

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO PERIÓDICO GERADO POR MEDIDORES DE FLUXO TIPO VÓRTICE ATRAVÉS DA LASER DOPPLER VELOCIMETRIA

Sonia M. dos Santos – vnsantos@mikrus.com.br

Fundação Universidade Federal do Rio Grande – Departamento de Física
96201-900 - Rio Grande, RS, Brasil

Vilson C. da S. Ferreira – vferreir@vortex.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. P. 17819 – 90035-972 – Porto Alegre, RS, Brasil

Resumo. *O escoamento no entorno de um obstáculo quase sempre ocorre com o aparecimento de uma esteira de vórtices emitidos numa determinada frequência. No presente trabalho foram utilizados dois tipos de elementos de formas diferentes como geradores de vórtices. Um Laser Doppler Velocímetro (LDV) acoplado a um sistema sincronizador de sinal (“encoder”), que permite individualizar sinais de Doppler espaçados de 1MHz, foram utilizados para caracterizar e determinar as dimensões dos vórtices produzidos pelos diferentes geradores. Os obstáculos analisados tem seções transversais mostradas na figura 5 e instalados no centro da seção de teste da bancada de ensaio. Os diferentes posicionamentos permitiu estabelecer relações entre as dimensões dos vórtices bem como seus espaçamentos, nas direções axial e radial do escoamento. A determinação da frequência de surgimento dos vórtices no escoamento permitiu também comparar o número de Strouhal (S_r), característico de escoamentos periódicos obtidos nestes experimentos, com os dados disponíveis de bibliografia especializada. A análise dos resultados permite determinar geometrias mais adequadas para os elementos geradores de vórtices a serem empregados em medidores de fluxo do tipo vórtice. A instrumentação empregada permitiu medir as componentes da velocidade axial e circunferencial do escoamento, a determinação dos campos de velocidades e da frequência dos vórtices. Os ensaios foram realizados numa bancada de calibração de medidores de fluxo para líquidos, do tipo gravimétrica, com incerteza expandida, avaliada em conformidade com o guia da ISO, em $\pm 0,4\%$.*

Palavras chave: *Vórtices; Laser Doppler Velocimetria ; Frequência de vórtices*

1. INTRODUÇÃO

Uma esteira de vórtices, segundo De Carlo (1984), é produzida pelo encontro brusco de um corpo, normalmente com face plana, colocado perpendicularmente ao escoamento do fluido, como mostrado na Fig.1. A separação da camada limite e formação de vórtices são também descritas por Kármán e Rubach (1912), por Fage e Johansen (1927), por Goldstein (1965), num fluxo ao redor de uma placa plana, por Schlichting (1968), num fluxo ao redor de um cilindro e mais recentemente por Zhang e Ko (1996) e Achenbach e Heineck (1981), entre outros.

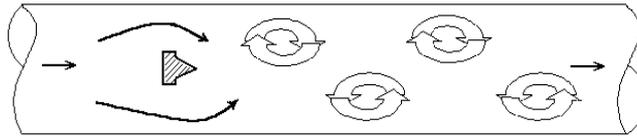


Figura 1 – Esteira de vórtices produzidas por obstáculo – Vista superior

Quando um fluido passa no entorno de um elemento gerador de vórtices, seus cantos vivos causam pontos de separação da camada limite do fluido. A esteira provocada pela separação da camada limite contém altos gradientes de velocidade de fluido de inerente instabilidade. Um determinado volume de fluido desta esteira, formado por gradientes de mesmo sentido, se destaca e, após percorrida uma determinada distância a jusante do obstáculo, transforma-se num vórtice bem caracterizado. Diversos outros volumes seguem a mesma formação alternando-se de posição em relação ao eixo de simetria do obstáculo. A frequência dos vórtices formados é diretamente proporcional à velocidade do fluido, fato descoberto por Strouhal (1878) e comentado por Schlichting (1968). No entanto, a aplicação deste fenômeno na medição de fluxo (medidores de fluxo tipo vórtice) apareceu comercialmente a partir dos anos 70. Estes medidores são geralmente compostos de três partes básicas: um elemento gerador de vórtices, um sensor para converter a energia dos vórtices em pulsos elétricos e um transmissor para amplificação e transmissão do sinal.

A passagem do vórtice pelo elemento sensor do medidor de fluxo pode ser percebida de duas formas: pela flutuação da onda de pressão ou pela flutuação da velocidade local.

As formas e as dimensões do corpo gerador de vórtices são importantes para a performance hidrodinâmica do medidor de fluxo. Quando suas dimensões crescem, a frequência de oscilação no escoamento decresce, para uma velocidade do fluido fixa, de acordo com a Eq. 1:

$$S_r = \frac{n \cdot b}{V} \quad (1)$$

onde:

S_r = n° de Strouhal, sem dimensão

b = projeção da largura do obstáculo, m

V = velocidade média do escoamento, m/s

n = frequência do escoamento, Hz.

Para que se mantenha uma relação linear entre a frequência dos vórtices (n) e a velocidade do fluido (V), o limite mínimo do valor do número de Reynolds (Yamasaki, 1974), Re_D é de 10^4 . O fluxo máximo de fluido (V_{max}) também é limitado por problemas de cavitação, quando o fluido é um líquido, devendo ser mantida uma pressão mínima, acima da pressão parcial de vapor do fluido no entorno do obstáculo. Segundo Yamasaki (1974), quando Re_D assume valores acima de 10^5 a camada limite torna-se excessivamente turbulenta a ponto de desfazer a estabilidade e periodicidade da esteira de vórtices. Esta característica, adicionada ao consequente aumento do coeficiente de arrasto, torna restrita a faixa de uso deste tipo de medidor.

A dimensão geométrica b do obstáculo, deve ser escolhida de modo conveniente para ser uma dimensão característica da representação do fenômeno físico, conforme White, Rodely e McMurtrie, contido em Dowdell (1974).

Ainda, para um fluxo ao redor de um cilindro, h/a vale 0,28 (Yamasaki, 1974) e no entorno de uma placa plana, com ângulo de ataque $\alpha = 90^\circ$, (Fage e Johansen, 1927), h/a varia com a distância na direção jusante, sendo $h/a = 0,25$ a uma distância $5b$ da placa, $h/a = 0,38$ a $10b$ e $h/a = 0,52$ a $20b$, sendo Re_b da ordem de 2×10^3 . A Figura 2, identifica as distâncias mencionadas.



Figura 2 - Desenvolvimento teórico dos vórtices

Neste trabalho, conforme descrição do experimento, são utilizados dois tipos de obstáculos para determinação da frequência e dimensões dos vórtices, através da medida da flutuação de velocidade local.

2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Para determinação da frequência e dimensões dos vórtices, pela medida da flutuação da velocidade local, conforme Fig. 3, foram utilizados os seguintes equipamentos:

Laser Doppler Velocímetro (LDV) → Utilizado para medir a velocidade de partículas contidas na água, as quais se consideram ter a mesma velocidade do fluido em escoamento. É composto de uma fonte de laser do tipo ions de argônio (4W), um sistema óptico com divisor de frequência, cabos de fibra óptica, fotomultiplicadoras e sonda laser, um processador de sinal do tipo correlação cruzada (FVA a duas componentes) e um microcomputador para pós-processamento dos dados.

Uma partícula, ao cruzar o volume de medição formado pelo encontro de dois pares de feixes de lasers (verdes e azuis), produz, geralmente, dois efeitos Doppler, um para cada conjunto de franjas. Os dois sinais luminosos, capturados pela sonda, chegam individualizados às respectivas fotomultiplicadoras, após passar por dois filtros de alta resolução (514,5 nm e 488 nm). Os sinais elétricos, provenientes das fotomultiplicadoras, são amplificados, validados e pré-processados no FVA. Posteriormente, os dados são recuperados e pós-processados no microcomputador transformando os valores numéricos de tensão elétrica, anteriormente obtidos, em valores de velocidades (m/s).

A característica aleatória de um sinal válido é mantida através de um discretizador operado com base num oscilador fixo em 1MHz. Assim, durante a medição de um escoamento em regime permanente, embora todos os sinais validados sejam processados e colocados num único arquivo, não é perdida a história de chegada de um sinal Doppler devido a um contador associado ao oscilador. Para um escoamento periódico, no entanto, é necessário individualizar os efeitos repetitivos, colocando-os em diferentes arquivos. Isto é feito com o auxílio do sincronizador que permite agrupar os sinais Doppler processados, em faixas de tempo previamente estabelecidas e denominadas de “janelas”. A largura de uma janela depende, fundamentalmente, da frequência estabelecida no gerador de sinal.

Sincronizador (Encoder) → Usado para chavear o processador (FVA), interrompendo o processamento do sinal Doppler proveniente da fotomultiplicadora por um lapso de tempo fixo. É também função do sincronizador fornecer o sinal para reinicializar o contador da próxima “janela” e ajustar seu tempo de duração, que é função da frequência aplicada no gerador de funções. Entre duas interrupções sucessivas detecta-se a frequência dos vórtices através do campo de velocidades dos conjuntos de partículas que produziram sinal Doppler válido.

Gerador de funções → Empregado para permitir variar a frequência de excitação do “encoder” pela aplicação de uma função senoidal, com variação desde 6Hz até 96Hz. Os ensaios formam feitos em degraus de 6 em 6Hz;

Osciloscópio → Usado para monitorar a qualidade do sinal Doppler (*burst*), a frequência da onda produzida no gerador de funções e a atuação do encoder;

Microcomputador → Usado para recuperar e pós-processar os dados.

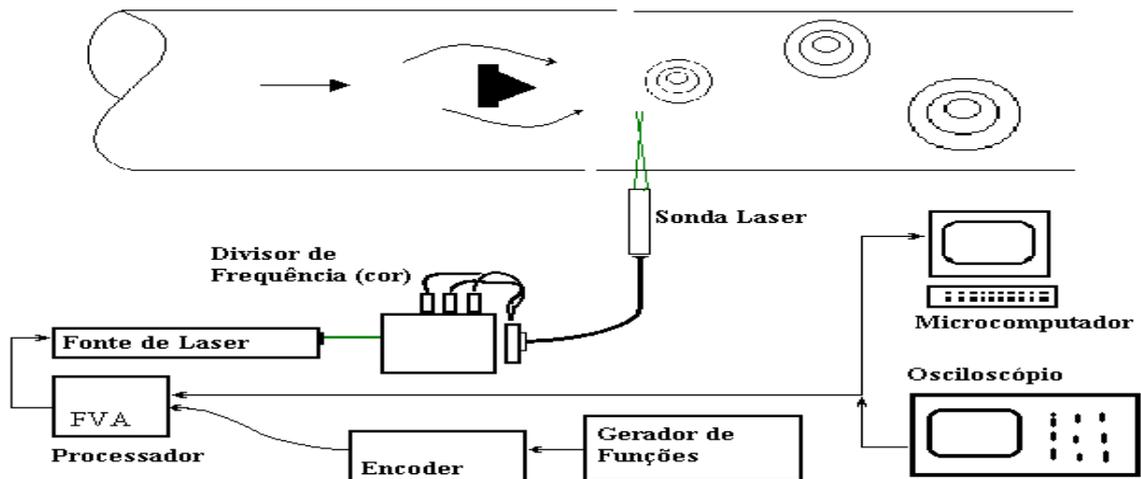


Figura 3 – Equipamentos empregados

2.1 Operação do Sincronizador (“encoder”)

O sincronizador, inicialmente desenvolvido para estabelecer a coordenada circunferencial (Favaretto, 2000) para as componentes de velocidades medidas numa região entre pás de uma turbomáquina, é empregado aqui para dividir um conjunto de dados processados em M janelas, com a zeragem do contador, cada vez que um pico sincronizado chega ao processador. Assim são formadas M janelas, conforme Fig.4, cada uma com um total (máximo) de N dados (Doppler *bursts*) válidos e seqüencialmente numerados (1,2,3,... N). O processamento envolve N arquivos montados agrupando-se os dados homólogos (de mesmo número de ordem). Desta forma um vórtice será formado pela superposição das M janelas, se adequadamente for escolhida sua frequência de aparecimento.

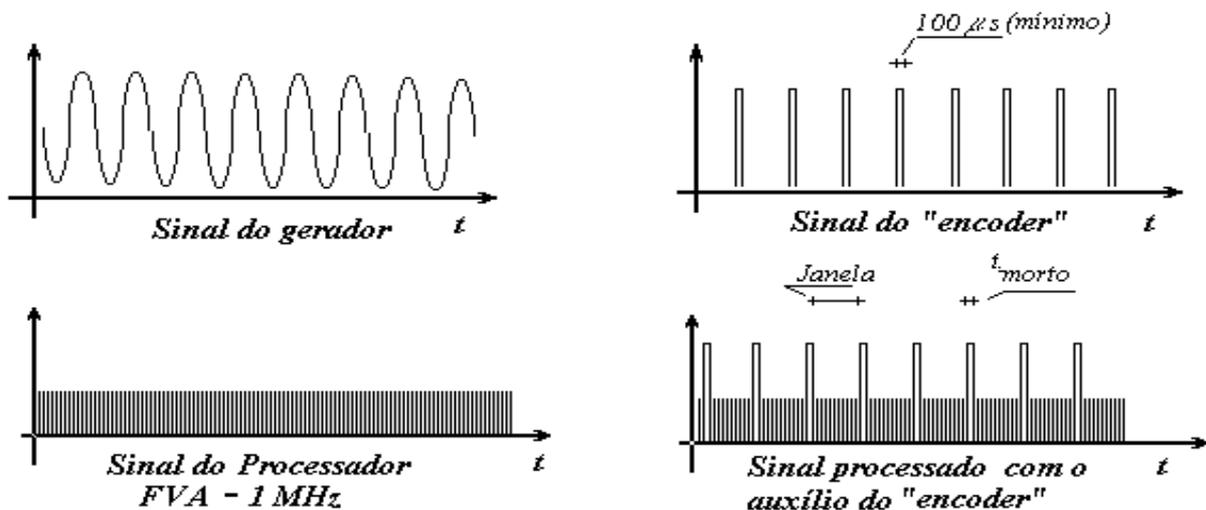


Figura 4 – Operação do sincronizador (encoder)

O experimento foi realizado na seção de teste de uma bancada de calibração de medidores de fluxo para líquidos (água). A bancada possui um circuito fechado para circulação de água por meio de uma bomba centrífuga e está descrita em Ferreira et al. (1991).

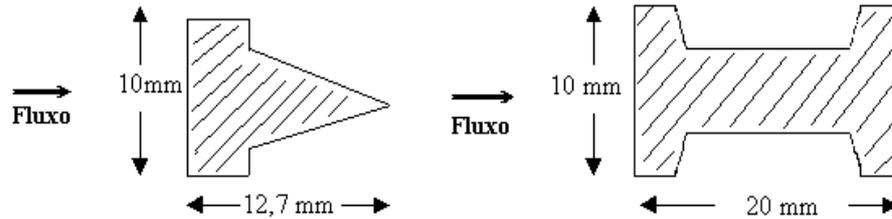


Figura 5 – Seção transversal dos obstáculos testados

Nesta mesma bancada, um trabalho anterior (Santos e Ferreira, 1998), validou a técnica com a determinação da frequência dos vórtices, dimensões e n° de Strouhal, S_r , para um escoamento consagrado e referenciado de uma placa plana com diferentes ângulos de ataque (0° , 45° e 90°) com relação ao escoamento principal.

No presente trabalho, são estudados vórtices produzidos por dois obstáculos diferentes, de geometria prismática, cuja seção transversal são mostradas na Fig. 5.

Os obstáculos foram colocados no interior da seção de teste, tubo circular em acrílico de 52mm de diâmetro interno, nas posições horizontal e vertical, para medida de h/a e a/b , conforme Figs. 3 e 7. A posição horizontal é necessária para a correta medição da componente de velocidade circunferencial que forma a revolução do vórtice. O fluido empregado foi água a 20°C na vazão de $3,0 \text{ kg/s} \pm 2,5\%$, correspondente a um Re_D de $7,25 \times 10^4$. O número de Reynolds característico de cada obstáculo foi $Re_b = 1,78 \times 10^4$ para o obstáculo 1 e $Re_b = 2,79 \times 10^4$ para o obstáculo 2.

White, Rodely e McMurtrie (Dowdell, 1974), estudando um objeto gerador de vórtices semelhante ao obstáculo 1, obtiveram para uma relação b/D igual a 0,33 e diâmetro interno do tubo $D = 50\text{mm}$ numa faixa de Reynolds Re_D entre 10^4 e 10^6 , o número de Strouhal $S_r = 0,875$. Como, no presente caso a relação $b/D = 0,23$ e o diâmetro D é igual a 52mm, S_r deve assumir valor maior para o mesmo número de Re . Isto foi comprovado, pois obteve-se $S_r = 0,60$. Substituindo-se os dados de velocidade do escoamento V , do número de Strouhal, S_r e a dimensão mais representativa do obstáculo b , na Eq. 1, chegou-se à frequência de sucessão de vórtices da ordem de 66Hz.

Como não estavam disponíveis dados semelhantes para o obstáculo 2, decidiu-se trabalhar neste experimento com frequências múltiplas de 6Hz, variando-se desde a frequência de 6Hz até 96Hz. Para cada frequência aplicada pelo gerador de funções, foram medidas as componentes axial e circunferencial da velocidade do escoamento, como função do tempo de chegada das partículas, em seis posições na direção radial (y) e seis posições na direção axial (x). As Figuras. 6 e 7 apresentam os pontos de medidas nas vistas frontal e superior da seção de testes, para o obstáculo 1.

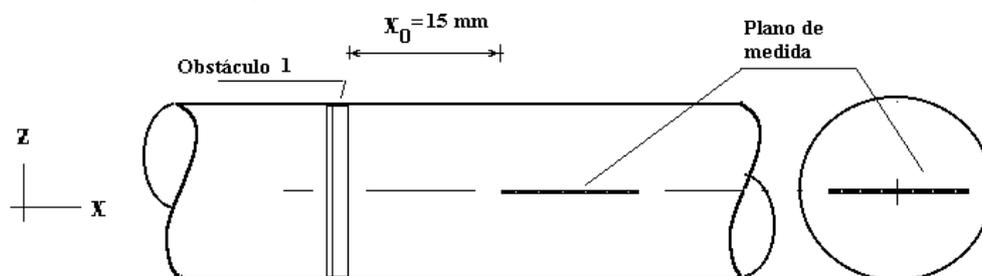


Figura 6 – Vista frontal do plano de medida

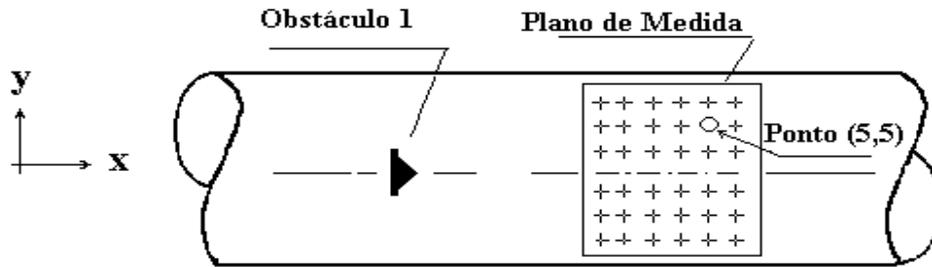


Figura 7 – Vista horizontal do plano de medida

Para o obstáculo 2, duas posições do plano de medida foram adotadas, a primeira, numa distância de $x_0 = 20$ mm e a segunda a 50 mm, a jusante do obstáculo.

3. RESULTADOS

As frequências que apresentaram maior formação de vórtices foram 66Hz e 48Hz, para os obstáculos 1 e obstáculo 2, respectivamente. As Figuras 8 e 9 mostram o comportamento da componente axial da velocidade $u = f(t)$, para o obstáculo 1 e obstáculo 2, caracterizando a alternância da direção da velocidade no decorrer do tempo de chegada das partículas nos pontos analisados.

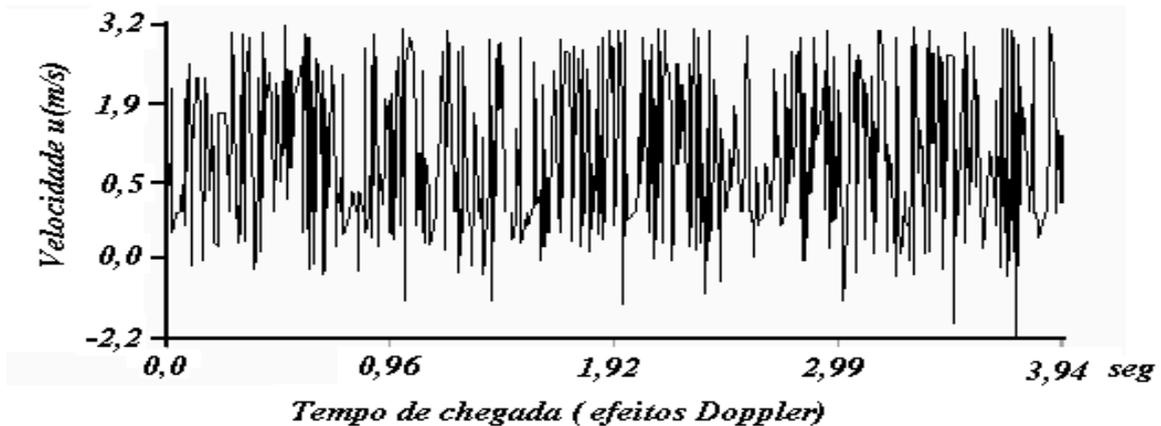


Fig. 8 – Componente axial, $u=f(t)$ no ponto $(x ; y) = (15,0 ; 7,3)$ mm e frequência $n = 66$ Hz . (Obstáculo 1)

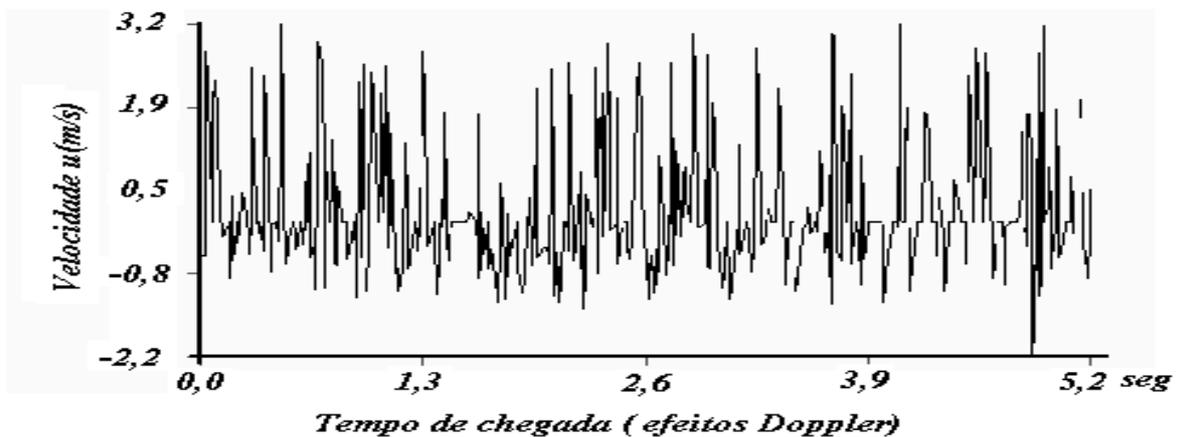


Fig. 9 - Componente axial, $u=f(t)$ no ponto $(x ; y) = (30,0 ; 37,3)$ mm e frequência $n = 48$ Hz . (Obstáculo 2).

As Figuras 10 e 11, apresentam o desenvolvimento dos perfis da componente da velocidade $u = f(x,y)$ ao longo da direção radial, após a passagem pelos obstáculos 1 e 2, respectivamente.

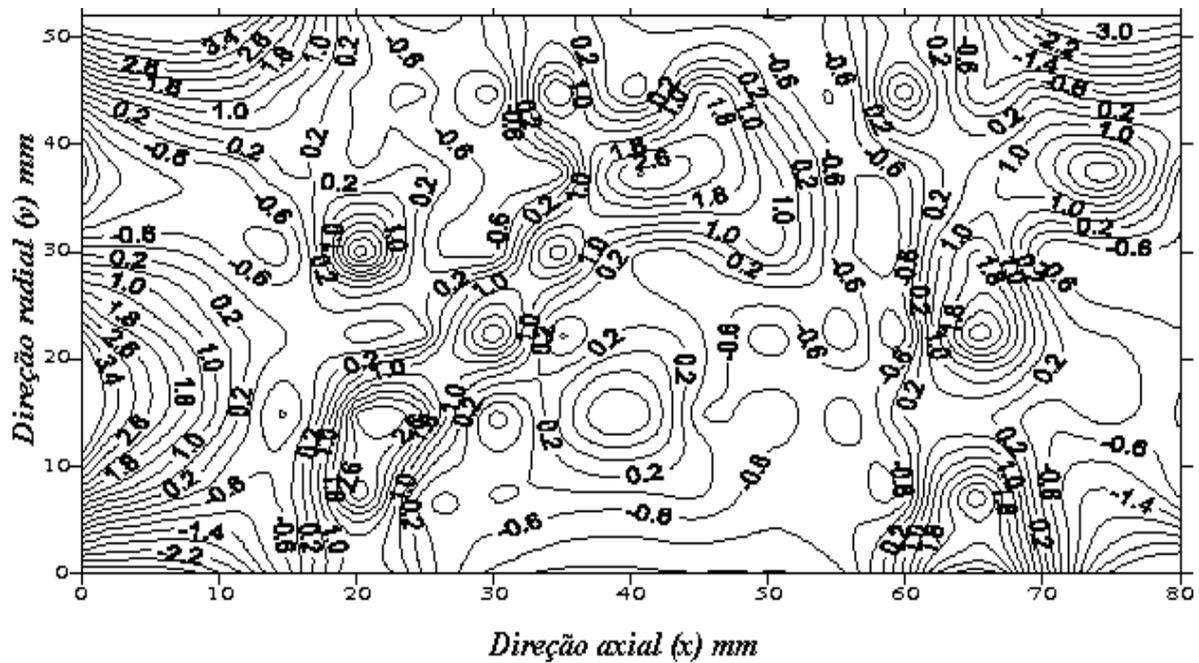


Fig. 10 – Distribuição da componente axial $u = f(x,y)$ produzida pelo Obstáculo 1 ($n = 66\text{Hz}$).

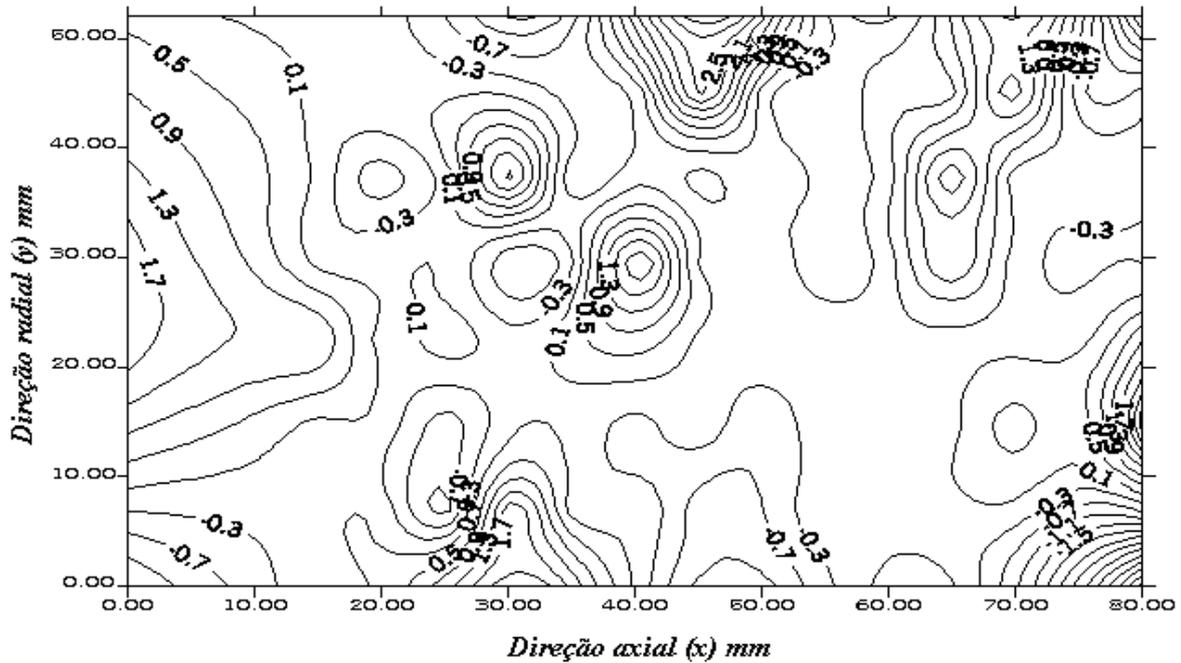


Fig. 11 – Distribuição da componente axial $u = f(x,y)$ produzida pelo Obstáculo 2 ($n = 48\text{Hz}$).

Diagramas semelhantes são obtidas para a componente circunferencial e a composição das duas.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Campos de velocidade medidos para as diferentes frequências, variando de 6 a 96Hz, permitiram destacar a diferença de comportamento do escoamento sob a ação dos dois obstáculos considerados e identificar uma frequência característica média para a formação de uma esteira sistemática de vórtices. A frequência característica, para o obstáculo 1, foi confirmada em 66Hz e para o obstáculo 2, avaliada em 48Hz. A Figura 12 mostra como a avaliação da frequência característica média para o obstáculo 1, foi obtida. É representada nesta figura a superposição de algumas “janelas”, mostrando a variação da componente axial, $u(x)$, com o tempo. Esta figura foi montada para o ponto P(5,5) conforme a Fig. 7.

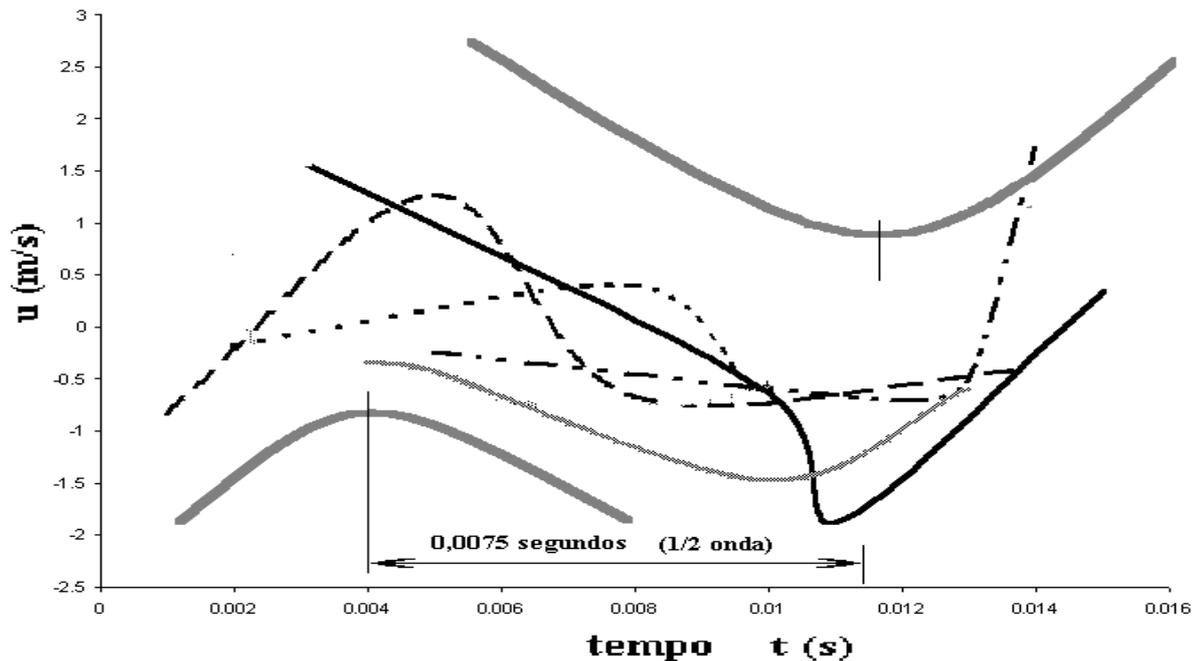


Figura 12 - Avaliação da frequência característica média para o obstáculo 1

Semelhantes superposições foram feitas para os demais pontos e componentes de velocidade mostrando semelhante configuração.

Os resultados obtidos, permitiram estabelecer as relações geométricas h/a e a/b e o número de Strouhal, S_r , que caracterizam os vórtices em cada uma das situações analisadas sendo apresentados na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 – Posição geométrica dos vórtices e número de Strouhal, S_r

$\alpha = 90^\circ$	Obstáculo 1	Obstáculo 2
h/a	0,940 a 1,000	0,976 a 1,038
a/b	0,622 a 0,661	0,400 a 0,425
S_r	0,60	0,63
X/b	0,787 a 6,300	0,750 a 4,000
$n (Hz)$	66	48

5. CONCLUSÕES

Como conclusão do presente trabalho, deve-se registrar que a metodologia empregada mostrou-se aplicável para a determinação das características de uma esteira de vórtice gerada por um obstáculo de geometria qualquer. As dimensões dos vórtices, sua frequência característica de aparecimento bem como o número de Strouhal podem ser determinados. Deve-se ressaltar, no entanto, que a aplicação desta metodologia demonstrou ser muito morosa tanto devido ao tempo de aquisição como devido ao seu processamento, por se tratar de uma metodologia de massivo volume de dados.

A varredura da faixa de frequência para cada obstáculo formaram 16 séries de medições, sendo que cada série é composta de pelo menos 36 pontos de medida. Cada medida é composta por dois conjuntos de dados (duas componentes de velocidade) e cada conjunto com valores de velocidade a serem processados que variam entre 1000 e 3000 (efeitos Doppler), distribuídos em N arquivos (das M “janelas”) que variam de acordo com a frequência pré-estabelecida no sincronizador. Uma avaliação pessimista indica que foram processados da ordem de 1×10^7 dados para a obtenção dos resultados constantes na Tabela 1. Deve-se alertar, ainda, que todos estes dados se referem a uma condição de vazão, apenas. Seria extremamente desejável ter-se semelhante informação para outras vazões, pelo menos para mais duas condições, as limites inferior e superior de operação do obstáculo.

Uma nova metodologia, denominada de processamento digital de imagens “PIV”, está em desenvolvimento e parcialmente disponível para esta finalidade. Esta nova técnica permite o processamento instantâneo de imagens planas contendo um conjunto de vórtices. Embora o número de dados seja muito maior do que o identificado na metodologia anterior, eles são capturados simultaneamente, fato não possível pela metodologia anterior.

REFERÊNCIAS

- Achenbach, E. e Heinecke, E., 1981, “On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 ”, *J.Fluid Mech.*, Vol.109, pp.239-251.
- Dantec Elektronik, 1990, “Floware User’s Guide”, Denmark.
- De Carlo, J.P., 1984, “Fundamentals of flow measurements”, Instrument Society, New York, pp.143 - 148.
- Favaretto, C.F.F., 2000, - Análise dos Efeitos Dinâmicos e Cinemáticos de uma Turbina de Medição – Dissertação de Mestrado, PROMEC – UFRGS, Porto Alegre.
- Ferreira, V. C. S., Souto S. L.L. e Schuller, M.B., 1991, Medidores de Fluxo: Curva de Calibração. - XI COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, pp 49-52, São Paulo, SP.
- Goldstein,S., 1965, “Modern Developments in Fluid Dynamics”, Dover Publications Inc., New York ,Vol.I, pp.36-40 e pp. 88-89 e Vol.II, pp.418-440
- Santos, S.M. e Ferreira, V. S., 1998, " Caracterização do Escoamento Periódico com Vórtices através de Laser Doppler Velocimetria ", Anais ENCIT, Rio de Janeiro, pp.695-700
- Schlichting, H., 1968, “Boundary Layer Theory, 6th ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York, pp. 44 -47.
- White, D.F.; Rodely, A.E. e McMurtrie, C.L., 1974, ”The vortex Shedding Flowmeter”, Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry, R. B. Dowdell, ed. Instrument Society of America, pp. 967- 974.
- Yamasaki, H., 1974, “The Vortex Flowmeter”, Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry, R. B. Dowdell, ed., Instrument Society of America, pp. 975 - 983.
- Zhang, H. L. e Ko, N.W.M., 1996, “Numerical Analysis of incompressible flow over smooth and grooved circular cylinders”, *Computers & Fluids*, Vol. 25, nº 3, pp. 263 - 281.

Characterisation of a periodic flow produced by a vortex type Flowmeter using Laser Doppler Velocimetry

Summary. Flow around an obstacle sometimes happen with a vortex shedding produced with a defined frequency. The present work uses Laser Doppler Velocimetry (LDV) coupled to a synchronised system which allows individualise Doppler signals up to 1 MHz in order to characterise the size of the vortices produced by different generators. Two different obstacles were studied. The vortex frequencies measured experimentally allowed to perform the actual Strouhal number (St), characterist of the periodic flows, and these values were compared with data from specialised bibliography. The study may contribute to define new geometry for generator elements adopted in vortex type flowmeter design. The LDV measured two velocity components, the axial and the circumferential one which allowed visualise the flow field downstream the obstacle. The study was held in a gravimetric calibration rig for water flowmeters with an extended uncertainty of $\pm 0,4\%$.

Keywords: Vortex Shedding; Laser Doppler Velocimetry; Frequency of vortices