

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO INTERMITENTE VERTICAL COM SONDA CONDUTIVA INTRUSIVA

Ederson Comar Ferreira da Costa (FEM/UNICAMP), Natache Arrifano Sassim (CEPETRO/UNICAMP),
Fernando de Almeida França¹ (DEP/FEM/UNICAMP)

¹CEP 13083-970, Campinas, SP, ffranca@fem.unicamp.br (Autor para Correspondência)

Este trabalho mostra o desenvolvimento de uma técnica para caracterização hidrodinâmica do escoamento gás-líquido intermitente vertical, ou escoamento pistonado - *slug flow*. Esta técnica baseia-se na aplicação de sondas elétricas condutivas de fios paralelos, intrusivas no escoamento, para a obtenção dos sinais dinâmicos e variáveis típicos das estruturas que formam o escoamento *slug flow*: a bolha de Taylor, circundada por um filme de líquido de pequena espessura, e a massa de líquido aerada que a sucede, contendo pequenas bolhas dispersas. A topologia do escoamento pistonado vertical é, talvez, a que impõe a maior dificuldade de caracterização dinâmica, pois a intermitência severa entre as fases alterna variações extremas da concentração das fases e formas de interface na seção transversal da tubulação. As variáveis de interesse do escoamento pistonado e suas estruturas típicas são determinadas, dinamicamente e em tempo real, com a técnica aqui apresentada, através da medição da condutividade elétrica da mistura bifásica que circunda os fios paralelos de duas sondas que cortam diametralmente a seção da tubulação. Estes sinais das sondas condutivas elétricas, instaladas sequencial e longitudinalmente na tubulação, são processados para se calcular as velocidades de propagação e os comprimentos das estruturas intermitentes - bolha de Taylor e massa de líquido aerada, a espessura do filme de líquido que circunda a bolha de Taylor e a fração de vazio da massa aerada de líquido. Ensaios já realizados com técnicas de ultra-som na mesma seção de testes foram usados como referência para calibração da sonda de fios paralelos. Este trabalho discute aspectos da técnica, mostra os procedimentos de calibração e apresenta os resultados preliminares obtidos para o escoamento gás-líquido

Escoamento pistonado, sondas de condutância intrusiva, hidrodinâmica de escoamentos bifásicos.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento bifásico vertical é típico em indústrias químicas, petroquímicas e de produção de petróleo, e pode ocorrer nos circuitos de refrigeração de reatores nucleares. No caso da indústria de petróleo brasileira, é o escoamento com presença mais freqüente na produção e transporte de misturas bifásicas, dadas as características dos campos produtores e dos fluidos produzidos na Bacia de Campos. Em um escoamento bifásico, as fases distribuem-se de maneira muito particular, caracterizando diversos arranjos topológicos, denominados de padrões de escoamento. Estes arranjos topológicos são então estruturas dinâmicas no escoamento, determinadas por propriedades físicas das fases, dimensões do sistema e condições operacionais: viscosidade, tensão superficial, diâmetro, inclinação, vazões, pressão, etc.

Na década de 1980 vários autores trabalharam intensivamente com a identificação e a modelagem preditiva de arranjos topológicos em escoamentos bifásicos líquido-gás. No escoamento vertical ascendente, quatro padrões básicos ganharam aceitação geral (Taitel et al., 1980; Mishima e Ishii, 1984): o escoamento em bolhas dispersas, o escoamento intermitente ou pistonado (*slug flow*), o escoamento agitante (*churn flow*) e o escoamento anular. Posteriormente, novos padrões intermediários foram propostos: por exemplo, para Costigan e Whalley (1997) há o *plug flow*, uma transição entre o escoamento em bolhas e o escoamento intermitente propriamente dito; ou o pistonado instável, que ocorre entre o padrão pistonado e o padrão agitante.

O avanço tecnológico recente, com técnicas como o imageamento rápido ou a tomografia, permitiu o aprimoramento da identificação dos sub-padrões bifásicos e a identificação de transições sutis entre os padrões clássicos. De fato, esta é uma área de grande importância para trabalhos experimentais, pois é o passo inicial para a determinação de novas correlações, muitas vezes usadas como equações de fechamento (*closure conditions*) de modelos matemáticos de escoamentos bifásicos. Nesta linha de atuação, este trabalho apresenta a descrição da aplicação de uma técnica experimental já conhecida e muito utilizada em escoamentos bifásicos separados, isto é, com interface contínua, para a caracterização do escoamento intermitente. Ela baseia-se na medição dinâmica da condutividade elétrica da mistura bifásica que circunda os fios paralelos de duas sondas elétricas que cortam diametralmente a seção da tubulação. Estes sinais elétricos das duas sondas, instaladas sequencial e longitudinalmente na tubulação, foram processados para se calcular as velocidades de propagação e os comprimentos das estruturas intermitentes - bolha de Taylor e massa de líquido aerada, a espessura do filme de líquido que circunda a bolha de Taylor e a fração de vazio da massa aerada de líquido. As sondas foram

calibradas diferentemente para enfatizar a medição de variáveis características de cada uma das estruturas do escoamento: a espessura instantânea do filme de líquido quando a bolha de Taylor ocorre na tubulação, e a concentração de bolhas – ou fração de vazio, na massa aerada de líquido. Essa é a particularidade original do presente trabalho: usando uma técnica conhecida na medição de escoamentos de fases separadas, com interface contínua, mostra a possibilidade de medição dinâmica de escoamentos intermitentes que apresentam intensa variação da concentração das fases e de formas de interfaces na seção transversal da tubulação.

Ensaios simultâneos já realizados com técnicas de ultra-som, na mesma seção de testes, foram usados como referência para calibração da sonda de fios paralelos. Assim, este trabalho discute aspectos da técnica, mostra os procedimentos de calibração e apresenta os resultados preliminares obtidos para o escoamento gás-líquido. A seção de testes é parte de uma tubulação vertical de 60 mm de diâmetro externo, que constitui um circuito de ensaios de 6 metros de altura. Este circuito inicialmente opera com água e ar, e futuramente operará com soluções aquosas e viscosas de glicerina e ar.

2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado no circuito vertical de ensaios bifásicos do LabPetro, Cepetro/Unicamp. Este circuito foi construído com uma seção vertical de tubos de acrílico de 60 mm de diâmetro externo, a qual tem 6 m de altura. Constituem o circuito um tanque de armazenamento de líquido, uma bomba centrífuga, instrumentos de medição de vazão mássica de líquido e vazão volumétrica de gás (ar), sensores/transmissores variados de pressão, temperatura, separador de gás, trocador de calor e tubulações e acessórios diversos. A sua operação está monitorada por um sistema de aquisição de dados digital baseado em *hardware* e *software* da *National Instruments*.

2.1 Técnica de Medição

A técnica utilizada baseia-se na medição da diferença de condutividade elétrica da mistura de gás e líquido que envolve, dinamicamente, as sondas de fios paralelos, colocadas em posição normal à parede da tubulação. O sinal de resposta depende da topologia do escoamento, da geometria da sonda, das propriedades elétricas dos fluidos em escoamento e das características do circuito elétrico acoplado ao sistema. Torres (1992) e Bolonhini (1995) utilizaram este tipo de sonda para caracterizar interfaces em escoamentos estratificados horizontais. O circuito eletrônico utilizado por ambos foi baseado no esquema proposto por Koskie et al. (1989).

No experimento desenvolvido, cada uma das sondas utilizadas é formada por pares de fios paralelos de ouro, as quais são instaladas normalmente à parede da tubulação da seção de testes, e, então, transversalmente ao escoamento. Como o escoamento tende a apresentar alguma simetria axial, somente metade de cada uma das sondas é eletricamente ativa. Isto é, a metade de cada uma das sondas é isolada eletricamente, com uma cobertura de fibra ótica oca, flexível, vedada por peróxido. O isolamento de parte das sondas minimiza os efeitos do campo elétrico, torna o sinal mais “limpo” e sua calibração mais direta, além de enfatizar a medição de variáveis “simétricas” no escoamento. Este trabalho decorre de outros trabalhos realizados no Laboratório de Escoamentos Multifásicos da FEM-Unicamp, principalmente, o trabalho de Pedroso (1998), que utilizou a técnica de medição da diferença de condutividade elétrica através de fios paralelos em escoamentos verticais de água e ar e em soluções aquosas e viscosas de xarope de milho (mel Karo) e ar. Particularmente, cabe mencionar que este foi o primeiro trabalho a verificar a possibilidade de medir efetivamente (mesmo sem a precisão adequada) e simultaneamente com vários outros parâmetros, a concentração e a variação de gás no *slug* de líquido ao longo de seu comprimento. Esta é uma das variáveis ainda carentes de modelos físicos consistentes, apesar de exercer influência considerável nas simulações de escoamentos verticais. O fato deve-se, provavelmente, à dificuldade de medição simultânea de tantas variáveis dinâmicas como as que ocorrem no *slug flow* vertical, com limites de variação (*range*) tão amplos, ocorrendo quase que instantaneamente.

A Figura 1(a) é um esquema (vista de topo) de uma das sondas, isolada até o centro da tubulação por um capilar de vidro (fibra ótica oca) e instalada na seção de testes. Os fios de ouro têm 0,13 mm de diâmetro e as fibras ocas flexíveis têm 0,15 mm de diâmetro externo. A miniaturização das sondas reduz a interferência e a intrusividade no escoamento. Em síntese, o sensor intrusivo deve ser grande o suficiente para se tornar resistente, mas pequeno o suficiente para minimizar o distúrbio no fluxo. Os fios de ouro foram obtidos a partir da trefilação de um fio de 1mm de diâmetro e os capilares são fibras óticas ocas, fabricadas pelo antigo CPqD da Telebrás. A flexibilidade da fibra facilita a construção mecânica das sondas, e aumenta sua resistência às vibrações impostas pelo escoamento.

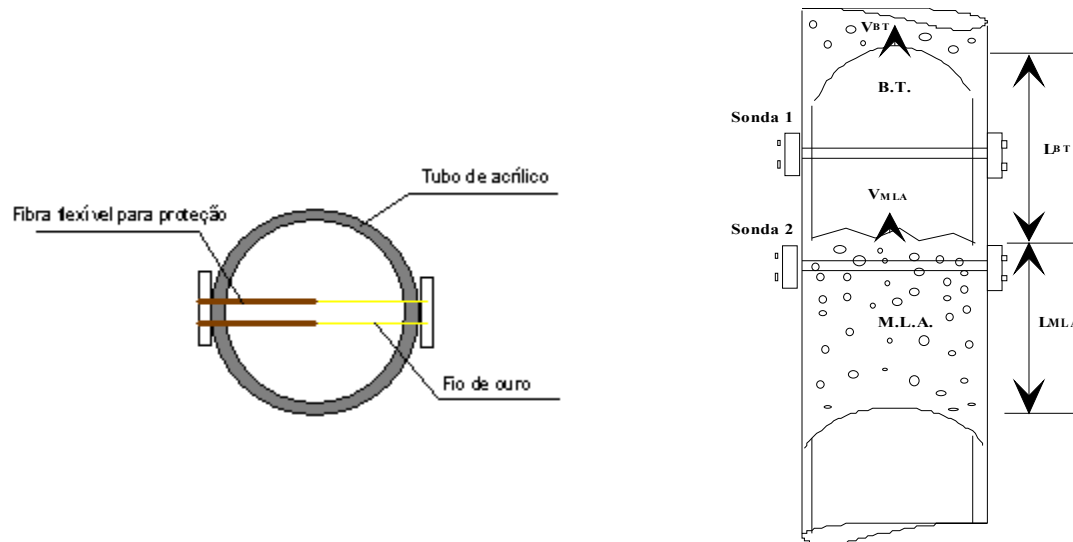


Figura 1 – (a) Esquema: vista de topo de sonda elétrica e (b) representação das estruturas do *slug flow*.

Para regiões pequenas em comparação ao comprimento de onda de um campo eletromagnético oscilatório, Koskie et al. (1989) mostram que a resistência desta região pode ser dada por uma integral volumétrica da condutividade da fase líquida φ_L multiplicada por um vetor de força eletromagnética E :

$$R = \frac{1}{I^2} \int_V \varphi_L |E|^2 d^3x \quad (2.1)$$

Assumindo que a resistência elétrica dos fios utilizados é desprezível em relação à resistência do meio que os separa, e que a corrente elétrica passa, preferencialmente, através da fase líquida existente entre os fios, Koskie et al. (1989) concluem, através de análise numérica, que entre 90 a 99% da resistência elétrica do sistema provém da região bidimensional entre os dois fios, e que a resposta de um sistema de condutância de fios paralelos é tanto melhor quanto mais próximos os fios.

Dois pares de fios de ouro foram instalados radialmente na seção de testes do circuito, distantes um do outro de 29,5 mm e formando as duas sondas, que estão localizadas a aproximadamente 4,5 m da base da tubulação vertical, posição de instalação do injetor de ar. As sondas estão instaladas longitudinal e seqüencialmente na seção de testes, isto é, estão em série no escoamento. Cada uma das sondas tem um condicionador de sinal próprio, que excita a sonda com uma corrente em tensão alternada a uma frequência de 1 kHz. Desta forma, efeitos de eletrodeposição nos fios de ouro são evitados, mas um filtro passa baixa é aplicado para eliminar a portadora de frequência elevada e preservar a oscilação típica provocada pelo escoamento bifásico, geralmente inferior a 100 Hz. Conforme varia a impedância da mistura que envolve a sonda, a tensão varia de forma diretamente proporcional. Conseqüentemente, o sinal de saída do condicionador é uma tensão retificada, DC, cuja amplitude é ajustada de acordo com a sensibilidade desejada para cada sonda, isto é, para enfatizar a medição da variável que se deseja prioritária para cada sonda, a espessura do filme de líquido da bolha de Taylor (B.T.), ou a concentração de bolhas dispersas da massa de líquido aerada (M.L.A.). Uma representação pictórica das estruturas do escoamento *slug flow*, que devem ser medidas pelas sondas, aparece na Figura 1(b). A utilização de duas sondas de fios paralelos em série permite a obtenção dos comprimentos e velocidades das bolhas de Taylor e da massa de líquido aerada. Sendo Δs a distância linear entre as duas sondas, a velocidade de bolha de Taylor é dada por:

$$V_{BT} = \frac{\Delta S}{t_{BT1} - t_{BT2}} \quad (2.2)$$

Na equação (2.2), $t_{BT1} - t_{BT2}$ é intervalo de tempo entre o toque da interface superior da bolha de Taylor nas sondas em série. A velocidade de ascensão da massa de líquido aerada, de maneira análoga:

$$V_{MLA} = \frac{\Delta S}{t_{MLA1} - t_{MLA2}} \quad (2.3)$$

Na equação (2.3), $t_{MLA1} - t_{MLA2}$ é o intervalo de tempo entre o toque da interface superior da golfada de líquido. Conhecidos os valores de V_{BT} e V_{MLA} os comprimentos da bolha de Taylor e massa de líquido aerada são dados, respectivamente, por:

$$L_{BT} = \frac{V_{BT}}{t_{PBT}} \quad (2.4)$$

$$L_{MLA} = \frac{V_{MLA}}{t_{PMLA}} \quad (2.5)$$

Os tempos de passagem da bolha de Taylor e da massa de líquido aerada por uma sonda são dados, respectivamente, por t_{PBT} e t_{PMLA} . Os valores obtidos são considerados válidos se apresentarem desvio máximo de 5% entre os tempos de passagem apontados pelas duas sondas utilizadas. A aplicação deste critério garante que não sejam registradas bolhas de Taylor ou golfadas de líquido em processo de desagregação ou coalescência. Veja fotografia da seção de testes na Figura 2. Da correlação cruzada dos sinais, obtida por processamento, obtém-se as velocidades de deslocamento das estruturas bifásicas, a bolha de Taylor e a massa de líquido aerada. A discriminação dos sinais referentes a cada uma das estruturas principais do escoamento *slug flow*, realizadas por *software*, permite o cálculo da espessura instantânea do filme de líquido (ou o *liquid hold-up*) que circunda a bolha de Taylor e a concentração volumétrica de bolhas (a fração de vazio, *void fraction*) na massa aerada de líquido.

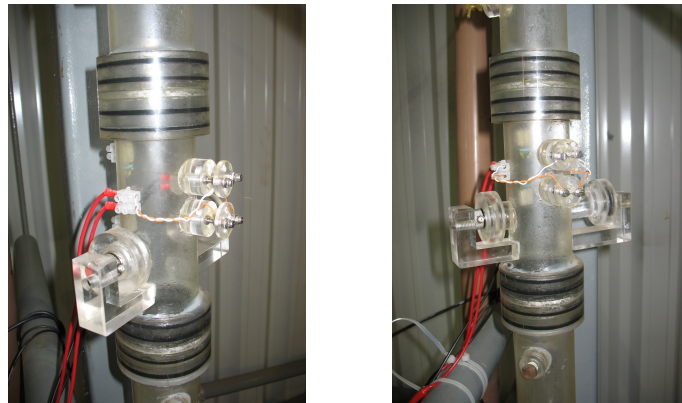


Figura 2 – Fotografia da seção de testes: (a) sondas elétricas em série e (b) disposição dos sensores de ultrassom.

2.2 Sistema de Aquisição de Dados e Processo de Calibração

Os dados do experimento foram amostrados e armazenados utilizando-se de *hardware* de aquisição de dados e *software* LabView 6.0 da *National Instruments*. O LabView é utilizado para a aquisição e tratamento de sinais, através de uma interface gráfica chamada “G”, o que facilita a utilização e a operação, pois o programador não necessita escrever qualquer linha de código. Para este experimento foram desenvolvidas duas interfaces gráficas sendo executadas em dois computadores equipados com diferentes *hardware* de aquisição de dados: uma interface foi usada para adquirir as condições operacionais do sistema, isto é, vazões, pressões, temperaturas, etc. e a outra para adquirir dados em frequência mais elevada, os sinais das sondas de fio paralelo, além de ser usada para a aquisição dos sinais de calibração do sistema de ultrassom. O *hardware* utilizado para aquisição dos sinais com alta frequência foi um computador industrial dedicado, com um sistema de aquisição de alta performance, modelo PXI da *National Instruments*. A interface gráfica utilizada para a aquisição dos sinais das sondas de fios paralelos aparece na Figura 3. As condições operacionais do circuito de ensaios foram adquiridas com uma placa AT-MIO de 16 canais, também da *National Instruments*. Todos os sensores/transmissores utilizados no monitoramento da operação do circuito têm módulos eletrônicos e transmitem os sinais correspondentes às variáveis medidas em tensão e/ou corrente. Cada um deles foi cuidadosamente calibrado, via transformação dos dados dos sensores e transdutores em uma tensão elétrica correspondente, obtendo-se assim uma escala de conversão, na qual uma certa tensão representa uma quantidade física. A interface gráfica desenhada para realizar a aquisição dos sinais das condições operacionais aparece na Figura 4.



Figura 3 – Interface gráfica em ambiente LabView para aquisição de sinais das sondas de fios paralelos.

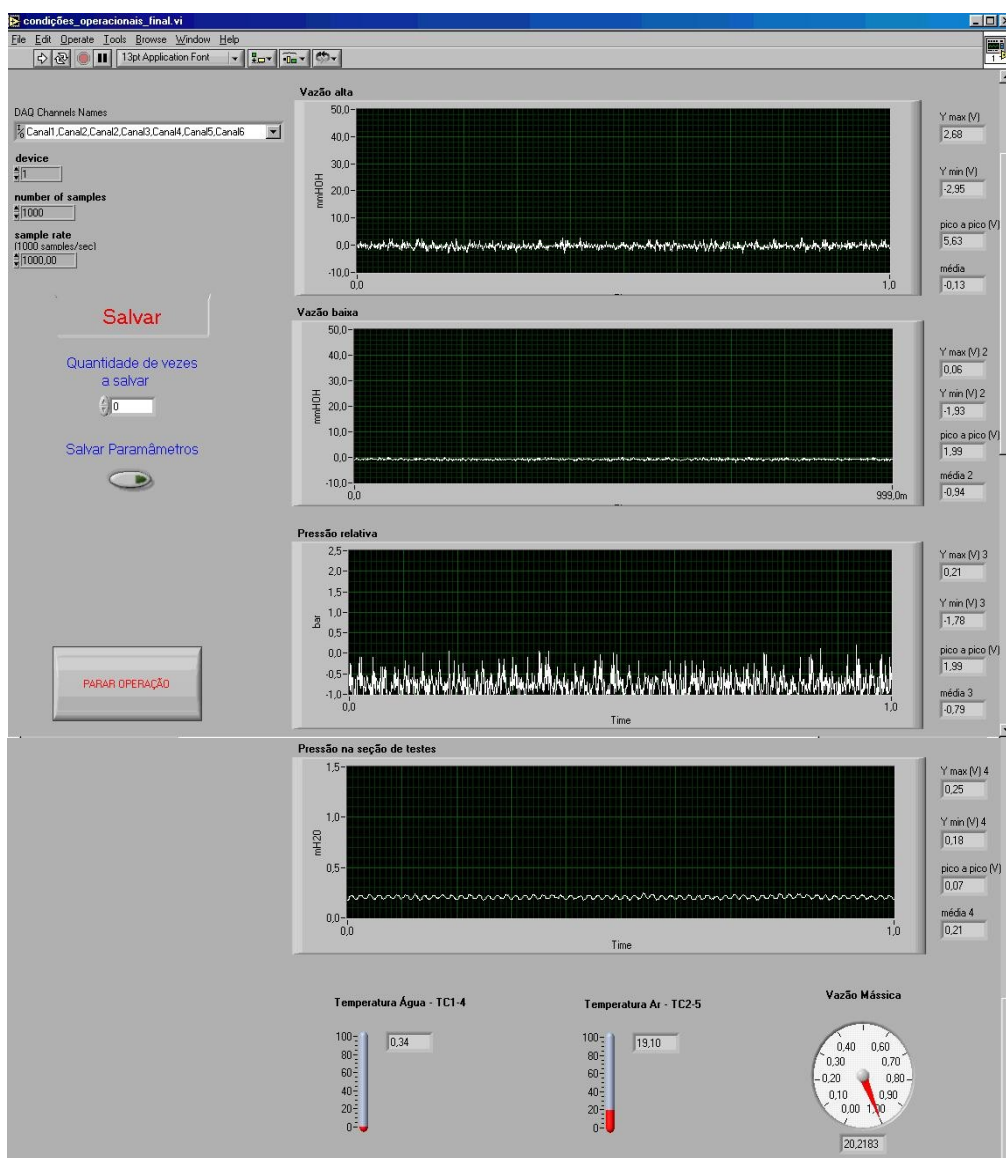


Figura 4 – Interface gráfica em ambiente LabView para aquisição de sinais das condições operacionais.

Uma curva de calibração típica, como a do medidor de elemento laminar de vazão de ar (baixa vazão) está apresentada na Figura 5: no caso, a diferença de pressão no elemento laminar, em milímetros de coluna de água, representa a vazão volumétrica de ar no dispositivo. A interface gráfica da operação do sistema permite a monitoração em tempo real das variáveis, indicando valor instantâneo e valor médio, para uma verificação constante e adequada da estabilidade operacional.

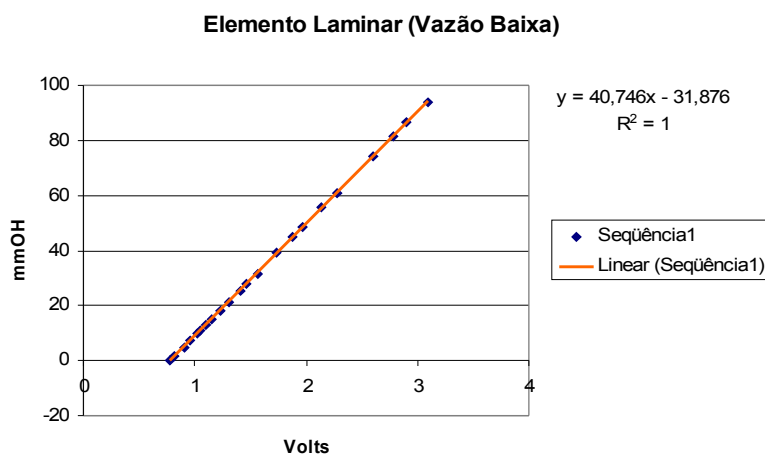


Figura 5 – Calibração do elemento laminar de vazão baixa de ar.

As sondas de fio paralelo foram calibradas estaticamente duas vezes, a fim de ratificar o resultado da medição da espessura de filmes de líquido, tendo a água como referência. A calibração dinâmica na seção de testes, novamente contra sinais de sensores de ultrassom, permite ratificar o resultado da medição da fração de vazios (concentração de gás) na massa de líquido aerada. A calibração estática foi realizada em uma bancada horizontal, confrontando-se as medições das sondas com resultados obtidos com a aplicação de técnica de ultrassom. Uma imagem da bancada de calibração estática está na Figura 6: o sensor de ultrassom, operando com o princípio de pulso-eco, foi instalado entre as duas sondas, no eixo inferior da tubulação. A técnica de ultrassom forneceu, assim, a espessura média do filme de líquido entre as posições de cada uma das sondas.

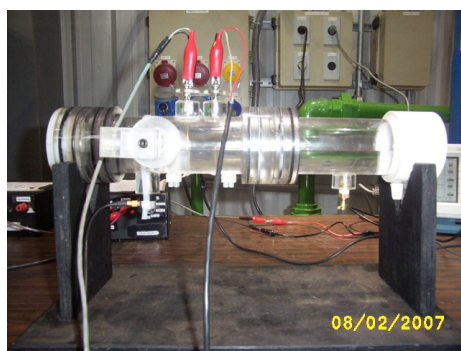


Figura 6 – Seção com as sondas paralelas sendo calibradas contra técnica de ultrassom.

O ultra-som emite o pulso e mede o tempo para seu retorno (operação no princípio pulso-eco). Então, a espessura do filme de líquido é obtida através da multiplicação do intervalo de tempo que o pulso ultrasonoro demora para ir da parede do tubo de acrílico até a interface da água e retornar até a parede de acrílico, com velocidade do ultra-som na água, 1.480 m/s. A técnica de calibração utilizada torna difícil a obtenção de pontos para filmes menores que 2 mm, por efeito de molhabilidade. Por este motivo, mesmo para a espessura de filme, alguns pontos adicionais de calibração devem ser obtidos dinamicamente, com as sondas já instaladas na torre vertical, gerando bolhas de Taylor isoladas e medindo a espessura do filme com auxílio do ultra-som operado pelo princípio do pulso-eco.

A Figura 7 abaixo mostra as curvas da calibração estática obtidas para as duas sondas, em momentos diferentes do dia. Verifica-se que há uma divergência entre calibrações, provavelmente, resultante do procedimento adotado, como a colocação do sensor de ultrassom, o alinhamento horizontal e de prumo do sensor de ultrassom, etc, todos realizados manualmente. Uma calibração final das sondas em situação dinâmica, com a seção de testes instalada no circuito, vai propiciar uma aferição precisa em relação às medições do ultrassom.

Outro aspecto a destacar na calibração das sondas, este intencional, é a diferença entre os resultados: a razão é que uma sonda deve privilegiar a medição da espessura de filme de líquido na periferia da bolha de Taylor (sonda 1, na figura, pontos e curva de parametrização na cor azul), a outra, a concentração de bolhas na massa de líquido aerada (sonda 2, cor vermelha). Observe a variação contínua da tensão para pequenas espessuras de líquido, sonda 1, condição para qual a sonda 2 apresenta saturação. Inversamente, a sonda 1 apresenta saturação quando a seção transversal está quase plena de líquido; a sonda 2 ainda indica, neste caso, um gradiente de tensão relativo à espessura (ou volume) de líquido na seção de testes.

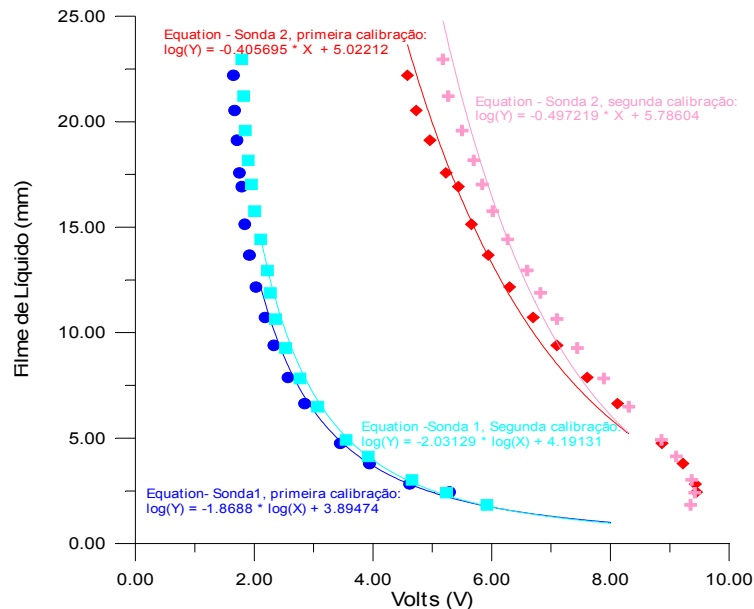


Figura 6 – Calibrações estáticas sondas de fios paralelos.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRELIMINARES

Efetivamente, os sinais elétricos de tensão gerados pelas sondas elétricas de condutância aplicadas em uma mistura bifásica condutora formada por água e ar têm como característica uma amplitude elevada com a ocorrência das duas estruturas principais do escoamento intermitente. Os sinais de alta intensidade representam a ocorrência de filme de líquido (passagem da bolha de Taylor), e os sinais de intensidade baixa indicam a ocorrência da massa de líquido aerada. Assim, a sobreposição dos sinais das sondas instaladas em série produz gráficos como mostrado na Figura 7, para a condição operacional representada pelas velocidades superficiais de líquido e gás “in-situ”, isto é, na seção de testes (JG = 0,48 m/s; JL = 0,55 m/s). Na Figura 7(a) aparece uma amostragem de 10 segundos dos dois sinais, sobrepostos no tempo, representados pelas cores preto (sonda 1) e vermelho (sonda 2). A Figura 7(b) apresenta de forma mais detalhada o sinal obtido, em intervalo de tempo entre 2,3s e 3,9s. Observe que as estruturas marcantes do escoamento (no caso, altas amplitudes representam a passagem das bolhas de Taylor e outras bolhas longas em formação no escoamento) ocorrem primeiro na sonda 1, que está à jusante, e também que uma atividade intensa é também registrada no período de tempo entre a passagem das bolhas, indicando que a sonda mede, também, a passagem e a concentração das bolhas dispersas pelo campo elétrico formado pelos fios paralelos. Outro aspecto a destacar, no caso, é que as sondas foram calibradas diferentemente: a sonda 2 sempre satura, e não mede a espessura do filme de líquido na periferia da bolha de Taylor, mas registra com mais detalhes a passagem das pequenas bolhas no pistão de líquido. O sinal da sonda 1, por outro lado, não satura e registra a evolução temporal do filme de líquido na periferia da bolha de Taylor; entretanto, apresenta “undershoot” quando a massa de líquido aerada com bolhas dispersas passa pela seção transversal do tubo onde está instalada, e não produz sinal processável com correspondência com o fenômeno físico.

A diferença média de tempo entre os sinais das duas sondas, obtido por correlação cruzada, permite calcular a velocidade e o comprimento médio das estruturas. Antes, porém dever ser realizado um processamento computacional para separação dos eventos, possivelmente, após estabelecimento de níveis de corte da intensidade dos sinais das sondas (*threshold*).

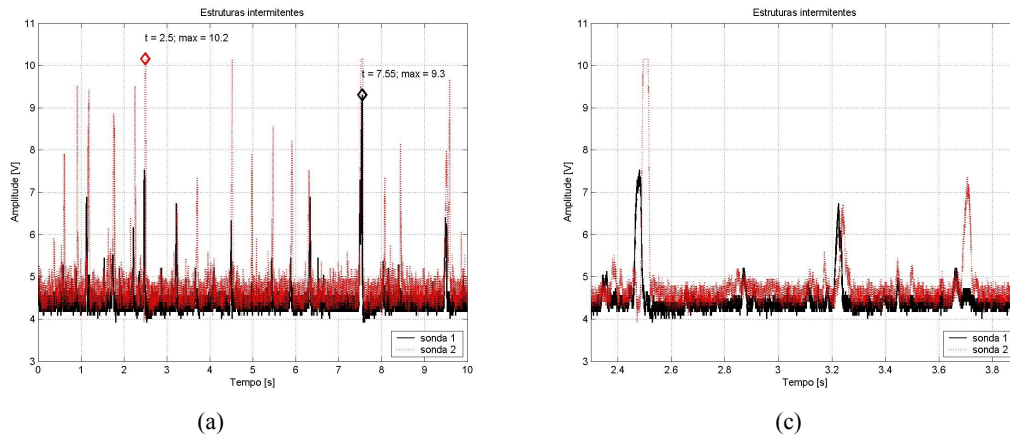


Figura 7 – Sobreposição temporal dos sinais das sondas instaladas em série: (a) amostra de 10 segundos e (b) detalhe (zoom temporal) entre 2,3 e 3,9s.

Outra possibilidade é a identificação por software de cada par de ocorrências caracterizada como bolha de Taylor e massa de líquido aerada e calcular cada uma das variáveis de interesse individualmente. Os valores médios podem ser obtidos então na sequência. Neste caso, as Figuras 8(a, b, c) mostram a discriminação dos sinais, na sequência de ocorrência das estruturas que ocorreram em torno de 2,4s (identificados pelo losango vermelho na Figura 8(a)), 4,5s e 7,4s, todos obtidos na mesma condição operacional mencionada anteriormente.

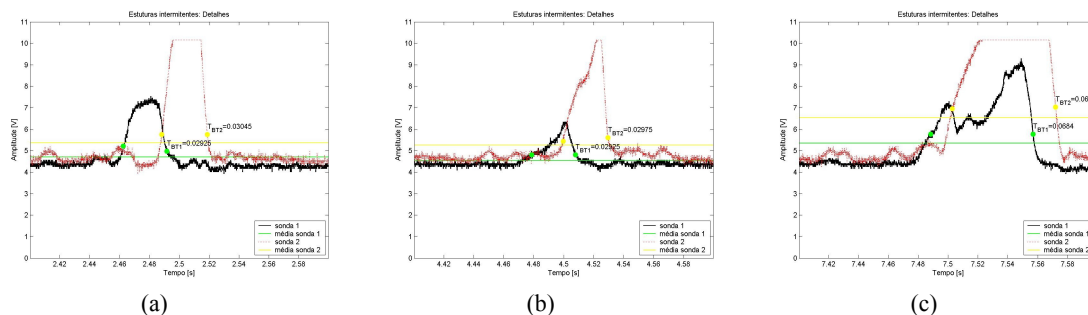


Figura 8 – Identificação individualizada das estruturas marcantes (bolhas de Taylor e massa aeradas de maior porte do “slug flow” vertical) para a condição operacional ($J_g = 0,48$ m/s; $J_l = 0,55$ m/s): (a) $V_{BT} = 1,13$ m/s; (b) $V_{BT} = 1,39$ m/s; (c) $V_{BT} = 2,07$ m/s.

É interessante observar que as sondas registraram a passagem de diferentes estruturas do escoamento, produzindo diferentes velocidades: 1,13 m/s, 1,39 m/s e 2,07 m/s. Esta é a natureza do escoamento “slug flow” vertical: a intermitência temporal está associada à ocorrência de diferentes arranjos topológicos nem sempre regulares, que têm características dinâmicas, distribuição estatística, etc. Em suma, o escoamento pode ser estacionário, com valores médios das variáveis se mantendo, mas com oscilações de magnitude das variáveis instantâneas seguindo alguma distribuição estatística específica. Outro ponto interessante a destacar é o valor da velocidade obtida, quando comparado com resultados de correlações. É bem conhecida a velocidade da BT calculada por correlações do tipo $J_G / \langle \alpha \rangle = C_0 J + V_{GJ}$, onde J é a velocidade superficial total, soma das velocidades superficiais parciais (de gás e líquido, J_G e J_L), $\langle \alpha \rangle$ é a fração de vazio média na seção transversal, C_0 é o coeficiente de distribuição e V_{GJ} é a velocidade de deslizamento típica da BT. Esta correlação produz, para a mistura de água e ar, $V_{BT} = 1,40$ m/s. As velocidades medidas variaram entre 1,13 m/s e 2,07 m/s. A maior velocidade, inclusive, foi obtida em um tempo em torno de 7,4 s, para um evento marcadamente distinto entre as duas sondas, indicando, talvez, que a BT estava em processo de coalescência (ver detalhes na Figura 8(c)).

Os outros parâmetros do escoamento, tais como, valores instantâneos e médios da espessura do filme de líquido descendente ao redor das bolhas de Taylor e da fração de vazio nas massas aeradas, serão obtidos a partir da calibração da sonda elétrica contra os sensores de ultrassom, após a separação dos eventos.

Cabe ainda destacar as possibilidades de aplicação da técnica de sondas elétricas condutivas em escoamentos gás-líquido vertical tipo “slug flow”: evidentemente, esta é uma técnica intrusiva, restrita a aplicações em laboratório, com líquidos específicos (condutores elétricos), dada a fragilidade dos fios e a natureza da mistura bifásica. Aplicações em campo, com fluidos contaminados por partículas sólidas, por exemplo, não serão possíveis se fios finos forem utilizados. Entretanto, é uma técnica poderosa e ainda simples, tecnologicamente,

além de precisa o suficiente para medir as várias características das estruturas do escoamento “slug flow” vertical, que têm marcantes diferenças, dinâmicas próprias e natureza estatística peculiar. Uma técnica de certa forma similar pode ser usada em misturas de líquidos dielétricos: mede-se a capacitância do meio ao invés da condutância elétrica. Os mesmos sensores poderiam ser utilizados, ou outros mais robustos, viabilizando sua aplicação a misturas de hidrocarbonetos em campo, em escoamentos reais. Para tanto, basta aumentar a frequência de oscilação do circuito de alimentação da sonda elétrica condutiva: a capacitância se sobreporá à condutância elétrica. Entretanto, haverá dificuldades com a frequência de excitação mais elevada, pela ocorrência de um SNR menos intenso, isto é, a frequência de excitação mais elevada induz ruídos, sempre presentes, mais ainda em aplicações de campo. A sonda elétrica, como proposta aqui, tem uso em laboratórios de pesquisa, em aplicações com fluidos específicos, em condições operacionais controladas. Destina-se ao estudo de fenômenos básicos do escoamento, ao desenvolvimento e verificação de correlações, pois mede com precisão as variáveis típicas do “slug flow” vertical, incluindo espessuras de filmes de poucos milímetros, frações de vazio de bolhas dispersas da ordem de 1% a 15%, etc, além dos eventos marcantes do escoamento, como a passagem das BTs, das MLAs, suas velocidades e comprimentos, de forma simultânea, o que é mais importante.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a técnica de medição da diferença de condutividade elétrica para caracterização hidrodinâmica do escoamento gás-líquido intermitente vertical, ou escoamento pistonado - *slug flow*. Resultados preliminares mostram que o conjunto de sondas de fios paralelos instaladas radialmente na tubulação e dispostas em série é uma técnica de medição relativamente simples e de grande utilidade para estudos de escoamentos bifásicos, em especial do escoamento intermitente vertical, visto que permite a caracterização de todos os parâmetros hidrodinâmicos pertencentes a este tipo de escoamento. Para isto, as sondas devem ser ajustadas para apresentar sensibilidade aos fenômenos que se deseja caracterizar no escoamento em bolhas, o que permite estabelecer uma curva de calibração para cada fenômeno. Desta forma, torna-se propícia a utilização desta técnica no reconhecimento de padrões de escoamento e como instrumento de medida de vazão de escoamentos intermitentes verticais.

Note que, por ser uma técnica de medição intrusiva, a medição da diferença de condutividade elétrica através de fios paralelos é de difícil aplicação no setor industrial. Além disso, o fato de que o líquido em escoamento deva ser condutivo, excluindo a sua utilização em fluidos constituídos por hidrocarbonetos. Outra limitação da técnica está relacionada ao procedimento de calibração, utilizada para a caracterização da fração de vazio na massa de líquido aerada, pois esta variável é tipicamente mais elevada que a maior fração de vazio em bolhas, o que torna necessário definir as frações de vazio máximas em massas de líquido aeradas e utilizar extrapolações de curvas de calibração para mensuração deste parâmetro. Esta dificuldade foi contornada com a utilização de técnicas de ultra-som, obtendo assim, alguns pontos adicionais de calibração.

A próxima etapa do trabalho consiste no processamento computacional para separação e correlação cruzada dos eventos ocorridos, visando determinar todos os parâmetros do escoamento intermitente vertical e futuramente trabalhar com soluções aquosas e viscosas de glicerina e ar, caracterizado hidrodinamicamente este tipo de escoamento.

5. REFERÊNCIAS

- BOLONHINI, E.H. Geometria de interface e gradiente de pressão em escoamentos horizontais estratificados e anulares com dispersão. **Tese de mestrado**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
- COSTIGAN, G., WHALLEY, P.B. Slug flow identification from dynamic void fraction measurement in vertical air-water flows. **Int. J. of Multiphase Flow**, v. 23, n. 2, p. 263-282, 1997.
- KOSKIE, J.E. et al.. Parallel-wire probes for measurement of thick liquid films. **Int. J. of Multiphase Flow**, v. 15, n. 4, p. 521-529, 1989.
- MISHIMA, K., ISHII, M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. **Int. J. Heat and Mass Transfer**, v. 27, n. 5, 1984.
- PEDROSO, D.C. Estudo experimental e caracterização estatística da hidrodinâmica do escoamento bifásico vertical ascendente em padrão pistonado. **Tese de mestrado**, Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- TAITEL, Y., BARNEA, D., DUKLER, A.E. Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, v. 26, n.3, 1980.
- TORRES, F.R. Caracterização da interface e determinação experimental do fator de atrito interfacial em escoamentos horizontais estratificados. **Tese de mestrado**, Universidade Estadual de Campinas, 1992.