

# INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

## MEDIÇÃO DE CAUDAL 3

- 1.ª Parte – Classificação dos Caudalímetros; Pressão Diferencial: Placa de Orifício ou Diafragma
- 2.ª Parte – Pressão Diferencial: Medidor Venturi; Tubo Annubar
- 3.ª Parte – Velocidade: Turbina; Ultrasónico; Vortex / Electromagnéticos / Rodas Ovais / Caudalímetro Mássico de Coriolis / Comparação entre Caudalímetros

[Continuação da última edição]

### VELOCIDADE: TURBINA

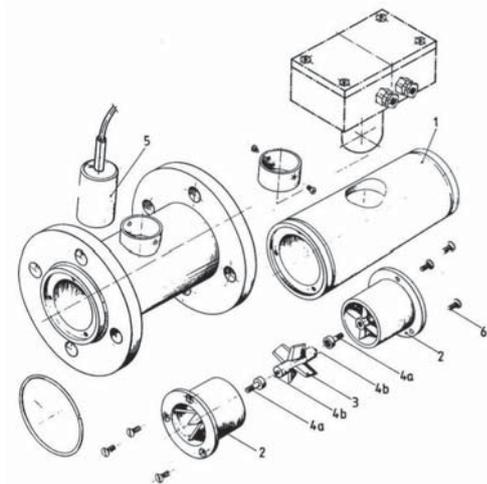


Figura 1 · Caudalímetro de turbina sem transmissor incorporado

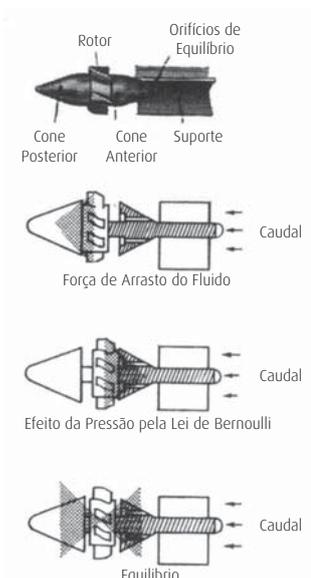


Figura 2 · Caudalímetro de turbina

O caudalímetro de turbina é um equipamento electromecânico cuja velocidade angular do rotor (turbina) é directamente proporcional ao caudal que o movimenta. A velocidade do fluido exerce uma força de arrasto no rotor; a diferença de pressão devida à alteração de área entre o rotor e o cone posterior exerce uma força igual e oposta. Deste modo o rotor está equilibrado hidrodinamicamente e gira entre os cones anterior e posterior, sem necessidade de utilizar rolamentos axiais evitando assim um atrito que necessariamente existiria (Figura 2).

Um sensor eléctrico (*pick-up*) capta impulsos gerados aquando da passagem das pás da turbina. Estes impulsos são tratados electronicamente e enviados sob a forma de um sinal analógico (4 ~ 20 mA DC) ou digital (trem de impulsos). O número de impulsos por unidade de caudal é constante (Figura 3).

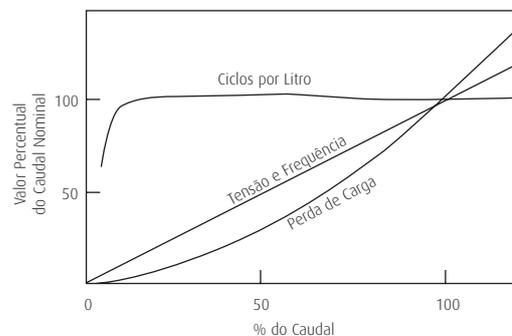


Figura 3 · Curvas do caudalímetro de turbina

### VELOCIDADE: ULTRA-SÓNICO



Figura 4 · Caudalímetro com transmissor incorporado.

Os caudalímetros ultra-sónicos (Figura 4) baseiam-se nas propriedades de propagação dos ultra-sons (20kHz) através dos líquidos.



Os transdutores de *cristal piezométrico* utilizam-se para transmissão e recepção de energia acústica. Ao aplicar a um cristal uma energia eléctrica em forma de uma pequena perturbação de tensão a alta-frequência, provoca um estado de vibração. Se o cristal está em contacto com o fluido, esta vibração transmite-se e propaga-se neste. O cristal receptor expõe-se a estas flutuações de pressão e responde vibrando também. Este movimento vibratório produz um sinal eléctrico proporcional. Os sensores estão situados na tubagem na qual se conhece a área e o perfil das velocidades. Os princípios de funcionamento são muito variados. Um dos modelos mais simples (Figura 5), a velocidade do fluido é determinado pela seguinte fórmula:

$$V = \frac{C^2 \times \text{tg} \alpha \times \Delta t}{2 \times D}$$

em que:

$V$  = velocidade do fluido

$C$  = velocidade do som no fluido

$\alpha$  = ângulo do feixe do som relativamente ao eixo longitudinal da tubulação.

$D$  = diâmetro interior da tubagem

$\Delta t$  = diferença entre os tempos de trânsito do som no fluido.

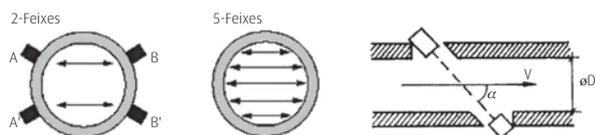


Figura 5 - Representação dos feixes ultra-sónicos

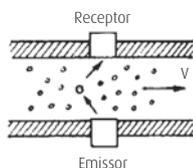


Figura 6 - Caudalímetro ultrasónico, método doppler

Outra técnica de medição é o *Método Doppler* (Figura 6). Projectam-se ondas ultra-sónicas ao largo do fluxo do fluido e mede-se o corrimento da frequência que tem o sinal de retorno ao reflectir o som nas partículas do fluido. O método está limitado pela necessidade da presença das partículas, mas permite medir alguns caudais de fluidos difíceis, tais como misturas gás - líquido, lamas, entre outros.

Estes elementos são ideias para a medida da maior parte dos líquidos, em particular nos líquidos com sólidos em suspensão. São sensíveis as alterações da densidade do líquido, e portanto à temperatura, uma vez que estas variáveis influem a velocidade do som.

**VELOCIDADE: VORTEX**



Figura 7 - Caudalímetros vortex com e sem transmissor incorporado

# booki

UMA MARCA PUBLINDÚSTRIA

**A melhor  
seleção de livros  
especializados!**

[www.booki.pt](http://www.booki.pt)

IMPORT . EXPORT . BOOKS

**"Promovemos  
o conhecimento"**

**Quântica editora**  
conteúdos especializados, lda.

engebook agrobok gestbook artbook  
sportbook medicabook juribook mybook



Figura 8 - Representação da amplitude dos vórtices (setas claras e paralelas) e do sentido de deflexão da barra trapezoidal (seta escura).

Os caudalímetros vortex (Figura 7) são instrumentos electrónicos que medem a frequência gerada num cristal piezoeléctrico montado numa barra de secção trapezoidal, onde um corpo em forma de cone gera alternativamente vórtices (áreas de baixa pressão e instáveis) desfasadas 180°, devido à passagem dum fluido (líquido ou gasoso) (Figura 8). A frequência é directamente proporcional à velocidade do fluido, de acordo com a expressão conhecida como número de Strouhal:

$$f = \frac{V \times St}{d}$$

Em que:

$St$  = número de Strouhal

$f$  = frequência do medidor

$d$  = largura do medidor

$V$  = velocidade do fluido

O número de Strouhal é constante para números de Reynolds compreendidos entre 10000 e 1000000 e  $d$  é um valor constante indicado pelo fabricante para cada medidor.

Como  $Q = V \times S$  e  $V = \frac{f \times d}{St}$  temos  $Q = \frac{f \times d}{St} \times S = f \times K$

Sendo,

$Q$  = caudal volumétrico do fluido

$S$  = secção da tubagem

$K$  = constante

Portanto o caudal volumétrico do fluido é directamente proporcional à frequência do medidor.

### TENSÃO INDUZIDA: ELECTROMAGNÉTICOS

Os caudalímetros electromagnéticos (tensão Induzida) baseiam-se na teoria de Faraday (Figura 9):



Figura 9 - Caudalímetro electromagnético com transmissor incorporado e representação da teoria de Faraday

A f.e.m. induzida no fluido, quando este se move perpendicularmente a um campo magnético, é proporcional à velocidade do fluido. E pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\vec{E} = \alpha \times \vec{B} \times \vec{V} \times D$$

Em que:

$B$  = indução magnética (Webers/m<sup>2</sup>)

$V$  = velocidade média do fluxo do fluido (m/s)

$D$  = diâmetro interno da tubulação (m), ou distância entre eléctrodos.

Como:

$$Q = V \times \frac{\pi \times D^2}{4}$$

Resulta:

$$Q = K \times \frac{E_s}{B} \times D$$

No caudalímetro electromagnético o sinal gerado é captado por dois eléctrodos, um em cada extremidade do diâmetro horizontal da tubagem. O sinal gerado depende, não só da velocidade do fluido mas também da densidade do campo magnético  $B$  que está dependente da tensão da linha ou condutividade do fluido e da temperatura do fluido (Figura 10).

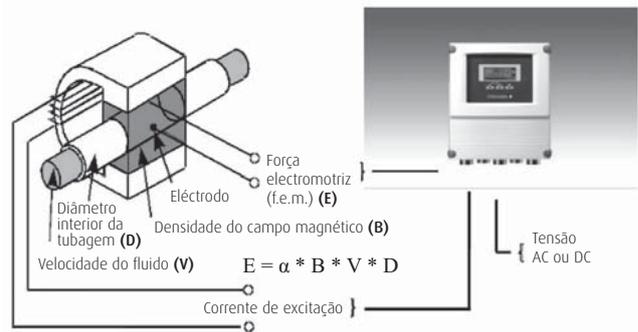


Figura 10 - Representação do transdutor com transmissor remoto de um caudalímetro electromagnético

Para se medir a f.e.m. pode-se utilizar um transmissor remoto. O fluido que circula pela tubagem tem de ter alguma condutividade e deve fluir alguma corrente para accionar o instrumento de medição.

O medidor electromagnético visto na Figura 10 está restrito à medição de fluidos que tenham considerável condutividade. Nos líquidos com baixa condutividade os eléctrodos têm tendência a polarizarem-se. Os efeitos de polarização podem ser eliminados ou minimizados aplicando um campo de corrente alternada (CA). No entanto, quando se aplica um campo CA, a constante dielétrica do líquido influencia a medição, pois tem um efeito de derivação sobre a tensão. Existe também uma f.e.m. induzida criada pelo campo variante, além da gerada pelo fluido no medidor de caudais, que existe mesmo quando não há líquido. Esta f.e.m. induzida pode ser anulada adicionando-se, em série com o transmissor remoto, uma f.e.m. igual e oposta. Na planta existem muitas fontes de *sinais de ruído* que podem perturbar o funcionamento dos caudalímetros electromagnéticos. Por exemplo, um motor eléctrico de grande potência colocado nas imediações do elemento gera um campo magnético que pode sobrepor-se ao próprio fluxo do medidor. Do mesmo, os restantes motores e linhas eléctricas de potência podem gerar correntes e tensões eléctricas nas tubagens da planta, sendo estes sinais captados pelo medidor em forma de sinais de tensão. Para reduzir a influência destes sinais de ruído liga-se electricamente à massa, em *bypass*, as flanges de conexão do medidor. Apesar de, na prática se verificar que esta medida é insuficiente e, por isso, muitos fabricantes possuem sistemas no receptor para eliminar estes sinais de ruído.

O *material dos eléctrodos* do tubo de medida para as aplicações correntes é aço inoxidável SS316 ou é *hastelloy*. Para aplicações com fluidos corrosivos o material é titânio ou é platina.

O fluido pode levar substâncias que pela sua natureza química podem depositarem-se no tubo, nos eléctrodos ou em ambos. O *depósito nos eléctrodos* existe em particular nos processos em que há numerosos aditivos. Em alguns casos este depósito dá lugar a erros importantes, sempre que as substâncias se depositem concêntricamente e não há isolamento eléctrico do eléctrodo com o fluido. Alguns destes problemas resolvem-se utilizando equipamentos de limpeza e aquecimento de tubos:



O dispositivo ultra-sónico consiste num gerador ultra-sónico que faz vibrar os eléctrodos com vibrações de alta-frequência e baixa amplitude que se opõem à tendência de depósito nos eléctrodos.

O dispositivo de limpeza mecânico consiste em raspadores mecânicos accionados por um motor e que roçam continuamente com as superfícies dos eléctrodos. Se os sólidos que se acumulam têm uma dimensão considerável, os raspadores mecânicos podem danificar-se.

O aquecimento exterior dos tubos podem efectuar-se mediante cintas de resistências alimentadas electricamente e controladas por um termostato. O aquecimento que se consegue no tubo impede o depósito de gorduras ou de sólidos nas paredes do tubo, tanto na instalação em movimento como parada. Noutros sistemas, os eléctrodos têm um selo de pressão e estão dentro de uma unidade fácil de desmontar, o que permite limpar ou substituir os eléctrodos sem necessidade de desmontar o tubo de medida da tubagem. O caudalímetro electromagnético pode ser montado inclinado ou horizontal para que se mantenha a tubagem com *liquido durante a medida*. Se a instalação é inclinada será conveniente a colocação de uma válvula, anterior ao medidor, para assegurar que a tubagem está com liquido para todos os caudais. Apesar de, se o sistema de bombagem pára, o liquido deixa de banhar os eléctrodos, abrindo o circuito e indicando um sinal erróneo. Alguns fabricantes modificam ligeiramente o circuito para que o índice do instrumento receptor indique zero quando o circuito está aberto. Os instrumentos digitais detectam automaticamente o estado de não existência de liquido na tubagem. Geralmente não é necessário uma *troços rectos da tubagem* antes do medidor de caudal, contudo, a existência de acessórios podem provocar a formação de filetes de caudal assimétricos, obrigando a deixar pelo menos um troço recto de 5 vezes o diâmetro da tubagem antes do caudalímetro, e um troço de 2 vezes o diâmetro depois deste. Quando o fluido circula nos dois sentidos deverá ser 5 vezes o diâmetro para cada lado.

Os fluidos que têm *partículas magnéticas em suspensão* podem medir-se com um medidor magnético de caudal, sempre que as partículas estejam em suspensão homogénea ao passar pelo instrumento. Consegue-se geralmente, instalando o medidor numa tubagem vertical em que as partículas magnéticas adoptam uma distribuição uniforme na secção transversal da tubagem. Os medidores de caudal não requerem, normalmente, ajustes antes da sua colocação. Os ajustes e a calibração necessários são feitos na fábrica. Uma vez que o instrumento esteja instalado, com as ligações eléctricas concluídas, o medidor de caudal está pronto a funcionar. Basta que a tubagem tenha liquido, com o instrumento ligado à corrente e dando algum tempo para que o sistema aqueça e estabilize.

A adição de um microprocessador melhora substancialmente as funções de inteligência do medidor magnético de caudal. A sua exactidão é de  $\pm 0,5\%$  de toda a escala. O campo de medida entre o caudal máximo e o mínimo é de 100:1 com uma escala de leitura linear. A sensibilidade é de  $\pm 0,1\%$  e a linearidade  $\pm 0,5\%$ .

O medidor dispõe de uma função de auto diagnóstico, a detecção automática do estado de não existência de liquido na tubagem, e a capacidade para medir, manualmente ou automaticamente, o caudal em ambos os sentidos de circulação do fluido. Pode seleccionar-se as unidades de leitura que se deseja e dispôr de um duplo campo de medida seleccionáveis manualmente ou automaticamente. O caudalímetro electromagnético é útil na medição de líquidos condutores, especialmente nos fluidos corrosivos e nas pastas. Não é afectado pela viscosidade, densidade ou turbulência. A perda de carga num medidor de caudais electromagnético é baixa e corresponde a um tubo recto com o mesmo diâmetro e comprimento.

#### **DESLOCAMENTO POSITIVO: RODAS OVAIS**

Os caudalímetros de deslocamento positivo são equipamentos electro-mecânicos, normalmente chamados contadores volumétricos quando têm um integrador (mecânico ou electrónico). O caudalímetro deste tipo mais utilizado é o de rodas ovais.

**Princípio de medição**

Os contadores de rodas ovais pertencem ao grupo dos contadores directos de volume para fluidos líquidos, com separadores móveis (contadores de deslocação). São constituídos por uma câmara de medição com duas rodas ovais que engrenam entre si por meio de dentes, que, aproveitando a energia do fluido, rodam em sentidos opostos com uma determinada perda de carga (Figura 11).

Em cada rotação, as rodas fazem passar através do contador quatro volumes parciais entre a roda oval e a câmara de medição (Figura 12).

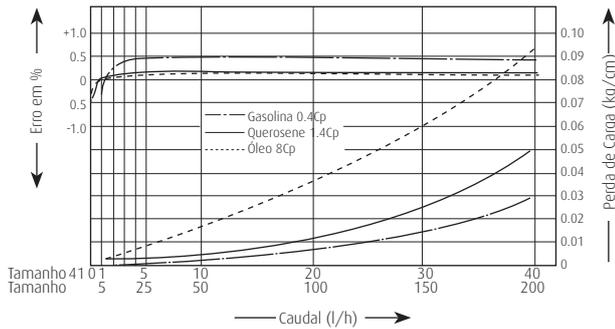


Figura 11 · Curvas de exactidão e perda de carga de dois contadores DNxx e DNyy utilizados na medição do gasolina, querosene e óleo

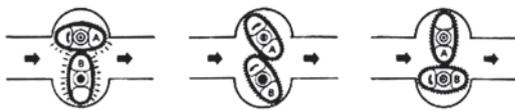


Figura 12 · Representação do movimento das rodas ovais

Para a medição, o movimento de rotação das rodas ovais é transmitido a um contador local mecânico ou electrónico e/ou a um gerador de impulsos, através de acoplamento magnético e engrenagem.

**FORÇA DE CORIOLIS: CAUDALÍMETRO MÁSSICO DE CORIOLIS**



Figura 13 · Caudalímetro mássico com transmissor incorporado

O caudalímetro mássico de Coriolis (Figura 13) baseia-se no teorema de Coriolis, matemático francês que observou que um objecto de massa (*m*) que se desloque a uma velocidade linear (*V*) através de uma superfície giratória que roda com uma velocidade angular constante (*w*), tem uma velocidade tangencial (velocidade angular x raio de rotação) tanto maior quanto maior é o seu afastamento do centro. Se o objecto se desloca do centro até à periferia existe um aumento gradual da sua velocidade tangencial, isto é está a aplicar-se uma aceleração e, portanto, uma força de Coriolis (*F*) sobre a massa:

$$F = 2 \times m \times W \times V$$

Por exemplo, colocando uma esfera de aço num disco giratório cheio de gordura, que funciona como travão, na sua parte superior e fazendo girar o disco, a esfera descreve uma linha curva até sair do disco. Durante o percurso tem uma velocidade tangencial igual à velocidade angular do disco multiplicada pela distância ao centro de rotação. Esta velocidade tangencial vai aumentando à medida que a esfera se afasta do centro do disco, o que evidencia a existência de uma aceleração, e portanto de uma força.

**Princípio de medição**

Os caudalímetros baseados na aceleração de Coriolis proporcionam uma medição "exacta" do caudal mássico, densidade, e também caudal volúmico. Os tubos detectores são excitados por um dispositivo electromagnético na sua frequência de ressonância. Quando o fluido passa através dos tubos, o efeito da força de Coriolis deflacte os tubos minuciosamente (Figura 14).

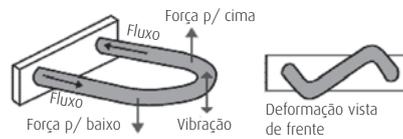


Figura 14 · Representação esquemática dum tubo de medida e sua deformação

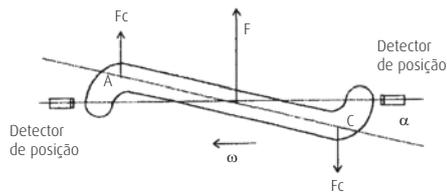


Figura 15 · Torção do tubo no caudalímetro mássico de Coriolis.

A torção do tubo (Figura 15) é medida por dois sensores de proximidade, um de cada lado do tubo, fixos em relação à estrutura do caudalímetro. Quando o aparelho está em funcionamento e não há caudal (embora o tubo esteja cheio), não há torção e os pontos A e C passam simultaneamente em frente dos detectores de proximidade (note-se que o tubo se encontra a vibrar, devido à força aplicada F alternada). Quando o fluido circula no tubo passa a existir torção e os pontos A e C passam em frente dos detectores de proximidade desfasados no tempo. Este desfasamento  $\Delta T$ , é proporcional ao ângulo de torção  $\alpha$ :

$$\Delta T = \frac{k_1}{\omega} \times \alpha$$

Na prática, as dimensões dos tubos são da ordem das dezenas de centímetros e a diferença de amplitude entre os extremos, devida à torção, é da ordem dos micra. Nestas condições pode considerar-se  $\alpha$  proporcional a  $T_c$ :

$$F_c = k_2 \times \alpha$$

Do teorema de Coriolis obtém-se:

$$v = \frac{1}{2} \times m \times w \times F_c$$

Definindo caudal mássico pela equação:

$$q_m = \rho \times v \times S$$

Das quatro equações anteriores, obtém-se:

$$q_m = \frac{\rho \times S}{2 \times m \times w} \times k_1 \times k_2 \times w \times \Delta T$$



Uma vez que a massa  $m$  é dada por

$$m = \rho \times S \times d$$

em  $d$  que representa o comprimento de um troço de tubo de A a C, a expressão pode escrever-se:

$$q_m = \frac{k_1 \times k_2}{2 \times d} \times \Delta T$$

ou seja, o desfasamento na passagem por zero dos pontos A e C é directamente proporcional ao caudal mássico que percorre o tubo:

$$\Delta T = k \times q_m$$

Combinado com moderna tecnologia digital e processamento de sinal, este princípio de medição é inultrapassável em exactidão, estabilidade e fiabilidade.

#### Comparação entre os caudalímetros:

	Caudal máx./min.	Precisão em % em toda a escala	Escala	Pressão máx. bar.	Temp. máx. °C	Perda de carga máx. m=mc. b=bar	Aplicação	Materiais de construção	Custo relativo	Vantagens	Desvantagens
Placa de orifício	3 : 1	1-2 %	√	400	500	20 m	Liq./ vapor / gás	Metais e plásticos	Baixo	Simples, económico	ΔP, fluidos limpos
Tubo Venturi	»	0,75 %	»	»	»	4 m	»	»	Muito elevado	Precisão, pouca ΔP	Muito caro, fluidos limpos
Tubo Annubar	»	1 %	»	»	»	-	»	»	Baixo	Simples, económico	Pouca precisão
Turbina	15: 1	0,3 %	linear	200	250	0,7 b	Liq./ gás	Metais	Alto	Precisão, ampla margem	Calibr. cara, fluidos limpos
Ultra-sónico	20: 1	2 %	»	100	250	nula	Líquidos	Metal, plásticos	»	Qualquer líquido, baixa Δp	Caro, calibração sensível à densidade
Electromagnético	100: 1	0,5-1 %	linear	20-200	150	nula	»	Teflón, fibra de vidro (tubo)	Alto	Baixa Δp	Caro, líquidos condutores
Rodas ovais	10: 1	0,5 %	»	100	180	1 b	»	Metais	Médio	Indep. dens. e visc.	Δp
Vórtex	10: 1	1 %	»	50	400		Liq./gás		»	Vibrações	Insensível a baixo caudal
Coriolis	10: 1	±0,5 %	»	400	200	0,1 a 3 b	Liq./gás	Metal, plásticos	Alto	Independente, pressão, temp., dens.	Caudais médios

[Última parte da Medição de Caudal]

**ALPHA ENGENHARIA - Equipamentos e Soluções Industriais**

Tel. 220 136 963 | Tlm: 933 694 486

info@alphaengenharia.pt | www.alphaengenharia.pt