



VISUALIZAÇÃO DE FLUIDOS EM ALTA VELOCIDADE POR PROCESSAMENTO DE CAMPOS INTERCALADOS DE IMAGEM USANDO A TÉCNICA “PIV”

Flávio T. Van der Laan

Departamento de Engenharia Nuclear - UFRGS
Oswaldo Aranha, 99 - 90046-900 - Porto Alegre, RS, Brasil
E.mail ftvdl@vortex.ufrgs.br

Vilson V.C.S. Ferreira

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia - UFRGS
Sarmiento Leite, 425 - 90050-170 - Porto Alegre, RS, Brasil
E.mail vferreir@vortex.ufrgs.br

***Resumo.** A maior dificuldade na medição de escoamentos de líquidos é com campos em alta velocidade, na ordem de 100 m/s. O processamento “PIV” (Particle Image Velocimetry) com iluminação com planos de Laser e câmeras CCD possibilitou a análise de quadros em seqüências de imagens capturadas na velocidade convencional de 30 quadros/s, com bons resultados para deslocamentos lentos. Para velocidades maiores esta técnica torna-se inviável. Com a introdução recente de câmeras digitais rápidas com velocidade de obturação controlada tornou-se possível a medida de fluídos em deslocamentos rápidos. O presente trabalho apresenta a técnica de processamento intercalado de campos capturados na velocidade de obturação de modo entrelaçado utilizando câmeras CCD-DV e gravação digital em fita DVT (digital videotape). Obtém-se uma imagem dupla capturada em tempos diferentes, montada pelo campo ímpar e o campo par, intercalado entre um e o outro. A câmera captura e grava o evento na velocidade de obturação variável de 1/30 por segundo até 1/10000 por segundo, requerida para observar-se os deslocamentos entre os campos. Uma placa de aquisição digitaliza a imagem a ser processada. Um algoritmo baseado nas técnicas de correlação e autocorrelação entre os campos, determina os múltiplos deslocamentos das partículas apresentando o diagrama com os vetores velocidade. Os resultados são validados com velocimetria Laser Doppler (LDV).*

***Palavras-chave:** Visualização de Fluxos, Velocimetria por Processamento de Imagens*

1. INTRODUÇÃO

As técnicas não intrusivas como a Laser Doppler Velocimetria “LDV” e Velocimetria por Processamento de Imagens “PIV” (Adrian, 1991) apresentam grande vantagem na medição da velocidade de fluidos em escoamento sobre as técnicas intrusivas, utilizando sensores internos de medida. As primeiras utilizam propriedades da luz coerente para medir diretamente a velocidade de partículas em movimento. Ambas apresentam resposta rápida e direta não dependendo de calibração e com incertezas de medição muito baixa. A técnica “PIV” detêm ainda uma vantagem adicional sobre a de LDV. Por possibilitar o processamento de amplos campos de escoamento permite determinar multi-pontos de velocidade simultaneamente num mesmo espaço bidimensional dando assim uma visão direta da distribuição de velocidade (Lourenço, 1996).

Este trabalho apresenta a técnica de processamento intercalado de campos, capturados na velocidade de obturação de modo entrelaçado, para imagens de fluídos em altas velocidades. As duas imagens formadas mostram as partículas deslocadas e pelo tempo de obturação da câmera é possível calcular a velocidade da partícula. Uma seção de teste para ensaios de desempenho, constituída de um tubo de acrílico transparente com uma placa de orifício em seu interior foi desenvolvida. Uma seção é iluminada com um plano de laser e imagens são capturadas nas regiões a montante e jusante da placa de orifício. Diferentes velocidades de obturação foram programadas para possibilitar a captura das partículas deslocadas que possuem diferentes velocidades.

2. DESCRIÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

Para a visualização da seção do tubo utilizou-se uma câmera de vídeo digital CV-M30 da JAI, (CCD 1/2”), monocromática de 760 x 480 “Pixels”, com oito opções de obturação, desde 1/60 segundos até 1/10000 segundos e a gravação digital em fita magnética tipo DV utilizou-se um gravador digital da Sony DSR-30 com resolução de 180000 pontos na reprodução. Utilizou-se também uma câmera colorida digital VR-1000. A digitalização das imagens capturadas pela câmera é feita com auxílio de placas de imagens. Duas placas de interface estão disponíveis para esta finalidade. Uma placa de alta velocidade marca EPIX (4MEGVIDEO) com capacidade para processar até 9000 quadros por segundo e com resolução de até 8000 Pixels por linha e uma outra de baixa velocidade de processamento modelo TR488 de 760 x490 Pixeis. Um microcomputador (Pentium 200) permite processar as imagens digitalizadas pelas placas de interface.

Para a medição da velocidade de um fluido em escoamento se faz necessário a definição de um domínio (plano) onde partículas são visualizadas. A utilização de uma luz coerente (laser) é muito própria para esta finalidade pois além de proporcionar iluminação bem definida no plano tem uma intensidade capaz de fornecer o brilho adequado as imagens das partículas a serem capturadas pela câmera de vídeo. No presente caso empregou-se uma fonte de laser a Ions de Argônio (Spectra Physics, modelo 2016 de 4 w) iluminando o domínio com a luz verde (514,5 nm). O feixe de laser de 1 mm de diâmetro e com uma intensidade gaussiana incide numa lente cilíndrica transformando-se em um plano de iluminação. A seção de captura de imagens é a região a montante e a jusante da placa de orifício do tubo transparente (acrílico). O tubo de acrílico tem diâmetro interno de 50mm e diâmetro externo de 60mm. O domínio em estudo é um plano longitudinal passando pelo

eixo do tubo com uma extensão de 100mm. A câmera de vídeo captura imagens ortogonalmente ao plano de iluminação. Para melhor identificação do campo de velocidade, partículas são adicionadas ao escoamento com características físicas adequadas. Partículas de Polipropileno de densidade muito próxima do fluido são atualmente empregadas. Sua granulometria é de 160 μm .

A Figura 1 apresenta a configuração física da medição de velocidade numa placa de orifício. Imagens foram capturadas numa seqüência de tomadas com velocidades de obturação variando de 1/60 à 1/10000 segundos. Velocidades de obturação inferiores a 1/60s não produziram boa definição das imagens das partículas e velocidades na ordem de 1/4000s a iluminação não foi suficiente para distinguí-las.

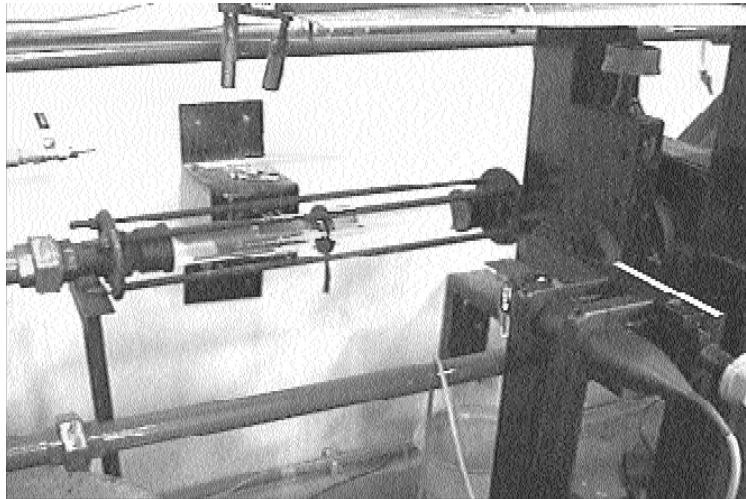


Figura 1- Tubo de acrílico com a montagem PIV

3. PROCESSAMENTO INTERCALADO DE CAMPOS

A maior dificuldade de acompanhamento de campos de partículas em altas velocidades pelo processo convencional utilizando-se câmeras convencionais de 30 quadros por segundo (Almeida, 1994), reside em que as partículas do primeiro quadro quando analisadas no segundo quadro já passaram pela seção focalizada pela câmera. No processo de obturação um quadro pode ser capturado numa velocidade bem maior que a convencional e variável de 1/30 s até 1/10000 s, só que o seguinte quadro será mostrado 1/30 s depois. Assim objetos em alta velocidade podem ser observados sem o rastro na imagem. No processo intercalado de campos podemos obter duas imagens da captura na velocidade de obturação programando-se a câmera de modo entrelaçado e não progressivo. O deslocamento mostrado pelas duas imagens é proporcional a velocidade de obturação. O processo é similar ao usado no PIV com Laser pulsado em que uma única imagem capturada pela câmara fotográfica é obtida deixando o obturador aberto.

Para se ter uma melhor idéia do processo mostramos na Fig.2 a montagem da Imagem que é desmembrada em dois campos, o ímpar e o par, 1C e 2C respectivamente. No processo de varredura entrelaçada os dois campos são varridos seqüencialmente, começando com as 262,5 linhas do campo ímpar e na seqüência as 262,5 linhas pares, e com a superposição dos dois, formando um quadro de 525 linhas intercalado de meia linha.

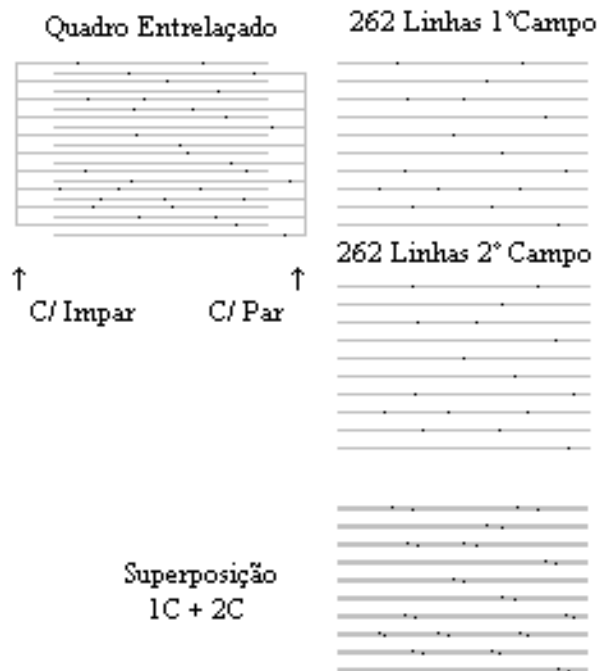


Figura 2- Superposição de dois campos entrelaçados

Esta técnica tem varias vantagens sobre as técnicas anteriores (Loureço, 1996), adotadas nos sistemas PIV. Primeiro, tem-se dois quadros consecutivos e separados, portanto com o tempo entre os dois, determinado pela velocidade de obturação (tomada de eventos de velocidades até 100m/s). Segundo, devido a seqüência dos quadros, se tem a direção das partículas. Terceiro, pelo processo de auto correlação dos dois quadros, pode-se identificar um grupo de partículas e sua velocidade de grupo. E por último, como no processamento tem-se os dois quadros em separado pode-se determinar a velocidade das partículas diretamente sem o processamento de correlação, por univocidade dos pontos próximos, economizando-se o tempo de processamento. Por outro lado a redução da resolução vertical para 262 linhas é compensada pelo sistema ótico da câmera e a integração entre linhas do Sistema CCD cujas dimensões das células são de 10x10 μ m.

4. CORRELAÇÃO DE QUADROS SUBSEQUENTES

Algoritmos de correlação são amplamente usados em processamentos PIV (Lourenço,1996), (Gonzales, 1993), para a identificação de grupos de partículas. A correlação é sempre referenciada de um quadro para o quadro seguinte. Do primeiro quadro definido pela função $f(x,y)$ monta-se uma matriz de 760x480 pixels das partículas tomadas numa determinada posição. Do segundo quadro monta-se a função $g(x-\zeta,y-\eta)$ com os referidos deslocamentos em x e y . A correlação entre os dois quadros $H(\zeta,\eta)$ pode ser descrita pela Equação (1).

$$H(\zeta,\eta) = f(x,y) \otimes g(x-\zeta,y-\eta) \quad (1)$$

Na forma discretizada, pela a Equação (2)

$$H(\zeta,\eta) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(x_i,y_j) \cdot g([x-\zeta]_i,[y-\eta]_j) \quad (2)$$

O resultado do produto pixel a pixel da equação acima é um pico de correlação deslocado de exatamente de (ζ,η) . Portanto a velocidade de grupo pode ser calculada pela Eq.(3).

$$|v| = \frac{\Delta(\zeta,\eta)}{\Delta t} \quad (3)$$

Na aplicação de auto correlação aplicamos o produto de um quadro único, com ele mesmo, composto de dois quadros com as partículas deslocadas (superposição), como mostra a Fig.2. O resultado do produto são três picos de correlação, um central com dobro da amplitude e outros dois deslocados de (ζ,η) , podendo a velocidade de grupo também ser calculada pela a Eq.3. Na aplicação simples da correlação, quando se tem dois quadros consecutivos o Δt é a relação de tempos entre dois quadros ou seja 1/30s. Na auto correlação aplicada ao processo de intercalamento de campos, Δt é função das velocidades de obturação ou seja 1/60 à 1/10000s.

5. IMAGENS NO TUBO DE ACRÍLICO

O sistema “PIV” montado em Laboratório descrito anteriormente, permite a visualização das partículas em movimento para captura e processamento das Imagens. A Fig.3 mostra uma imagem da seção do tubo, à montante da placa de orifício, com a obturação da câmera em 1/100s tal como foi adquirida, com a iluminação do plano de Laser caracterizado pelo fundo cinza e os limites do tubo de acrílico. Esta imagem foi invertida para melhor apresentação no trabalho. A original tem fundo preto e as partículas são brancas. Nesta velocidade de obturação os deslocamentos das partículas são

caracterizados como um rastro, pois esta velocidade é ainda muito lenta para a visualização dos pares de partículas.

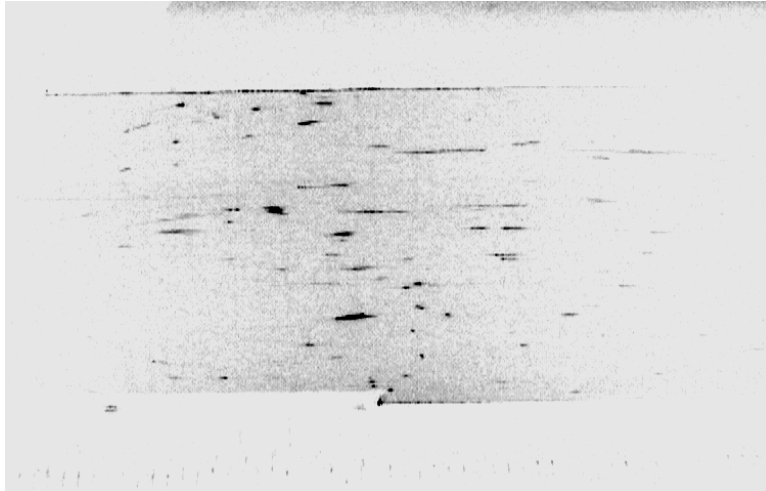


Figura 3- Plano iluminado pelo Laser

6. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Imagens foram gravadas com VTR (video tape record) digital, nas velocidades de obturação de 1/60,1/100,1/250,1/500,1/1000,1/2000s programadas na câmera, durante 20 segundos em cada tomada. As regiões de interesse foram selecionadas com a operação quadro a quadro que congela a imagem para análise. Selecionada a imagem de interesse pelo VTR, digitalizou-se as respectivas com a placa da EPIX citada anteriormente, criando-se quatro arquivos BMP para cada velocidade de obturação. Para processamento destes arquivos foi desenvolvido em programa C++ com telas para Windows, ferramentas que manipulam os arquivos, e faz diversas operações pixel a pixel, para processamento das imagens e cálculos dos vetores velocidade para visualização de campos. A região escolhida para levantamento do campo de visualização, foi a dos quatro arquivos (quatro imagens) na velocidade de obturação de 1/1000s. Nesta região foi caracterizada a imagem duplicada de pontos, obtida pela superposição do campo ímpar e par do processo de intercalamento de campos. Na Fig.4 mostramos as quatro imagens superpostas, que servirão de base para o algoritmo de cálculo das velocidades. Nesta figura esta bem claro os pares formados pela captura do primeiro e segundo campo. Alguns conjuntos de partículas apresentaram-se unidas, denotando mais alta velocidade, sendo desprezados no algoritmo de cálculo, pois o Δt neste caso é a metade de quando as partículas aparecem isoladas. Neste caso não é necessário a aplicação do algoritmo de auto correlação para identificação de grupo, pois no

tubo de acrílico com a placa de orifício a velocidade das partículas é praticamente constante, e esta técnica seria aplicada para situação de grupos de velocidade diferentes.

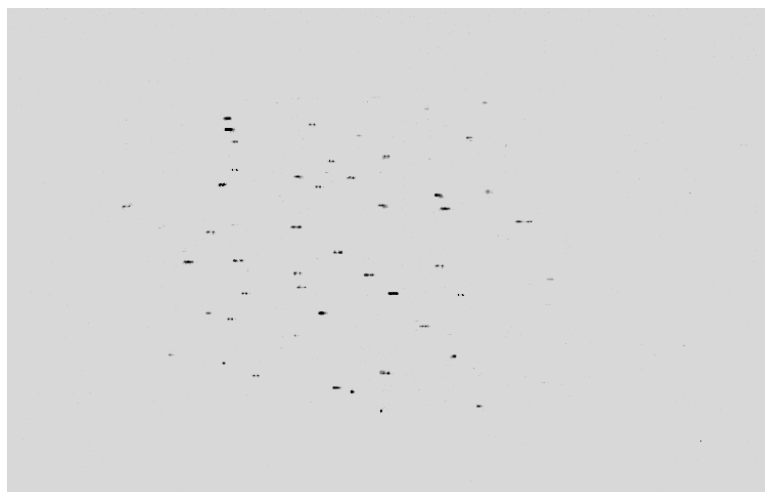


Figura 4- Superposição de quadros à velocidade de 1/1000s

7. VISUALIZAÇÃO DE FLUXO

Na Figura 5 se tem o campo de velocidade juntamente com o reticulado de calibração para cálculo dos vetores velocidade com o paço entre eles de 10 pixels. Nesta figura há uma ampliação de 5 vezes no eixo horizontal, para melhor representação dos vetores. Os limites do tubo (diâmetro) de acrílico estão demarcados, e por meio deles pode-se determinar a magnificação da imagem (relação objeto/imagem). O diâmetro do tubo é de 60 mm, assim assume a dimensão de 307 pixels, valor base para o cálculo dos vetores velocidade.

Tabela 1 – Grupos de velocidades distribuídas no campo

V	n° vetores	n° Pixels	Δ mm	Vel. m/s
V ₁	4	3	0,58	1,16
V ₂	2	4	0,78	1,56
V ₃	6	5	0,97	1,94
V ₄	5	6	1,17	2,34
V ₅	5	7	1,36	2,72

Na tabela 1 tem-se a distribuição de velocidades do campo reproduzido na Fig.5., calculada pela Equação 3, considerando Δt igual a $1/2000$ s. Utiliza-se a metade do tempo de obturação, pois no processo de intercalamento, tem-se dois campos e a metade do tempo é utilizada para varrer um campo. A velocidade calibrada do retículo é de 3,90 m/s e a velocidade média na tubulação é de 2,03 m/s.

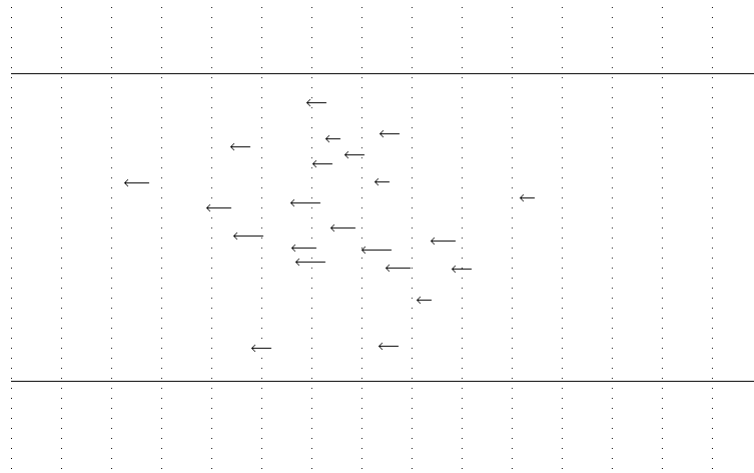


Figura 5- Visualização do fluxo no tubo de acrílico

8. CONCLUSÃO

A técnica mostrou-se bastante eficaz mas dependente da qualidade da imagem obtida em mais altas velocidades, pois a medida que a velocidade de obturação aumenta necessita-se de mais iluminação do feixe de Laser. Velocidades das partículas maiores, de 10 à 100 m/s poderão ser facilmente medidas mostrando um distanciamento maior entre elas. A validação destas medidas serão posteriormente realizadas com a técnica LDV, bem como as incertezas detalhadas de cada etapa do sistema de medição.

9. ABSTRACT

High Velocity Measurement in Fluids using “PIV” Technique and Interlaced Image Processing.

Measuring high velocity in fluid flows is not an easy task. Processing image techniques, such as particle image velocimetry (PIV), with continuous laser sheet and conventional CCD cameras, operating at 30 frames per second, allows good measurement, only for slow flows. For a faster flow, this technique, unfortunately, is not suitable. But at

present time, a new generation of digital CCD-DV cameras, with controlled shutter velocity, is being introduced in the market. This new feature turned possible measure velocities up to 100 m/s, even without pulsating the laser light. This work shows a technique for processing frames captured at different shutter velocity and recorded into a digital DVT (digital videotape). One image of double field (even and odd fields) is captured and the processing is done between both fields. An image, captured with variable shutter velocity (ranging from 1/30 up to 1/10000 seconds), is recorded onto a DVT to be digitized by an interface board into a microcomputer and processed, afterwards. The processing algorithm is based on a cross correlation and autocorrelation technique between both fields and a post-processing procedure presents the flow field results.

Key-words: Flow Visualization, Particle Image Velocimetry

10. REFERÊNCIAS

Adrian, R.J. 1991, Particle Image Velocimetry, TSI Short Course Test, Brussels.

Almeida, J.A., Cunha C.M., e Azevedo L.F. 1994, Medida do Campo Completo de Velocidade Através do Processamento Digital de Imagens, III Congresso de Eng. Mecânica Norte-Nordeste, Belém.

Gonzales R., e Woods R., 1993, Digital Imaging Processing, Massachusetts, Addison Wesley.

Lourenço L.M., 1996, Particle Image Velocimetry, Lecture Series 1996-03, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium.