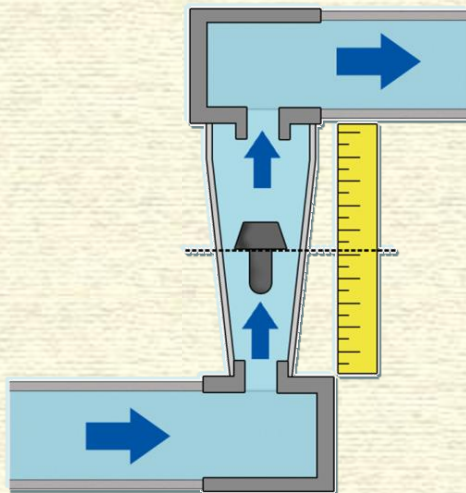
Sección de pasaje vinculada a la posición (escala)

Depende de la geometría del flotador

Relaciona densidad de fluido y del flotador



Se puede cambiar el alcance de un rotámetro cambiando el flotador (forma y densidad).





# MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE (rotámetro)

Se puede cambiar la aplicación cambiando el flotador.



Para gases

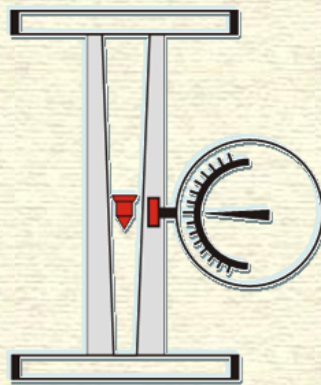


Para líquidos no viscosos

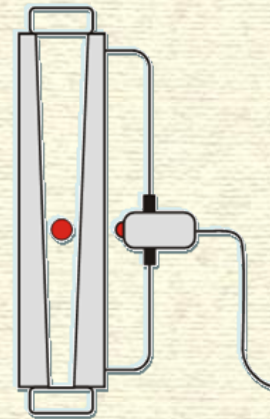


Para líquidos viscosos

Hay modelos con mecanismos de alarma:



Alarma Inductiva



Alarma Óptica



# MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE

## Rotámetro en by-pass

El sistema consta de una placa de orificio como elemento primario y un rotámetro como elemento indicador, que se conecta entre las tomas de alta y de baja. La presión diferencial hace circular un determinado caudal a través del rotámetro. El nivel vertical del flotador indica el caudal.

Especialmente apto para cañerías de gran diámetro para la que no se puede emplear directamente un rotámetro.





# MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE (rotámetro)

Es económico para caudales bajos y cañerías con diámetros menores a 2".

Cubre un rango amplio de caudales.

Sirve para líquidos y gases.

Provee una información visual directa.

La caída de presión es baja y constante.

Instalación y mantenimiento simple.

## VENTAJAS



No es sencillo ni económico obtener señal eléctrica a partir de la indicación.

No aplicable a cañerías grandes.

Instalación solo vertical

Relativamente baja precisión

## DESVENTAJAS



# TIPOS DE CAUDALÍMETROS (Norma BS-7405)

• Convencionales de presión diferencial

• Otros tipos de presión diferencial

• De desplazamiento positivo

• Rotatorios

• De Área variable

• Oscilatorios para fluidos

• Electromagnéticos

• Ultrasónicos

• Másicos directos e indirectos

• Térmicos

• Otros para fluidos en ductos cerrados

• De canal abierto

• Para sólidos





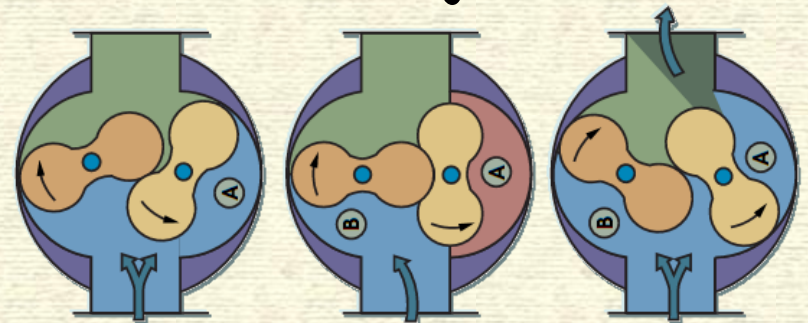
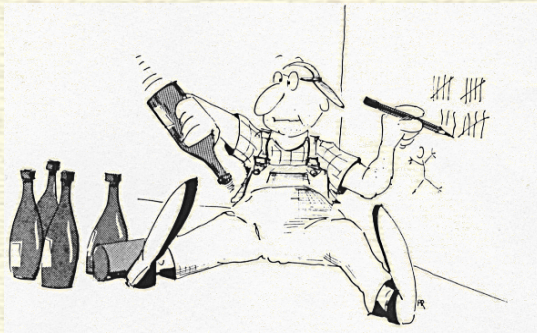
# MEDIDORES DE DEPLAZAMIENTO POSITIVO

Los medidores de desplazamiento positivo **miden la cantidad de fluido** que circula por un conducto, dividiendo el flujo en volúmenes separados. Después **cada porción es contada** para medir el caudal.



Se pueden destacar tres componentes comunes:

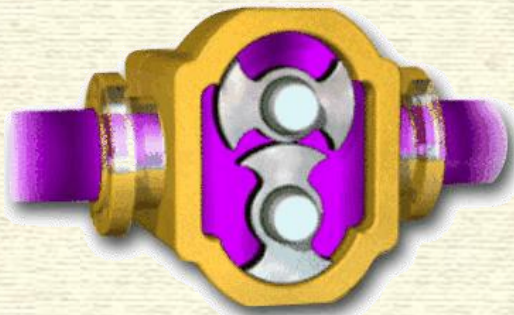
- ❶ **Cámara**, que se encuentra llena de fluido,
- ❷ **Desplazador**, que transfiere el fluido desde el final de una cámara a la siguiente
- ❸ **Mecanismo indicador, totalizador o transmisor** conectado al desplazador, que cuenta el número de veces que el desplazador se mueve en la cámara de trabajo.



# MEDIDORES DE DEPLAZAMIENTO POSITIVO

Estos dispositivos deben tener una **buena estanqueidad** de las partes móviles, evitando un par de rozamiento inaceptable y que las fugas de fluido sean mínimas.

Son **calibrados** a varios caudales, dentro del margen de utilización, con un fluido de viscosidad conocida (referencia).



Están muy difundidos en trabajos de fiscalización y transferencia de custodia fundamentalmente por que totalizan en vez de dar medición puntual de caudal.



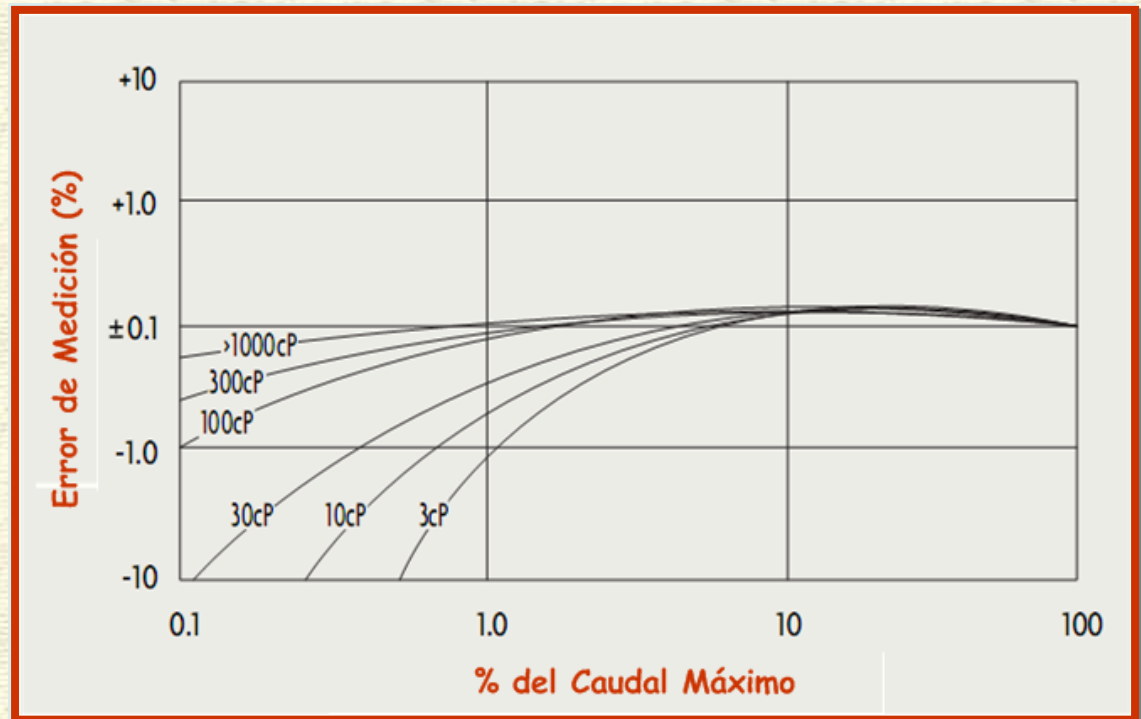
# MEDIDORES DE DEPLAZAMIENTO POSITIVO

Los medidores de desplazamiento positivo se usan con fluidos limpios. Proporcionan alta exactitud (entre  $\pm 0.1$  y  $\pm 0.5$  %). Son **robustos y relativamente caros**.



No son afectados generalmente por las distorsiones en los perfiles de velocidad.

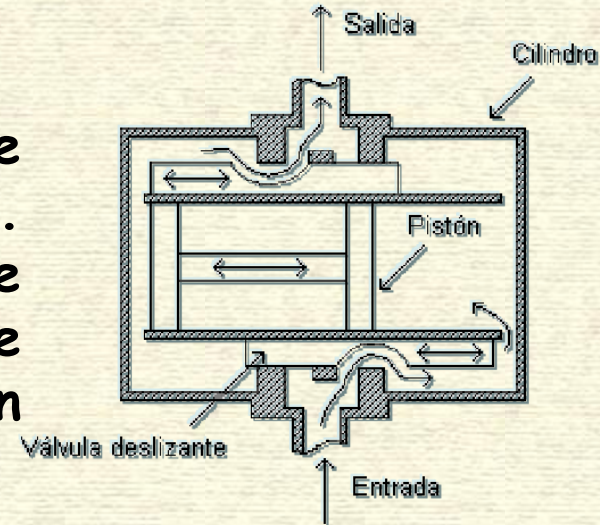
Son especialmente aptos para medir con fluidos de **alta viscosidad**.



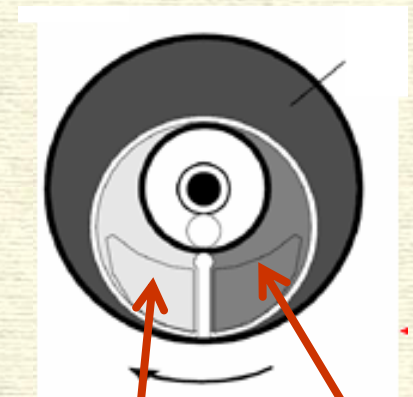
# MEDIDORES DE DEPLAZAMIENTO POSITIVO

## Medidores de Pistón

**Pistón alternativo.** Es el más antiguo de los medidores de desplazamiento positivo. Está compuesto por un cilindro en donde se aloja el pistón y las válvulas que permiten la entrada y salida del líquido en su interior.



**Pistón Oscilante.** Más usados en la actualidad. Consiste de un pistón hueco montado excéntricamente dentro de un cilindro. El cilindro y el pistón tienen la misma longitud, pero el pistón, tiene un diámetro más pequeño. El pistón oscila alrededor de un puente divisor que separa la entrada de la salida de líquido.



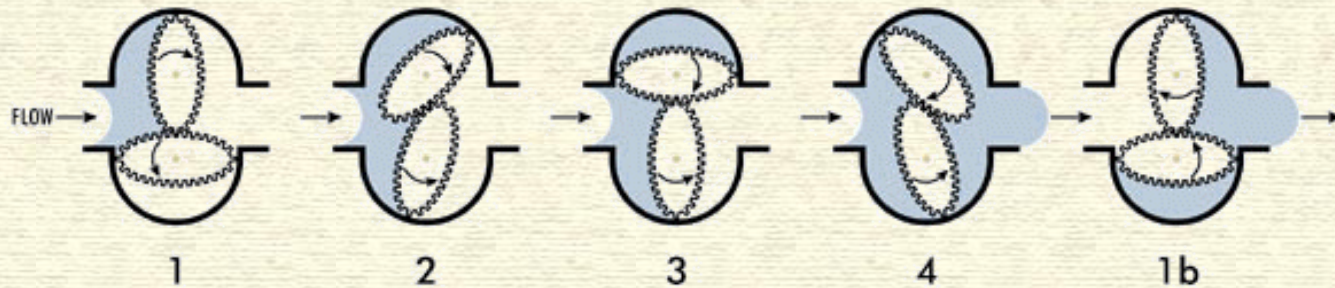
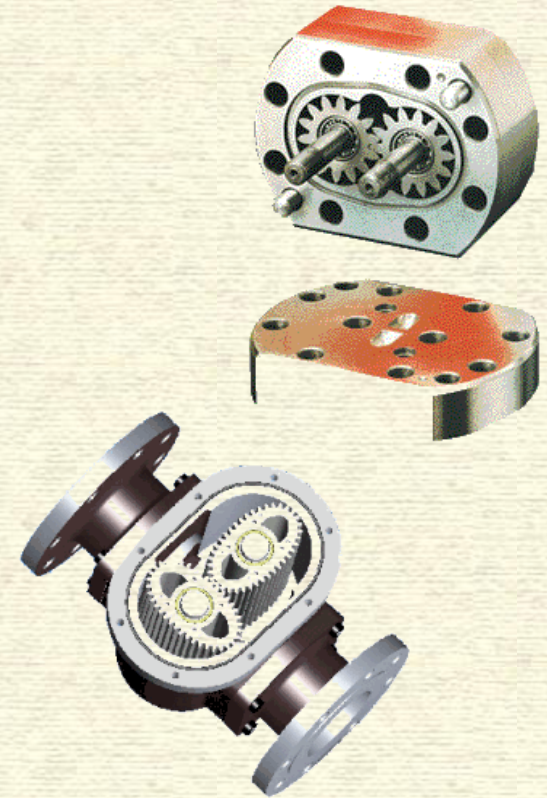


# MEDIDORES DE DEPLAZAMIENTO POSITIVO

## Medidores de Engranaje

Constan de dos ruedas circulares u ovals que **engranan entre sí** y tienen un movimiento de giro debido a la presión diferencial creada por el flujo de líquido.

La principal ventaja de estos medidores es que la **medida realizada es prácticamente independiente de variaciones en la densidad y en la viscosidad del líquido.**

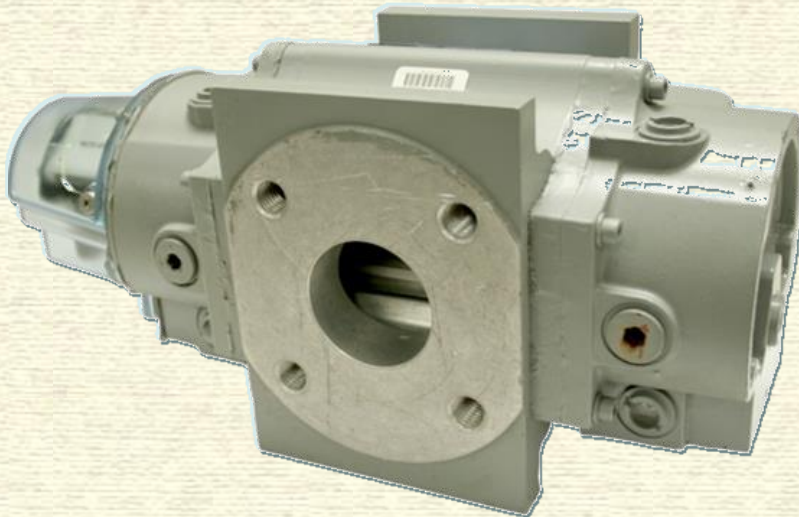
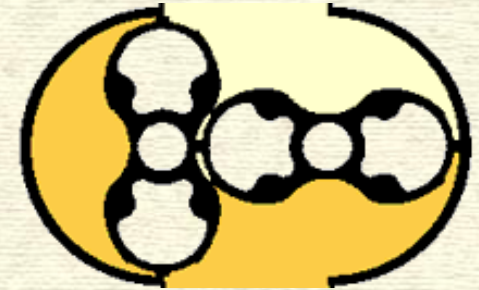


# MEDIDORES DE DEPLAZAMIENTO POSITIVO

## Medidores de Lóbulos y helicoidal

Similares a la de engranajes, pero con lóbulos y tornillos.

Se emplean cuando se deben medir grandes volúmenes desplazados (por ejemplo gas natural).





# MEDIDORES DE DEPLAZAMIENTO POSITIVO

## Medidor de disco nutante



Está compuesto por una cámara circular con un disco plano móvil que posee una ranura en la que está intercalada una placa fija. Esta placa separa la entrada de la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido.

La cara baja del disco está siempre en contacto con la parte inferior de la cámara, mientras que su parte superior roza con la parte superior de la cámara en el lado opuesto. De este modo la cámara está dividida en compartimientos separados de volumen conocido.

**Se utiliza en aplicaciones domésticas** para la medición de **consumo de agua**, y en la industria en la medición de gasto de agua, aceite y líquidos alimenticios. La precisión es de  **$\pm 1\%$  a  $\pm 2\%$** .



# TIPOS DE CAUDALÍMETROS (Norma BS-7405)

- Convencionales de presión diferencial

- Otros tipos de presión diferencial

- De desplazamiento positivo



- Rotatorios

- De Área variable

- Oscilatorios para fluidos

- Electromagnéticos

- Ultrasónicos

- Másicos directos e indirectos

- Térmicos

- Otros para fluidos en ductos cerrados

- De canal abierto

- Para sólidos





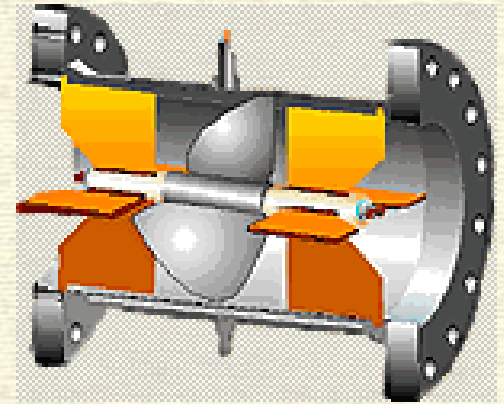
# MEDIDORES ROTARORIOS - Turbinas

Los caudalímetros de turbina consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal.

Es uno de los más **precisos y repetibles** caudalímetros tanto para líquidos como para gases, con altísima linealidad por encima del 10 % del caudal máximo de calibración.

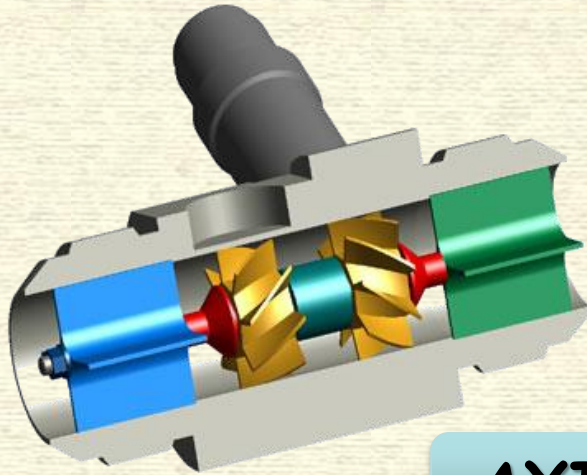
Su **rápida respuesta y buena repetibilidad**, los hacen aptos para un amplio espectro de aplicaciones que van desde la fiscalización o transferencia de custodia de líquidos y gases, hasta el control de procesos.

La viscosidad del fluido restringe su aplicación, siendo de 30 cSt el máximo admisible. Son **sensibles a la viscosidad, perfil de flujo, y pulsaciones**.

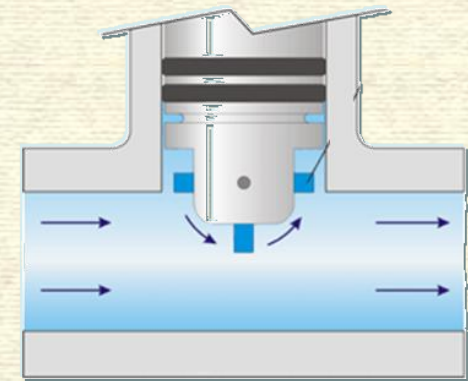
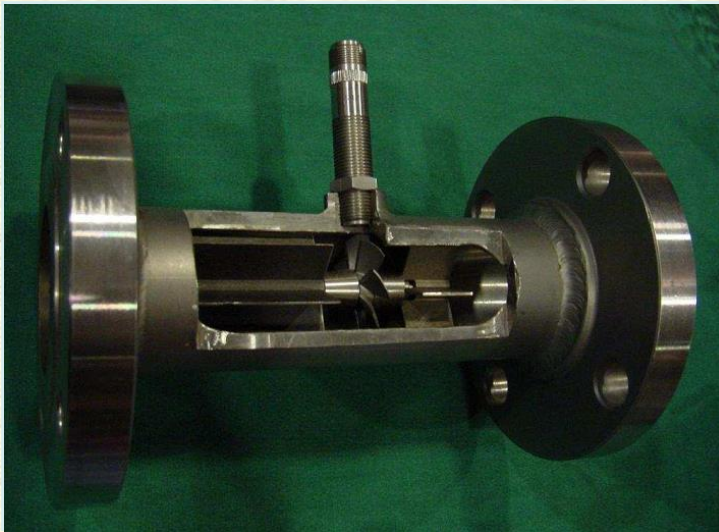
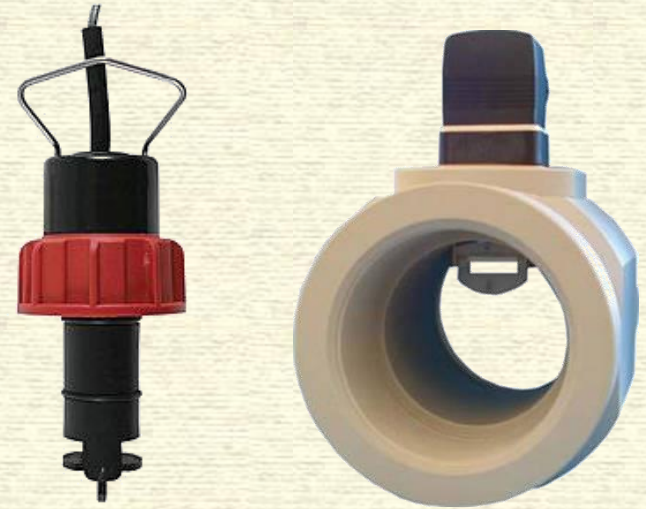


# MEDIDORES ROTARORIOS - Turbinas

## Tipos



**AXIAL**



**TANGENCIAL**

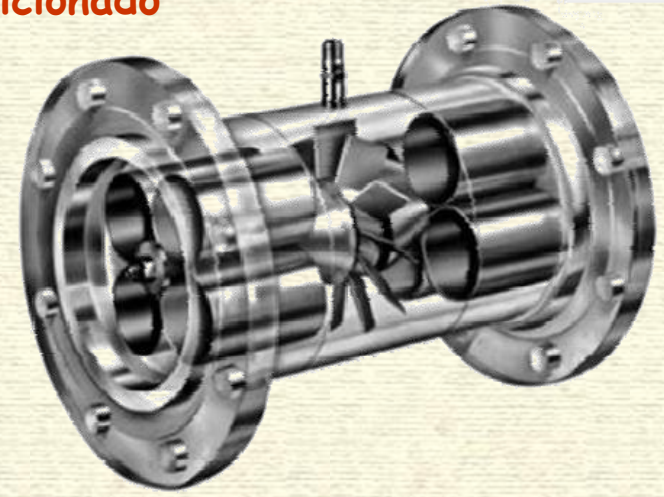
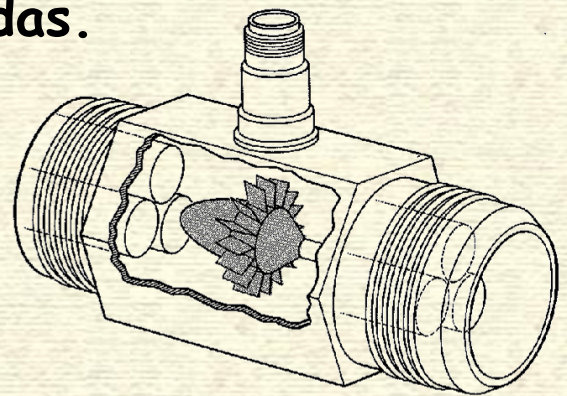
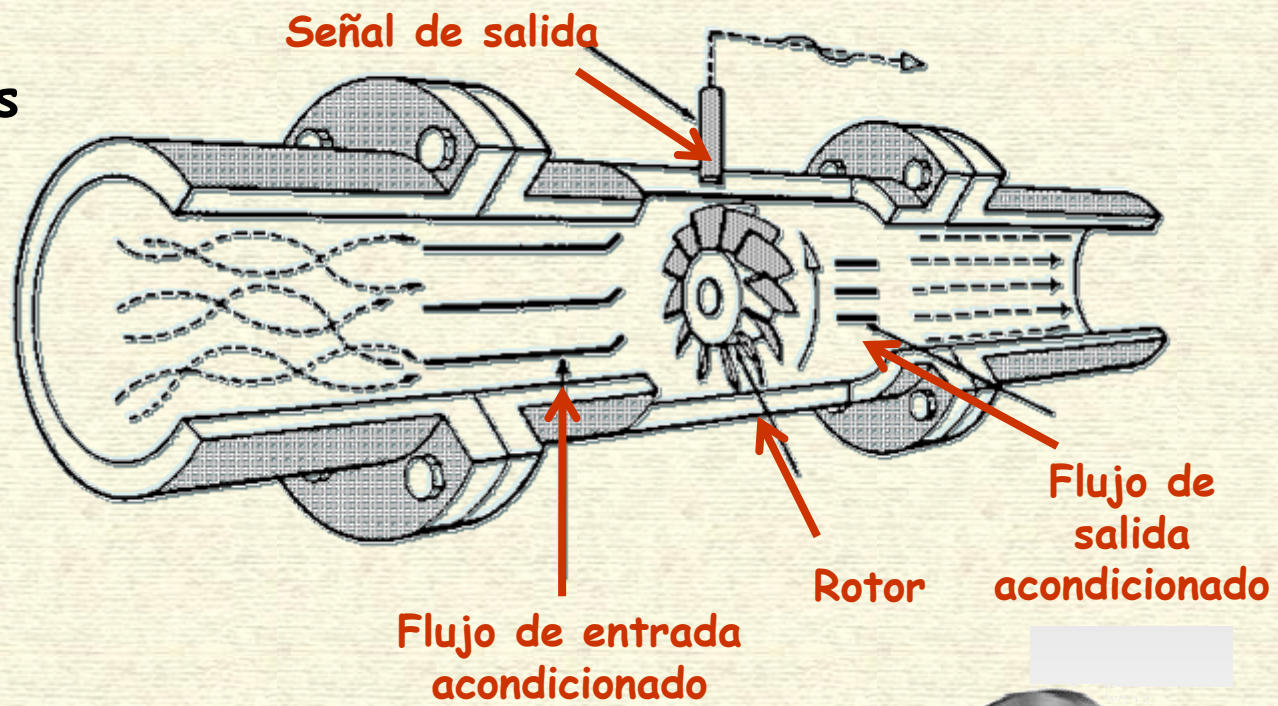


# MEDIDORES ROTARORIOS - Turbinas Axiales

Curso: Instrumentación Industrial de Procesos y gestión Industrial  
Departamento de Ingeniería de Procesos y gestión Industrial

Los caudalímetros de turbina axial suelen tener incorporado elementos que acondicionan el flujo de entrada y salida.

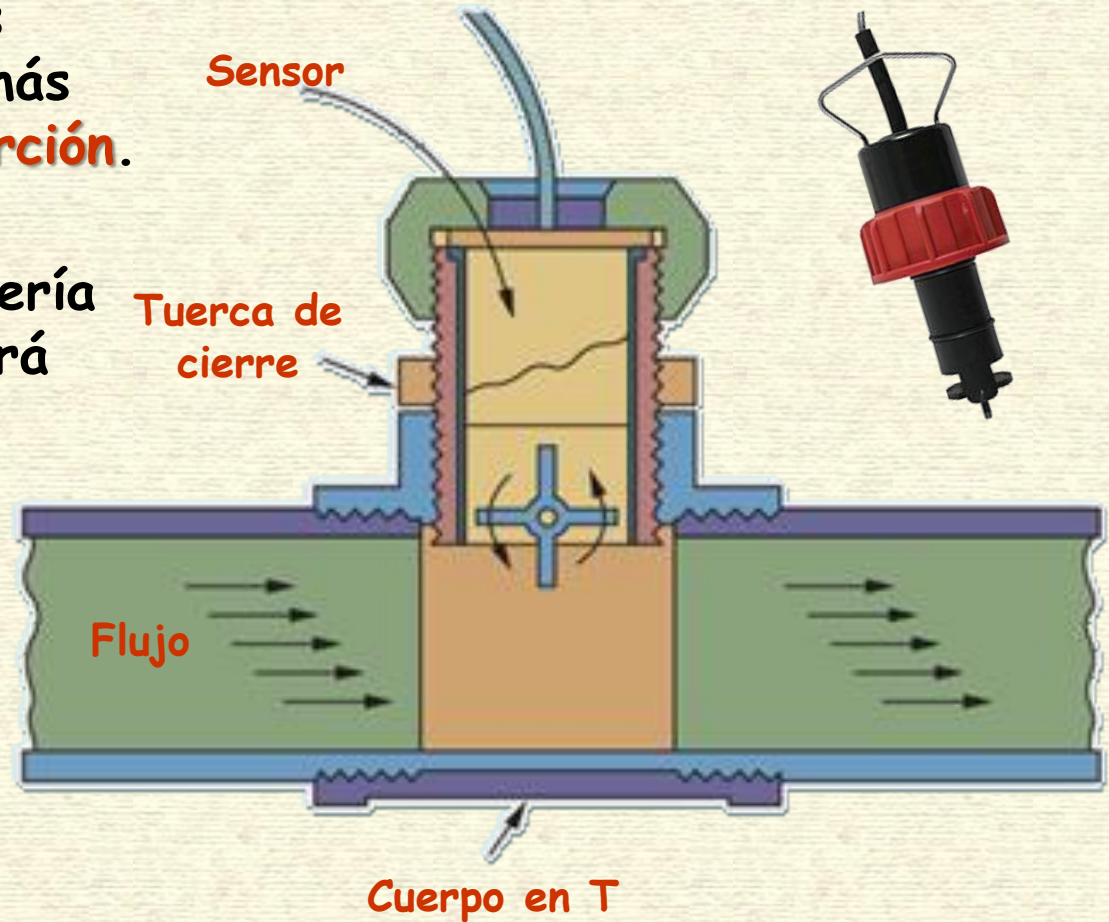
Se fabrican de diámetros entre  $\frac{3}{4}$  y 16 pulgadas.



# MEDIDORES ROTARORIOS - Turbinas Tangenciales

Hay varios de Turbinas Tangenciales, pero la más difundida es la de **inserción**.

Se pueden insertar directamente en la cañería sobre la que se realizará la medición.



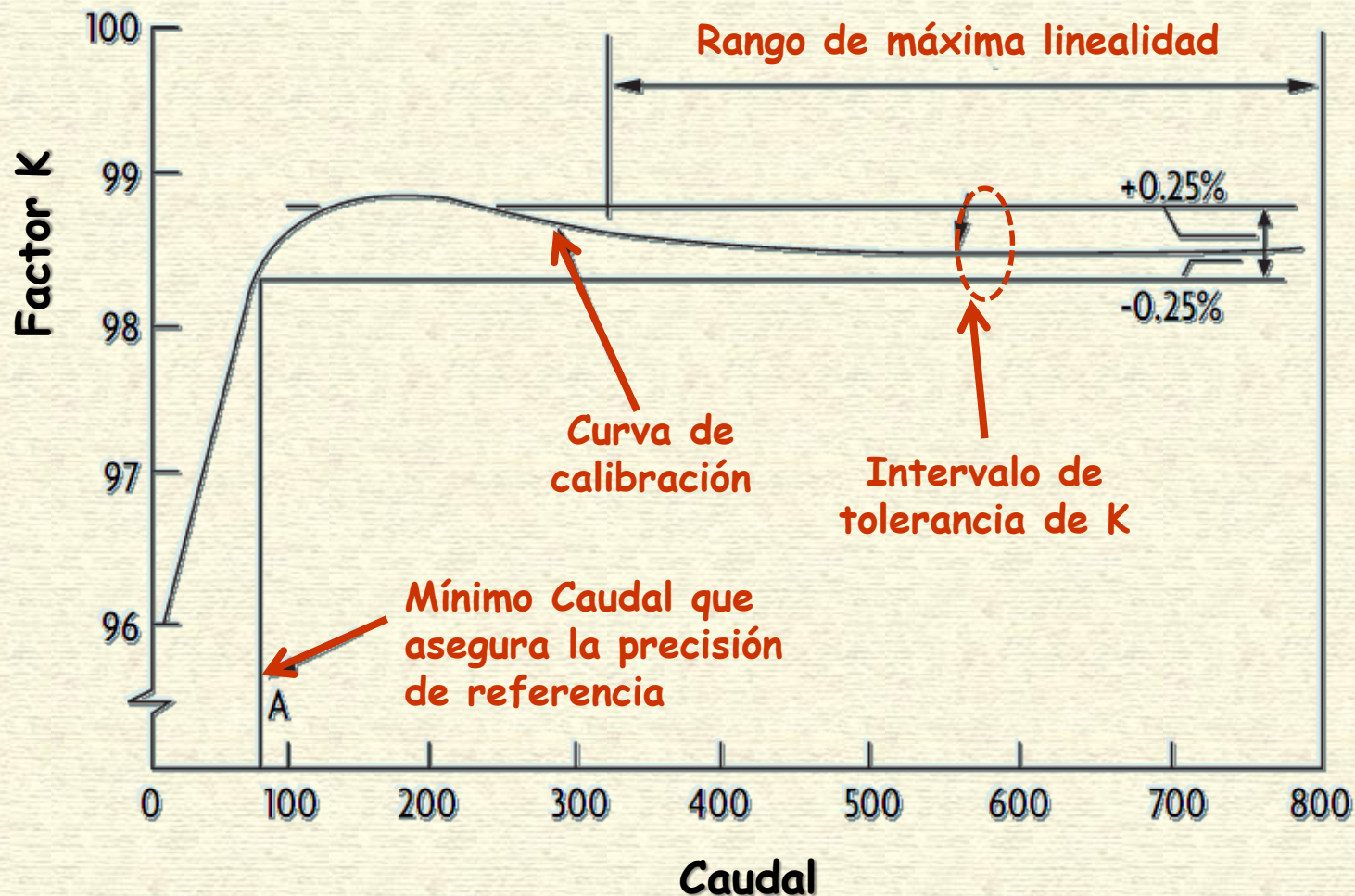
Son dispositivos **relativamente baratos** si se toma en consideración el diámetro de cañería y los caudales que se miden.



# MEDIDORES ROTARORIOS - Turbinas

El fabricante informa el valor del **factor K**,  
que relaciona caudal con frecuencia.

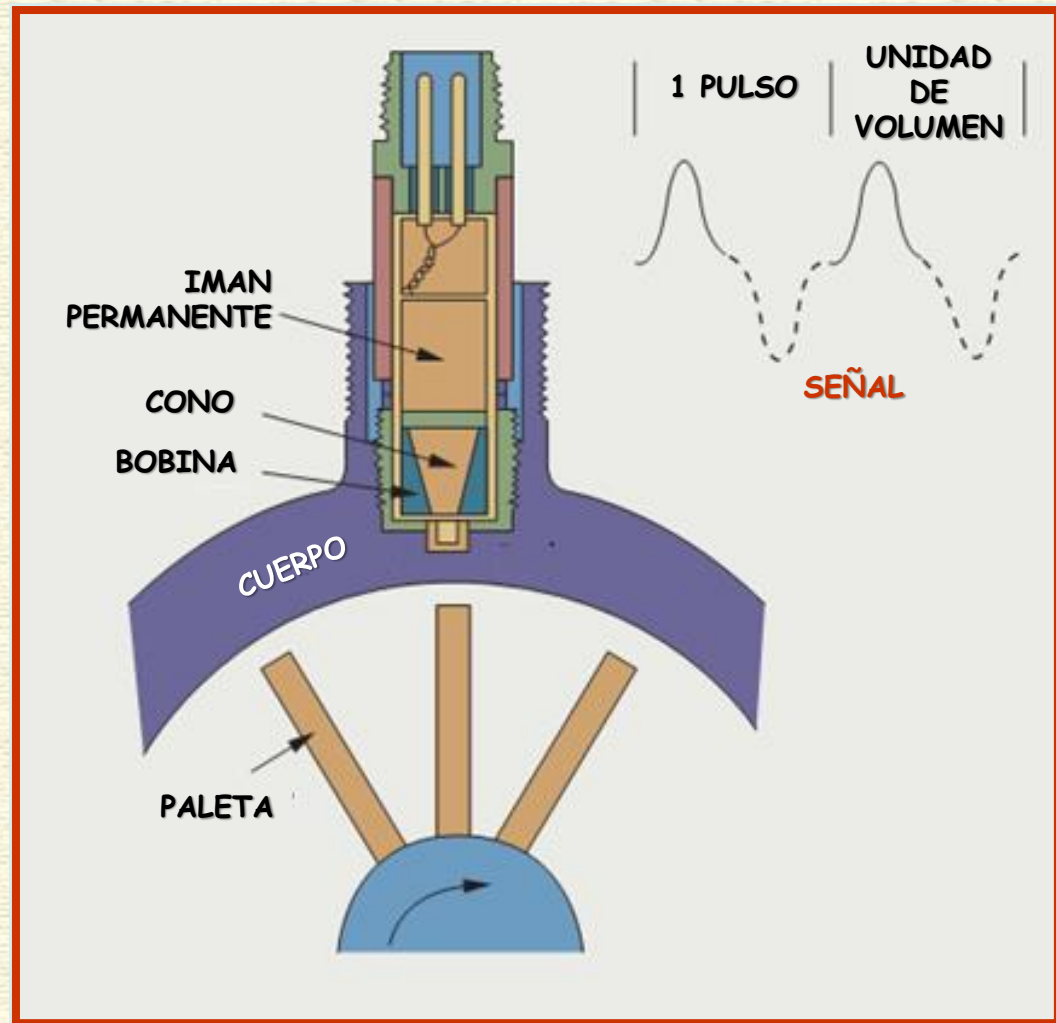
$$Q = K f$$



# MEDIDORES ROTARORIOS - Turbinas

Las turbinas se dividen según los tipos de convertidores de la señal para captar la señal de velocidad.

Los del tipo **reluctancia**, un bobina exterior capta la interacción de las paletas sobre un imán exterior permanente. El paso de las paletas cambia el circuito magnético, provocando un campo eléctrico en la bobina proporcional al giro de las paletas.





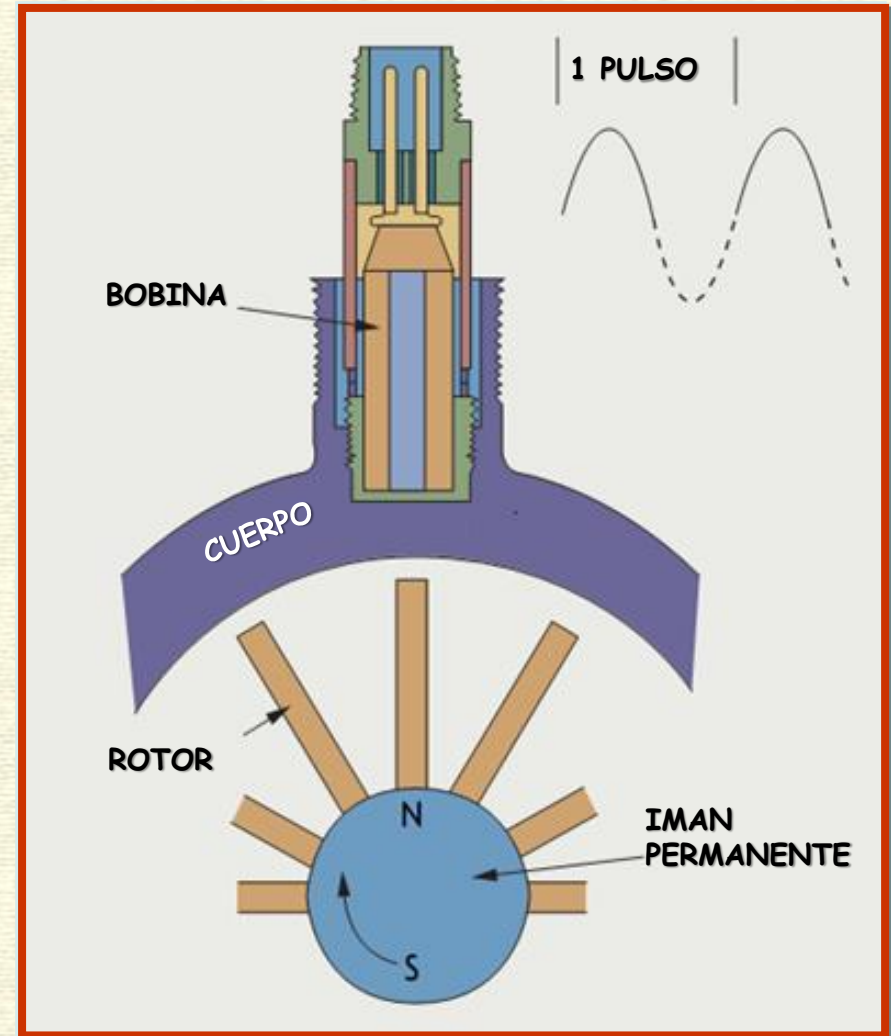
# MEDIDORES ROTARORIOS - Turbinas

En las turbinas del tipo **inductivo**, es el rotor el que lleva incorporado un imán permanente. El campo magnético giratorio origina una corriente en la bobina exterior, proporcional al giro.

En los dos casos, la señal resulta un tren de pulsos (uno por cada giro o sea una unidad de volumen).

La salida puede ser continua, en cuyo caso, es proporcional a la frecuencia **f**.

También permite hacer una totalización si se cuenta el número de ciclos **N**.



$$V = k N$$

# TIPOS DE CAUDALÍMETROS (Norma BS-7405)

• Convencionales de presión diferencial

• Otros tipos de presión diferencial

• De desplazamiento positivo

• Rotatorios

• De Área variable

• Oscilatorios para fluidos

• Electromagnéticos

• Ultrasónicos

• Másicos directos e indirectos

• Térmicos

• Otros para fluidos en ductos cerrados

• De canal abierto

• Para sólidos

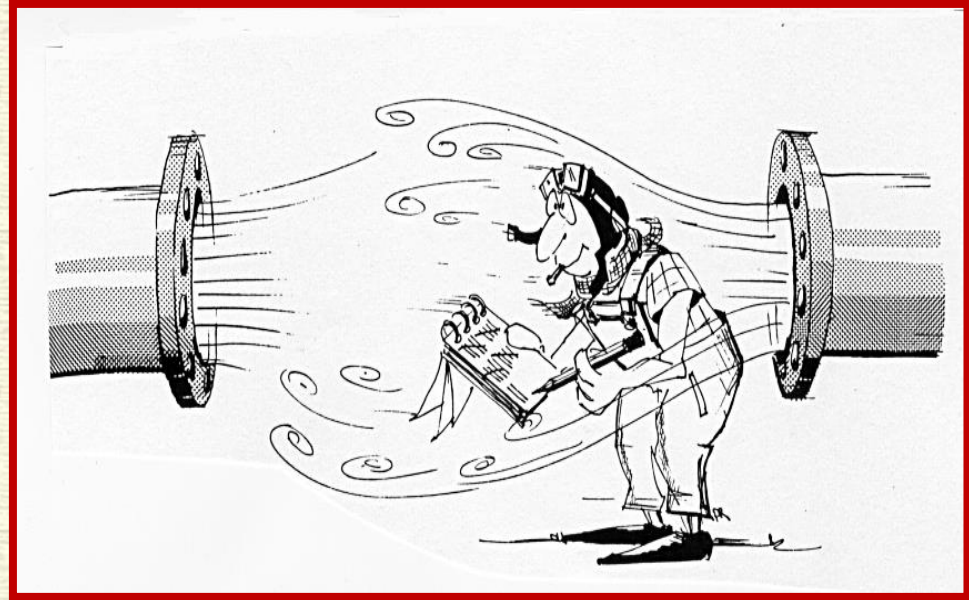




# MEDIDORES OSCILATORIOS

Son elementos que emplean fenómenos físicos que generan **pulsaciones** en el fluido.

Casualmente, la **frecuencia** de esas pulsaciones son las que están en relación directa con la velocidad del fluido.



Los principios de funcionamiento en los que se basan son tres y definen los tipos de estos caudalímetros:

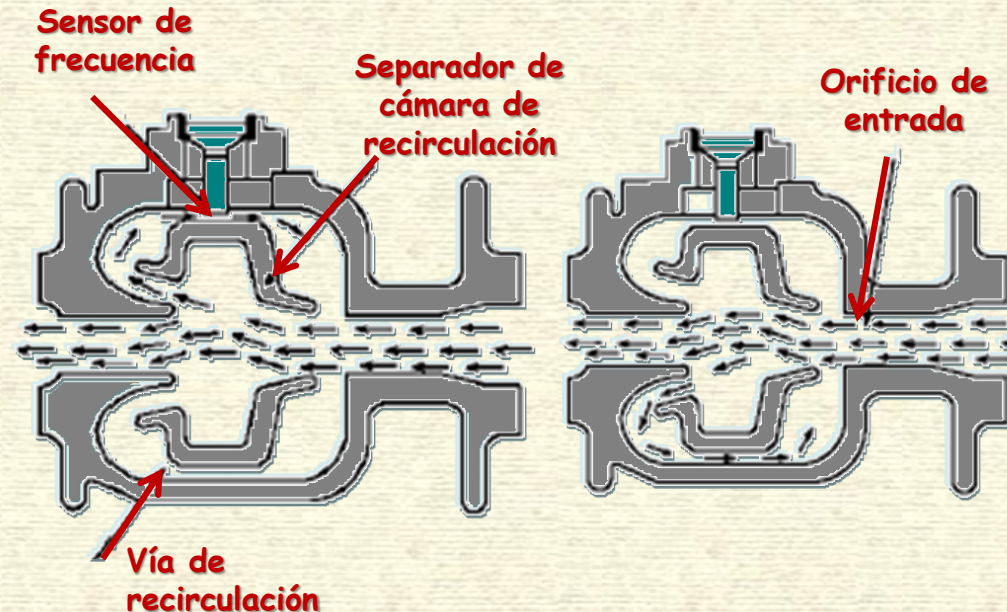
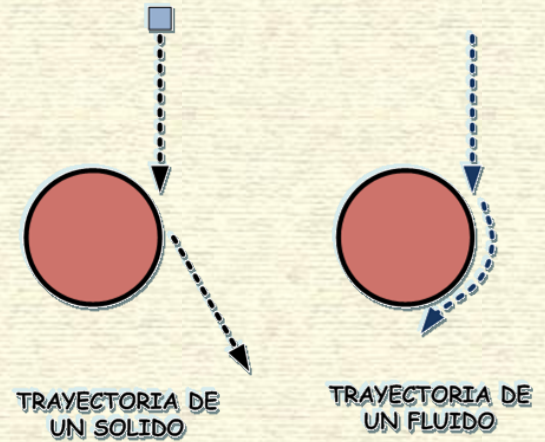
- ✿ De oscilación fluidica (**efecto Coanda**)
- ✿ De remolinos (de precesión) - **Swirl meter**
- ✿ De desprendimiento de vórtices - **Vortex**

# MEDIDORES OSCILATORIOS - De efecto Coanda

El efecto **Coanda** se aprecia cuando un fluido se encuentra en su camino con un sólido, tiende a pegarse (lo contrario sucede con un sólido)

Los caudalímetros de este tipo tienen dos cámaras laterales para recirculación.

El fluido cambia de cámara (oscila) con una frecuencia que es proporcional al caudal volumétrico.

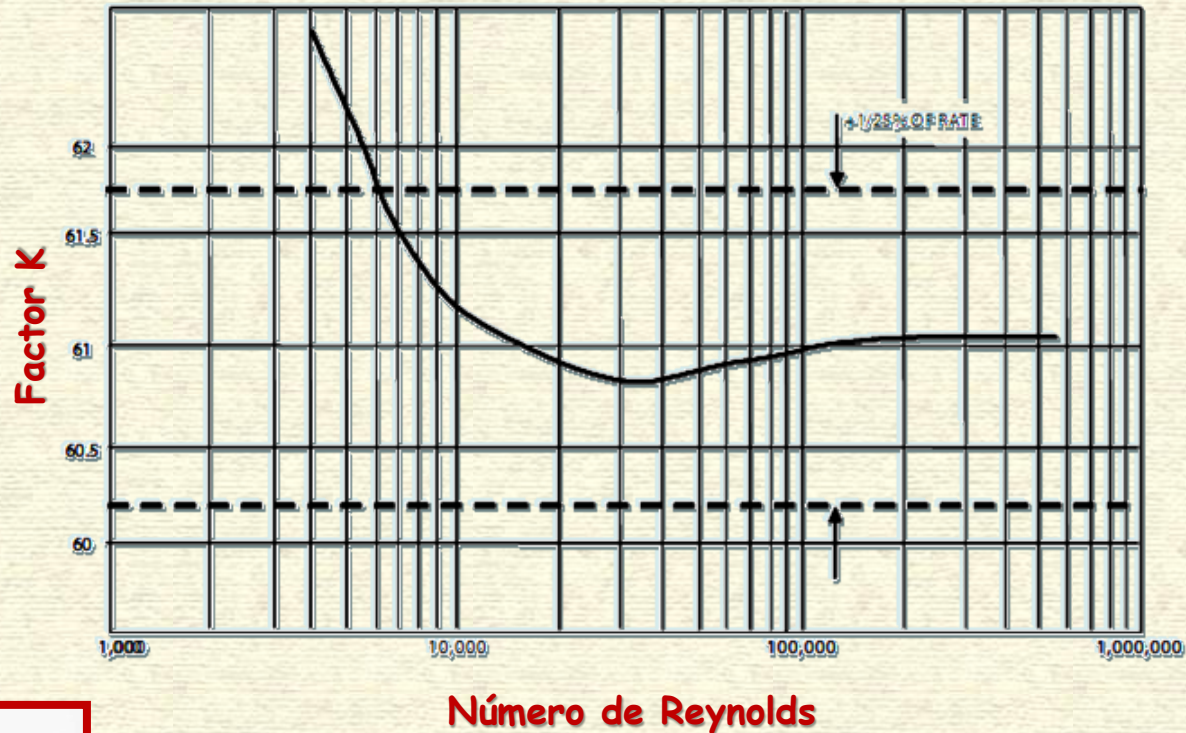




# MEDIDORES OSCILATORIOS - De efecto Coanda

Los caudalímetros de efecto **Coanda** están disponibles para diámetros no muy grandes. El **régimen debe ser turbulento**,  $N_{re}$  superior a 2000.

$$Q = K f$$



Número de Reynolds

Presenta **Turndown alto** (12:1 o más) y una exactitud típica de alrededor del **2 %**. Se usa con líquidos. Es muy **sensible a la distorsión del perfil de velocidades**.

No posee partes móviles. Es inmune a golpes y a vibraciones.

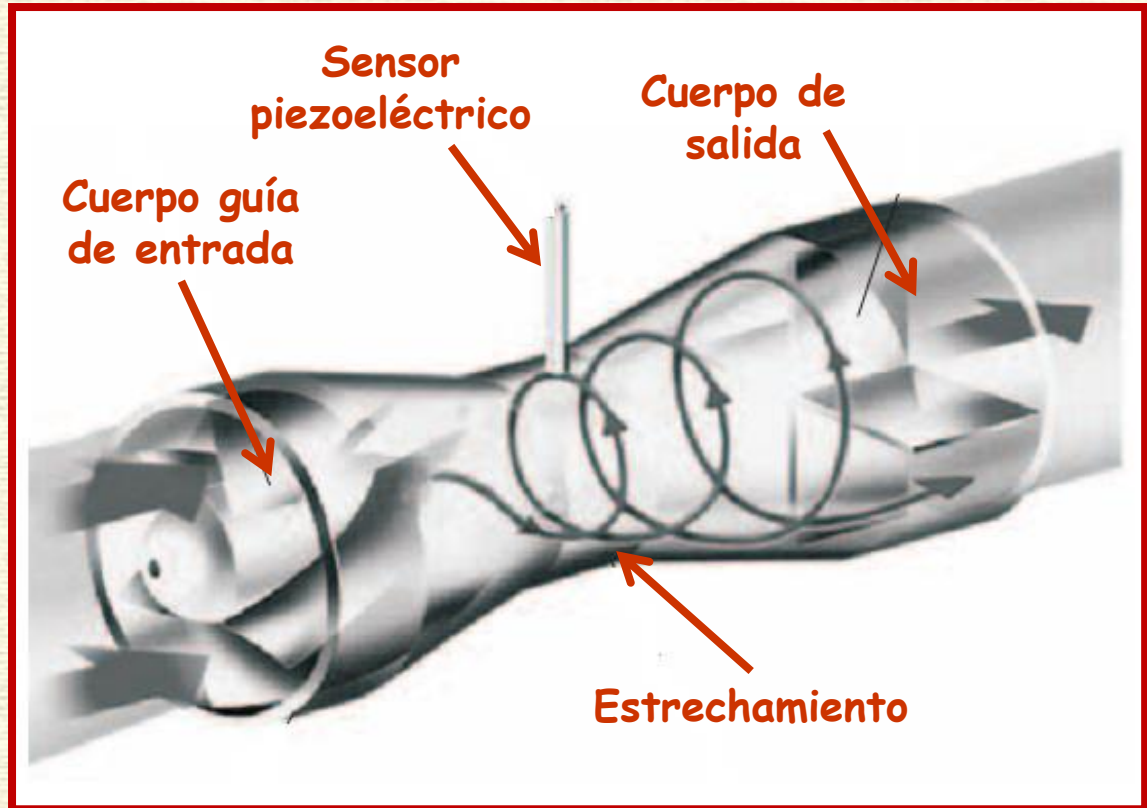


# MEDIDORES OSCILATORIOS - De remolinos

El cuerpo guía de entrada perturba la corriente de fluido que entra axialmente en el tubo de medida, poniéndola en movimiento de rotación.

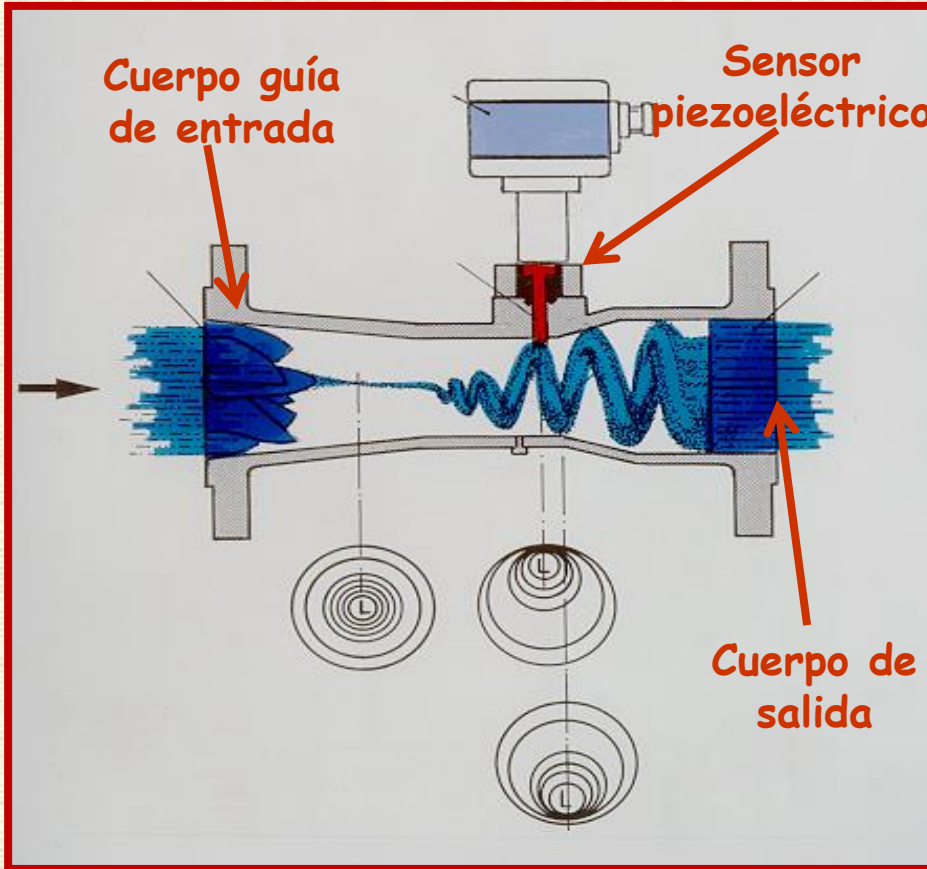
En el centro de rotación se forma un núcleo de remolino que es forzado, por medio de una corriente inversa, a efectuar una rotación secundaria espiral.

La frecuencia de la rotación secundaria es proporcional al caudal y permanece lineal dentro de un rango de medida muy amplio si el medidor dispone de una geometría interna optimizada. Esta frecuencia se registra mediante un sensor piezoeléctrico.

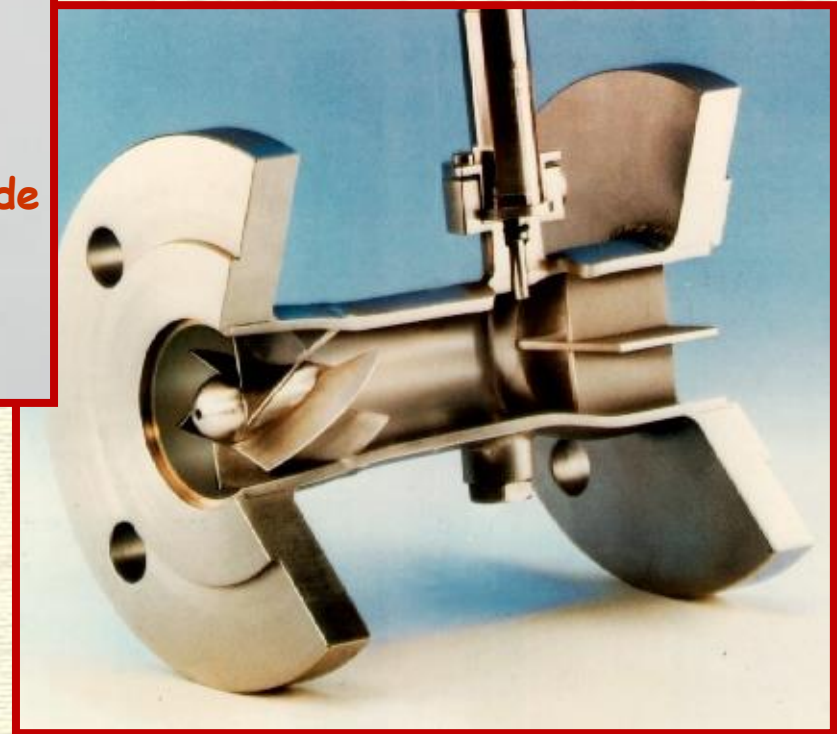




# MEDIDORES OSCILATORIOS - De remolinos



La señal de frecuencia proporcional al caudal emitida por el sensor de caudal se transmite para su procesamiento ulterior al transmisor de medida.



# MEDIDORES OSCILATORIOS - De remolinos



## Características:

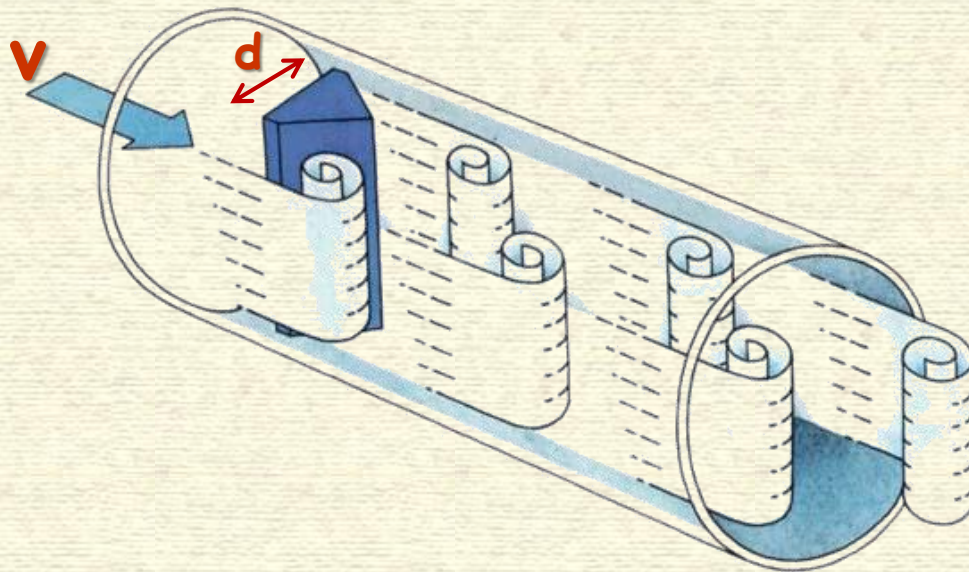
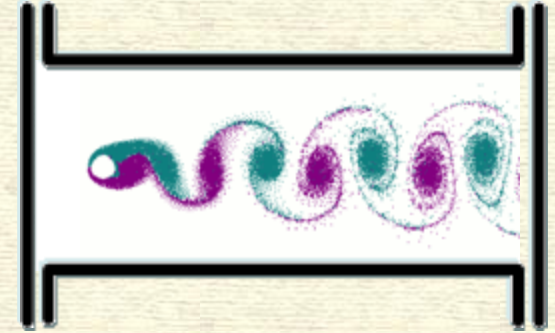
- ❖ Se usan con líquidos, gases y vapor de agua.
- ❖ Disponible con indicación local, switch o transmisión.
- ❖ Exactitud típica  $\pm 0.50 \% R$
- ❖ Tamaños entre  $\frac{3}{4}$  y 16 pulgadas
- ❖ Se requieren tramos de cañería recta aguas abajo.



# MEDIDORES OSCILATORIOS

## De desprendimiento de vórtices (Vortex)

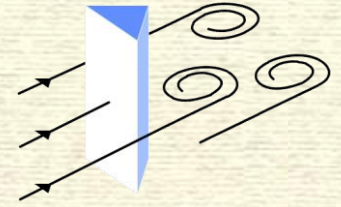
Para Reynolds moderados y elevados, si el fluido pasa por un obstáculo, produce **remolinos** a su paso, alternativamente de un lado y del otro del obstáculo. La frecuencia con la que se producen estos torbellinos está relacionada con la velocidad del fluido (von Karman).



La frecuencia **f** del desprendimiento de torbellinos es proporcional a la velocidad de flujo **v** e inversamente proporcional al ancho del cuerpo perturbador **d**. El **Número de Strouhal** (adimensional) relaciona los parámetros:

$$NSt = \frac{f d}{v}$$

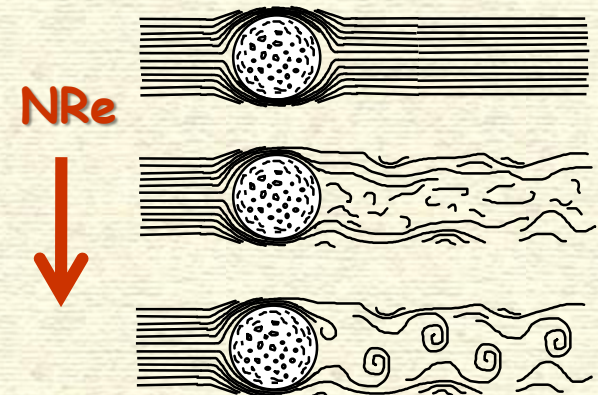
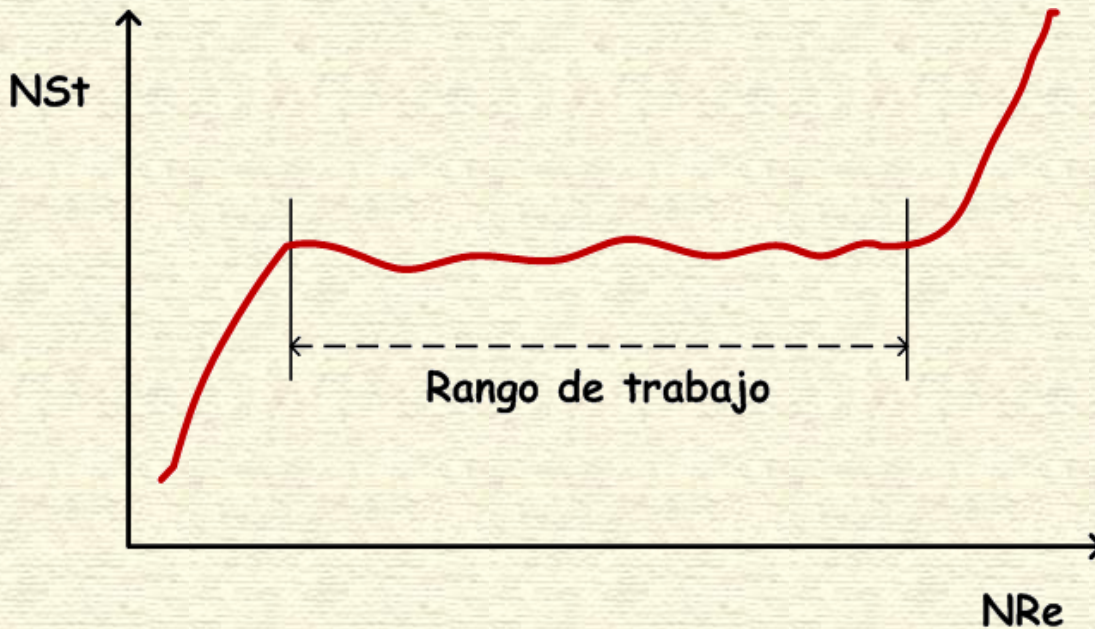
# MEDIDORES OSCILATORIOS De desprendimiento de vórtices (Vortex)



Para una geometría en condiciones dadas, existe una evidente **relación entre el Número de Strouhal y el de Reynolds**. El número de Strouhal es constante para números de Reynolds comprendidos entre aproximadamente 1000 y 100.000, que será el rango de trabajo del instrumento. En ese rango, el caudal volumétrico resultará proporcional a la frecuencia de producción de vórtices.

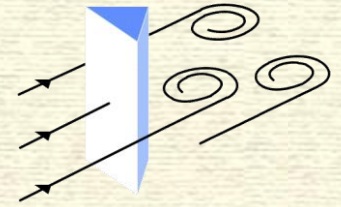
$$Q = K f$$

El coeficiente **K** se determina por calibración.

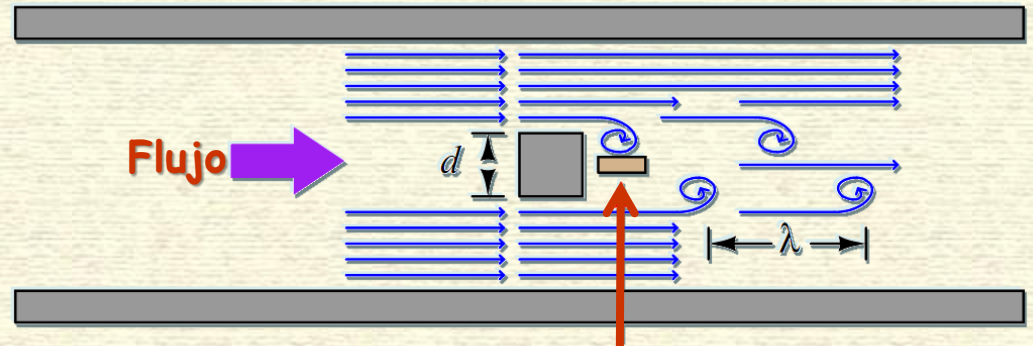




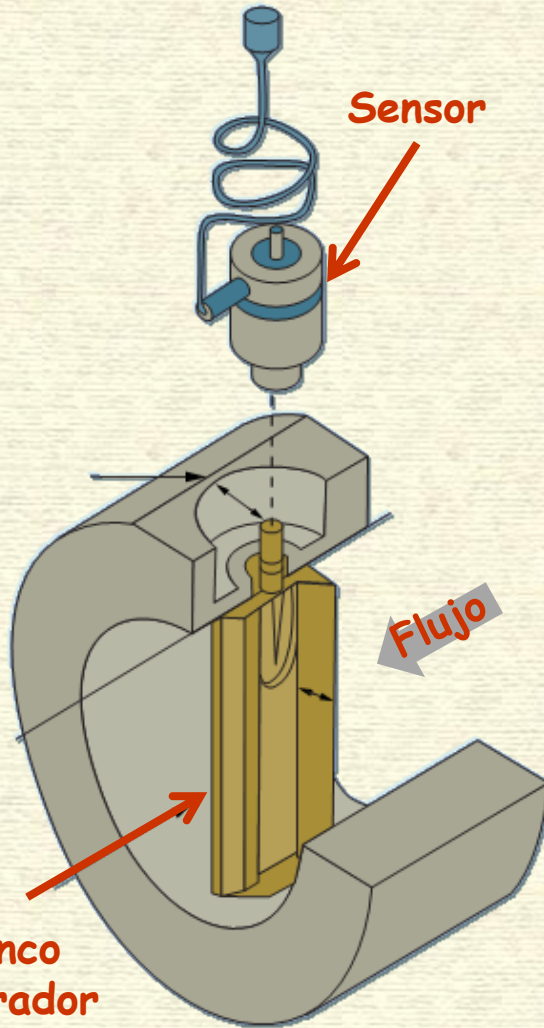
# MEDIDORES OSCILATORIOS De desprendimiento de vórtices (Vortex)



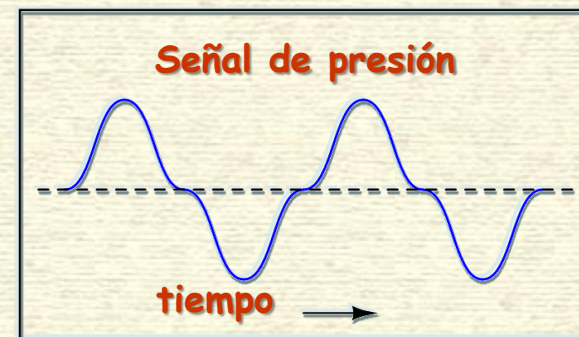
La detección de la frecuencia se realiza mediante **sensores de presión piezométricos** que detectan los picos de presión creados por el torbellino.



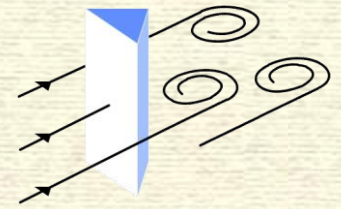
Elemento medidor de presión



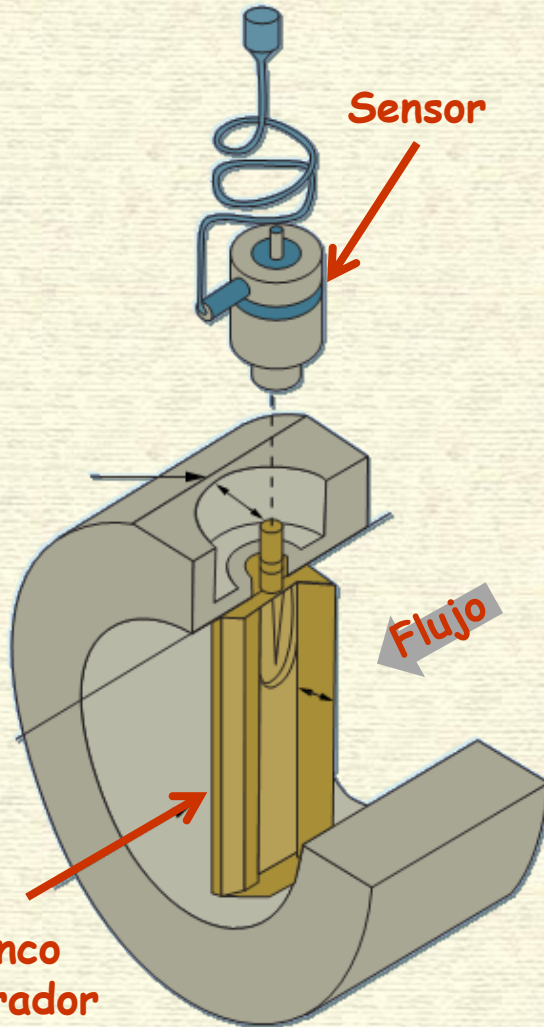
Blanco generador de vórtices



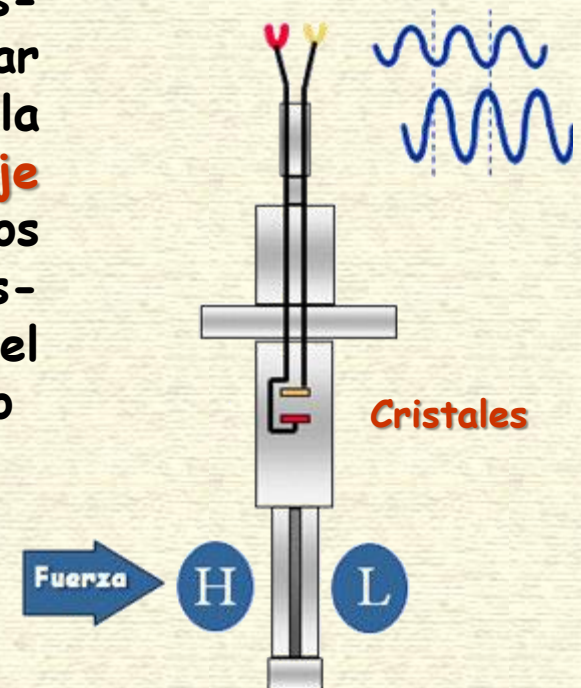
# MEDIDORES OSCILATORIOS De desprendimiento de vórtices (Vortex)



Algunos usan resistencias de baja inercia térmica que aprovechan el **efecto refrigerante** del aumento de la velocidad de los **torbellino en la región de cola**.



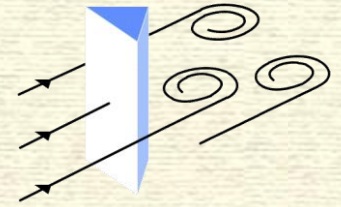
Una tecnología alternativa consiste en aprovechar la variación en la **fuerza de empuje** creada por los remolinos al desprenderse del blanco de impacto



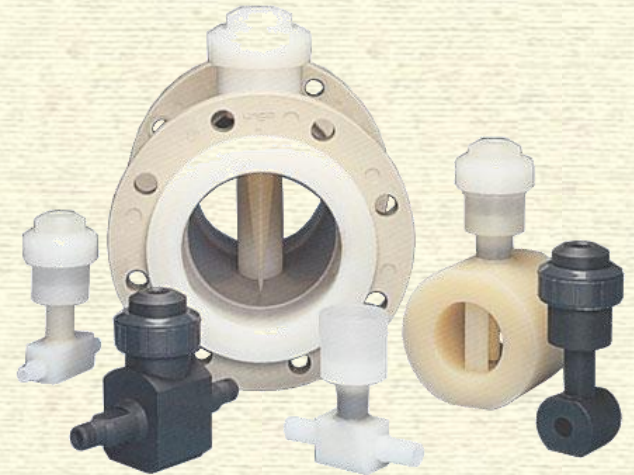
Blanco  
generador  
de vórtices



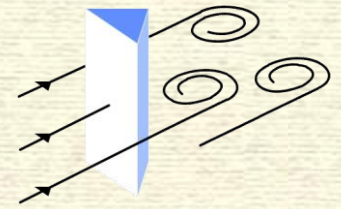
# MEDIDORES OSCILATORIOS De desprendimiento de vórtices (Vortex)



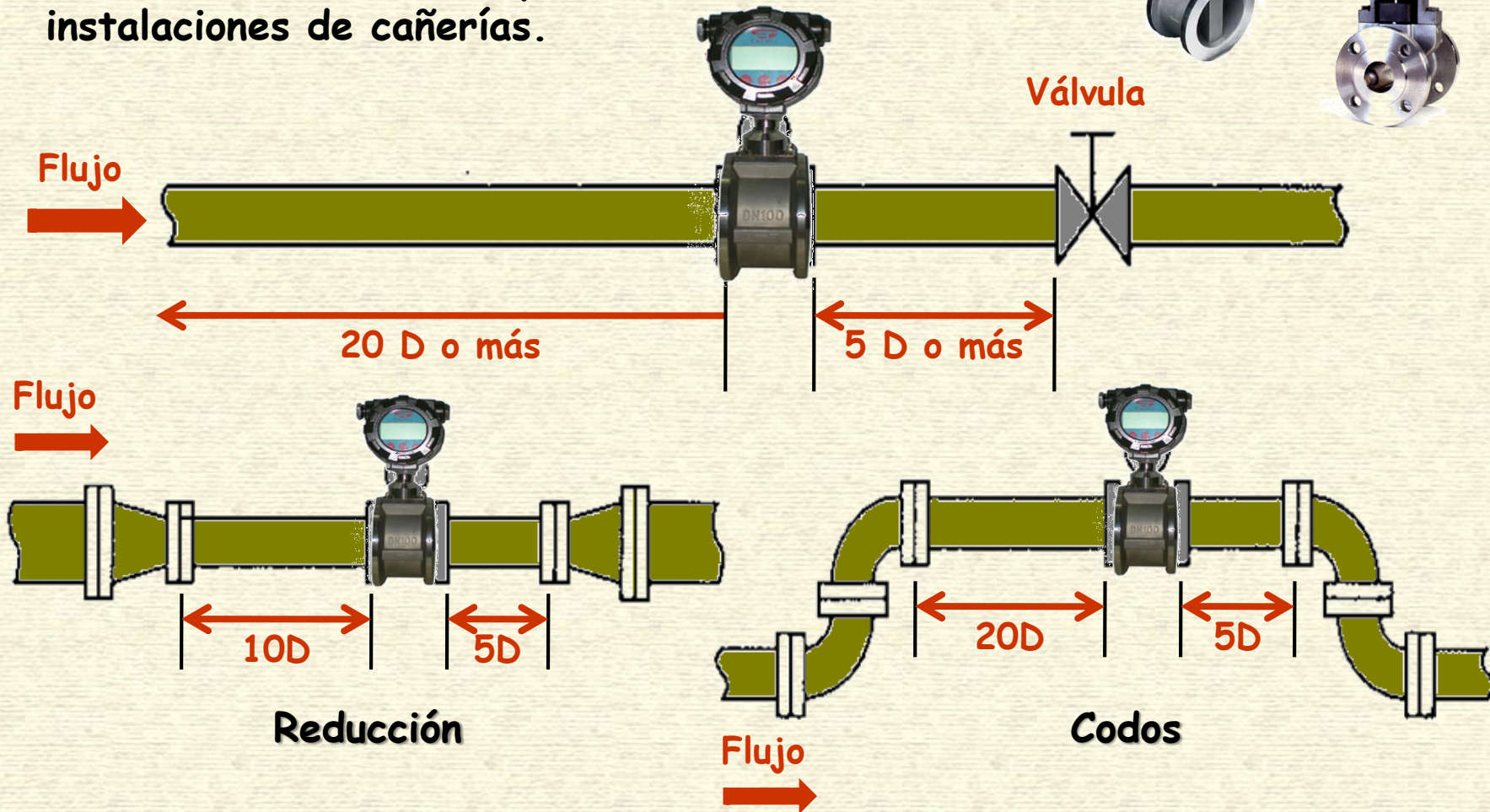
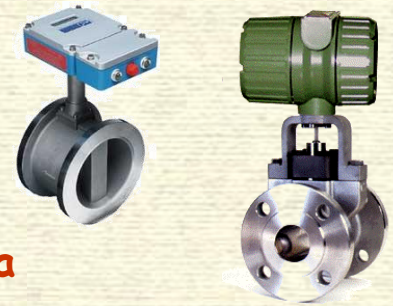
- ❖ Se usan para **líquidos, gases y vapor de agua**. No deben tener material abrasivo.
- ❖ Disponibles para cañerías de 1" a 12".
- ❖ Temperaturas de trabajo hasta 450 °C.
- ❖ No posee partes móviles. Inmune a cambios de viscosidad y densidad.
- ❖ El transmisor y componentes electrónicos se montan sobre el sensor o en forma remota.
- ❖ Exactitud  $\pm 0.7 \% R$  para líquidos y vapor  $\pm 1.0 \% R$  para gases y vapor. Alta linealidad.
- ❖ Turndown entre 15:1 y 25:1
- ❖ Susceptible a vibraciones. Operan con bajo consumo de energía y requieren de poco mantenimiento.



# MEDIDORES OSCILATORIOS De desprendimiento de vórtices (Vortex)

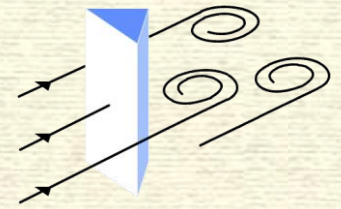


El **perfil de velocidades** afecta seriamente el comportamiento del caudalímetro. Por eso existen restricciones importante en cuanto a las instalaciones de cañerías.

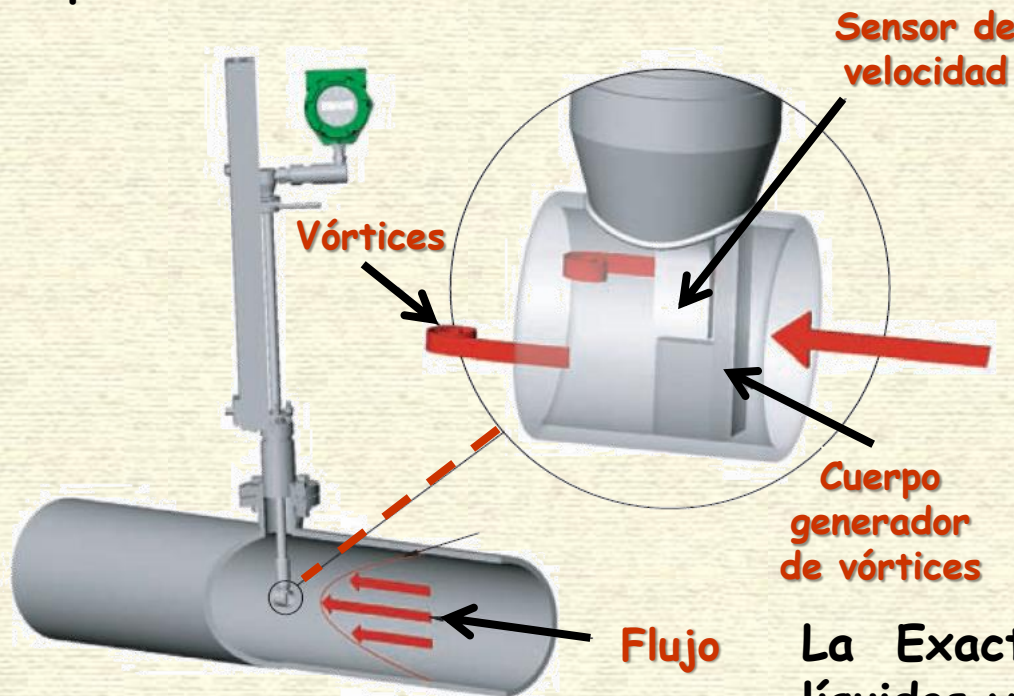




# MEDIDORES OSCILATORIOS De desprendimiento de vórtices (Vortex)



Un caudalímetro de inserción consiste en generar los remolinos y detectar su frecuencia con un **dispositivo que se inserta en una cañería**. Se logra así una mayor versatilidad (se puede instalar en distintos puntos y en cañerías de diversos tamaños, 3 a -80"). Se puede lograr así un ahorro importante, sobre todo en cañerías gran porte.



La Exactitud es de  $\pm 1 \% R$  para líquidos y vapor  $\pm 1.5 \% R$  para gases y vapor. Turn-down entre 15:1 y 20:1.

# TIPOS DE CAUDALÍMETROS (Norma BS-7405)

• Convencionales de presión diferencial

• Otros tipos de presión diferencial

• De desplazamiento positivo

• Rotatorios

• De Área variable

• Oscilatorios para fluidos

• **Electromagnéticos**

• Ultrasonicos

• Másicos directos e indirectos

• Térmicos

• Otros para fluidos en ductos cerrados

• De canal abierto

• Para sólidos

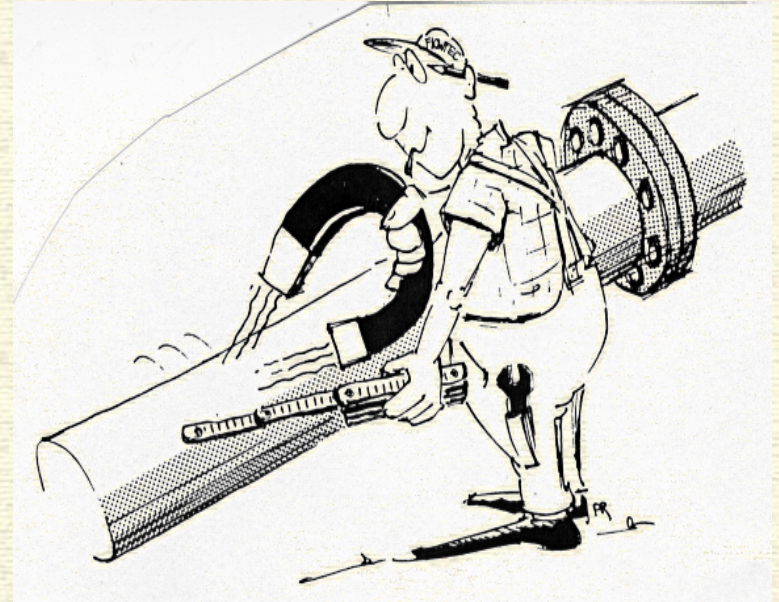




# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

Los **medidores electromagnéticos** están restringidos a ser utilizados con fluidos conductivos. Son ampliamente usados en la medición de caudal de líquidos.

Llegan a tener un intervalo de medición (turndown) muy amplio (hasta 100:1).



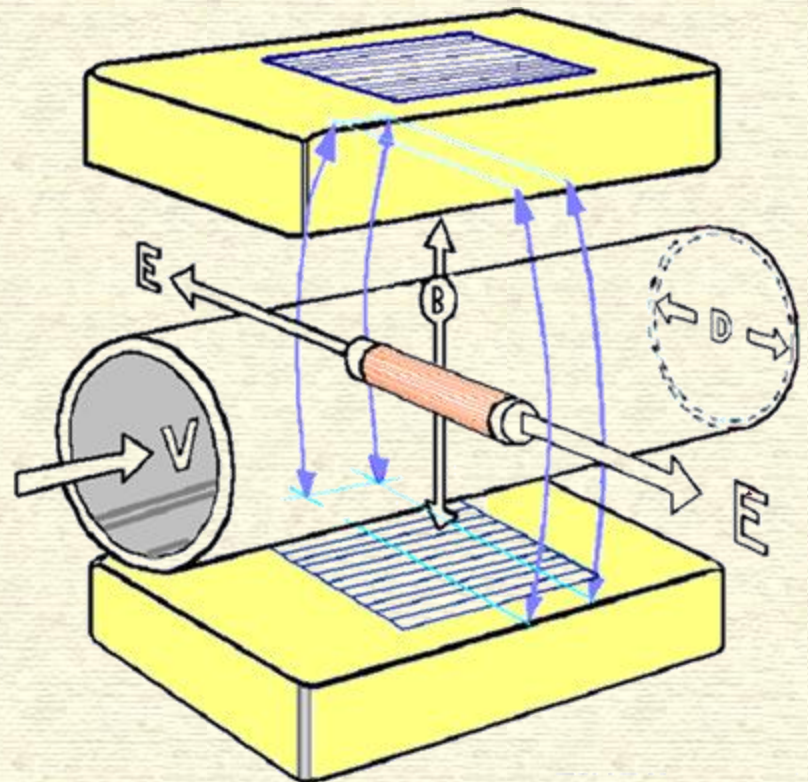
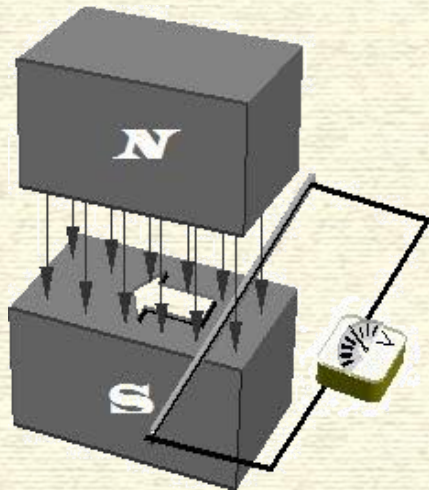
No presentan cambios significativos por el uso (**deriva baja**), por lo que son una opción muy difundida en los sistemas de distribución de agua.

Típicamente estos medidores **no se ven afectados** apreciablemente por las distorsiones del perfil de velocidades.

# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

La **ley de Faraday** establece que, la Fuerza Electromotriz ( $\epsilon$ ) inducida a través de un conductor al moverse en dirección perpendicular a un campo magnético resulta proporcional a Inducción Magnética ( $B$ ), a la velocidad con la que se mueve ( $v$ ) y a su longitud ( $D$ ).

$$\epsilon = K B D v$$





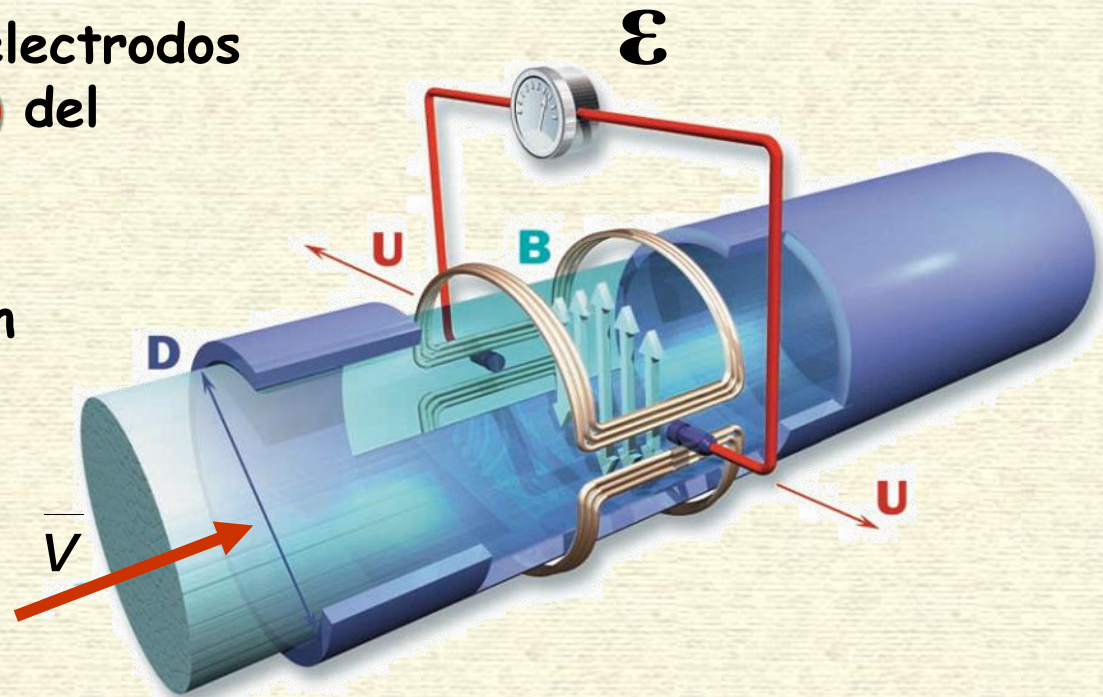
# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

La ley de Faraday de inducción es la base de la medición de los caudalímetros electromagnéticos. En este caso el conductor que se mueve (con cargas asociadas a sus iones) es la porción de fluido que pasa a través de los electrodos en los que se induce la f.e.m. que es **proporcional a la velocidad media**.

$$\varepsilon = K B D \bar{v}$$

La distancia entre los electrodos es igual al diámetro (**D**) del caudalímetro.

La velocidad comprende el área de la conducción por lo que ésta es una **velocidad media** independiente del perfil de velocidades y el régimen de flujo.



# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

## Requerimiento de la instalación

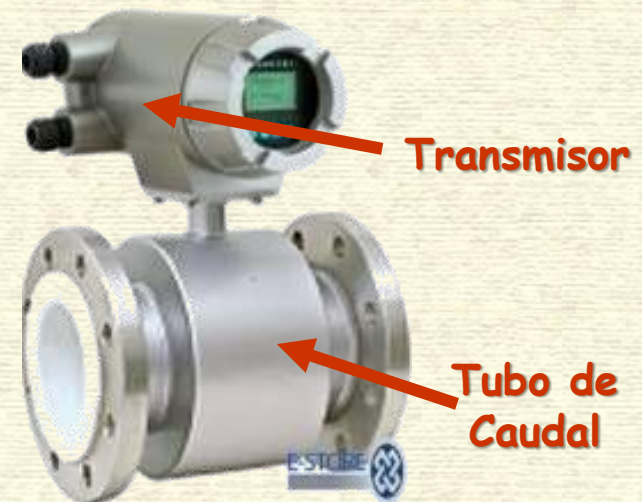
El medidor consta de:

### Tubo de Caudal

El propio tubo (de material no magnético) recubierto de material no conductor (para no cortocircuitar la tensión inducida), con las bobinas generadoras del campo magnético y los electrodos detectores del voltaje inducido en el fluido.

### Transmisor

Sistema que alimenta eléctricamente (C.A. o C.C.) a las bobinas y elimina el ruido del voltaje inducido. Además convierte la señal (mV) en otra estandarizada para equipos de indicación y control (mA, frecuencia, digitales)



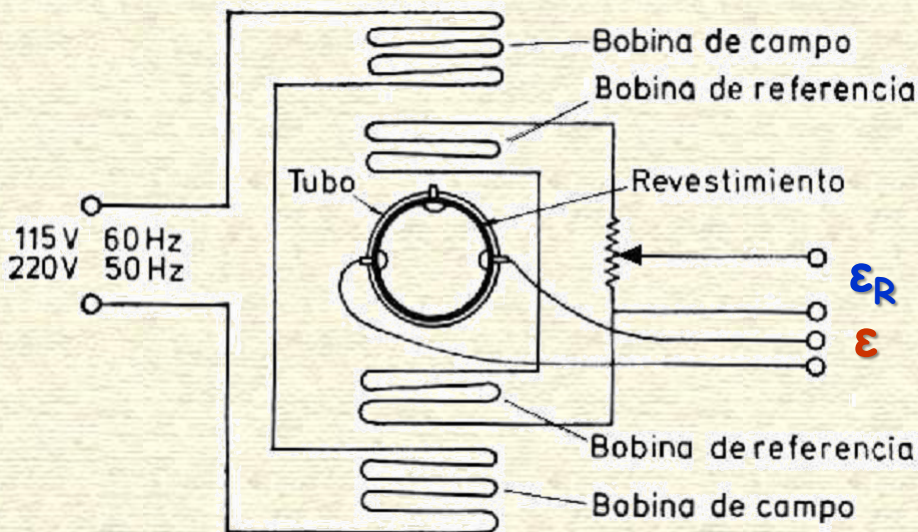


# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

$$\varepsilon = K B D \bar{v}$$

La señal de salida  $\varepsilon$  depende de la velocidad del fluido y de la densidad del campo magnético  $B$ , la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido.

Para eliminar la influencia de estos tres factores, la señal de tensión del medidor se compara en el receptor con una tensión de referencia  $\varepsilon_R$ . Como las dos señales derivan a la vez del campo magnético  $B$ , la tensión de la línea y **las variaciones de temperatura y de conductividad del líquido no influyen en la precisión de la medida.**



La señal de referencia  $\varepsilon_R$  se toma de un arrollamiento colocado en los bobinados del campo que generan el flujo magnético. Se usan fuentes de corriente alterna o continuas

# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS



La conductividad del fluido es la única característica propia del líquido que puede limitar el empleo del medidor magnético.

Los sistemas electrónicos requieren una conductividad superior a **5  $\mu\text{S/cm}$** .

Algunos dispositivos especiales permiten trabajar con una conductividad mínima de **0,3  $\mu\text{S/cm}$** .





# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

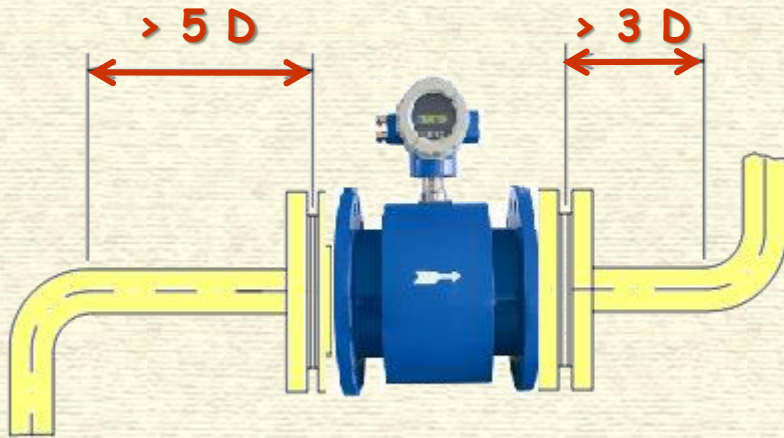
Los medidores magnéticos del caudal son adecuados para la medida de caudales de líquidos conductores en particular los **líquidos fangosos y fluidos corrosivos**.



Pueden medir caudales del fluido en ambos sentidos en la cañería. Además este medidor es **no invasivo** pues no tiene elementos que obstruyan el paso del fluido.

# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

## Requerimiento de la instalación



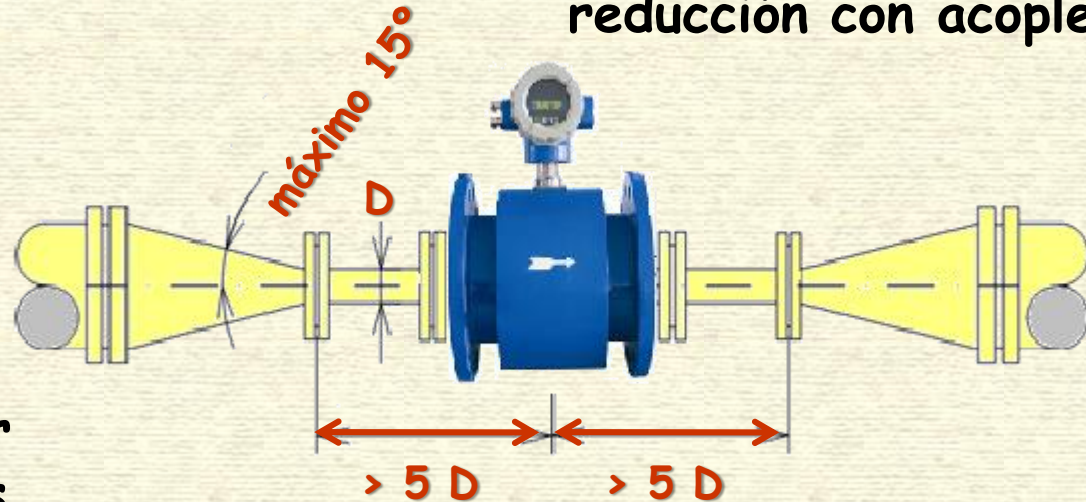
Tramos rectos de cañería



Adaptador de reducción



Se deben evitar derramamientos



Adaptador de reducción con acople



# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

Pérdida de carga baja

Medición bidireccional

No posee partes móviles (bajo mantenimiento)

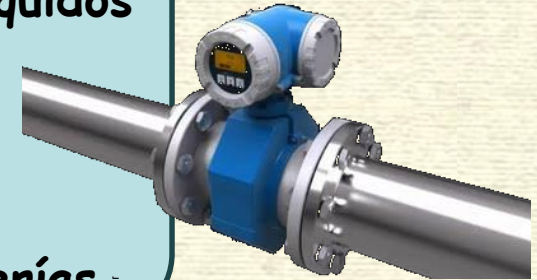
No se necesita filtro (se puede usar con líquidos sucios)

Gran exactitud (típicamente 0,2% a 0,4% R)

Gran variedad de tamaños: 2 plg hasta 20 plg

Bajos requerimientos de tramos rectos de cañerías

## VENTAJAS



Se necesita cortar la tubería para su instalación

Inversión inicial grande

Se requieren de muchos tamaños diferentes para las diferentes aplicaciones (stocks caro)

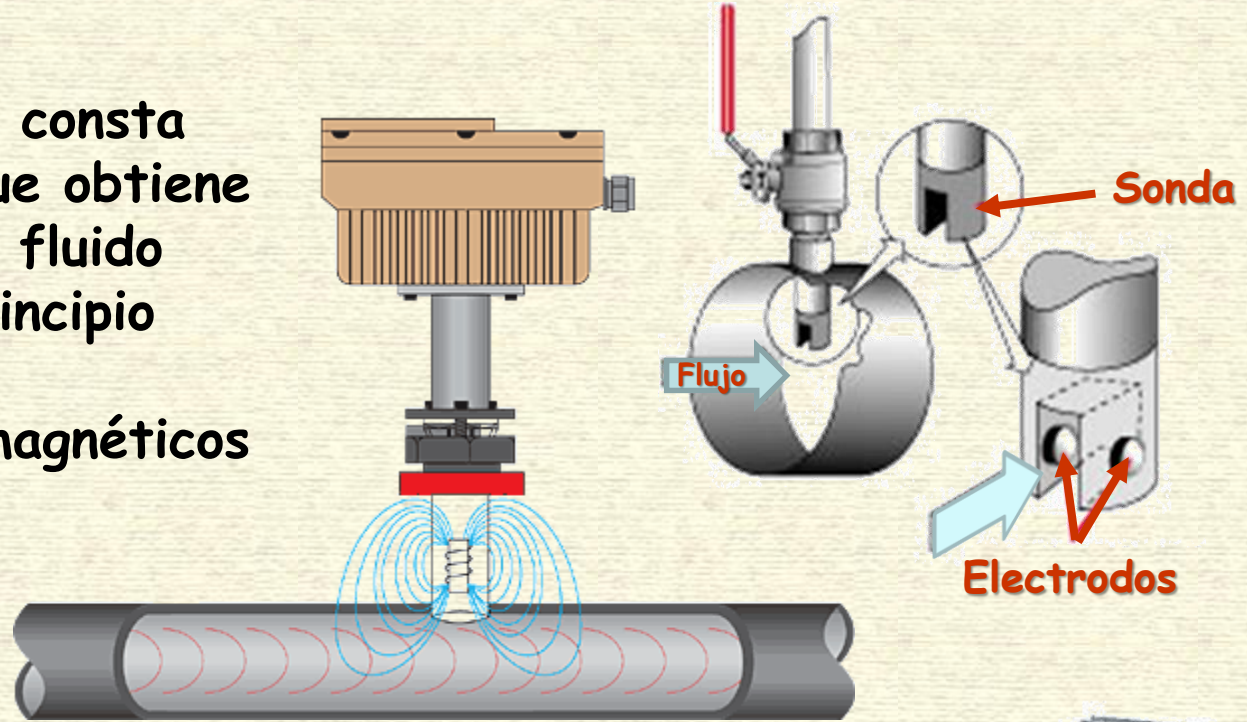
## DESVENTAJAS

# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

## Dispositivos de Inserción

Este dispositivo consta de una **sonda** que obtiene la velocidad del fluido por el mismo principio físico que los caudalímetros magnéticos comunes.

La sonda incorpora bobinas que generan un campo magnético y los electrodos se hayan en la misma sonda.



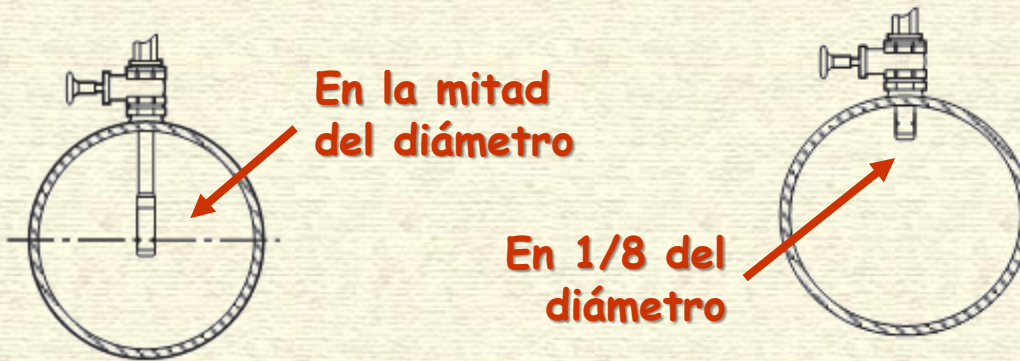
Están especialmente pensados para **cañerías de gran diámetro** (hasta 2000 mm y algunos modelos especiales aún más).





# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS Dispositivos de Inserción

Permite instalar el elemento de medición sin cortar la cañería y aún sin interrupción del flujo mediante el sistema hot taps. Se puede incluso fijar la profundidad de inserción.



La **exactitud** es menor, **2 a 3 % R** por que el medidor infiere una velocidad puntual. Las limitaciones de la instalación (tamos de cañería recta) son mayores. Se ven más afectados por las condiciones de presión, temperatura. La conductividad mínima es de **20  $\mu\text{S}/\text{cm}$** .

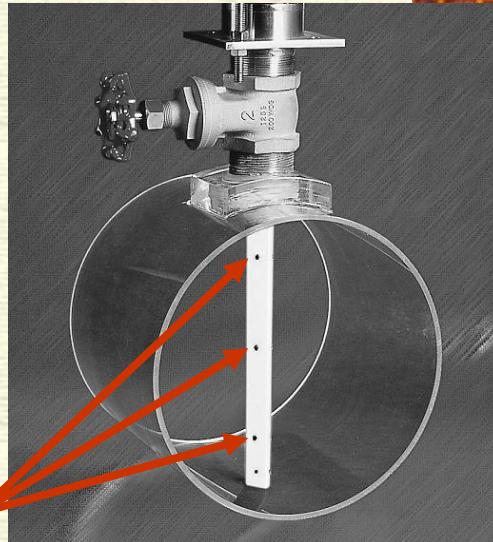
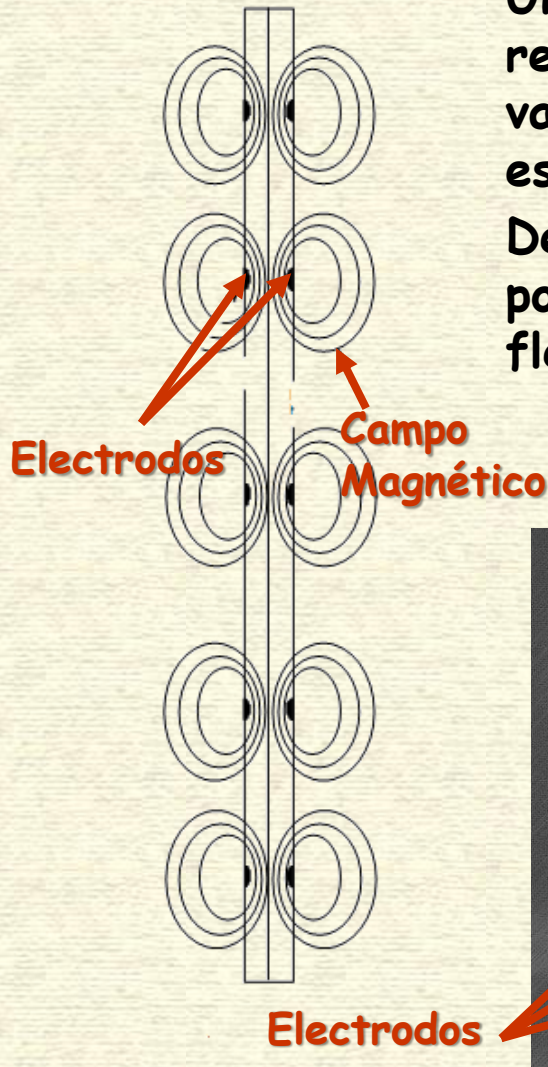


# CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

## Dispositivos de Inserción Promediante

Una modificación para ganar en precisión y reangeabilidad, consiste en usar un dispositivo con varios electrodos ubicados para promediar la estimación de la velocidad del fluido.

De esta forma se hace coincidir las características positivas del sensor electromagnético común con la flexibilidad del elemento de inserción.





# TIPOS DE CAUDALÍMETROS (Norma BS-7405)

• Convencionales de presión diferencial

• Otros tipos de presión diferencial

• De desplazamiento positivo

• Rotatorios

• De Área variable

• Oscilatorios para fluidos

• Electromagnéticos

• **Ultrasónicos**

• Másicos directos e indirectos

• Térmicos

• Otros para fluidos en ductos cerrados

• De canal abierto

• Para sólidos



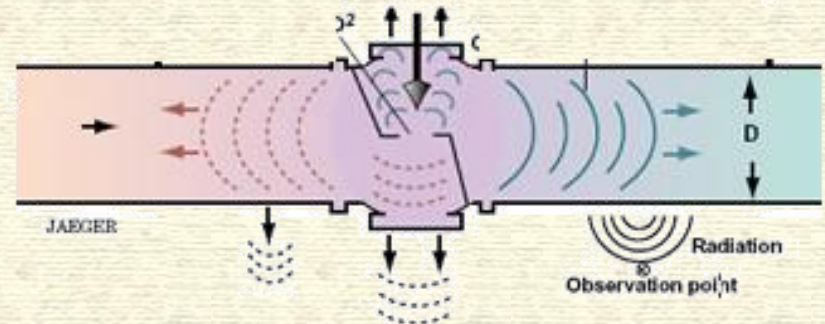
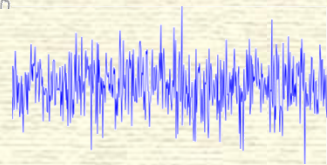
# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

Los Medidores ultrasónicos, con variadas formas, han tenido un rápido desarrollo. Actualmente se utiliza para cuestiones de fiscalización, transferencia de custodia o para monitorear caudales de distintas cañerías.



Los medidores ultrasónicos "clamp-on" proporcionan una medición no invasiva, con su con una exactitud moderada.

Por su principio de operación, estos medidores pueden ser afectados por **ruido acústico** generados por válvulas o tuberías.

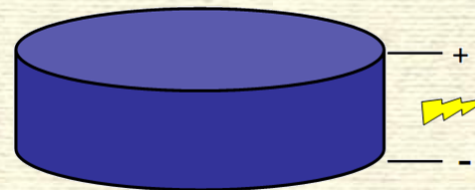
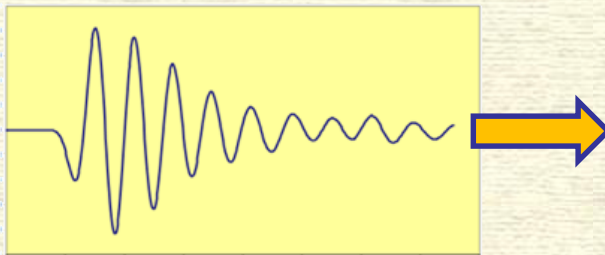
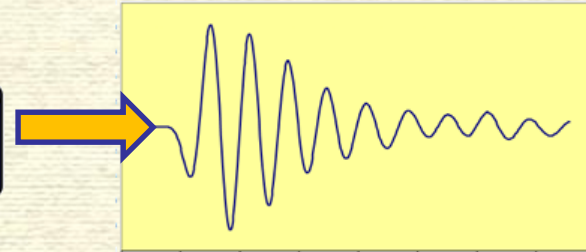
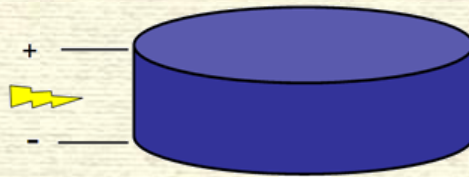




# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

La medición del caudal se realiza por medio de una onda sonora ultrasónica que se propaga a través del fluido. Constan básicamente de **dos transductores piezoeléctricos**, uno actúa como **emisor** y otro como **receptor** de la onda sonora.

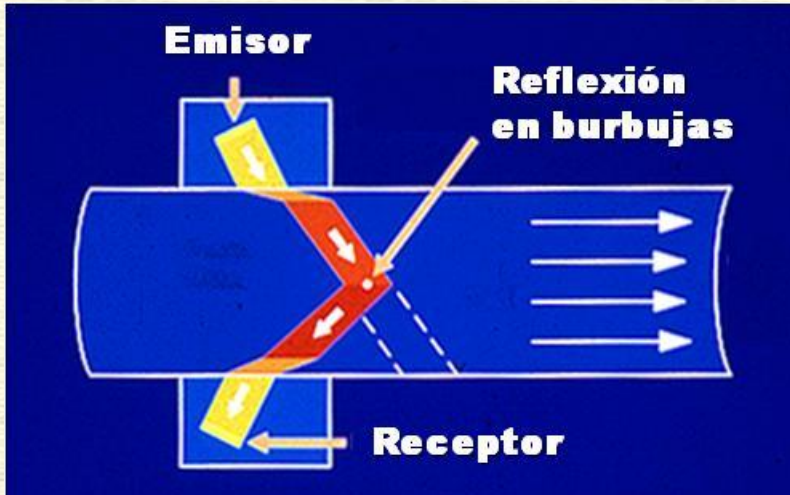
**EMISOR**  
Un cristal, usando  
tensión eléctrica,  
produce ultrasonido  
(0.5 a 2 MHz)



**RECEPTOR**  
El ultrasonido hace  
vibrar un cristal,  
generando una  
tensión eléctrica  
(señal de salida)

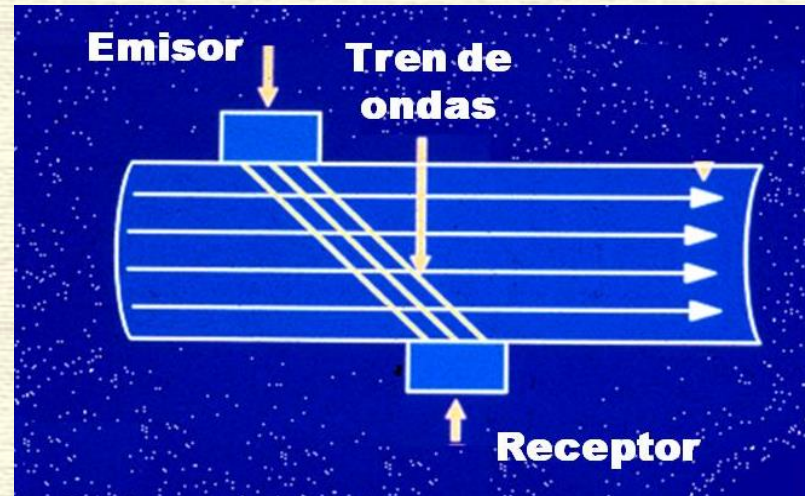
# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

Dos son los **principios** que se emplean para medir caudal.



**Caudalímetros  
basados en el  
efecto Doppler**

**Caudalímetros  
que miden  
tiempo de tránsito**

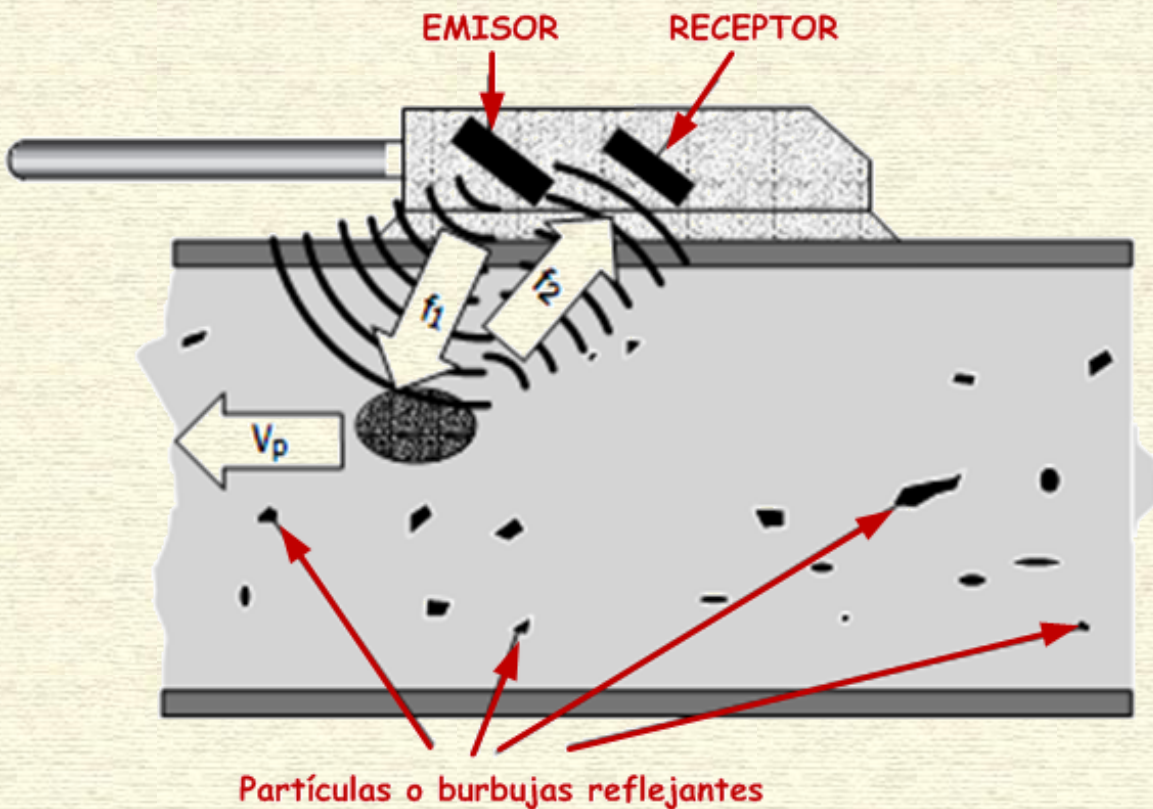




# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Basados en el efecto Doppler

La velocidad del fluido se determina midiendo el **corrimiento de frecuencia que experimenta la señal de retorno (eco)** al reflejarse en partículas o burbujas contenidas en el fluido.



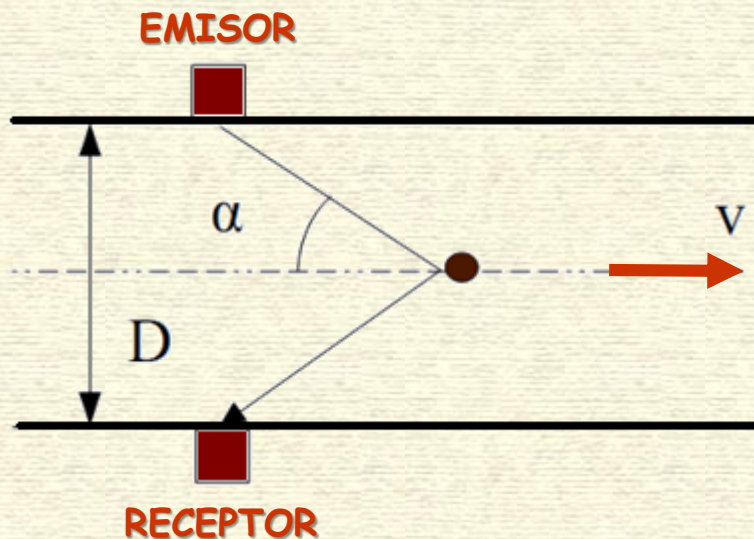
Está limitado a fluidos que contengan partículas sólidas o burbujas en suspensión.

Por eso pueden medirse algunos caudales de mezclas gas-líquido, fangos, etc.

# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Basados en el efecto Doppler

Se emiten señales de ultrasonido de frecuencia **fija** y **definida** y se sensa por medio de un receptor las señales reflejadas (ecos) por las partículas o burbujas. Se comparan de frecuencias y el corrimiento es proporcional a la velocidad de movimiento de las partículas.



Longitud de Onda emitida  $\lambda_1 = \frac{c}{f_1}$

Longitud de Onda que "ve" receptor  $\lambda_2 = \frac{c - 2 v \cos\alpha}{f_1}$

El corrimiento de frecuencias resulta:

$$f_1 - f_2 = \Delta f = \frac{2 v f_1 \cos\alpha}{c}$$



# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Basados en el efecto Doppler (Características)



Altamente dependiente de las características de las partículas en suspensión dentro del fluido (material, geometría, densidad).



La conductividad sónica (impedancia acústica) del fluido tiene influencia.



Influye el perfil del flujo (por ejemplo, zonas de mayor concentración turbulencias)



Sensible a cambios de presión y temperatura en el fluido.



Se aplica a fluidos en dónde otros caudalímetros fallan (fluidos con gran proporción de partículas en suspensión, líquidos mezclados con altas concentraciones de gases).



No produce obstrucción en el ducto (sin pérdida de carga)

# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS Basados en el efecto Doppler



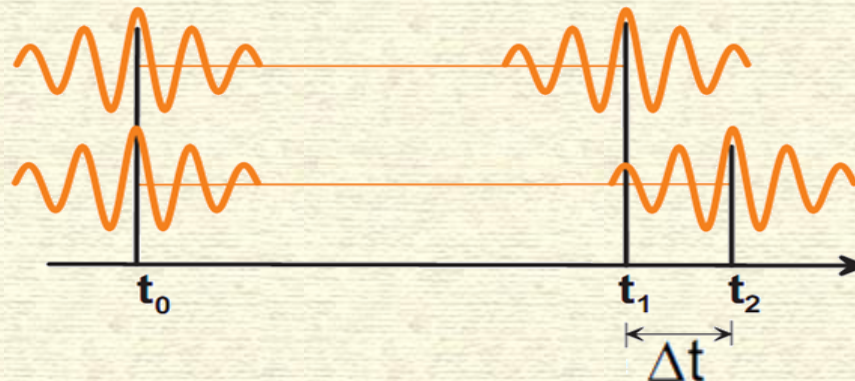
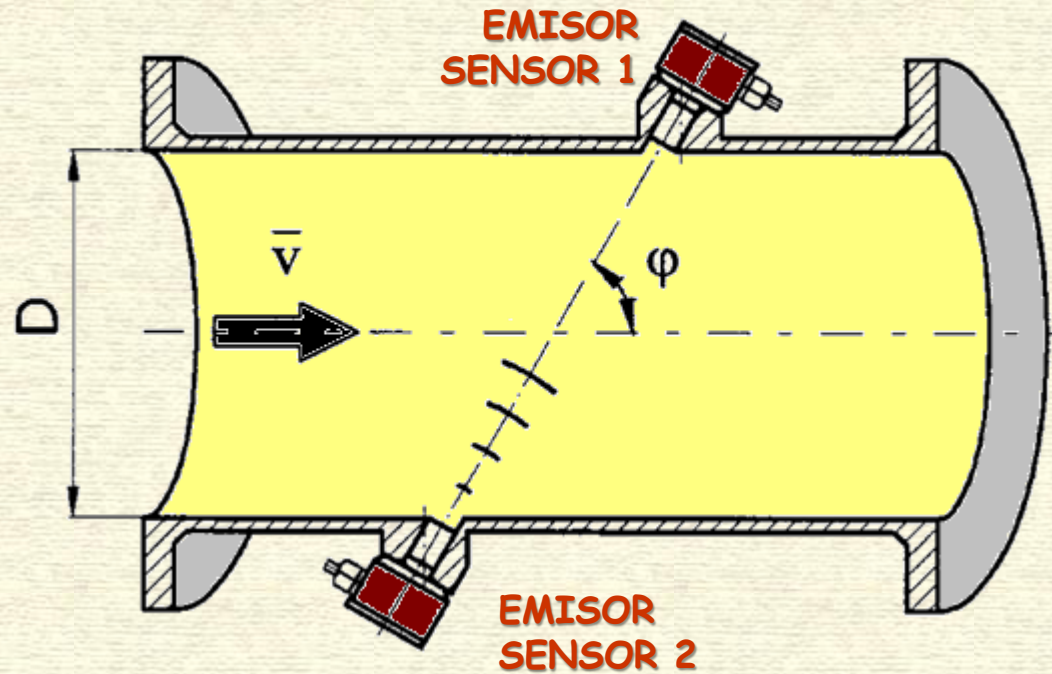


# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Medición de tiempo de tránsito

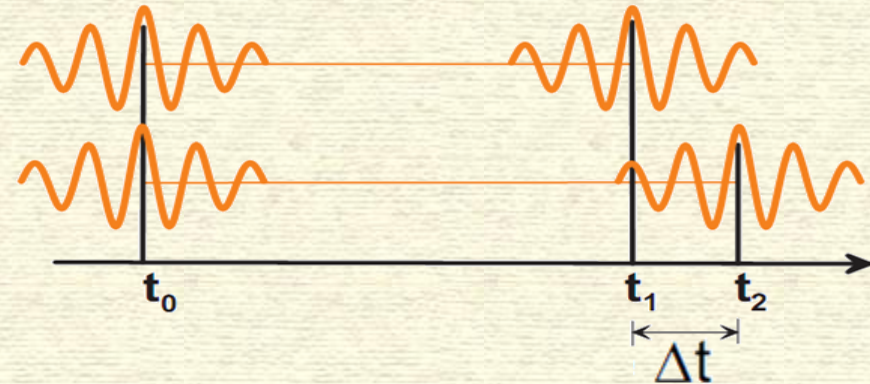
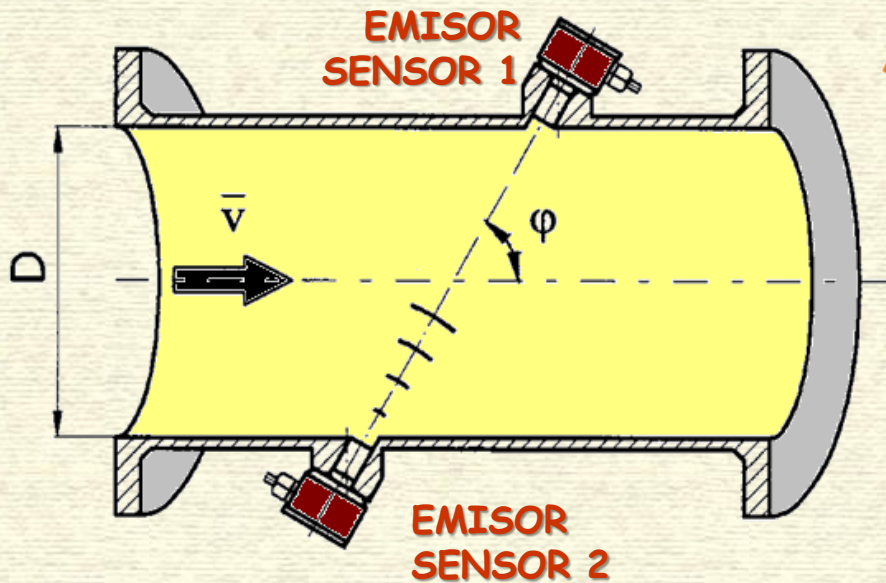
Cuando el fluido es limpio, se emiten pulsos ultrasónicos alternativamente en el sentido de flujo y en contra del sentido de flujo.

Se mide la diferencia del **tiempo de tránsito** de la onda en uno y otro sentido.



# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Medición de tiempo de tránsito



$$t_1 = \frac{D}{\text{sen} \alpha [c + v \cos \alpha]}$$

$$t_2 = \frac{D}{\text{sen} \alpha [c - v \cos \alpha]}$$

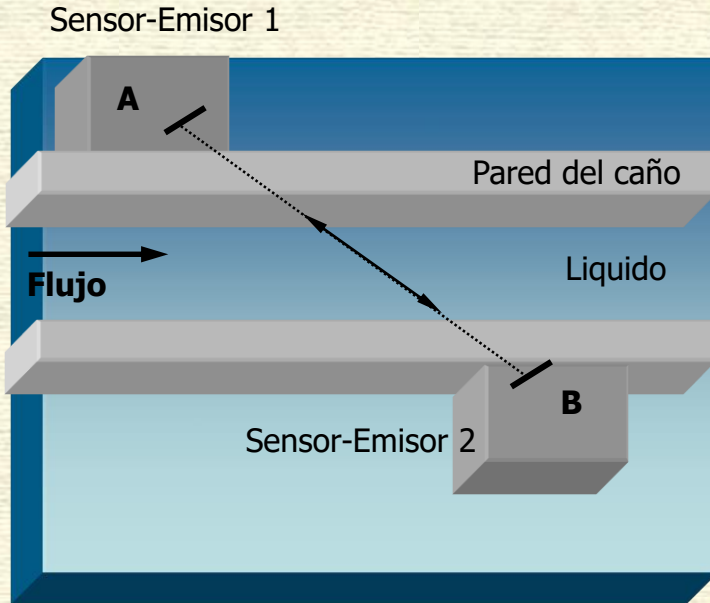
La velocidad media del fluido resulta proporcional a la diferencia de los dos tiempos de tránsito  $\Delta t$

$$v = \frac{c^2 \text{tg} \alpha \Delta t}{2 D}$$



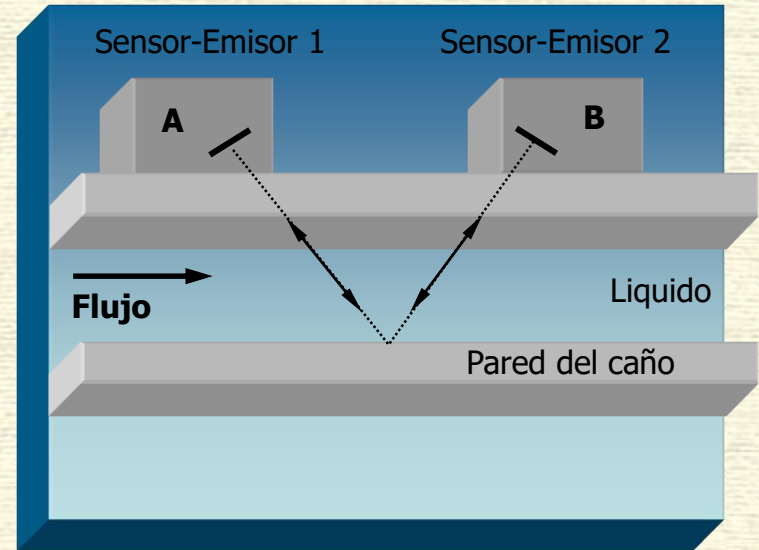
# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Medición de tiempo de tránsito - Montajes



### Diagonal

Apto para caudales altos y aplicaciones con régimen turbulento

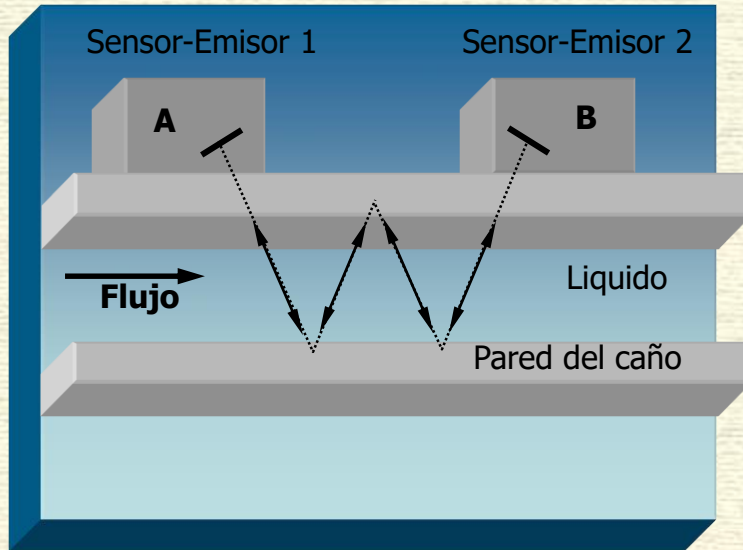


### Reflex

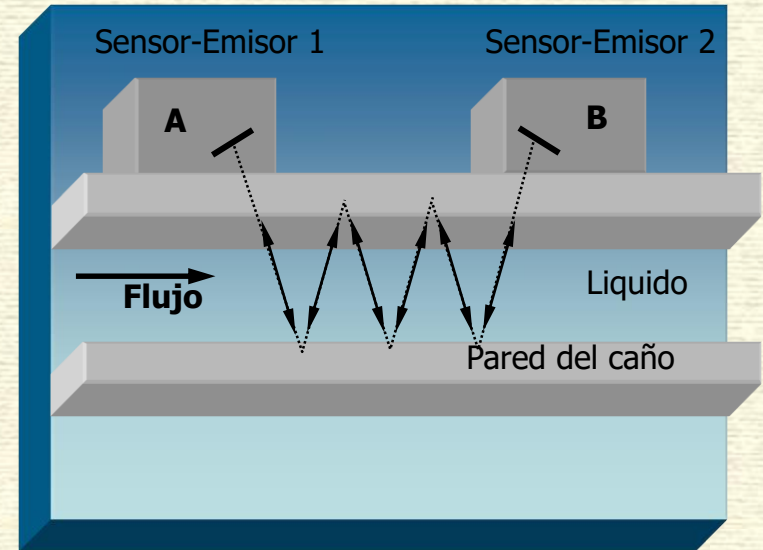
Fácil calibración.  
Amplia gama de aplicaciones.

# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Medición de tiempo de tránsito - Montajes



**Doble Reflex**



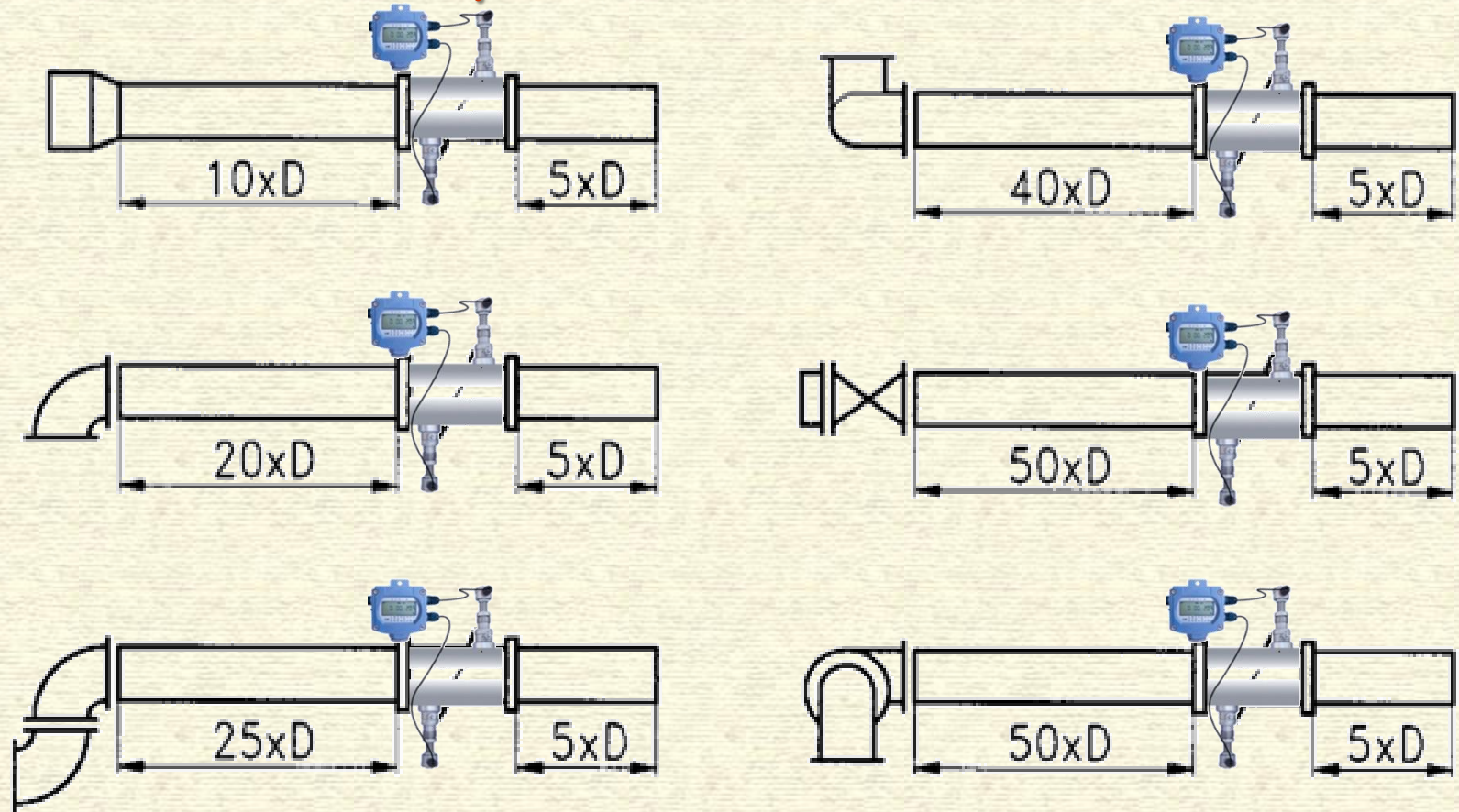
**Triple Reflex**

Se aplica a velocidades bajas de líquidos y para cañerías de diámetros reducidos.  
Son relativamente más fáciles de calibrar



# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

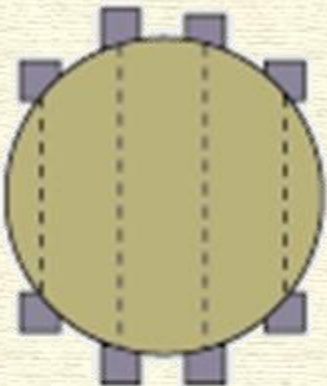
## Medición de tiempo de tránsito - Instalación



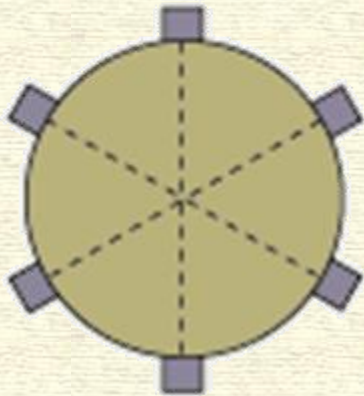
Las mayores restricciones se dan para el montaje en diagonal de emisor y sensor

# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Medición de tiempo de tránsito - Montajes

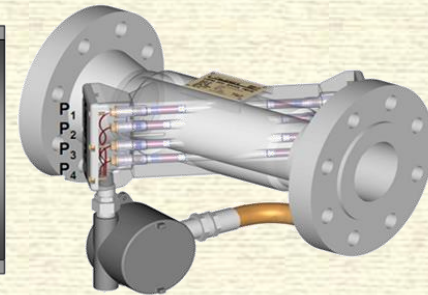
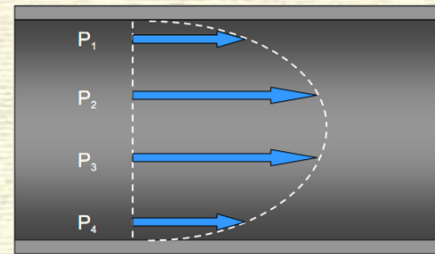
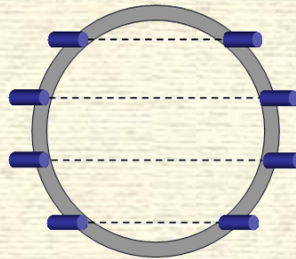


**Cordal**

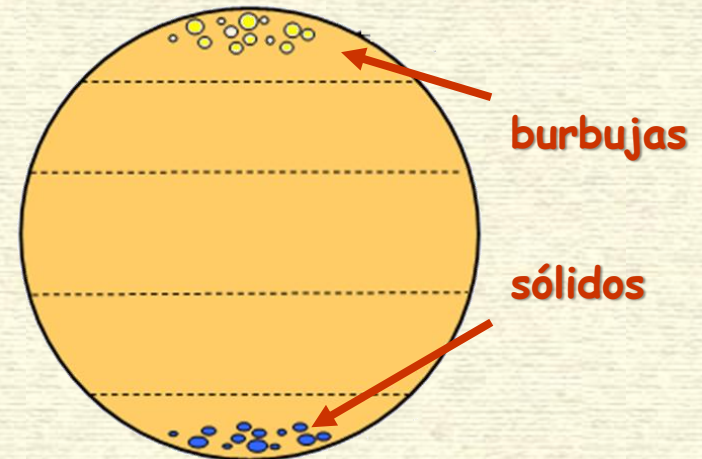


**Diagonal**

Aumentando el número de pares de sensores-emisores se puede mejorar la rangeabilidad y precisión de los instrumentos.



En arreglo cordal del camino acústico evita interferencia de burbujas de gases (tope) o de partículas (fondo)





# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Medición de tiempo de tránsito - Tipos

### No Invasivos

Se montan sobre el exterior de la cañería ("clap on"), incluso pueden ser portátiles



### Invasivos

Usan más de una vía acústica. Tienen mayor exactitud y se aplican incluso a gases.

# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Comparación de principios operativos

### EFEECTO DOPPLER

- El fluido debe contener partículas o burbujas
- Mide diferencia de frecuencia de ultrasonido
- Se aplica solo a líquidos
- Generalmente no invasivo



### TIEMPO DE TRÁNSITO

- El fluido debe ser relativamente limpio
- Mide diferencia de tiempo de tránsito
- Se aplica a líquidos y gases
- Puede ser invasivo y no invasivo





# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## Modelos duales

Hay dispositivos que tienen la posibilidad de medir la velocidad del fluido por los dos principios y se conmuta a uno u otro automáticamente según se precise. A estos caudalímetros se los denomina **duales**.



# CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS

## VENTAJAS

Pérdida de carga baja o nula

No posee partes móviles (bajo mantenimiento)

Se puede usar con líquidos sucios)

Gran exactitud para tiempo de tránsito  
(típicamente 0,4% a 0,9% Span)

Versatilidad para usar con distintos diámetros en sistema "camp-on" tramos rectos de cañerías

Relativamente económicos para grandes diámetros

Instalación no invasiva si se requiere.

## DESVENTAJAS

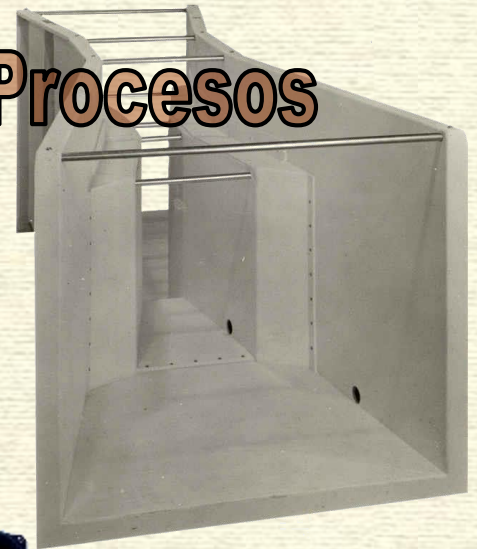
Requiere régimen de flujo establecido.

Según el principio de funcionamiento, hay restricciones para el tipo de fluido





# Instrumentación Industrial de Procesos



## TEMA 5

# ELEMENTOS DE CAUDAL

2da. Parte



Departamento de Ingeniería de Procesos  
y Gestión Industrial