



SENSORES E ACTUADORES

Medidas em escoamentos

J.R.Azinheira

Nov 2008

*Bibliografia: Sensores e Actuadores, J.R. Azinheira, 2002, IST-DEM
(disponível na página da UC em 'Material de Apoio' -> 'Bibliografia Complementar')*

ÍNDICE

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
 - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
 - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores

ÍNDICE

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
 - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
 - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores

4. Medidas em escoamentos

- definições
 - geometria aberta ou fechada
 - fluido incompressível ou compressível
 - viscosidade
 - equações
- medições locais
- caudais volumétricos
- caudais mássicos

Medidas em escoamentos

definições

- muito pouco está directamente palpável ou sensível e só constatado nos seus efeitos: as leis geralmente utilizadas são leis empíricas.
- três parâmetros são normalmente objecto de medições:
 - a **velocidade** do escoamento: velocidade local, função do espaço e do tempo; velocidade local estacionária, média da primeira no tempo; velocidade média V , média no espaço;
 - o **caudal volumétrico** Q , produto da velocidade média V pela área A perpendicular ao escoamento - expresso em m^3/s em unidades do SI;
 - o **caudal mássico** ϕ , produto do anterior pela densidade ρ do fluido - expresso em kg/s em unidades do SI.
- Outros parâmetros como a densidade, a temperatura, a viscosidade, a composição podem eventualmente ser medidos.

Medidas em escoamentos

definições

- geometria aberta ou fechada ?
- fluido incompressível ou compressível ?
 - incompressível: caudal volumétrico e mássico equivalentes $\phi = \rho Q$
 - número de Mach

$$M = \frac{v}{c}$$

- para velocidades pequenas, $M < 0.2$, o escoamento é considerado incompressível, obedecendo a leis simplificadas;
- para $0.2 < M < 1$, o escoamento compressível é subsónico;
- para $M > 1$ o escoamento é supersónico, com o aparecimento de ondas de choque e características totalmente diferentes.

Medidas em escoamentos

definições

- Viscosidade ?

- Em função do número de Reynolds, $Re = \frac{vL\rho}{\mu}$

compara forças de inércia no numerador e forças viscosas no denominador

- dois tipos de escoamentos:

- para baixos valores de Re , essencialmente viscoso, o escoamento é dito laminar;
- para elevados valores de Re , dominado pelas forças de inércia, o escoamento é dito turbulento.

Medidas em escoamentos definições

- Em laminar, as partículas de fluido seguem as linhas de corrente (LC).
- O perfil de velocidades, em regime estabelecido, é parabólico.
- Em turbulento, a linha de corrente é uma simples média.
- A velocidade flutua em torno do valor médio.
- Os gradientes de velocidade junto da parede são muito mais elevados.

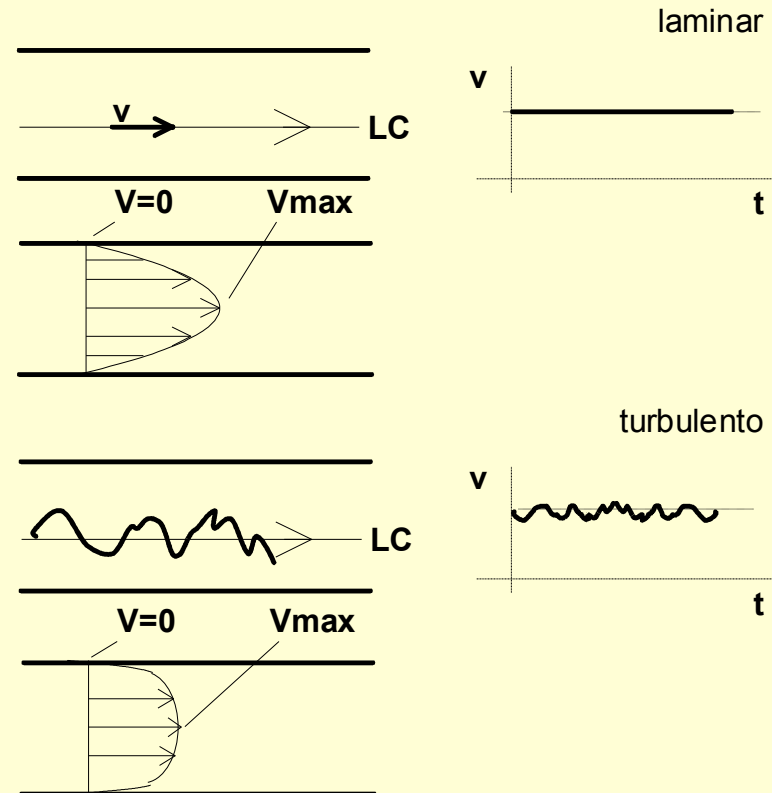


fig. escoamentos laminar e turbulento



Medidas em escoamentos

definições

- A definição do comprimento de referência L e a transição laminar-turbulento dependem da geometria:
 - em geometria aberta:
 - L é o comprimento desde o bordo de ataque, Re é então local,
 - a transição efectua-se para 10^5
 - em geometria fechada:
 - L é dado por $4A/P$, onde A é a área transversa e P o perímetro molhado. Para tubos de secção circular $L = D$
 - a transição laminar-turbulento ocorre para 2000.

Medidas em escoamentos

definições

- Equações

- conservação de massa,
equação de continuidade:

$$\phi = \text{cste} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

- conservação de energia,
equação de Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh = \text{cste}$$

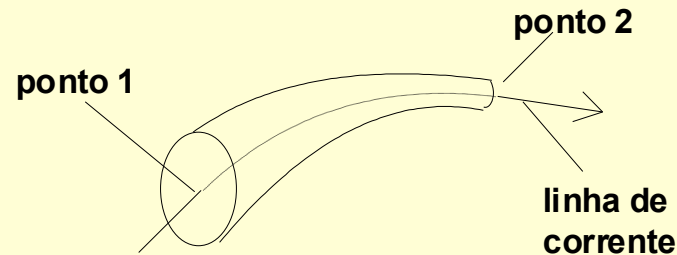


fig. ao longo de uma linha de corrente
-conservação da massa e da energia

– incompressível

– compressível

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{cste}$$

$$p + \rho \frac{V^2}{2} = \text{cste} = p_t$$

Medidas em escoamentos

medições locais

- O objectivo de medições locais pode ser:
 - medições do valor local da velocidade
 - medição representativa do escoamento.
- A medição é considerada local se as dimensões da sonda são pequenas em relação ao gradiente e à geometria do escoamento.



Medidas em escoamentos medições locais

- tubo de pitot
- anemometria de fio quente
- anemometria laser Doppler (LDA)

Medidas em escoamentos

tubo de pitot

- Um tubo de pitot é uma sonda de dimensões pequenas, a partir
 - da pressão total, obtida no orifício frontal e
 - da pressão estática em orifícios laterais, perpendiculares ao escoamento,

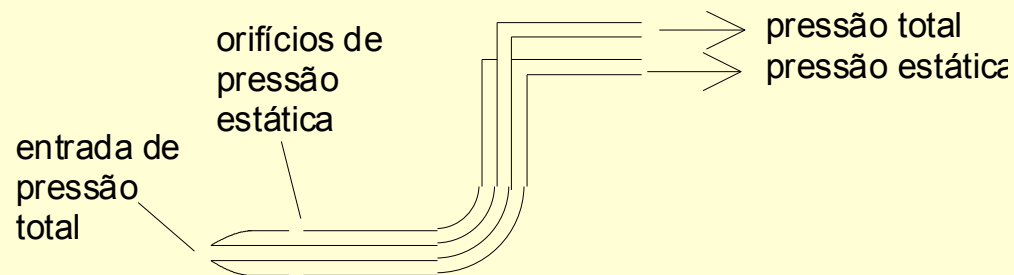


fig. sonda Pitot -pressões total e estática

- pressão dinâmica, detectada por um sensor de pressão diferencial

Medidas em escoamentos

tubo de pitot

- Cuidados a ter com medições Pitot:
 - i) a **geometria da sonda** e a localização e forma dos orifícios da tomada de estática têm grande influência nos resultados e obedecem a regras estritas;
 - ii) o **alinhamento da sonda** com o escoamento tem que ser cuidado, para não perturbar e para não fornecer medidas erradas -devido ao ângulo de incidência;
 - iii) em **subsónico compressível**, a equação de Bernoulli deve ser substituída, introduzindo-se o número de Mach:

$$p_t = p \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \approx p + \rho \frac{V^2}{2} \left(1 + \frac{M^2}{4} \right);$$

- para o supersónico, sonda e equações são diferentes;
- iv) a densidade ρ , em particular, é **função da temperatura**;
- v) a medição é local: é necessário um modelo do escoamento ou calibração para se obter o caudal.

Medidas em escoamentos

tubo de pitot

- factor de recuperação K da pressão dinâmica, função da geometria

$$p_t = p \left(1 + K \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

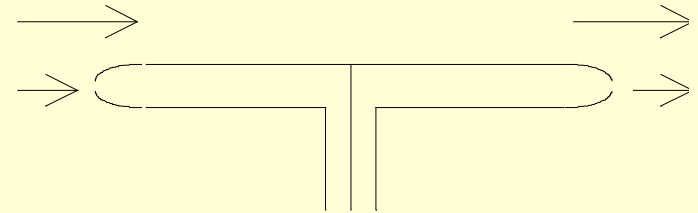


fig. sonda fore-and aft

Exemplo de características de sondas de Pitot:

	Prandtl	fore-and-aft
coef. de recuperação K	1	1.8
velocidade máxima M_{\max}	0.26	
âng. incidência máx.	20	°
precisão	1	%
temperatura de operação	-20..600	°C
fluido	ar, gás, água	
dimensões (diam.)	2..25	mm
material	latão, aço inoxidável	

Medidas em escoamentos

fio quente

- Um fio quente introduzido no escoamento: o calor produzido W é levado pelo fluido por convecção:

$$W = Ri^2 = hA(T_R - T_f)$$

- A a área, T_R temperatura da sonda, T_f temperatura do fluido e h o coeficiente de convecção:

$$h = C_0 + C_1\sqrt{v}$$

- A relação entre a intensidade i e a velocidade v é

$$i^2 = C_2 + C_3\sqrt{v}$$

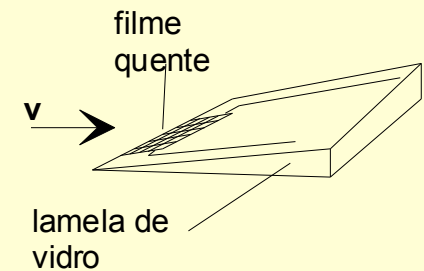
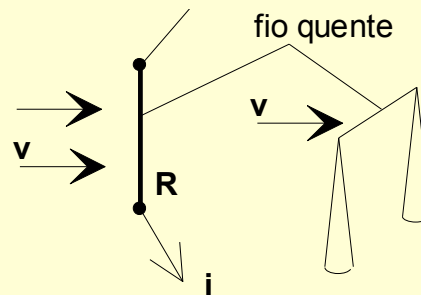


fig. anemometria de fio quente

Medidas em escoamentos

fio quente

- Notas:
 - i) a medição é sensível ao **alinhamento da sonda**;
 - ii) a **sonda é frágil** e deve ser escolhida em função do fluido;
 - iii) com **líquidos condutores**, pode desencadear-se um processo de electrolise, falseando as medidas;
 - iv) a altas velocidades, o escoamento induz **vibrações** do fio: uma solução consiste em trocar o fio por um filme condutor
- O material do fio pode ser platina, uma liga de platina ou tungsténio. Dimensões usuais rondam os $25\text{mm} \times 25\mu\text{m}$ (diam).
- Medições em gases cobrem a gama 0.1..500 m/s, para temperaturas até 750°C. Em líquidos as velocidades são menores, 0.01..5 m/s com fio quente, até 25 m/s com filme quente.
- A anemometria de fio quente permite medições com uma precisão melhor que 1% e com tempos de resposta permitindo ter acesso às flutuações do regime turbulento (≈ 1 ms).

Medidas em escoamentos

anemometria Laser

- O princípio físico:
 - **feixe laser** (de árgon Ar tipicamente) **divido em dois** e focalizado por uma lente
 - no cruzamento cria-se uma pequena zona (\sim milímetro) de **interferências**;
 - **partículas** imersas no fluido (gotas, partículas eventualmente injectadas como fumo de cigarro) ao passarem pelas zonas claras/escuras (**franjas**) reflectem a luz com uma frequência proporcional à velocidade (v)
 - um fotosensor mede a **intensidade luminosa reflectida**
 - o computador efectua a **FFT**, fornece a frequência e logo a velocidade pretendida.

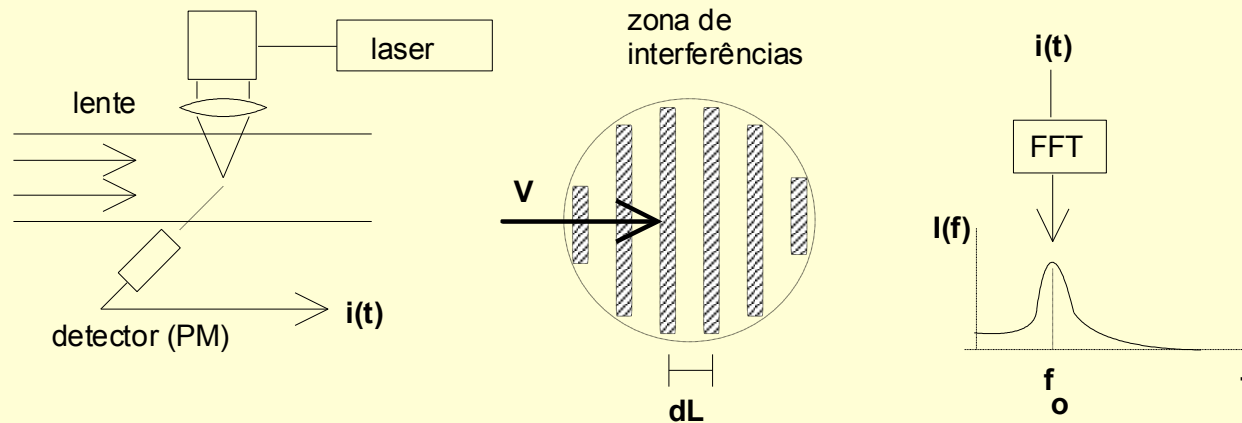


fig. anemometria laser

Medidas em escoamentos

anemometria Laser

- Entre as vantagens da anemometria laser, citemos:
 - não intrusão;
 - boa resolução espacial;
 - gama relativa de 1:100 000;
 - a possibilidade de obter duas componentes em simultâneo, com dois feixes laser (as duas frequências do laser Ar) focalizados em perpendicular no mesmo ponto;
 - há uma medição da dispersão da velocidade;
 - precisão $<1\%$.

Medidas em escoamentos

anemometria Laser

- Entre os inconvenientes:
 - ajuste, alinhamento e tratamento são complexos e onerosos;
 - as partículas podem não acompanhar o escoamento;
 - medições essencialmente em estacionário;
 - se houver gradientes de temperatura, eles desviam os feixes laser, perturbam o alinhamento e resulta uma certa imprecisão espacial;
 - fluido e tubo devem ser transparentes;
 - é uma técnica de laboratório, i.e. não tipicamente industrial.

Caudal volumétrico

- pressão diferencial
- pressão diferencial em laminar
- sensor magnético
- medição por arrasto
- medição por ultra-sons
- velocidade por turbina
- velocidade por detecção de vórtices

- geometria aberta

Caudal volumétrico pressão diferencial

- O escoamento ao passar na obstrução:
 - a redução da área
 - aumenta a velocidade
 - e reduz a pressão estática

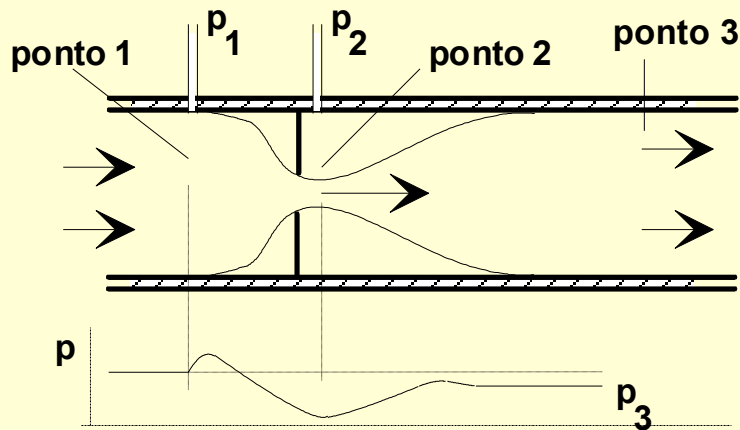


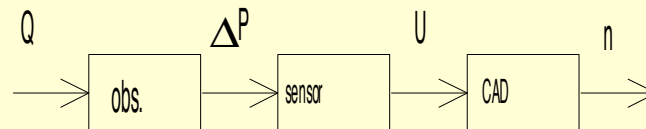
fig. passagem por uma obstrução

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Caudal volumétrico pressão diferencial

- Diagrama de blocos:



– relação pressão caudal

$$Q = \frac{CA_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

o coeficiente C é objecto de calibração

Caudal volumétrico pressão diferencial

Outras geometrias de orifícios:

- melhor coeficiente
- menor perda de carga ($p_3 - p_1$)

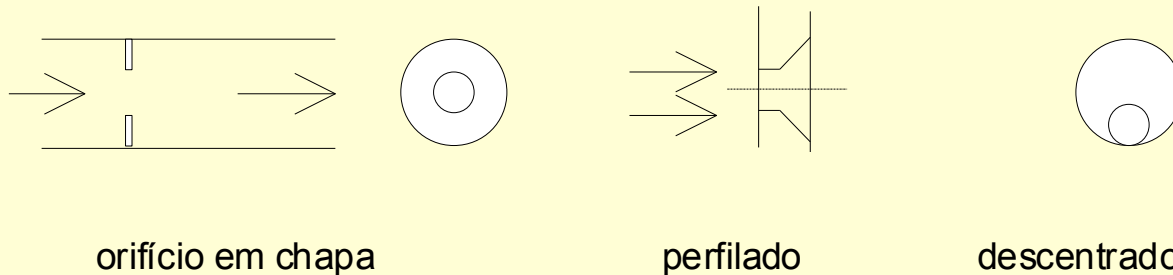


fig. variação de pressão com obstruções simples

Caudal volumétrico pressão diferencial

- Outras geometrias:

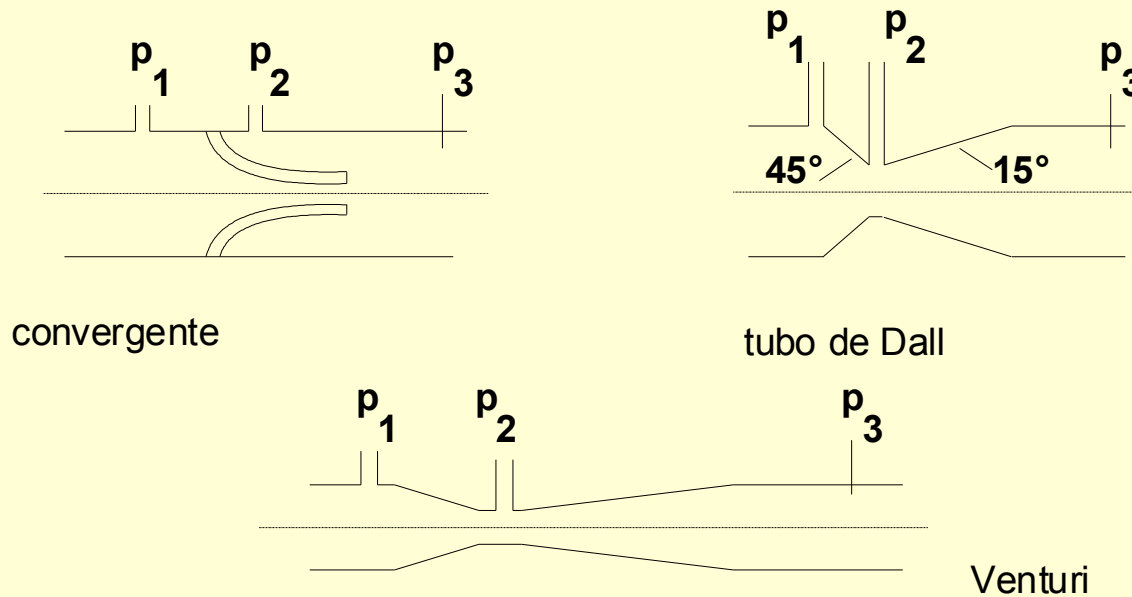


fig. outras geometrias

Caudal volumétrico pressão diferencial

Comentários:

- solução industrial comum
- fiável
- saídas frequentemente normalizadas em 4-20mA

Tabela comparativa das medições por obstruções

	orif.	conv.	venturi	Dall	
precisão	1..2	0.9..1.5	0.75	1	%
sensibilidade (Δp)	200	160	40	50	Pa
perda de pressão ($p_3 - p_1$)	60	40	10	10	%
coeficiente C	0.6		0.96		
custo	-	++	+++	++	

Caudal volumétrico pressão diferencial em laminar

Em laminar, o sensor equivalente
é linear

$$\Delta p = C\mu LV$$

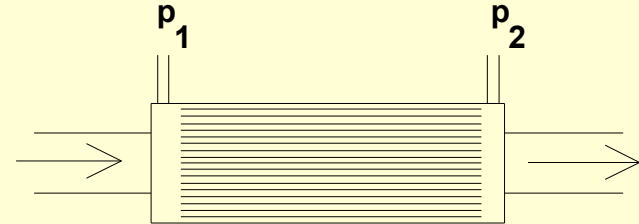


fig. variação de pressão em laminar

medição de caudal por queda de pressão em laminar

gama de caudais	1..200	l/min
fluido	ar ou gases	
Δp nominal	10..100	Pa
pressão estática máxima	1	bar
Reynolds máximo	$10^5..10^7$	
material	Alumínio, inox, latão, silicone	
dim. (tubular: 200 l/min)	15x270	mm(diam.)× mm
dim. (placas: 2 l/min)	255×30×30	mm
dim. (placas: 200 l/min)	585×65×48	mm

caudal volumétrico sensor magnético

Princípio físico:

- a força de Lorentz desvia as cargas ao passar num campo magnético
- aparece um ddp proporcional à velocidade média

$$e_o = k B l v$$

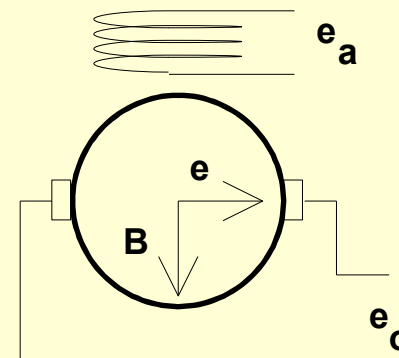
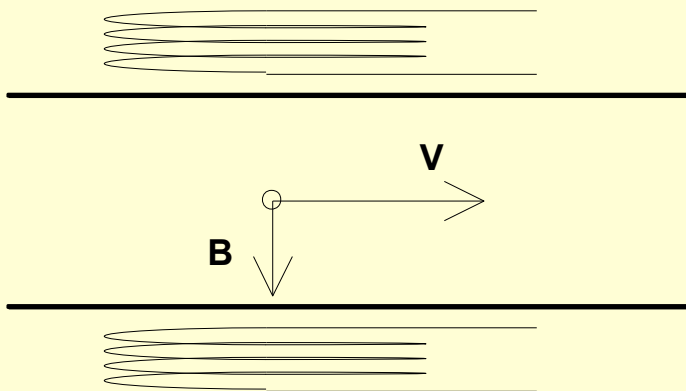


fig. medição de caudal por princípio magnético

Caudal volumétrico sensor magnético

- Características:
 - **solução não intrusiva;**
 - **bidireccional;**
 - **insensível** a variações de **temperatura** (se não variar a condutividade do fluido);
 - linearidade de $\approx 0.5\%$ e precisão de $0.5\%..5\%$;
 - resposta rápida;
 - o sinal fornecido é fraco (≈ 1 mV fim de escala);
 - o fluido deve ter uma condutividade $>10^{-6}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ -por exemplo, uma solução de sal NaCl a 5% em peso a 18°C tem uma condutividade de $7 \cdot 10^{-2}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$.
- Medições com água, ácidos, bases, produtos alimentares, pasta de papel...
- A alimentação pode ser em corrente alterna ou contínua.
- Os diâmetros dos tubos vão de uns milímetros até o metro e meio, com gamas relativas de 1:10

Caudal volumétrico sensor magnético

Alguns valores

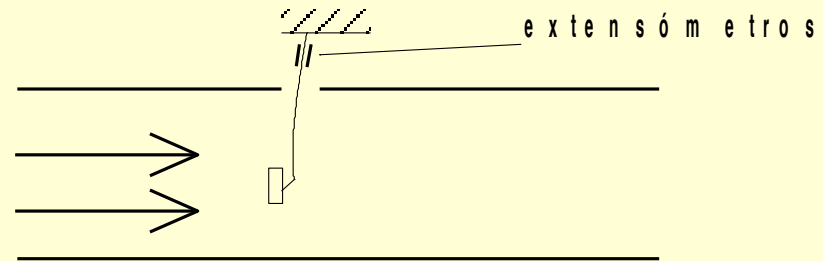
Exemplo de especificações de dois sensores magnéticos e do seu CS (Turbo)

	MG711/F	MG711/E	
diâm. ligações	1.5..40	15..2000	mm
temperatura máxima	1180	180	°C
pressão máxima	25	320	bar
material	Al, cerâmica	aço inox.	
	PC2	PR2	
saída analógica	0..20	0..20	mA
saída digital	opc.	opc.	
precisão	1	0.5	%
alimentação	rede/24	rede/12/24	Vac/dc

Caudal volumétrico sensor por arrasto

Princípio físico:

- um extensómetro mede a força exercida sobre o obstáculo
- após calibração, pode-se deduzir o caudal Q .
- em líquidos, em gamas de 3..40000 l/min, mas com gamas relativas reduzidas de cerca de 1:3, consegue-se uma precisão de cerca de 1%.



$$F = C_x A \frac{1}{2} \rho V^2$$

fig. medição de caudal por arrasto

Caudal volumétrico sensor por arrasto

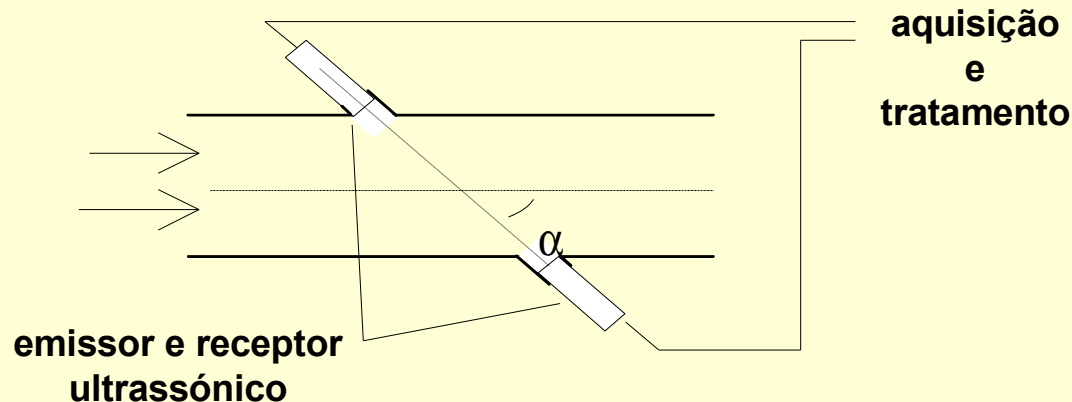
Valores (Turbo Gardex)

- líquidos ou gases
- precisão de 2%,
- pressão <25 bar
- temperatura <250°C.
- com água: a gama de medida é de 0.4..1350 m³/h;
- com ar: a gama é de 12..40500 m³/h.

Caudal volumétrico sensor ultrasónico

Princípio físico:

- efeito Doppler sofrido ao atravessar o caudal
- mede a velocidade média
- líquidos ou gases
- gamas relativas de 1:20
- precisão de 1..4%



$$\Delta f = \frac{V \cos(\alpha)}{L}$$

fig. medição de velocidade por efeito Doppler
em transmissões acústicas

Caudal volumétrico por turbina

Princípio físico:

- uma turbina inserida no escoamento roda a uma velocidade proporcional à velocidade média

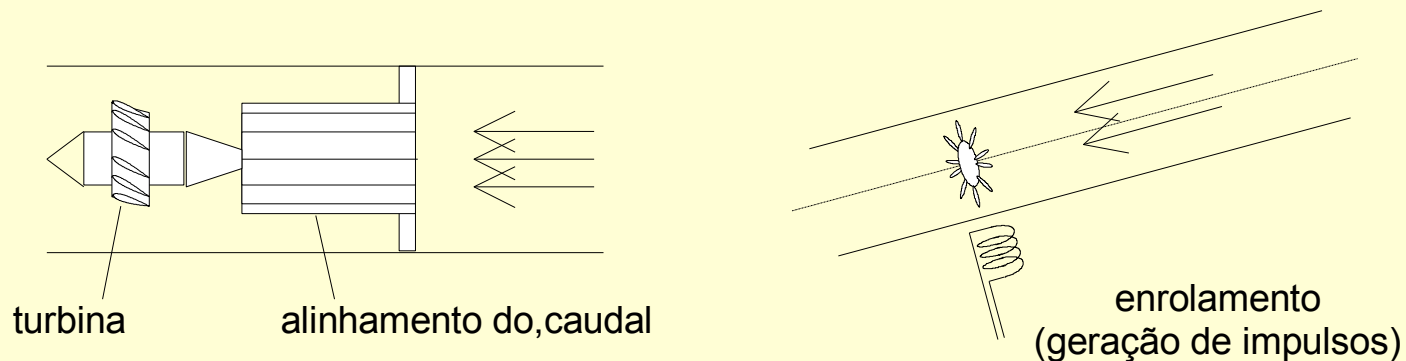


fig. medição de velocidade por turbina

Caudal volumétrico por turbina

- Medições realizam-se em líquidos ou gases:
 - gama de 0.001..500 m³/min (gamas relativas de 1:15), em gases
 - gama de 0.05..120000 l/min em líquidos
 - precisão até 0.25%
 - tempo de resposta de 2..10 ms.
- Exemplo de sensor disponível no mercado (Turbo Quant)
 - precisão de 0.5%
 - gama relativa de 1:10
 - água: gama de medida de 0.06..2700 m³/h,
 - pressão <320 bar
 - temperatura -100..250°C

Caudal volumétrico por vórtices

- Princípio físico:
 - vórtices a jusante de um obstáculo
 - a frequência depende do caudal volumétrico.
 - a medição é independente do número de Reynolds.
- A detecção dos vórtices pode ser:
 - por sensor de pressão acústica;
 - por sonda de temperatura (termistância).

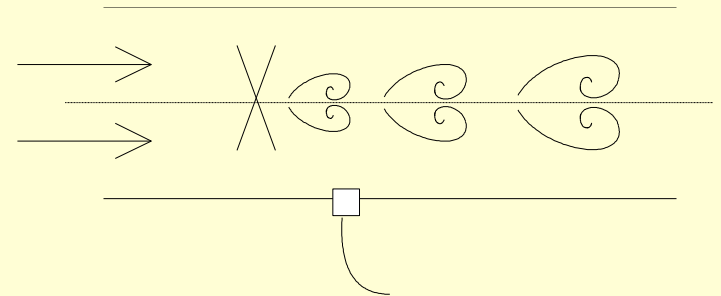


fig. medição de velocidade por
detecção de vórtices

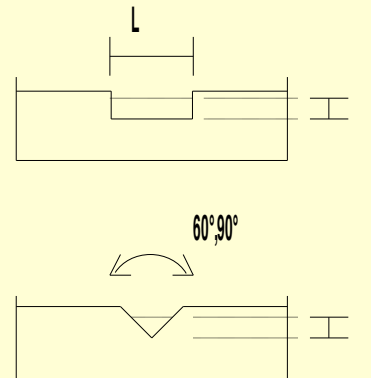
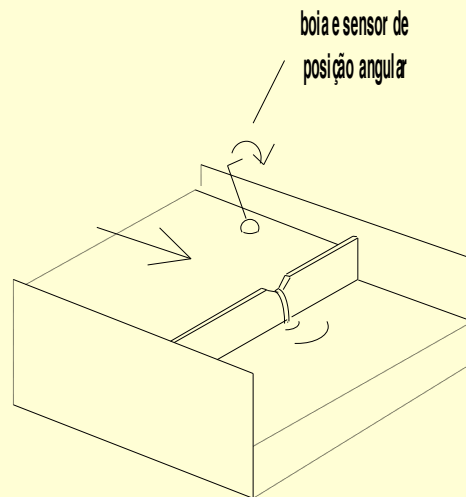
Caudal volumétrico por vórtices

- Comentários:
 - líquidos ou gases
 - gama relativa de 1:100
 - medição em frequência muito ruidosa, sujeita a calibração, difícil para baixas velocidades
 - intrinsecamente digital.
- Exemplo, o sensor Turbo Fluidistor:
 - precisões respectivas de 1.5% e 0.5% para gases e líquidos
 - gama de medida,
 - com líquidos começa em 0.009 m³/h
 - com gases começa em 0.17 m³/h
 - gama de pressões vai até 25 bar
 - gama de temperaturas é de -40 a 150°C.

Caudal volumétrico geometria aberta

Exemplo:

- o nível numa obstrução mede o caudal



$$Q = 1.84 (1 - 0.2h) h^{1.5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$90^\circ: \quad Q = 1.23 h^{2.475} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$60^\circ: \quad Q = 0.77 h^{2.5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

fig. medição de caudais em canais

Caudal mássico

- medição volumétrica e de densidade em paralelo
- medição térmica
- medição da força de Coriolis

Caudal mássico por temperatura

Princípio físico:

- o aquecimento depende do caudal mássico

Em regime estacionário, q é dado por uma relação quase linear do caudal mássico:

$$q = k \phi^n (T_2 - T_1)$$

com $n \approx 0.8$.

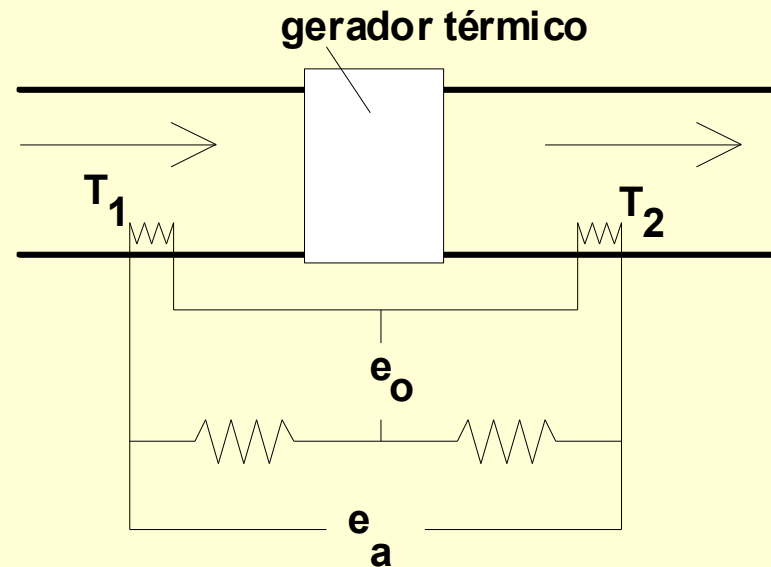


fig. caudal mássico por medição térmica

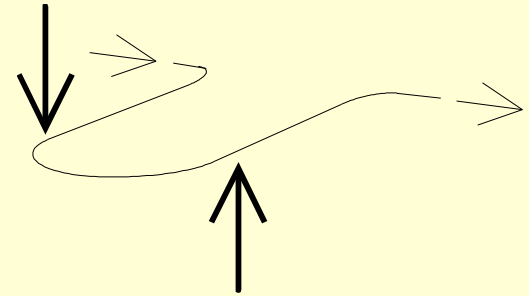
Caudal mássico por temperatura

- Comentários:
 - medição em gamas de 10^{-9} .. 10^{-3} kg/s (em gases)
 - precisão de 1%
 - repetibilidade de 2%
 - constante de tempo de 3 s
 - diferença de temperaturas de 1°C e temperaturas até 100°C
 - pressão estática até 200 MPa.
- A técnica é quase não intrusiva mas só é possível com caudais pequenos.

Caudal mássico por força de Coriolis

Princípio físico:

- deformação provocada num tubo em duplo U provocada pela força de Coriolis actuando sobre o fluido em movimento no tubo,
- proporcional ao caudal mássico e à direcção do escoamento
- gamas desde 3..54 até 34000..680000 kg/h,
- pressões <43..180 bar
- temperaturas -240..425 °C
- gamas relativas de cerca de 1:20



ÍNDICE

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
 - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
 - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores