

# Introdução

Em muitos processos, a regulação do caudal permite controlar reacções químicas ou propriedades físicas através de um controlo de variáveis como a pressão, a temperatura ou o nível. O caudal é uma variável bastante difícil de medir quando se pretendem medições rigorosas. O método mais simples para a medição do caudal consiste em determinar a variação da massa do fluído por unidade de tempo. Este método assume que a massa do fluído é conservada, ou seja, a massa que entra na conduta é a mesma que sai da conduta para o mesmo intervalo de tempo. Na prática, o método utiliza a variação da massa por unidade de tempo para medir o caudal. Em numerosas situações, isto é impraticável como, por exemplo, quando a densidade de um fluído é alterada por variações da pressão ou da temperatura. Consequentemente, têm de ser usados outros métodos para se obter uma medição de caudal rigorosa.



Estes métodos, nos quais se incluem os medidores ultrassónicos, têm em consideração propriedades do fluído como a densidade e a viscosidade, entre outras. A densidade pode ser definida, de uma forma muito simplificada, como sendo a variação da massa por unidade de volume. A temperatura e a pressão afectam a densidade de uma substância. Este efeito varia de acordo com as propriedades físicas de uma substância. Os gases são os mais afectados por este efeito e os sólidos são os menos afectados, os líquidos situam-se, geralmente, entre estes dois extremos.

O efeito da pressão e da temperatura na densidade de sólidos e líquidos pode na maioria das situações ser negligenciado. O mesmo não acontece com os gases em cuja alteração da pressão ou temperatura provoca alterações bastante significativas e, conseqüente, nas medições dos caudais dos gases e, por isso, terá que se ter em atenção este facto.

A viscosidade é uma propriedade que determina o movimento livre de um fluído num caudal. Uma substância com uma viscosidade elevada apresenta uma alta resistência para o movimento do fluído. A viscosidade pode ser descrita como uma propriedade que contribui para a existência de caudais turbulentos ou laminares. A viscosidade é afectada significativamente pela variação da temperatura e da pressão. Normalmente, um aumento da temperatura provoca uma diminuição da viscosidade e vice-versa.

Frequentemente, são usados dois tipos de medidores ultrassónicos em medições de caudais em tubos fechados. O primeiro, denominado "Transit time", baseia-se na transmissão de pulsações, enquanto o segundo, denominado "Doppler", utiliza, geralmente, a transmissão contínua de ondas. Estes dois tipos de medidores completam-se mais do que competem.

Os medidores "Transit time" baseiam-se no intervalo de tempo que demora uma pulsação de som a percorrer uma distância fixa, primeiro na direcção do caudal e depois em direcção oposta ao caudal. Estes medidores apresentam medições bastante rigorosas quando são devidamente instalados e utilizados. Os medidores "Doppler" baseiam-se nas alterações de frequência do som disperso ou reflectido devido ao movimento das partículas do fluído do caudal. Estes medidores não são considerados tão rigorosos como os medidores "Transit time". Os medidores "Doppler" são, normalmente, mais usados e menos dispendiosos que os medidores "Transit time".

# Princípio de funcionamento

Para descrever o modo de funcionamento destas duas medidas utilizadas são necessários três modos distintos de funcionamento: dois para transdutores de tempo e um para Doppler. Os ultrassônicos transdutores de tempo estão divididos nestas operações em domínio de tempo e em domínio de frequência. Ambas transmitem por vibração, a partir de um tradutor de transmissão. As diferenças entre os tempos de chegada de vibrações propagadas numa direcção contra-corrente e propagadas em direcção da corrente (com o fluxo) são usadas para calcular a velocidade do fluxo em ambos os tipos. Medidas Doppler transmitem uma onda contínua inclinada fazendo um ângulo com o fluxo. A batida da frequência entre o sinal transmitido e aquela dispersão de partículas móveis no fluxo, proporciona informação da velocidade do fluxo. Mais pormenorizadamente podemos descrever cada uma destes modos distintos de funcionamento. Assim temos:

## *Transdutores de tempo em domínio de tempo*

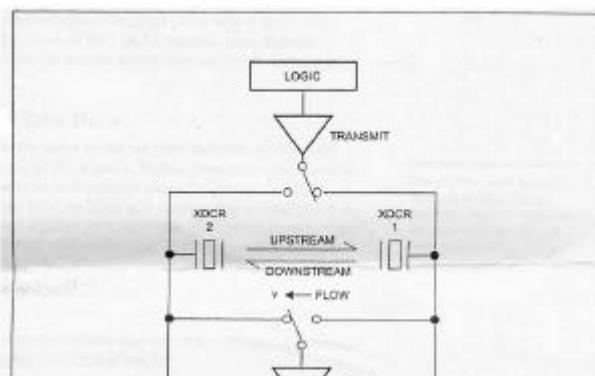
Transdutores de tempo em domínio de tempo, como mostra a fig.1, transmitem uma vibração em uma dada direcção e registam o tempo de chegada da vibração no local oposto ao caminho inicialmente tomado. Então transmitem uma vibração na direcção oposta e tornam a registar esse tempo de chegada. A diferença entre as duas medidas de tempo providencia a informação do movimento do fluido no caminho do fluxo.

A configuração na figura mostra a parte essencial do campo de acção de um transitor de tempo. Há muitas maneiras de implementar esta configuração, mas todas elas contêm esta parte essencial. Uma equação típica da velocidade do fluxo no domínio de tempo é dada por:

$$v_t = \frac{C^2 \cdot (T_u - T_d) \tan \theta}{2 \cdot D}$$

Onde

- $v_t$  = velocidade do fluxo baseada no tempo
- $C$  = velocidade do som no fluido
- $T_u$  = tempo de transmissão contra-fluxo
- $T_d$  = tempo de transmissão na direcção do fluxo
- $D$  = diâmetro do cano
- $\theta$  = ângulo entre a direcção do som e o eixo do fluxo



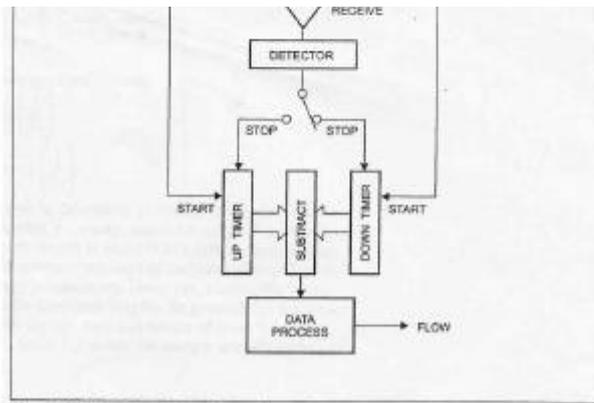


Figure 18-1. Time Domain Transit Time Flowmeter

Nota: De notar que esta expressão é sensível à velocidade do som no meio. Ter a certeza que o algoritmo de cálculo do fluxo usado toma a velocidade do som em conta, para evitar erro significativo dependente de temperatura. Limites frequentes de ultrassónicos em domínio de tempo e a habilidade de resolver as diferenças de tempo estão relacionados com o tamanho dos canos. Assumindo que as diferenças de tempo podem ser resolvidas em 10 nanosegundos (100 Mhz relógio). Se for desejado, para medir o fluxo em 0,5 metros de diâmetro do cano, a mínima mudança mensurável na medida da velocidade do fluxo (assumindo 1500 m/s como velocidade do som) é cerca de 0,02 metros por segundo. Numa medida frequente, uma resolução de cerca de 0,07 m/s pode ser esperada, que representa um fluxo de cerca de 0,14 m/s. Abaixo deste ponto a habilidade do medidor para ler aceitavelmente, torna-se questionável.

### *Transitores de tempo em domínio de frequência*

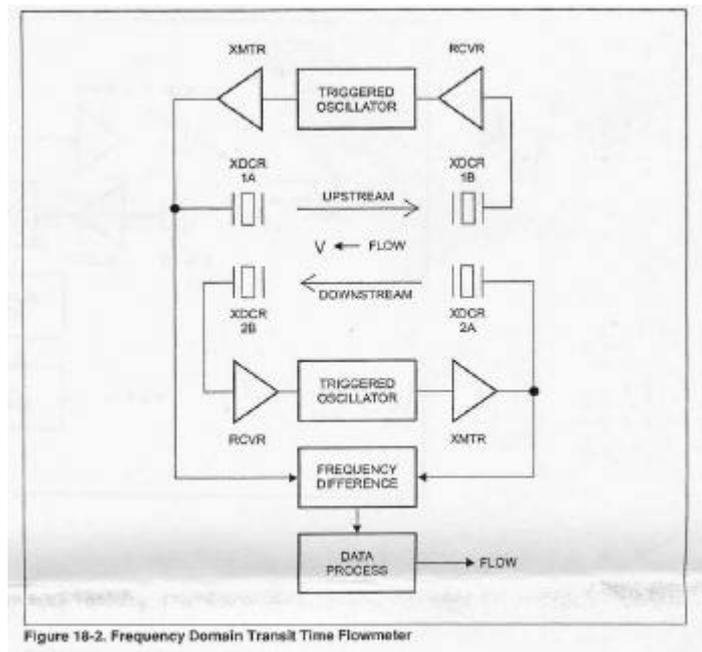
Ultrassónicos em domínio de frequências usam o mesmo sensor que ultrassónicos em domínio e tempo. A única diferença é no processamento de sinais. Em vez de ler o tempo directamente esta implementação converte a informação de tempo em frequência. Na forma mais simples como se mostra na figura, tão rápido quanto uma vibração sónica é recebida, é imediatamente retransmitido para formar uma taxa de repetição de vibração (frequência) proporcional ao tempo de transmissão da vibração. Se dois destes caminhos, um em cada direcção do fluxo são usados, duas frequências são geradas. A diferença nestas duas é proporcional à velocidade do fluxo. A configuração da fig.2 serve apenas como explicação. Nenhum fabricante usa caminhos independentes para medidas contra e a favor do fluxo. Na prática uma amostra de tempo do caminho do som é usada e em vez de ganchos de fase complexos são geralmente utilizados para obter dois tipos de frequências independentes. A velocidade do fluxo para ultrassónicos em domínio de frequência é dada por:

$$v_f = \frac{2.D.(f_{up} - f_{dn})}{2.\sin \theta.\cos \theta}$$

Onde

- $v_f$ = velocidade do fluxo dependente da frequência
- $f_{up}$ = frequência contra-fluxo ( $1/T_u$ )
- $f_{dn}$ = Frequência na direcção do fluxo ( $1/T_d$ )

O caminho prático mais rápido não pode ser calculado tão simplesmente como ultrassónicos em domínio de tempo. Tradutor de diâmetro, geometria de montagem e outras considerações subjectivas proporcionam um caminho prático de extensão cerca de 0,075 metros.



### Método Doppler

Flutuadores Doppler industriais geralmente fazem uso de transmissão contínua de uma única frequência em vez de vibrações. O feixe de som é propagado no meio seguinte com um certo ângulo em relação ao fluxo. Pequenas inclusões de bolhas sólidas ou refluxos de corrente no meio seguinte reflecte ou espalha o som de volta ao receptor. Se houver algum movimento nessas inclusões haverá uma mudança na frequência no sinal retornado. Cada partícula reflecte som enquanto está no campo sónico do transmissor. Estas partículas têm uma distribuição física ao acaso e uma distribuição ao acaso nas velocidades. O sinal composto reflectido é uma distribuição casual de frequências que se adicionam ao que parece ser uma forma de onda simples. A diferença entre as frequências transmitidas e as recebidas é proporcional ao movimento do fluxo. A velocidade teórica do fluxo dada pela frequência Doppler é :

$$v_d = \frac{f_d \cdot C}{(2 \cdot F_0 \cdot \cos \theta)}$$

Onde:

- $v_d$ = velocidade do fluxo baseada na frequência Doppler
- $f_d$ = frequência Doppler
- $F_0$ = frequência transmitida

A maior parte dos sistemas Doppler determina a frequência Doppler contando cada ciclo na forma de onda Doppler. Esta técnica não dá a frequência Doppler teórica, mas por vezes fica perto do espectro

Doppler. Outros sistemas tomam a distribuição espectral do sinal em consideração e prevêm a frequência teórica. Esta técnica tardia dá melhor performance na presença de concentração variável de partículas móveis.

# Características estáticas

A tabela seguinte apresenta as principais características de três modelos de medidor de caudal ultrassónicos, produzidos pela Omega.

Características	FD-10	FD-301	FD-7000
<b>Tipo de fluido</b>	Fluídos com sólidos ou borbulhas suspensos com menos de 30 microns e numa proporção inferior a 30 ppm	Fluídos com sólidos ou borbulhas suspensos com menos de 25 microns e numa proporção inferior a 30 ppm	Fluídos com número de Reynolds superiores a 3000 e com um máximo de sólidos suspensos de 2%
<b>Exactidão</b>	+/- 5%	+/- 2% a +/- 3%	+/- 2%
<b>Repetibilidade</b>	+/- 1%	+/- 0.2%	+/- 2%
<b>Linearidade</b>	---	+/- 0.2%	+/- 2%
<b>Output</b>	---	Isolado: 4-20 mA em 600 Ohms não isolado: 0-1 mA em 2000 Ohms	4-20 mA em 600 Ohms
<b>Intervalos de operação para temperaturas</b>	-40°C a 52°C	---	-40°C a 82°C
<b>Dimensões do aparelho</b>	altura: 35 cm largura: 28 cm espessura: 8 cm	---	comprimento: 45.7 cm largura: 25.4 cm espessura: 20.3 cm
<b>Energia para alimentação</b>	5 baterias de 9 V cada	120 V para 50 mA ou 220 V para 220 mA	---
<b>Outras características</b>	As baterias duram 60 horas em operação contínua	Escala padrão de 0 a 10 FPS	Pesa 7.27 Kg e é forrado a plástico
<b>Preço</b>	\$765	\$1850	\$6500

Os modelos apresentados instalam-se facilmente e num curto espaço de tempo, bastando para isso seguir as indicações do produtor.

Na manutenção destes instrumentos pode-se contactar directamente o produtor ou um distribuidor, caso seja necessário adquirir novas peças ou obter informação. As novas peças podem também ser adquiridas através de compras efectuadas na Internet.

# Gama de medida

Este tipo de medidor pode ser usado numa vasta gama de caudais bem como para medir diversos tipos de correntes. Nas secções relativas aos [fabricantes](#), [construção/materiais](#) e [outros](#) temos diversos exemplos de utilização deste tipo de manómetros em diferentes gamas de medida e condições de operação.

# Calibração

Os resultados obtidos em medidores de caudais, como em qualquer outro tipo de medidores, resulta de uma interacção entre o medidor e a calibração efectuada. Quando o medidor de caudal é posto em serviço a calibração efectuada a quando o fabrico pode não ser válida devido à configuração hidráulica da instalação. A grande preocupação na utilização deste tipo de instrumentos é proporcionar umas condições o mais próximas possível daquelas que se verificavam a quando da calibração dos mesmos em laboratório.

Um medidor com uma calibração com 0.25% (em erro relativo) pode apresentar erros superiores a 16% quando colocados em tubos com diâmetros cinco vezes superiores aqueles em que foram calibrados. Válvulas parcialmente fechadas nas proximidades do medidor podem induzir erros superiores a 30%. Este problema não está somente em medidores ultrassónicos. Os medidores rigorosos só são conseguidos em boas instalações. Se possível, os medidores devem ser calibrados no local de operação quer tenham sido calibrados em laboratórios ou não. Em determinadas situações, há um requerimento de calibração para medidores "Doppler", baseados em padrões já existentes. Por isso, surge uma grande variedade de medidores "Doppler".

# Seleccção

A seleccção de medidores de caudais ultrassónicos deve ser cuidadosa e devem ser escolhidos os medidores com as características que melhor se adaptam a cada caso, ou seja, com o tipo de fluído, exactidão pretendida, intervalos de temperatura de operação, entre outras. O custo do instrumento é outro factor a ter em conta e pode ser determinante na escolha de instrumentos que apresentam características semelhantes.

. Nas secções de [fabricantes](#), [outros](#) e [construção/materiais](#) existem tabelas que podem ajudar, numa fase preliminar, a seleccção da instrumentação mais adequada.

# Custos e fabricantes



[www.krohne.com](http://www.krohne.com)

# Vantagens e desvantagens

## *Vantagens*

A presença deste medidor não provoca no fluido do caudal uma resistência adicional e, por isso, o caudal da amostra não é afectado, desde que o equipamento seja bem instalado. Este tipo de medidores de caudal aplica-se a uma gama bastante extensa de líquidos e a líquidos que apresentam alta viscosidade. Os medidores de caudal ultrassónicos permitem também a medição de caudais em fluidos que se encontrem no estado gasoso.



## *Desvantagens*

A grande desvantagem deste tipo de medidores está relacionada com o facto de utilizar, nas suas medições, leituras de velocidades que se consideram uniformes ao longo da área da secção da conduta. Isto corresponde a uma situação ideal e, por isso, é praticamente impossível que a mesma se verifique.