

## 4 Técnicas de Medição do Escoamento

O conhecimento do campo de velocidade de fluidos em movimento é fundamental para o entendimento dos mecanismos básicos que governam a dinâmica do escoamento. Nas últimas décadas, a evolução da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores viabilizou a solução numérica de escoamentos complexos.

Em áreas onde os métodos computacionais são aplicados em modelos físicos bem estabelecidos com modelos matemáticos bem comportados, o papel de experimentos de laboratório tem enfraquecido consideravelmente, não sendo mais necessária a comprovação experimental das previsões computacionais. No entanto, existem classes de problemas mais complexos para os quais os estudos experimentais são fundamentais para o entendimento dos fenômenos básicos envolvidos e validação de previsões numéricas.

O caso do escoamento que foi estudado para este trabalho, um jato espiralado incidente numa placa, merece ser enquadrado no grupo dos problemas para os quais uma investigação experimental é bastante importante. Formar um banco de dados abrangente com dados experimentais confiáveis é crucial para o teste da eficiência de simulações numéricas e de modelos de turbulência em escoamentos com esta configuração e desta natureza. Nas duas próximas seções serão descritas as técnicas de medição de velocidade utilizadas no presente trabalho.

### 4.1. Velocimetria por Imagem de Partículas - PIV

A medição de escoamentos mais complexos tem sido um desafio permanente para os experimentalistas. Técnicas de medida pontuais como anemometria de fio e filme quente e anemometria *laser-Doppler* têm sido alvos de constantes aperfeiçoamentos nos últimos anos. Estas técnicas são largamente utilizadas oferecendo informações sobre a variação no tempo de várias quantidades de interesse em pontos específicos dos escoamentos. No entanto, o

instrumento ideal para o estudo de escoamentos é aquele capaz de medir o campo completo, tridimensional do vetor velocidade,  $\vec{u}(\vec{x},t)$ , como uma função contínua do espaço em todo o domínio do escoamento, e como uma função contínua do tempo.

As medidas espaciais e temporais obtidas com este instrumento possibilitariam o cálculo direto de quantidades fundamentais para a mecânica dos fluidos como campo de vorticidade, tensor deformação, e até gradientes de pressão.

Os mesmos avanços na informática e microeletrônica que impulsionaram o desenvolvimento das soluções numéricas de escoamentos estão possibilitando o desenvolvimento de sistemas de medição de campos completos. Câmeras de alta resolução, alta capacidade de armazenamento e processamento digital de imagens a um custo acessível tornaram viável a transformação da visualização de escoamentos de uma técnica qualitativa para uma técnica quantitativa, com nível de exatidão comparável às técnicas de medição pontuais existentes.

Uma das técnicas mais difundidas para medição de escoamentos instantâneos em regiões extensas do escoamento é a velocimetria por imagem de partículas.

A grande maioria dos esforços realizados no sentido de desenvolver sistemas para a medição simultânea de um grande número de vetores velocidade em domínios bi e tridimensionais tem sido concentrada em técnicas óticas. Estas técnicas usam planos de luz pulsada e equipamentos fotográficos ou eletrônicos para o registro das imagens de partículas traçadoras distribuídas no fluido. São classificadas, portanto, como técnicas não invasivas (se considerarmos que a adição de partículas traçadoras não perturba o escoamento), de medição indireta do escoamento, pois medem o deslocamento de partículas que supostamente acompanham o escoamento de forma fiel.

Uma fonte de luz pulsada ilumina por curtos intervalos de tempo estas pequenas partículas traçadoras distribuídas no fluido. Um meio de gravação de imagens armazena as informações das localizações das partículas em dois instantes de tempo correspondentes aos instantes de iluminação. As velocidades dos traçadores são obtidas a partir de seus deslocamentos registrados e do intervalo de exposição utilizado.

As partículas são focalizadas no plano da imagem. A câmera, com a lente

posicionada a  $90^\circ$  com este plano produz uma ampliação,  $M$ , tipicamente na faixa de 0,1 a 10. As imagens de dupla exposição formadas são transferidas para um computador onde são analisadas e processadas para a obtenção das informações desejadas. A análise das imagens registradas constitui uma das mais importantes etapas do processo de medida. Dela depende a exatidão, confiabilidade e resolução espacial obtidas. Existem diversos algoritmos para análise das imagens e extração do campo de velocidade.

Os principais elementos que compõem a técnica são o fluido, as partículas traçadoras, o sistema de iluminação, o sistema de aquisição das imagens e o sistema de processamento das imagens para obtenção do campo de velocidade desejado.

### **O Fluido**

A principal restrição ao fluido é que o mesmo deve ser transparente ao comprimento de onda da luz utilizada.

Idealmente, a massa específica do fluido utilizado deve ser a mesma das partículas para garantir que as partículas acompanhem fielmente o movimento do fluido. No estudo do escoamento de gases, como no caso deste trabalho, a diferença de massa específica em relação aos materiais das partículas utilizadas no escoamento de líquidos obriga a utilização de partículas de dimensões reduzidas para garantir o acompanhamento do movimento do fluido e, como será comentado adiante, partículas pequenas podem dificultar o registro das imagens.

### **As Partículas**

As partículas traçadoras desempenham um papel fundamental no sistema de medição, pois elas são responsáveis pelo espalhamento da luz, devendo produzir imagens de boa qualidade e seguir de maneira fiel o escoamento.

### **Concentração das Partículas no Fluido**

As partículas dispersas no escoamento não devem perturbar o campo de velocidade. Como este campo, na região próxima a cada partícula, é inevitavelmente afetado, as partículas devem ser suficientemente pequenas e estar suficientemente dispersas para minimizar o efeito de sua presença. Portanto, as partículas devem apresentar baixa concentração em volume, além de possuir

pequeno diâmetro. Por outro lado, a concentração deve ser suficientemente grande para que o campo de velocidade possa ser completamente reconstituído.

O diâmetro da imagem de uma partícula,  $d_\tau$ , é determinado pelo diâmetro da partícula,  $d_p$ , pela ampliação da imagem e pela abertura da lente que focaliza a imagem da partícula.

Para uma lente limitada por difração, a resposta pontual tem diâmetro,  $d_{diff}$ , dado por [17]:

$$d_{diff} = 2,44 (1+M) f\# \lambda \quad (4-1)$$

onde  $f\#$  é o número f da lente (sua abertura),  $M$  é a ampliação da imagem e  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz do laser.

O diâmetro da imagem da partícula,  $d_\tau$ , seria então

$$d_\tau = (M^2 d_p^2 + d_{diff}^2)^{1/2} \quad (4-2)$$

Este diâmetro vai se tornando aproximadamente independente do tamanho real da partícula para partículas com diâmetro inferior a 10 micrometros.

A qualidade das imagens obtidas é de fundamental importância para o sucesso do processo de análise de imagens em que os deslocamentos das partículas entre dois instantes de tempo são medidos. O bom contraste de uma imagem depende do poder de espalhamento da luz incidente pelas partículas.

Como pode ser observado, a escolha das partículas envolve a conciliação de dois fatores opostos: o diâmetro das partículas deve ser o menor possível para que ela acompanhe o escoamento e grande o suficiente para que ela espalhe a luz necessária para sensibilizar o sensor da câmera no momento do registro da imagem.

### **Registro das Imagens**

Os avanços recentes verificados na área de equipamentos para aquisição eletrônica de imagens proporcionaram uma alternativa interessante aos registros fotográficos (primeira forma de registro usada em PIV). A possibilidade de observação da imagem quase em tempo real e a eliminação dos processos químicos de revelação de filmes são vantagens consideráveis.

Existe uma grande variedade de sensores eletrônicos de imagem. Dentre estes, o mais utilizado é o sensor CCD (“*charged coupled device*”). De uma maneira geral, o CCD é um sensor eletrônico que converte luz, isto é, fótons, em carga elétrica. Normalmente, quando nos referimos a um sensor CCD, temos em mente uma matriz destes sensores. Cada elemento individual da matriz é chamado de pixel, do inglês, *picture element*. Suas dimensões típicas são da ordem de 10 x 10  $\mu\text{m}$ , ou 100 pixels por milímetro, como é o caso do CCD utilizado neste experimento.

Com o modo de registro de imagens utilizado, cada imagem de partículas correspondendo a um pulso de luz é capturada em um quadro distinto. Para a utilização deste modo de operação em escoamentos com velocidades elevadas, é necessário que a câmera seja capaz de atualizar o registro da imagem rapidamente. O avanço na velocidade de atualização dos campos das novas câmeras, aliado a técnicas de sincronismo, tem permitido a utilização desta técnica para escoamentos com velocidades bastante altas.

Um tipo de arranjo que tem sido bastante utilizado na aquisição de imagens em sistemas PIV é representado na Figura 4.1. Este arranjo é utilizado na câmera TSI-PIVCAM 10-30 fabricada pela TSI Inc, que foi usada para este trabalho. Nesta câmera os tempos de exposição de cada quadro são da ordem de 33 ms, um valor elevado para aplicações de velocidades médias e altas. O tempo de transferência das imagens entre quadros pode ser, no entanto, da ordem de 5  $\mu\text{s}$ . Através de um sistema eletrônico de sincronização o disparo do primeiro pulso de laser é ajustado para acontecer imediatamente antes do fim do período de exposição do primeiro quadro. O segundo disparo do laser acontece imediatamente após o início da exposição do segundo quadro. Desta forma, a partir de uma câmera com tempo de exposição longo de 33 ms obtém-se dois registros consecutivos de imagens com intervalo da ordem de 5  $\mu\text{s}$ , que é suficiente para registrar velocidades bastante altas.



Figura 4.1 – Diagrama de sincronismo utilizado na aquisição de imagens com PIV

### Métodos de Análise das Imagens

Uma vez que as imagens das partículas traçadoras correspondentes aos dois pulsos de luz tenham sido registradas, o próximo passo é iniciar a análise destas imagens, com o objetivo de extrair as informações sobre os deslocamentos das partículas e o campo de velocidade desejado.

No caso da técnica PIV, a densidade de partículas na imagem é elevada, não permitindo que o deslocamento individual de cada partícula seja determinado. A alternativa disponível é estudar-se o deslocamento de pequenas regiões na imagem contendo cerca de uma dezena de partículas e assumir-se que, devido às pequenas dimensões desta região, não há gradientes apreciáveis de velocidade e que as partículas ali contidas deslocam-se preservando suas distâncias relativas entre os dois instantes de tempo considerados. Esta técnica aplica-se a escoamentos predominantemente bidimensionais.

### Método de Correlação Cruzada das Imagens

Este método é empregado para determinar o campo de velocidades quando dispõe-se de duas imagens sucessivas do escoamento.

A aplicação do algoritmo de correlação cruzada normalizada bidimensional permite determinar o módulo, a direção e também o sentido de cada vetor que compõe o campo de velocidade medido. Para tal são necessárias duas imagens, uma obtida no instante  $t$  (Imagem 1) e outra em  $t+\Delta t$  (Imagem 2).

Uma região contendo o ponto no qual desejamos determinar a velocidade é selecionada na Imagem 1, e então a mesma configuração das partículas é procurada na Imagem 2, como mostra a Figura 4.2.

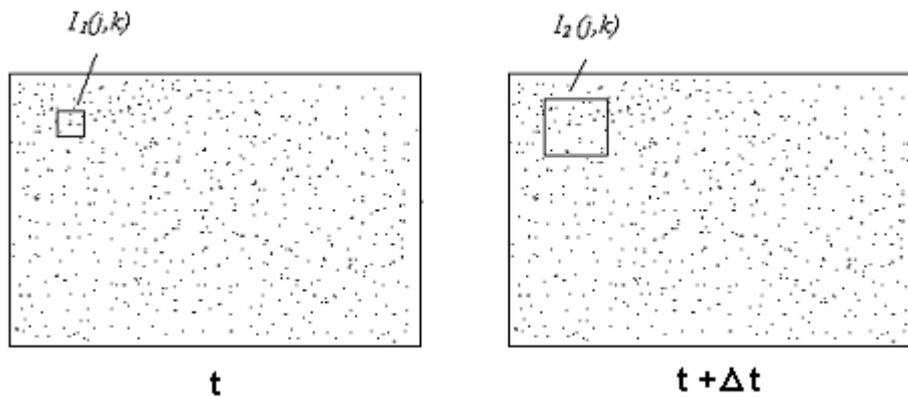


Figura 4.2 - Regiões base e de busca para correlação cruzada

A região indicada por  $I_1(j,k)$ , na Figura 4.2, é chamada de região base, e a região indicada por  $I_2(j,k)$  está localizada dentro de uma região  $I_B(j,k)$  chamada de região de busca. A região de busca deve ser maior do que a região base, e a escolha do tamanho de cada região depende do escoamento. A correlação espacial das imagens está baseada no fato de que as partículas dentro da região investigada têm a mesma velocidade e mantêm a mesma posição relativa, portanto o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre as duas imagens é limitado para que não ocorram deformações significativas na posição relativa das partículas. Pode-se esperar que escoamentos com gradientes de velocidade altos sejam mais difíceis de se medir.

A base é obtida de uma região na Imagem 1 com coordenadas do ponto central  $(x_1, y_1)$ , e contém um padrão distinto de partículas. A região de busca na Imagem 2 também tem coordenadas do ponto central  $(x_1, y_1)$ . Utilizando a equação de correlação [18], o padrão da Imagem 1 é sobreposto em todas as posições possíveis dentro da Imagem 2, com resolução de 1 pixel, e o ponto central da base na posição que apresenta o maior coeficiente de correlação  $R$  possui coordenadas  $(x_2, y_2)$  que descrevem o deslocamento do padrão, como ilustra a Figura 4.3. O vetor deslocamento é a linha que une o centro da região de busca ao centro da região base na posição onde ocorre o maior valor do coeficiente  $R$ .

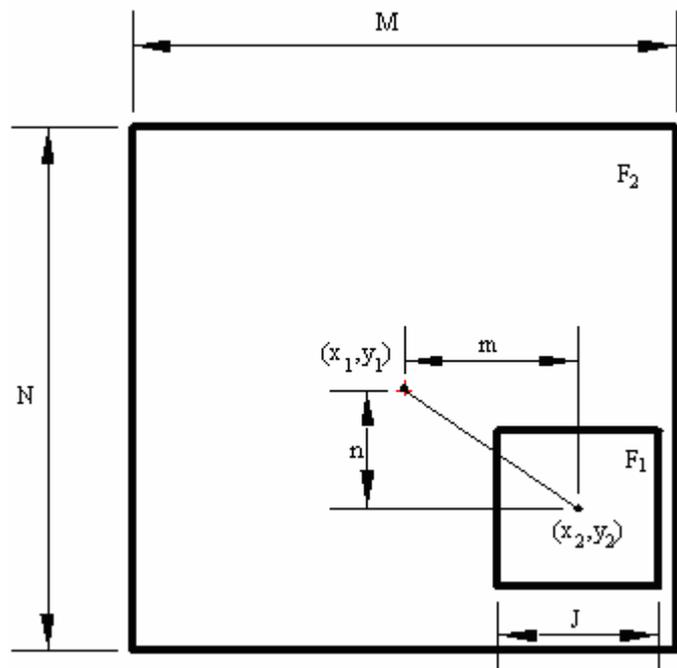


Figura 4.3 - Posição do pico de correlação máximo

Os componentes da velocidade são calculados por:

$$U = FS \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \quad (4-3)$$

$$V = FS \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \quad (4-4)$$

o que permite determinar o módulo, a direção e o sentido de cada vetor velocidade. Nas equações acima,  $FS$  é um fator de escala que relaciona uma dimensão na imagem com uma dimensão real no escoamento.

Como a função de correlação é normalizada, o coeficiente de correlação  $R$ , varia entre 0 e 1 ( $0 \leq R \leq 1$ ). Portanto, quando o padrão da região base for localizado na região de busca, o coeficiente de correlação será  $R=1$ . Entretanto, devido às possíveis deformações que o padrão pode sofrer em razão das características do escoamento, em alguns casos encontraremos valores máximos de  $R < 1$ . Faz-se portanto necessário estabelecer um valor de  $R$  acima do qual a deformação do padrão é aceitável e abaixo do qual considera-se que a correlação não é boa o suficiente para determinar a velocidade com a exatidão desejada.

Um mapa dos coeficientes de correlação para uma situação típica é apresentado na Figura 4.4, onde as coordenadas do centro da região base são

$x_1=0, y_1=0$  e as coordenadas  $(x_2, y_2)$  correspondem ao ponto onde  $R$  é máximo, isto é, ao pico mais elevado.

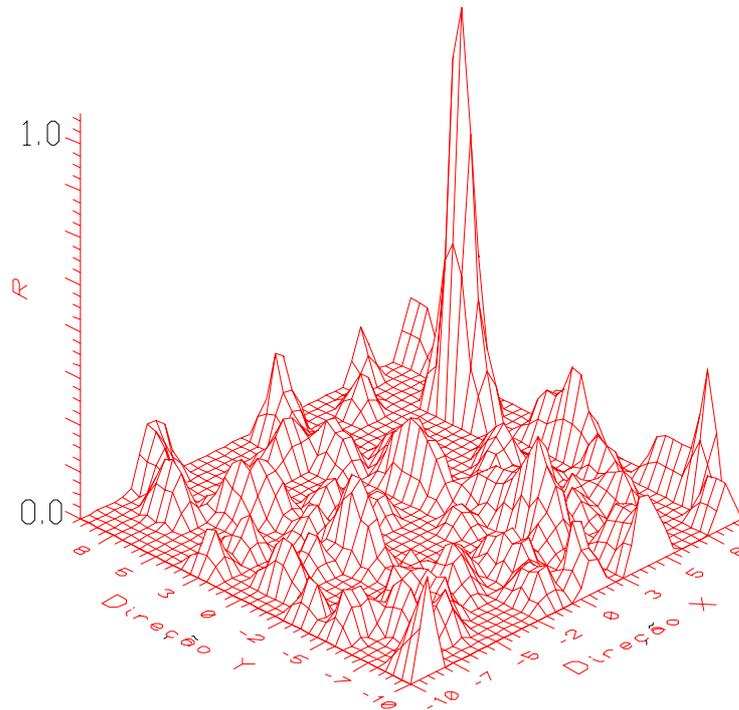


Figura 4.4 – Mapa típico do coeficiente de correlação,  $R$ , para correlação cruzada.

Um dos pontos cruciais no uso da técnica, mas não facilmente compreendido, é o fato de que a posição do pico de correlação pode ser medida com uma resolução sub-pixel.

Como os dados de entrada são discretizados, os valores de correlação só existem para deslocamentos inteiros. O mais alto valor de correlação permite então que o deslocamento seja determinado com uma incerteza de  $\pm \frac{1}{2}$  pixel. Entretanto, com a função de correlação sendo uma medida estatística da melhor “coincidência”, os próprios valores de correlação também contêm informação útil. Por exemplo, se uma amostra de interrogação contém dez pares de imagens de partículas com um deslocamento de 2,5 pixels, então, do ponto de vista estatístico, cinco deles teriam contribuído para o valor de correlação associado a um deslocamento de 2 pixels, enquanto os outros cinco indicariam um deslocamento de 3 pixels. Como resultado, os valores de correlação para os deslocamentos de 2 pixels e de 3 pixels terão o mesmo valor. Uma média dos dois deslocamentos fornecerá uma estimativa de deslocamento de 2,5 pixels. Mesmo sendo um exemplo básico, ilustra que a informação por trás dos valores de correlação pode ser utilizada efetivamente para estimar o deslocamento médio de uma partícula na

imagem dentro da janela de interrogação.

Uma variedade de métodos para se estimar a localização dos picos de correlação foi utilizada no passado. Um método mais robusto é ajustar os dados relativos à correlação com alguma função. Especialmente para picos de correlação estreitos, a abordagem de usar apenas três valores adjacentes para estimar a componente de deslocamento se tornou bastante utilizada. Os mais comuns destes métodos são o ajuste parabólico e o ajuste gaussiano, sendo o último mais freqüentemente implementado. Uma explicação para isto é que as próprias imagens das partículas, se focadas corretamente, descrevem funções de intensidade de Airy que são muito bem aproximadas por uma distribuição de intensidade gaussiana [18].

Estes tipos de estimativa tipicamente funcionam melhor para picos de correlação estreitos formados a partir de imagens de partículas com 2 a 3 pixels de diâmetro. Simulações indicam que para maiores imagens de partículas, a incerteza atingível nas medições aumenta, o que pode ser explicado pelo fato de que, enquanto o nível de ruído em cada valor de correlação continua praticamente o mesmo, as diferenças entre os três valores de correlação adjacentes são muito pequenas para gerar estimativas de deslocamento confiáveis. Em outras palavras, o nível de ruído se torna cada vez mais significativo enquanto as diferenças entre os valores de correlação vizinhos decresce. Se, ao invés disso, as imagens das partículas são muito pequenas ( $d_{\tau} < 1,5$  pixel), os “estimadores” também funcionarão de forma insatisfatória, principalmente porque os valores adjacentes ao pico estarão “escondidos” pelo ruído.

No presente trabalho, a localização do pico de correlação a nível subpixel foi feita através de um ajuste gaussiano:

$$f(x) = C \exp \frac{-(x_0 - x)}{k} \quad (4-5)$$

$$x_0 = i + \frac{\ln R_{(i-1,j)} - \ln R_{(i+1,j)}}{2 \ln R_{(i-1,j)} - 4 \ln R_{(i,j)} + 2 \ln R_{(i+1,j)}} \quad (4-6)$$

$$y_0 = j + \frac{\ln R_{(i,j-1)} - \ln R_{(i,j+1)}}{2 \ln R_{(i,j-1)} - 4 \ln R_{(i,j)} + 2 \ln R_{(i,j+1)}} \quad (4-7)$$

Erros randômicos associados ao cálculo do deslocamento podem ter um papel crucial na exatidão dos resultados instantâneos. Entretanto, devido à natureza randômica destas incertezas, elas podem ser consideradas insignificantes quando se calcula a média dos campos vetoriais no tempo ou espaço, desde que a amostra seja suficientemente grande. Assim, erros randômicos não degradam os resultados estatísticos relativos a uma grande amostra de campos de velocidade.

Por outro lado, erros de tendência, os chamados “*bias errors*”, certamente não são randômicos no espaço e no tempo e podem, portanto, degradar não somente resultados instantâneos mas também estatísticas computadas a partir de uma amostra de campos vetoriais. Existem vários tipos de “*bias errors*” associados a medições com PIV, como por exemplo erros associados à escolha do algoritmo usado para interrogar as imagens. Mas um dos erros mais significantes associados a esta técnica é chamado em inglês de “*peak locking*” ou “*pixel locking*” – a tendência dos valores de deslocamento das partículas serem estimados em valores inteiros de pixels. Este fenômeno é associado tanto à escolha da ferramenta que estima o deslocamento sub-pixel quanto a uma resolução ruim das imagens das partículas ( $d_t/d_{pix} < 2$ ), onde  $d_{pix}$  é a dimensão do pixel) e está ilustrado na figura 4.5. No caso de resolução ruim das imagens, “*peak locking*” pode ser uma importante fonte de erro independentemente da escolha do tipo de estimativa sub-pixel.

Westerweel [19] mostrou que o ajuste gaussiano para avaliar o deslocamento subpixel é superior aos ajustes centróide e quadrático em termos de diminuir os efeitos de “*peak locking*”.

Em uma medição de escoamento turbulento com PIV, se torna ainda mais crítica a escolha correta dos ajustes a serem utilizados, pois normalmente há a necessidade de se computar estatísticas a partir da amostra de campos vetoriais. Quando as flutuações de velocidade são pequenas, a incerteza destas estatísticas aumenta. Por exemplo, dado um escoamento com um deslocamento médio de 10 pixels em uma direção e com flutuações nesta direção da ordem de 10% da média, o deslocamento associado a estas flutuações seria da ordem de 1 pixel. Se as flutuações na outra direção forem da ordem de 5% da média, elas seriam associadas a um deslocamento de 0,5 pixel. Assim, uma determinação exata dos valores destas flutuações seria fortemente dependente de uma boa estimativa do deslocamento subpixel das imagens das partículas. Como a maioria das

estatísticas de turbulência de interesse são computadas a partir das flutuações de velocidade, erros associados ao fenômeno de “*peak locking*” podem ser bastante significativos na contribuição para a incerteza nos resultados.

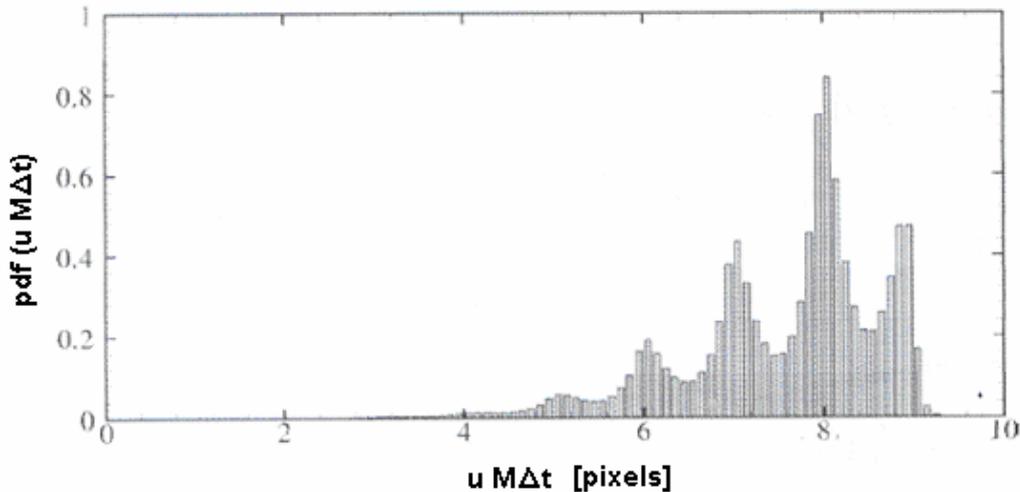


Figura 4.5 - Função Densidade de Probabilidade do deslocamento de partículas – Efeito de “*peak-locking*” [4]

Pode-se afirmar que o único resultado estatístico insensível ao fenômeno de “*peak locking*” é a velocidade média. Velocidades r.m.s., tensões de Reynolds, vorticidade e coeficientes de correlação são bastante afetados. Também fica claro que a maior sensibilidade a este tipo de erro nas estatísticas de turbulência ocorre quando os deslocamentos relativos às flutuações são pequenos. Em particular, quando estes deslocamentos são menores que 0,5 pixel em magnitude, eles acabam sendo avaliados como deslocamentos nulos, subestimando assim os resultados estatísticos.

### Efeito de Gradientes de Deslocamento

Como PIV é uma técnica baseada na medição estatística do deslocamento usando a correlação entre duas janelas de interrogação, um gradiente de deslocamento elevado dentro de uma janela provavelmente irá introduzir um erro no resultado ali calculado, pois nem todas as imagens de partículas presentes na primeira janela de interrogação estarão também presentes na segunda janela de interrogação, ou a posição relativa das partículas pode mudar significativamente. Uma observação importante é que janelas de interrogação menores podem tolerar gradientes de deslocamento mais altos. A razão disto é que, na janela maior, o

pico de correlação tem um espalhamento maior: para o mesmo gradiente de deslocamento, o intervalo de deslocamentos que geram um alto valor de correlação é maior do que em uma janela menor. Esta proporcionalidade é linear, gerando picos cada vez mais largos quando se usa janelas cada vez maiores. Portanto, janelas de interrogação menores devem ser escolhidas para o processamento de um campo com presença de gradientes fortes, desde que se garanta que a densidade de partículas na imagem seja suficientemente grande.

### **Efeito do Movimento Ortogonal ao Plano**

Freqüentemente deseja-se aplicar o método PIV a escoamentos altamente tridimensionais, com componente de velocidade normal ao plano de iluminação. Em casos como este, pode haver a falta de partículas que se encontravam no plano no instante  $t$  e não se encontram mais focadas no instante  $t+\Delta t$ . Uma solução para isto é diminuir tanto quanto possível o intervalo de tempo entre os dois pulsos, de modo que as imagens das partículas correspondentes a dois instantes de tempo consecutivos mantenham-se dentro do plano iluminado.

### **Pós-Processamento dos Dados**

A principal vantagem do método PIV sobre técnicas convencionais de medição de escoamentos é a possibilidade de determinação de campos instantâneos de velocidade em regiões extensas do escoamento. A medição destes campos instantâneos permite que quantidades integrais ou derivadas de interesse sejam calculadas. Dentre esta, destaca-se campos instantâneos de vorticidade, taxa de deformação, circulação e fluxos de massa.

Após uma análise automática das imagens com as técnicas descritas anteriormente, uma quantidade significativa de vetores velocidade fica disponível para pós-processamento. Se a técnica PIV é bem aplicada, apenas uma pequena fração dos vetores calculados são errados. Uma inspeção visual do mapa de vetores indica claramente vetores em erro. Estes vetores devem ser descartados para evitar que o cálculo das quantidades derivadas e integrais seja afetada por estes vetores ditos espúrios.

Várias técnicas foram propostas para remover os vetores errados. Em sua maioria as técnicas de remoção são baseadas na comparação de vetores com seus vizinhos e na aplicação de critérios de desvio máximo. Alguns métodos baseiam-

se na verificação da conservação de massa em células vizinhas aos vetores testados.

Depois de serem identificados, os vetores errados são removidos e devem ser substituídos por vetores interpolados para que não haja vazios no campo de velocidade medido. Estes vazios provocam problemas graves no cálculo posterior das quantidades derivadas, como a vorticidade.

Esta interpolação é normalmente baseada nos valores dos vetores vizinhos. O número de vetores vizinhos a serem levados em conta pode ser modificado de acordo com as características do escoamento estudado.

## 4.2. Velocimetria Laser-Doppler – LDV

Esta é uma técnica de comprovada qualidade que mede com boa exatidão e de forma não-invasiva a velocidade em um ponto do escoamento. A velocidade é medida em um único ponto, com elevada taxa de amostragem.

### Princípio de Funcionamento

Uma fonte de luz coerente é utilizada para gerar dois feixes que se cruzam, dando origem a franjas de interferência. A coerência do laser garante que a localização das franjas de interferência é constante e a diferença de fase dos feixes é independente do tempo.

A interseção dos feixes é denominada volume de medição. Quando uma partícula presente no fluido passa pelo volume de medição, ela causa um espalhamento de luz, que é detectado por um sistema óptico. A frequência dessa luz espalhada é diretamente proporcional à velocidade da partícula na direção perpendicular às franjas de interferência, e assim a grandeza desejada pode ser calculada.

Se pares adicionais de feixe de laser com diferentes comprimentos de onda forem direcionados para o mesmo volume de medição, dois e até três componentes de velocidade podem ser determinados simultaneamente. Para mudar o componente de velocidade que está sendo medido, deve-se alterar o alinhamento do par de feixes em relação à direção desejada.

Se num dos feixes do par houver um incremento na frequência, o sistema LDV pode também medir reversões no escoamento.

### **Resolução do Sentido da Velocidade: Deslocamento de Frequência ou “*Frequency Shifting*”**

A configuração óptica explicada no item anterior resolve a componente do vetor velocidade normal às franjas de interferência. Entretanto, nenhuma informação sobre o sentido desta componente está contida no sinal adquirido. A frequência não é dependente do sentido da velocidade, ou seja, uma medida de velocidade de mesma magnitude, positiva ou negativa, irá resultar na mesma frequência Doppler de saída.

Para superar esta limitação, os sistemas LDV são normalmente equipados com moduladores óptico-acústicos, chamados de células de Bragg, que permitem resolver o sentido do escoamento e permitem também a correta avaliação das baixas velocidades.

O propósito da Célula de Bragg é introduzir um desvio de frequência, ou “*shift*”,  $f_{sh}$ , em um dos feixes. Num sistema LDV sem deslocamento de frequência, as franjas no volume de medição são estacionárias. Quando é introduzido o desvio na frequência de um dos feixes, as franjas ópticas no volume de medição se movem no sentido do feixe de frequência modificada (“*shifted beam*” – que está a uma frequência mais alta) para o outro (“*unshifted beam*” – a uma frequência mais baixa). A frequência deste movimento das franjas é igual ao deslocamento de frequência utilizado. Isto está ilustrado na Figura 4.6.

Assim, uma partícula passando por este volume de medição e se movendo no sentido oposto ao das franjas, gera um sinal com uma frequência que é igual à frequência de “*shift*” mais a sua própria frequência Doppler. Por outro lado, o sinal de uma partícula passando pelo volume de medição mas se movendo no mesmo sentido que as franjas, será igual à diferença entre a frequência de “*shift*” e a própria frequência Doppler. Se o escoamento que está sendo estudado apresenta reversões ou se há componentes de velocidade pequenos a serem medidos, é necessário fazer uso de “*frequency shifting*”.

Para ilustrar como este processo funciona para o caso de uma reversão do escoamento, pode-se pensar em um exemplo e observar a Figura 4.7. Com uma frequência de desvio ( $f_{sh}$ ) de 1 MHz, a frequência de saída do sinal é de 1 MHz para velocidade nula. A frequência aumenta de 1 MHz no sentido “positivo” do escoamento (é necessário atribuir inicialmente o sinal positivo a um dado sentido e negativo ao outro, de acordo com a posição dos feixes) e decresce de 1 MHz no

sentido “negativo” do escoamento.

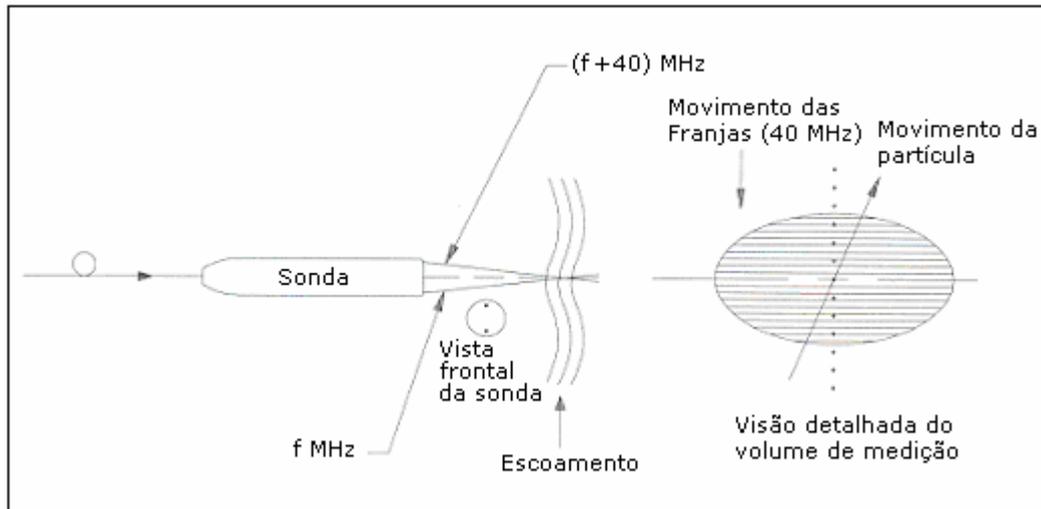


Figura 4.6 - Movimento das franjas em um sistema LDV com “frequency shift”

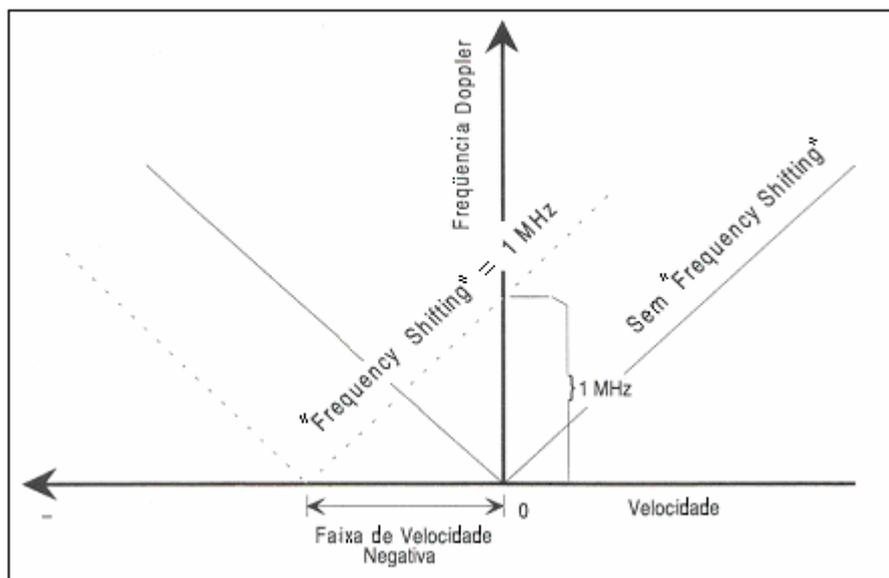


Figura 4.7 - Deslocamento de frequência para a medição de reversões no escoamento

A regra geral para medir reversões no escoamento é selecionar a magnitude do desvio de frequência com valor de aproximadamente o dobro da frequência Doppler correspondente à máxima velocidade negativa esperada.

Sendo  $\beta$  o ângulo que caracteriza a mudança no sentido do escoamento, pode haver uma reversão, tal que  $\beta = 180^\circ$ .

O número de franjas no volume de medição (sem “shift” de frequência) é  $N_F$ . Neste caso, o número de ciclos no sinal do fotodetector,  $N_I$ , depende da

trajetória da partícula

$$N_1 = \left( \frac{v_0 \cos \beta}{d_f} \right) * \left( \frac{d_m}{v_0} \right) = N_F \cos \beta \quad (4-8)$$

onde  $v_0$  é a velocidade da partícula,  $d_f$  o espaçamento entre as franjas e  $d_m$  o diâmetro do volume de medição.

Com o desvio de frequência, ou “shift”, o número de ciclos no sinal,  $N$ , é:

$$N = N_1 + N_S = N_F \cos \beta + \left( \frac{d_m}{d_f} \right) * \left( \frac{d_f}{v_0} \right) * f_S \quad (4-9)$$

onde  $N_S$  é atribuído ao desvio de frequência.

### **Detecção e Processamento do Sinal**

O elemento responsável por converter um sinal óptico em um sinal eletrônico é normalmente chamado de fotodetector. Um fóton de luz provoca a mudança do nível de energia de um elétron, ou seja, um fluxo de fótons do sinal óptico implica em um fluxo de elétrons. A interação entre um campo óptico e o material foto-sensível é um fenômeno quântico, que inevitavelmente imprime um dado ruído ao sinal. Essa corrente produzida pelo fotodetector contém então a informação de frequência que será relacionada com a velocidade do fluido.