

Escoamentos multifásicos são encontrados em inúmeros processos industriais, como plantas de geração de energia, sistemas de combustão e produção de petróleo. No caso da indústria de petróleo, o escoamento em mais de uma fase ocorre tanto nos poços quanto nas linhas que interligam o poço à plataforma, sendo comum o transporte da mistura por longas distâncias antes que as fases sejam separadas, o que enfatiza a importância do conhecimento das propriedades relacionadas a estes escoamentos.

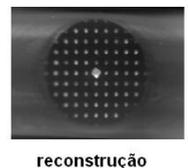
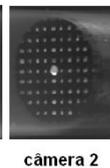
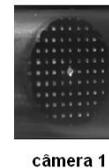
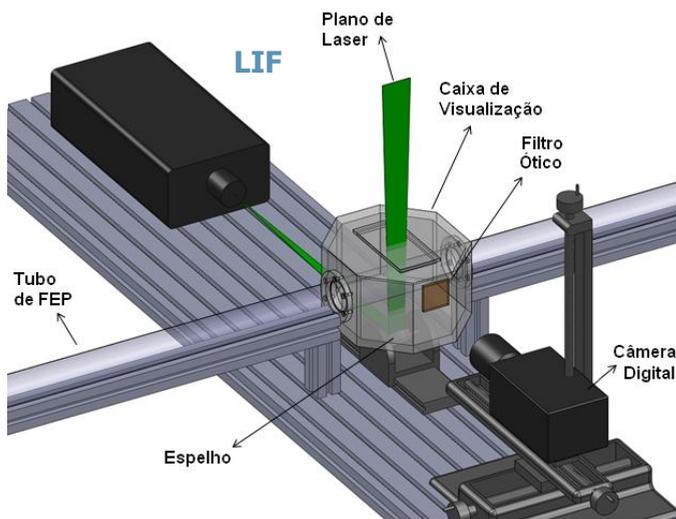


Visualização de Bolha de Taylor com técnica de sombra pulsada

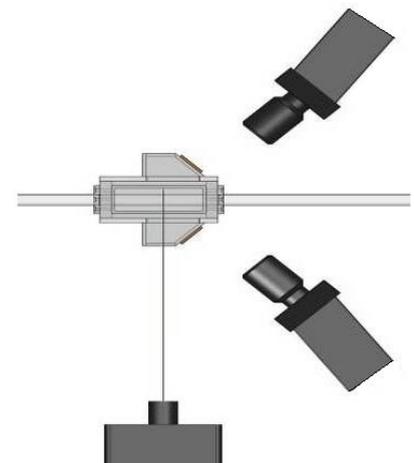
Diferentes arranjos geométricos das interfaces entre os fluidos podem ocorrer dependendo das condições de operação (vazão, pressão, temperatura), da geometria da tubulação (dimensão, inclinação) e das propriedades dos fluidos (densidade, viscosidade e tensão interfacial). A combinação destas características determina o regime de escoamento, que pode ser anular, ondulado, estratificado, ou em golfadas.

O Laboratório de Engenharia de Fluidos vem desenvolvendo técnicas óticas não-intrusivas para a visualização qualitativa e quantitativa de escoamentos bifásicos, com o objetivo de estudar os diferentes regimes e fenômenos observados em situações reais. Técnicas de fluorescência induzida por laser (LIF), velocimetria por imagem de partículas (PIV), iluminação pulsada de fundo (PST), ajuste de índice de refração e processamento digital de imagens têm sido combinadas para produzir resultados inovadores nesta área de pesquisa ([veja mais](#) sobre as técnicas de medição utilizadas no LEF). Alguns dos tópicos abordados no LEF são brevemente descritos a seguir.

## • Estudo da dinâmica de escoamentos bifásicos nos diferentes regimes

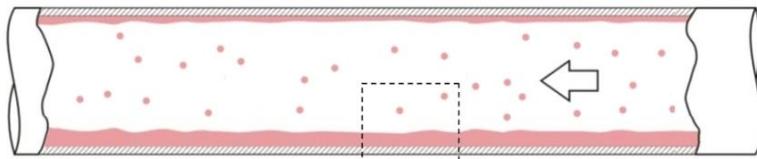


## Regime Anular

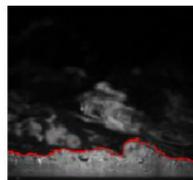


A bancada experimental permite visualizações e medições longitudinais (acima) e transversais (à direita). As medições transversais, isto é, da seção reta do tubo como se vista de frente, são possíveis devido ao uso da técnica estereoscópica de aquisição de imagens. Duas câmeras são utilizadas em ângulo com o eixo do escoamento, montadas na condição Scheimpflug, e um cuidadoso procedimento de calibração é realizado com alvos especiais.

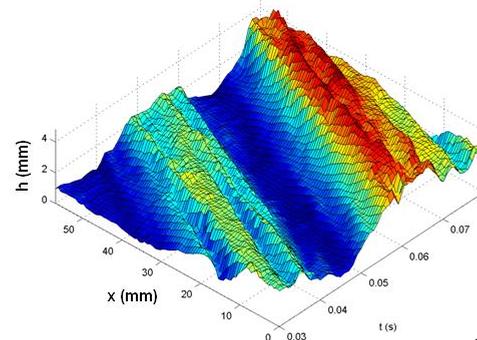
# Escoamentos Bifásicos



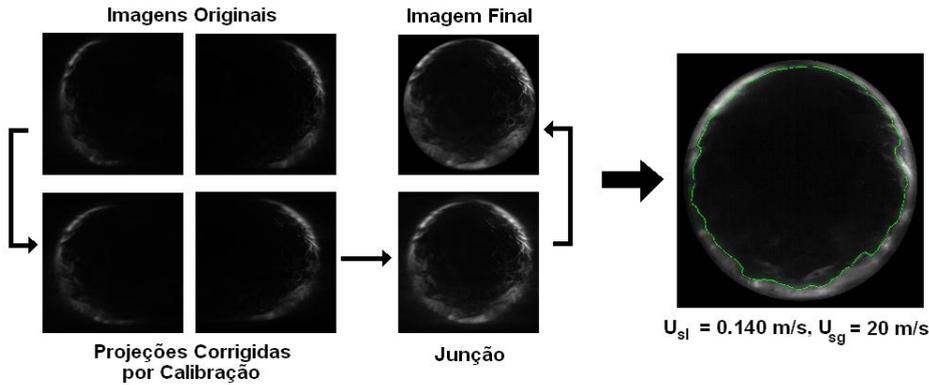
Medição de espessura e evolução temporal de filme líquido a partir da aquisição longitudinal de imagens



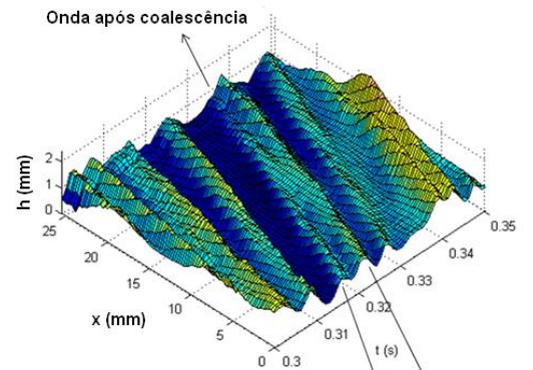
Espessura do Filme



Mapas espaço-tempo da espessura de filme líquido  $h(x,t)$  na parede inferior do tubo.  $x$  é a coordenada longitudinal.

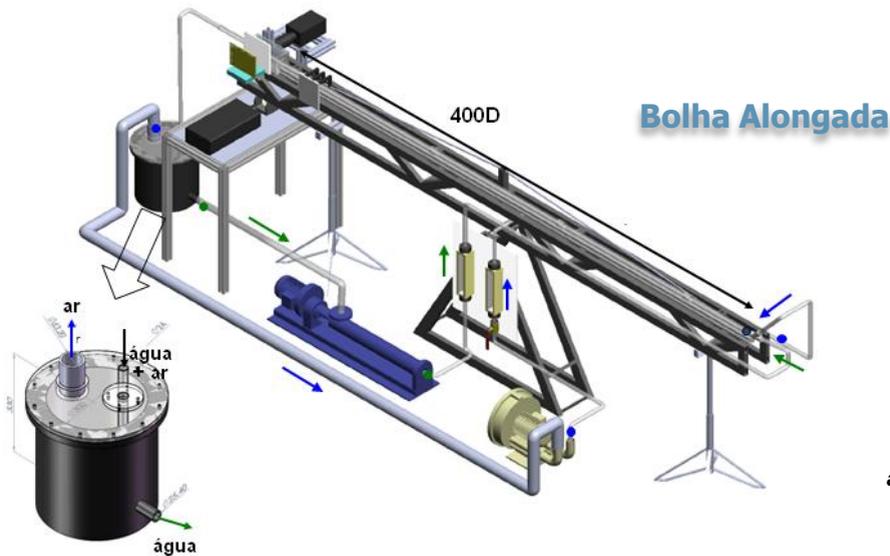


Medição de espessura e evolução temporal de filme líquido a partir da aquisição transversal (estereoscópica) de imagens.

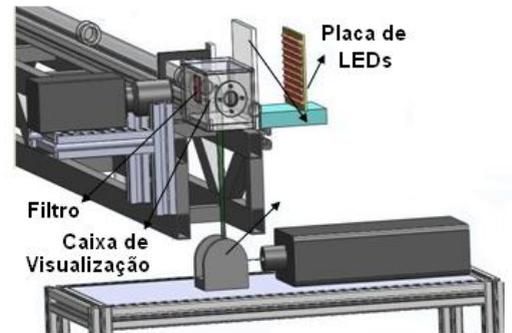


Ondas individuais de pequena amplitude

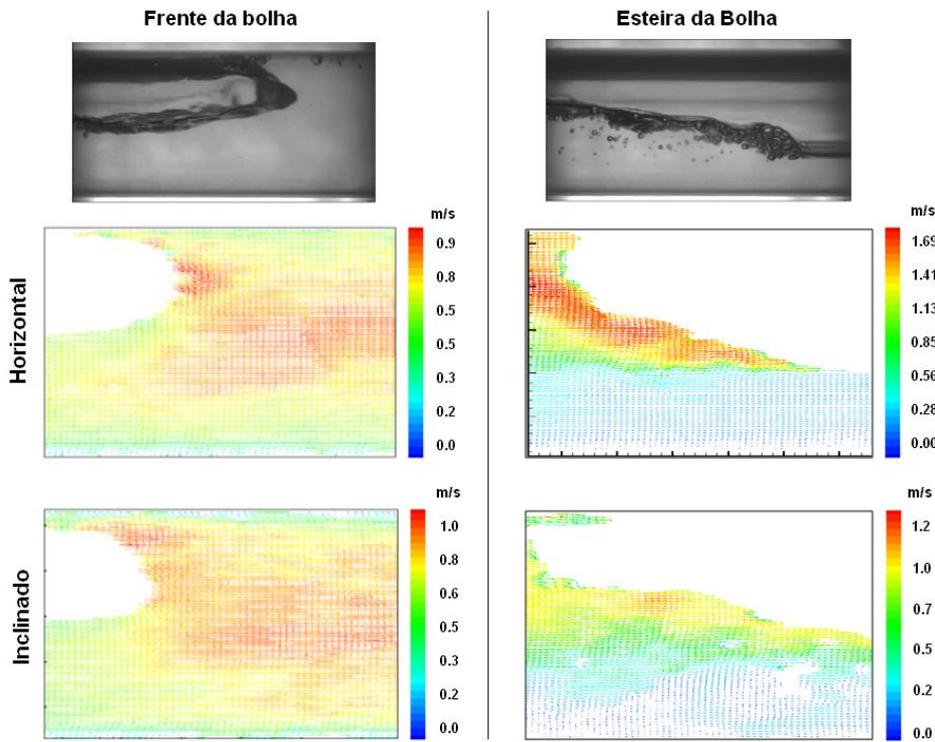
# Escoamentos Bifásicos



PST + LIF + PIV

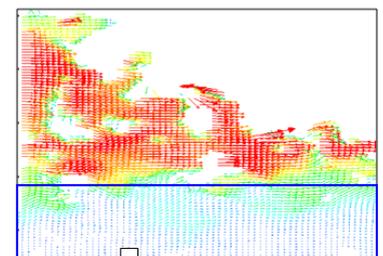


Nesta seção de testes, que pode ser inclinada em diversos ângulos, utiliza-se uma combinação das técnicas de sombra pulsada (iluminação com painel de LED's por trás), fluorescência, e velocimetria com partículas. Com isso, as imagens adquiridas possuem boa definição de interface e o campo de velocidade na parte líquida pode ser calculado.

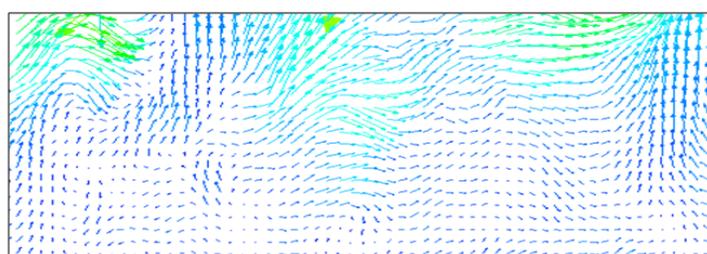


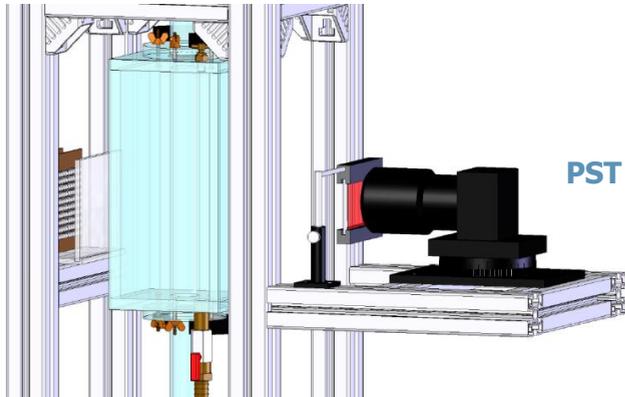
À esquerda: visualização e campos de velocidade na frente e na esteira de bolhas, para tubo horizontal e inclinado e velocidades superficiais líquido/gás  $U_{sl} = 3 \text{ m/s}$  e  $U_{sg} = 5 \text{ m/s}$ .

Abaixo: Processamento de imagem e zoom do campo vetorial na parte inferior do escoamento na esteira.



Recirculação na esteira da bolha

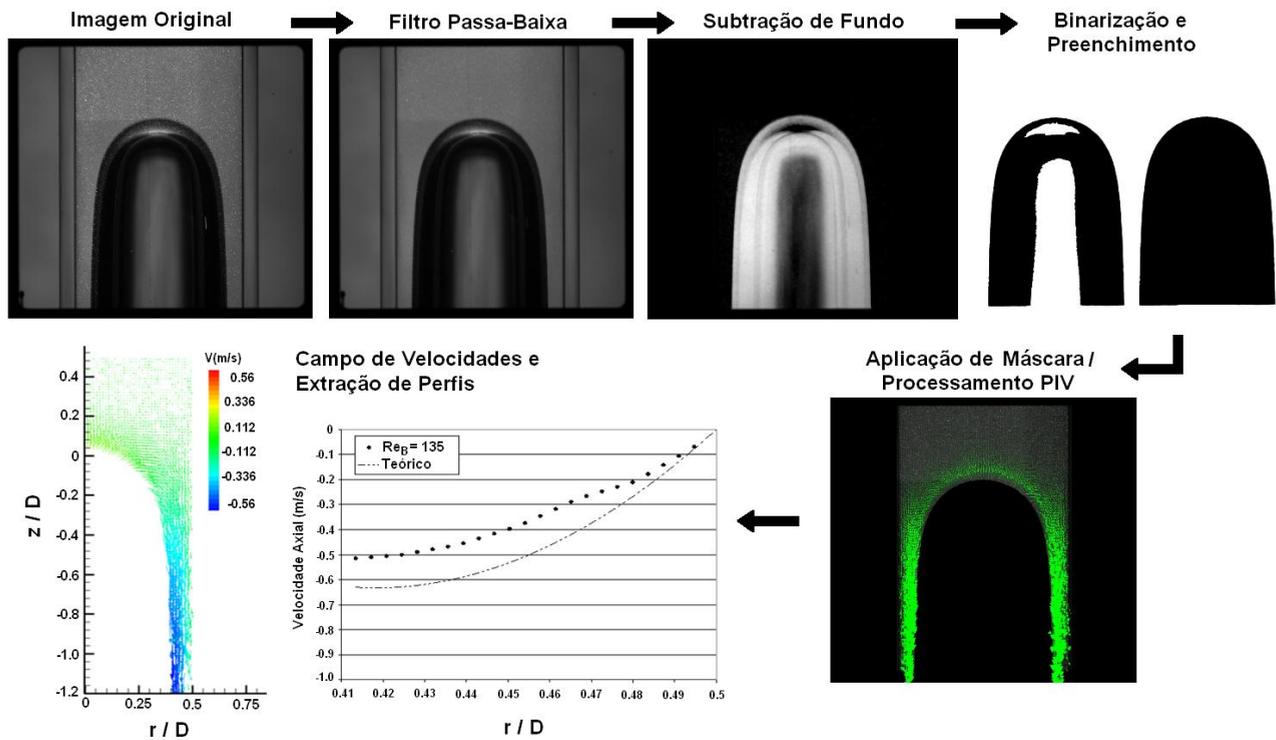




PST + LIF + PIV

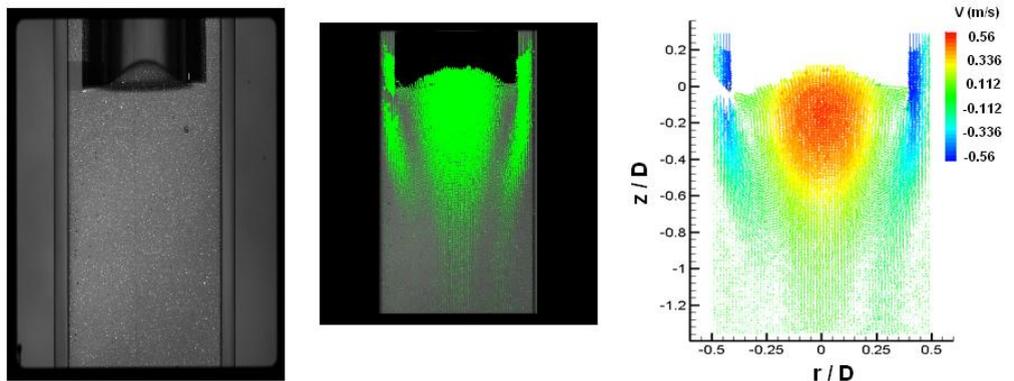
## Bolha de Taylor

Estes experimentos visam estudar o comportamento dinâmico do escoamento gerado ao redor de uma bolha de ar ascendente passando por fluido (água) inicialmente estagnado (Bolha de Taylor). Neste caso é utilizada uma combinação das técnicas de sombra pulsada (PST), fluorescência (LIF) e velocimetria por imagem de partículas (PIV).



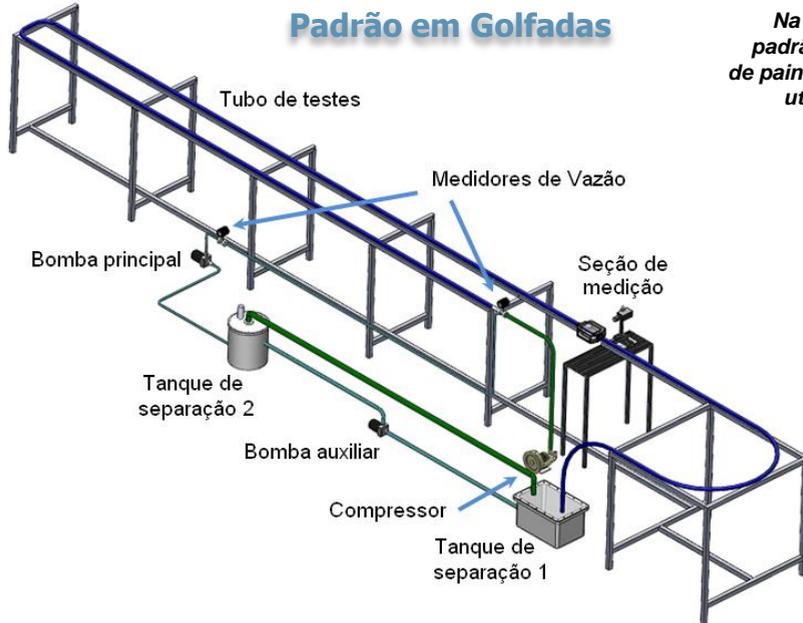
Acima: Etapas de aquisição, processamento e pós-processamento de imagens (apenas uma das imagens do par registrado para PIV é apresentada) da frente de uma Bolha de Taylor.

À direita: aquisição de imagens da esteira de uma bolha: imagem de partículas, campo de velocidade, e campo de velocidade pós-processado colorido por magnitude.

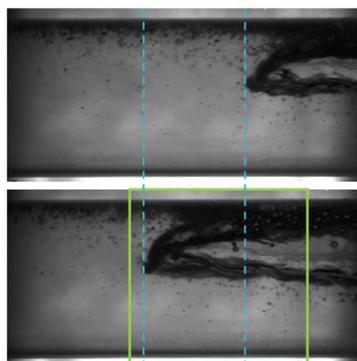
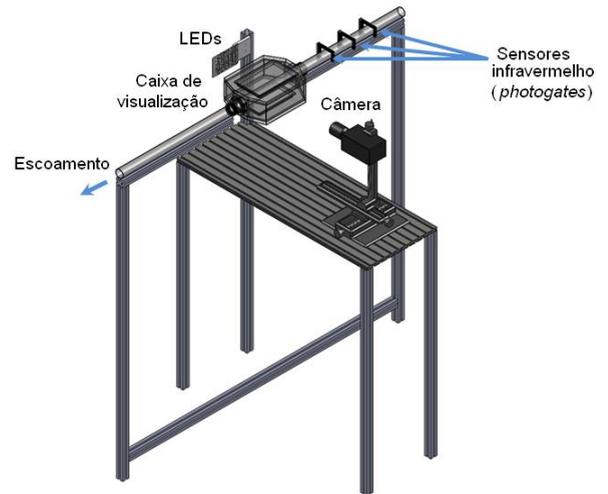


# Escoamentos Bifásicos

## Padrão em Golfadas



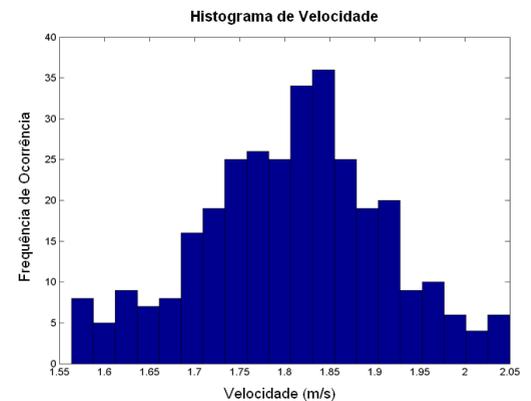
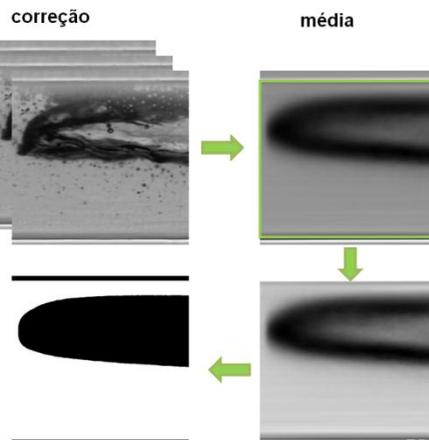
Na bancada experimental para medição de escoamentos bifásicos em padrão de golfadas (slugs), as imagens são registradas com iluminação de painel de LEDs ao fundo (técnica PST). Feixes de luz infravermelha são utilizados para gerar triggers que acionam a captura de imagens nos instantes desejados de passagem de slugs.



$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Escolha manual da frente do slug nas duas imagens para cálculo de velocidade

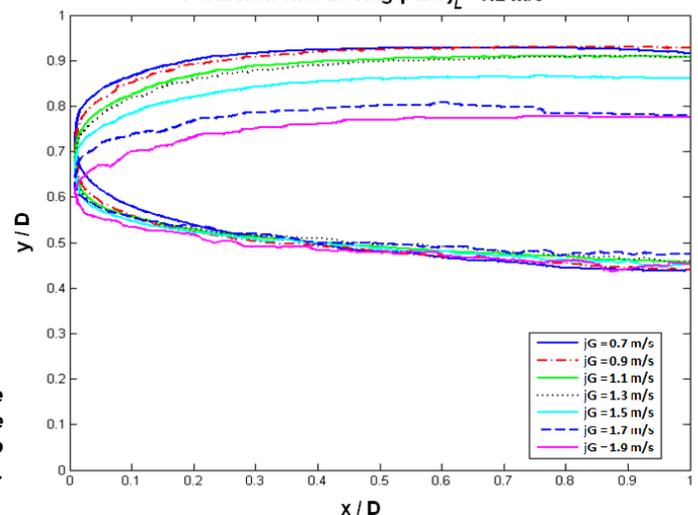
## Processamento de imagem na frente do slug



Acima: as diversas etapas de processamento visam a análise das características geométricas das golfadas, assim como o cálculo da velocidade de propagação para diversos valores de velocidade superficial.

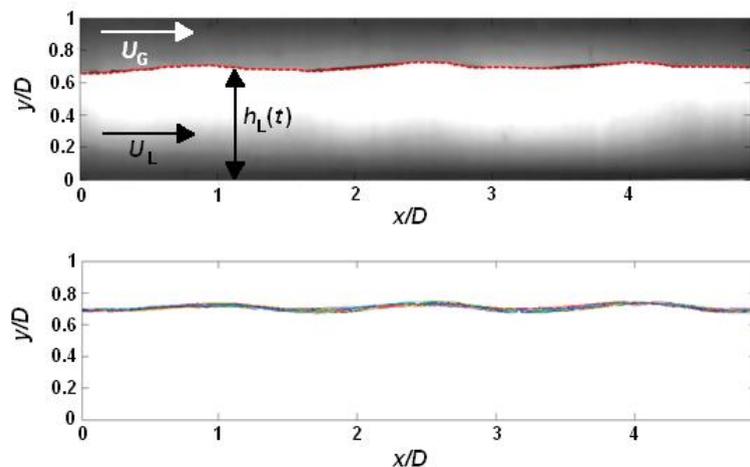
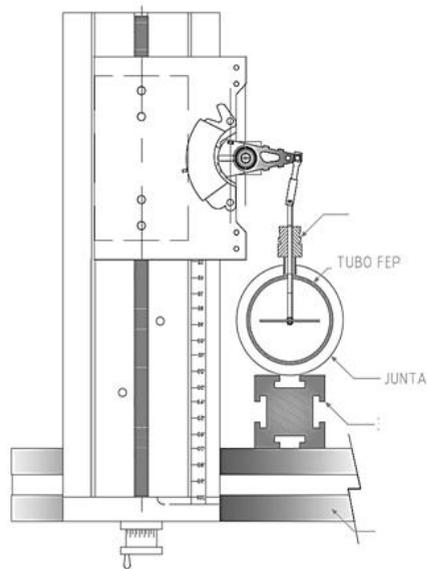
A técnica PIV também é utilizada para a medição de campos completos de velocidade na fase líquida. Estudos de instabilidade hidrodinâmica e de metodologias de controle e supressão de golfadas também são conduzidos no LEF.

## Perfil na frente do slug para $j_L = 0.2 \text{ m/s}$



## • Estudo da instabilidade hidrodinâmica associada aos padrões de escoamento

No estudo da instabilidade hidrodinâmica no processo de formação de golfadas em dutos horizontais, excita-se o escoamento estratificado com perturbações periódicas e controladas. A evolução dessas perturbações ao longo da tubulação é medida através da aquisição e processamento de imagens. As medições de altura de líquido, feitas na mesma fase do ciclo do perturbador, demonstram a reprodutibilidade do escoamento. Isso mostra que é possível se estudar de maneira sistemática a transição do regime estratificado para o de golfadas a fim de se obter informações importantes para a validação de simulações numéricas e de modelos de previsão, assim como para teste de mecanismos de controle.



## • Para o estudo de escoamentos multifásicos o laboratório conta com os seguintes equipamentos:

- ✓ Bancadas de testes de até 20 metros com tubulações de 3/4", 1" e 2" de diâmetro, em acrílico e FEP (Fluorinated\_ethylene\_propylene);
- ✓ Diversas bombas volumétricas com vazões de até 10m<sup>3</sup>/h;
- ✓ Compressores e sopradores com vazão e pressão de até 22 m<sup>3</sup>/min e 4100 m.m.c.a;
- ✓ Câmeras de alta velocidade IDT X3 Pro com taxa de amostragem de até 3kHz;
- ✓ Câmeras TSI com 4 megapixels e taxa de amostragem de até 15Hz;
- ✓ Geradores de pulso para a sincronização de eventos;
- ✓ Diversos sistemas de aquisição de dados;
- ✓ Lasers NdYAG de baixa frequência e potência de 120mJ/pulso
- ✓ Laser de alta frequência, com potência de 10mJ/pulso a 1kHz;
- ✓ Laser Doppler com 2 canais;
- ✓ Anemômetro de fio quente TSI;
- ✓ Diversos equipamentos de medição de pressão, vazão, temperatura.

## Parcerias



<http://lef.mec.puc-rio.br>

Lfaa@puc-rio.br

tel.: +55 21 3527-1181