



Técnicas Experimentais Aplicadas à Mecânica dos Fluidos

Juliana Braga Rodrigues Loureiro, DSc
Divisão de Metrologia da Dinâmica dos Fluidos
Diretoria de Metrologia Científica e Industrial
Instituto Nacional de Metrologia
Dimci/INMETRO

Conteúdo da aula

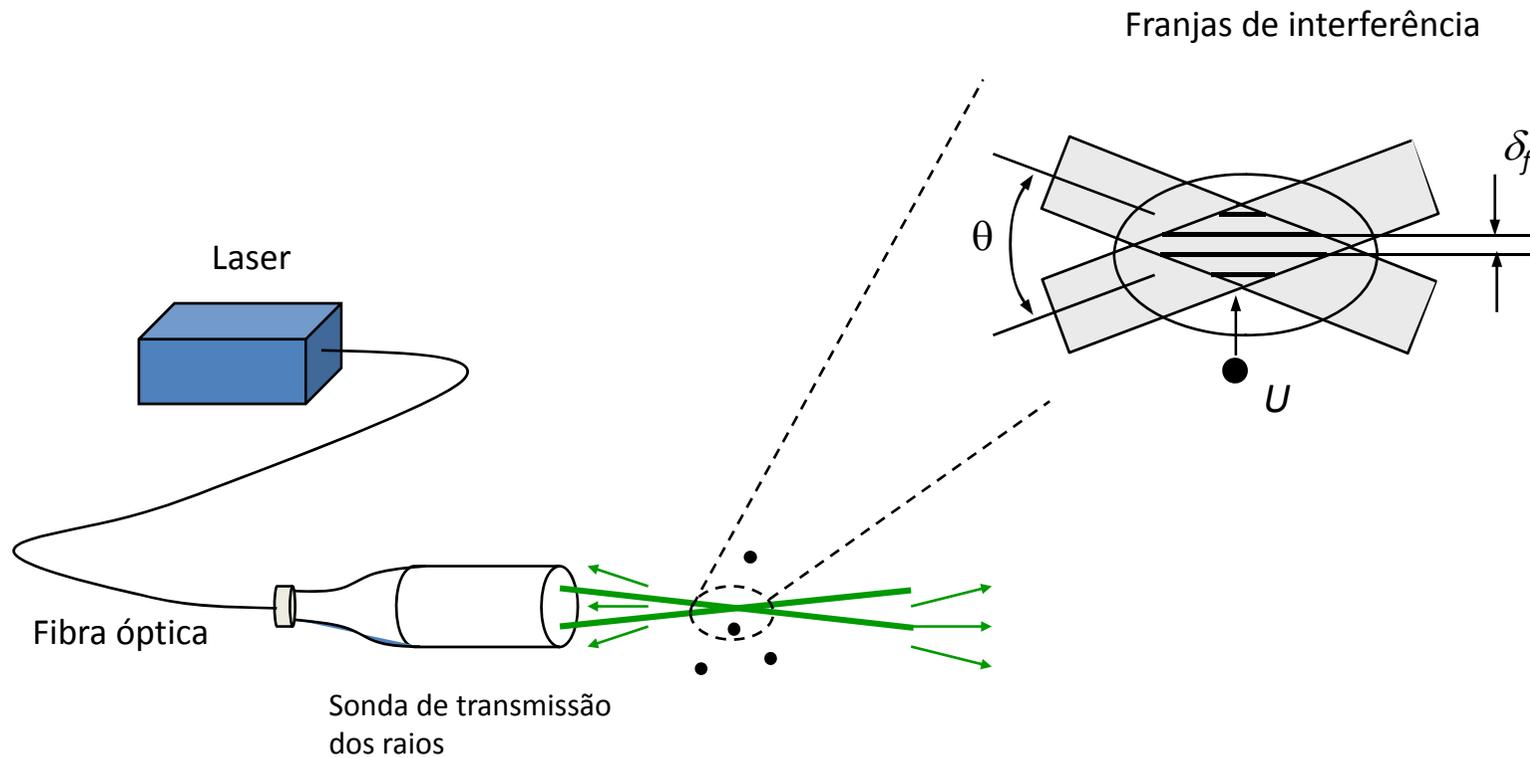
- **Principais tipos de medidores de velocidade e vazão**
- **Técnicas sofisticadas de medição de velocidade:**
 - **Anemometria a fio-quente**
 - **Velocimetria a laser-Doppler**
 - **Velocimetria por imagem de partícula**
- **Técnicas complementares**
- **Análise crítica**

Principais técnicas de medição

- **Medidores locais de velocidade:**
 - **Tubo de Pitot**
 - **Anemômetro térmico**
 - **Anemômetro a laser-Doppler**
 - **Velocimetria por imagem de partículas**
- **Medidores baseados em outros princípios:**
 - Turbina
 - Emissão de vórtice
 - Ultrassônico
 - Rotâmetro
 - Coriolis
 - Elemento laminar
- **Medidores baseados no princípio de queda de pressão:**
 - **Placa de orifício**
 - **Bocais**
 - **Venturi**
- **Medidores de massa ou volume totalizado:**
 - Método gravimétrico
 - Tanques-padrão
 - Deslocamento de pistão
 - Medidores de esfera

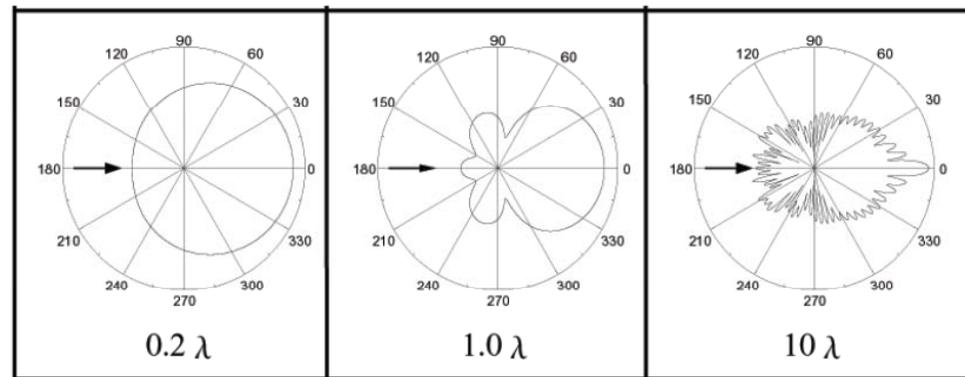
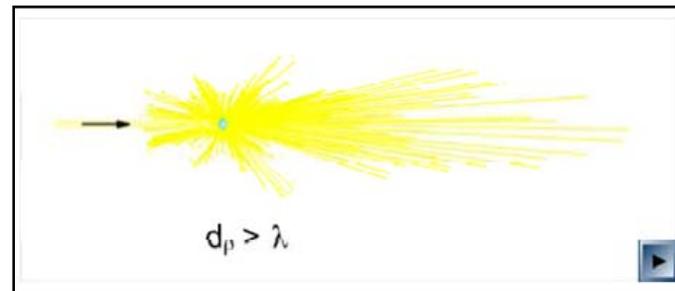
Velocimetria a Laser Doppler

- Técnica concebida por Yeh e Cummings (1964): laser é utilizado com fonte de **luz coerente**.



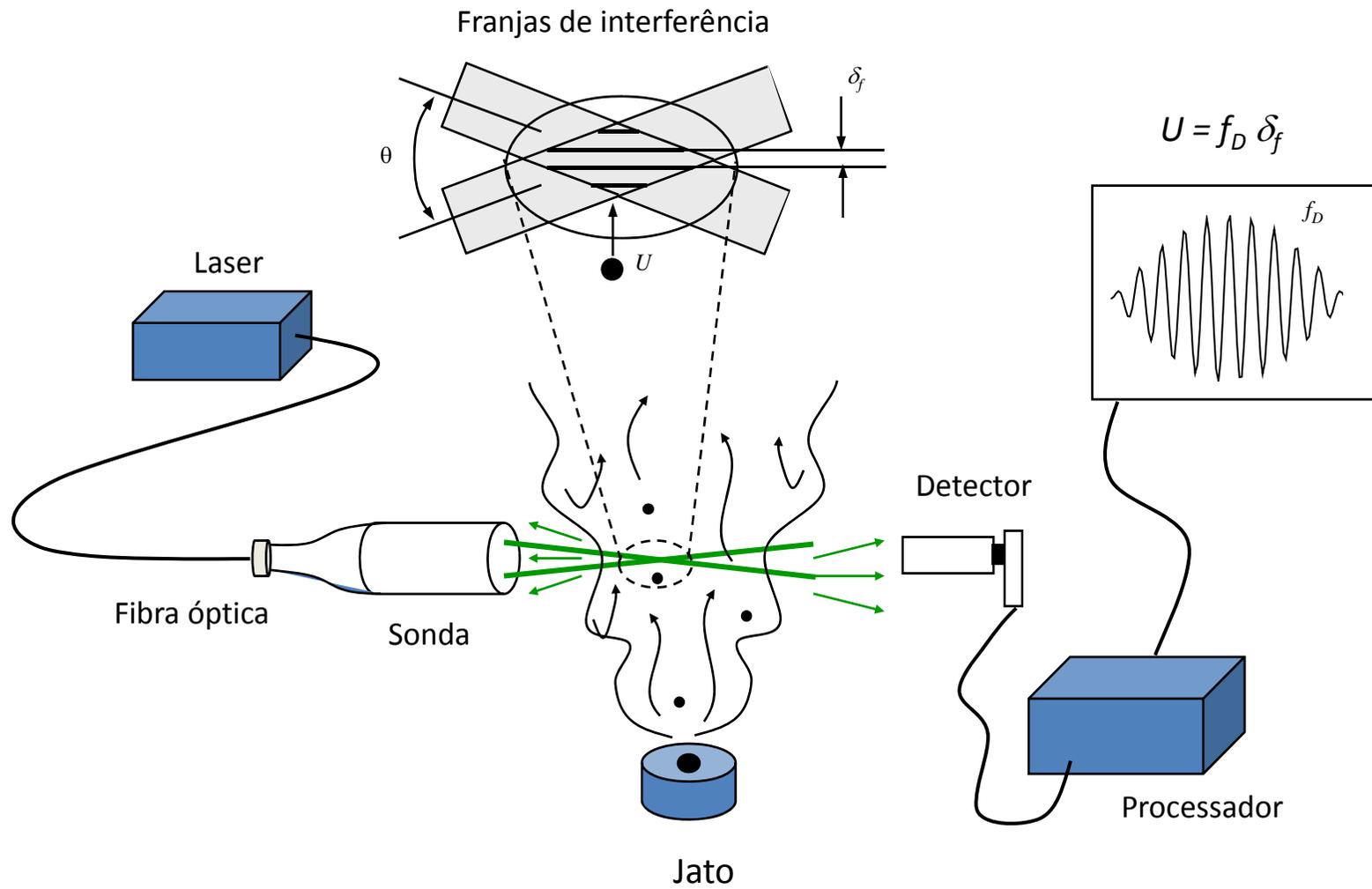
Espalhamento de luz

- Técnica ALD requer a inserção de partículas no escoamento.
- Back-scatter x forward scatter.



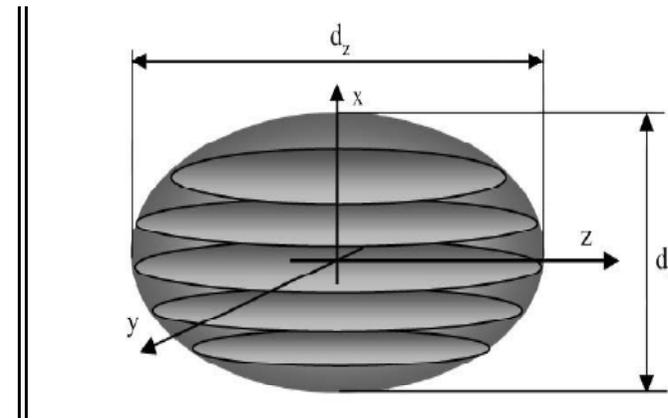
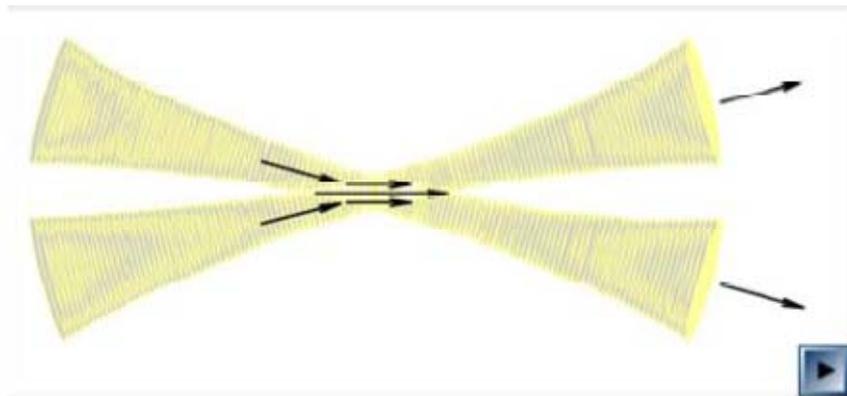
[Video particulas.mp4](#)

Princípio de funcionamento



O modelo de franjas

- O modelo de franjas proposto por Rudd (1969) permite uma visualização simples e intuitiva do fenômeno, sem a necessidade de recorrer à teoria Doppler.
- Os dois feixes de luz coerente se cruzam, dando origem às franjas no volume de interseção em consequência da sucessão de interferências construtivas e destrutivas.

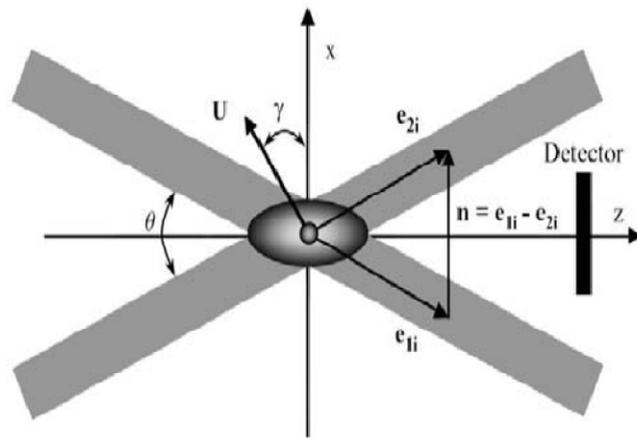


- O tamanho do volume de controle pode ser calculado através do diâmetro da cintura do raio e ângulo de cruzamento entre os raios.

$$d_y = \frac{d_{cr}}{\cos(\theta/2)}, \quad d_x = d_{cr} \quad \text{e} \quad d_z = \frac{d_{cr}}{\sin(\theta/2)}$$

O modelo de franjas

- Configuração de dois raios: Durst et al. (1976)
- Com base no modelo de franjas, é fácil deduzir a frequência vista pelo detector por argumentos puramente geométricos:



$$\delta_f = \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen}(\theta/2)}.$$

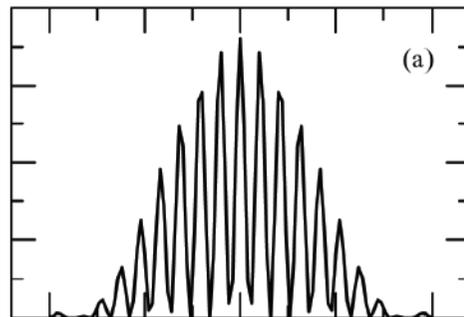
$$N_f = \frac{d_x}{\delta_f}$$

$$f_D = \frac{1}{\lambda} (\mathbf{U} \cos \gamma) \cdot (\mathbf{e}_{1i} - \mathbf{e}_{2i}) = \frac{2 \operatorname{sen}(\theta/2)}{\lambda} U_x$$

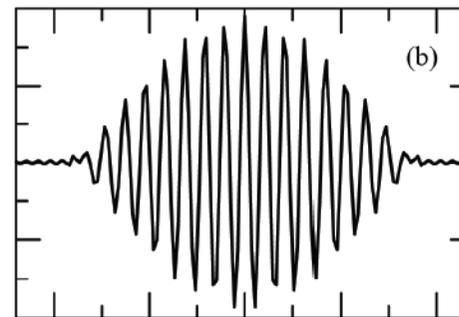
- Esta relação que mostra a **linearidade** entre a componente de velocidade calculada e a frequência Doppler medida pelo receptor.

Geração do sinal

- Detecção da luz refletida:
 - Conversão da **luz** em **sinal elétrico**: fotodetector.
 - O processo de detecção acontece basicamente por meio de uma **transição foto-elétrica**, 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 no detector.
 - Sinal característico da anemometria laser-Doppler:



Sinal completo.

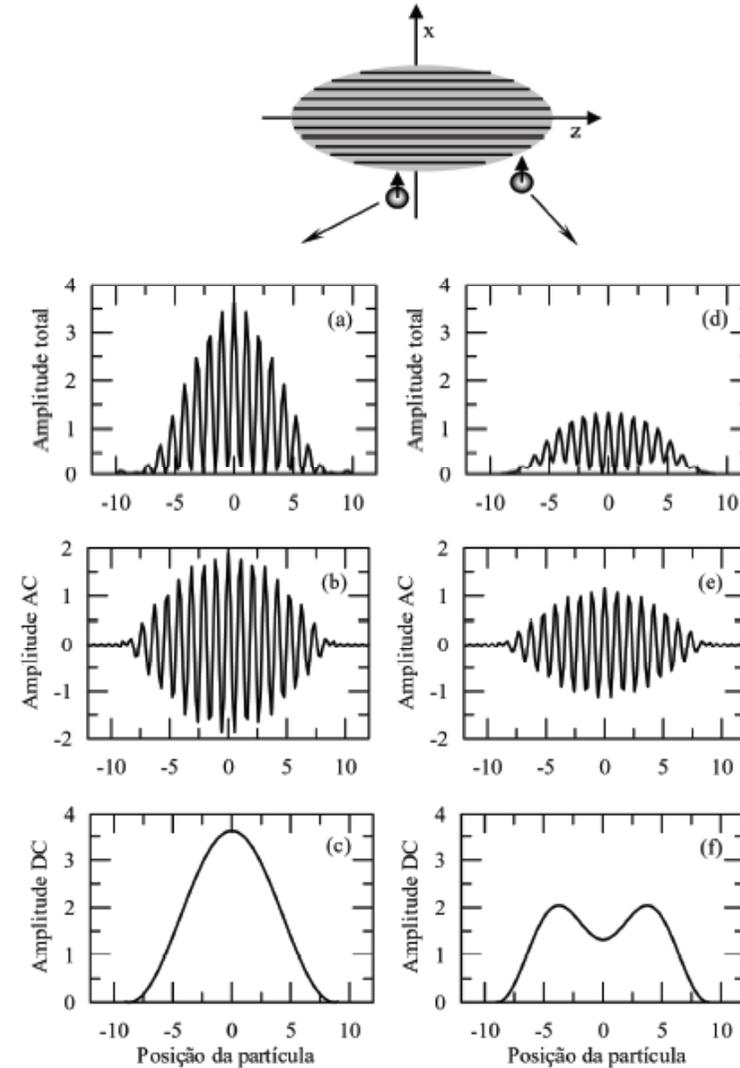


Componente AC do sinal.

Características do sinal da ALD

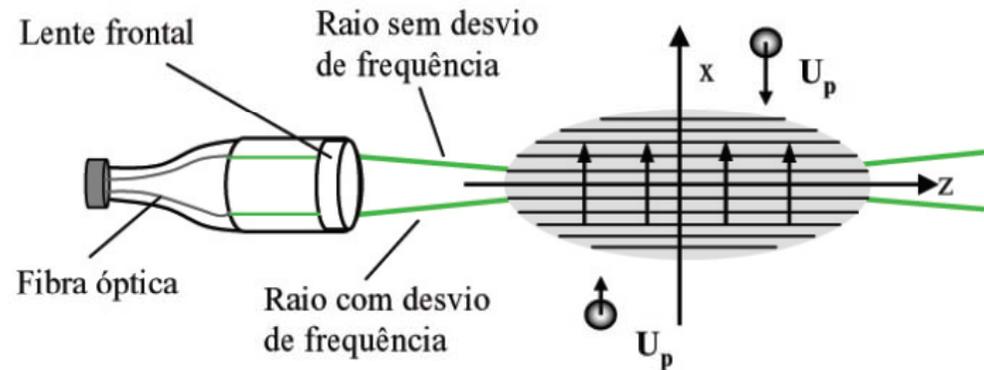
- A variação de baixa frequência : **envelope** ou pedestal; consequência da distribuição Gaussiana dos raios laser.
- A amplitude do envelope varia com o **tamanho** da partícula e com a sua **posição** ao longo do volume de controle.
- O sinal de **alta frequência** contido no interior do envelope está relacionado com a velocidade da partícula, e o número de períodos representa o número de franjas de interferência que a partícula atravessou.

Video Scope.mp4



Resolução do sentido da velocidade

- Célula de Bragg:



- A frequência vista pelo detector se torna:

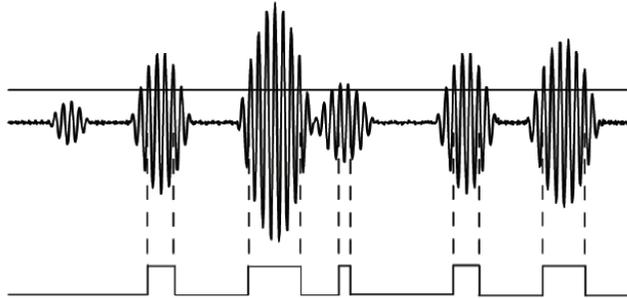
$$f_d = f_{des} + \frac{2 \operatorname{sen}(\theta/2)}{\lambda} |U_x| = f_{des} + f_D.$$

- Logo, a frequência medida corresponde à velocidade relativa entre as partículas com respeito às franjas de interferência.

$$U_x > -\frac{\lambda f_{des}}{2 \operatorname{sen}(\theta/2)}$$

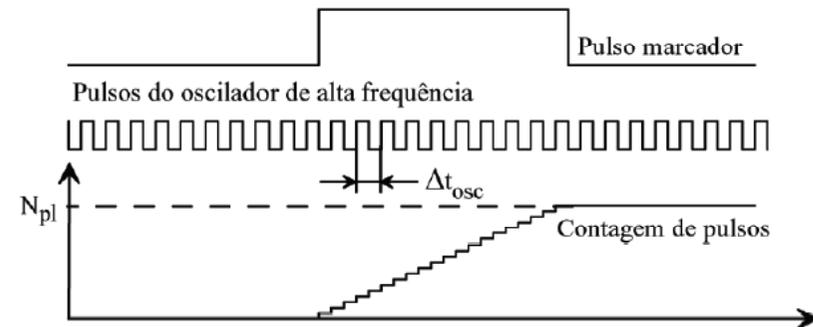
Aquisição e tratamento de dados em ALD

- O sinal elétrico gerado no fotodetector é enviado diretamente a um processador de sinal.
- Instrumentos contadores de períodos:



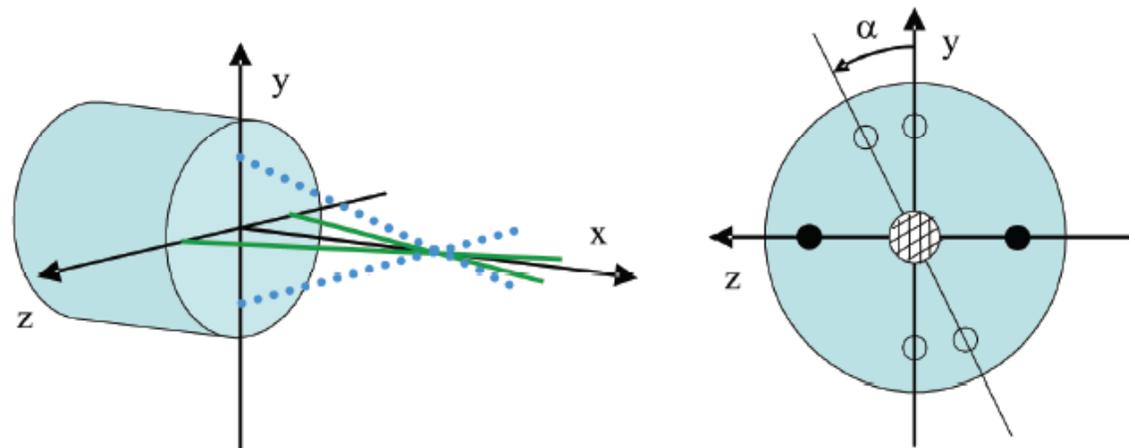
- O tempo de residência da partícula no VC é ditado pela duração de um pulso. O princípio é simples: o pulso marcador é ativado quando o sinal ultrapassa o nível de detecção, e desativado quando o sinal deixa de cruzar este nível por mais de um ciclo. O tempo de permanência é quantificado através da contagem do número de pulsos de um oscilador de alta frequência durante o intervalo do pulso contador.

- A identificação é feita com base na amplitude do sinal, e dois são os principais critérios de validação: o cruzamento seqüencial de diferentes **níveis de amplitude** e a comparação da frequência calculada a partir de diferentes números de períodos.



Sistemas bidimensionais

- Sistemas bidimensionais típicos utilizam duas cores e sonda de quatro raios, normalmente dois feixes **verdes** (514.5 nm) e dois feixes **azuis** (488 nm), arranjados geometricamente a 90º.
- A detecção do sinal de cada componente é feita separadamente através de dois ou três fotodetectores, de acordo com o sistema. É praxe utilizar **filtros** específicos na entrada do fotodetector para os dados comprimentos de onda, com o fim de eliminar reflexões indesejadas e melhorar a taxa sinal-ruído.

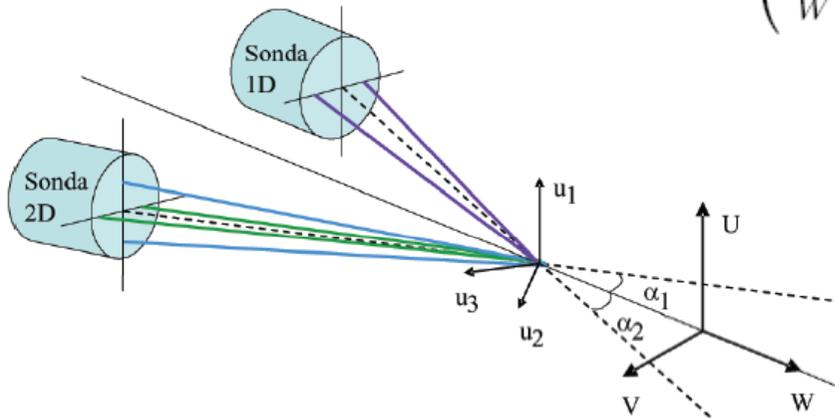


Video Sistema2D.mp4

Sistemas tridimensionais

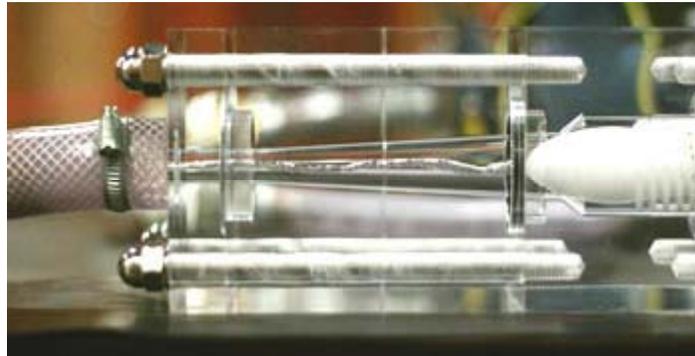
- O destaque positivo dos sistemas tri-dimensionais é permitir a medição simultânea dos componentes do tensor de Reynolds, bem como de correlações de ordem superior, como correlações triplas, por exemplo. A extensão da técnica ALD para a medição de três componentes é direta: a adição de uma segunda sonda unidimensional (de cor diferente) ao sistema bi-dimensional pode ser utilizado para formar um terceiro volume de controle. Nesse caso, é comum utilizar um laser de argônio para gerar seis feixes: dois verdes (514.5 nm), dois azuis (488 nm) e dois violetas (476.5 nm). Um terceiro fotodetector com o filtro para a cor apropriada e um processador adicional totalizam o sistema 3D.

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{c}.$$



Aplicações

- **Válvula ciclônica:**



[Video LDA_Valvula.mp4](#)

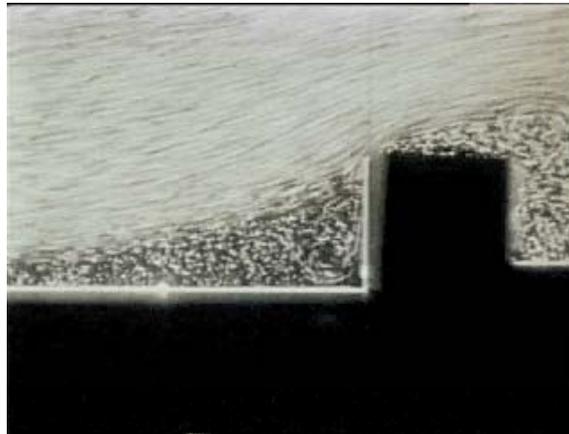
[Video NucleoValvula.mp4](#)

Características principais da ALD

- **Medição não-intrusiva**
 - Não perturba o escoamento
 - Requer somente acesso visual e fluido transparente
- **Não requer calibração**
 - Resposta linear à velocidade do fluido, independente da variação das condições ambiente
- **Resolução do sentido da velocidade**
 - Resolve a direção e o sentido das três componentes de velocidade
- **Alta resolução espacial**
 - Depende essencialmente do tamanho do volume de controle
- **Alta resolução temporal**
 - Relacionada com o tamanho e concentração de partículas em suspensão no fluido.
- **Requer adição de partículas ao fluido.**

Velocimetria por Imagem de Partículas

- O princípio fundamental da velocimetria por imagem de partícula remonta às visualizações de escoamento realizadas por Prandtl no início do século passado.
- Desenvolvimento e disponibilização de lasers e câmeras CCD.
- Desenvolvimento da capacidade de processamento de computadores pessoais.
- Sistemas comerciais começam a ser disponibilizados no final da década de 80.



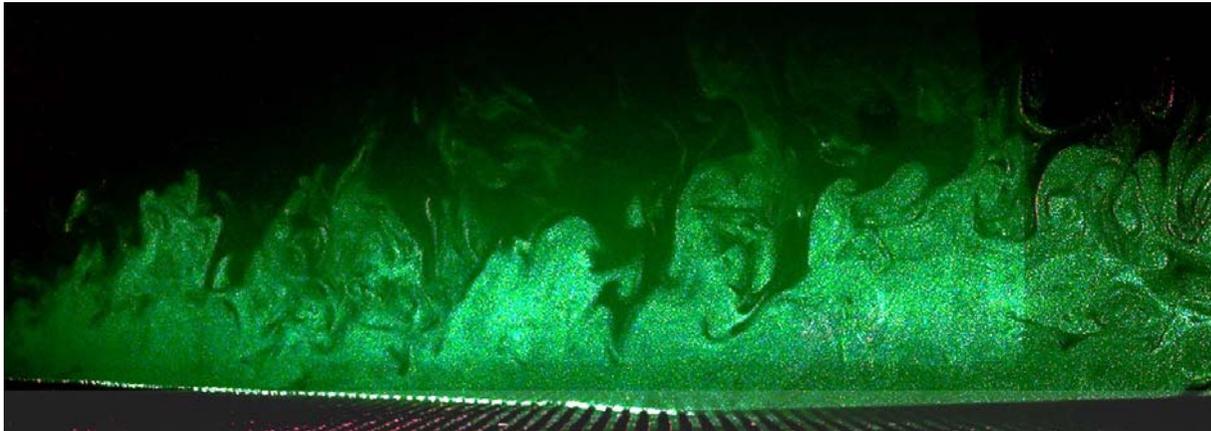
Noções básicas

- Ilustrações:



Noções básicas

- **Necessidade de inserção de partículas.**
- **Fonte de iluminação de alta energia.**
- **Foco, profundidade de campo, tempo de exposição, fator de magnificação.**



Video LaserPIV.mp4

Imagem típica

Tempo t1

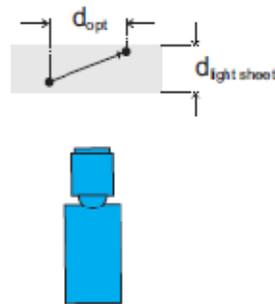


Tempo t2

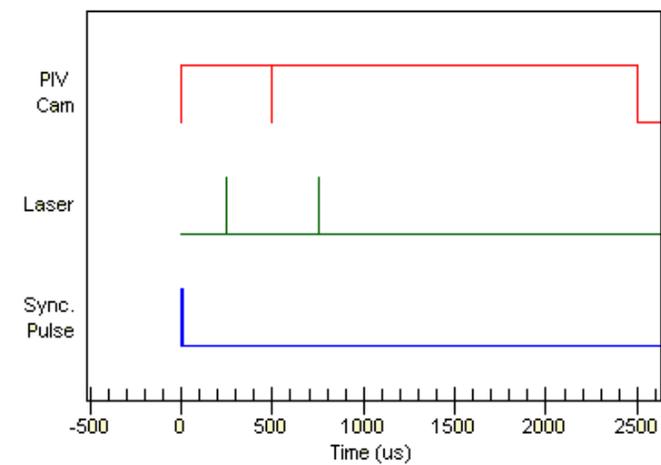
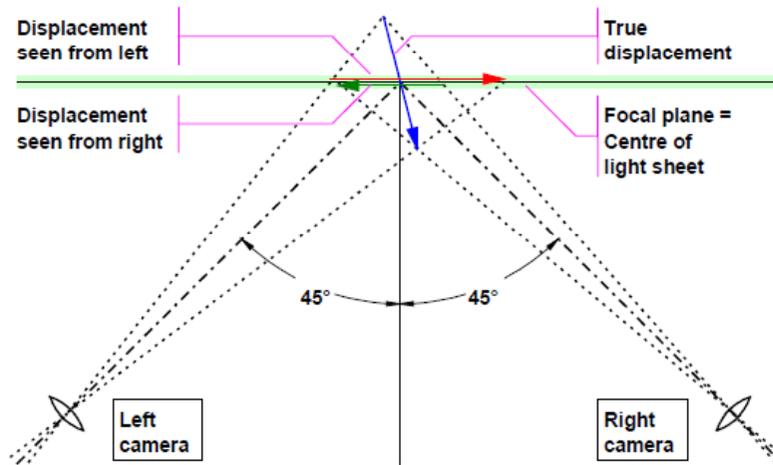
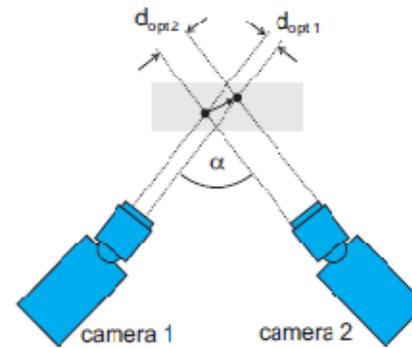


Configurações

- **Sistemas 2D :**

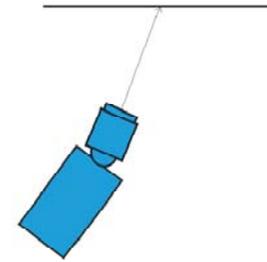
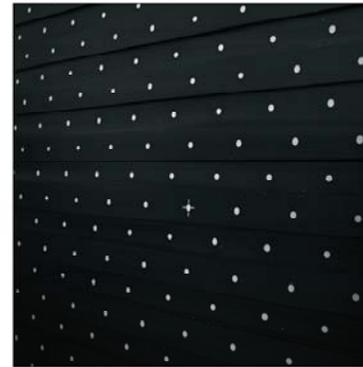
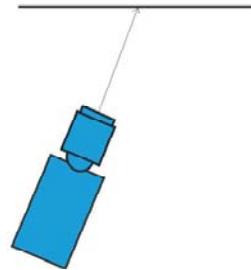
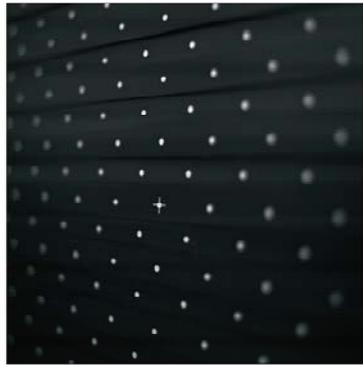


- **Sistemas 3D (estereoscópico):**

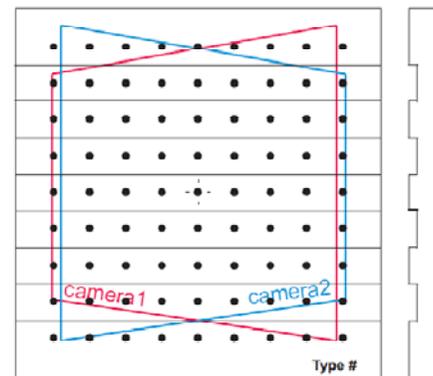
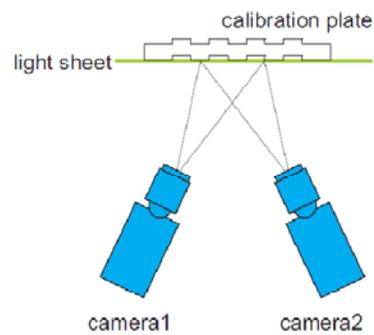


Calibração das imagens

- Ajuste do ângulo Scheimpflug:



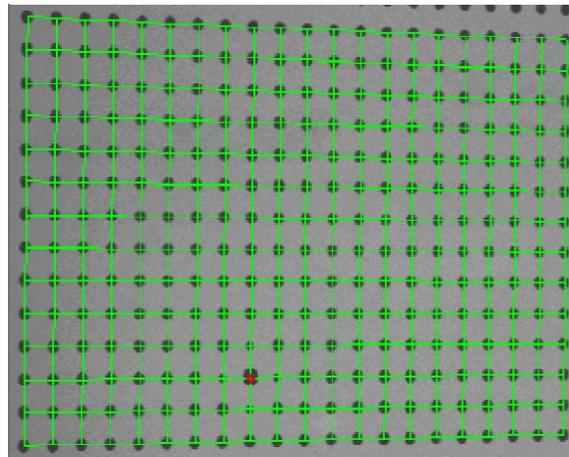
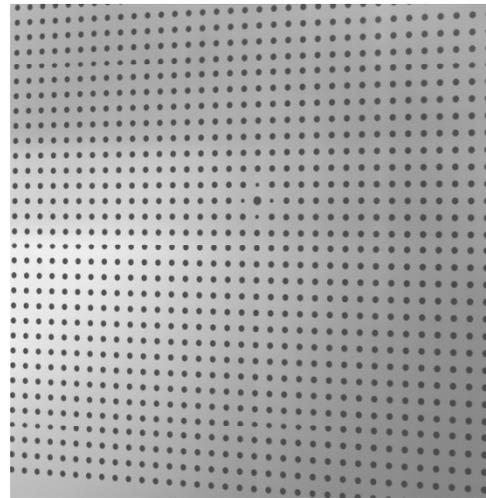
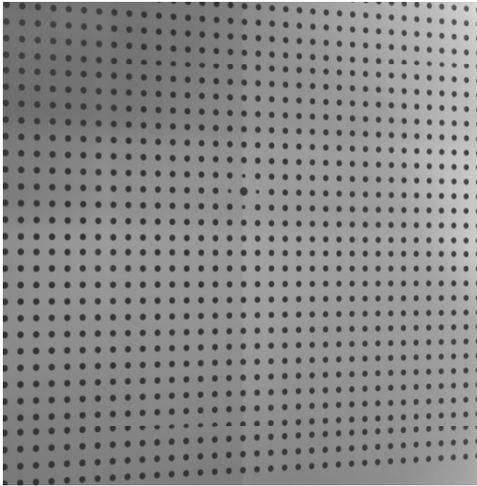
- Imagem do alvo de calibração:



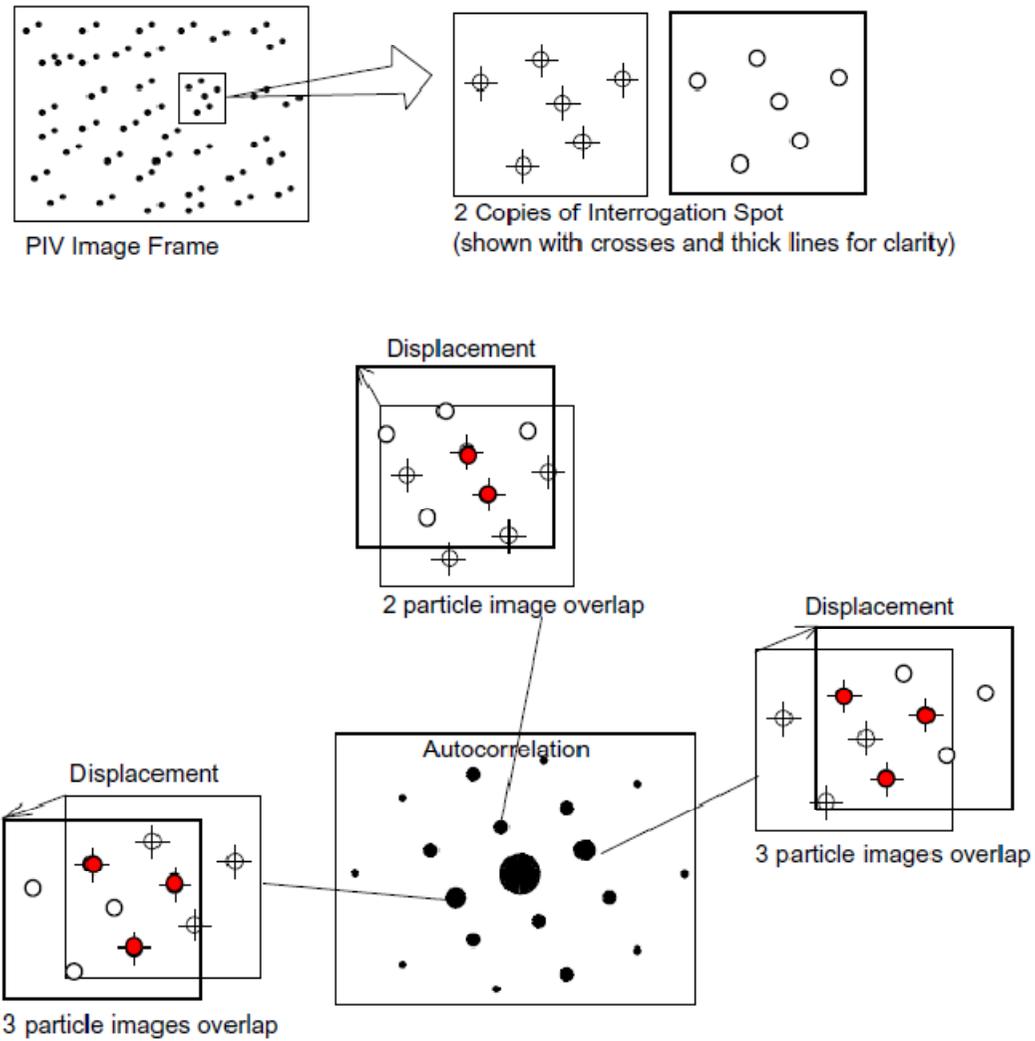
two-level calibration plate

Calibração das imagens

- Matriz de transformação de pixels em milímetros:



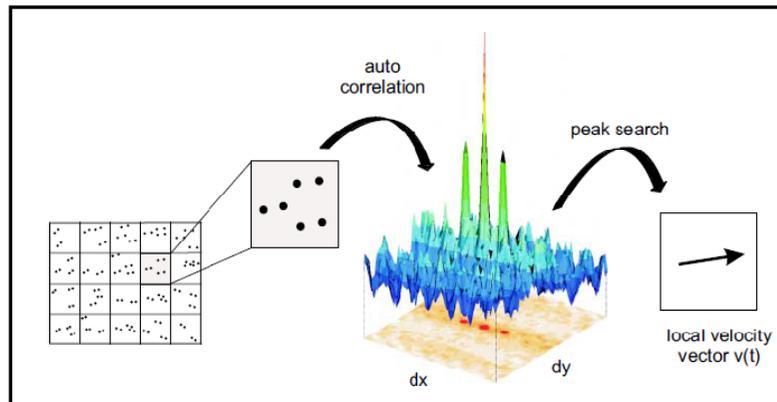
Processamento das imagens



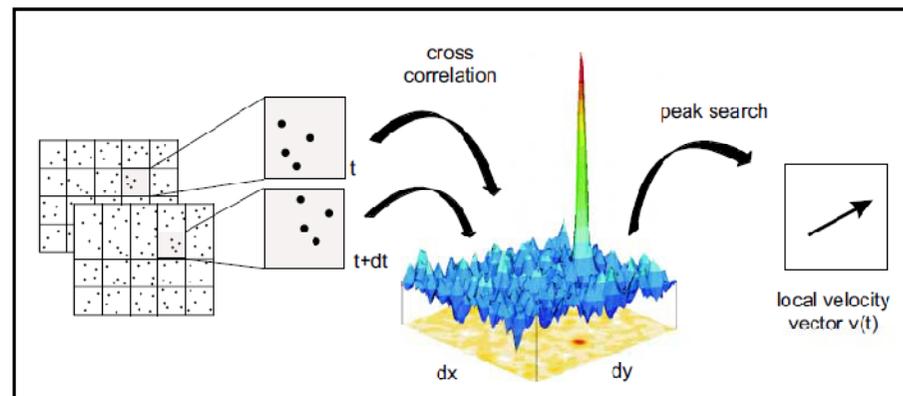
Determinação da velocidade

- Cada imagem é dividida em pequenas seções chamadas **janelas de interrogação**, com tamanhos que variam entre 8 e 64 pixels.
- O **deslocamento médio** obtido a partir de cada janela de interrogação é calculado e dividido pelo intervalo entre pulsos.
- Duas imagens, exposição única: solução do problema de **ambiguidade direcional**.

- **Auto-correlação :**

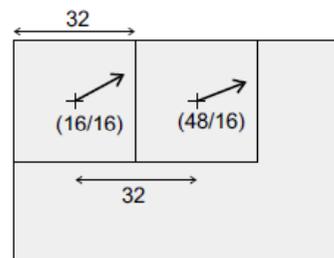
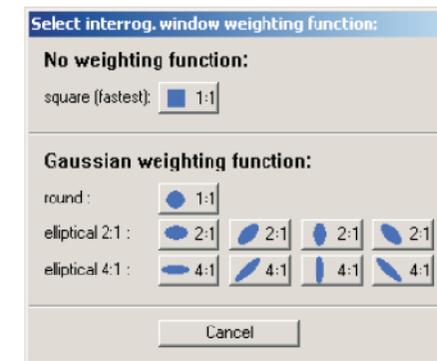
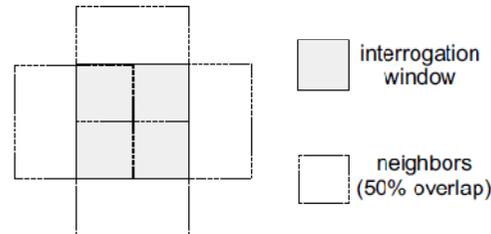
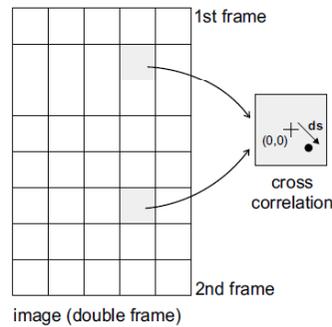


- **Correlação-cruzada :**

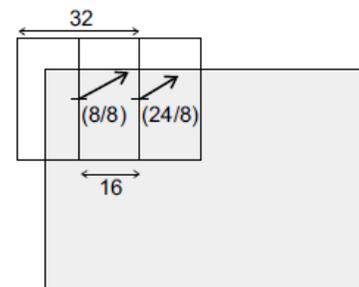


Determinação da velocidade

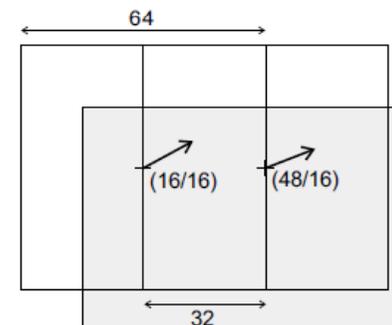
- Tamanho da janela de interrogação
- Funções de suavização
- Correlação adaptativa



Interrogation window: 32x32 pixel
Overlap: 0%
Grid: 32 pixel



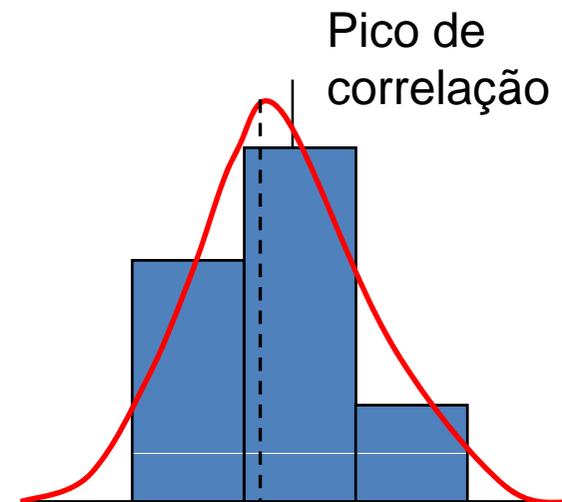
Interrogation window: 32x32 pixel
Overlap: 50%
Grid: 16 pixel



Interrogation window: 64x64 pixel
Overlap: 50%
Grid: 32 pixel

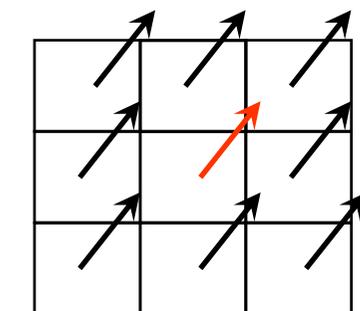
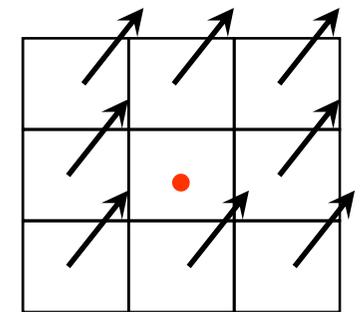
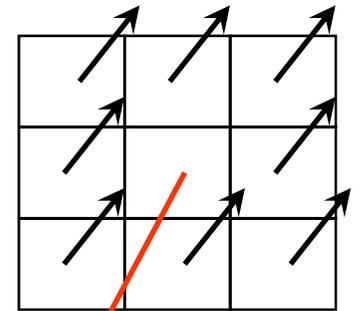
Regras básicas

- Regras gerais para a optimização da correlação cruzada:
 - O deslocamento das partículas entre dois pulsos consecutivos deve ser inferior a $\frac{1}{4}$ do tamanho da janela de interrogação.
 - Para aumentar a resolução espacial, uma sobreposição de cerca de 50% do tamanho das janelas deve ser utilizada.
 - O número de partículas na região de interrogação deve estar entre 10 e 15.
 - A partícula deve ocupar cerca de dois pixels ou mais na imagem adquirida.
- Interpolação sub-pixel:
 - Correlação-cruzada convencional: 1 pixel
 - Interpolação: 0.1 pixel



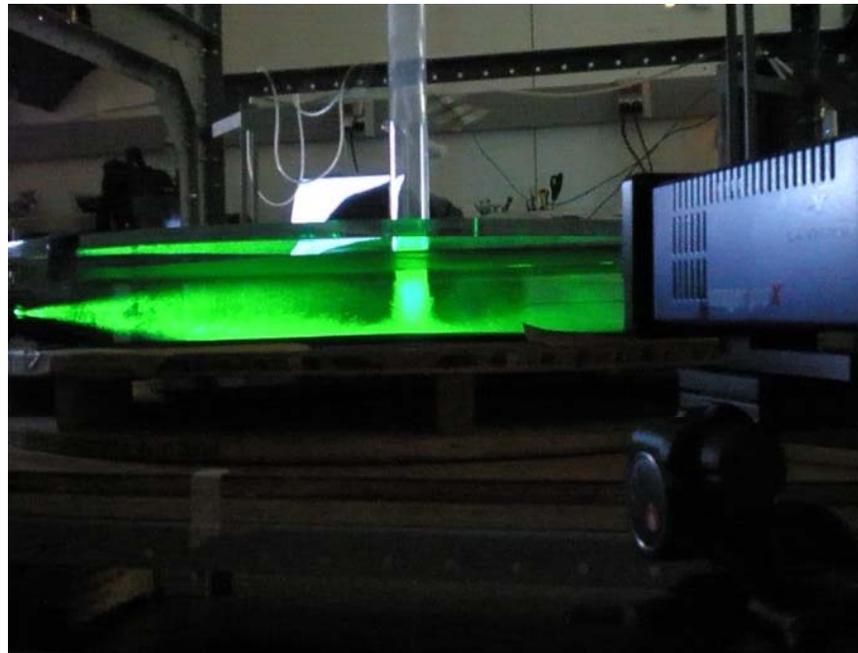
Pós-processamento dos dados

- Vetores espúrios:
 - Podem ser causados por baixa densidade de partícula, sementeira não-uniforme, baixo SNR ou por movimentação tri-dimensional das partículas
- Eliminação dos vetores espúrios:
 - Fixação de uma velocidade máxima.
 - Aplicação de filtros médios locais
 - Através do cálculo da equação da continuidade
- Substituição dos vetores eliminados:
 - Média das velocidades locais.
 - Média ponderada das velocidades locais
 - Interpolação

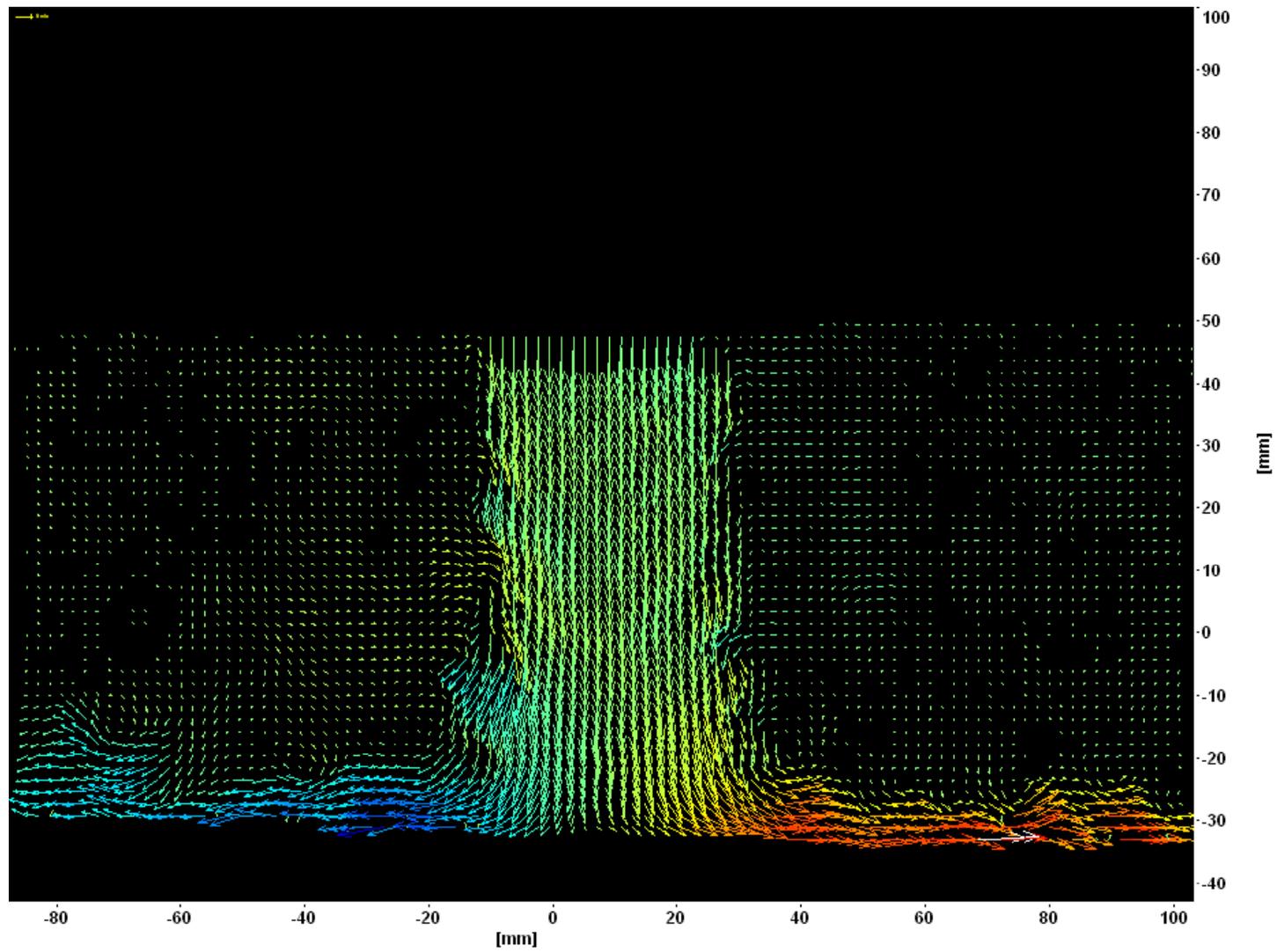


Aplicações

- Jato incidente

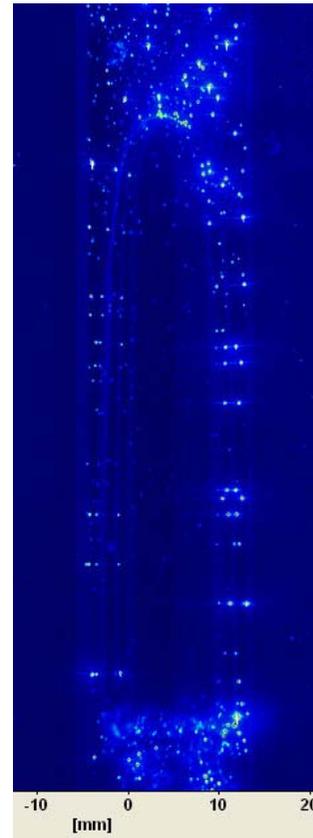
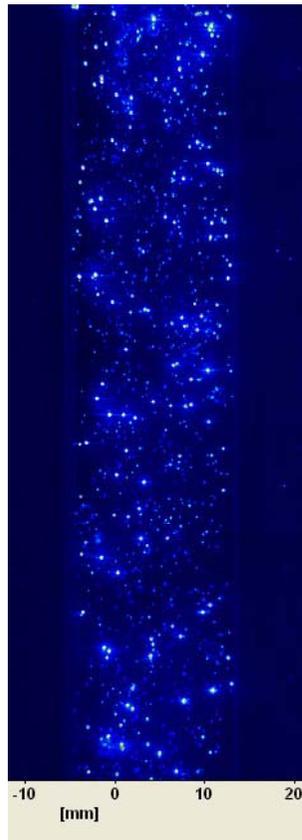


Aplicações



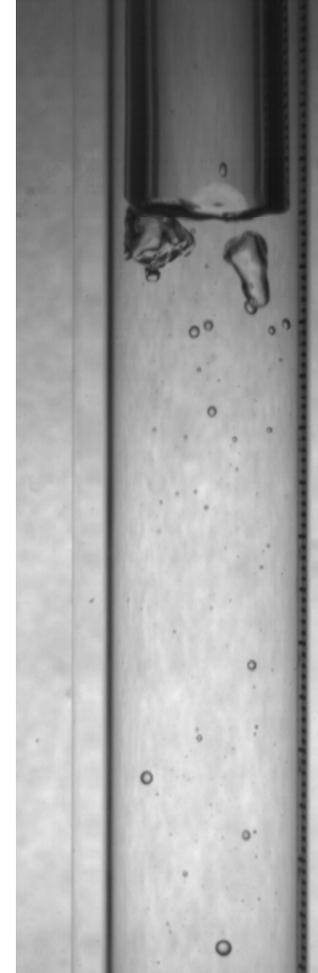
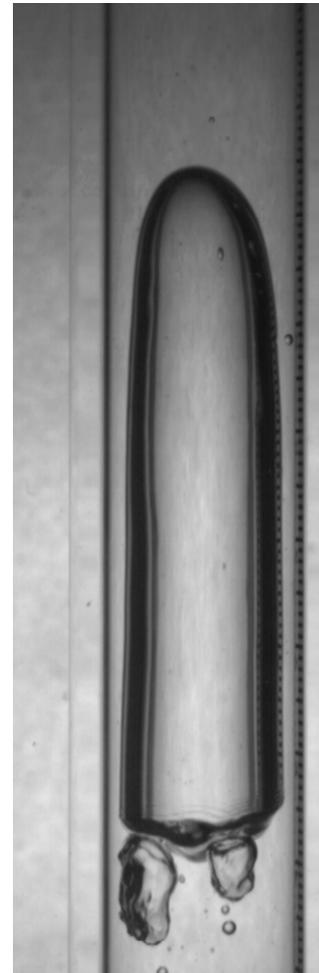
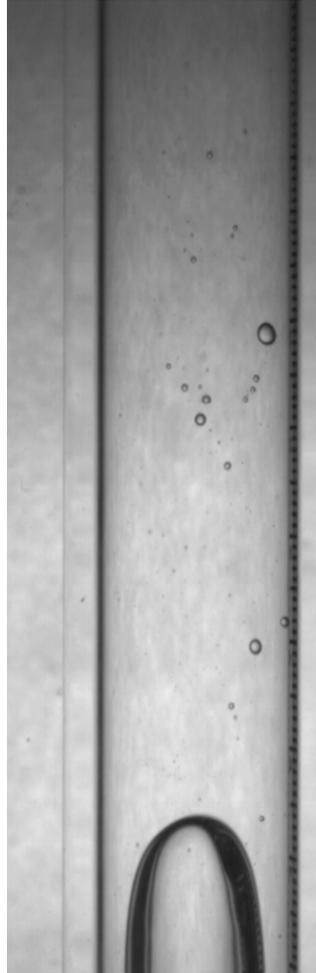
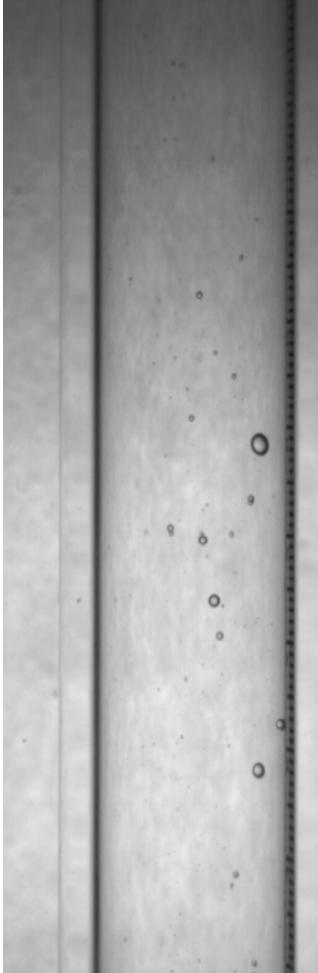
Aplicações

- Escoamento bi-fásico em tubulações verticais:



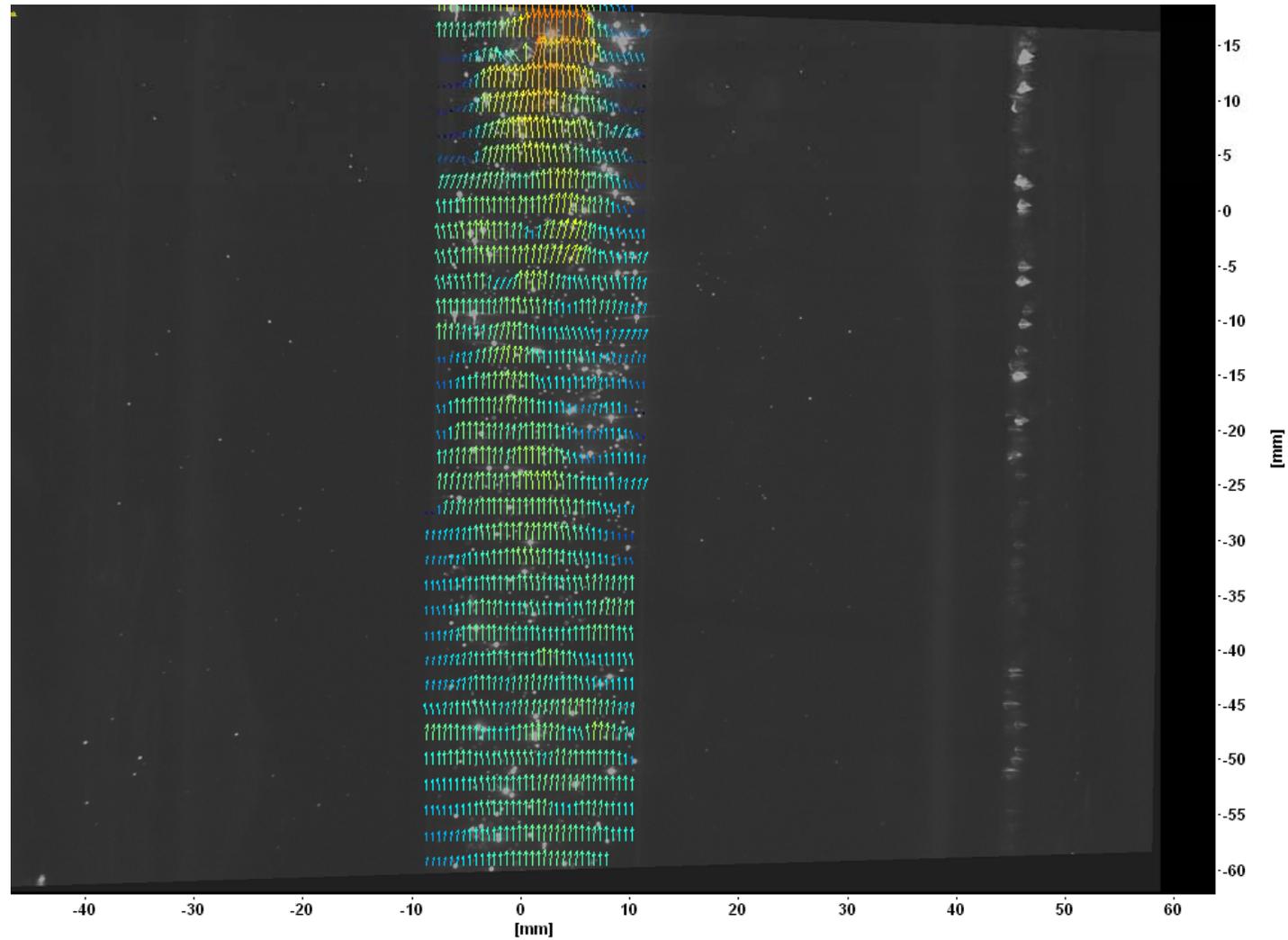
Aplicações

- escoamento bi-fásico em tubulações verticais:



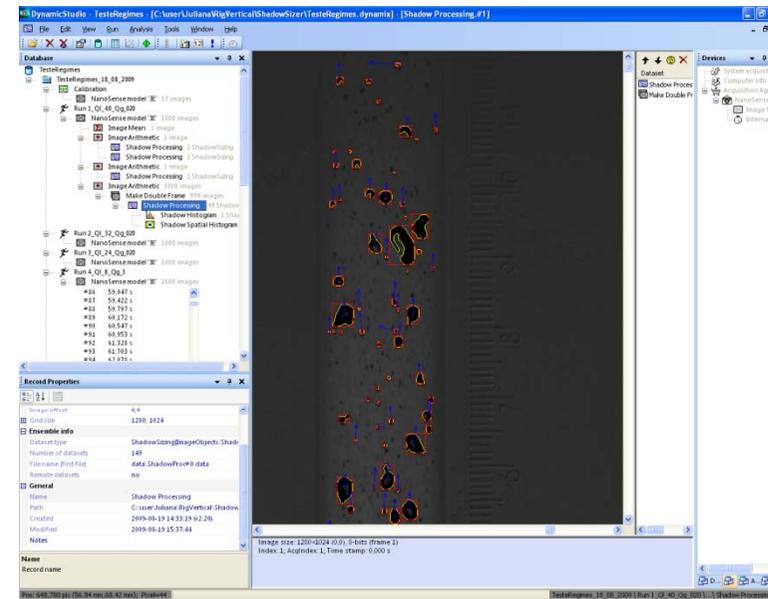
Aplicações

- Escoamento bi-fásico em tubulações verticais:



Outras técnicas experimentais

- Técnicas experimentais dedicadas:
 - Caracterização de escoamento por imagem
 - Sensores eletroresistivos
 - Sensores de fibra-óptica



Comparação entre as técnicas experimentais

Anemometria de fio-quente	Anemometria laser-Doppler	Velocimetria por imagem de partículas
<ul style="list-style-type: none">● Princípio de transferência de calor● Medição pontual● Requer calibração a cada nova medição Não requer calibração● Alta resolução espacial● Alta resolução temporal	<ul style="list-style-type: none">● Princípio recorre ao efeito Doppler● Medição pontual● Não requer calibração● Boa resolução espacial● Boa resolução temporal	<ul style="list-style-type: none">● Correlação entre dois quadros de imagens● Medição do campo de escoamento● Requer calibração● Boa resolução espacial● Baixa resolução temporal

Demanda industrial

- Medição de petróleo:
 - Em tanques (volume)
 - Em linha (vazão e volume)
- Medição de gás natural:
 - Em linha
- Requisitos da medição em tanques:
 - Arqueamento (a cada 10 anos)
 - Tabela volumétrica
 - Medição de temperatura => Dilatação térmica
 - Teor de água e sedimentos
 - Todas as válvulas de entrada e saída dos tanques devem ser seladas (lacre)
 - Trena manual ou sistemas automáticos de medição de nível
- Requisitos da medição em linha:
 - Intervalo de calibração:
 - Medição Fiscal < 60 dias
 - Medição para Apropriação < 90 dias
 - Dilatação térmica
 - Compressibilidade do líquido
 - Cálculos de acordo com normas especificadas

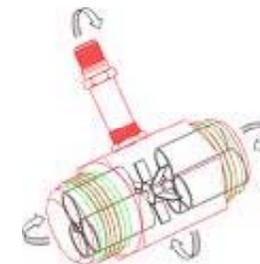
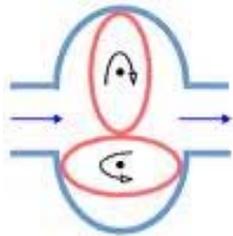
Medição em linha

Medidores aprovados pela ANP:

- Medidores do tipo deslocamento positivo (volumétrico)
- Medidores do tipo turbina
- Medidores mássicos (coriolis), com indicação de volume

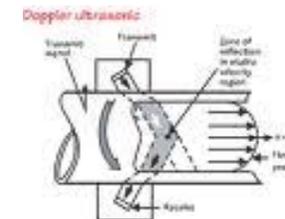
Principais fontes de problemas:

- Montagem inadequada
- Escoamento pulsátil



Medição em linha

Outros tipos de medidores podem ser utilizados, desde que previamente autorizados pela ANP, como é o caso do medidor ultra-sônico.



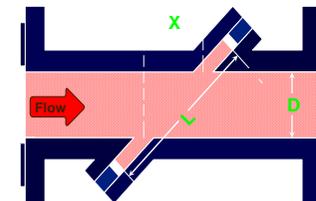
Problemas:

- Presença de água
 - Tratamento do óleo ($BSW \leq 1\%$)
 - Determinação do BSW (basic sediment and water)

Medição de gás natural

Medidores aceitos pela ANP:

- Placa de orifício
- Turbina
- Ultra-sônico



Calibração:

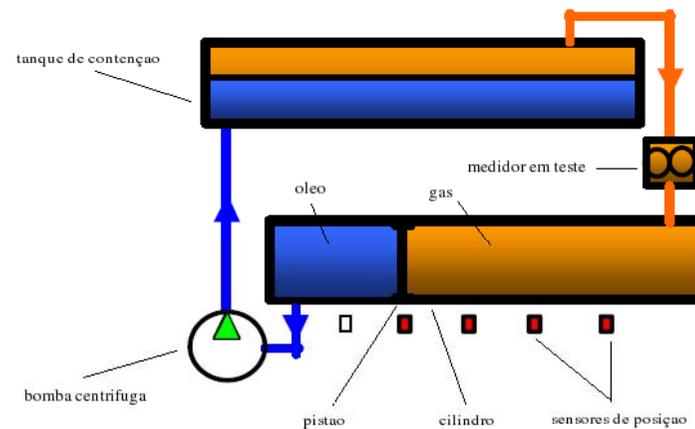
- Placa de orifício:
 - Transmissor: Calibração anual
 - Placa: Inspeção anual
 - Trecho reto: Inspeção tri-anual

Calibração e incertezas

Sistemas de medição:

Óleo		Gás natural	
Fiscal	$\pm 0,3 \%$	Fiscal	$\pm 1,5 \%$
Apropriação	$\pm 1,0 \%$	Apropriação	$\pm 2,0 \%$
Outros	?	Outros	$\pm 3,0 \%$

- Medidor Master: 3 testes sucessivos com Δ entre os fatores de calibração $< 0,05\%$.
- Prover: 5 de 6 testes sucessivos com Δ entre os fatores de calibração $< 0,05\%$.
- Tanque de Calibração: 2 testes sucessivos com $\Delta < 0,05\%$ do volume do tanque.



Desafios

- Medição de petróleo com alto BSW
- Amostragem de petróleo com alto BSW
- Medição de óleos pesados
- Calibração de medidores com óleos pesados
- Verificação de medidores de gás de queimadores (flares)
- Verificação de medidores multifásicos

Conclusão

- **Foi apresentada uma visão geral sobre as principais técnicas que constituem o atual estado da arte na experimentação em Mecânica dos Fluidos.**
- **Todas as técnicas experimentais são necessariamente complementares. Uma investigação completa e refinada do escoamento demanda o uso de diferentes instrumentos, apropriados para o tipo de problema que se deseja estudar.**
- **O rigor e a atenção aos menores detalhes na execução dos aparatos experimentais e na condução das medidas são elementos fundamentais, sem os quais nenhuma técnica experimental pode ser utilizada com confiança.**
- **A análise do resultado medido requer uma avaliação criteriosa do seu método de funcionamento e das condições operacionais.**

Agradecimentos

