



# Instrumentos de Vazão

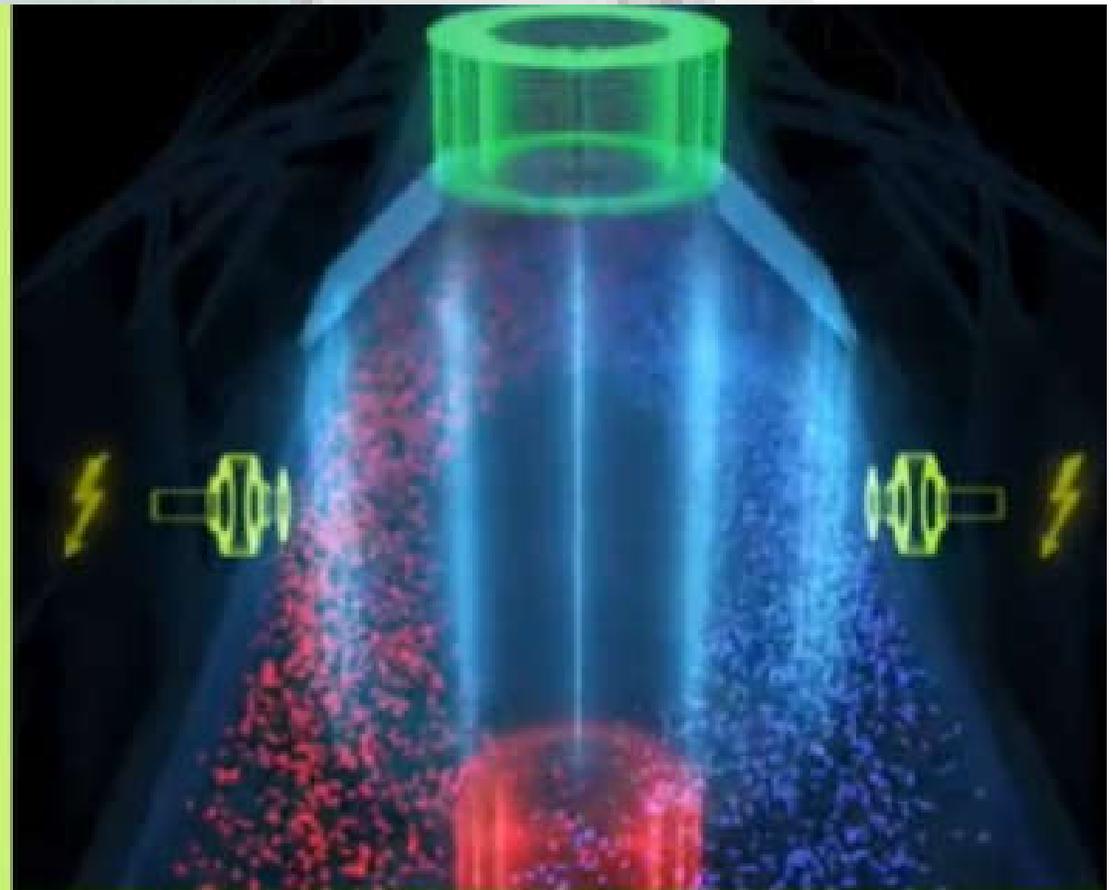
Adrielle C. Santana

# Medidor de Vazão Magnético

- Perda de carga mínima pelo fluido;
- Se baseiam na criação de potencial elétrico pelo movimento de um fluido **condutor** através de um campo magnético gerado exteriormente.
- Usando a lei de Faraday da indução eletromagnética, a tensão gerada, é diretamente proporcional à velocidade da vazão do fluido.

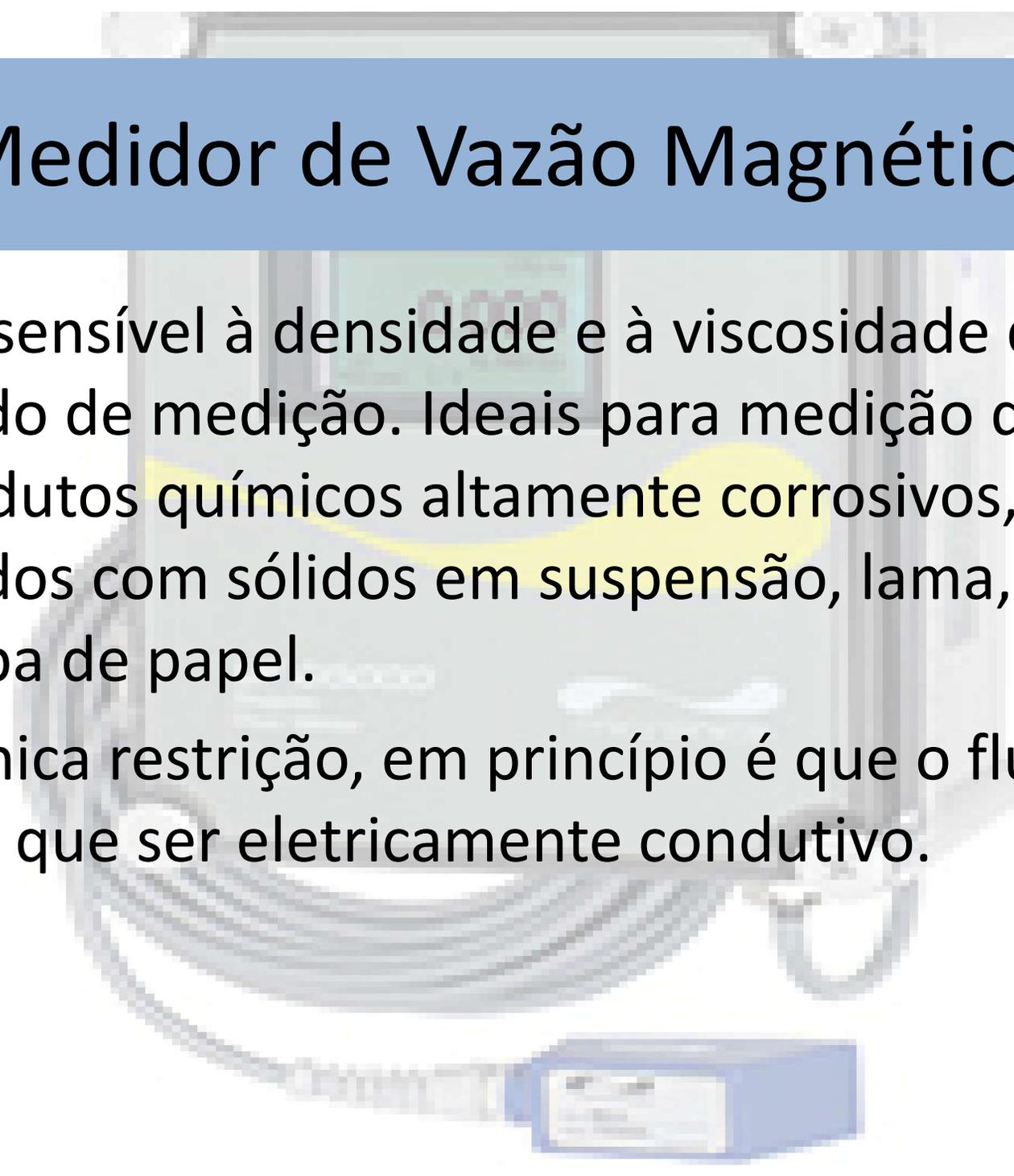
# Medidor de Vazão Magnético

O fluido, agora, polarizado pelo campo eletromagnéticos, irá gerar uma corrente, que por sua vez gerará uma tensão induzida que será captada pelos eletrodos.

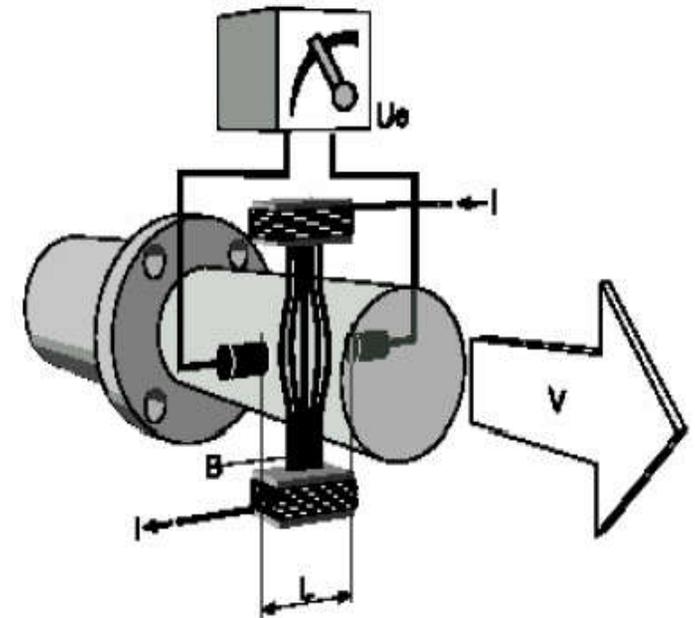
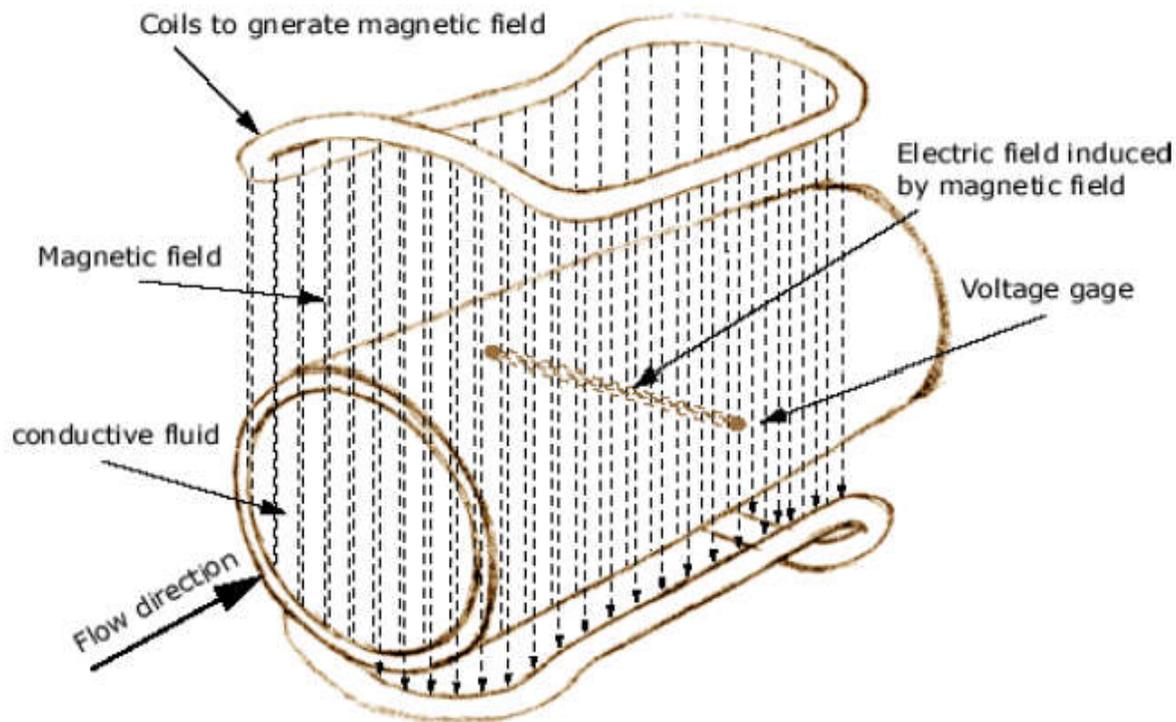


# Medidor de Vazão Magnético

- É insensível à densidade e à viscosidade do fluido de medição. Ideais para medição de produtos químicos altamente corrosivos, fluidos com sólidos em suspensão, lama, água, polpa de papel.
- A única restrição, em princípio é que o fluido tem que ser eletricamente condutivo.



# Medidor de Vazão Magnético



$$U_e = B \cdot L \cdot v$$

$$Q = v \cdot A$$

$U_e$  = induced voltage

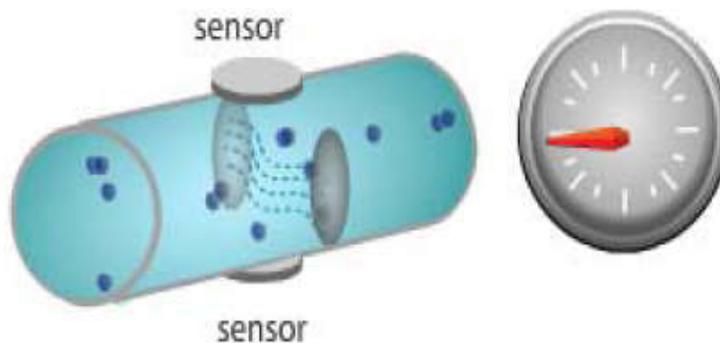
$B$  = magnetic induction (magnetic field)

$L$  = distance between electrodes

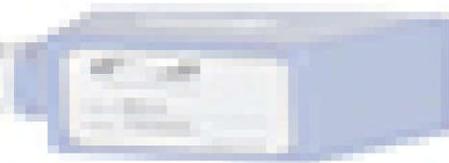
$v$  = flow velocity

$Q$  = volume flow

$A$  = pipe cross-section



# Medidor de Vazão Magnético



# Medidor de Vazão de Turbina

Este medidor é composto basicamente de um rotor montado axialmente na tubulação.

O rotor é provido de aletas que o fazem girar quando passa um fluido na tubulação do processo.

Uma bobina captadora com um ímã permanente é montada externamente fora da trajetória do fluido. Quando este se movimenta através do tubo, o rotor gira a uma velocidade determinada pela velocidade do fluido e pelo ângulo das lâminas do rotor.

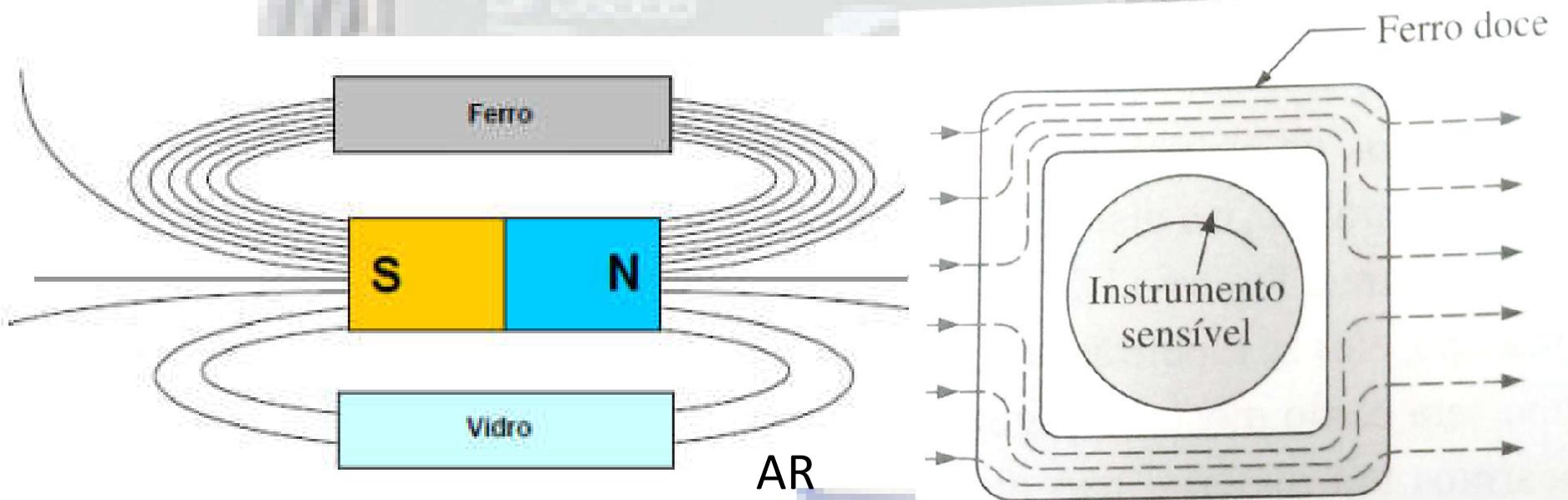
À medida que cada lâmina passa diante da bobina e do ímã, ocorre uma variação da *relutância* do circuito magnético e no fluxo magnético total a que está submetida a bobina. Verifica-se então a indução de um ciclo de tensão alternada.

A frequência dos pulsos gerados desta maneira é proporcional à velocidade do fluido e a vazão pode ser determinada pela medição / totalização de pulsos.

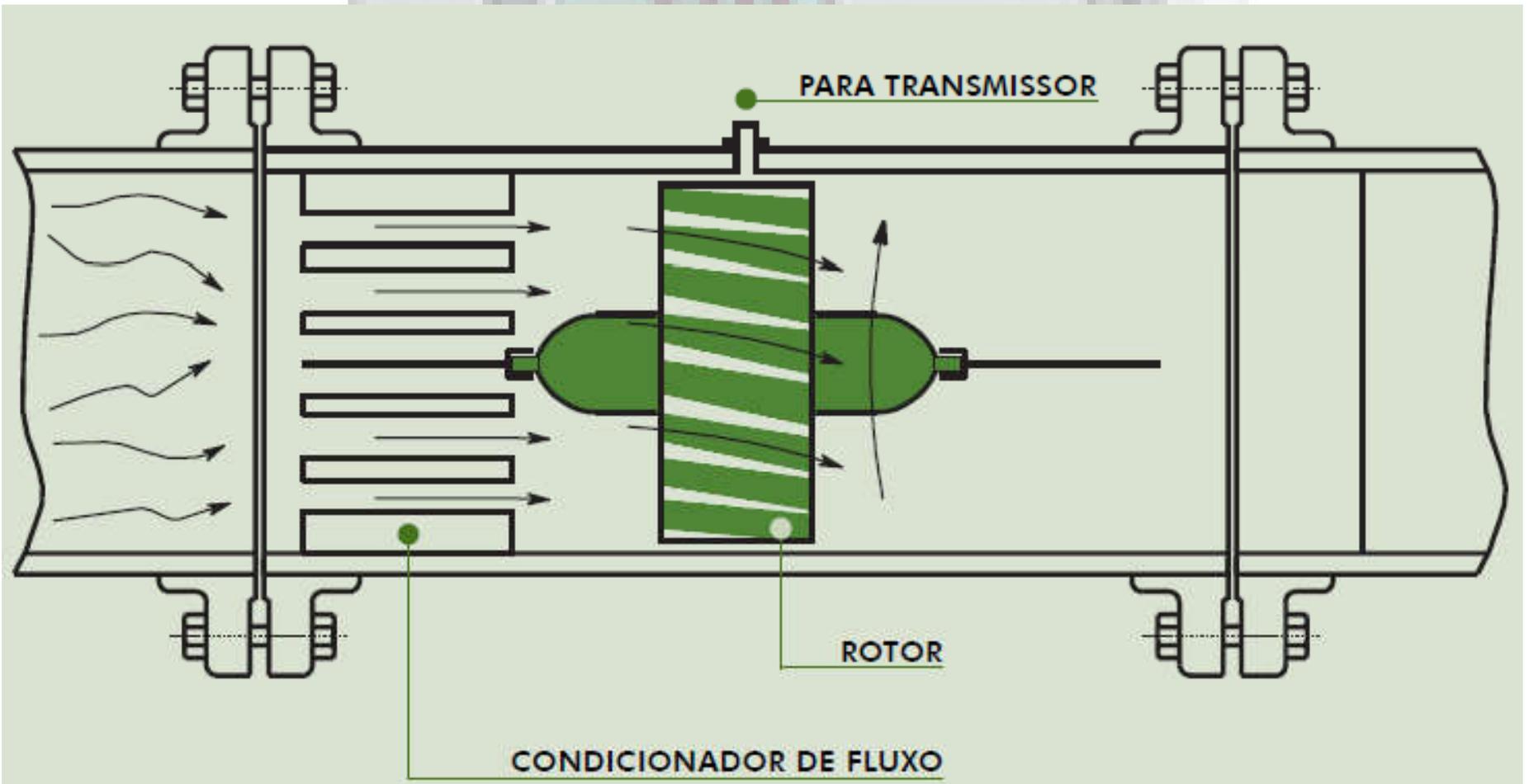
# Medidor de Vazão de Turbina

**Relutância Magnética** É a dificuldade imposta ao circuito magnético à passagem do fluxo magnético pelo material ou meio que circunda a região descrita pelas linhas de campo magnéticas.

Quanto mais condutor o material (aletas), menor é a relutância ajudando a aumentar a concentração das linhas de campo magnético.



# Medidor de Vazão de Turbina



# Medidor de Vazão de Turbina

A  $f$  de saída da tensão é proporcional à vazão sendo relacionadas por um coeficiente  $K$  (pulsos por unidade de volume) que é um parâmetro de calibração da turbina variando de turbina para turbina e sendo determinado pelo fabricante.

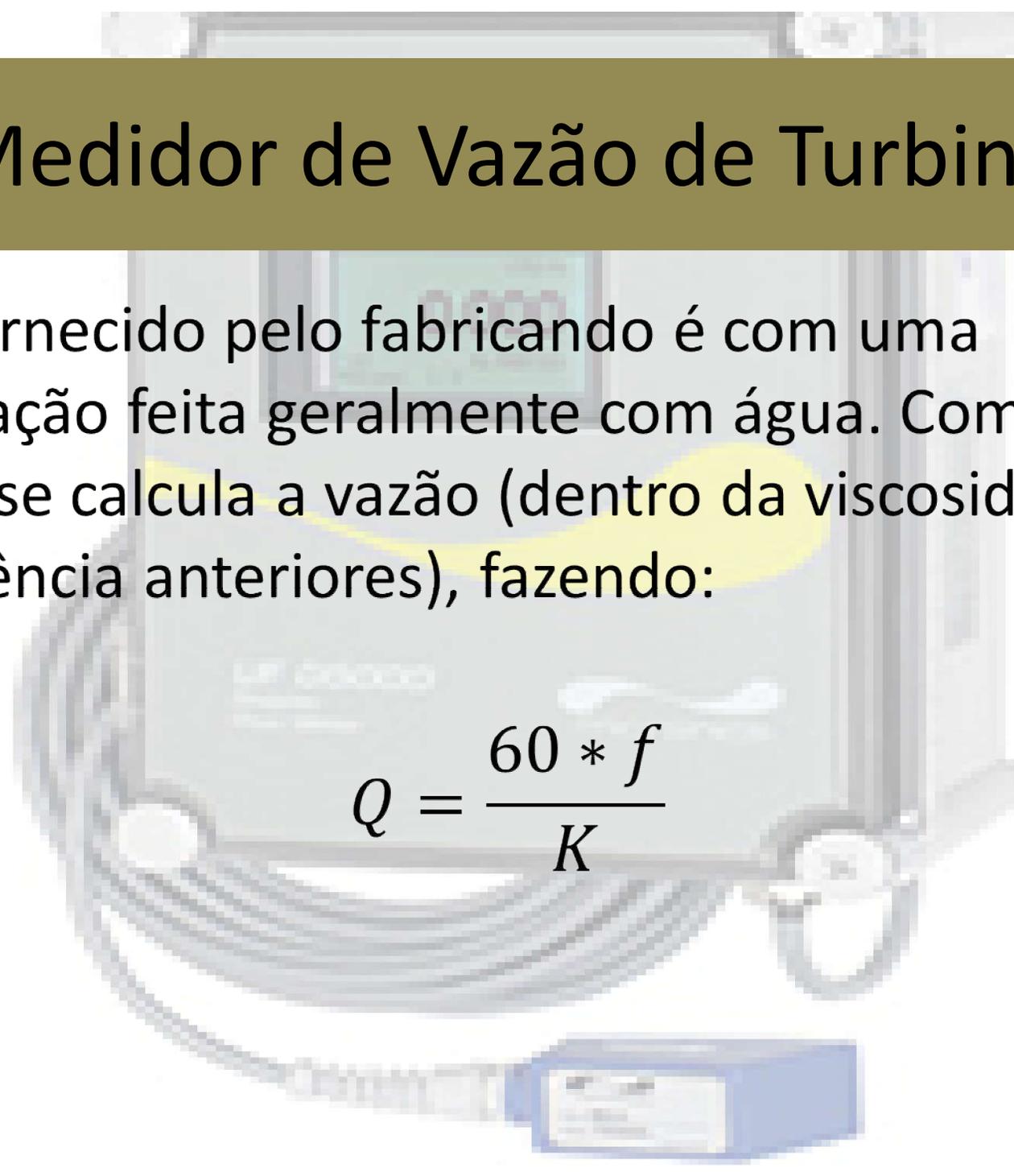
O  $K$  é dependente da viscosidade do fluido.

Abaixo de 2cSt (centiStrokes) de viscosidade o  $K$  é aproximadamente constante para frequências acima de 50Hz.

# Medidor de Vazão de Turbina

O K fornecido pelo fabricante é com uma calibração feita geralmente com água. Com ele pode-se calcular a vazão (dentro da viscosidade e frequência anteriores), fazendo:

$$Q = \frac{60 * f}{K}$$



# Medidor de Vazão de Turbina



# Medidor de Vazão de Turbina



# Medidor de Vazão de Turbina

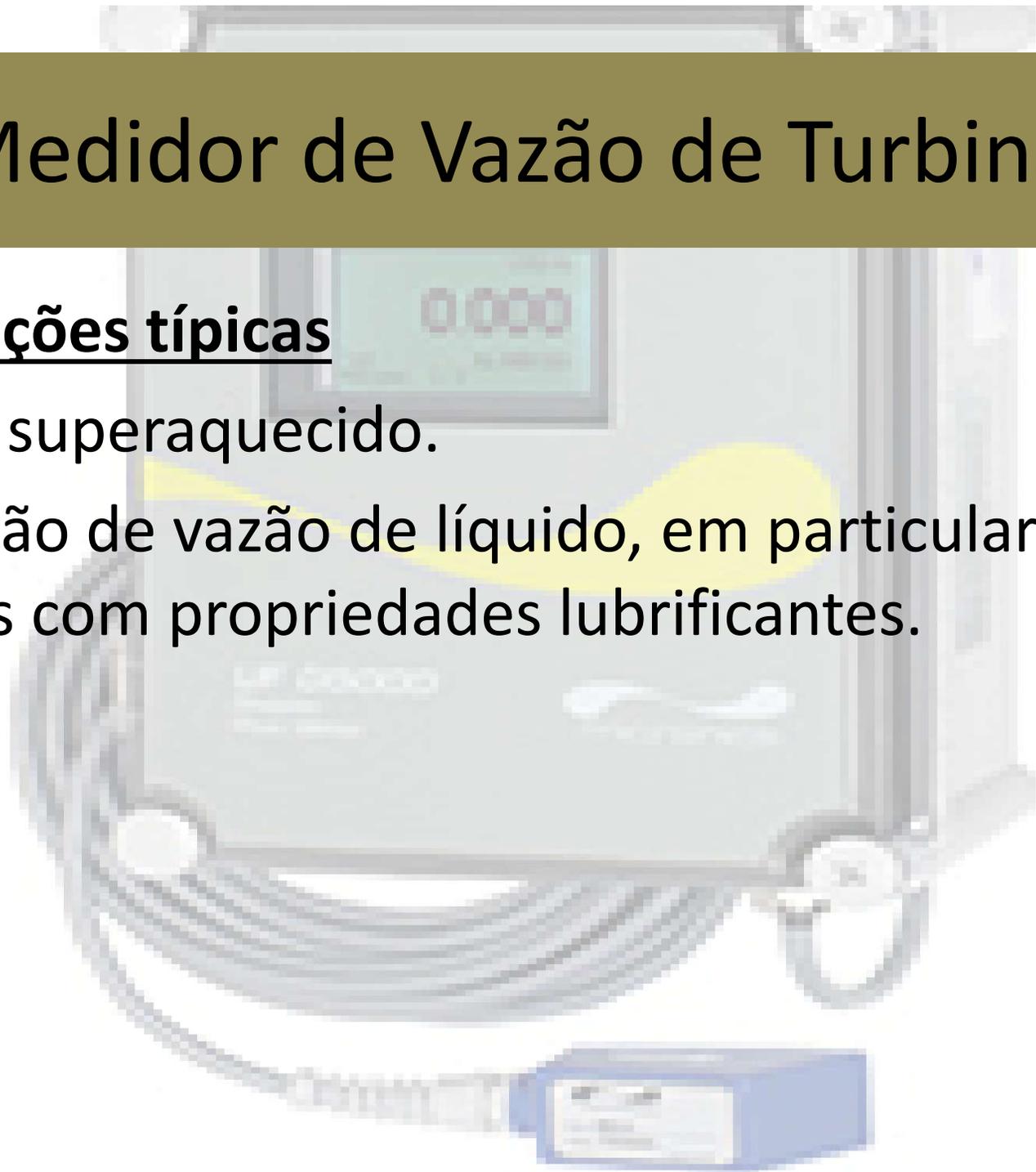


# Medidor de Vazão de Turbina

## Aplicações típicas

Vapor superaquecido.

Medição de vazão de líquido, em particular fluidos com propriedades lubrificantes.



# Medidor de Vazão de Turbina

## Desvantagens

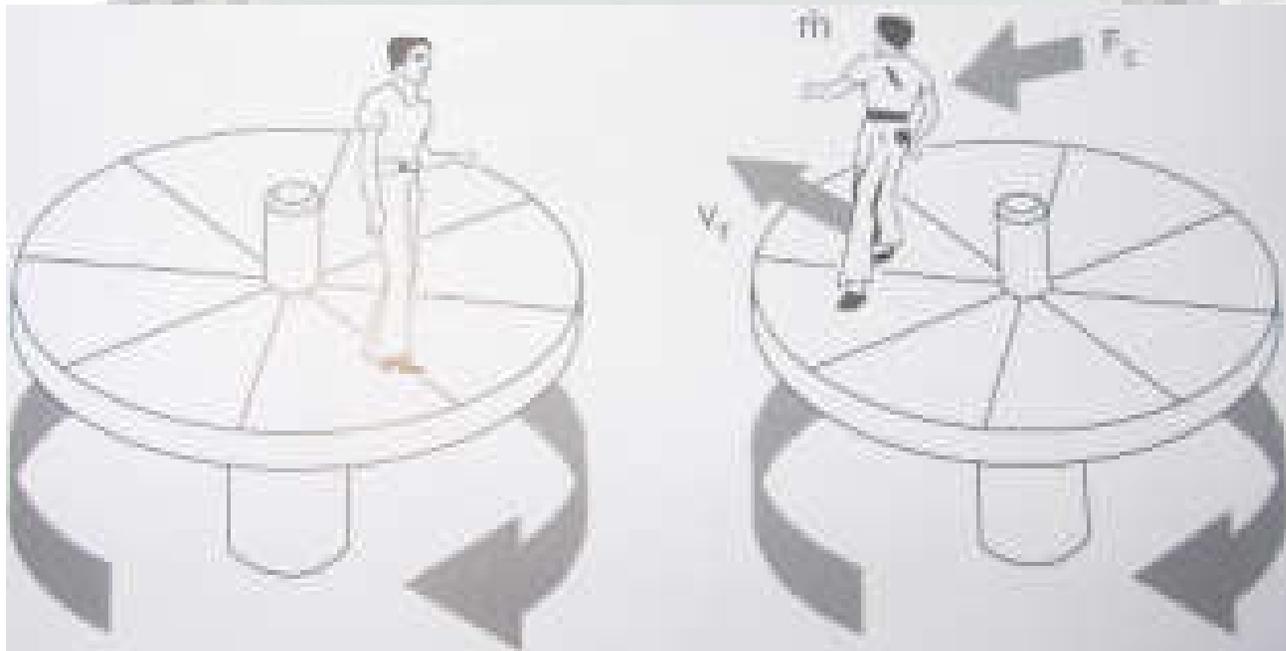
- Calibração para uma pressão específica da linha.
- Direcionadores de fluxo são essenciais
- Vapor úmido pode danificar a roda da turbina e afetar a precisão.
- Baixas vazões podem ser perdidas porque não há energia suficiente para girar a roda da turbina.
- Sensível à viscosidade.
- O fluido deve ser muito limpo (tamanho de partícula não superior a  $100\ \mu\text{m}$ ),

# Medidor por Efeito Coriolis

- Tem grande aplicabilidade desde indústria alimentícia, farmacêutica, química, papel, petróleo etc. e sua medição, independe das variáveis de processo - densidade, viscosidade, condutibilidade, pressão, temperatura, perfil do fluido.
- O medidor Coriolis possui dois componentes:
  - tubos de sensores de medição e
  - transmissor.

# Medidor por Efeito Coriolis

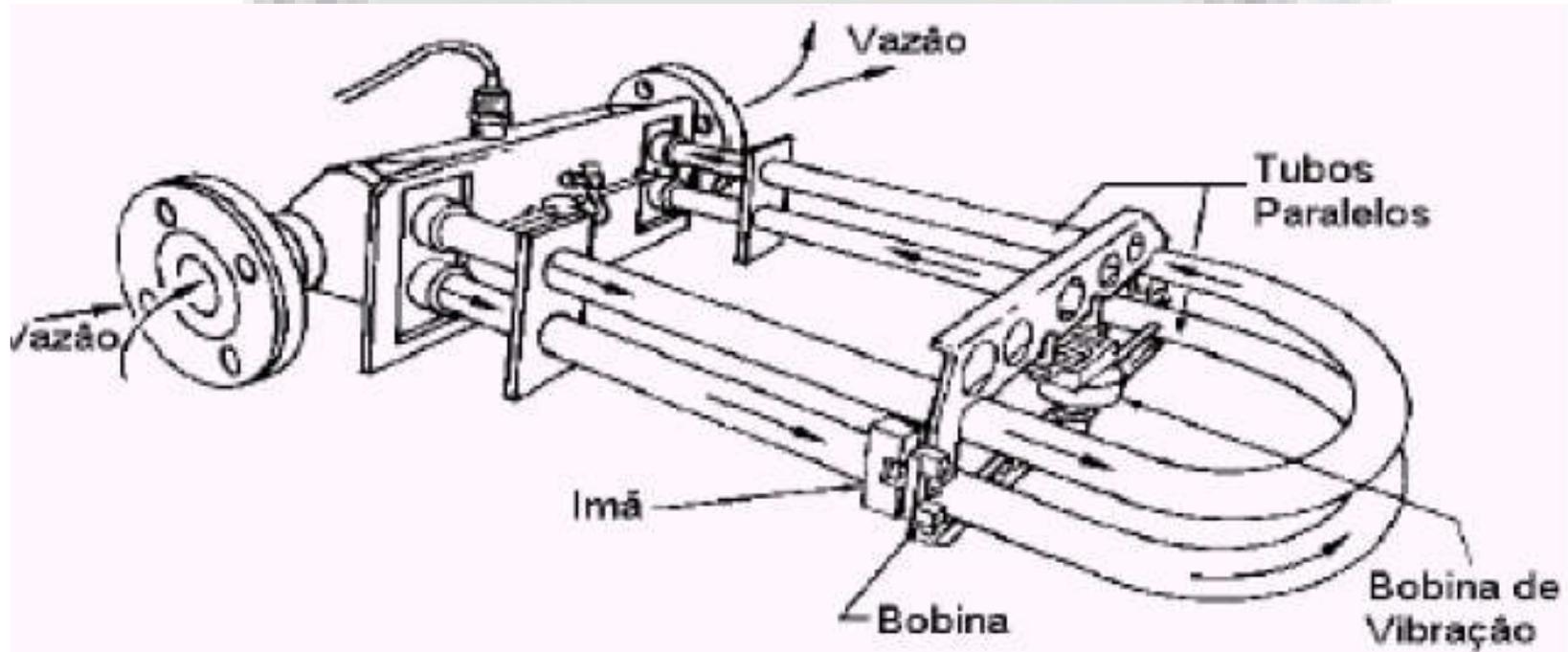
**Efeito Coriolis**: um corpo em movimento dentro de um sistema em rotação sofre um desvio lateral causado pelo movimento rotacional, a essa força deu-se o nome de “Força Coriolis”.



# Medidor por Efeito Coriolis

Nesse medidor tem-se tubos curvos em constante oscilação causando um movimento lateral dos tubos (para cima e para baixo). (Representa a plataforma giratória)

Metade do fluido passa por cada tubo em movimento linear.



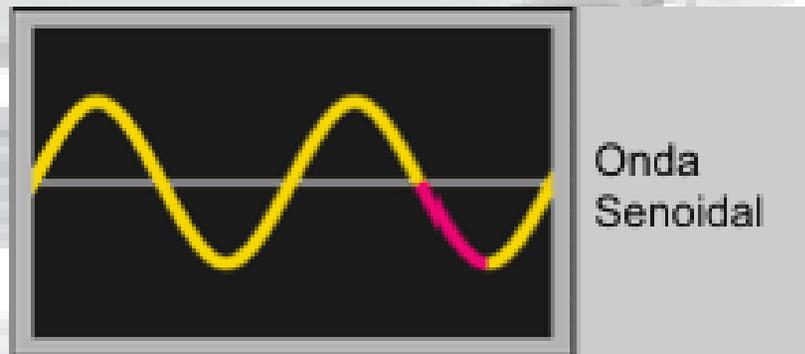
# Medidor por Efeito Coriolis

Os conjuntos de ímã e **bobina captora** são montados nos tubos de fluxo. As bobinas captoras são montadas nas laterais de um dos tubos e os ímãs são montados nas laterais do tubo de fluxo oposto.

Durante o funcionamento, uma **bobina impulsora** é energizada, fazendo com que os tubos oscilem em oposição um ao outro.

# Medidor por Efeito Coriolis

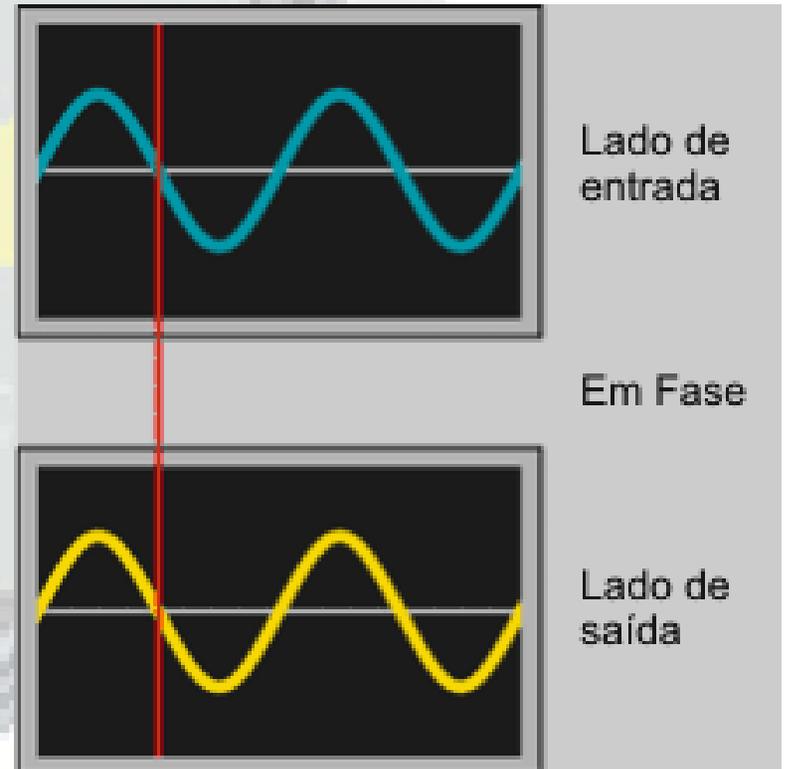
Cada bobina capta se move através do campo magnético uniforme do ímã adjacente. A tensão gerada por cada bobina capta cria uma onda senoidal. Como os ímãs são montados num tubo e as bobinas no tubo oposto, as ondas senoidais geradas representam o movimento de um tubo em relação ao outro.



# Medidor por Efeito Coriolis

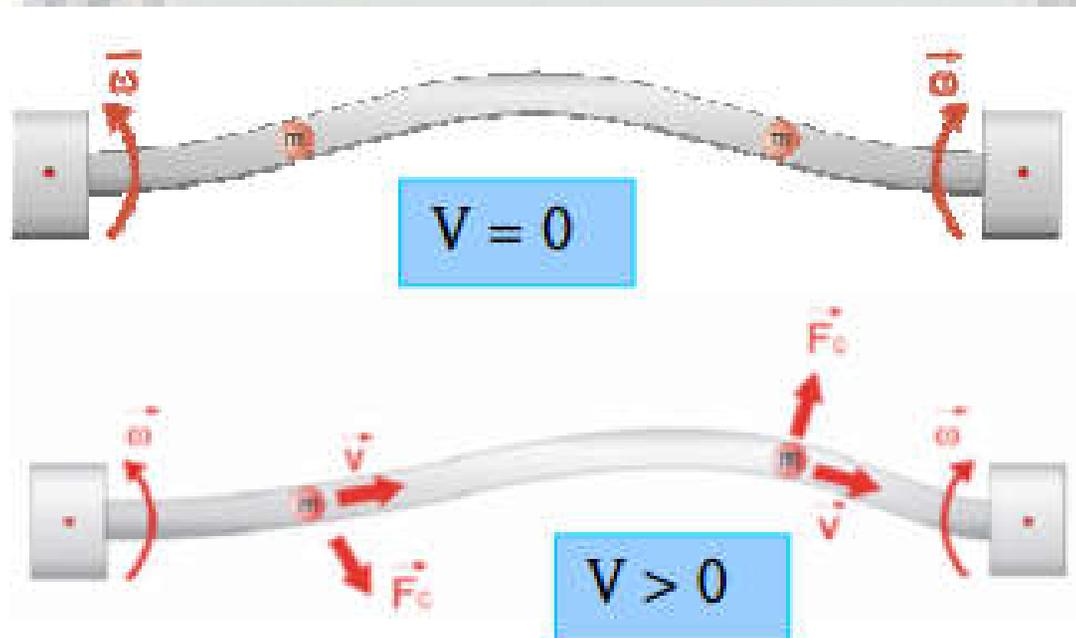
Os tubos de fluxo oscilam em oposição um ao outro.

Os dois captores (um no lado da entrada e outro no lado da saída) geram sinais de onda senoidais continuamente quando os tubos estão oscilando. Quando não há fluxo as fases das ondas senoidais coincidem.



# Medidor por Efeito Coriolis

Quando a vazão (representa o cara andando na plataforma giratória) por dentro do tubo for igual a zero, ou seja, sem movimento linear, não haverá atuação da força coriolis, por outro lado, assim que fluido começar a fluir pelo tubo, teremos uma clara deformação sobre os tubos.



# Medidor por Efeito Coriolis

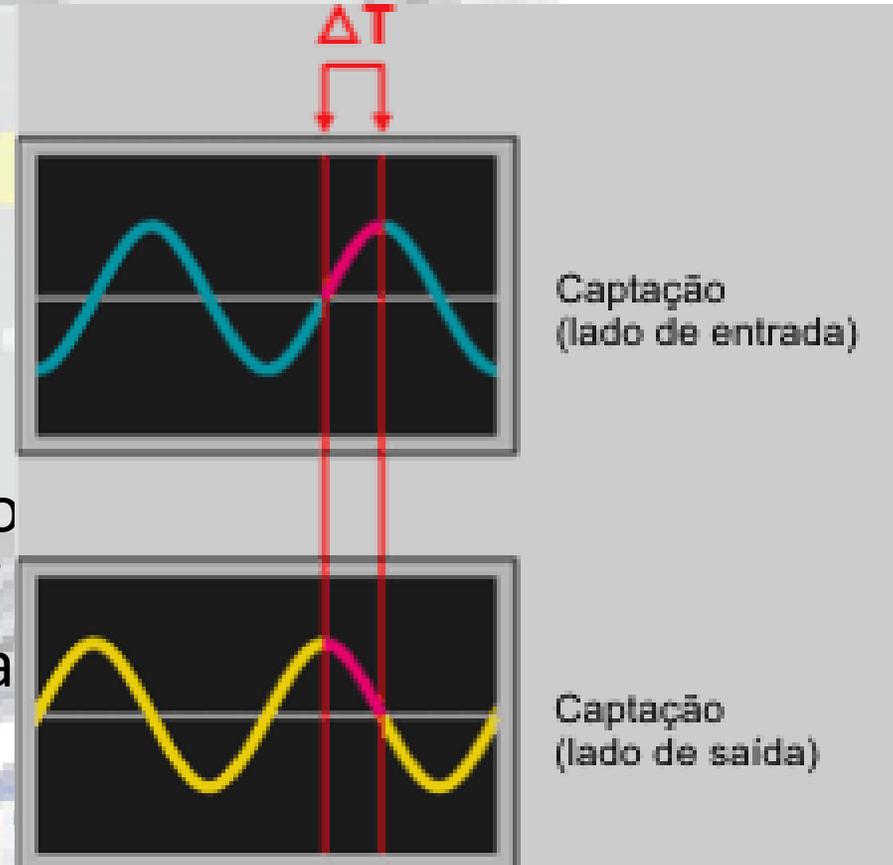
- Quando existe fluxo passando através dos tubos do sensor, as forças Coriolis são induzidas nos lados de entrada e saída dos dois tubos de fluxo. Estas forças geram uma torção nos tubos de fluxo um em oposição ao outro.
- O fluxo que passa através dos tubos do lado de entrada do medidor gera uma força Coriolis que resiste à vibração nos tubos de fluxo. Conforme o fluxo se desloca através dos tubos do lado de saída, a força de Coriolis acrescenta vibração aos tubos de fluxo. É a direção oposta da força de Coriolis entre os lados de entrada e saída que resulta no movimento de torção usado para medir a vazão mássica.



# Medidor por Efeito Coriolis

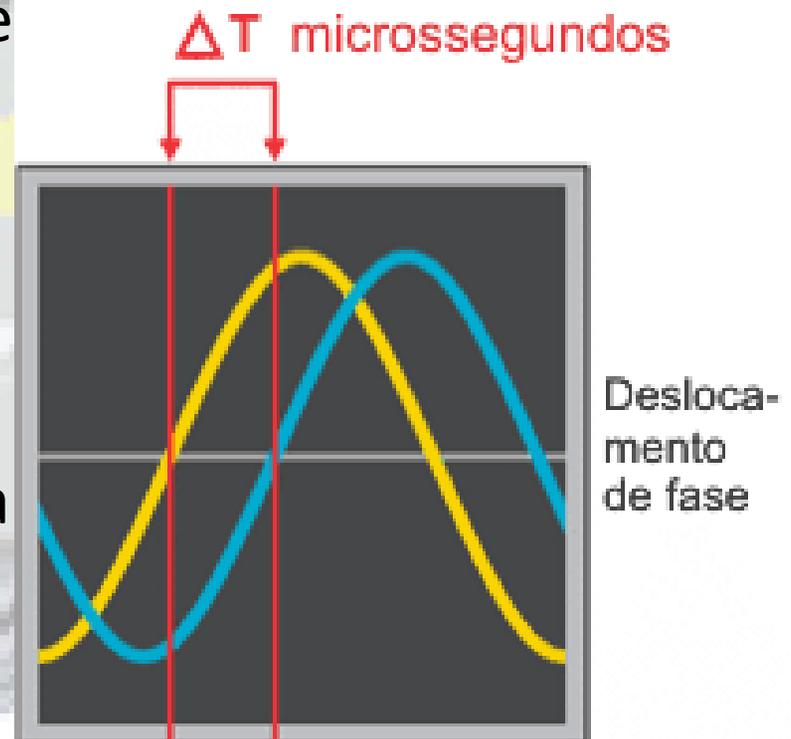
Como resultado da torção dos tubos de fluxo, as ondas senoidais geradas pelas bobinas captoras, agora estão fora de fase.

O tempo de atraso entre as duas ondas senoidais é medido em microssegundos e é chamado Delta-T. Delta-T é sempre diretamente proporcional à vazão mássica - quanto maior o Delta-T criado pela força Coriolis, maior a vazão mássica.



# Medidor por Efeito Coriolis

O fator de calibração do fluxo contém dois componentes principais. A primeira componente é a constante de proporcionalidade entre o fluxo de massa e o Delta-T medido. O segundo componente é uma constante usada para compensar automaticamente as alterações de temperatura dos tubos de fluxo. Como a temperatura do fluido afeta a rigidez do material do tubo, essa constante é utilizada em cálculos internos para realizar a compensação, mantendo com isso a precisão da medição.



# Medidor por Efeito Coriolis

Um exemplo de fator de calibração de fluxo para um sensor Micro Motion ELITE seria: 4.27454.75

Os primeiros cinco dígitos (4.2745) são a constante de proporcionalidade. Cada sensor tem um fator de calibração exclusivo.

Os últimos três dígitos (4.75) são um coeficiente de temperatura do material do tubo do sensor.

Esse coeficiente compensa o efeito da temperatura na rigidez do tubo.

Dados 5 microssegundos Delta-T  
 $5 \times 4.2745 = 21.3725$  gramas/segundo de fluxo

# Medidor por Efeito Coriolis

Dependendo da densidade do produto a frequência de oscilação varia. Assim medindo a frequência de ressonância dos tubos, sabemos a densidade do meio.

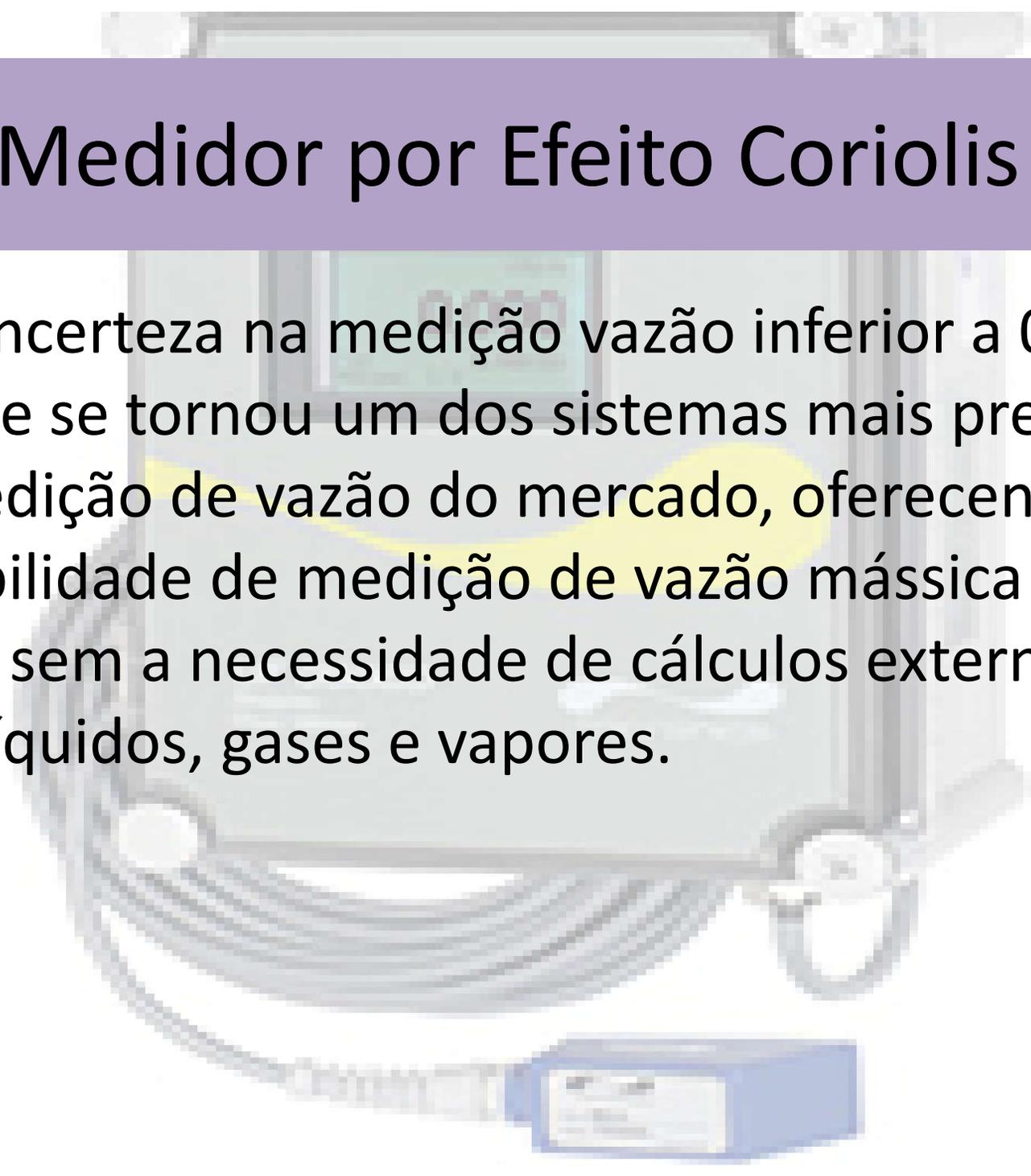


# Medidor por Efeito Coriolis



# Medidor por Efeito Coriolis

Com incerteza na medição vazão inferior a 0,1 %, esse se tornou um dos sistemas mais precisos de medição de vazão do mercado, oferecendo a possibilidade de medição de vazão mássica direta sem a necessidade de cálculos externos para líquidos, gases e vapores.



# Medidores Ultrassônicos

- Os medidores de vazão que usam a velocidade do som como meio auxiliar de medição podem ser divididos em dois tipos principais:
  - Medidores a efeito doppler
  - Medidores de tempo de trânsito.
- Podem ter transdutores presos à superfície externa da tubulação, ou transdutores em contato direto com o fluido.
- Os transdutores-emissores de ultrassons consistem em cristais piezoelétricos que são usados como fonte de ultrassom, para enviar sinais acústicos que passam no fluido, antes de atingir os sensores correspondentes.

# Medidores Ultrassônicos

## Medidores de efeito Doppler

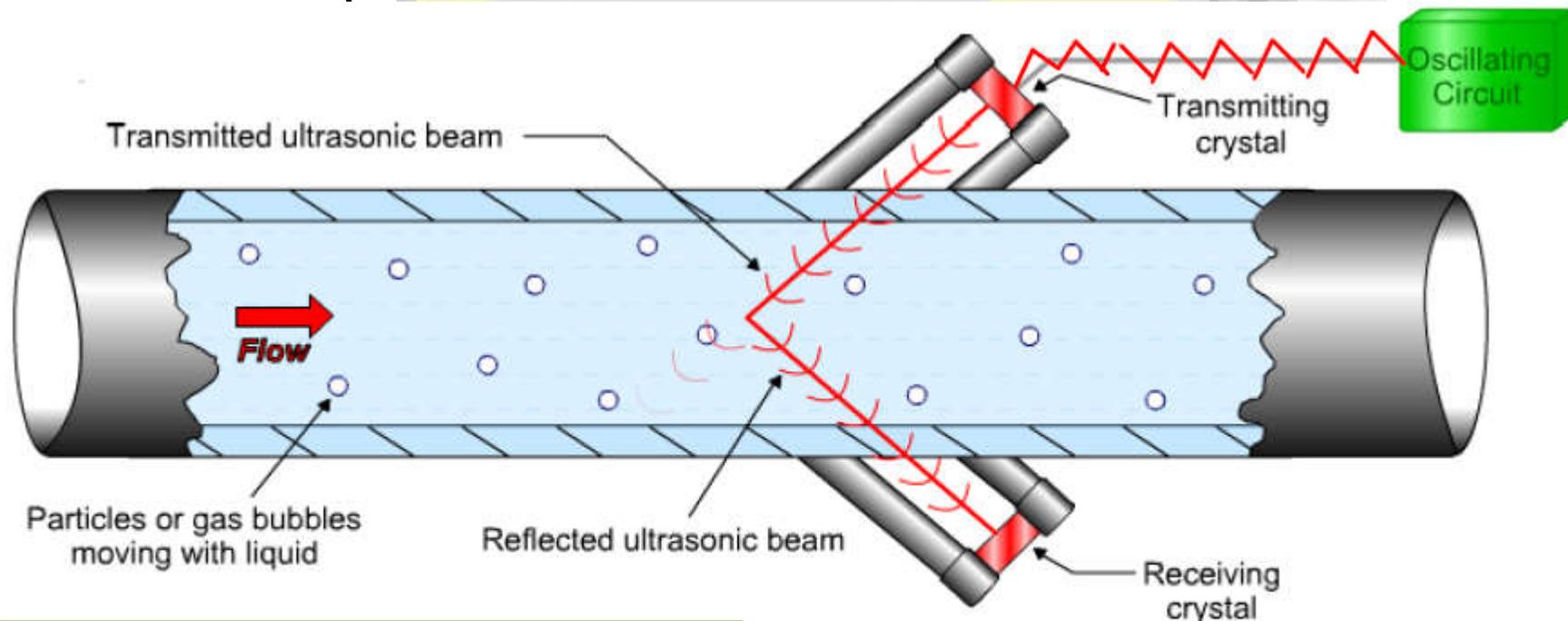
- O efeito Doppler é aparente variação de frequência produzida pelo movimento relativo de um emissor e de um receptor de som. No caso, esta variação de frequência ocorre quando as ondas são refletidas pelas partículas móveis do fluido.

# Medidores Ultrassônicos

- Os transdutores-emissores projetam um feixe contínuo de ultrassom na faixa das centenas de khz. Os ultrassons **refletidos por partículas** veiculadas pelo fluido têm sua frequência alterada proporcionalmente ao componente da velocidade das partículas na direção do feixe.
- Estes instrumentos são conseqüentemente adequados para medir vazão de fluidos **que contêm partículas capazes de refletir ondas acústicas.**

# Medidores Ultrassônicos

- O sensor ultrassônico é um sensor não invasivo, localizado na parte externa da tubulação e sem contato com o fluido.



$$v = \lambda f$$

Onde  $v$  é a velocidade do som no meio.

$$V = \frac{\Delta f \cdot v}{2 \cdot f_1 \cdot \cos \theta}$$

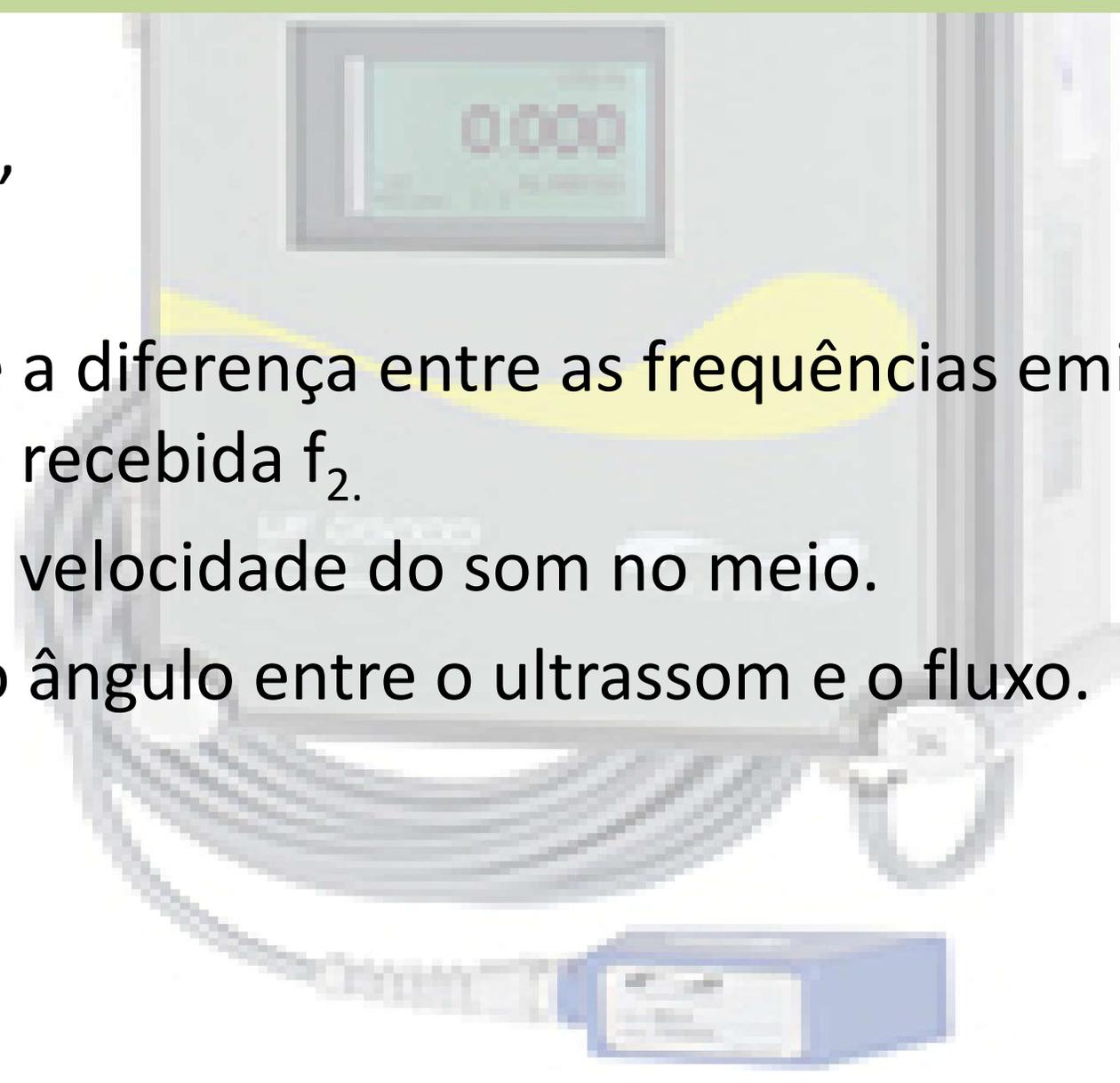
# Medidores Ultrassônicos

Onde ,

$\Delta f$  é a diferença entre as frequências emitida  $f_1$  e recebida  $f_2$ .

$v$  é a velocidade do som no meio.

$\theta$  é o ângulo entre o ultrassom e o fluxo.



# Medidores Ultrassônicos

- Este medidor propaga ondas sonoras no interior do fluido **através** das paredes da tubulação. Quando as ondas sonoras são refletidas por partículas em movimento, a frequência é deslocada devido ao fenômeno conhecido como efeito Doppler.
- As paredes do tubo permitem a propagação de boa parte do ultrassom e refletem outra parte destas ondas devido a sua impedância acústica mas esta reflexão é menor do que a que ocorre na partícula cuja impedância acústica é diferente. É claro que a composição do tubo e da partícula influenciam com esse medidor e detalhes da sua relação deve ser especificado pelo fabricante.

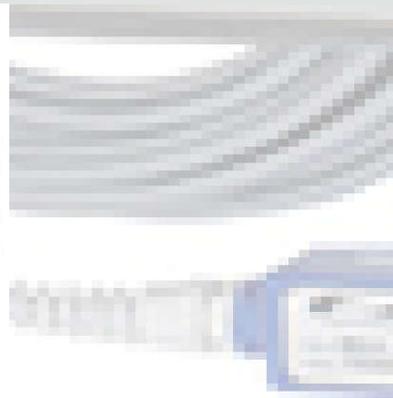
# Medidores Ultrassônicos



# Medidores Ultrassônicos

## Medidores de Tempo de Trânsito

Para que a medição seja possível, os medidores de tempo de trânsito devem medir vazão de fluídos relativamente limpos (sem partículas).



# Medidores Ultrassônicos

Um sinal acústico (ultrassom) é transmitido de um sensor a outro e baseia-se no tempo de trânsito de sinais no meio.

Este pode ser tanto na direção do fluxo, quanto contrário ao fluxo. De acordo com princípio físico, o sinal enviado na direção do fluxo requer menos tempo de trânsito que o sinal enviado contra o fluxo. **A diferença entre os tempos de trânsito contra e a favor do fluxo é proporcional à velocidade do fluido.**

# Medidores Ultrassônicos

$$V \approx \Delta t \quad V = \frac{L}{2 \cdot \cos \theta} \cdot \frac{t_{B-A} - t_{A-B}}$$

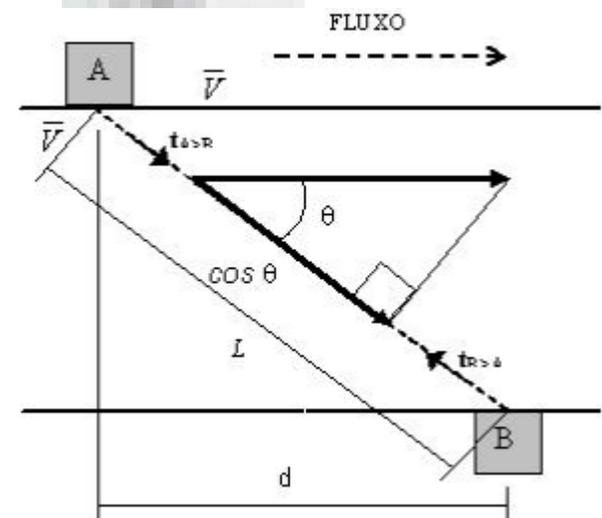
$$Q = V \cdot A$$

$V$  = velocidade do fluido

$\Delta t$  = diferença de tempo de trânsito

$Q$  = fluxo volumétrico

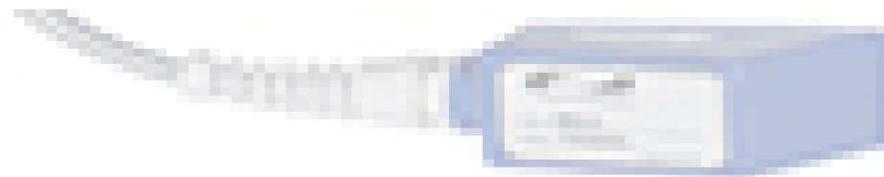
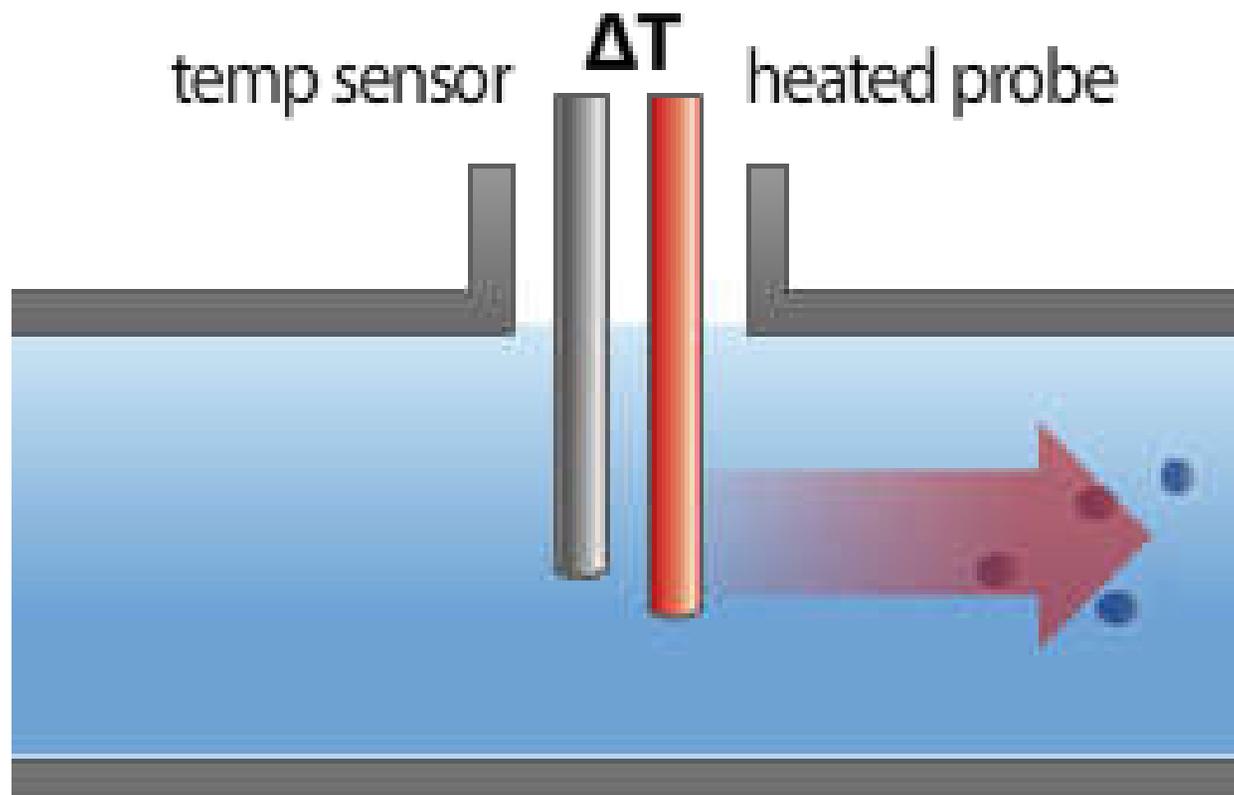
$A$  = seção cruzada do tubo.



# Medidores de Vazão por Temperatura

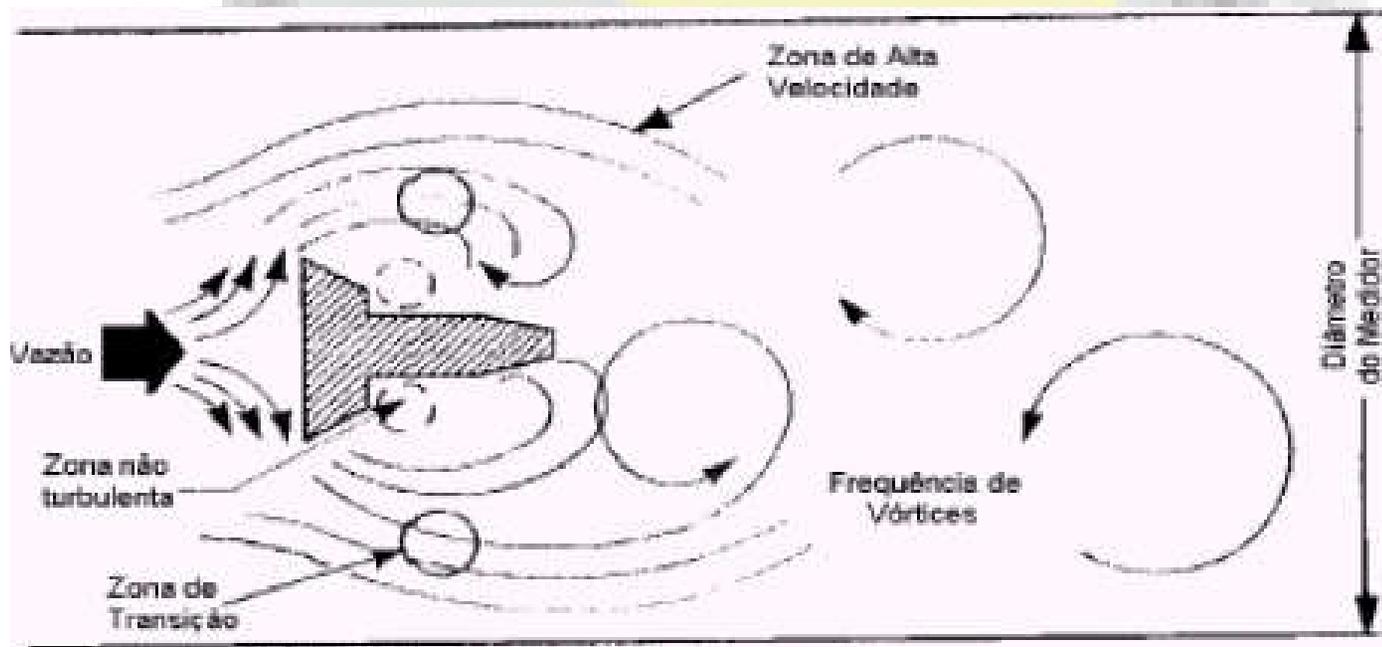
- O fluido, passa por um sensor de temperatura do tipo PT100 e um aquecedor com sensor de temperatura também PT100. Este último é mantido a uma temperatura diferencial (relativa a temperatura atual do fluido medida no primeiro PT100) variando a corrente sobre ele.
- Quanto maior o fluxo passando sobre o sensor aquecido, maior é a corrente exigida para manter constante a diferença de temperatura. A corrente do sensor com aquecedor é proporcional ao fluxo do fluido.

# Medidores de Vazão por Temperatura



# Medidores de Vazão Vortex

Quando fluídos fluem através de uma restrição introduzida no duto, vórtices são formados pelos lados.

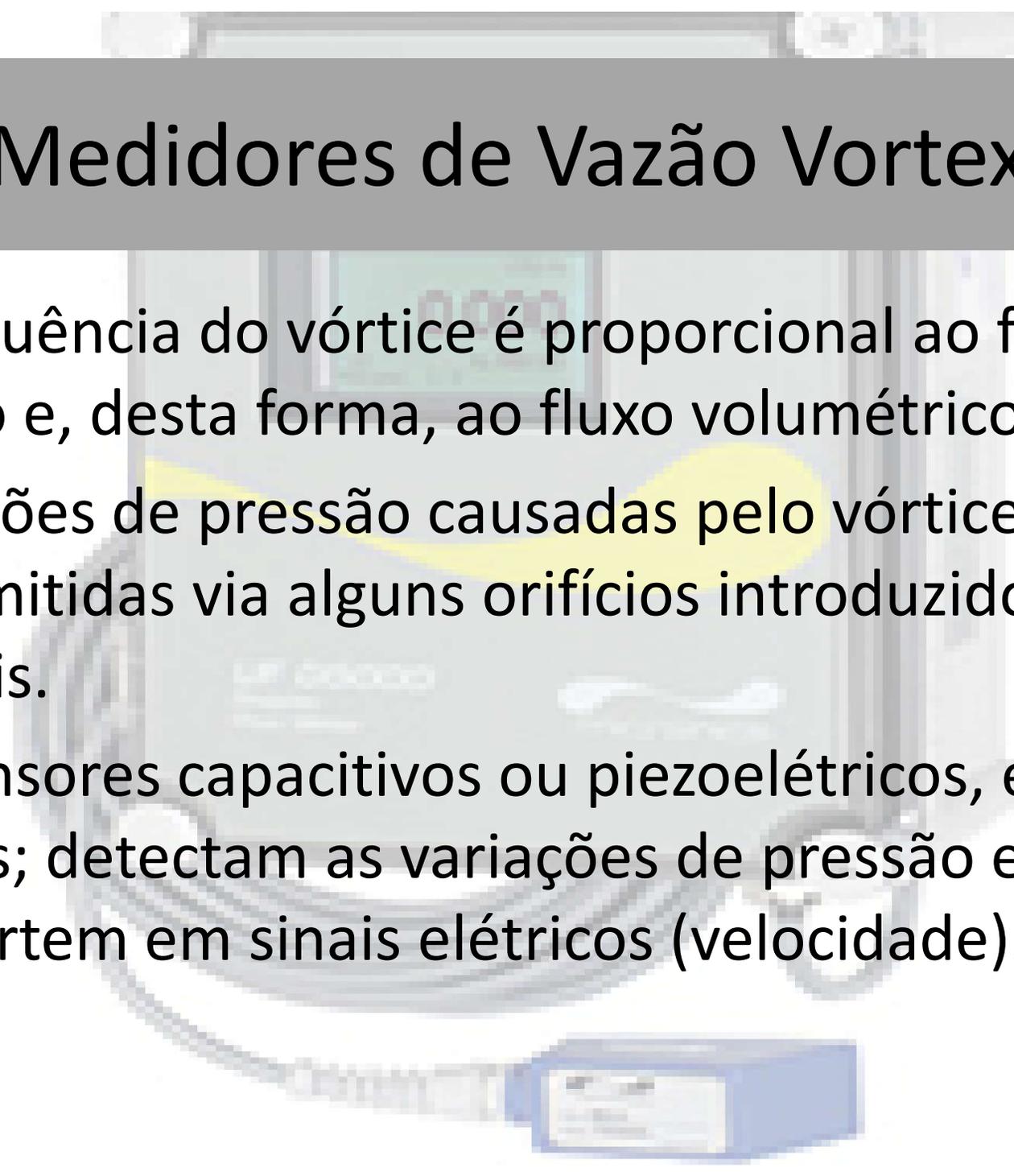


# Medidores de Vazão Vortex

A frequência do vórtice é proporcional ao fluxo médio e, desta forma, ao fluxo volumétrico.

Variações de pressão causadas pelo vórtices são transmitidas via alguns orifícios introduzidos nas laterais.

Os sensores capacitivos ou piezoelétricos, entre outros; detectam as variações de pressão e os convertem em sinais elétricos (velocidade).



# Medidores de Vazão Vortex

O número de Strouhal é determinado experimentalmente e geralmente permanece constante para uma vasta gama de números de Reynolds; que indica que a frequência de vórtices não será facilmente afetado por uma alteração na densidade do fluido.

**Num. Reynolds:** número usado cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. Depende do fluido, sua viscosidade e sua velocidade de escoamento.

$$f = \frac{Sr u}{d}$$

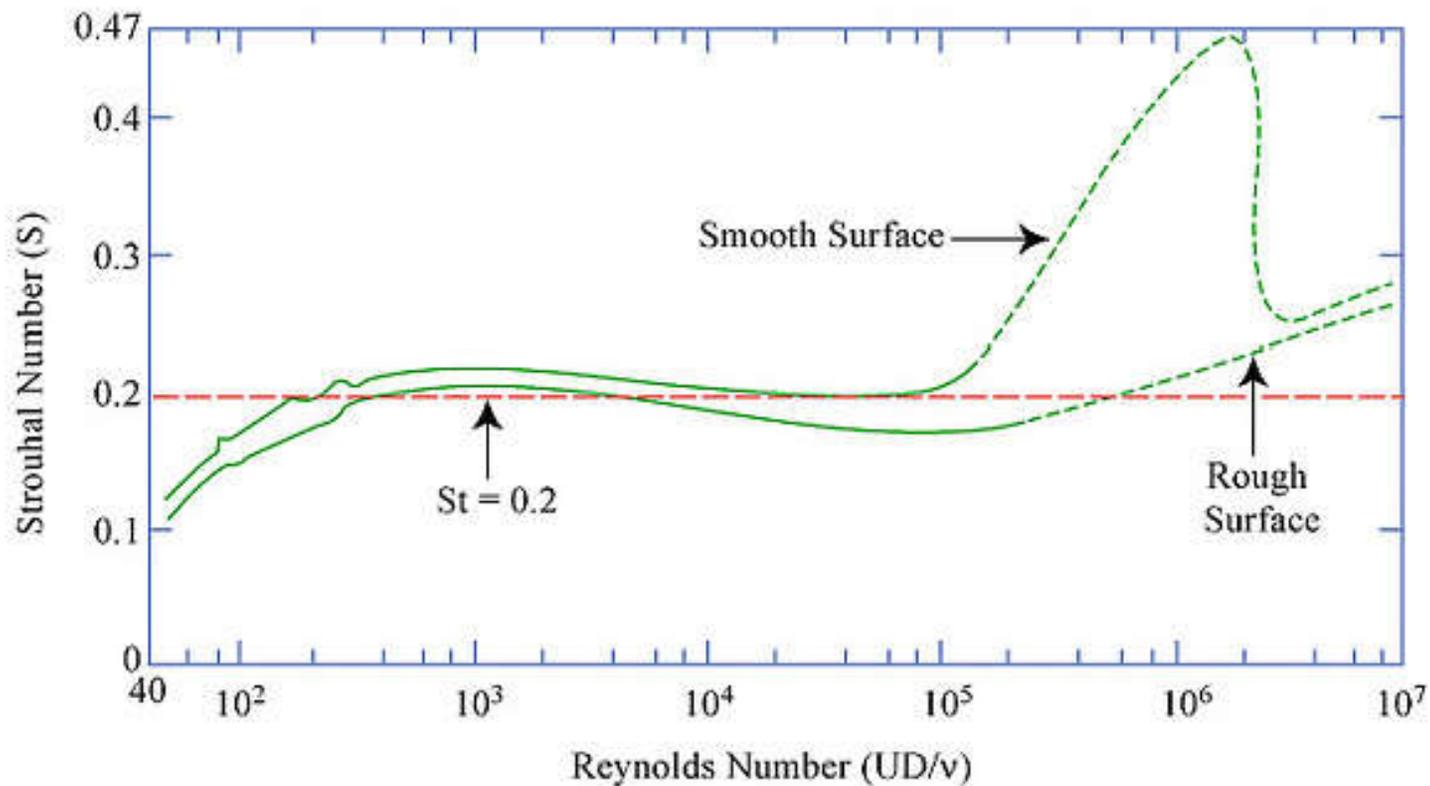
f = Frequência da transmissão (Hz)

Sr = número Strouhal (adimensional)

u = velocidade média de fluxo do tubo (m/s)

d = diâmetro do corpo (m)

# Medidores de Vazão Vortex



Relationship between Strouhal number and Reynolds number for circular cylinders. Data from Lienhard (1966) and Achenbach and Heinecke (1981).  $S \sim 0.21 (1 - 21/Re)$  for  $40 < Re < 200$ , from Roshko (1955).

# Medidores de Vazão Vortex

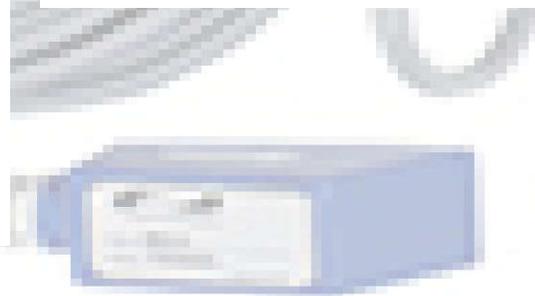
Uma vez obtida a frequência pela medição, multiplica-se pela área do tubo medidor para se obter a vazão volumétrica:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot f \cdot d}{4 \cdot Sr}$$

Q=vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s)

D=diâmetro do tubo

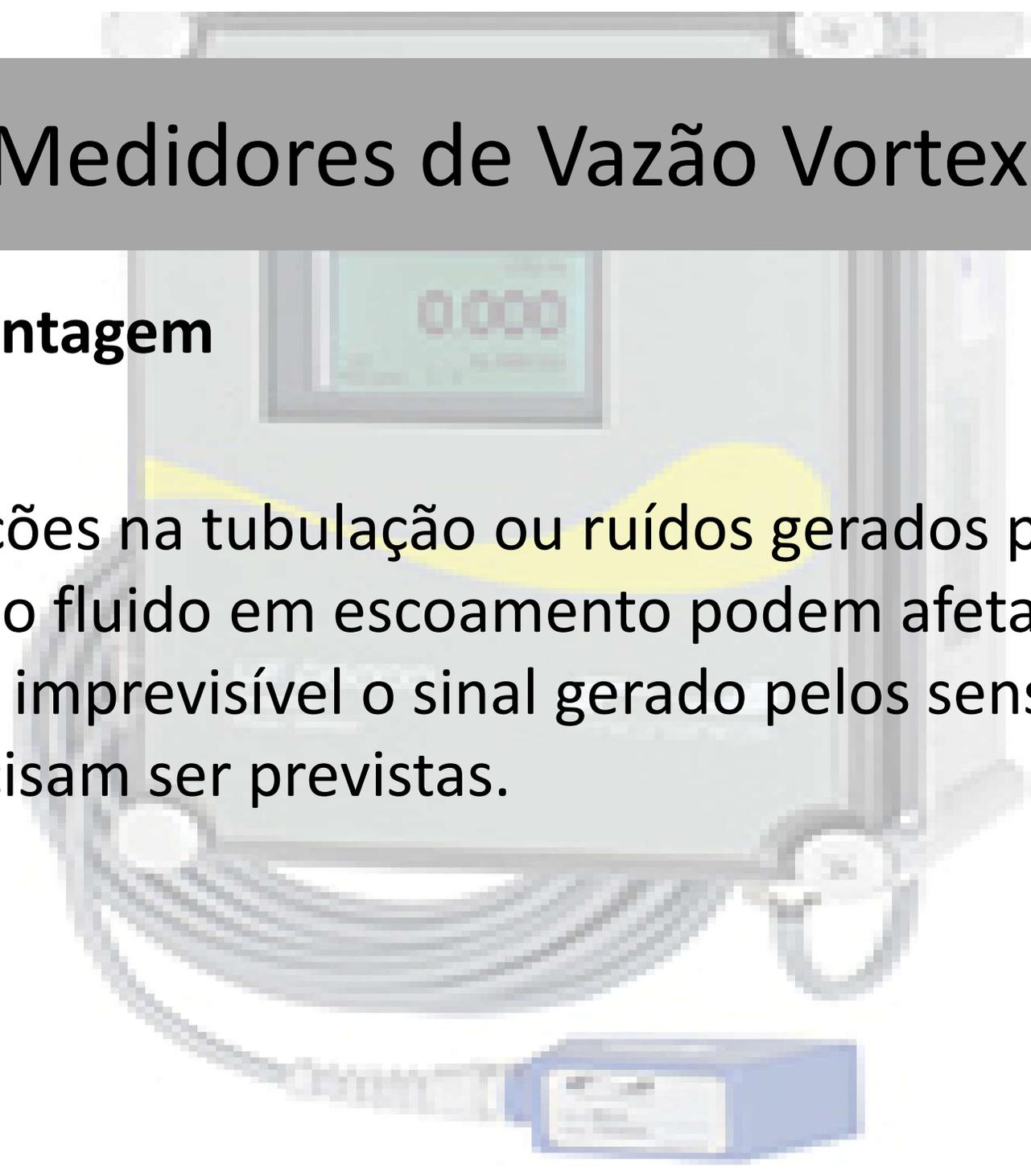
# Medidores de Vazão Vortex



# Medidores de Vazão Vortex

## Desvantagem

Vibrações na tubulação ou ruídos gerados pelo próprio fluido em escoamento podem afetar de forma imprevisível o sinal gerado pelos sensores e precisam ser previstas.



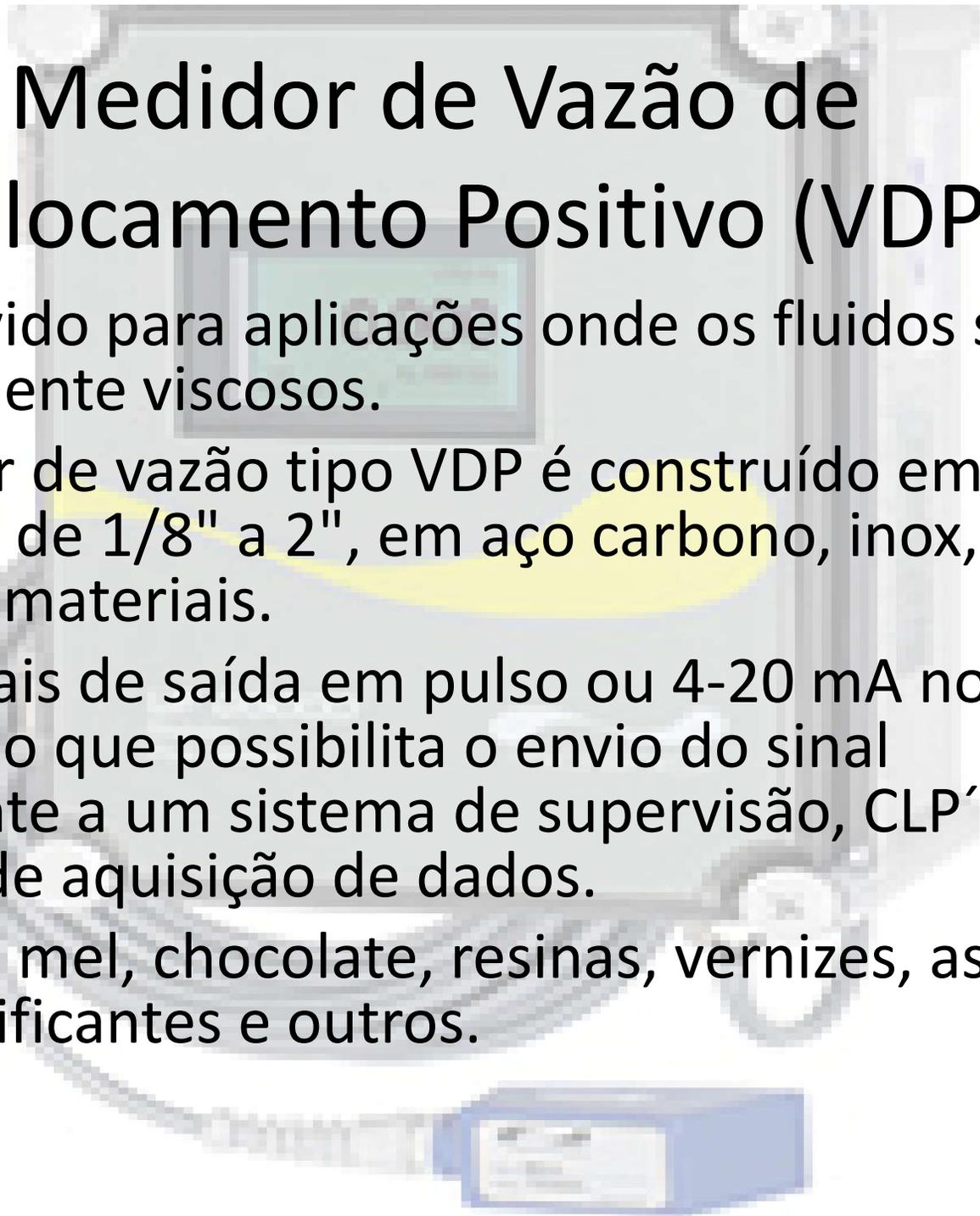
# Medidor de Vazão de Deslocamento Positivo (VDP)

Desenvolvido para aplicações onde os fluidos são extremamente viscosos.

O medidor de vazão tipo VDP é construído em diâmetros de 1/8" a 2", em aço carbono, inox, latão ou outros materiais.

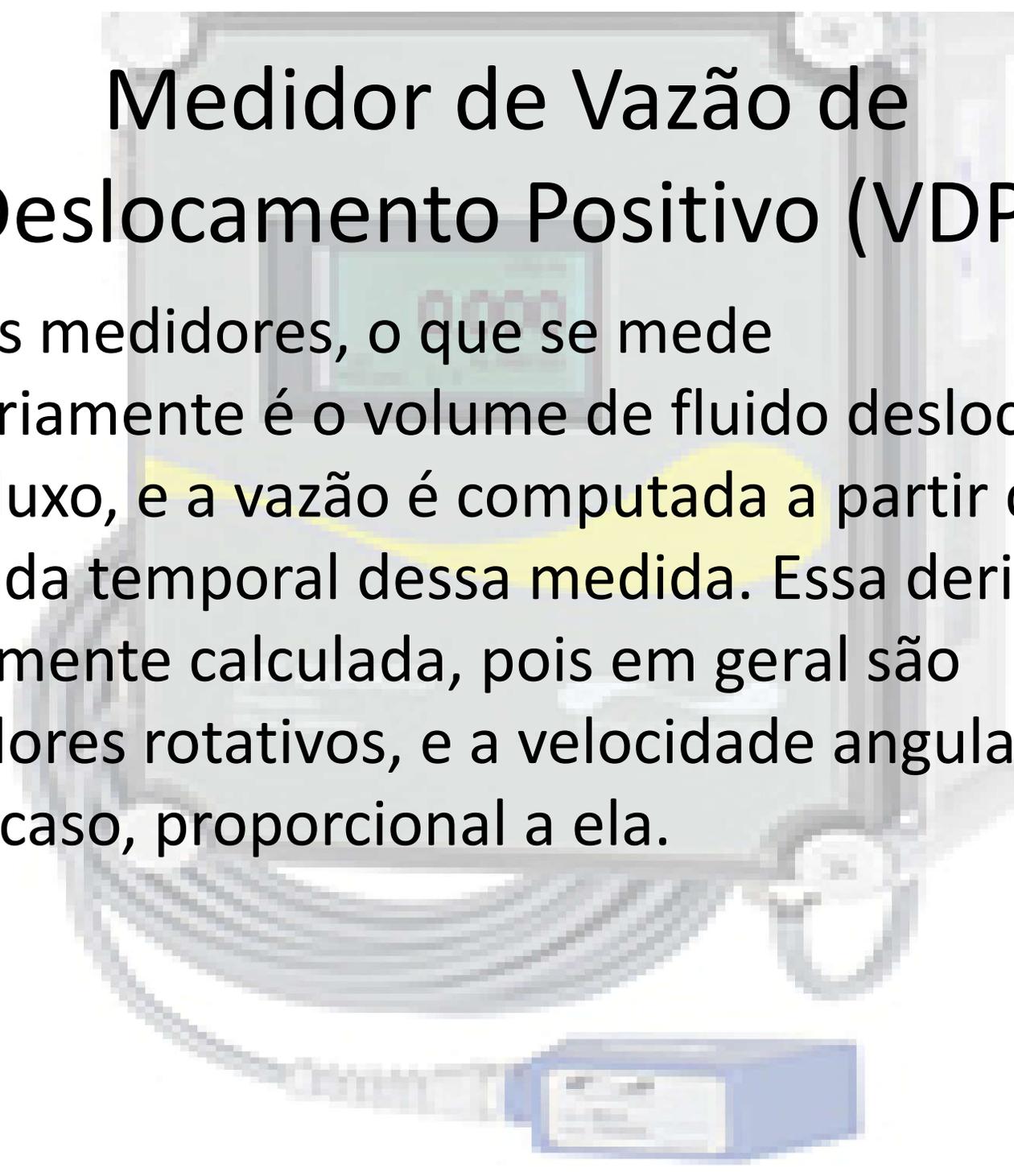
Possui sinais de saída em pulso ou 4-20 mA no cabeçote, o que possibilita o envio do sinal diretamente a um sistema de supervisão, CLP's, módulos de aquisição de dados.

Aplicação: mel, chocolate, resinas, vernizes, asfalto, óleos lubrificantes e outros.



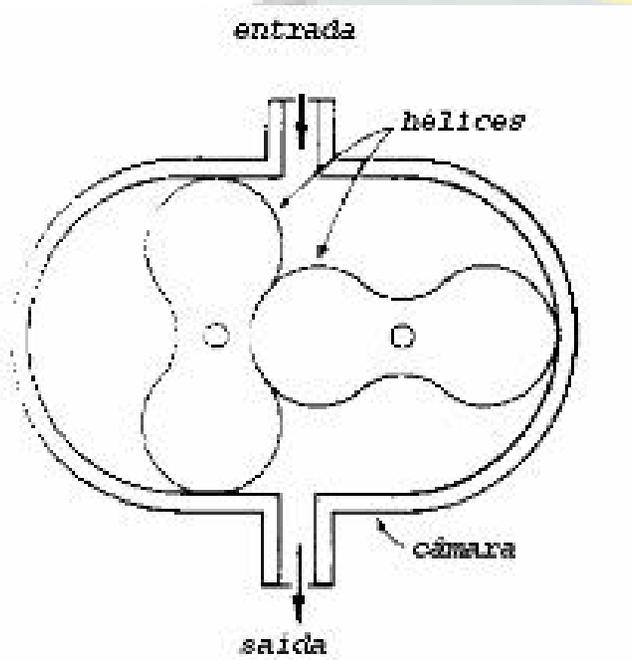
# Medidor de Vazão de Deslocamento Positivo (VDP)

Nesses medidores, o que se mede primariamente é o volume de fluido deslocado pelo fluxo, e a vazão é computada a partir da derivada temporal dessa medida. Essa derivada é facilmente calculada, pois em geral são medidores rotativos, e a velocidade angular é, neste caso, proporcional a ela.

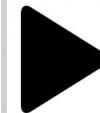
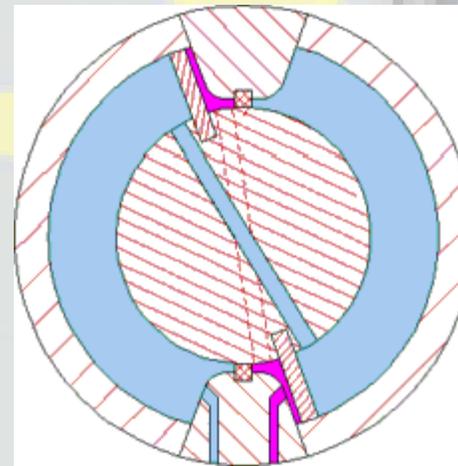


# Medidor de Vazão de Deslocamento Positivo (VDP)

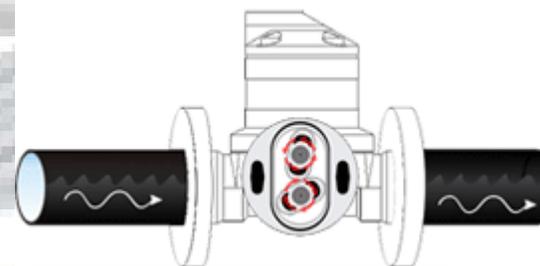
O próprio fluxo move o medidor de forma que, a cada momento, o fluido penetra em uma câmara diferente.



Medidor de Lóbulos Rotativos



Medidor de Diafragma



# Medidor de Vazão de Deslocamento Positivo (VDP)

No **medidor de diafragma**, usado para gases a baixa pressão (como o gás doméstico, por exemplo), o fluido é forçado a entrar numa câmara cujo volume é conhecido, através de uma válvula de distribuição; a câmara tem a saída bloqueada nesse instante, por isso o gás que ingressa a infla; quando a câmara se enche, a válvula de distribuição se move e direciona o fluxo para outra câmara vazia, ao mesmo tempo que a saída da primeira câmara se abre; esta segunda câmara, ao receber o gás, infla e pressiona as laterais a primeira câmara, fazendo com que o ar no interior desta seja expelido para o exterior; o processo continua indefinidamente.

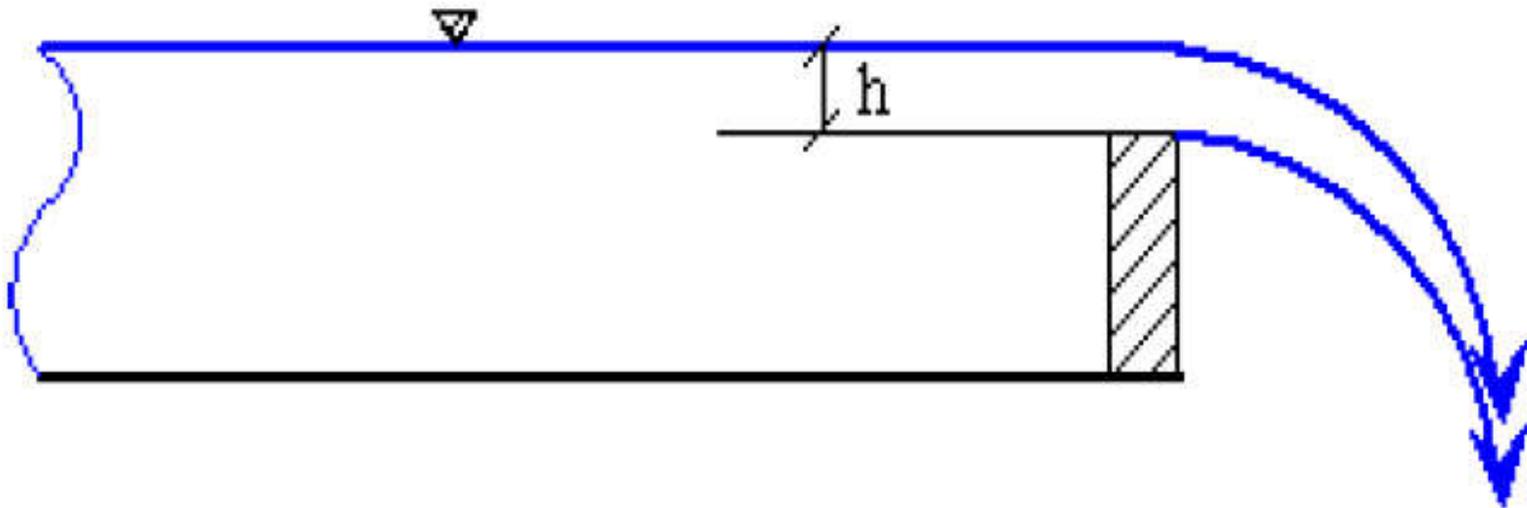
No **medidor de lóbulos rotativos** o movimento rotativo causado pelo fluido ou oscilante pode acionar um mecanismo simples de engrenagens e ponteiros ou dispositivos eletrônicos nos mais sofisticados.

# Medidor de Vazão de Deslocamento Positivo (VDP)



# Fluxômetros de Canal Aberto

Um método comum de medição do fluxo através de um canal aberto é medir a altura do líquido à medida que passa sobre uma obstrução como uma calha ou barragem no canal.



# Fluxômetros de Canal Aberto

## Calha de Parshall

A vazão é medida de acordo com o nível de líquido na Calha Parshall, podendo ser observado pela régua graduada fixada internamente ao equipamento.

## Instalação

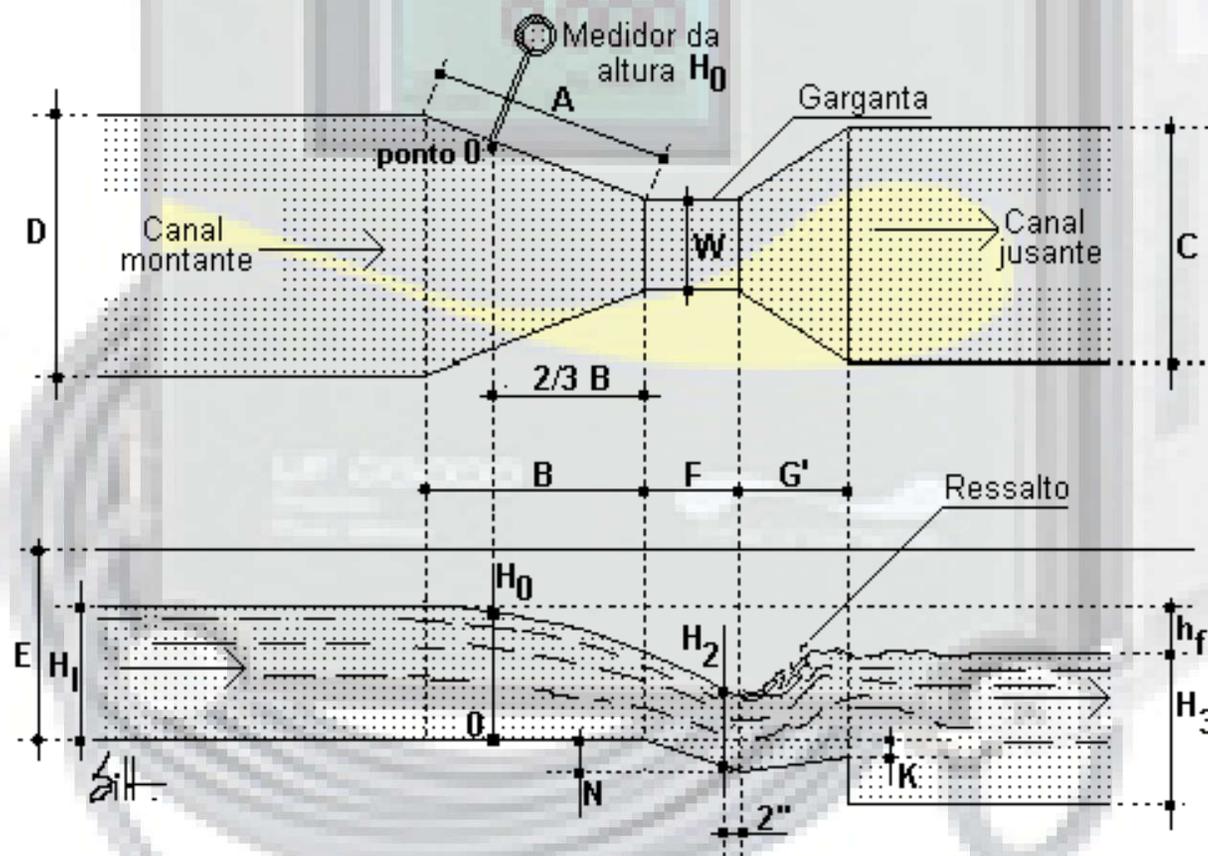
A calha deve ser acomodada em caixa de concreto nivelada, posicionada conforme o projeto.

# Fluxômetros de Canal Aberto

A base horizontal da calha constitui um nível de referência para o nível de água a montante. Muitas vezes mede-se a altura da água num ponto situado a  $2/3$  do canal de aproximação da garganta, tendo-se estabelecido empiricamente a seguinte relação entre o nível de água no **ponto 0** e a vazão na seção:

$$Q = 2,2. W. H_0^{3/2}, \text{ (Q em m}^3\text{/s)}$$

# Fluxômetros de Canal Aberto



ESQUEMA DE UMA CALHA PARSHALL CONVENCIONAL

# Fluxômetros de Canal Aberto



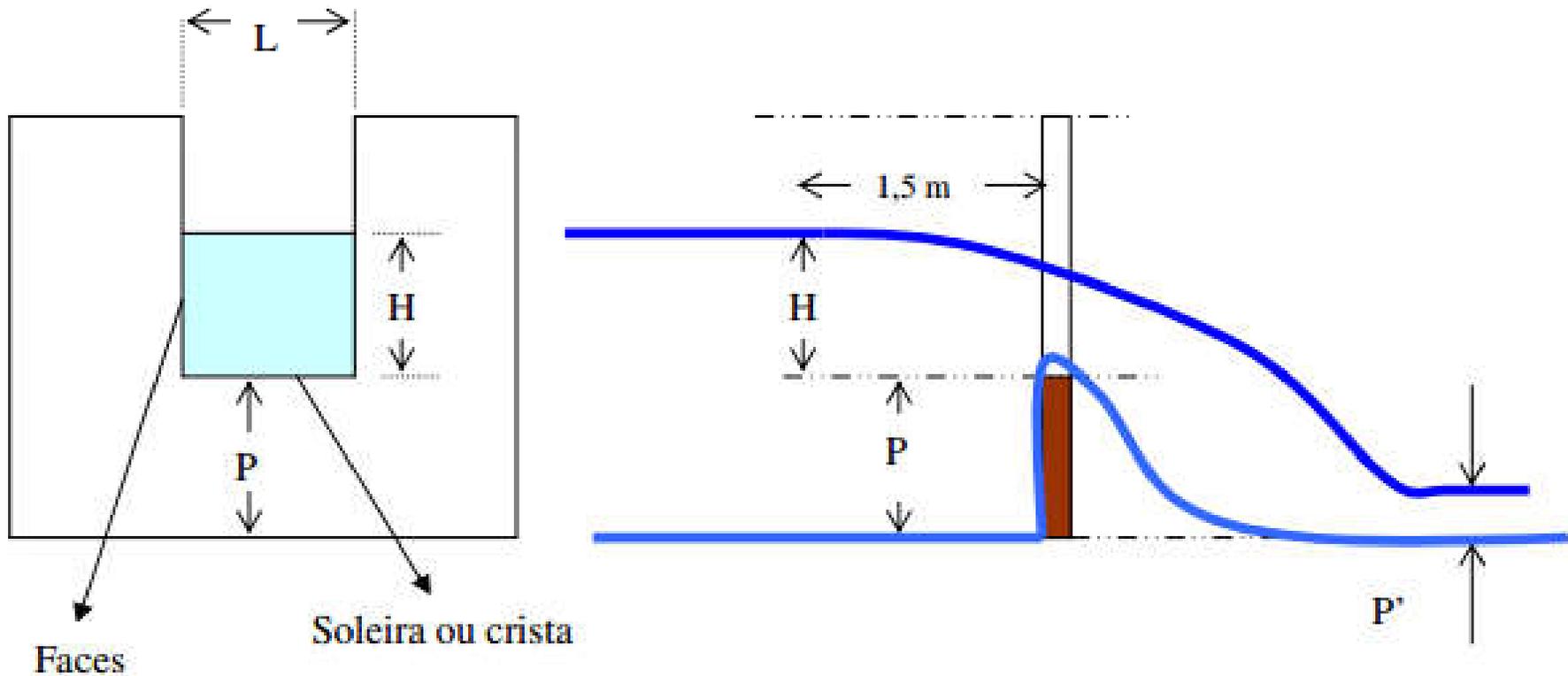
# Fluxômetros de Canal Aberto

## Vertedouros

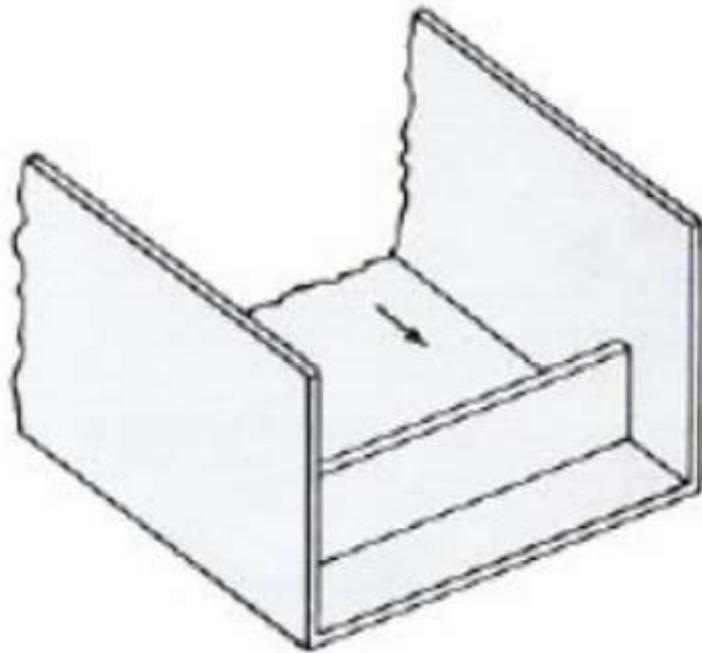
São aberturas ou entalhes na parte superior de uma parede, através dos quais o líquido escoava. Sua principal utilização é na medição de vazão das canalizações abertas e no controle do escoamento em galerias e canais.

Para cada faixa de vazão deve-se adotar um tipo de vertedor, com o seu formato e equação específica. Podem ser retangulares ou triangulares

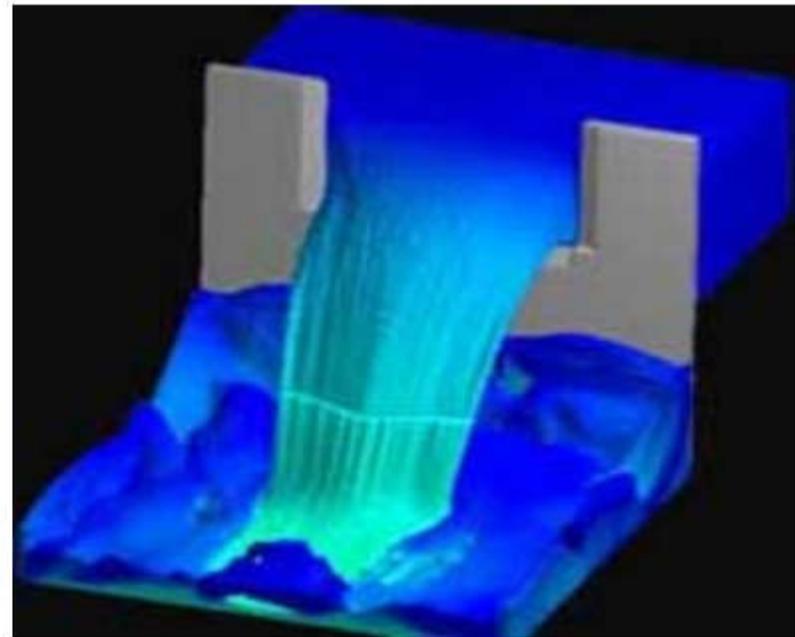
# Fluxômetros de Canal Aberto



# Fluxômetros de Canal Aberto



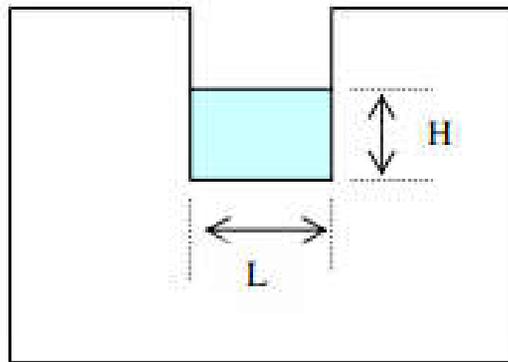
**Vertedor sem  
contrações laterais**



**Vertedor retangular  
com duas contrações  
laterais**



# Fluxômetros de Canal Aberto



$$Q = 1,84 \cdot L \cdot H^{3/2}$$

(Q = m<sup>3</sup>/s ; H = m ; L = m)

Para  $C_d$  médio de 0,62  
e sem contrações  
laterais

$$Q = \frac{2}{3} C_d l \sqrt{2g} \left[ \left( H + \alpha \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} - \left( \alpha \frac{v^2}{2g} \right) \right]^{3/2}$$

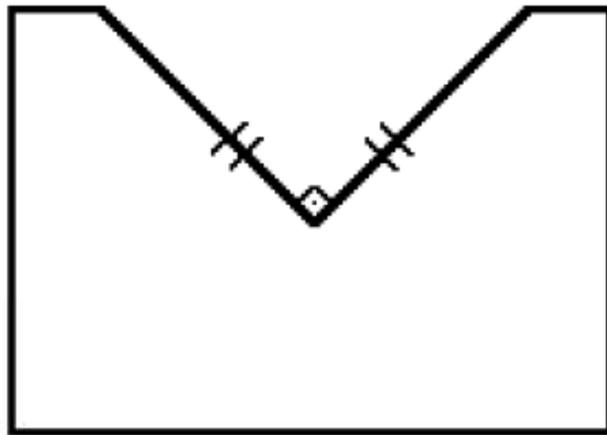
$C_d$  → Coeficiente de descarga do orifício

$\alpha$  → Coeficiente de Coriolis, em media vale 1,66.

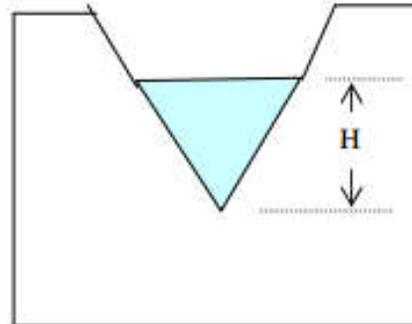
Com contrações laterais a fórmula reduzida fica:

$$Q = 1,838 \cdot (L - 0,2 \cdot H) \cdot H^{3/2}$$

# Fluxômetros de Canal Aberto



Considerando  $C_d$  médio de 0,62 e  $\theta = 90^\circ$



$$Q = 1,4 \cdot H^{5/2}$$

(  $Q = \text{m}^3/\text{s}$  ;  $H = \text{m}$  ;  $\theta = 90^\circ$  )



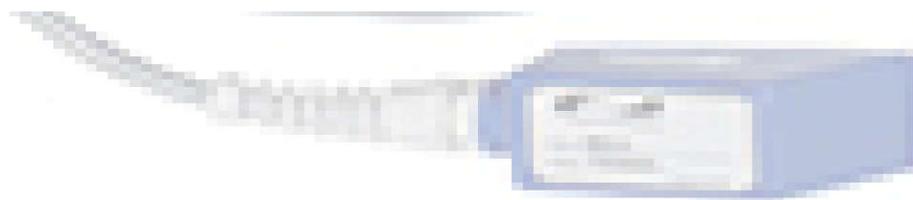
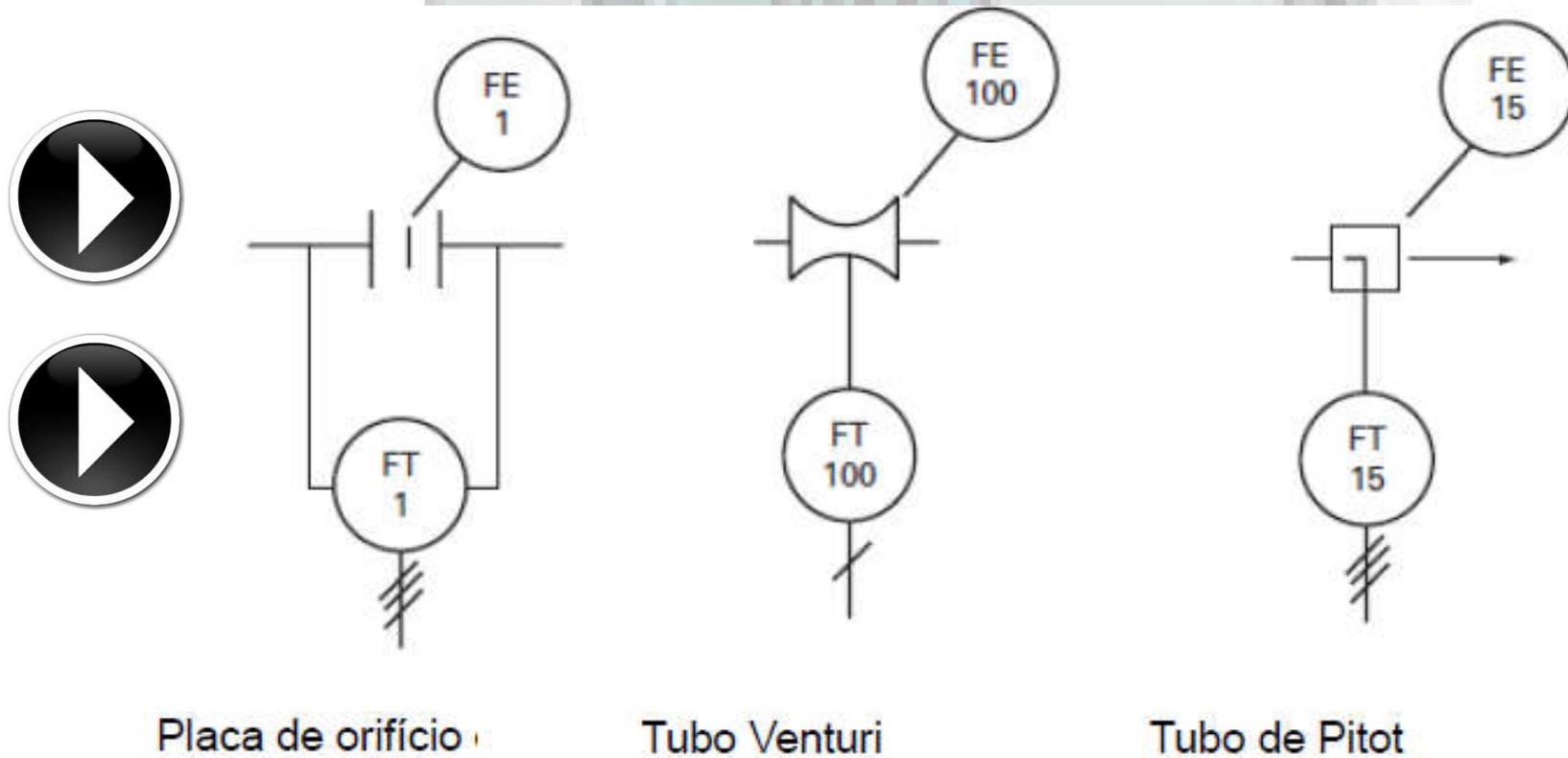
$$Q = \frac{8}{15} C_d \operatorname{tg} \left( \frac{\theta}{2} \right) \sqrt{2g} H^{5/2}$$

$C_d \rightarrow$  Coeficiente de descarga do orifício

# Fluxômetros de Canal Aberto

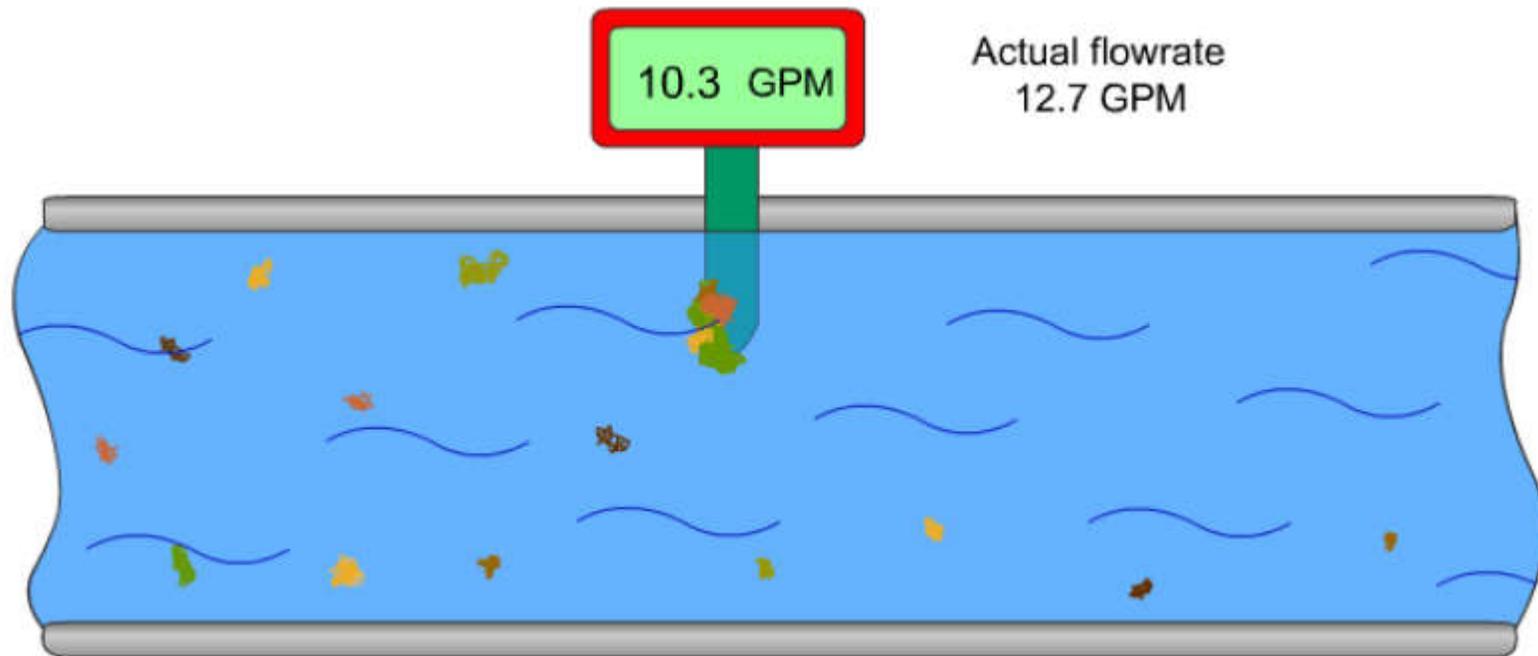


# Símbolos em Fluxogramas de Processo



# Observação

Deve-se observar que na medição de vazão **intrusiva** em líquidos sujos, as partículas podem se acumular e/ou danificar o sensor fazendo com que a medição se torne imprecisa.



# Observação

- Para determinar a aplicação correta de um medidor de vazão é necessário conhecer:
- As características do fluido;
- Instalação;
- Condições de operação.

