

MEDIÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADE EM UM ESCOAMENTO TURBULENTO INTERNO AO DUTO CIRCULAR ATRAVÉS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Roger Pizzato Nunes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Física
Av. Bento Gonçalves 9500, Caixa Postal 15051, CEP.: 91501-970 – Porto Alegre, RS, Brasil
Correio eletrônico: rogerpn@if.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Sarmento Leite 425, CEP.: 90050-170 – Porto Alegre, RS, Brasil
Correio eletrônico: roger.pizzato@ufrgs.br

Flávio Tadeu van der Laan

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Nuclear
Av. Osvaldo Aranha 99, 4to. Andar, CEP.: 90046-900 – Porto Alegre, RS, Brasil
Correio eletrônico: ftvdl@ufrgs.br

Resumo. Nos últimos anos, as técnicas de velocimetria envolvendo processamento digital de imagens tornaram-se referência na área experimental em mecânica dos fluidos. Tal fato ocorreu pois estas técnicas permitem que medidas instantâneas de campo de velocidade sejam obtidas de um determinado escoamento em análise. Contudo, devido às limitações tecnológicas presentes nos equipamentos de instrumentação, estas técnicas estiveram limitadas à aplicação em escoamentos de baixa velocidade. Desta forma, a sua utilização no estudo de certos fenômenos tal como a turbulência foi restrita. Nesta direção, o objetivo deste trabalho é a apresentação de um sistema de instrumentação eletro-eletrônica para a análise de escoamentos de alta velocidade. Para tanto, uma câmera CCD com taxas de aquisição de até 500Q/s foi utilizada. Para validação do sistema implementado, este foi aplicado em um escoamento turbulento interno ao duto circular com $Re \approx 27000$. Os resultados obtidos aproximaram-se muito ao comportamento verificado por Nikuradse através da Lei da Potência $1/n$.

Palavras chave: Visualização de escoamentos, Velocimetria por Imagens de Partículas, Processamento Digital de Imagens.

1. Introdução

A turbulência é um problema ainda não compreendido e descrito teoricamente pela física clássica (Schlichting, 1968). Desta forma, os resultados experimentais ainda desempenham um papel importante para a obtenção de relações empíricas necessárias em projetos de engenharia envolvendo as áreas de aerodinâmica (Yildirim *et al.*, 2005), turbomáquinas (Chow *et al.*, 2002), biomédica (Vieira *et al.*, 1999), dentre muitas outras. No meio acadêmico, estes resultados experimentais têm sido utilizados para a validação de modelos que visam descrever os mecanismos envolvidos na turbulência (Gioia *et al.*, 2006, Goldenfeld, 2006).

O campo de velocidades instantâneo de um escoamento é a grandeza de interesse fundamental em mecânica dos fluidos. Com o campo de velocidades instantâneo torna-se possível computar grandezas como vorticidade, intensidade de turbulência, circulação, dentre outras, as quais determinam a completa caracterização do escoamento em questão.

Diversas técnicas experimentais foram desenvolvidas ao longo dos anos passados para a medição da velocidade pertinente a um escoamento qualquer. Em geral, estas técnicas consistiram e consistem em inserir uma estrutura que altere o escoamento de tal forma que haja o surgimento de uma variação de uma de suas grandezas características. Através da medição destas últimas e equações matemáticas que modelam o seu comportamento pode-se obter de forma indireta então a velocidade. Algumas destas técnicas envolvem a medição de uma variação de pressão (tubos de Pitot, tubos de Venturi e placas de orifício), do desprendimento de vórtices (medidores tipo esteira de vórtices de Karman), de uma força de arrasto (medidores de arrasto), de troca de calor (anemometria a fio quente) e de rotações (medidores tipo turbina), dentre outros (Doebelin, 1990).

No entanto, as técnicas de medição anteriores permitem apenas a medição de uma das componentes do vetor velocidade e em muitos casos somente podem ser aplicadas em escoamentos que possuem uma direção preferencial. Além disto, estas técnicas também apenas permitem que a medição da velocidade seja efetuada em um ponto particular do escoamento. Assim, para um mapeamento espacial dos valores da velocidade no escoamento, deve-se, ou utilizar vários equipamentos de medição em paralelo e em posições diferentes, ou então utilizar apenas um equipamento de medição e deslocá-lo espacialmente, sucessivamente ao longo do tempo. No primeiro caso, a variabilidade na fabricação dos sensores bem como a dificuldade em inserir diversos equipamentos de medição em uma determinada

região do escoamento sem interferir de forma significativa no experimento implicam na dependência da medição em relação à resposta do sensor empregado e, também, na dependência da medição em relação ao número de sensores utilizados, respectivamente. Quanto mais sensores inseridos, mais intensamente os equipamentos de medição influenciam na estrutura do escoamento. Assim, este escoamento não condiz mais com o original, o qual se deseja mensurar a velocidade. No segundo caso, o fato de empregar apenas um equipamento de instrumentação determina que a medição em cada ponto do espaço ocorra em tempos diferentes. Ou seja, a medição da velocidade nas diferentes coordenadas espaciais não possui coerência temporal. Estas são algumas das questões que preteriram as técnicas tradicionais frente ao surgimento das técnicas atuais envolvendo processamento digital de imagens (Nunes, 2005).

O avanço tecnológico na eletrônica determinou o surgimento de sensores de imagens como o CCD (Charged Coupled Device). Tais sensores propiciaram que técnicas de velocimetria através de processamento digital de imagens surgissem. Neste tipo de medição, partículas traçadoras são disseminadas no escoamento e irradiadas com uma fonte de luz coerente laser. A câmera com sensor CCD captura quadros da evolução espacial das partículas ao longo do tempo, permitindo que então a velocidade seja mensurada.

O principal benefício destas técnicas frente as tradicionais é que, para um determinado tempo $t=t_0$, torna-se possível obter um campo de velocidade $\vec{v}(\vec{r}, t_0)$ para $0 \leq \vec{r} \leq \vec{r}_0$ ao invés de apenas um vetor $\vec{v}(\vec{r}_0, t_0)$ pertencente a uma determinada posição específica $\vec{r} = \vec{r}_0$. Isto se deve ao caráter bidimensional do sensor eletrônico de imagem, o qual permite que certa área, ao invés de apenas um ponto do escoamento como nas técnicas de medição tradicionais, seja analisada para um instante particular de tempo. Mais, estas técnicas não interferem na estrutura do escoamento a ser investigado, uma vez que as partículas podem ter seu diâmetro diminuído, em certos limites, tanto quanto for necessário para que não haja influência alguma sobre a dinâmica do fluido em questão (Nunes, 2005).

Estas técnicas de velocimetria por processamento de imagens foram largamente aplicadas nas mais diversas geometrias de escoamento e com as mais diferentes variações de equipamentos de instrumentação ao longo dos anos (Lee et al., 2003, Schlicke, 2001, Thomas et al., 1999), utilizando os seus 3 diferentes modos de operação PTV (Particle Tracking Velocimetry), PIV (Particle Image Velocimetry) e LSV (Laser Speckle Velocimetry) (Adrian, 1991). Contudo, devido às restrições computacionais, estas técnicas estiveram ainda assim limitadas à aplicação em escoamentos de baixa velocidade. Este fato está relacionado à frequência e/ou a velocidade com que os quadros são capturados do escoamento, a qual se denomina de taxa de quadro. Usualmente tal taxa de quadro esteve restrita em câmeras CCD ao valor 30Q/s. Isto ocorreu devido à incapacidade de se armazenar e/ou transferir toda a informação capturada por um sensor CCD (Nunes, 2005).

Geralmente, mas não necessário, escoamentos com baixa velocidade se encontram fora do regime turbulento. Por tanto, a limitação imposta pelas câmeras determina que fenômenos como a turbulência não possam ser investigados adequadamente. Além disto, em outros casos, até mesmo escoamentos em regimes laminares não podem ser completamente caracterizados, uma vez que muitas frequências pertencentes ao campo de velocidade são filtradas naturalmente no processo de amostragem imposto pela baixa taxa de quadros da câmera utilizada (Nunes, 2005).

Neste trabalho, serão apresentados os resultados obtidos pertinentes a um escoamento interno ao duto circular com $Re \approx 27000$. Para a medição dos campos de velocidade em duas dimensões espaciais utilizou-se um sistema de velocimetria através de processamento digital de imagens, o qual dispõe de uma câmera com taxa de quadros programável à até 500Q/s (Nunes, 2005). A densidade de partículas foi tal que o sistema operou no modo PIV e algoritmos de processamento baseados na correlação cruzada foram utilizados. Ao final, tais resultados foram comparados com o clássico trabalho de Johann Nikuradse (Nikuradse, 1932), muito discutido na literatura.

2. Metodologia

O princípio básico de um sistema de velocimetria consiste em determinar a distância percorrida por objetos sobre um intervalo de tempo bem definido. No caso particular aplicado à mecânica de fluidos, partículas micrométricas são disseminadas no escoamento e irradiadas por uma fonte de laser. Uma ou mais câmeras CCD tem a função de captar sucessivos quadros da evolução espacial destas partículas com uma base de tempo estável Δt . Os quadros capturados fornecem a informação espacial, enquanto, a taxa de quadros T_q com que são adquiridos, fornece a informação temporal do escoamento em questão.

É importante salientar que a velocidade determinada constitui a velocidade da partícula, a qual difere da velocidade do escoamento dos elementos de fluido no local de análise. O fato de a partícula possuir um tamanho finito determina que esta sofra um arrasto no escoamento, devido ao caráter viscoso do fluido. Ainda, caso a partícula possua a mesma densidade do fluido onde esteja disseminada, há um desequilíbrio entre a força gravitacional e a de empuxo. Por fim, a ação conjunta da força de arrasto, empuxo e gravitacional implica que a velocidade da partícula seja diferente da velocidade do fluido ao seu redor, surgindo efeitos de uma força de sustentação que irá desviar a partícula em relação à trajetória do elemento de volume. No entanto, estes fatores pertinentes à inserção da partícula no escoamento podem ser fortemente minimizados ao se diminuir o diâmetro médio das partículas utilizadas e ao se aproximar a sua densidade a do fluido em escoamento.

Dependendo da densidade de partículas utilizadas, ao invés de determinar a velocidade individual de cada uma das partículas no escoamento, pode-se determinar a velocidade de um grupo de partículas presentes em uma determinada região do escoamento.

A Fig. 1 ilustra a situação onde um determinado grupo de partículas descreve em relação a um sistema de coordenadas fixo uma trajetória arbitrária em um escoamento. A trajetória do grupo de partículas é registrada nas coordenadas dadas pelos pontos P_0 , P_1 e P_2 em tempos também arbitrários representados por t_0 , t_1 e t_2 , respectivamente. Em $t=t_2$, o deslocamento espacial calculado difere muito da trajetória real realizada pela partícula. Com a diminuição do tempo de análise para $t=t_1$, o vetor velocidade se torna cada vez mais tangente à trajetória, descrevendo com maior precisão a dinâmica do grupo de partículas. Ou seja, quanto menor for o intervalo de tempo Δt entre dois quadros capturados sucessivamente do escoamento, mais a medida efetuada será condizente com a velocidade instantânea real do escoamento.

A velocidade média temporal deste grupo de partículas para um tempo arbitrário dado por $J \cdot \Delta t$, considerando um intervalo $\Delta t_j \approx \text{constante} = \Delta t$, pode ser obtida pela seguinte equação (Nunes, 2005):

$$\langle \vec{v} \rangle_o = \frac{\sum_{j=1}^J \Delta \vec{r}_j}{\sum_{j=1}^J \Delta t_j} = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \vec{v}_j \quad (1)$$

onde j é o indexador temporal, $\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z$ e $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ são os vetores unitários nas direções (x, y, z) respectivamente.

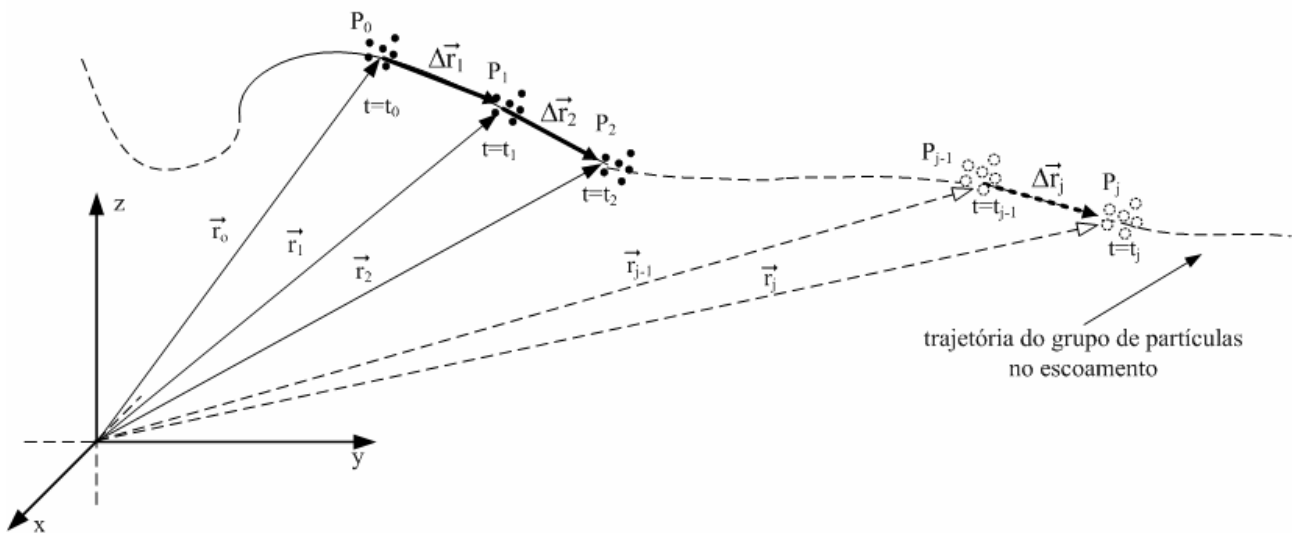


Fig. 1. Trajetória de um grupo de partículas em um escoamento arbitrário.

A base de tempo Δt está relacionada diretamente com a taxa com que os quadros podem ser capturados do escoamento pela câmera CCD empregada. Desta forma:

$$\Delta t = 1/T_q \quad (2)$$

Onde T_q é a taxa de quadros da câmera CCD empregada. A dimensionalidade da taxa de quadros é $[T_q]=1/s$. Ao longo do tempo, forma-se então uma seqüência de quadros $\{Q_j, Q_{j-1}, Q_{j-2}, \dots, Q_0\}$ do escoamento.

A base de tempo depende diretamente do sistema físico e das escalas de tempo em que suas grandezas variam. Portanto, constitui uma excelente aproximação, a análise onde o intervalo de tempo Δt seja menor que as escalas de tempo envolvidas no escoamento. Para regimes turbulentos, considerando a ordem de grandeza envolvida nas grandes escalas do fenômeno (Freire *et al.*, 2002) e o critério de Nyquist (Oppenheim *et al.*, 1989) tem-se que:

$$\Delta t \leq \frac{L_c}{2 \cdot U_c} \quad (3)$$

onde L_c é o comprimento característico e U_c é a velocidade característica do escoamento em questão. Nesta situação, considerando $j=1$ na Eq. (1), se obtém a velocidade instantânea do grupo de partículas no escoamento.

Ao processar os quadros de imagens capturados do escoamento, na realidade se está mensurando o deslocamento e por conseqüência a velocidade da imagem do grupo de partículas, quantificados em um referencial local, localizado

sobre o sensor CCD. Para se obter a velocidade do grupo de partículas no escoamento é necessário efetuar uma transformação de coordenadas para um referencial global, localizado no sistema físico em análise. Tal operação de troca de referenciais utilizada na descrição é denominada de transformada perspectiva-projeção (Schalkoff, 1989).

A transformação de uma perspectiva em uma projeção é uma operação não-linear onde uma das dimensões espaciais é eliminada. Quando o interesse reside em grandezas dinâmicas como a velocidade, matematicamente observa-se que a velocidade relativa à dimensão espacial eliminada influencia na obtenção das demais componentes. Em certas situações, esta influência é desprezível e esta transformação pode ser linearizada. Então, a velocidade do objeto pode ser obtida da velocidade de sua imagem mediante apenas o uso da constante FE (Nunes, 2005). O fator de escala FE relaciona as coordenadas do grupo de partículas com as coordenadas de suas imagens. Nestas circunstâncias:

$$\langle \vec{v} \rangle_o \approx FE \cdot \langle \vec{v} \rangle_i \quad (4)$$

Onde $\langle \vec{v} \rangle_i$ é a velocidade média temporal calculada no referencial local presente sobre o sensor CCD.

Dimensionalmente, o fator de escala FE aqui definido possui dimensões de $[FE]=m/pixel$.

O problema básico reside então em determinar a velocidade média temporal da imagem do grupo de partículas $\langle \vec{v} \rangle_i$ sobre o sensor CCD ao longo do tempo. Trata-se de um problema não trivial, já que não somente é necessário empregar algoritmos que detectem o seu deslocamento ao longo na seqüência de quadros. Devido ao ruído intrínseco ao processo de captura dos quadros, algoritmos de filtragem tornam-se necessários. Também, para homogeneização dos valores de luminância, algoritmos de realce e restauração também desempenham um papel importante. Por final, o campo de velocidade ainda deve ser processado por algoritmos de validação, visando a eliminação dos vetores velocidade espúrios naturais em qualquer processo de medição (Nunes, 2005).

Neste trabalho, para obtenção dos resultados que serão apresentados nos itens subseqüentes utilizou-se uma ferramenta computacional denominada IPVFlow baseada no operador correlação-cruzada, dentre outros muitos algoritmos (Nunes, 2005). Os quadros capturados do escoamento são segmentados em pequenas áreas de interesse e busca e então correlacionadas entre si. A coordenada onde ocorre o maior valor de correlação é utilizada para a obtenção do deslocamento da imagem do grupo de partículas.

3. Aparato Experimental

A disposição dos equipamentos utilizados no sistema de instrumentação é apresentada na Fig. 2. Este é composto por uma fonte de laser, por partículas traçadoras, uma lente cilíndrica, uma câmera CCD, sistemas de fixação e um posicionador xyz. A lente cilíndrica permite que o feixe colimado de laser seja expandido, formando um plano que seccionará o duto circular. A área irradiada por laser é denominada de seção de teste. As partículas disseminadas no escoamento espalham o laser incidido, sendo estes captados pela câmera em uma seqüência $\{Q_j, Q_{j-1}, Q_{j-2}, \dots, Q_0\}$ de quadros.

As partículas disseminadas no escoamento foram iluminadas através de uma fonte de laser contínuo do fabricante Spectra-Physics modelo 2016. Esta fonte utiliza como material laser íons de Argônio, cujo comprimento de onda principal de emissão corresponde a uma banda estreita no entorno de $\lambda=514nm$ (tonalidade verde), em uma cavidade ressonante com comprimento $L=0.96m$. Um campo magnético é aplicado a cavidade ressonante proporcionando um feixe colimado de 2mm, divergência de 0.5mrad e com potência de até 20W.

As partículas utilizadas são constituídas de polietileno, material cuja densidade possui o valor de $0,92 g/cm^3$, a qual é próxima a da água. Desta forma, os efeitos oriundos do desequilíbrio da força de empuxo e da força gravitacional podem ser desprezados em regimes altamente turbulentos. Tratando-se de um material obtido junto à indústria de polímeros, uma grande variedade de diâmetros está presente. Uma análise granulométrica de sua composição é apresentada na Fig. 3. Pode-se observar que o diâmetro médio ocorre para partículas com valores de $159,17\mu m$ e o diâmetro a 50% para valores de $152,46\mu m$. Portanto a distribuição não é perfeitamente simétrica no entorno da média. As partículas predominantemente possuem valores de diâmetro de 100 a $250\mu m$.

A fonte de LASER é posicionada sobre um carro DANTEC e o feixe de LASER produzido é então inserido em um dispositivo ótico composto de divisores óticos também da DANTEC e acoplado a um guia de onda tipo fibra-ótica, o qual é utilizado como sonda. Esta sonda permite flexibilidade e mobilidade na utilização do feixe de laser. Desta forma, este pode ser posicionado e ajustado em conjunto com a lente cilíndrica na formação do plano de laser.

O plano de laser foi obtido mediante a utilização de uma lente cilíndrica DANTEC, modelo 3060. Esta foi montada sobre um translador Optron TX1 com regulagem de 1 dimensão e fixada a ponteira de LASER através de um suporte de 3 pontos Optron SL1. Assim, pode-se precisamente posicionar o feixe de LASER de tal modo que a sua reflexão fosse mínima perante a lente. A espessura do plano de laser obtida foi de 2mm.

A câmera utilizada é a Redlake MotionMeter 500. O sensor CCD presente nesta câmera é o modelo TC237 pertencente a Texas Instruments. Seus pixels são quadrados, sensíveis a tons de cinza, quantizados em 8bits e com dimensão lateral de $l_{CCD}=7.4\mu m$. Estes estão arrançados em colunas de $n_c=658$ pixels e linhas de $n_l=496$ pixels e são varridos no modo *progressive-scan*, com obtenção eletrônica de 1/60 a 1/50000s.

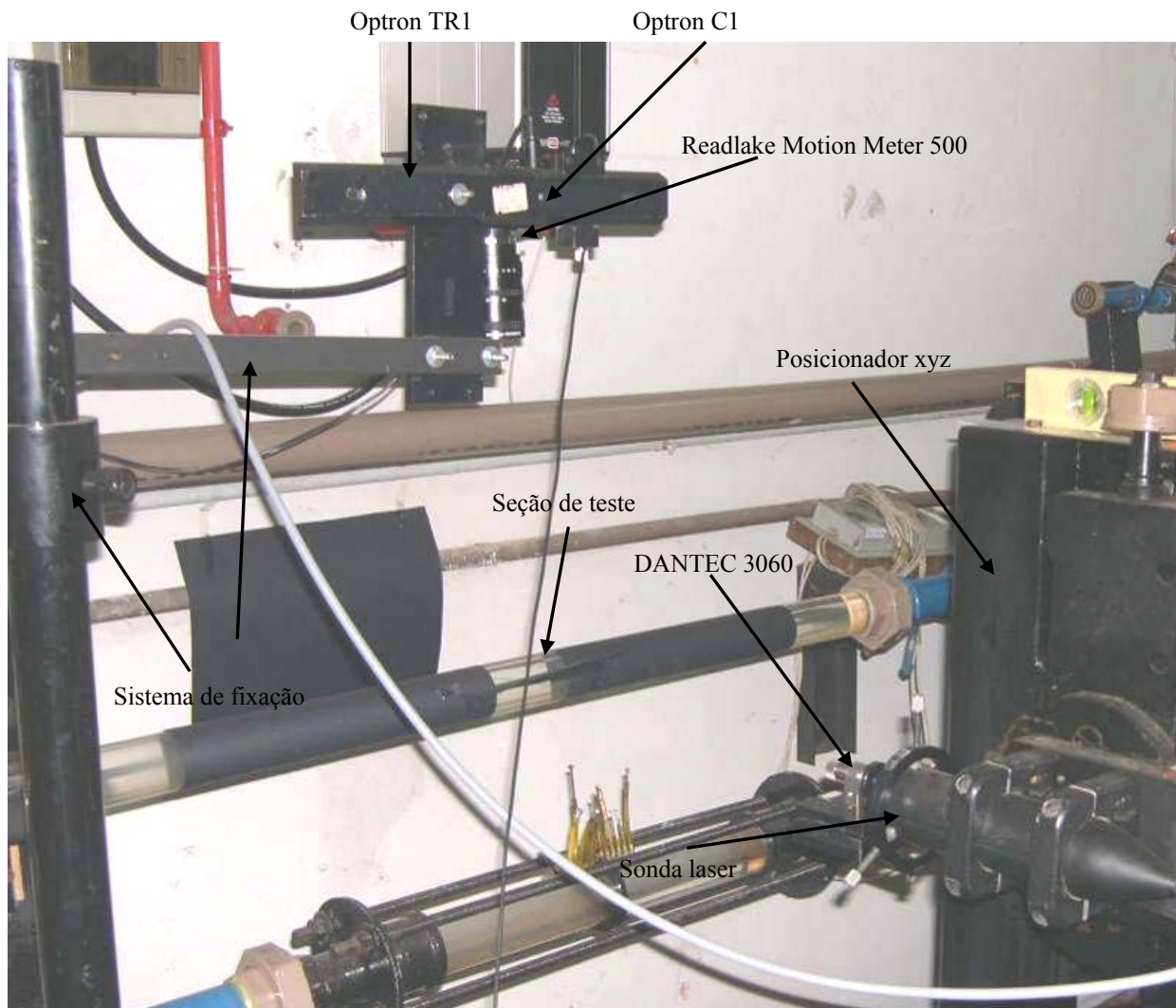


Fig. 2. Equipamentos envolvidos no sistema de instrumentação implementado.

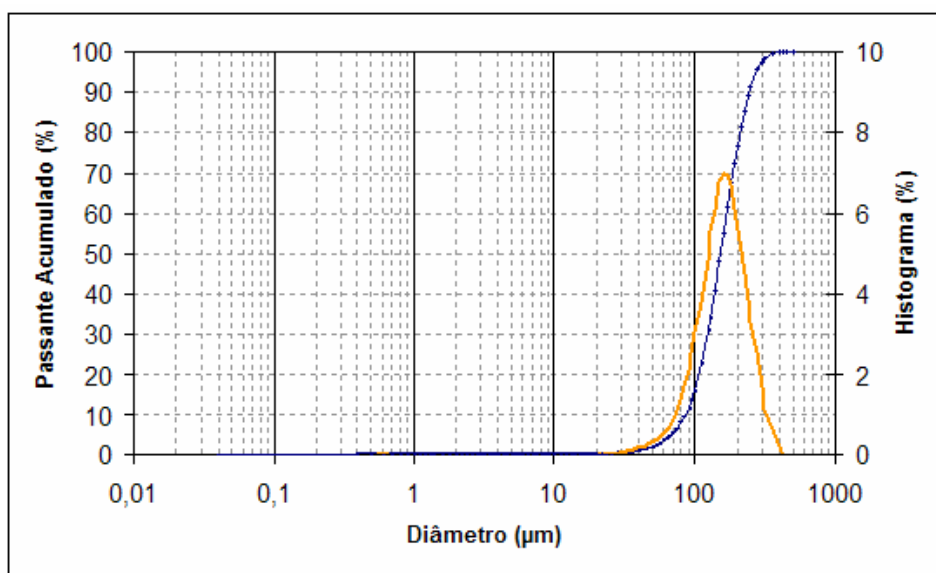


Fig. 3. Histograma do diâmetro das partículas de polietileno utilizadas.

Diferentemente das câmeras usuais, ao projeto desta câmera foi agregado um buffer de memória que permite o armazenamento de até 64kbytes de dados. Isto propicia que quadros possam ser capturados com alta taxa de quadros T_q e armazenados rapidamente. As taxas de quadro podem ser programadas em 60Q/s, 125Q/s, 250Q/s e 500Q/s,

constituindo um avanço em relação as usuais, as quais operam a 30Q/s. A Fig. 4 ilustra o diagrama temporal do armazenamento das imagens no buffer de memória a uma $T_q=500Q/s$. Nesta taxa, até 1024 quadros podem ser armazenados, correspondendo a um tempo de aproximadamente 2s de análise do escoamento. Cada quadro Q_j capturado do escoamento é sucessivamente armazenado em cada buffer até o completo preenchimento da memória, quando o processo de armazenamento reinicia, subscrevendo os dados anteriores. Para transmissão, esta câmera possui uma saída de vídeo analógico ou no padrão RS-170 ou no padrão PAL-M.

O sinal analógico de imagem proveniente da câmera Redlake MotionMeter 500 foi digitalizado mediante uma placa de aquisição EPIX 4MEG VIDEO conectada a um computador. A seqüência de quadros $\{Q_j, Q_{j-1}, Q_{j-2}, \dots, Q_0\}$ foram armazenados no formato bitmap (BMP).

À câmera Redlake MotionMeter 500 foi fixada uma objetiva Pentax modelo C60812 com encapsulamento c-mount, zoom e regulagem da íris manual. A sua distância focal f pode ser variada de 8 a 48mm, e o seu número $f_\#$ é dado por $f_\#=f/1,0$.

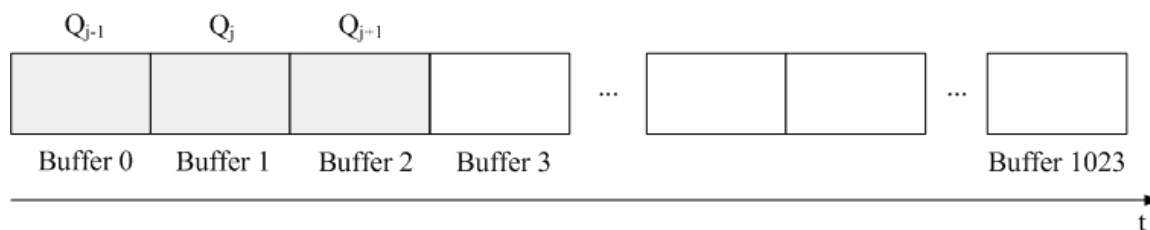


Fig. 4. Armazenamento da seqüência de quadros $\{Q_j, Q_{j-1}, Q_{j-2}, \dots, Q_0\}$ no buffer da Redlake MotionMeter 500.

A seção de teste presente na Fig. 2 corresponde à área do escoamento onde o campo de velocidades será mensurado. O esquemático desta seção de teste consta na Fig. 5. Esta seção corresponde a uma área retangular, com 90mm de comprimento e 44mm de largura, orientada perpendicularmente ao campo gravitacional e centrada à metade do duto. As medições foram realizadas após o comprimento de entrada hidrodinâmico, na região plenamente desenvolvida do escoamento.

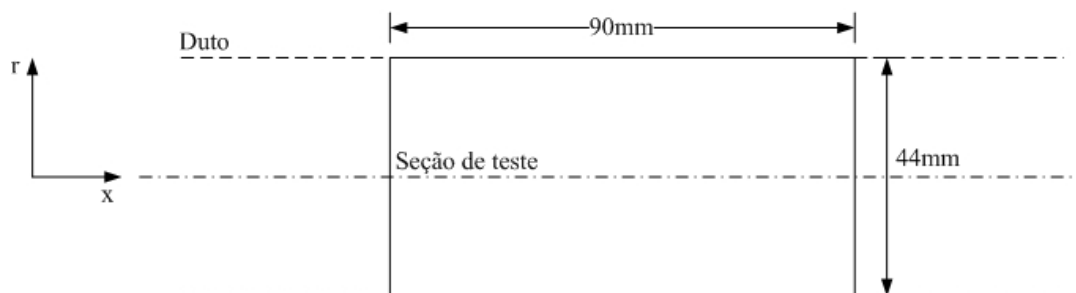


Fig. 5. Esquemático da seção de teste.

4. Resultados e discussão

O sistema de instrumentação foi aplicado a um escoamento interno ao duto circular altamente turbulento com $Re \approx 27000$. A velocidade média temporal e geométrica neste escoamento foi ajustada a 0,5265m/s. Segundo (Schlichting, 1968), a velocidade máxima que ocorre no perfil desenvolvido no escoamento pode ser obtida por:

$$U = U(u_g = 0,5265, n = 7) = 0,5265 \frac{(7+1) \cdot (14+1)}{2 \cdot 49} \cong 0,6447 \text{ m/s} \quad (5)$$

Onde n é dependente e obtido do valor do número de Reynolds do escoamento. Neste caso, para $Re=27000$, $n=7$.

Portanto, com a velocidade máxima do perfil U determinada através da Eq. (5), segundo a Lei da Potência $1/n$ de Nikuradse, o perfil de velocidade internamente ao duto circular deve assumir o seguinte formato (Schlichting, 1968):

$$u_r = u_r(r) = 0,6447 \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^{-3} - r}{22 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/7} \quad (6)$$

Onde $r_0=22 \cdot 10^{-3}$ m corresponde ao valor do raio do duto circular utilizado nos experimentos.

Capturou-se $J=100$ quadros do escoamento à uma taxa de 500Q/s. Com esta taxa de quadros, considerando a dimensão característica do duto, a velocidade característica do escoamento e a Eq. (2), pode-se verificar que a condição imposta pela Eq. (3) é plenamente satisfeita. Na Fig. 6, 2 quadros Q_{j-1} e Q_j selecionados ao acaso entre os 100 capturados são apresentados para exemplificação. As linhas tracejadas delimitam o tamanho das áreas de interesse e busca em que os quadros capturados foram segmentados pelo programa IPVFlow.

O campo de velocidade médio temporal ao longo destes 100 quadros consta na Fig. 7. Os vetores velocidades deste campo são localizados por coordenadas discretas (l,c) conforme o sistema de coordenadas nesta figura especificado. Este foi obtido através da média dos campos de velocidade instantâneos referentes aos 100 quadros capturados, descrito pela Eq. (4), totalizando aproximadamente 3,33s de análise do escoamento. O escoamento interno ao duto circular não possui componentes de velocidade na direção y expressivas. Por este motivo, todos os vetores, a menos de uma pequena flutuação em l , devido à turbulência, estão direcionados em c .

Para comparação com o perfil de velocidade proposto por Nikuradse e descrito matematicamente pela Eq. (6), escolheu-se ao acaso uma das coordenadas c do campo, extraíndo o perfil de velocidade correspondente. A coordenada em questão é $c=240$, a qual consta assinalada na Fig. 8. A coordenada l deste perfil foi limitada pelo programa a apenas os vetores que estivessem presentes na área do quadro referente ao escoamento analisado, descartando os vetores presentes na área externa ao duto.

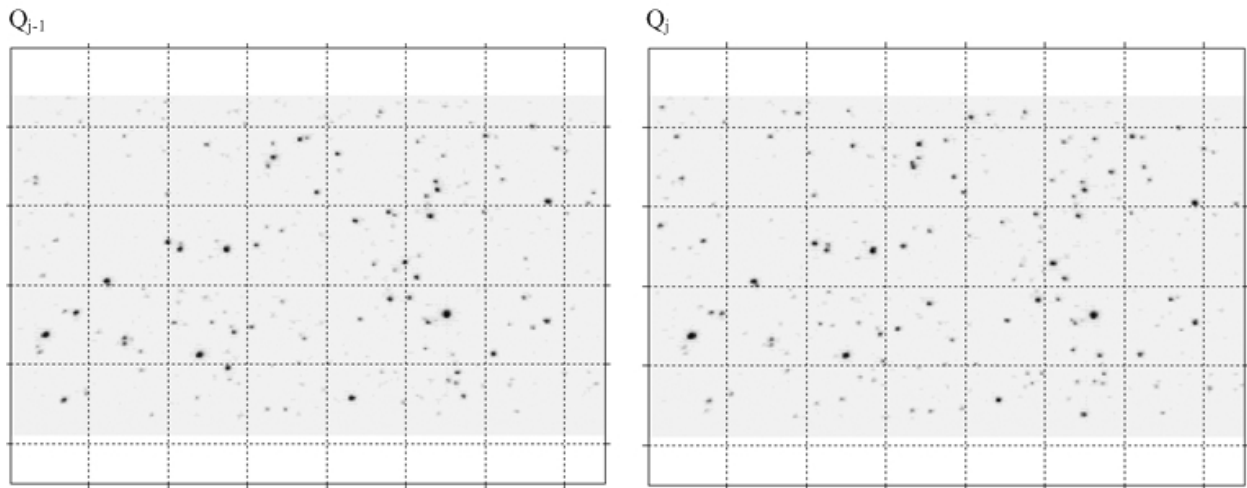


Fig. 6. Exemplo de 2 quadros Q_{j-1} e Q_j extraídos do escoamento interno ao duto circular.

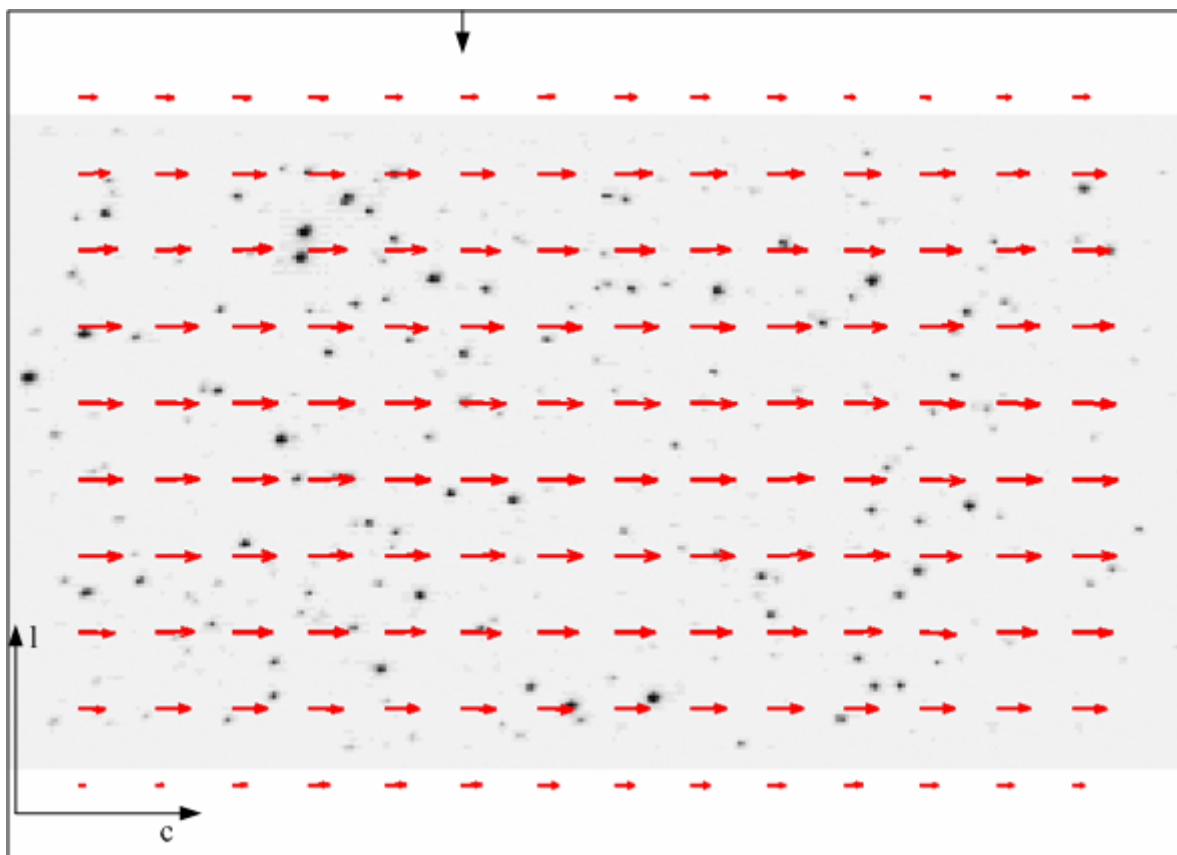


Fig. 7. Campo de velocidade médio ao longo de $J=100$ quadros.

Este perfil de velocidade médio foi plotado juntamente com o perfil analítico da Eq. (6) no gráfico adimensional presente na Fig. 8. Para comparação, um perfil de velocidade instantâneo também foi neste mesmo gráfico plotado. Tanto o perfil instantâneo quanto o médio estão abaixo do analítico, confirmando a tendência de que qualquer medição que utilize partículas irá fornecer um valor inferior ao analítico ou ao numérico calculado. Isto se deve à presença da força de arrasto, oriunda da viscosidade do fluido e que impede que a velocidade da partícula seja próxima a do escoamento (Rodrigues, 2003). Juntamente, pode-se observar uma maior concordância do perfil de velocidade médio com o perfil analítico. O campo instantâneo contém flutuações oriundas da turbulência e a tendência é que quando o número de quadros utilizados no processo de média temporal $J \rightarrow \infty$, o campo de velocidade médio obtido aproxime-se mais do perfil analítico. Este fato está relacionado à fundamentação teórica a partir de médias temporais pela qual a Eq. (6) foi originalmente proposta.

Os resultados numéricos referentes a cada coordenada l para os perfis de velocidade analítico, experimental instantâneo e experimental médio bem como seus erros relativos e absolutos constam na Tab. 1. Nesta tabela também constam as coordenadas l da imagem e as suas correspondentes coordenadas y em cm do escoamento. A diferença máxima entre o perfil médio e o analítico não ultrapassou 4%. A incerteza no processo de medição é de 1,6% (Nunes, 2005). O tempo total requerido para processamento das imagens pelo programa atingiu 7,5930s para o campo de velocidade instantâneo e 965,3453s para o campo de velocidade médio.

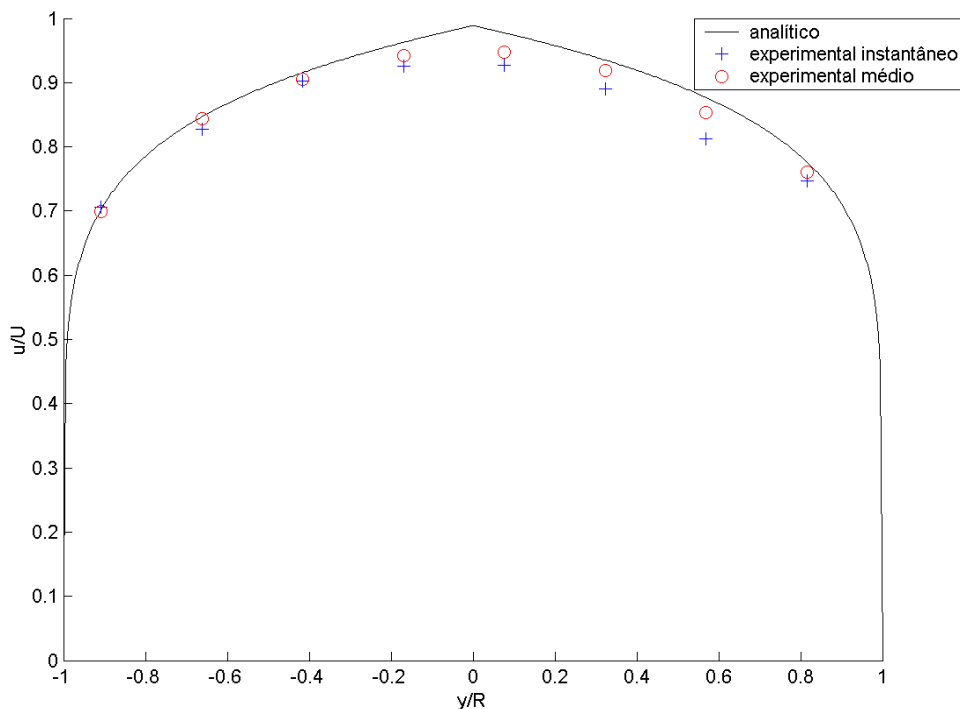


Fig. 8. Comparação do resultado analítico e experimental (instantâneo e médio) para a coordenada $c=240$ pixels.

Tab. 1. Resultados do perfil de velocidade na coordenada $c=240$ pixels.

l (pixels)	80	120	160	200	240	280	320	360
y (cm)	1,8006	1,2591	0,7175	0,1760	-0,3655	-0,9071	-1,4486	-1,9902
Analítico (m/s)	0,5111	0,5777	0,6164	0,6445	0,6355	0,6045	0,5594	0,4662
Experimental instantâneo (m/s)	0,4874	0,5302	0,5804	0,6050	0,6040	0,5982	0,5522	0,4653
Erro absoluto (m/s)	0,0238	0,0475	0,0360	0,0395	0,0315	0,0063	0,0072	0,0010
Erro relativo (%)	4,6494	8,2222	5,8427	6,1325	4,9587	1,0423	1,2870	0,2054
Experimental médio (m/s)	0,4963	0,5565	0,5992	0,6182	0,6143	0,5998	0,5589	0,4634
Erro absoluto (m/s)	0,0148	0,0212	0,0172	0,0263	0,0212	0,0047	0,0005	0,0028
Erro relativo (%)	2,8957	3,6697	2,7903	4,0806	3,3359	0,7775	0,0893	0,6006

5. Conclusões

As técnicas experimentais envolvendo velocimetria através de processamento de imagens representaram um grande avanço na investigação dos fenômenos envolvendo mecânica dos fluidos. O fato de permitirem que um campo de

velocidades instantâneo do escoamento seja mensurado representa um grande diferencial frente às demais técnicas tradicionalmente utilizadas em laboratório. No entanto, a usual taxa de quadros de 30Q/s das câmeras empregadas persistiu como um fator limitante e restritivo na sua utilização em qualquer configuração de escoamento.

Neste trabalho, apresentou-se um sistema de instrumentação para medição de campos de velocidade em escoamentos com alta velocidade. Para tanto, empregou-se uma câmera com taxa de quadros programável à até 500Q/s. O sistema foi aplicado então a um escoamento interno ao duto circular com $Re=27000$. Os resultados foram satisfatórios e condizem com os perfis propostos por Nikuradse. A diferença máxima ocorrida entre o perfil mensurado e o proposto por Nikuradse não foi maior que 4%, com uma incerteza na medida de 1,6%.

Em futuros trabalhos, grandezas como intensidade de turbulência, vorticidade, dentre outras serão quantificadas.

6. Agradecimentos

O autor Roger Pizzato Nunes é grato ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo suporte financeiro ao desenvolvimento deste trabalho.

7. Referências

- Adrian, R. J., 1991, "Particle-imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annual Reviews in Fluid Mechanics, vol. 23, pp 261-304.
- Chow, Y. C., Katz, J., Uzol, O., e Meneveau, C., 2002, "An Investigation of Axial Turbomachinery Flows Using PIV in an Optically-Unobstructed Facility", International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery.
- Doebelin, E. O., 1999, "Measurement Systems Application and Design", McGraw-Hill, New York.
- Freire, A. P. S., Menut, P. P. M., e Su, J., 2002, "Turbulência", Associação Brasileira de Ciências Mecânicas (ABCM), Rio de Janeiro.
- Gioia, G., e Chakraborty, O., 2006, "Turbulent Friction in Rough Pipes and the Energy Spectrum of the Phenomenological Theory", Physical Review Letters, pp. 1-4.
- Goldenfeld, N., 2006, "Roughness-Induced Critical Phenomena in a Turbulent Flow", *Physical Review Letters*, pp. 1-4.
- Lai, W. T., Bjorkquist, D. C., Abbott, M. P., e Naqwi, A. A., 1998, "Video systems for PIV recording", Journal of Measurement Science and Technology, vol. 9, pp. 297-308.
- Lee, S. J., Kim, G. B., 2003, "X-ray particle image velocimetry for measuring quantitative flow information inside opaque objects", Journal of Applied Physics, vol. 94, pp. 3620-3623.
- Nunes, R. P., 2005, "Projeto e Implementação de um Sistema de Instrumentação Eletro-Eletrônica para Caracterização de Escoamentos através de Processamento Digital de Imagens", Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre.
- Nikuradse, J., 1932, "Gesetzmassigkeiten der turbulenteu Stromung in glatten Rohren", Verein deutscher Ingenieure Forschungshesft 356.
- Oppenheim, A. V., e Schaffer, R. W., 1989, "Discrete-Time Signal Processing", Prentice-Hall, New Jersey.
- Rodrigues, R. E. S., 2003. "Comportamento de Partículas em Fluido frente a Variações de Velocidade", Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre.
- Schalkoff, R. J., 1989, "Digital Image Processing and Computer Vision", John Wiley & Sons, Canada.
- Schlichting, H., 1968, "Boundary-Layer Theory", McGraw-Hill, New York.
- Schlicke, T., 2001, "Breaking Waves and the Dispersion of Surface Films", Doctor of Philosophy Thesis, University of Edinburgh.
- Thomas, E. J., Watson, M., 1999, "First experiments in the Dusty Plasma Experiment device", Physics of Plasmas, vol. 6, pp. 4111-4117.
- Vieira, E. D. R., Dall'Agnol, E., e Mansur, S. S., 1999, "Flow visualization of heart valves prostheses in a steady flow model", Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, vol. 15, pp. 63-68.
- Yildirim, I., Cetiner, O., e Unal, M. F., 2005, "PIV Measurements of the wake interactions for a Circular Cylinder behind an Airfoil", International Symposium on Particle Image Velocimetry.

Velocity field measurement for a high turbulent duct flow through digital image processing

Roger Pizzato Nunes

Federal University of Rio Grande do Sul – Physics Institute
Bento Gonçalves avenue 9500, P.O. Box 15051, Zip code: 91501-970 - Porto Alegre, RS, Brazil
E-mail: rogerpn@ifufrgs.br

Federal University of Rio Grande do Sul – School of Engineering – Department of Mechanical Engineering
Sarmiento Leite street, 425 - Sala 314, Zip code: 90050-170 - Porto Alegre, RS, Brazil
E-mail: roger.pizzato@ufrgs.br

Flávio Tadeu van der Laan

Federal University of Rio Grande do Sul – School of Engineering – Department of Nuclear Engineering
Osvaldo Aranha avenue, 99 – 4th. Floor , Zip code: 90046-900 - Porto Alegre, RS, Brazil
E-mail: ftvdl@ufrgs.br

Abstract

In the last years, velocimetry techniques through digital image processing had become reference since its propitiated that a whole field velocity measurement was taken from the fluid flow under analysis. However, due to technological limitation, they had always been restricted to the application in low velocity fluid flows. In this cases, the investigation of certain phenomena as the turbulence becomes difficult. In this direction, the main objective of this work is the presentation of an electro-electronics instrumentation system for the analysis of high velocity fluid flows. In such way, a CCD camera with a frame rate until 500Q/s was used. For validation, this system was applied on an internal circular duct flow with $Re \approx 27000$. The obtained results approximated very well of the behavior predicted by Nikuradse in the $1/n$ power law.

Keywords: Flow Visualization, Particle Image Velocimetry, Digital Image Processing