

A smiling man with glasses on his head, wearing a light purple shirt, is looking at a laptop screen in an office setting. The background is blurred, showing office furniture and a window.

Mini-curso - Vazão

ISA Poli

Presented by: Leandro Massaro

Sumário

- Por que medimos vazão?
- Introdução à mecânica dos fluidos
- Noções Básicas de Vazão
- Selecionando os medidores
- Medição de vazão por pressão diferencial
- Medidores tipo Magnético
- Medidores tipo Vortex
- Medidores tipo Coriolis
- Novidades em vazão
- Dúvidas?

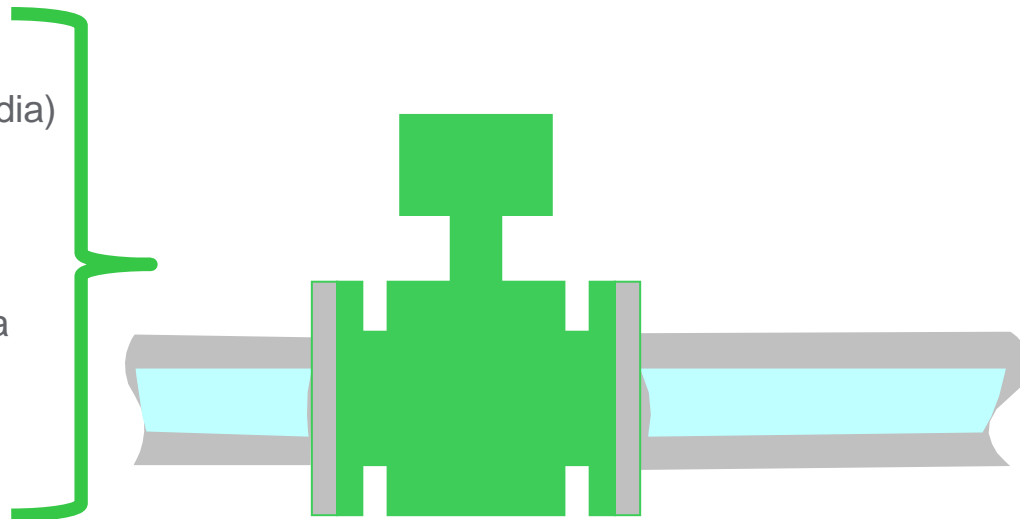
Por que medimos vazão?

Breve introdução

Por que medimos vazão?

Uma necessidade de controle

- Controlar um processo
- Taxação (transferência de custódia)
- Mistura de produtos
- Eficiência (balanço de massa)
- Alimentação de água de caldeira
- Alimentação de combustível
- Detecção de vazamento
- ...para listar alguns

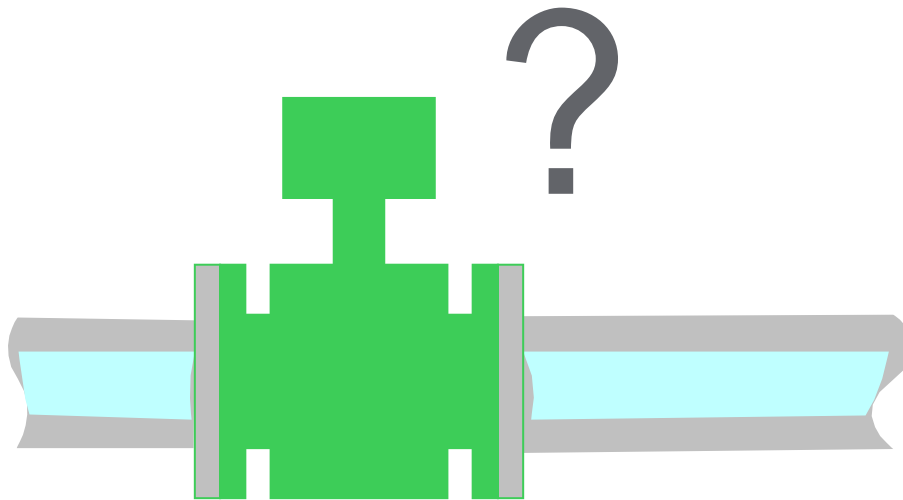


Responder perguntas do tipo “Quantos”. Quantos são usados e/ou como são produzidos, etc.?

Medição de Vazão – uma tarefa complexa

Com muitas perguntas iniciais você pode começar a seleção de um instrumento para uma aplicação

- Massa ou Volume?
- Viscosidade?
- Abrasivo?
- Corrosivo?
- Preço?
- Delta de Pressão?
- Trecho Reto?
- Exatidão?
- Densidade?
- Min / Max vazão?
- Dinâmica da medição?
- Perfil de Vazão?
- Dimensionamento Tubulação?
- Pressão?
- Temperatura?
- Condutividade?
- Líquido ou Gás?
- Etc.



2 nomes importantes da Foxboro

Que tiveram importância na medição de Vazão

- Leland K. Spink, publicou “Principles and Practice of Flow Meter Engineering”. Primeira Edição de Abril/1930.
 - Este livro é geralmente reconhecido com o primeiro, e que por muitos anos foi o único, guia do conhecimento para medição de vazão industrial. Após nove revisões, a última revisão foi impressa em 1978, 21 anos após a morte de Spink.
- Richard W. Miller, publicou “Flow Measurement Engineering Handbook”. Primeira Edição de Janeiro/1983.
 - Geralmente reconhecido como herdeiro de Spink, a segunda edição do livro de R.W. Miller tem mais de 1000 páginas e ainda é utilizado como uma referência no dimensionamento de placas de orifício, publicado em 1989.

A marca Foxboro é sinônimo de Medição ou Controle para processos de vazão.



Introdução à mecânica dos fluidos

Líquidos ou gases

Propriedades Básicas dos Fluidos

Viscosidade

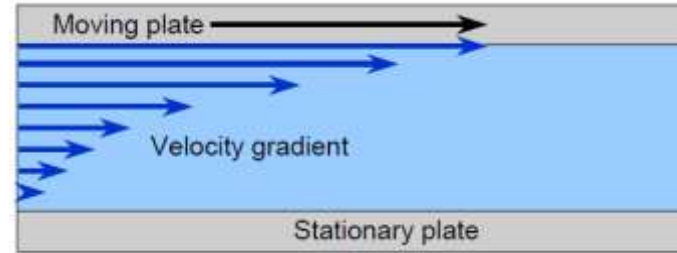
- Uma das mais importantes propriedades primárias dos fluidos (líquido ou gás) é a **viscosidade**.
- **Viscosidade**: é a resistência à vazão ou objetos passando pelo fluido.
- Conceitualmente, viscosidade pode ser entendida como a “espessura” de um fluido.
 - Em essência, viscosidade é uma força friccional interna entre as diferentes camadas do fluido quando essas passam uma sobre a outra. Em um líquido, esta força é devida às forças coesas entre as moléculas, enquanto que para gases, esta força provém das colisões das moléculas.
- Diferentes fluidos possuem diferentes viscosidades.

Fluid	Temperature (°C)	Viscosity μ (Pa.s)
Molasses	20	100
Glycerine	20	1.5
Engine oil (SAE 10)	30	0.2
Milk	20	5×10^{-3}
Blood	37	4×10^{-3}
Water	0	1.8×10^{-3}
Ethyl alcohol	20	1.2×10^{-3}
Water	20	1×10^{-3}
Water	100	0.3×10^{-3}
Air	20	0.018×10^{-3}
Water vapour	100	0.013×10^{-3}
Hydrogen	0	0.009×10^{-3}

Propriedades Básicas dos Fluidos

Viscosidade

- Se um fluido é referenciado como uma coleção de placas em movimento, uma sobre a outra, então quando uma força é aplicada sobre o fluido, um movimento ocorre e a viscosidade é a medição da resistência praticada pela camada entre placas adjacentes.
- A figura à direita apresenta uma camada fina do fluido entre duas chapas metálicas de área A . A placa inferior está parada e a superior em movimento com velocidade v . O fluido diretamente em contato com cada placa é mantido junto à superfície pela força adesiva entre as moléculas do fluido e aquelas da parede. Então, a superfície superior do fluido se move na mesma velocidade v que a placa superior, enquanto que o fluido em contato com a parte estacionária se mantém parado. Como a parte parada do fluido reduz a vazão da camada ligeiramente acima, esta camada também reduz a vazão da próxima camada, o que resulta na velocidade variando linearmente de 0 a v , como apresentado.



Atualmente, viscosidade é expressado como viscosidade absoluta ou dinâmica medida em Pascal-segundos (Pa.s).

Propriedades Básicas dos Fluidos

Viscosidade

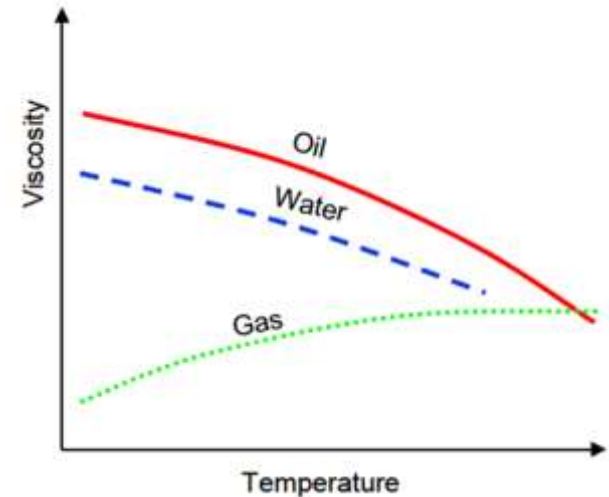
- A **viscosidade** de um fluido **depende muito da temperatura** e geralmente reduz com o aumento da temperatura. Gases, entretanto, apresentam comportamento oposto e a viscosidade aumenta com o aumento da temperatura.
- A **viscosidade** de um fluido também **depende da pressão**, mas, surpreendentemente, a pressão tem efeito menor na viscosidade de gases do que em líquidos.
- Viscosidade relacionada a densidade dos fluidos é chamada **viscosidade cinemática**. Viscosidade cinemática é dada por:

$$v = \mu / \rho$$

onde: v = viscosidade cinemática medida em m^2/s

μ = viscosidade dinâmica medida em Pa.s

ρ = densidade do líquido (kg/m^3)



Propriedades Básicas dos Fluidos

Número de Reynolds

- Um dos primeiros investigadores de vazão em fluidos foi Osborne Reynolds (1842-1912), que conduziu vários experimentos, utilizando o que é agora um instrumento de Reynolds. Este é um equipamento que injeta tinta em uma corrente de vazão.
- O número de Reynolds, Re , é um número adimensional dado por:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}$$

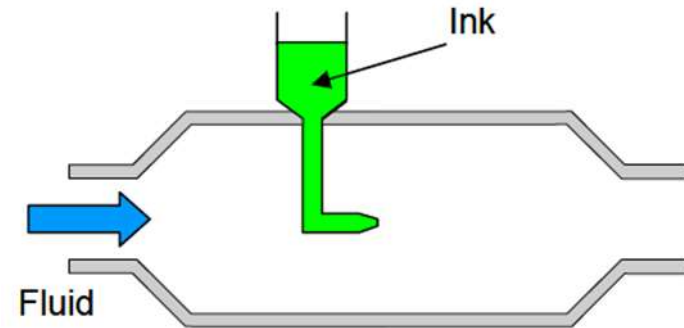
onde: ρ = densidade do fluido (kg/m^3)

μ = viscosidade do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

v = velocidade média (m/s)

d = diâmetro da tubulação (m)

O número de Reynolds define o estado do regime de vazão na tubulação



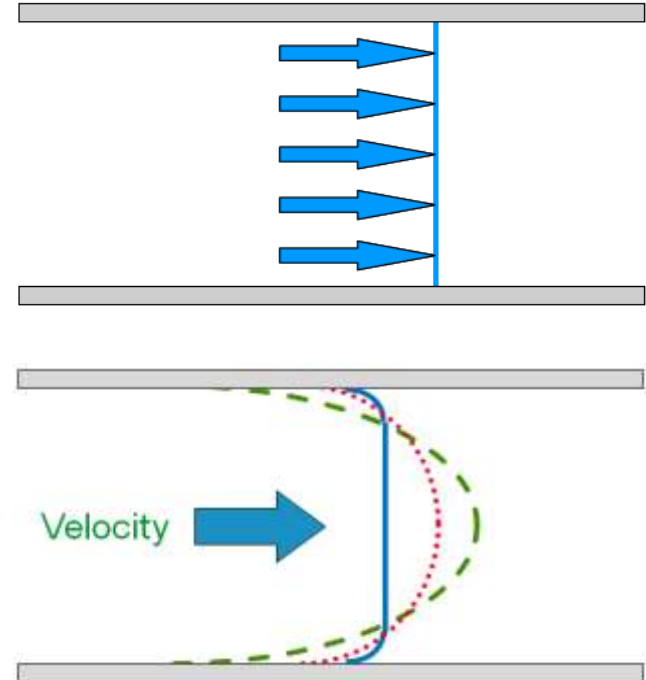
Propriedades Básicas dos Fluidos

Perfil de velocidade e regime de vazão

- Perfil de vazão ideal
 - Em uma tubulação sem atrito, em que não há retardo nas paredes, um perfil de velocidade ideal “flat” será observado (figura à direita), ou seja, as partículas do fluido se movem na mesma velocidade.

- Perfil de vazão típico (mundo real)
 - Com a mesma Velocidade do fluido (meio) há três números de Reynolds possíveis devido à viscosidade e densidade dos fluidos diferentes.

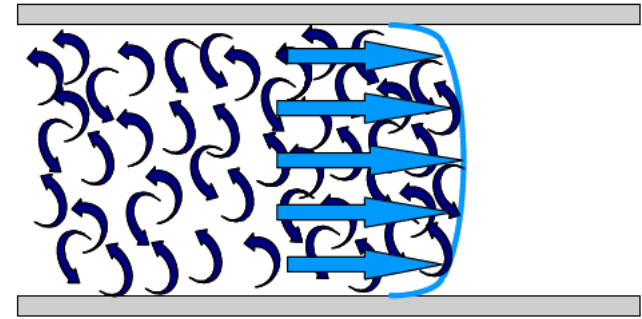
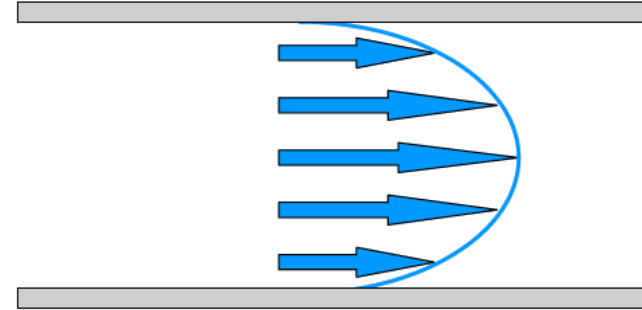
- Steam ($Re > 8000$)
- ⋯ Water ($Re > 2000$)
- - - Heavy Crude Oil ($Re < 2000$)



Propriedades Básicas dos Fluidos

Perfil de velocidade e regime de vazão

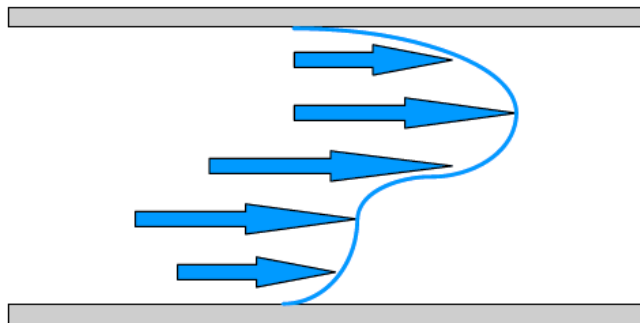
- Perfil Laminar, Número de Reynolds $Re < 2000$
 - Em vazões baixas, as partículas dos fluidos se movem em linhas retas de forma laminar, com cada camada fluindo lentamente através das outras camadas, sem misturas entre as partículas dos fluidos das várias camadas. Como resultado, a velocidade aumenta de zero, nas paredes, até o máximo valor, no centro da tubulação, e há um coeficiente de vazão através da tubulação. O perfil de um escoamento laminar bem desenvolvido é uma parábola com velocidade no centro igual a duas vezes a média da vazão.
- Perfil Turbulento, Número de Reynolds $Re > 8000$
 - Para uma tubulação e uma vazão dadas, conforme a velocidade aumenta, os caminhos laminares começam a se misturar de maneira desordenada até uma mistura completa.



Propriedades Básicas dos Fluidos

Perfis de vazão com distúrbio

- Obstruções em tubulação, como curvas, cotovelos, reduções, expansões, restrições, válvulas de controle e tês, podem alterar o perfil de vazão de uma maneira que afeta severamente a exatidão da medição.
- Vazões distorcidas como esta, que não devem ser confundidas com vazões turbulentas, fazem surgir vários efeitos, entre eles: Redemoinhos, Vórtices, Perfil Assimétrico (veja figura), perfil simétrico com velocidade intensa em um ponto, etc.
- Por fim, o perfil de velocidade será reestabelecido pela ação natural de mistura das partículas fluídas conforme o fluido avança na tubulação. Entretanto, o efeito destes distúrbios podem ter impactos na exatidão dos instrumentos em até 40 diâmetros a jusante. A figura à direita apresenta os distúrbios na tubulação após um simples cotovelo.



Noções básicas de vazão

Densidade, Massa ou Volume, Instantânea ou Total, Exatidão e Repetibilidade

Noções Básicas de Vazão

Instantânea & Total

- Tecnologias de medição apresentam ferramentas para otimizar a produção de processos e operações de dosagem. Em adição à **pressão** e **temperatura**, a **vazão instantânea** é uma das variáveis de medição mais importantes. A determinação quantitativa de valor, volume e vazão instantânea permite que os processos produtivos sejam otimizados através de controle e regulação. Algumas vezes, os medidores de vazão apresentam a quantidade de fluido que passou e o valor instantâneo da vazão que está passando por um condutor (tubulação ou canal). Assim sendo, eles possuem totalizadores e pulso e/ou saídas 4-20mA.
- **Todos os medidores de vazão são dimensionados e especificados pela vazão Instantânea**



Instantânea= a velocidade do fluido em um dado instante de tempo



Total = a quantidade que foi coletado ou passou através de um condutor por um período de tempo

Noções Básicas de Vazão

Densidade

- Os valores básicos mais importantes são massa e volume:
 - **Massa** com o símbolo m medido em kg ou g, Libras (lb) ou Tons
 - **Volume** com o símbolo V medido em m^3 , dm^3 ou cm^3 , $feet^3$, U.S. galões ou $inch^3$
 - **Standard** ou **Volume Normalizado**
- A razão de massa por volume, a densidade define a relação entre os dois valores:

$$\text{Densidade} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} : \rho = \frac{M}{V} \left[\text{kg}/\text{dm}^3 \text{ (kg/l)}, \text{kg}/\text{m}^3, \text{g}/\text{cm}^3, \text{lb}/\text{feet}^3, \text{lb}/\text{U.S. gal}, \text{lb}/\text{inch}^3 \right]$$



Noções Básicas de Vazão

Vazão Instantânea Mássica & Vazão Instantânea Volumétrica

- Como a maioria dos sistemas de produção operam continuamente, os valores medidos devem representar as condições instantâneas ou indicar valores instantâneos. Sendo assim, um valor dependente do tempo é necessário: a vazão instantânea. Utilizando duas unidades básicas, massa e volume, uma distinção é feita entre vazão instantânea mássica q_m e vazão instantânea volumétrica q_v :

$$\text{Vazão Instantânea Mássica} = \frac{\text{Massa}}{\text{Tempo}} : q_m = \frac{M}{t} \left[\text{Kg/s, Kg/h, g/s, lb/s, lb/h, Tons/h etc.} \right]$$

$$\text{Vazão Instantânea Volumétrica} = \frac{\text{Volume}}{\text{Tempo}} : q_v = \frac{V}{t} \left[\text{m}^3/\text{s, l}^3/\text{s, m}^3/\text{h, feet}^3/\text{s, gallons/h, barrels/h etc.} \right]$$

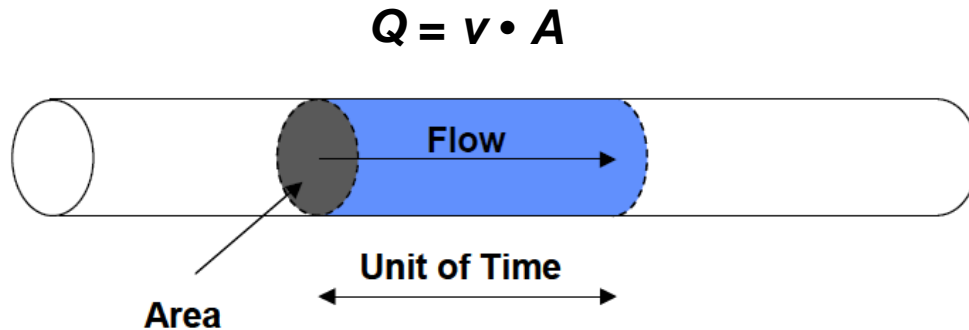
- Vazão instantânea mássica é o valor de medição ideal, pois é independente de pressão e temperatura, entretanto, a vazão volumétrica instantânea é usualmente mais conveniente de medir e, portanto, preferida.



Noções Básicas de Vazão

Vazão instantânea Volumétrica

- A **vazão instantânea volumétrica**, Q , representa o total de volume passando por uma tubulação por unidade de tempo e, normalmente, é expressa em litros por segundo (l/s ou U.S. Gal/s) ou metros cúbicos por hora (m³/h ou Ft³/h).
- A medição de vazão instantânea volumétrica é frequentemente obtida pela medição da média da velocidade de um fluido que transita pela tubulação com uma área A conhecida.



Noções Básicas de Vazão

Vazão Instantânea Mássica

- A maioria das reações químicas são baseadas na relação de **massas** e, conseqüentemente, em busca do controle do processo mais preciso, geralmente se busca medir a vazão mássica dos produtos. A **vazão instantânea mássica**, W , representa a massa total de um fluido passando por um instante de tempo. Um conhecimento da vazão instantânea volumétrica Q e da densidade do fluido ρ permite determinar a vazão mássica com:

$$W = Q \cdot \rho \text{ (Kg/s ou lb/s)}$$

- Alguns medidores, como os Coriolis, medem a vazão mássica diretamente. Entretanto, em muitos casos, a vazão mássica é determinada através da vazão volumétrica e da medição da densidade mais o cálculo da vazão mássica como mostrado acima.
- Algumas vezes a densidade é inferida pela medição de temperatura e pressão de um fluido, como em medidores Multivariáveis. Este tipo de medição é referenciada como método por inferição da vazão mássica.

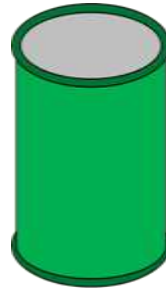


Noções Básicas de Vazão

Líquidos

- Medições de líquidos:
 - Os volumes de líquidos incompressíveis não são afetados pela pressão nas faixas normalmente encontradas. Entretanto, a temperatura varia, e a mesma resulta em mudanças de volume que podem requerer em alguns casos correção na medição.
 - Volumes de Líquidos são normalmente medidos em vazão volumétrica atual.

Massa versus Volume



20 kg de Líquido a **-6.67° C**
=> 208.2 l



20 kg de Líquido a **15.56° C**
=> 214.3 l

Noções Básicas de Vazão

Medições de Gases

- **Medições de Gases: Volume Normalizado ou Volume Standard**

- Os efeitos de temperatura e pressão são maiores nas medições de gás. Esta é a razão pela qual as medições absolutas são normalmente baseadas em **condições normais**, como $p_n = 101325 \text{ Pa}$ ou 1.01325 bar e $T_n = 273.15 \text{ K}$.
- Estas medições absolutas em condições normais (p_n , T_n) também conhecidas em algumas regiões como condições padrões (p_s , T_s). Isto pode causar confusões em alguns casos.
- Brasil – CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão):
 - Pressão = 101325 kPa ou 1 atm
 - Temperatura = 273.15 °K ou 0 ° C

Standard reference conditions in current use

Temperature	Absolute pressure	Relative humidity	Publishing or establishing entity
°C	kPa	%	
0	100.000		IUPAC (STP) ^[1]
0	101.325		NIST ^[7] ISO 10780 ^[2] formerly IUPAC ^[1]
15	101.325	0 ^[20]	ICAQ's ISA ^[9] ISO 13443 ^[2] EEA ^[10] EGIA ^[11]
20	101.325		EPA ^[12] NIST ^[13] This is also called NTP, Normal Temperature and Pressure ^[14]
22	101.325	20-80	American Association of Physicists in Medicine ^[15]
25	100.000		IUPAC (SATP) ^[1]
25	101.325		EPA ^[16]
20	100.000	0	CAGI ^[17]
15	100.000		SPE ^[18]
20	101.3	50	ISO 5011 ^[19]
°C	mmHg	%	
20	760.0	0	GOST 2939-63
°F	psi	%	
60	14.696		SPE ^[18] U.S. OSHA ^[20] SCAQMD ^[21]
60	14.73		EGIA ^[11] OPEC ^[22] U.S. EIA ^[23]
59	14.503	78	U.S. Army Standard Metro ^[24]
59	14.696	60	ISO 2314 ^[25] ISO 3977-2 ^[26]
°F	inHg	%	
70	29.92	0	AMCA ^[27] air density = 0.075 lbm/ft ³ . This AMCA standard applies only to air.
59	29.92		Federal Aviation Administration (FAA) ^[28]

Noções Básicas de Vazão

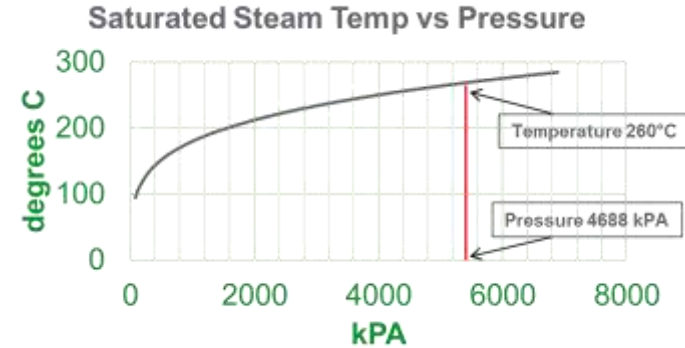
Vapor

• Medições de Vapor Saturado

- Este é o vapor que está totalmente vaporizado, mas que não foi aquecido a uma temperatura acima do ponto de ebulição.
- Em vapor saturado, a relação de Pressão e Temperatura é fixa. Portanto, se você sabe a temperatura, você sabe a pressão e vice-versa. Veja os gráficos ao lado.

• Medições de Vapor Superaquecido

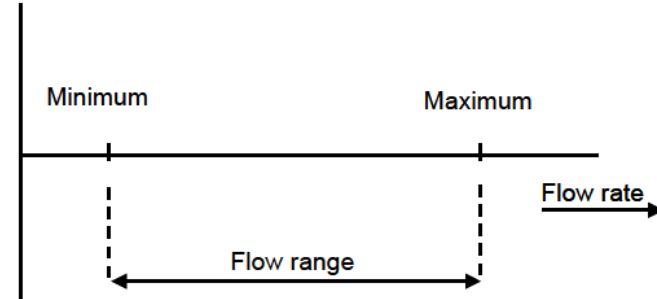
- Este é o vapor que está totalmente vaporizado e aquecido acima da temperatura de ebulição.
- Em vapor superaquecido, não há relação linear entre Pressão e Temperatura e, portanto, a medição das duas variáveis é necessária para se obter a Massa.



Noções Básicas de Vazão

Faixa de Vazão & Rangeabilidade

- A **Faixa de Vazão** é a diferença entre o valor máximo e o mínimo de vazão que o medidor produz performance aceitável dentro da exatidão especificada pelo medidor:
 - Para medidores que possuem uma vazão mínima, a faixa de vazão é o intervalo do valor mínimo ao valor máximo. Se o medidor não apresenta valor mínimo de vazão, a faixa de vazão é o intervalo entre vazão zero e o valor máximo.
- **Rangeabilidade** é a medição de quanto a faixa de vazão do instrumento pode ser ajustada e é definida como a razão da faixa de vazão máxima ou span máximo e mínimo span.
 - O termo rangeabilidade normalmente é confundido com turndown ratio e os usuários devem tomar cuidado com o que realmente estão pedindo quando utilizam estes termos.



Noções Básicas de Vazão

Turndown ratio & Span

- O **Turndown ratio** (no Brasil também é rangeabilidade) é a razão da máxima vazão pela mínima vazão para um range de medição que está dentro da exatidão apresentada. Por exemplo, o range de medição de um medidor magnético pode ser entre 0.3 m/s e 12 m/s com exatidão de 0.3%. Isto representaria um turndown ratio de 40:1 (0.3 %). Além disso, o range de medição pode ser estendido para 0.2 m/s a 12 m/s com exatidão de 0.5%. Neste caso, o turndown ratio é 60:1 (0.5%). Isto é, não significa nada expressar turndown ratio sem uma exatidão especificada.
- O termo **Span** faz referência à saída do medidor de vazão e é a diferença entre os valores superiores e inferiores da faixa (URV & LRV) definidas para este sinal. Por exemplo, um medidor Coriolis tendo uma saída 4-20 mA os valores da faixa superior e inferior podem ser determinados como:
 - LRV: 4 mA = 0 kg/h
 - URV: 20 mA = 5000 kg/h
- O span é então a diferença entre estes dois valores, i.e. $0 - 5000 = 5000$ kg/h. O span mínimo é o mínimo valor que produz um fundo de escala, enquanto que o máximo span é igual a saída máxima do sensor.

Noções Básicas de Vazão

Exatidão

- A **Exatidão** de um medidor de vazão é o máximo desvio entre a indicação do medidor e o valor real da **vazão instantânea** ou a **vazão totalizada**.
- **Exatidão**, também conhecida como **incerteza**, é o intervalo dentro do qual o valor real da medição pode ser encontrado dentro de uma probabilidade definida (normalmente 95 % caso não especificado).
- **Exatidão** inclui os erros combinados de linearidade, histerese e repetibilidade e podem ser expressos em três formas: como um **percentual do span**; como um **percentual do valor atual**; ou como um **percentual do valor máximo de medição** (URL).

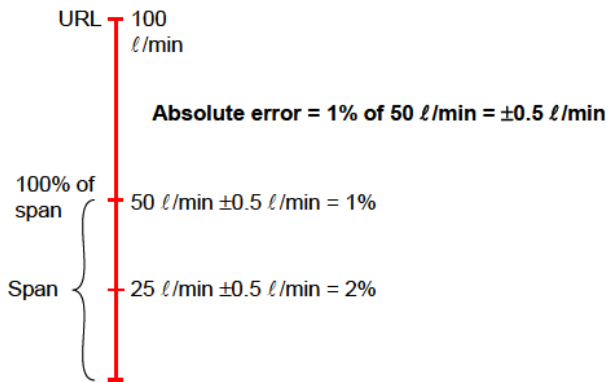


Noções Básicas de Vazão

Exemplos de Exatidão

• Medidor 1

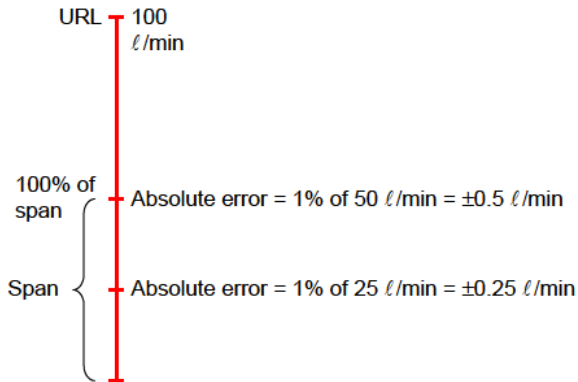
- URL = 100ℓ/min
- Span Calibrado = 0 – 50 ℓ/min
- Exatidão = ± 1% do Span



Exatidão = ± 1% do Span

• Medidor 2

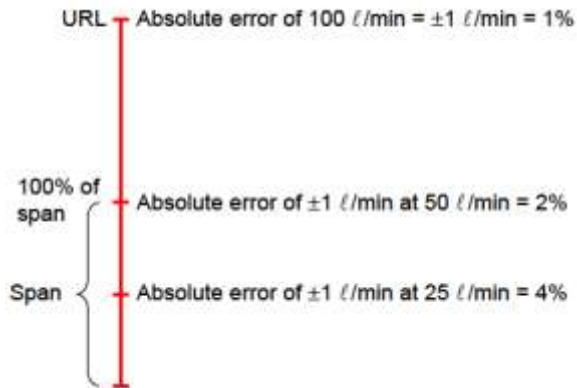
- URL = 100ℓ/min
- Span Calibrado = 0 – 50 ℓ/min
- Exatidão = ± 1% da Leitura



Exatidão = ± 1% da Leitura

• Medidor 3

- URL = 100ℓ/min
- Span Calibrado = 0 – 50 ℓ/min
- Exatidão = ± 1% do URL



Exatidão = ± 1% do URL

Noções Básicas de Vazão

Exatidão & Repetibilidade (Precisão)

- Repetibilidade Ruim

Significa Exatidão Ruim



- Boa Exatidão

Significa Boa Repetibilidade



- Boa Repetibilidade

Não significa necessariamente Boa Exatidão



Selecione os medidores

Qual o melhor medidor?

Selecionando os Medidores

Tecnologias de Medição

metering technology	Clean liquid	Dirty liquid	Corrosive liquid	Low conductivity < 5µS	High temperature	Low temperature	Low velocity	High viscosity	Abrasive slurries	Fibrous slurries	Clean Gas	Dirty Gas	Steam	Semi-filled pipe
Coriolis	Good	Good	Limited	Good	Limited	Good	Good	Good	Limited	Good	Good	Limited	No	No
Electro Magnetic	Good	Good	Good	No	Limited	No	Good	Good	Good	Good	No	No	No	Limited
Vortex	Good	Limited	Limited	Good	Good	Limited	No	No	No	No	Good	Limited	Good	No
Integral Flow (dP)	Good	Limited	Limited	Good	Good	Limited	No	No	No	No	Good	Limited	Limited	No
Orifice Plate (dP)	Good	Limited	Limited	Good	Good	Limited	No	No	No	No	Good	Limited	Good	No
Averaging Pitot tube (dP)	Good	Limited	Limited	Good	Good	Limited	No	No	No	No	Good	Limited	Good	No
Venturi (dP)	Good	Good	Limited	Good	Good	Limited	No	No	Limited	Limited	Good	Good	Good	No
V-Cone (dP)	Good	Good	Limited	Good	Good	Limited	No	No	Limited	Limited	Good	Good	Good	No
Wedge (dP)	Good	Good	Limited	Good	Good	Limited	No	No	Good	Good	Good	Good	Good	No
Flow Nozzles (dP)	Good	Limited	Limited	Good	Good	Limited	No	No	No	No	Good	Good	Good	No
Thermal Mass	Good	Limited	Limited	Good	Limited	No	Good	Limited	Limited	Limited	Good	Limited	Good	No
Positive Displacement	Good	No	Limited	Good	Limited	Limited	Good	Limited	No	No	Good	Limited	No	No
Turbine	Good	No	Limited	Good	Limited	Limited	No	No	No	No	Good	Limited	Good	No
Ultrasonic (transit time)	Good	Limited	Limited	Good	No	Limited	Limited	Limited	No	No	Good	Limited	No	No
Ultrasonic (doppler)	No	Good	Limited	Good	No	Limited	Limited	Limited	Limited	Limited	No	Limited	No	No
Ultrasonic (multibeam)	Good	Limited	Limited	Good	No	Limited	Limited	Limited	No	No	Good	Good	No	No
Variable Area	Good	No	Limited	Good	Limited	No	No	No	No	No	Good	No	No	No

Selecionando os Medidores

Tecnologias de Medição

	<i>Clean Liquids</i>	<i>Dirty Liquids</i>	<i>Corrosive Liquids</i>	<i>Viscous Liquids</i>	<i>Abrasive Slurries</i>	<i>Fibrous Slurries</i>	<i>Low Velocity Flows</i>	<i>Vapor or Gas</i>	<i>Hi Temp. Service</i>	<i>Cryogenic Service</i>	<i>Semi-Filled Pipes</i>	<i>Non-Newtonians</i>	<i>Open Channel</i>
Differential Pressure Orifice	✓	??	?	?	X	X	✓	✓	✓	✓	X	??	X
Venturi	✓	?	??	??	??	??	??	✓	??	??	X	??	X
Flow Nozzles and Tubes	✓	??	??	??	??	??	??	✓	??	??	X	??	X
Pitot Tubes	✓	??	?	??	X	X	??	✓	??	??	X	X	X
Elbow	✓	?	?	??	?	??	X	✓	??	??	X	??	X
Magnetic	✓	✓	✓	?	✓	✓	?	X	??	X	??	?	??
Mass Coriolis	✓	✓	?	✓	✓	?	?	??	??	??	X	✓	X
Thermal	??	??	??	??	??	??	?	✓	??	X	X	??	X
Oscillatory Vortex Shedding	✓	?	?	??	X	X	X	✓	??	??	X	X	X
Fluidic	✓	??	?	??	X	X	X	X	??	??	X	X	X
Vortex Precession	✓	X	??	??	X	X	X	✓	??	X	X	X	X
Positive Displacement	✓	X	??	✓	X	X	✓	✓	??	??	X	X	X
Target	✓	?	?	?	??	X	??	✓	??	??	X	??	X
Turbine	✓	??	??	?	X	X	??	✓	??	??	X	X	?
Ultrasonic Transit Time	✓	??	??	??	X	X	??	??	X	??	X	X	?
Doppler	X	✓	??	??	??	??	??	X	X	X	X	??	X
Variable Area	✓	?	?	?	X	X	??	✓	?	X	X	X	X
Weirs and Flumes	✓	?	??	X	??	??	?	X	X	X	✓	X	✓

Selecionando os Medidores

FlowExpert é uma ferramenta excelente para selecionar e dimensionar medidores de vazão

The screenshot shows the FlowExpertPro.com website interface. At the top left is the Foxboro logo with 'by Schneider Electric' underneath. To the right is the website name 'FlowExpertPro.com'. A green navigation bar contains links for 'Home', 'File', 'New Sizing', 'Help', and 'Login'. Below the navigation bar, a green banner reads 'Welcome to FlowExpertPro.com!'. The main content area is titled 'Please select a meter type to size.' and features five categories of flow meters: Coriolis, Compact Orifice, Magnetic, IFOA, and Vortex. Each category is represented by a cluster of images of the respective meter types. At the bottom center, there is a green box with the text 'Invenys is now Schneider Electric'. Below this, a footer contains copyright information for Schneider Electric and a note to send comments and questions to Global Customer Support. At the very bottom center is the FlowExpertPro logo, and at the bottom right is the Schneider Electric logo with the slogan 'Life Is On'.

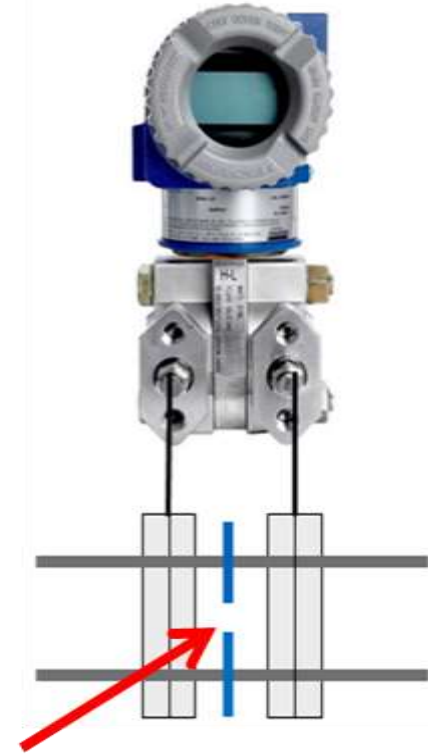
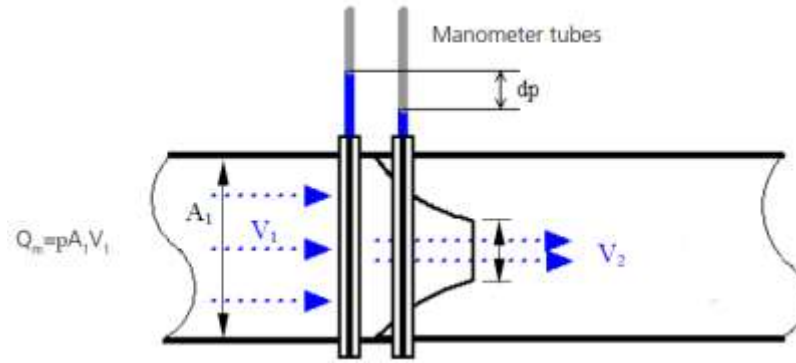
Medição de vazão por pressão diferencial

A tecnologia mais utilizada

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Básico

- Medidores de vazão por pressão diferencial baseiam-se em um **fenômeno físico**, no qual uma **restrição na tubulação** cria uma **queda de pressão** que tem relação com a vazão instantânea.
- Este fenômeno é baseada em 2 equações bem conhecidas: a **equação de continuidade** e **equação de Bernoulli** (Daniel Bernoulli, publicou seu livro Hidrodinâmica em 1738).
- Eles são chamados de " Head Loss", porque eles criam uma perda de carga permanente que depende do tipo de medidor e também da vazão volumétrica ao quadrado.



Flow restriction

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

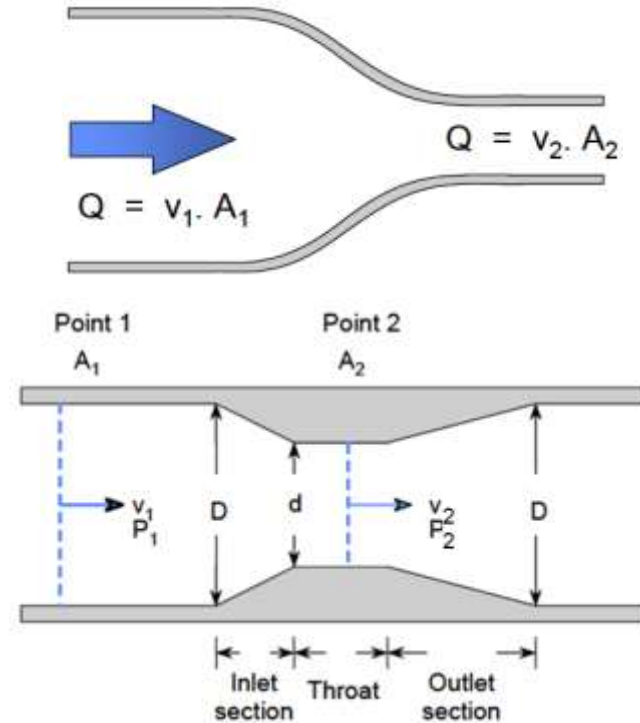
Básico

- A **Equação da Continuidade** diz: Para um fluido incompressível, a taxa de vazão de volume, Q , deve ser constante. Assim, quando um líquido flui através de uma restrição, em seguida, a fim de permitir que a mesma quantidade de líquido passe (para atingir uma taxa de vazão constante) a velocidade deve aumentar:

$$Q = v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2$$

- Um fluido de densidade ρ fluindo no tubo de área A_1 tem uma velocidade v_1 relativa a uma pressão na linha P_1 . Em seguida, ele flui através da restrição da área A_2 , em que a velocidade média v_2 aumenta e, então, a pressão cai para P_2 .
- A razão dos diâmetros da restrição (d) para o DI (diâmetro interno) (D) do tubo é denominado **beta ratio** (β):

$$\beta = \frac{d}{D}$$



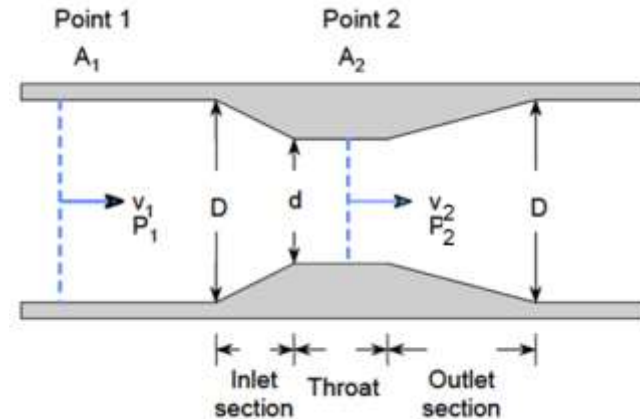
Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Básico

- A **Equação de Bernoulli** diz: Sob condições de vazão constante, a energia total (cinética + pressão + gravitacional) por unidade de massa de um fluido incompressível ideal (ou seja, com uma densidade constante e viscosidade zero) mantém-se constante ao longo de uma linha de vazão.

$$k = \frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gz$$

- onde:
 - v = velocidade num ponto do escoamento
 - P = pressão nesse ponto
 - ρ = a densidade do fluido
 - g = aceleração devida à gravidade
 - z = o nível do ponto acima de algum plano de referência horizontal arbitrário com a direção Z positiva no sentido oposto ao da aceleração gravitacional
 - k = constante
- Na seção restrita da corrente de vazão, a energia cinética (pressão dinâmica) aumenta, devido ao aumento da velocidade, e a energia potencial (pressão estática) diminui. Isto resulta num diferencial de pressão



Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Básico

- Combinando a equação de continuidade, a equação de Bernoulli e todas as outras influências, você obtém a seguinte fórmula mais utilizada para a medição de vazão mássica:

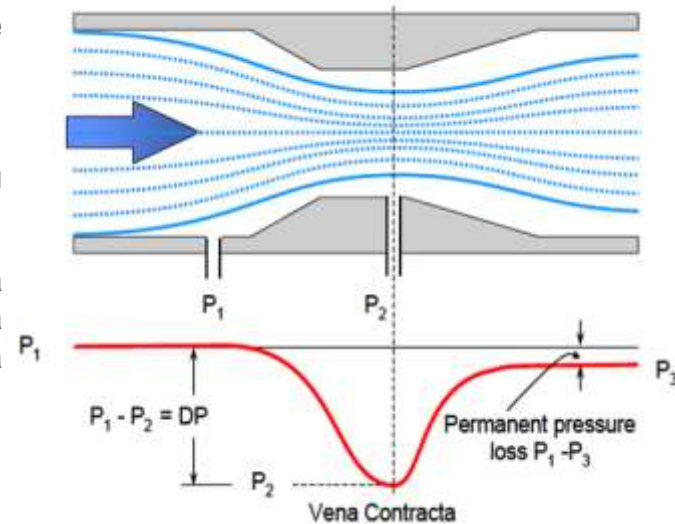
$$Q = C_d \cdot E_v \cdot Y_1 \cdot d^2 \sqrt{\Delta P \cdot \rho} \quad \text{e para Vazão Volumétrica} \quad Q = k \sqrt{\Delta P}$$

- onde:
 - Q = vazão
 - C_d = coeficiente de descarga
 - E_v = a velocidade do fator de abordagem
 - Y_1 = o fator de expansão de gás (para líquidos é 1)
 - d = o diâmetro da restrição
 - ρ = a densidade do fluido
 - ΔP = a pressão diferencial ($P_1 - P_2$)
 - k = constante específica do elemento primário
- **A vazão é a extração da raiz quadrada da pressão diferencial**
- C_d , o coeficiente de descarga, é uma função da razão de diâmetros, do número de Reynolds Re, do design da restrição, da localização das tomadas de pressão e do atrito devido à rugosidade da tubulação.
- Por exemplo: geralmente, para a maioria orifícios, os coeficientes de descarga ficam entre 0.6 - 0.9.

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Básico

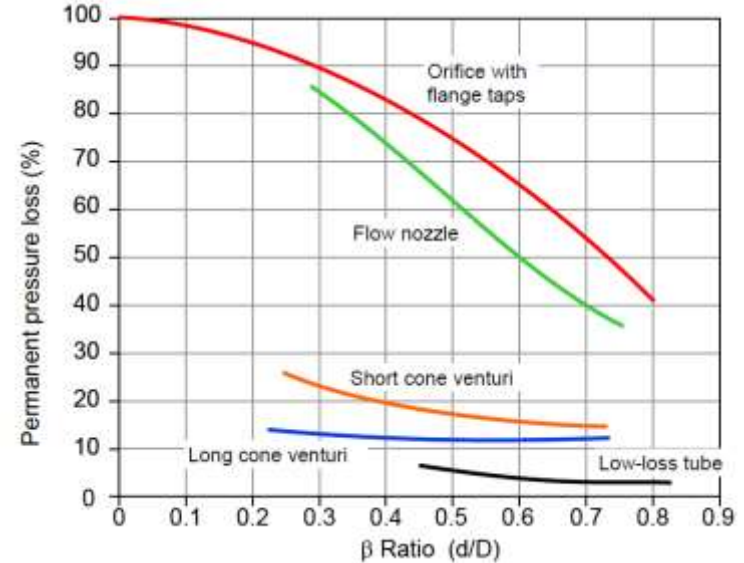
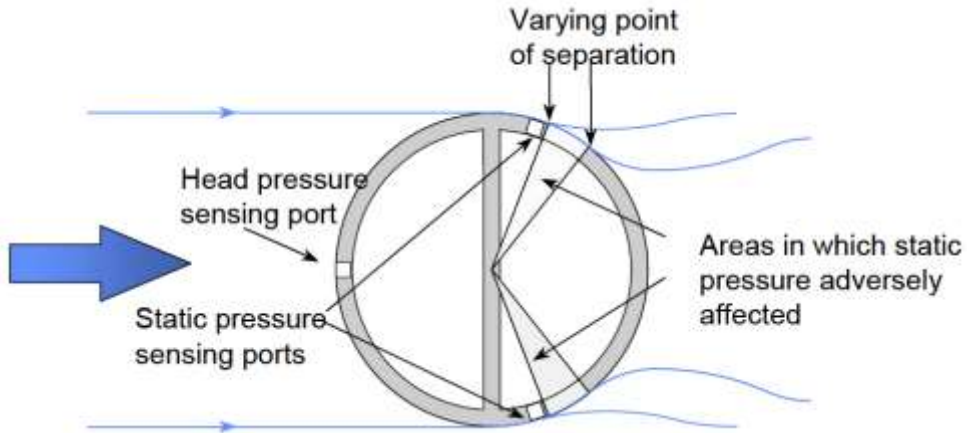
- A partir da fórmula do slide anterior, nós aprendemos duas limitações principais que são aplicáveis a todos os sistemas de pressão diferencial:
 - A relação entre a raiz quadrada da pressão diferencial (ΔP) e a vazão (Q), que limita severamente a **rangeabilidade (turndown ratio)** para **10:1** ou menos nessas tecnologias.
 - **Se a densidade (ρ) não é constante**, deve ser conhecida ou medida. Na prática, o efeito das variações de densidade não é significativa na maioria das aplicações de vazão de líquido e necessita apenas ser considerada na medição de vazão de gases.



Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Básico

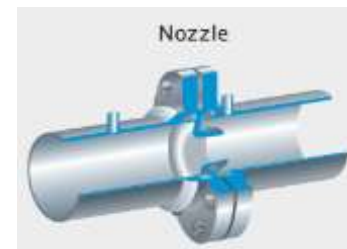
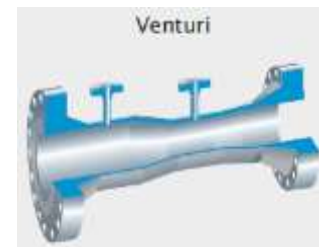
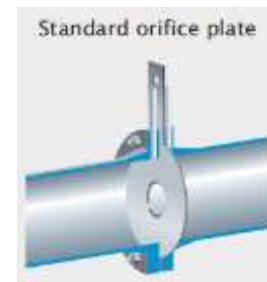
- Uma terceira limitação dos medidores de vazão com base na medição da pressão diferencial é que eles criam uma perda de pressão permanente. Esta perda de carga depende do tipo de medidor e do quadrado da vazão volumétrica.



Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Por que usamos medidores de vazão por pressão diferencial?

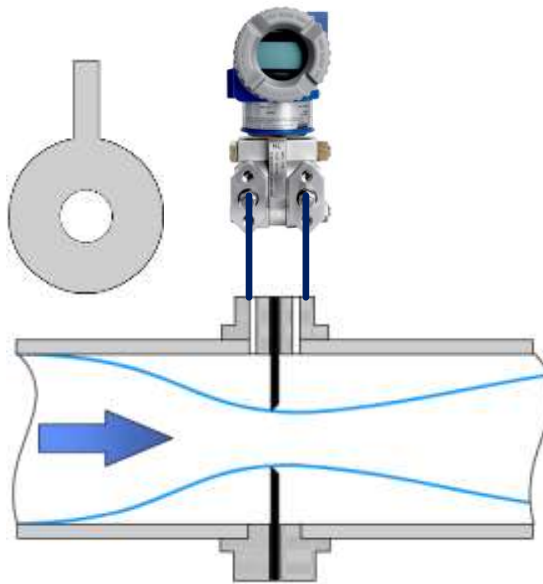
- **Medidores de vazão por pressão diferencial** utilizam uma grande variedade de elementos primários (dispositivos) que inclui: placas de orifício, V-cone, tubos Venturi, bocais e tubos de Pitot, sobre o qual a pressão diferencial é medida.
- Uma vantagem importante deste tipo de medidor sobre os outros instrumentos é que a medição de vazão pode ser determinada de forma precisa, **através da pressão diferencial, das dimensões mensuráveis do elemento primário e das propriedades do fluido**. Eles não requerem necessariamente a calibração direta da vazão.
- **Medidores de vazão por pressão diferencial podem ser usados em aplicações de líquido, gás ou vapor** e oferecem excelente confiabilidade, desempenho razoável e custo baixo.
- A medição de vazão por pressão diferencial **ainda é a tecnologia mais utilizada**, apesar das desvantagens.



Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Placa de Orifício, Orifício Compacto e Orifício Integral

- A **placa de orifício** é o elemento de medição **mais simples e mais utilizado** na medição de vazão por pressão diferencial e geralmente compreende uma placa de metal com um furo redondo concêntrico (orifício) através do qual o líquido flui.
- Vantagens:
 - Construção simples
 - Barata
 - Robusta
 - Facilmente montada entre flanges
 - Sem partes móveis
 - Vários tamanhos e proporções de abertura
 - Adequada para a maioria dos gases líquidos e vapor
 - O preço não aumenta drasticamente com o tamanho
 - Bem conhecida e comprovada



Placa de Orifício



Orifício Integral

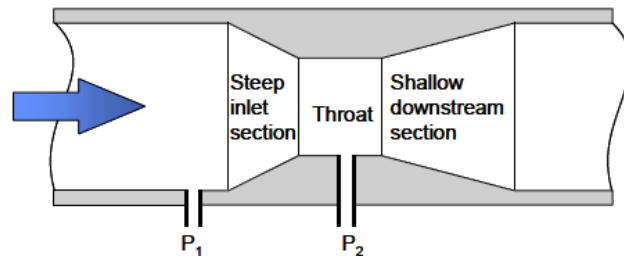


Orifício Compacto

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Venturi

- O **Tubo Venturi** afunila as seções de entrada e de saída com uma seção central paralela, chamada de garganta, em que a tomada de baixa pressão está localizada.
- A seção de entrada, que proporciona uma abordagem suave para a garganta, tem um ângulo mais inclinado do que a seção a jusante. O ângulo mais raso da seção a jusante reduz a perda total de pressão permanente pela desaceleração do fluxo sem problemas e, assim, minimiza a turbulência.
- Vantagens:
 - Menor perda de pressão através da restrição
 - Menor perda de carga permanente
 - Requer menor trecho reto a montante e a jusante

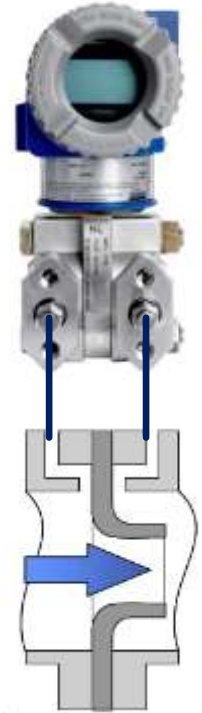
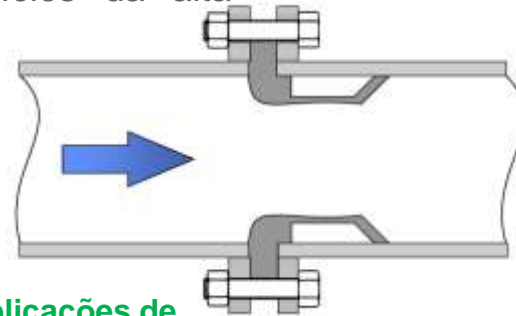


Você encontrará muitas vezes este tipo de aplicação em medições de vazão de gás, em tubulações de grande diâmetro.

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Bocal

- O **Bocal** é uma adaptação do tubo Venturi padrão que faz uso de um "bocal" em forma de admissão, uma garganta curta e uma seção de expansão a jusante. Embora aumente a perda de pressão permanente a cerca de 25% da pressão diferencial medida no tubo Venturi padrão, o bocal venturi é mais barato, requer menos espaço para instalação e ainda assim mantém os benefícios da alta precisão ($\pm 0,75\%$) e vazão em alta velocidade.



A medição de vazão com Bocal é usada principalmente em aplicações de alta velocidade como no vapor

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

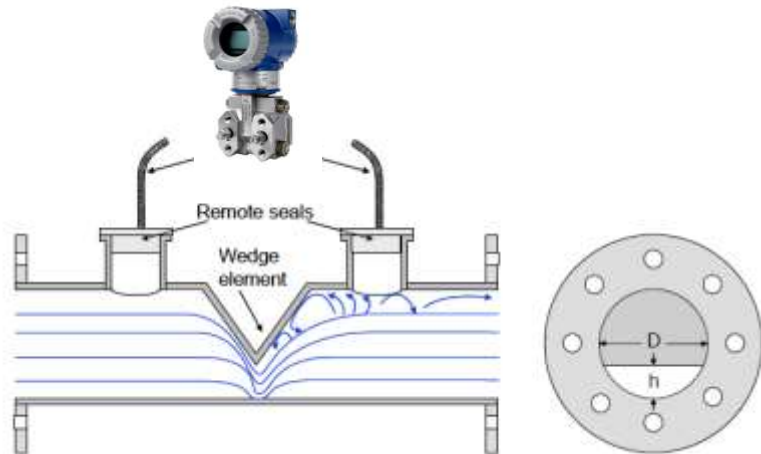
Cunha Segmental

- O elemento tipo **Cunha Segmental** possui uma restrição em forma de “ V “, fundido ou soldado em tubo flangeado, que cria uma pressão diferencial. A restrição é caracterizada pela razão (h/D) , correspondente à razão β de uma placa de orifício, em que (h) é a altura da abertura abaixo da restrição (a única dimensão crítica) e (D) é o diâmetro interior do tubo.

- Vantagens:

- Construção simples e robusta
- Pode ser usado para uma variedade de condições corrosivas, erosivas e fluidos altamente viscosos e suspensões
- Pode ser usado em baixas vazões $Re > 500$

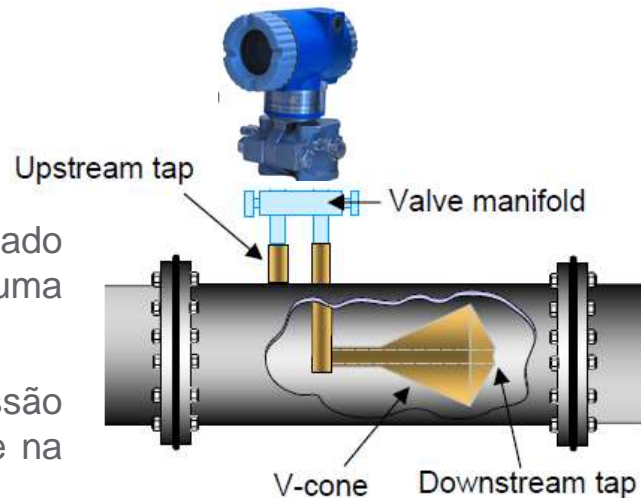
Utilizado em aplicações de Papel e Celulose e Mineração



Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

V-cone

- O medidor de vazão **V-cone** apresenta um cone central localizado no interior do tubo de medição que interage com o fluido e cria uma região de baixa pressão imediatamente a jusante do cone.
- A diferença de pressão é medida entre a tomada de pressão estática na linha, ligeiramente a montante do cone, e a jusante na tomada de baixa pressão localizada na face a jusante do cone.
- O V-cone é basicamente um orifício ao avesso.
 - Algumas vantagens são:
 - Tubulações curtas, a montante 3D e 1D a jusante
 - Precisão $\pm 0.5\%$ com repetibilidade de $\pm 0.1\%$
 - Adequado para uso com fluidos sujos

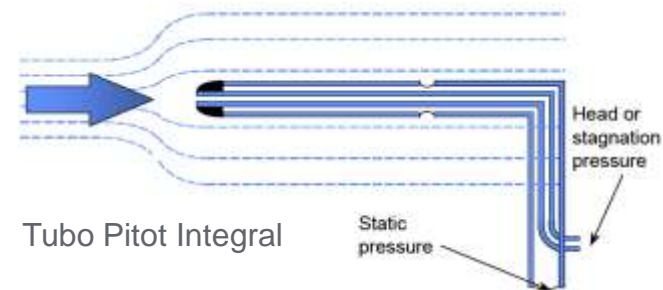
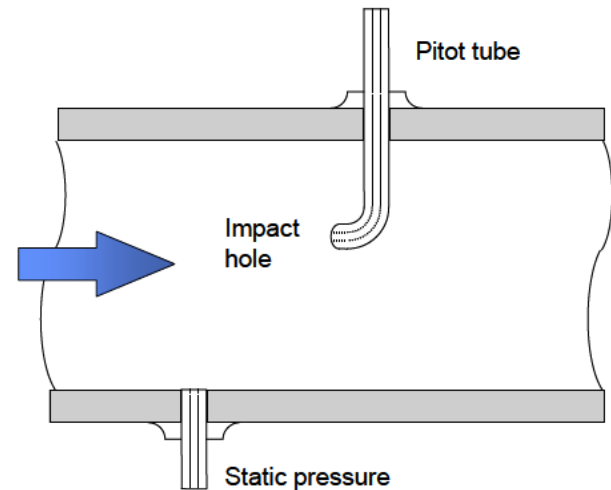


Comumente usado em aplicações de duas fases como Wet Gas e vapor saturado

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Tubo Pitot

- O **Tubo Pitot** é um dos mais antigos dispositivos de medida de velocidade e é frequentemente usado para determinar o perfil de velocidade em um tubulação através da medição da velocidade em vários pontos.
- O Tubo Pitot compreende um pequeno tubo inserido em uma tubulação com a cabeça inclinada de modo que a boca do tubo faça o fluxo. Como resultado, uma pequena amostra do meio que se escoia colide com a extremidade aberta do tubo e é colocado em descanso. Assim, a energia cinética do fluido é transformada em energia potencial na forma de uma pressão (também chamado de pressão de estagnação).
- Ponto de medição da velocidade
- Normalmente utilizado com fluidos limpos e gases

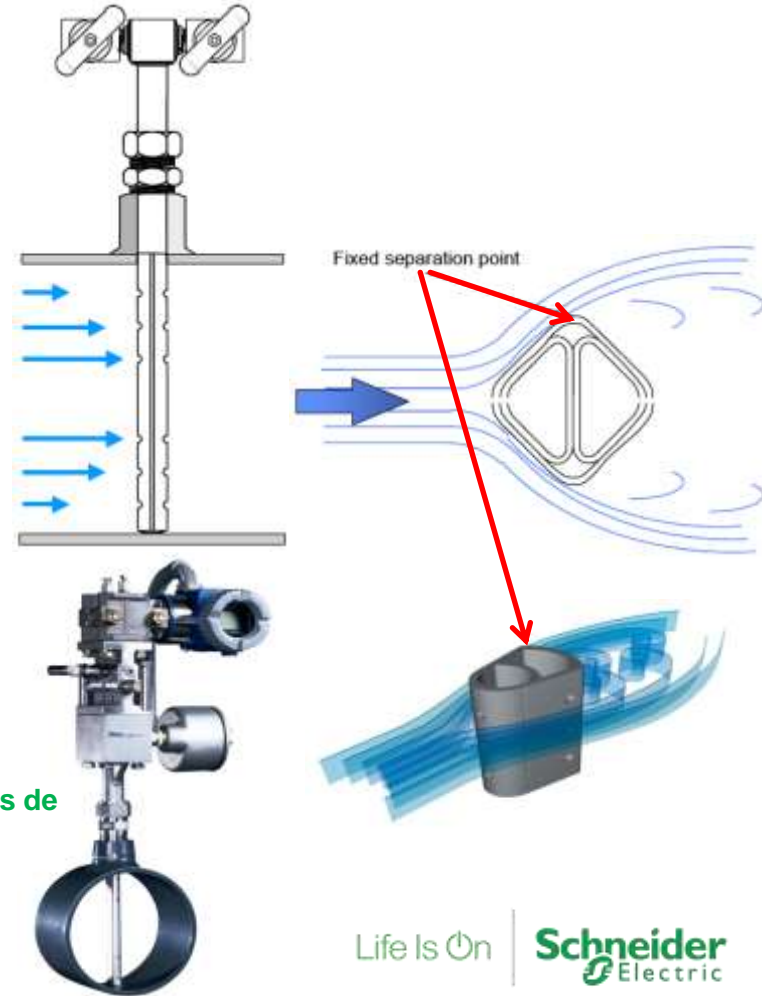


Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Tubo Pitot de Média - Annubar

- Outro método de determinar a velocidade média é com um sistema de **Tubo Pitot de Média**, também conhecido como **Annubar**.
- Este instrumento é composto por duas barras de sensoriamento nos dois lados, que abrangem a tubulação toda, em que as pressões a montante e a jusante são detectadas por um número de orifícios localizados criticamente.
- Os furos na barra de detecção a montante estão dispostos de modo que a pressão média é igual ao valor correspondente à vazão média do perfil de escoamento.

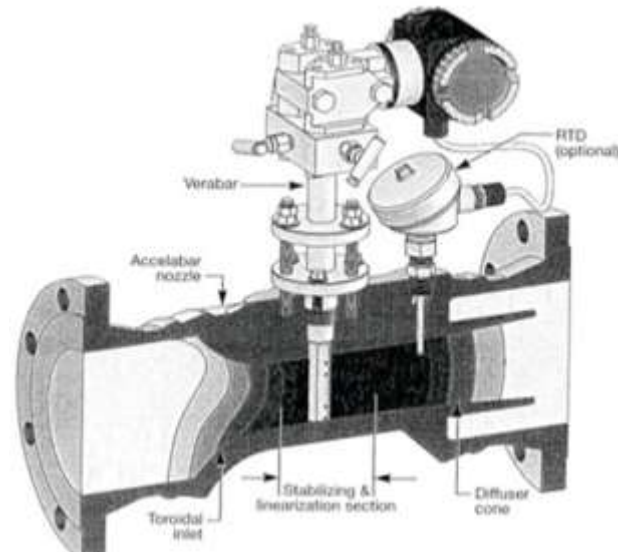
Estes dispositivos Annubar são utilizados principalmente na medição de fluxos de tubos de grande diâmetro interno



Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

VERIS Accelabar – Venturi + Tubo Pitot

- Esta solução combina duas tecnologias de elemento primário diferentes: Tubo Pitot de Média e Venturi.
- Onde o Tubo Pitot de Média tem dificuldades com as medições de vazão baixa, o Venturi acelera o fluxo e, portanto, a combinação dá um melhor desempenho global.
- Ele é capaz de gerar pressões diferenciais mais altas para medição de líquidos, gás e vapor.
- Ele minimiza os requisitos de instalação de trecho reto.



Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Outros tipos

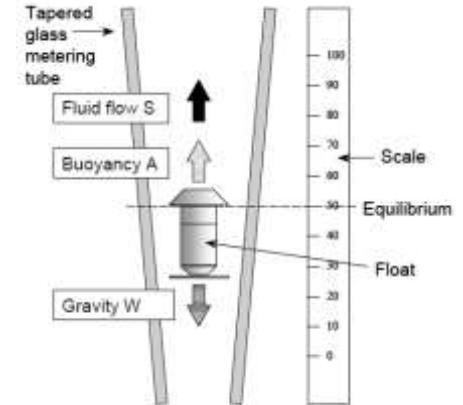
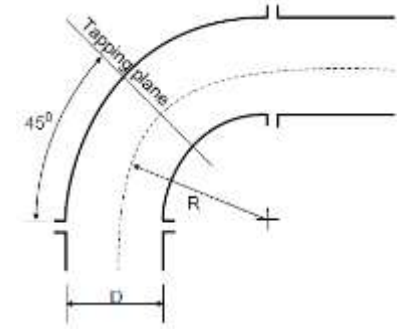
- Cotovelo

- Em aplicações onde o custo é um fator importante e não é possível utilizar uma placa de orifício devido ao aumento da perda de carga, um cotovelo da tubulação pode ser utilizado como um elemento primário. Tomadas tipo cotovelo tem uma vantagem, pois a maioria das tubulações têm cotovelos que podem ser usados.

O medidor de cotovelo é adequado apenas para velocidades mais altas e não pode produzir uma precisão superior a 5%

- Medidor de área variável

- Em operação, o fluido ou gás flui através do tubo cônico invertido da parte inferior para a parte superior, que transporta o flutuador para cima. Uma vez que o diâmetro do tubo aumenta na direção ascendente, a boia sobe até um ponto em que a força ascendente sobre o flutuador criada pela pressão diferencial através do intervalo anular, entre o flutuador e o tubo, é igual ao peso do flutuador.



Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Vantagens e Desvantagens

• Vantagens:

- **Construção simples** e de fácil manutenção.
- **Custo relativamente baixo**, especificamente sobre diâmetros > DN100, 4".
- Rangeabilidade, normalmente <5:1, mas utilizado em combinação com **transmissores Multivariável de Pressão diferencial** pode estender-se a rangeabilidade para 10: 1 e **vazão mássica** pode ser diretamente calculada.
- Adequado para **alta pressão e temperaturas elevadas**.
- **Sem partes móveis**.
- Historicamente é método mais utilizado na medição de vazão com muitos anos de experiência no campo.

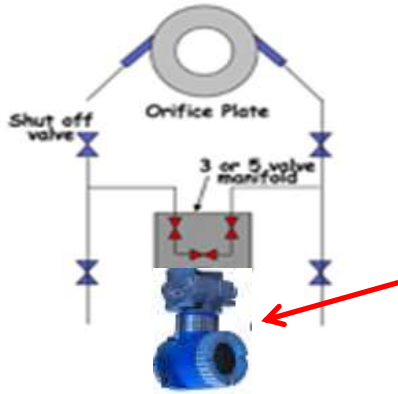
• Desvantagens:

- **Perda de carga permanente**.
- Exatidão, dependendo do método, de 0,2% a 5%.
- Exatidão pode ser afetada por flutuações na densidade, pressão e viscosidade e por erosão e danos físicos na restrição.
- Muitas vezes longos trechos retos são necessários: para aplicações de transferência de custódia, por exemplo, com placas de orifício, a American Gas Association (AGA) requer 95 diâmetros de trecho reto a montante do ponto de medição.
- **O sinal de saída não está linearmente** relacionada com vazão, implicando, assim, na extração de raiz quadrada.
- Há um grande número de potenciais pontos de vazamento.

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

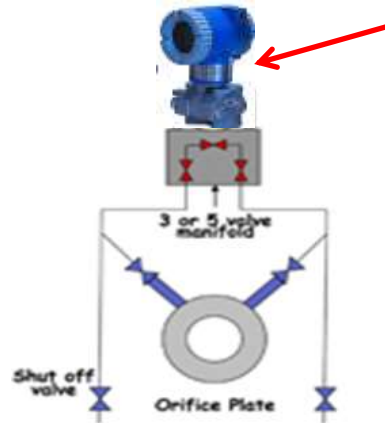
Pontos a considerar

- Vazão de líquidos
 - Conexão de processo na parte inferior ou lateral da tubulação



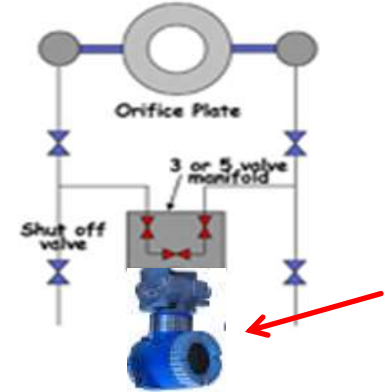
Transmissor dP abaixo da tubulação

- Vazão de gases
 - Conexão de processo no topo da tubulação



Transmissor dP acima da tubulação

- Vazão de vapor
 - Conexão do processo do lado da tubulação

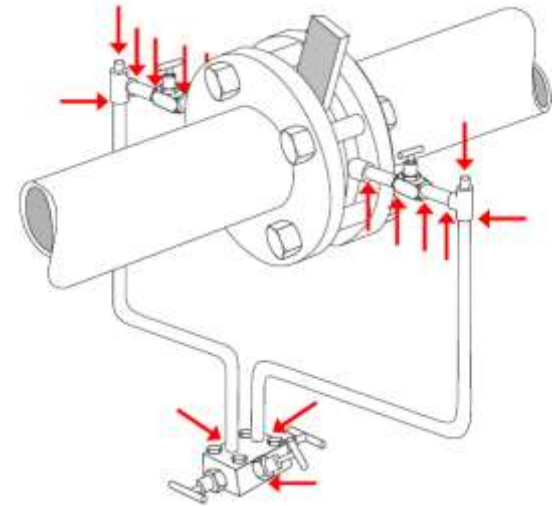
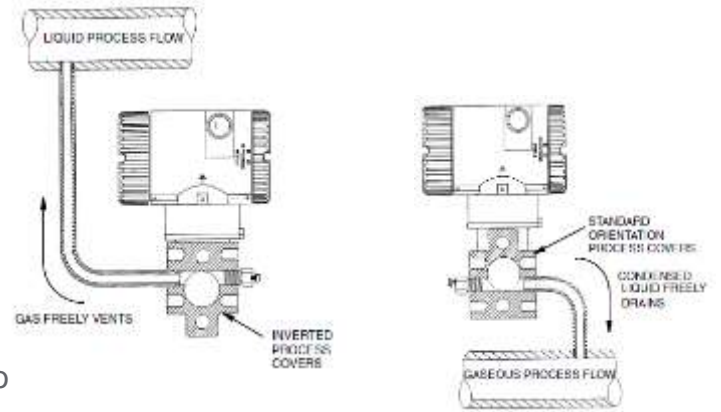


Transmissor dP abaixo da tubulação

Medidores de Vazão por Pressão Diferencial

Pontos a considerar

- Orientação do transmissor – Vent e Dreno
 - Medição de vazão de líquido, tomadas de processo invertidas
 - Medição de vazão de gases, tomadas de processo na orientação padrão
- Especial atenção para os potenciais pontos de vazamento
 - Conexões de processo
 - Conexões das válvulas de isolamento
 - Partes sensíveis da tubulação em geral
 - Conexões dos manifolds, 3 vias ou 5 vias
 - As conexões entre o manifold e o transmissor dP



Medidores tipo Magnético

Os mais versáteis

Medidores de Vazão Magnético

Um pouco de história

- Demorou 120 anos, desde as primeiras experiências de **Michael Faraday** (1792-1867) para medir a vazão do rio Tamisa em 1832, até a introdução do primeiro medidor de vazão eletromagnético prático em **1952**.
- O princípio do medidor magnético de vazão é baseado na **lei da indução de Faraday** que declara que se um condutor move-se através de um campo magnético, uma tensão será induzida e que a mesma será proporcional à velocidade do condutor.

Foxboro foi uma das pioneiras da vazão magnética desde 1954.



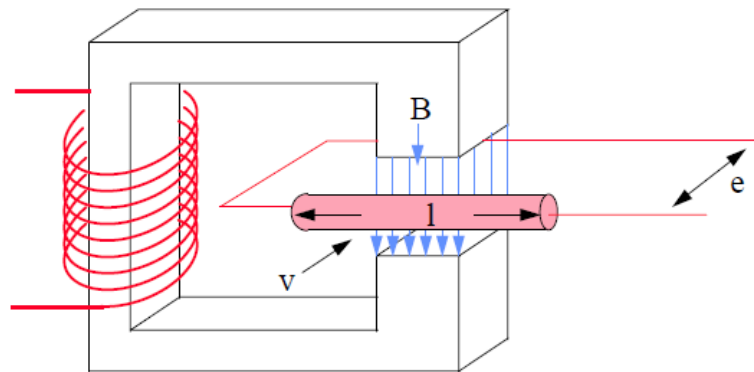
Medidores de Vazão Magnético

Lei da indução de Faraday

- Se um condutor de comprimento (L) é movido através do campo magnético, que tem uma densidade de fluxo magnético (B), a uma velocidade (v), em seguida, uma tensão será induzida:

$$U = B \cdot l \cdot v$$

- Onde:
- U = tensão induzida (V)
- B = densidade do fluxo magnético (Weber / m²)
- L = comprimento do condutor (m)
- v = velocidade de condutor (m / s)



Medidores de Vazão Magnético

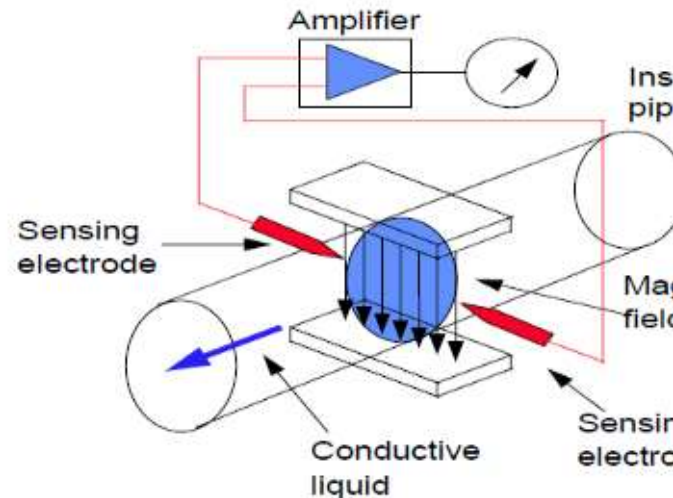
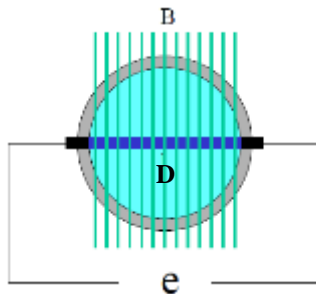
Lei de Faraday na medição de vazão

- No medidor de vazão eletromagnético, um campo magnético é produzido através de uma seção transversal da tubulação com o líquido condutivo formando o condutor.
- Dois eletrodos sensores, estabelecidos em ângulos retos em relação ao campo magnético, são utilizados para detectar a tensão que é gerada através o líquido que flui e que é diretamente proporcional à taxa de vazão no meio.

$$U = c \cdot B \cdot D \cdot v$$

— Onde:

- U = tensão induzida (V)
- c = constante (fator do medidor)
- B = densidade do fluxo magnético (Wb / m^2)
- D = diâmetro do tubo (m)
- v = velocidade do condutor (m / s)



Medidores de vazão eletromagnéticos precisam de um líquido condutivo!!!

Medidores de Vazão Magnético

Condutividade do fluido

- Como vimos, o método de medição de vazão magnética só funciona quando usamos um líquido condutor. Por isso, é importante verificar o valor da condutividade do fluido que você irá medir a vazão.
- Por favor note que, a condutividade do líquido pode variar com a temperatura e deve-se ter cuidado para assegurar que o desempenho do líquido em aplicações de baixa condutividade não é afetado pelas temperaturas de funcionamento. A maioria dos líquidos tem um coeficiente de temperatura positivo de condutividade. No entanto coeficientes negativos são possíveis em alguns líquidos.

Consulte a TI 027-072, que lista a condutividade dos líquidos

FIELD DEVICES – FLOW
Technical Information

Foxboro.
by Schneider Electric

TI 027-072

Magnetic Flowmeters
Electrical Conductivity of Process Liquids

Medidores de Vazão Magnético

O princípio de funcionamento

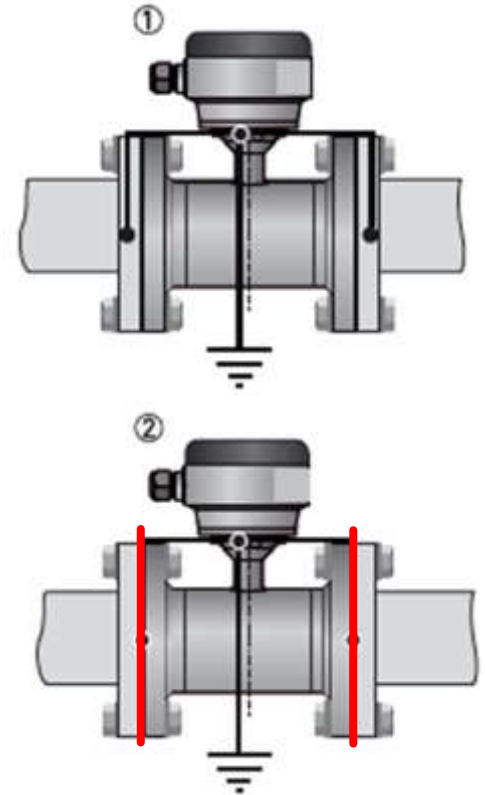
- **O princípio de funcionamento** do medidor de vazão eletromagnético é baseado no movimento do condutor (o líquido que flui) através do campo magnético. É importante que a tubulação que transporta o meio (o tubo de medição) não tenha qualquer influência sobre o campo. Conseqüentemente, a fim de evitar curto-circuito do campo magnético, o **tubo de medição deve ser fabricado a partir de um material não ferromagnético** tais como aço inoxidável (como 304 SS) ou níquel-cromo.
- **É igualmente importante** que o sinal de tensão detectado pelos dois eletrodos de medição não cause um curto-circuito através da parede do tubo. Conseqüentemente, **o tubo de medição deve ser revestido com um material isolante**. Esses materiais devem ser selecionados de acordo com a aplicação e a sua resistência à corrosão química, à abrasão, pressão e temperatura.



Medidores de Vazão Magnético

Aterramento e Cabeamento

- A tarefa do transmissor é ampliar **as pequenas tensões de medição** ($<0,5\text{mV}$), isolá-las das tensões de ruído e convertê-las em sinais utilizáveis, além de indicar os seus valores ou fornecê-los para posterior processamento.
 - Uma atenção especial deve ser tomada com o cabeamento, especificamente quando os transmissores são utilizados montados remotamente.
- Em segundo lugar, é necessário estabelecer um **sinal de referência do fluido** e, por conseguinte, importante que **o potencial do líquido esteja aterrado**.
 - Quando o medidor está montado entre os tubos de metal não revestido, os parafusos do flange fornecem uma conexão elétrica entre o medidor e a tubulação, consequentemente com o fluido.
 - Quando o medidor é montado em tubulação não metálica ou revestido, a instalação de anéis de aterramento é requerida. A continuidade é estabelecida pela conexão pelo aterramento entre o medidor e os anéis de aterramento.



Medidores de Vazão Magnético

O revestimento do medidor de vazão

- **PTFE:** Uma resina deformável a quente, o PTFE (Teflon) é o material de revestimento mais utilizado:
 - Capacidade muito alta temperatura (175 °C / 247°F)
 - Excelentes características antiaderentes reduz incrustação
 - Inerte a uma ampla gama de ácidos e bases
- **PFA:** PFA é uma resina processável por fusão:
 - Forma mais precisa do que PTFE
 - Melhor resistência a abrasão, já que não há protuberâncias ou deformações
 - Melhor resistência a vácuo, devido à capacidade de incorporar reforço de aço inoxidável
 - Aprovado em aplicações de alimentos e bebidas
- **Neoprene:**
 - Resistente ao ataque químico
 - Bom grau de resistência à abrasão
 - Temperatura de 95 °C / 203 °F



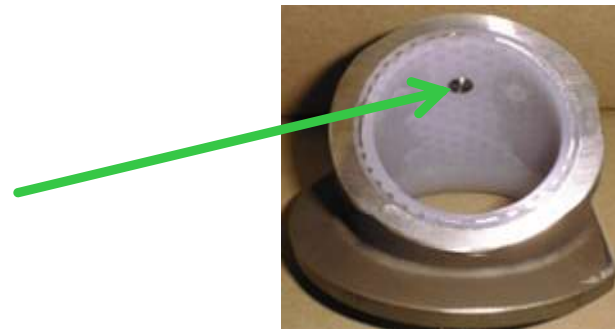
- **Poliuretano:** Geralmente, a melhor escolha quando extrema resistência ao desgaste e erosão é necessária:
 - Não pode ser usado com ácidos fortes ou bases
 - Não pode ser utilizado em altas temperaturas. Temperatura máxima de processo é de 70 °C / 158°F
- **Borracha Dura:**
 - Barato, revestimento de propósito geral
 - Vasta gama de resistência à corrosão
 - Principal aplicação na indústria de águas e resíduos industriais
- **Cerâmica (Óxido de alumínio):**
 - Bem recomendado em aplicações muito abrasivas e / ou corrosivas
 - Temperaturas elevadas até 205 °C / 401 °F
 - Amplamente utilizado na indústria química
- E outros



Medidores de Vazão Magnético

Eletrodos

- Os **eletrodos**, assim como os revestimentos, estão em **contato direto com o meio do processo** e os materiais de construção devem ser selecionados de acordo com a aplicação e a sua resistência à corrosão química, à abrasão, à pressão e temperatura. Os materiais comumente utilizados incluem:
 - Aço inoxidável 316
 - Hastelloy C
 - Platina
 - Titânio
 - Tântalo-Tungstênio
- Em algumas aplicações, o revestimento dos eletrodos é motivo de preocupação e forma uma camada isolante sobre os eletrodos.
 - Versões especiais são oferecidas com a opção de limpeza ultrassônica do eletrodo.



FIELD DEVICES – FLOW
Technical Information

Foxboro
by **Schneider** Electric

TI 27-71f

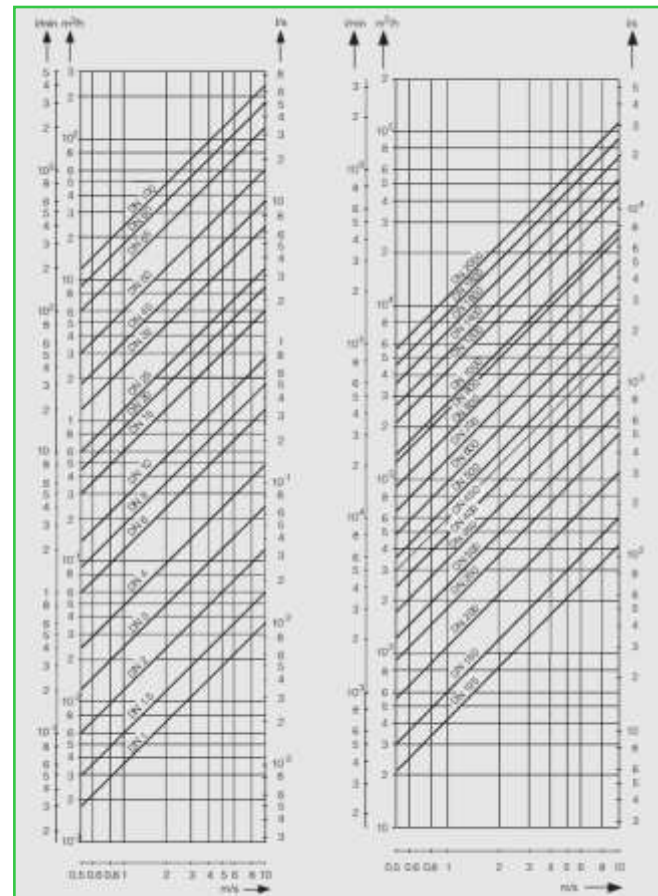
Magnetic Flowtubes
Material Selection Guide

Consulte o TI 27-71f que lista Eletrodo recomendado e Materiais de Revestimento

Medidores de Vazão Magnético

Dimensionamento

- Geralmente, o tamanho do medidor de vazão é igual ao diâmetro nominal da tubulação. Entretanto, é também necessário assegurar que a taxa de vazão do processo situa-se entre os intervalos mínimo e máximo do range do medidor específico. Os valores típicos dos intervalos mínimos e máximos do fundo de escala, são de **0,3 e 12 m/s**, respectivamente.
- A partir da experiência, a velocidade de fluxo ótima do meio através de um medidor de eletromagnético de vazão é geralmente de **2 a 3 m/s**, dependendo do meio. Por exemplo, para líquidos tendo um teor de sólidos, a velocidade de escoamento deve estar compreendida entre **3 a 5 m/s** para evitar depósitos e para minimizar a abrasão.
- Conhecendo a taxa de vazão volumétrica do meio, por exemplo, m³/h, e sabendo o diâmetro do tubo, é fácil de calcular e, portanto, verificar se a velocidade de fluxo está dentro do range recomendado. Há monogramas ou tabelas que permitem aos usuários verificarem esses dados rapidamente. (Ver tabela à direita)



Medidores de Vazão Magnético

Benefícios

O medidor de vazão eletromagnético é considerado por muitos usuários como a resposta universal para mais de 90% de todas as aplicações de medição de vazão.

Alguns dos muitos benefícios do medidor de vazão magnético são:

- **Medição do vazão volumétrica com saída linear**
- **Baixo custo de ownership:**
 - Custo de aquisição baixo
 - Fácil instalação
 - Excelente durabilidade e confiabilidade
 - Sem perda de carga permanente
- **Ampla rangeabilidade**, com dimensionamento adequado, melhor do que 30: 1.
- **Sem restrições ao fluxo** e ideal para polpas
- **Insensível às alterações de perfil do fluxo** (laminar a turbulento) inclusive muitos líquidos não newtonianos
- Curtos trechos retos (5D/ 3D)
- **Exatidão:** até $\pm 0,2\%$ (ou 0,5%) da vazão atual.
- Não há requisitos de calibração
- **Desde muito pequenos** (1,6 mm/1/16"), a diâmetros de tubulação muito grandes (2.000 milímetros / 80")



Um verdadeiro medidor de vazão de propósito geral

Medidores de Vazão Magnético

Itens a considerar

- Utilize em líquidos condutivos, em geral, **condutividade > 5 $\mu\text{S/cm}$**
- O tubo precisa estar completamente cheio
- Respeitar os **limites físicos de pressão e temperatura**, dependendo do revestimento e eletrodos utilizados
- Garantir um **bom aterramento** do fluido (siga as instruções de cabeamento)



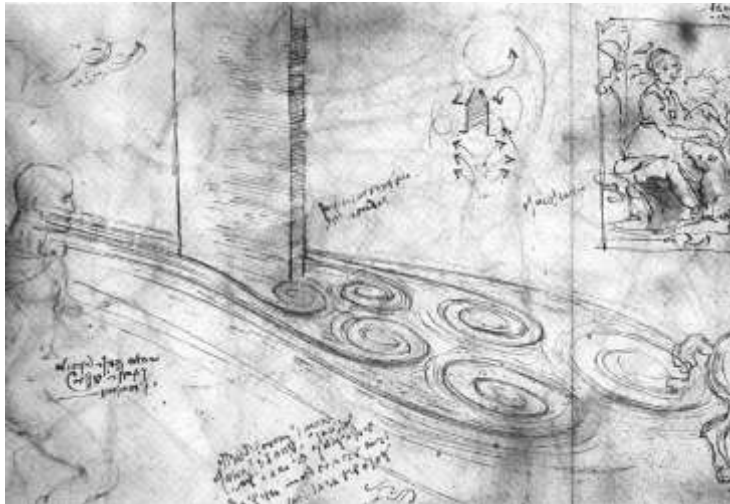
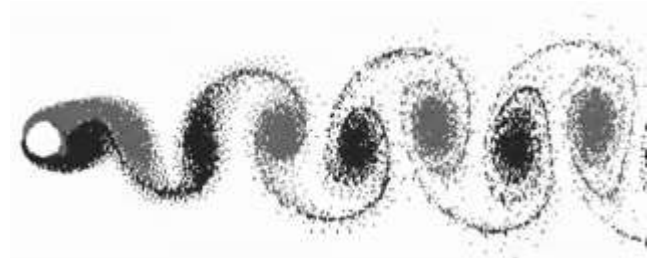
Medidores tipo Vortex

Um efeito observado todo dia

Medidores de Vazão Vortex

A ser observado todo dia

- A geração de vórtices ocorre naturalmente na natureza e pode ser observada em bandeiras em mastros. O mastro age como uma interferência e a geração de vórtices ocorre. Com a velocidade do vento aumentando, a geração de vórtices também aumenta e faz com que a bandeira se movimente mais (frequência maior).
- Ou quando um avião decola, você pode ver vórtices nas pontas das asas.
- Ou como Leonardo da Vinci já fez no ano de 1510 dentro de um duto sobre uma ponte na água.

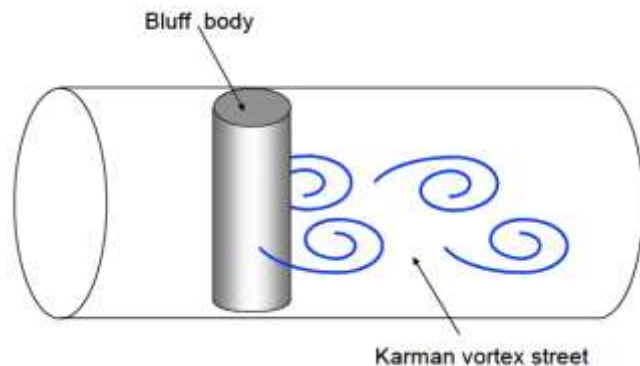


Um fenômeno diário

Medidores de Vazão Vortex

Um fenômeno natural explicado

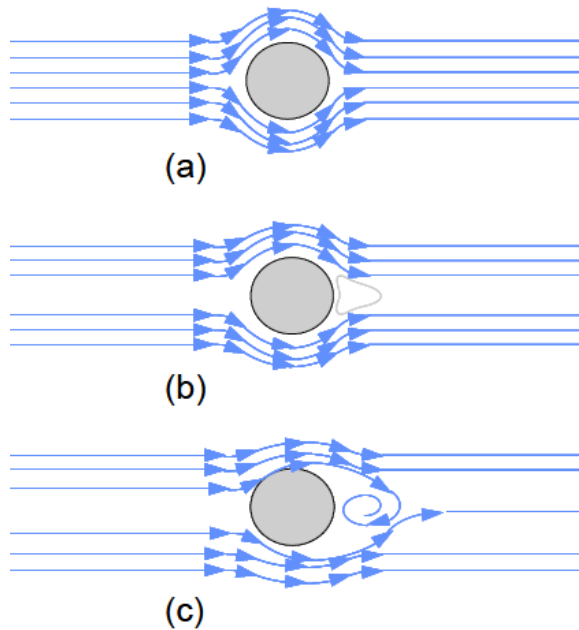
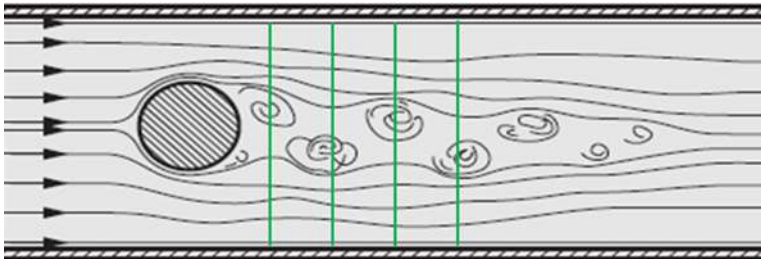
- Medidores Vortex são baseados no fenômeno conhecido como geração de vórtices. Isto ocorre quando um meio com vazão **turbulenta** (líquido, gás ou vapor) atinge um obstáculo (**bluff body**).
- Devido ao fluido ser incapaz de fluir pelos contornos do obstáculo, as camadas periféricas do fluido se separam de suas superfícies e geram vórtices em áreas de baixa pressão atrás do obstáculo.
- Estes vórtices são varridos para a jusante para formar o **Karman Vortex Street** (Theodore von Kármán em 1911 descreveu um critério de estabilidade para o conjunto de vórtices). Vórtices são gerados alternativamente de cada lado do obstáculo em uma frequência que, dentro de uma faixa do número de Reynolds, é proporcional à média da vazão na tubulação.
- Em medidores vortex, a alteração da pressão diferencial que ocorre conforme os vórtices são gerados, normalmente é utilizada para acionar um sensor em uma frequência proporcional à excitação dos vórtices e a vazão.



Medidores de Vazão Vortex

Um fenômeno natural explicado

- Formação dos Vórtices:
 - a) Região de escoamento laminar fluindo igualmente ao redor do corpo
 - b) Em altas velocidades, a região de baixa pressão começa a se formar atrás do obstáculo
 - c) Com o início da região turbulenta, há início a geração de vórtices.
- Estes vórtices usualmente não desejados são utilizados como a base para a medição dos transmissores vortex.
- Cada seção entre os vórtices representa um volume pré-definido.



Vortex é uma medição de vazão verdadeiramente volumétrica

Medidores de Vazão Vortex

O design do shedder bar (bluff body)

- Vários tipos:

- a) redondo

- b) retangular

- c) retangular duas partes

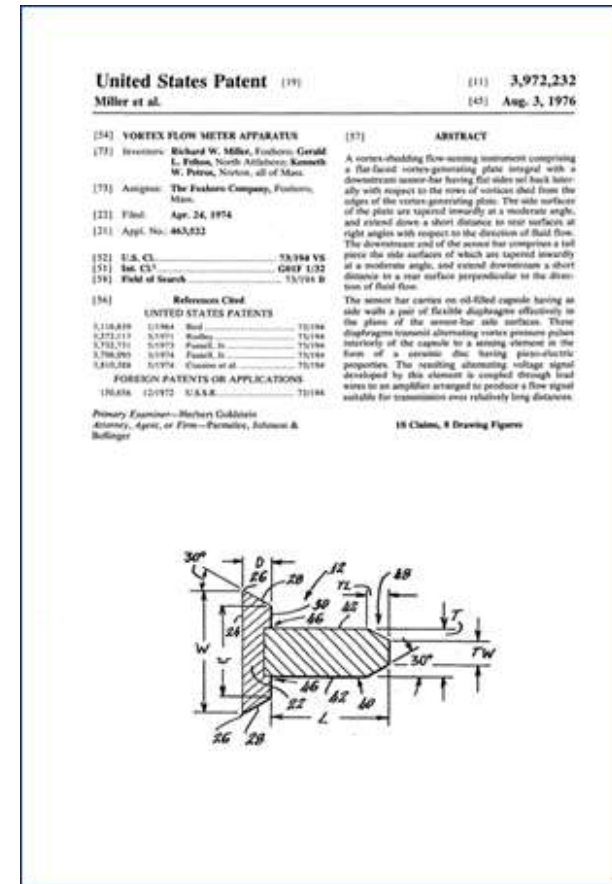
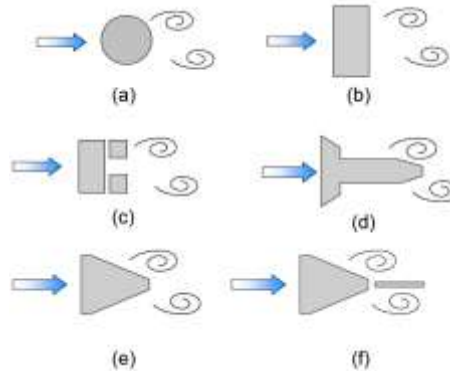
- d) Formato Tê

- e) + f) Formato Delta

- O Formato Shedder patenteado pela Foxboro em 1976, foi criado em 1974.

- Formato Tê combina a melhor performance dos formatos Delta e retangular duas partes.

- O formato Tê resulta em linearidade excelente com alta amplificação hidráulica através das bordas e precisão no ponto de geração dos vórtices.



Medidores de Vazão Vortex

O número de Strouhal

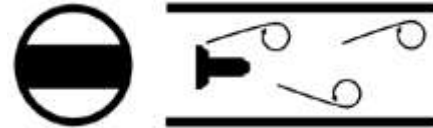
- Em 1878, Vincent Strouhal descreveu a relação entre a frequência de geração de vortex e a velocidade do fluido, que é dada por:

$$St = \frac{f \cdot d}{U} \quad \text{ou} \quad U = \frac{f \cdot d}{St}$$

Onde:

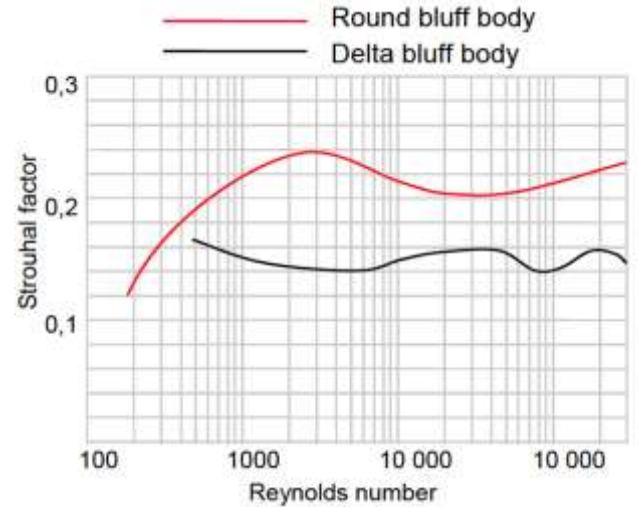
- f = Frequência do Vortex (Hz)
 - d = diâmetro do obstáculo (m)
 - U = velocidade do fluido (m/s)
 - St = Fator Strouhal (adimensional)
- Estudos iniciais foram realizados com vazão em canais sem restrição e foi observado mais tarde que a geração de Vortex também ocorria em vazão confinada, como tubulações existentes (ver figura abaixo). Para este caso, a média da velocidade do fluido \bar{U} , e o número de Strouhal do medidor St' , substituem a velocidade do fluido e o número de Strouhal como:

$$\bar{U} = \frac{f \cdot d}{St'}$$



- Desde que a seção de área (A) de uma tubulação é fixa, é possível determinar o fator K do medidor de vazão que relaciona a vazão volumétrica (Q) com a frequência de geração de vortex.

$$Q = A \times \bar{U} \quad \text{resulta em} \quad Q = \frac{f}{K}$$



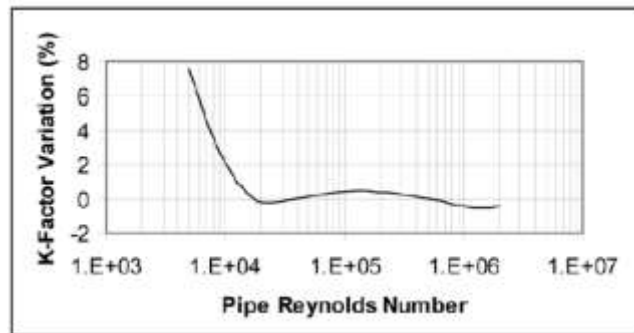
Medidores de Vazão Vortex

Fator K

- Para um medidor Vortex, um obstáculo é escolhido de tal forma que produzirá um **fator K constante** dentro de uma faixa representativa de números de Reynolds. Então, simplesmente contando os vórtices que são gerados em um tempo dado e dividindo este valor pelo fator K, é possível obter a vazão volumétrica instantânea.

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

- A variação do fator K sobre uma faixa específica do número de Reynolds, em alguns casos, é chamada de linearidade.
- Além disso, a frequência não é afetada pela densidade do meio, viscosidade, temperatura, pressão e condutividade, desde que o número de Reynolds (Re) fique dentro dos valores definidos.
- Conseqüentemente, independentemente do medidor ser utilizado para medições de líquidos, gases ou vapores, este terá virtualmente a mesma característica de calibração e o mesmo fator de medição, embora não necessariamente as mesmas vazões volumétricas e as mesmas faixas de velocidade.



Medidores de Vazão Vortex

Vantagens do Medidor Vortex

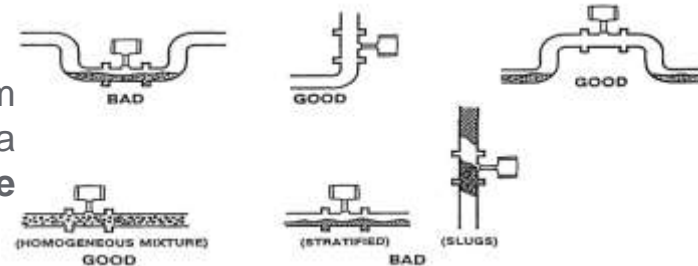
- Medidor de Vazão verdadeiramente Volumétrico
- Exatidão como **% do valor** vs. % do Span
- **Baixo custo de ownership**
 - Custo de aquisição baixo
 - Instalação fácil
 - Excelente durabilidade e confiabilidade
 - Tolerância a desgaste se comparado à Placas de Orifício e medidores Turbina
 - Perda de pressão permanente é cerca de 50% de uma placa de orifício
- **Alta rangeabilidade** para vazão se dimensionado corretamente
 - 40:1 tipicamente para líquidos
 - 20:1 tipicamente para gás/vapor
- **Poucas juntas** para emissões fugitivas
- **Sem partes móveis**, que significa sem custos de manutenção
- **Alta aplicabilidade**, cobrindo líquidos, gases e vapores



Medidores de Vazão Vortex

Medição de Vazão Vortex para Gás

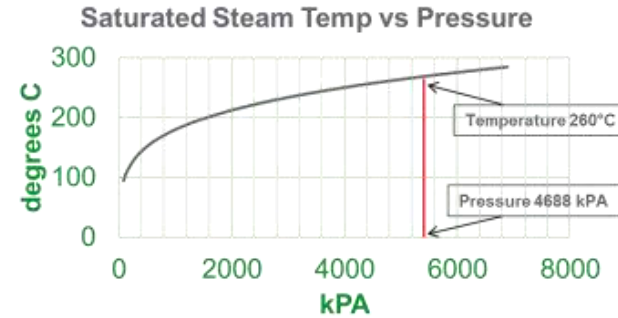
- **Gases e Vapores** são fluidos compressíveis e, portanto, as unidades de vazão são mais complexas devido ao fato de não ser aceito usualmente unidades de volume atual informados diretamente pelo Vortex.
- A única forma sensata de se comparar vazão de gases em diferentes temperaturas e pressões é relacionando todos para “Condições Base” comuns. Também conhecidas como **Volume Normalizado** ou **Volume Standard**.
- Infelizmente, não há uma base Universal para Pressão e Temperatura Base. Bases Americanas/Imperiais e Européias são diferentes e, para tornar isto pior, Europa utiliza Normalizado M3 e Standard M3, os quais utilizam valores diferentes. Sempre pergunte ao cliente quais as condições Base (uma boa Engenharia sempre colocará isto na sua folha de especificação).
- ou converta volume para “**Massa**”



Medidores de Vazão Vortex

Medição de Vazão Vortex para Vapor Saturado

- Medição de Vapor Saturado:
 - Este é o vapor que está totalmente vaporizado, mas que não foi aquecido a uma temperatura acima do ponto de ebulição.
 - Em Vapor Saturado, a relação entre Pressão e Temperatura é fixa. Portanto, se você sabe a temperatura, você sabe a pressão e vice-versa. Veja gráficos à direita.
 - Vapor Saturado é normalmente monitorado ou controlado por Massa ao invés de Volume, a saída do vortex deve ser compensada para mudanças de densidade por temperatura. Isto requer uma medição de temperatura adicional, bem como um computador de vazão para determinar a vazão mássica do vapor. Com uma medição de temperatura integral e um computador de vazão para vapor, o modelo 84C é uma solução completa e consideravelmente menos custosa que disponibiliza a vazão mássica para vapor saturado.



Medidores de Vazão Vortex

Medição de Vazão Vortex para Vapor Saturado

- O medidor Vortex com sensor de temperatura integrado gera 2 variáveis, **Vazão Volumétrica e Temperatura**. O computador de vazão integrado com curvas de vapor podem calcular a **Densidade e a Vazão Mássica para Vapor Saturado**.



Sensor pT100 e poço integrados

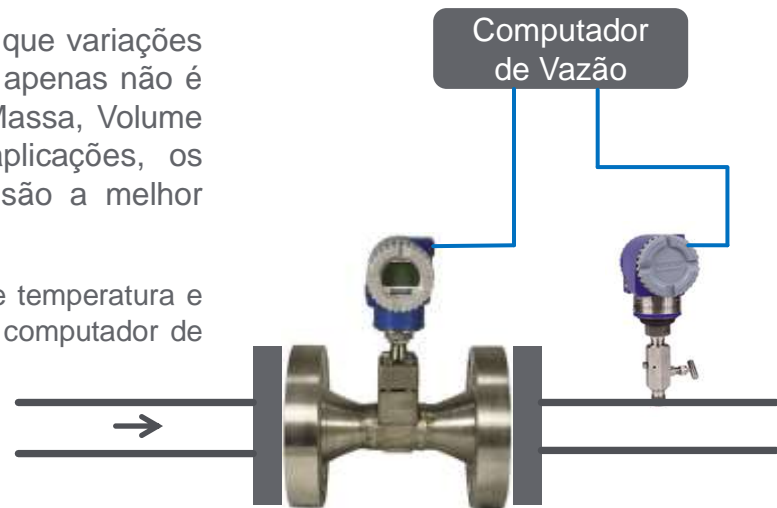


Medidores de Vazão Vortex

Medição de Vazão Vortex para Vapor Superaquecido

- Medição de Vapor Superaquecido

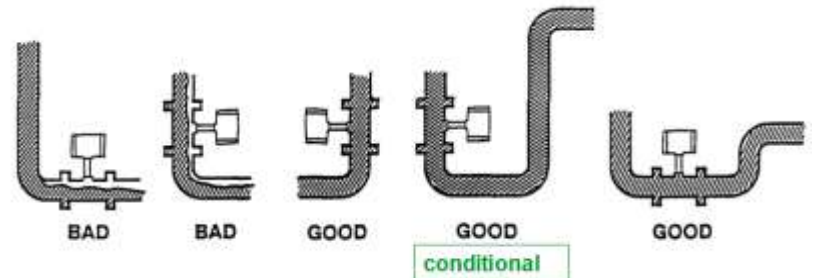
- Este é o Vapor que foi totalmente vaporizado e aquecido para uma temperatura acima do ponto de ebulição.
- Em Vapor Superaquecido, as condições de processo são tais que variações de pressão ocorrem no meio e uma medição de temperatura apenas não é suficiente para converter a Vazão Volumétrica de Gás para Massa, Volume Normalizado ou vazão mássica de Vapor. Para estas aplicações, os medidores Vortex em conjunto com computador de vazão são a melhor opção.
- Por exemplo, você pode pegar um Vortex com compensação de temperatura e um transmissor de Pressão externo e enviar os sinais para um computador de vazão externo.



Medidores de Vazão Vortex

Medição de Vazão Vortex para Líquidos

- Unidades de vazão de líquidos são normalmente mais fáceis. Na maioria dos casos, a unidade será volume atual, isto é, m³, litros, galões (U.S. ou U.K.), pé³, barris, etc.
- O maior problema associado com medição de líquidos é a viscosidade, a qual afeta o número de Reynolds e a mínima vazão linear do medidor.
- Fluidos:
 - Líquidos Limpos, viscosidade < 15cp
 - Líquidos sujos, limitados pelo design
 - Líquidos corrosivos
 - Fluidos não condutivos como hidrocarbonetos
 - Alta pressão estática até 1500# / PN160



Medidores de Vazão Vortex

Vantagens Vortex

- Contra Placa de Orifício:
 - Exatidão maior e maior faixa de operação
 - Menos suscetível a desgaste
 - Menor perda de carga, tipicamente < 50%

Menor custo de ownership

- Contra Medidores Turbina:
 - Sem partes móveis
 - Menos manutenção/ menor custo de ownership
 - Menos sensível a fluidos sujos
 - Menor danos devido ao alto momento das colisões das rotações

Sem manutenção mecânica



Medidores tipo Coriolis

O mais preciso

Medidores de Vazão Coriolis

Por que utilizamos medidores de vazão mássicos?

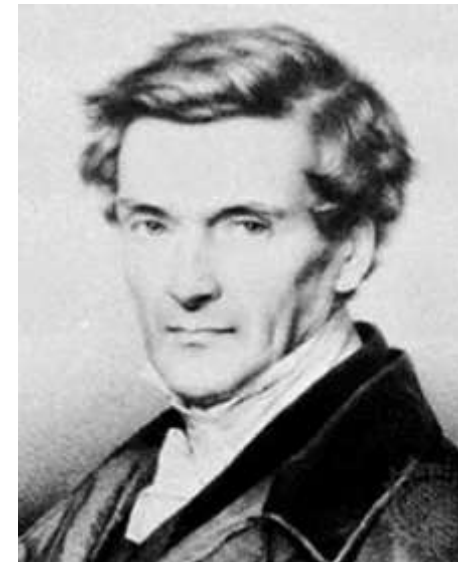
- A maioria das reações químicas são baseadas na relação de massa. Consequentemente, ao medirmos a vazão mássica do produto, é possível controlarmos o processo de forma mais precisa. Além disso, as componentes podem ser gravadas e totalizadas em termos de massa.
- **Vazão Mássica** é a unidade primária de vazão e não é afetada pela viscosidade, densidade, condutividade, pressão e temperatura. Sendo assim, é inerentemente mais precisa e significante para medição de transferência de material.
- Tradicionalmente, vazão mássica tem sido medida inferencialmente. Vazão Eletromagnética, placas de orifício, turbina, ultrassônico, venturi, vortex, etc. são princípios que medem a vazão em termos da sua velocidade de escoamento através da linha e combinam esta variável à temperatura e densidade para cálculo da massa. Contudo, tais métodos indiretos normalmente resultam em sérios erros na medição de vazão mássica.



Medidores de Vazão Coriolis

Efeito Coriolis

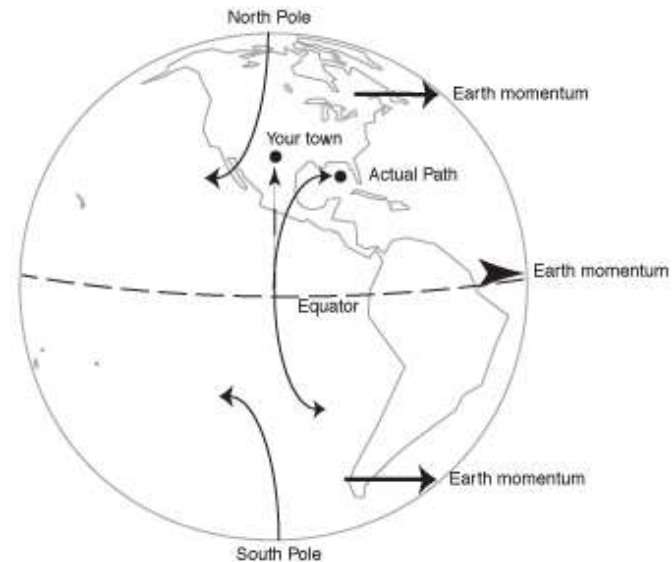
- Este medidor é baseado no chamado efeito Coriolis, nomeado assim pelo **cientista e matemático francês Gustave-Gaspard de Coriolis (1792-1843)**. Ele descreveu a força inercial que atua sobre os objetos que estão em movimento em relação a um sistema de referência em rotação.
- O **efeito Coriolis** existe apenas quando utilizamos **um sistema de referência em rotação**. Em um sistema em rotação, ele se comporta exatamente como uma força real (ou seja, causa aceleração e tem efeitos reais). Contudo, a força Coriolis é uma consequência da inércia e não é atribuível a um órgão originário identificável como é o caso das forças eletromagnéticas ou nucleares.
- Do ponto de vista analítico, para utilizarmos a 2ª lei de Newton em sistemas rotativos, a força Coriolis é matematicamente necessária, porém a mesma desaparece em um sistema de referência inercial que não possui aceleração.



Medidores de Vazão Coriolis

Explicação para força Coriolis

- Qual é a relação desta força com o medidor Coriolis que conhecemos?
- Pegue a Terra como sistema rotativo de referencia e caminhe sobre um dos meridianos do polo norte ao polo sul. No polo norte você não sofre nenhuma influencia do da velocidade de rotação da Terra. Durante sua caminhada do norte para o sul, seu movimento retilíneo está direcionado ao sul, contudo, devido a velocidade de rotação da Terra, sua própria velocidade de rotação chega a um máximo de 40.000 km/dia se você chegar na linha do equador. O fato de você estar acelerando (perpendicularmente a sua trajetória) significa que uma força esta agindo. Esta força não existiria se você estivesse parado, apenas em movimento. Somente se você se mover para o sul ou para o norte a aceleração existirá. Se movendo do norte para o sul, ainda no hemisfério norte, a força Coriolis aponta para a direita. Após cruzar o equador, você sofrerá um atraso, indicando que a força Coriolis no hemisfério sul aponta para a esquerda.

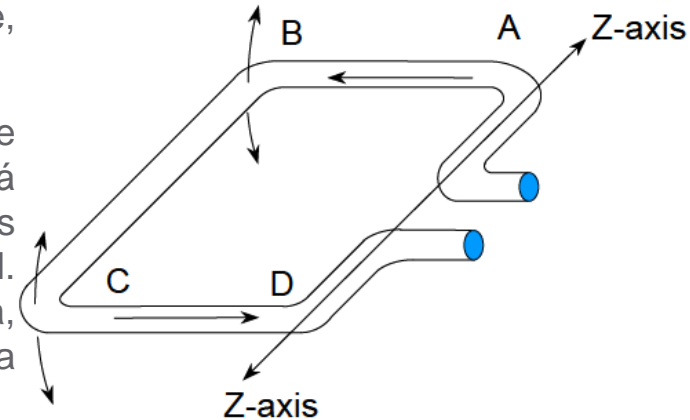


Importante: Sem movimento (sem vazão), sem força Coriolis. Com massa em movimento (vazão) → Força Coriolis

Medidores de Vazão Coriolis

Explicação para força Coriolis

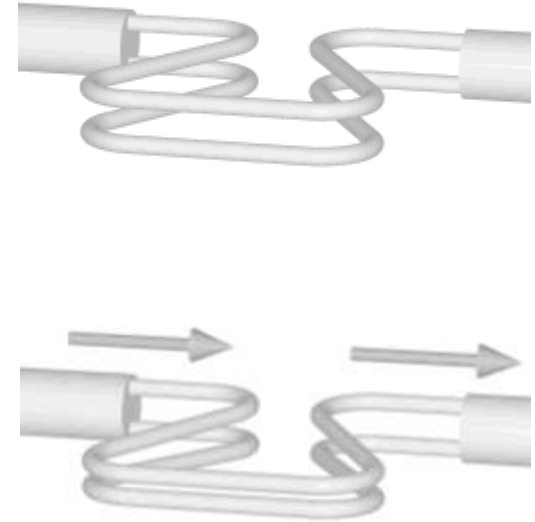
- O perfil ao lado é o mais simples para medidores Coriolis. O fluido passa por dentro do tubo e o tubo oscila em relação ao eixo Z. As seções A:B e C:D oscilam formando um arco e, se não há vazão, estes arcos ficam paralelos.
- Se há vazão, há partículas indo de A para B, sendo A uma zona de baixa velocidade e B uma zona de alta velocidade rotativa. Isto irá criar uma força de Coriolis em direção oposta ao movimento, pois as partículas devem ser aceleradas em oposição a sua massa inercial. Do mesmo modo, haverá partículas indo de C para D, ou seja, partículas saíam de um ponto de alta velocidade C para baixa velocidade rotativa D.
- Como resultado da força de Coriolis, a oscilação do lado A:B será desacelerada e do lado C:D será acelerada. Isto resultará um atraso no lado A:B e num avanço no lado C:D. A distorção é linearmente proporcional a vazão mássica.



Medidores de Vazão Coriolis

Explicação para força Coriolis

- A maioria dos medidores Coriolis possuem dois tubos paralelos. Estes estão conectados às flanges e são excitados por uma bobina, no centro, que os coloca em movimento.
- Pegue o mesmo exemplo anterior da viagem entre os polos norte e sul. O equador ficaria no centro dos tubos.
- Sem vazão não há força Coriolis e a vibração dos tubos é simétrica.
- Entretanto, quando há massa escoando através dos tubos, existe uma força reativa oposta em cada um dos lados dos tubos. Esta força faz os tubos oscilarem fora de fase. Essa oscilação de fase é proporcional a vazão mássica.



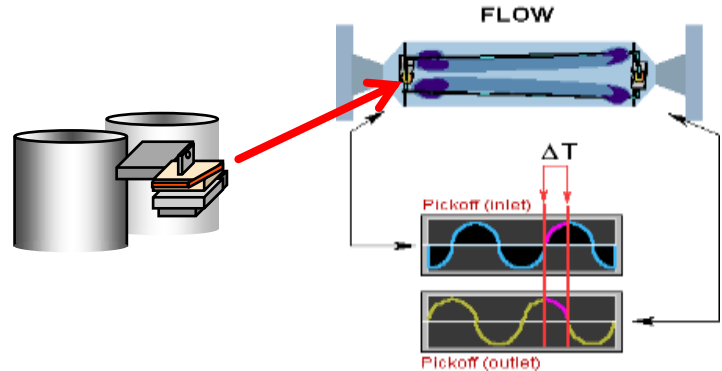
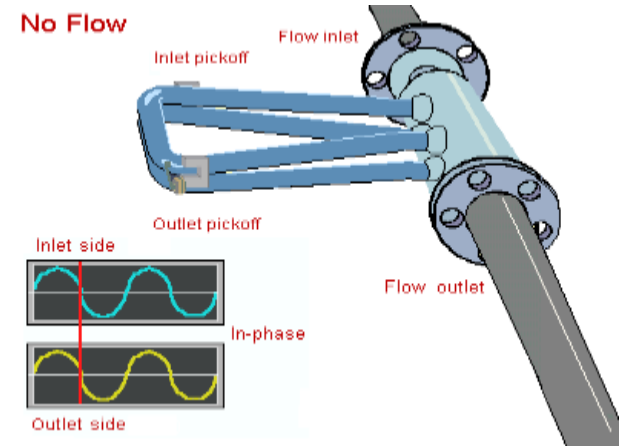
Medidores Coriolis não são medidores de velocidade nem volumétricos, mas sim verdadeiros medidores mássicos.

Medidores de Vazão Coriolis

Explicação para força Coriolis

- **Sem vazão**
- **Sem força Coriolis!**
- Os tubos oscilam em fase (simetricamente).

- **Vazão**
- **Força Coriolis**
- Tubos oscilam **fora de fase!**



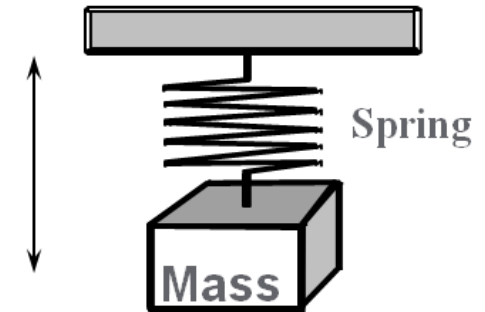
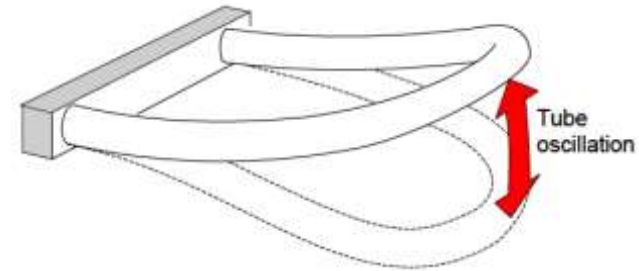
Medidores de Vazão Coriolis

Medição de densidade explicada

- Ainda tem mais! **Densidade**
- O sensor do medidor Coriolis é um conjunto massa-mola apoiado.
- É similar ao **massa única, sistema dinâmico de massa única** mostrado ao lado
- Esse sistema dinâmico possui uma **frequência natural de oscilação** descrita por:

$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(mola)}{m(tubo) + m(fluido)}}$$

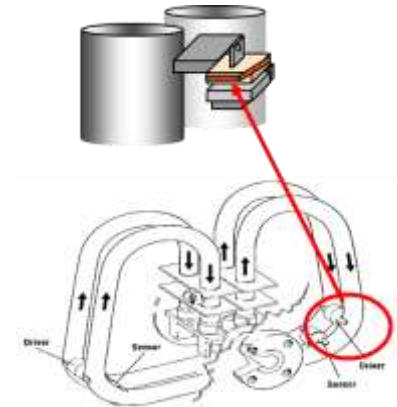
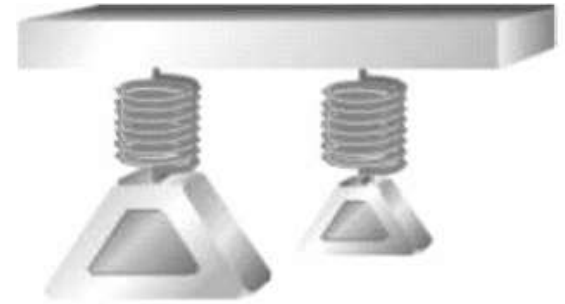
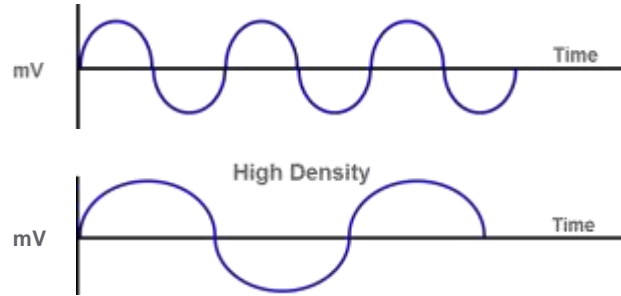
Medidores Coriolis podem ser utilizados como medidores de Densidade



Medidores de Vazão Coriolis

Medição de densidade explicada

- Diferentes **Densidades** possuem diferentes frequências de oscilação.
- **Baixa densidade:** Alta frequência de oscilação
- **Alta densidade:** Baixa frequência de oscilação
- Durante a medição os tubos entram em sua frequência ressoante. Isto em conjunto com a massa dos tubos + a massa do fluido, permite que o Coriolis meça a densidade do fluido.

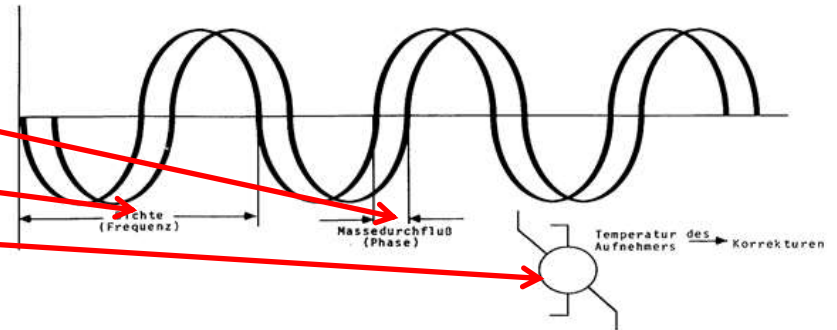


Medidores de vazão Coriolis podem medir vazão mássica e densidade

Medidores de Vazão Coriolis

Mais medições

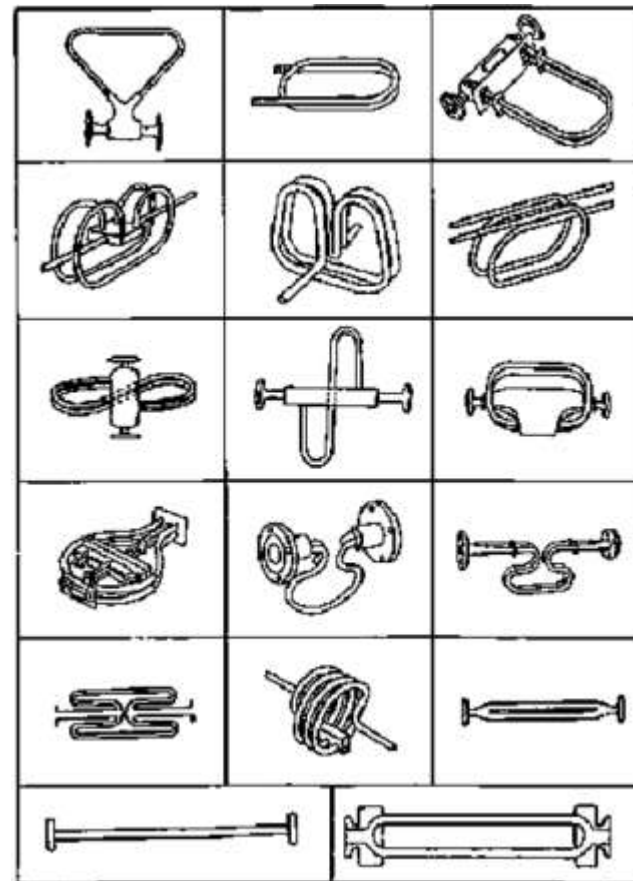
- Todos os medidores Coriolis possuem medição de temperatura integrada como referência para densidade.
- 4 medições estão geralmente disponíveis como saída nos medidores Coriolis, incluindo o volume calculado.
 - Vazão mássica (Mudança de fase – ΔT)
 - Densidade (frequência ressoante)
 - Temperatura (Pt 100)
 - Vazão Volumétrica



Medidores de Vazão Coriolis

Vários designs de tubo

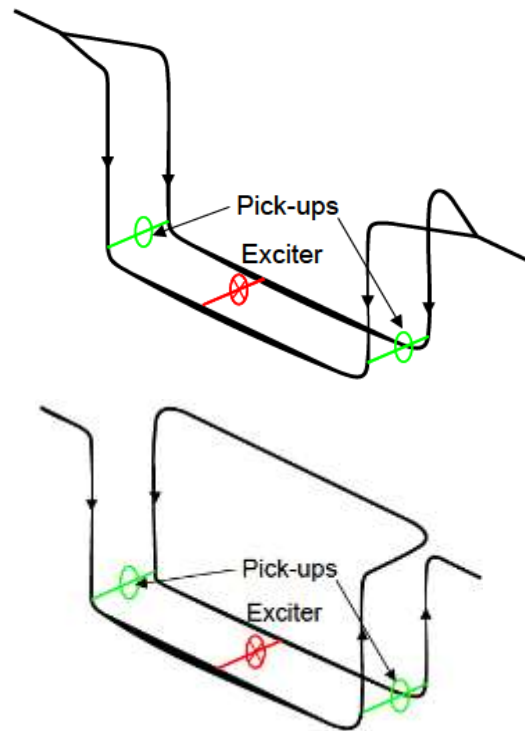
- Existem vários layouts para os tubos do Coriolis e cada um possui seus prós e contras, dependendo da aplicação.
 - Forma Ômega
 - Forma U
 - Triangular
 - Forma S
 - Forma O
 - Tubo Reto
 - Etc.



Medidores de Vazão Coriolis

Vários designs de tubo

- Arranjo paralelo:
 - A desvantagem deste arranjo está relacionada a divisão e posterior junção do fluxo, fato que introduz uma perda de carga significativa.
 - O fluxo pode não se dividir por igual, o que pode gerar desbalanceamento nos tubos, especialmente se sólidos ou gases estiverem presentes no fluido.
 - O mesmo pensamento se aplica se o balanceamento da divisão de fluxo sofrer distúrbio pelo completo ou parcial bloqueio de uma das seções, levando a erros na medição.
- Arranjo Serial:
 - O comprimento total do tubo é consideravelmente maior e necessita, por isso, de uma maior área de seção transversal para reduzir a queda de pressão.
 - A maior área contudo, aumenta a rigidez do tubo, tornando o mesmo menos sensível ao efeito Coriolis em vazões baixas. Em altas vazões, contudo, a perda de carga é menor.
 - O tubo é fácil de drenar e limpar.



Medidores de Vazão Coriolis

Benefícios Gerais

Alguns dos muitos benefícios do Coriolis são:

- **Medição de vazão mássica direta**
- **Medição de vazão mais precisa**
- **Independente da:**
 - Pressão
 - Temperatura
 - Viscosidade
 - Densidade
 - Condutividade elétrica / térmica
- Alta rangeabilidade, até 100:1
- **Indiferente a mudanças no perfil de escoamento** (laminar ou turbulento)

- Sem reduções na tubulação
- **Exatidão: $\pm 0.1\%$ Líquidos ($\pm 0.5\%$ gases)**
- Medidores mássicos podem ser utilizados em uma grande variedade de fluidos sem necessidade de recalibração.



Novidades em vazão

O que o futuro nos trará?

Novidades em Vazão

O mercado hoje

- $\pm 50\%$ por Pressão Diferencial em conjunto com elementos primários, estável
- $\pm 20\%$ Magnéticos, estável
- $\pm 5\%$ Coriolis, tendência subindo forte
- $\pm 5\%$ Vortex, tendência subindo
- Outras tecnologias $\pm 20\%$



Novidades em Vazão

Aplicações Futuras

- Substituição de medidores mecânicos por métodos eletrônicos, devido à manutenção mecânica.
- Desenvolvimento no controle de processo de Vazão Volumétrica para Vazão Mássica. Por exemplo, as indústria químicas, vários meios são misturados para reagir um com o outro e, nestes casos, engenheiros de processo estão interessados em vazão mássica, pois volume não ajuda.
- Melhorias das técnicas gerais em tecnologias existentes, como melhorias na exatidão de medidores magnéticos e ultrassônicos.
- Introdução de instrumentos multivariáveis que combinem diferentes condições de pressão, temperatura e vazão em um só instrumento.
- O preço de compra, custos de instalação e custos manutenção serão analisados mais e mais, para que os custos de ownership também caíam e tecnologias mais caras se tornem interessantes.



Dúvidas?

Leandro Massaro

Business Development Manager, LAO
Field Devices
Industry Business
Foxboro by Schneider Electric

D +55 11 2165 5295
M +55 11 99782 4303
E leandro.massaro@schneider-electric.com
CustomerCare +0800 7289 110

Av. das Nações Unidas, 18.605
04753-100
São Paulo, SP
Brazil

A photograph of a man in a light purple shirt sitting at a desk in an office. He is smiling and looking towards the left. He has glasses on his head. In front of him is a laptop. To his right is a blue file cabinet with a pen holder containing several pens. The background is a blurred office environment with a window and some charts on the wall.

Obrigado

Life Is On

Schneider
Electric