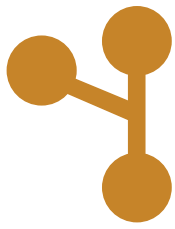


REVISTA TÉCNICO - CIENTÍFICA



# robótica®

automação  
controlo  
instrumentação



## ARTIGO CIENTÍFICO

- Impressoras 3D ao serviço da proteção contra a Covid-19

## INSTRUMENTAÇÃO

- Caudalímetro de vórtice ou turbilhão

## AUTOMAÇÃO E CONTROLO

- Automatismos programáveis (4.ª Parte)

## ELETRÓNICA INDUSTRIAL

- Eletrónica (11.ª Parte)

## DOSSIER SOBRE ROBÓTICA COLABORATIVA

- Solução modular de desinfeção para *robots* móveis colaborativos
- Porque investir em robótica colaborativa em tempo de pandemia?
- Robótica colaborativa na realidade atual (Covid-19)
- Soluções de segurança para colaboração homem-robot

## ESPECIAL SOBRE FABRICAÇÃO ADITIVA

- Impressão 3D é "trunfo" contra a pandemia e há novos produtos a nascer no INEGI
- Digital Manufacturing and Teaching in the area of 3D Printing

## NOTA TÉCNICA

- Monitorização de pulsação t-mass e prevenção de corrosão em sistemas de ar comprimido

## REPORTAGEM

- Festo Virtual Exhibition 2020
- WeAreCobots da Universal Robots, "a maior feira virtual de robótica colaborativa"
- Weidmüller Iberia ajuda a salvar vidas com Impressão 3D

## ENTREVISTA

- Teixeira Bicho, Fagor Automation, "O processo aditivo é estratégico para a nossa empresa"
- Paulo Sousa, FANUC, "A automatização assume um papel fundamental na competitividade das empresas"
- Adolfo Ibáñez Monteagudo, Sumcab Specialcable Group, "Fiabilidade para que nada pare"

KEY MACHINE INDICATORS  
**Predictive Maintenance**  
Predictive Quality

MACHINE LEARNING  
**Anomaly Detection**  
Anomaly Classification

OPERATIONAL STATE

ANOMALY DETECTION ANOMALY CLASSIFICATION PREDICTIVE MAINTENANCE PREDICTIVE QUALITY USER PROFILE DATA PROTECTION ON

www.weidmuller.pt

**Weidmüller**

# Caudalímetro de vórtice ou turbilhão

## 1. INTRODUÇÃO

Considere-se um fluido em escoamento permanente, o que significa que a velocidade e a pressão de uma partícula do mesmo, num qualquer determinado ponto, não variam no tempo. No entanto, a velocidade e a pressão podem variar de um ponto para outro do fluido, fazendo com que ambas as grandezas sejam apenas função das coordenadas espaciais e não da temporal.

O fluido é também considerado ser uniforme, uma vez que uma partícula de fluido possui um vector de velocidade constante ao longo da sua trajectória. Pode existir variação do vector de velocidade entre trajectórias de partículas distintas, mas o movimento conjunto de todas as partículas do fluido tem uma velocidade média constante em qualquer secção transversal.

Neste fluido de escoamento permanente e uniforme introduza-se uma vareta cilíndrica, perpendicular à direcção do escoamento. Por detrás da vareta forma-se uma região de relativa baixa pressão, a que se dá o nome de esteira, provocada pelo fenómeno de descolamento de partículas do fluido, que se difunde dentro do escoamento principal e eventualmente desaparece. A região da esteira é deficiente em quantidade de movimento, caracterizando-se por um baixo valor do número de Reynolds<sup>1</sup>  $R_e$ , a que corresponde um tipo de escoamento laminar (aquele em que as partículas do fluido têm uma trajectória ordenada; o escoamento é laminar se  $R_e < 2000$ ).

Para valores de  $R_e < 40$  as vibrações provocadas na esteira são tão intensas que, partindo da vareta, a jusante da mesma, surgem dois turbilhões: um superior, com rotação no sentido horário, e um inferior, com rotação no sentido anti-horário. A este fenómeno dá-se o nome de instabilidade de Strouhal<sup>2</sup>.

Ao conjunto de turbilhões que vão sendo dissipados e gerados em alternância, a uma frequência constante e com um espaçamento regular, como se mostra na figura 1, dá-se o nome de estrada de vórtices de Kármán<sup>3</sup>.

Para  $R_e \approx 200$  a estrutura da estrada de vórtices de Kármán torna-se tridimensional, desaparecendo quando  $R_e > 400$ .

A título de curiosidade refere-se a observação da estrada de vórtices de Kármán na atmosfera do planeta Terra, a sul dos arquipélagos da Madeira e das Canárias, conforme se mostra na figura 2.



Figura 1. Estrada de vórtices de Kármán gerados por uma vareta cilíndrica introduzida num escoamento com  $R_e=140$ . Crédito: Van Dyke, 1982.

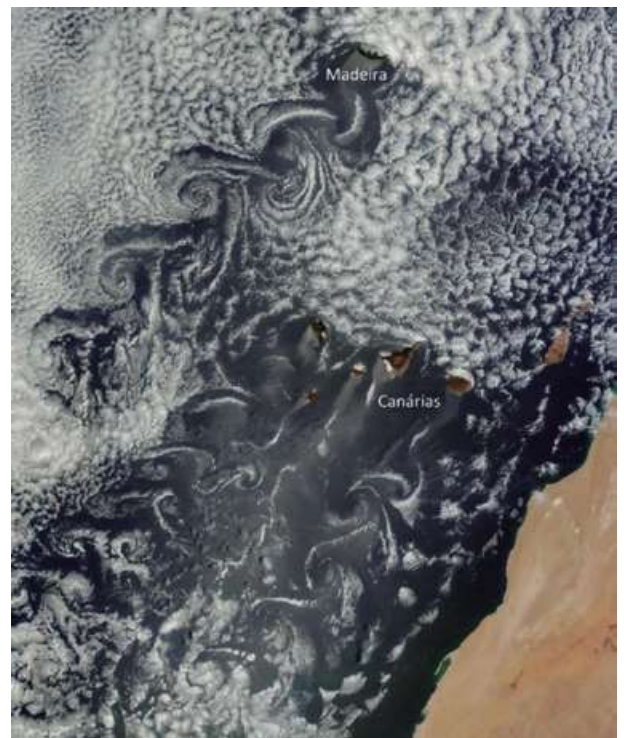


Figura 2. Estrada de vórtices de Kármán a sul dos arquipélagos da Madeira e das Canárias, numa imagem captada pelo sistema de imagem MODIS do satélite Terra, a 20 de Maio de 2015. Crédito: Jeff Schmaltz/LANCE/EOSDIS Rapid Response.

## 2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Os estudos efetuados mostram que existe uma relação bem determinada entre a largura da vareta  $h$ , a frequência de repetição dos turbilhões  $f_r$  e a velocidade média do fluido  $\bar{v}$ , revelando que, quanto mais elevado for o caudal, maior será a frequência dos turbilhões

$$\bar{v} = \frac{1}{S_N} h f_r \Leftrightarrow f_r = \frac{S_N}{h} \bar{v} \quad (1)$$

1 Osborne Reynolds, matemático irlandês, 1842–1912.

2 Čeněk Strouhal, físico checo, 1850–1922.

3 Theodore von Kármán, matemático, engenheiro aeroespacial e físico húngaro, 1881–1963.

É este o princípio de funcionamento dos caudalímetros de vórtice. Ao parâmetro  $S_N$ , adimensional, dá-se o nome de número de Strouhal. O seu valor depende das características do escoamento, sendo praticamente constante dentro de um determinado intervalo de medição do número de Reynolds:  $0,19 < S_N < 0,21$  para  $300 < R_e < 250000$  (vareta cilíndrica).

O valor de  $S_N$  também varia consoante o valor da secção reta da vareta. A fim de produzir turbilhões bem definidos, os caudalímetros industriais utilizam, em vez de uma vareta cilíndrica, uma vareta de secção trapezoidal (veja-se a figura 3).

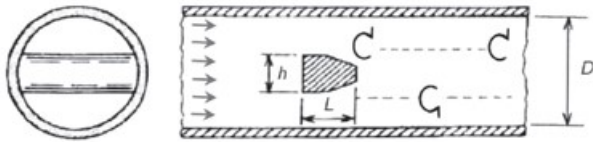


Figura 3. Caudalímetro de vórtice com vareta trapezoidal.

Para as dimensões apresentadas na figura 3, com  $h=1/3 D$  e  $L=1,3h$ , conclui-se que  $S_N=0,88 \pm 0,01$ , quando  $10^4 < R_e < 10^6$ .

Designado por  $A$  a área livre entre o tubo e a vareta, será  $q=A \bar{v}$ , donde, atendendo à equação (1),

$$q = A \frac{1}{S_N} h f_r = K f_r \quad (2)$$

sendo  $k$  uma constante.

Este caudalímetro é volumétrico e o caudal  $q$  é directamente proporcional à frequência de repetição  $f_r$  dos vórtices.

A localização dos sensores para a medição da frequência de repetição dos turbilhões é no interior da tubagem, a jusante da haste trapezoidal, ou lateralmente, na própria haste. São, regra geral, sensores piezoeléctricos que, através da pressão pulsada exercida pelo fluido, medem a frequência de oscilação deste. A fim de minimizar o efeito do ruído exterior de modo comum, tipicamente presente em ambientes industriais, são utilizados dois sensores em oposição de fase e sofisticados algoritmos de filtragem. Os dois sensores piezoeléctricos são ligados individualmente a dois amplificadores de carga, sendo a saída de cada um destes ligada a um conversor analógico/digital. Desta forma, quaisquer perturbações sentidas simultaneamente pela electrónica de condicionamento de sinal, são diferenciadas como sendo sinais não-vórtice.

Quando se trata de medições de caudal de vapor é necessário saber em que condições é que o caudalímetro foi calibrado, dispor de sensores adicionais, de pressão e de temperatura, e efectuar a compensação da leitura do caudal de acordo com

$$\rho = \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T} \quad (3)$$

Em que  $p$  é a pressão absoluta e  $T$  a temperatura absoluta, nas condições de funcionamento, e  $p_0$  a pressão absoluta e  $T_0$  a tem-

peratura absoluta, nas condições de calibração do transmissor. Modelos recentes incorporam estes sensores e dispõem de um microprocessador que efectua esta compensação. Na figura 4 apresenta-se um exemplo de um desses caudalímetros: o Vortex Foxboro Série 84.

A precisão dos caudalímetros de vórtice está compreendida entre 0,5 % e 1 % da amplitude de medição.



Figura 4. Caudalímetro Vortex Foxboro Série 84. Crédito: Foxboro (Division of Schneider Electric).

### 3. VANTAGENS E INCONVENIENTES DA MEDIÇÃO DO CAUDAL POR CAUDALÍMETROS DE VÓRTICE OU TURBILHÃO

A medição do caudal volumétrico recorrendo a caudalímetros de vórtice ou turbilhão apresenta vantagens e inconvenientes em relação a outros métodos de medida de caudal, nomeadamente:

#### • Vantagens:

- > não possuem peças móveis, logo, uma manutenção simplificada;
- > servirem para líquidos, gases e vapor, condutores ou isolantes eléctricos;
- > possuem um intervalo de medição de pressões elevado, dos 0 kgf/cm<sup>2</sup> aos 300 kgf/cm<sup>2</sup>;
- > terem um intervalo de medição de temperaturas relativamente elevado, dos -200 °C aos +400 °C;
- > poderem ser instalados em qualquer posição, horizontal, vertical ou inclinada;
- > serem lineares;
- > suportarem ligação a dois fios.

#### • Inconvenientes:

- > as leituras poderem ser influenciadas por vibrações das tubagens;
- > não servirem para líquidos com fibras em suspensão;
- > serem unidireccionais. ❗