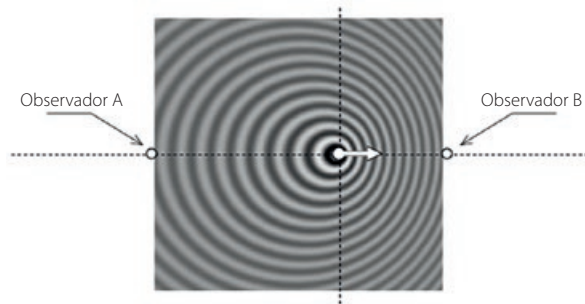


# Caudalímetros ultra-sónicos

## 1. CAUDALÍMETRO POR EFEITO DOPPLER

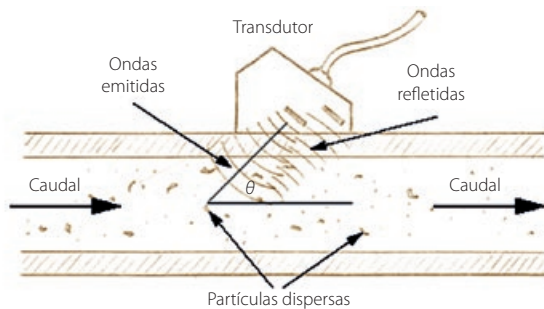
O efeito Doppler<sup>1</sup> é um fenómeno físico característico da propagação das ondas, que pode ser observado quando estas atingem um receptor que se encontra em movimento em relação à fonte que origina as ondas. Este efeito foi inicialmente observado em ondas sonoras e, mais tarde, em ondas electromagnéticas.

A Figura 1 mostra a propagação de uma onda num meio material, com a fonte (local onde a onda é originada) em movimento da esquerda para a direita, representada por um pequeno círculo branco com uma seta. Um observador fixo localizado no ponto A, do qual a fonte se está a afastar, regista uma frequência das ondas mais baixa do que um observador no ponto B, em relação ao qual a fonte se aproxima. Este fenómeno também se manifesta quando a fonte se encontra fixa e é o observador que se encontra em movimento.



**Figura 1.** Propagação de uma onda num meio material, com a fonte em movimento.

O caudalímetro por efeito Doppler baseia-se no fenómeno que acaba de se expor de forma resumida, encontrando-se o seu esquema de princípio representado na Figura 2. Para tal, utiliza um transdutor (e.g. cristal piezoeléctrico) capaz de emitir um feixe ultra-sónico dirigido na direcção do fluxo de fluido no interior da tubagem. Para que este caudalímetro funcione é necessária a existência de partículas em suspensão no fluido, ou a presença de bolhas de ar, capazes de reflectirem o feixe ultra-sónico.



**Figura 2.** Esquema de funcionamento do caudalímetro por efeito Doppler.

É exactamente o movimento destas partículas, ou bolhas de ar, que origina o desfasamento do feixe reflectido, recebido por um segundo transdutor (e.g. também ele um cristal piezoeléctrico), que é medido pelo caudalímetro, sendo este desfasamento proporcional ao caudal que se pretende medir.

Considere-se um feixe monocromático (i.e. com uma única frequência), luminoso ou sonoro, com comprimento de onda  $\lambda_e$  e frequência  $f_e$ . A sua velocidade de propagação,  $v_e$ , é dada por

$$v_e = \lambda_e f_e \quad (1)$$

Assumindo que a fonte do feixe está à distância  $d$  do observador e que a velocidade entre este e a fonte é nula, o feixe necessitará de  $n$  ciclos para se propagar da fonte até ao observador

$$n = \frac{d}{\lambda_e} \quad (2)$$

Admitindo, agora, que a fonte (o caudal) se aproxima do observador a uma velocidade média constante  $\bar{v}$  (menor do que a velocidade de propagação  $v_e$  do feixe), a distância percorrida pelo feixe até ao observador reduz-se para

$$d' = \left(1 - \frac{\bar{v}}{v_e}\right) d < d \quad (3)$$

enquanto o número de ciclos  $n$  se mantém constante, ao que corresponde uma compressão do comprimento de onda  $\lambda_e$  por um factor de  $\bar{v}/v_e$ , resultando um comprimento de onda,  $\lambda_o$ , percebido pelo observador

$$\lambda_o = \left(1 - \frac{\bar{v}}{v_e}\right) \lambda_e < \lambda_e \quad (4)$$

Como a velocidade do feixe é constante, a frequência  $f_o$  sentida pelo observador é

$$v_e = \lambda_e f_e = \lambda_o f_o \quad (5)$$

Substituindo a equação (4) na equação (5) e, resolvendo em ordem a  $f_o$ , obtém-se

$$f_o = \frac{f_e}{\left(1 - \frac{\bar{v}}{v_e}\right)} \quad (6)$$

Considere-se novamente a Figura 2; notando que o feixe emitido forma um ângulo  $\theta$  com a direcção do fluido, então  $\bar{v}$  é substituída pela sua projecção sobre a direcção do feixe emitido,  $\bar{v} \cos \theta$ . Desta forma, de acordo com a expressão (6), as frequências observadas para as ondas ultra-sónicas que viajam para montante,  $f_{om}$ , e para jusante,  $f_{oj}$ , do caudal do fluido na tubagem, são dadas por

$$\begin{cases} f_{om} = \frac{f_e}{\left(1 - \frac{\bar{v} \cos \theta}{v_e}\right)} \\ f_{oj} = \frac{f_e}{\left(1 + \frac{\bar{v} \cos \theta}{v_e}\right)} \end{cases} \quad (7)$$

<sup>1</sup> Christian Andreas Doppler, físico austríaco, 1803–1853.

Uma vez que a velocidade média do fluido é muito menor do que a velocidade do feixe emitido,  $\bar{v} < v_e$ , e que, de acordo com as expressões (7), o desfasamento  $\Delta f$  entre as frequências  $f_{om}$  e  $f_{oj}$  é

$$\Delta f = f_{om} - f_{oj} \approx 2f_e \left( \frac{\bar{v} \cos \theta}{v_e} \right) \quad (8)$$

sendo a velocidade do fluido

$$\bar{v} = \frac{v_e}{2f_e \cos \theta} \Delta f \quad (9)$$

e, por fim, considerando o diâmetro  $D$  da tubagem, obtém-se o caudal volumétrico

$$q = \frac{v_e}{2f_e \cos \theta} \pi \frac{D^2}{4} \Delta f = k \Delta f \quad (10)$$

proporcional ao desfasamento entre a frequência recebida e a frequência emitida pelos transdutores, com  $k$  igual a uma constante. As principais vantagens do caudalímetro por efeito Doppler são:

- poderem ser utilizados com fluidos espessos, fluidos arejados ou sujos com uma pequena ou grande quantidade de partículas sólidas em suspensão;
- poderem ser instalados exteriormente à tubagem;
- não obstruírem o caudal<sup>2</sup>;
- permitirem medir caudais em qualquer direcção;
- permitirem medições de caudais diminutos;
- serem resistentes à corrosão;
- terem um relativo baixo consumo de potência.

As principais desvantagens destes caudalímetros são:

- necessitarem em contínuo de um número mínimo de partículas em suspensão no fluido;
- as partículas terem de ser de dimensão suficientemente grande e em quantidade, de modo a permitirem boas reflexões, e.g. fluidos com pelo menos 25 p.p.m. (partes por milhão) de partículas com 30 micrones de dimensão;
- a velocidade do feixe ultra-sónico no meio intervir directamente no cálculo do caudal;
- a velocidade do feixe ultra-sónico no meio ter de ser significativamente superior à do fluido;
- o facto de o campo ultra-sónico apenas se estender para o caudal periférico, tornando as medidas fortemente dependentes do perfil de velocidades do caudal (i.e. do número de Reynolds<sup>3</sup>  $R_e$ );
- a velocidade das partículas normalmente diferir da velocidade média do fluido;
- serem necessários longos troços de tubagem desimpedida (e.g.  $20D$ ) para obtenção de medidas exactas.

Os valores típicos de frequência das ondas ultra-sónicas emitidas variam entre 1 MHz e 5 MHz e a classe de precisão deste caudalímetro, não sendo muito elevada, situa-se entre 2% e 5% da amplitude de medição.

Existem modelos portáteis, que podem ser apertados exteriormente à tubagem por meio de uma ou duas cintas metálicas, e outros fixos, montados *em linha*. Tanto os modelos fixos,

<sup>2</sup> Na versão montagem exterior por aperto; na versão montagem em linha (invasiva da tubagem) existe uma pequena perda de carga.

<sup>3</sup> Osborne Reynolds, matemático irlandês, 1842–1912.

como os modelos portáteis, podem ser utilizados em tubagens de dimensões muito variadas, desde os 25 mm de diâmetro até às grandes tubagens com diâmetros superiores a 1 m.

## 2. CAUDALÍMETRO POR TEMPO DE PROPAGAÇÃO

O caudalímetro por tempo de propagação mede o tempo de trânsito de uma onda ultra-sónica entre um transmissor e um receptor (elementos piezoeléctricos), quando esta percorre um trajecto no interior de uma tubagem que contém o fluido cujo caudal se pretende medir. O transmissor e o receptor (que também funcionam como receptor e transmissor, respectivamente) são colocados em lados opostos da tubagem, enviando e recebendo, alternadamente, impulsos de ondas ultra-sónicas entre ambos. Estas ondas possuem frequências predefinidas superiores às audíveis (valores usuais superiores aos 20 kHz) e os impulsos, dependendo do diâmetro da tubagem, frequências de repetição que podem variar entre os 20 Hz e os 50 Hz.

Na Figura 3 representam-se dois transdutores (emissores/receptores), situados nas posições A e B, a uma distância  $L$  um do outro, numa montagem *em linha* de configuração Z, formando um ângulo  $\varphi$  com o eixo longitudinal da tubagem de diâmetro  $D$ , representando  $\bar{v}$  a velocidade média do fluido no interior da tubagem.

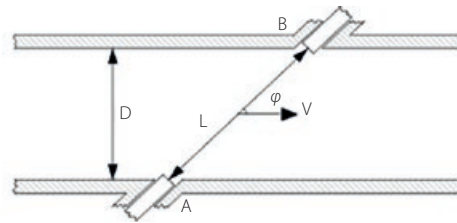


Figura 3. Esquema de funcionamento do caudalímetro por tempo de propagação, numa montagem *em linha* de configuração Z.

O sistema efectua a leitura dos tempos de propagação dos impulsos de ondas ultra-sónicas entre os dois transdutores, nos sentidos a favor e contra o caudal. Caso não exista caudal, os tempos de propagação são os mesmos em ambos os sentidos. Pelo contrário, quando existe caudal, os tempos de propagação são menores quando os impulsos de ondas ultra-sónicas viajam no sentido do caudal, do que quando estes viajam no sentido contrário ao caudal.

Uma vez que os impulsos de ondas ultra-sónicas têm de atravessar a tubagem, percorrendo a distância  $L$  entre transdutores, o fluido não poderá conter uma quantidade significativa de partículas sólidas ou de bolhas gasosas, correndo-se o risco de as ondas ultra-sónicas serem atenuadas até um ponto em que a sua detecção pelo receptor deixa de ser possível.

Os tempos de propagação nos sentidos a favor do caudal,  $t_{AB}$ , e contra o caudal,  $t_{BA}$ , são calculados através das seguintes equações

$$\begin{cases} t_{AB} = \frac{L}{(v_e + \bar{v} \cos \varphi)} \\ t_{BA} = \frac{L}{(v_e - \bar{v} \cos \varphi)} \end{cases} \quad (11)$$

em que  $v_e$  representa a velocidade da onda ultra-sónica no fluido e  $\bar{v}$ ,  $L$  e  $\varphi$  têm o significado representado na Figura 3.

Considerando que a velocidade da onda ultra-sónica no fluido,  $v_e$ , é constante durante a medição dos dois tempos calculados pela equação (11), resolvendo em ordem à velocidade média do fluido,  $\bar{v}$ , obtém-se

$$\bar{v} = \frac{L}{2\cos\varphi} \left( \frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \quad (12)$$

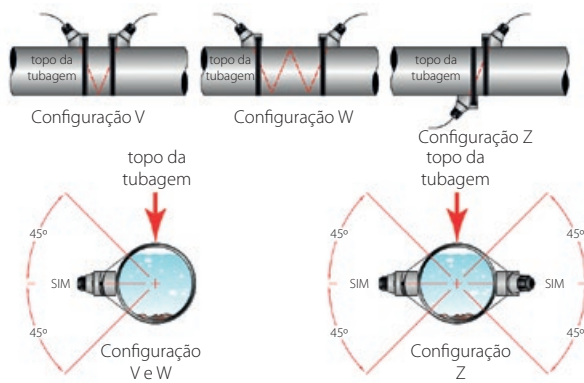
Por último, sabendo o diâmetro  $D$  da tubagem, é possível obter-se o caudal volumétrico pretendido

$$\bar{q} = \frac{L}{2\cos\varphi} \left( \frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \pi \frac{D^2}{4} = k \left( \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} t_{BA}} \right) \quad (13)$$

com  $k$  igual a uma constante.

Os caudalímetros por tempo de propagação podem ser instalados em três configurações distintas: Z ou método directo, V e W ou métodos por reflexão (veja-se a Figura 4). A escolha desta configuração é determinada de acordo com:

- o diâmetro da tubagem;
- o espaço disponível para a montagem dos transdutores;
- o estado das paredes internas da tubagem;
- o tipo de revestimento interno da tubagem;
- as características do fluido.



**Figura 4.** Configurações para a instalação do caudalímetro por tempo de propagação: Z ou método directo, V e W ou métodos por reflexão.

Sempre que possível, deve recorrer-se aos métodos por reflexão, de configuração V ou W, no entanto, em troços curtos de tubagem, ou em tubagem feita de material plástico, utiliza-se o método directo de configuração Z. Para os métodos por reflexão, o espaçamento entre os transdutores deve ser ajustado de acordo com a espessura da parede da tubagem, sendo introduzida alguma complexidade ao procedimento de instalação.

Na configuração Z, os transdutores são colocados em lados opostos da tubagem, estando um a jusante do outro, normalmente a uma distância  $D/2$  (em que  $D$  é o diâmetro da tubagem). Esta configuração é apenas recomendada quando existe elevada turbidez do fluido, um revestimento de argamassa ou uma acumulação excessiva de incrustações nas paredes internas da tubagem, devendo ser evitada a sua instalação em tubagens de pequeno diâmetro, já que a precisão das medições tende a degradar-se devido à curta distância percorrida pelos impulsos de ondas ultra-sónicas.

A configuração V é a forma de instalação mais comum. Os dois transdutores são posicionados do mesmo lado da tubagem, a uma distância, um do outro, aproximadamente igual ao diâmetro  $D$  da tubagem. A reflexão dos impulsos de ondas ul-

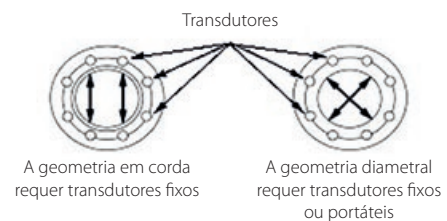
tra-sónicas dá-se na parede interna da tubagem, no lado oposto ao dos transdutores (como representado na Figura 4).

A configuração W é de instalação mais usual em tubagens de diâmetro mais reduzido (de  $1/2$  polegada até  $1 1/2$  polegada). O posicionamento dos transdutores é efectuado como descrito para a configuração V, mas ficando estes a uma distância de cerca de  $2D$ . Desta forma, os impulsos de ondas ultra-sónicas reflectem-se três vezes na parede interna da tubagem, realizando um percurso mais longo e compensando, assim, a curta distância correspondente ao diâmetro mais reduzido da tubagem (ver a Figura 4). Desta forma, é conseguida, uma maior precisão na medição do caudal.

Nos métodos por reflexão V e W, a turbidez dos fluidos e a deposição de impurezas nas paredes internas da tubagem são responsáveis pela diminuição da precisão da medição do caudal.

Tal como nos caudalímetros por efeito Doppler, existem modelos portáteis, que são apertados exteriormente à tubagem por meio de uma ou duas cintas metálicas, e outros fixos, montados *em linha*. Relativamente a estes últimos, existem duas possibilidades: por inserção ou por célula de fluxo. O caudalímetro por inserção requer furos na parede da tubagem para a instalação dos transdutores, já o caudalímetro por célula de fluxo necessita de ser instalado *em linha* com a tubagem, por aperto, por ligação flangeada, etc. Para este último, os transdutores são pré-instalados na célula de fluxo e, assim, o erro de instalação é minimizado. Regra geral, um caudalímetro fixo tem melhor exatidão e melhor estabilidade a longo prazo do que um portátil, sendo, no entanto, mais caro.

Relativamente ao tipo de configuração dos impulsos de ondas ultra-sónicas, as duas geometrias mais comuns são as (como representado na Figura 5): diametral e em corda. Estas duas geometrias são utilizadas de forma distinta, consoante o tipo do perfil de distribuição de velocidades do fluido no interior da tubagem. A geometria diametral utiliza um ou mais pares de transdutores (portáteis ou fixos) e é utilizada quando se crê que a forma do perfil de velocidades na secção de medição é muito semelhante à de um escoamento turbulento totalmente desenvolvido. Por outro lado, a geometria em corda utiliza quatro ou mais pares de transdutores (fixos). A componente de velocidade axial média para cada caminho (corda) sónico é usada para estabelecer o perfil de velocidades que, posteriormente, é integrado numericamente sobre a área transversal da tubagem, permitindo determinar o caudal do fluido. Desta forma, a exatidão deste tipo de caudalímetro é relativamente independente do perfil de distribuição de velocidades do fluido.



**Figura 5.** Tipos de configuração geométrica dos impulsos de ondas ultra-sónicas: em corda e diametral.

As principais vantagens do caudalímetro por tempo de propagação são:

- obstruírem pouco ou nada o caudal;
- introduzirem uma perda de pressão igual à de um troço recto de tubagem de comprimento equivalente;

- permitirem medir caudais em qualquer direção;
- permitirem medições de caudais diminutos;
- efectuarem leituras de caudal que não dependem da temperatura, da massa volúmica ou da viscosidade do fluido;
- serem de utilização apropriada em zonas de risco potencial;
- possuírem um relativo baixo consumo de energia;
- terem uma precisão próxima de 1% do caudal medido;
- disponibilizarem uma ampla seleção de protocolos para o sinal de saída, para ligação a registadores de dados ("*data loggers*"), ecrãs e sistemas remotos;
- possuírem ecrã LCD (do inglês "*Liquid Crystal Display*") integrado ou remoto;
- existirem comercialmente modelos portáteis alimentados por pilhas.

Adicionalmente, para os modelos portáteis, têm-se as seguintes vantagens:

- as pressões elevadas no interior da tubagem não são problemáticas;
- a questão da compatibilidade com o fluido do processo não se coloca;
- a resistência à corrosão e à abrasão;
- as condições de higiene são intrínsecas;
- a montagem é fácil, não necessitando de ser efectuada por engenheiros.

As principais limitações ao funcionamento destes caudalímetros são:

- a necessidade de possuírem um sistema de produção de ondas ultra-sónicas de elevada repetibilidade;
- a possibilidade dos impulsos de ondas ultra-sónicas serem bloqueados pelo excesso de partículas sólidas, ou de bolhas de gás, que possam existir em suspensão em fluidos lamacentos;

- não efectuarem medidas exactas em líquidos genéricos que arrastem gases;
- não tolerarem bem caudais de característica pulsátil;
- não serem recomendados em medições com lamas primárias, lamas digeridas aerobicamente, lamas sépticas e lamas de carbono ativado.

Relativamente à instalação dos caudalímetros por tempo de propagação, devem ter-se as seguintes precauções:

- a parede exterior da tubagem deve estar limpa e sem ferrugem;
- a tubagem deve estar cheia com o fluido do processo;
- o fluido do processo deve ser um condutor sónico;
- os transdutores não devem instalados em pontos a jusante e próximos de válvulas de estrangulamento ou de tanques misturadores.

Estes caudalímetros são particularmente eficazes na medição de caudais de:

- água ultra-pura;
- esgotos e águas residuais;
- vapor;
- gás de cidade;
- líquidos de elevada viscosidade;
- líquidos abrasivos;
- líquidos corrosivos;
- bebidas para consumo humano;
- ar comprimido;
- ... ❗