

MEDIÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIOS EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS BORBULHANTES UTILIZANDO ULTRA-SOM

João Paulo Druzina Massignan (UTFPR), Milton Yukio Nishida (UTFPR), Rafael José Daciuk (UTFPR), Flávio Neves Jr. (UTFPR)¹, Fernando de Almeida França² (UNICAMP), Ricardo Dias Martins de Carvalho³ (UNIFEI)

¹Av Sete de Setembro 3165 Bloco CPGEI Rebouças 80230-901 Curitiba PR Brasil, neves@utfpr.edu.br

²Caixa Postal 6052 CEP 13083-970 Barão Geraldo Campinas SP Brasil, ffranca@fem.unicamp.br

³Caixa Postal 50 CEP 37500-903 Itajubá MG Brasil, martins@unifei.edu.br

Na produção de petróleo, o escoamento bifásico é frequentemente encontrado na coluna de produção dos poços e nos dutos de produção. A produção no mar faz com que gás e fases líquidas sejam transportados por longas distâncias antes de serem separados. Para aperfeiçoar a produção é necessário ensaiar os diversos equipamentos, como por exemplo, a Bomba Centrífuga Submersa (BCS), nas diversas condições de escoamento com o objetivo de determinar parâmetros ótimos de projeto e de operação do equipamento. Como o petróleo é um meio opaco, as técnicas que utilizam imagens para determinar a fração de vazios no escoamento não se aplicam. O estudo da interação do campo acústico das ondas de ultra-som e o escoamento bifásico são de grande importância para determinar quais padrões de escoamento petróleo-gás estão trafegando pela tubulação e assim ensaiar o equipamento. Outras vantagens da instrumentação ultra-sônica são a sua robustez devido à simplicidade dos transdutores e o fato de ser não-invasiva, possibilitando futura utilização em equipamentos baseados em ultra-som nos poços de produção. Neste trabalho são apresentados os resultados de ensaios realizados em padrões de escoamento bifásico borbulhante água e ar entre 0 a 15 % de fração de vazios em tubulação vertical de seção circular utilizando técnicas de ultra-som pulsado no modo transmissão. O objetivo é determinar como o sinal de ultra-som interage com o meio bifásico e propor um método de medir a fração de vazios do escoamento. Técnicas numéricas e de processamento digital de sinais são utilizadas para analisar o sinal ultra-sônico. Entre os parâmetros e variáveis analisados estão a energia média do sinal, o tempo de trânsito, a envoltória do sinal recebido e a transformada de Fourier deste sinal. Medidas futuras em escoamento glicerina-gás e petróleo-gás serão realizadas a fim de se obter o entendimento fenomenológico em escoamentos, com líquidos mais viscosos e se aproximar da situação real em que se encontram os poços de produção de petróleo.

escoamento bifásico, ultra-som, instrumentação

1. INTRODUÇÃO

O estudo da técnica de ultra-som aqui exposto tem como objetivo principal verificar a sua potencialidade para caracterização de escoamentos bifásicos e quantificação de parâmetros importantes como fração de vazio. Tratando-se de um estudo inicial e dada a complexidade dos fenômenos envolvidos na interação entre a onda acústica e o escoamento bifásico água-ar vertical, a técnica foi aplicada somente em escoamentos borbulhantes, a fim de se limitar o número de variáveis analisadas. Do ponto de vista da tecnologia de aquisição e processamento de dados, foi desenvolvido um protótipo completo (*hardware, firmware, software*) de sonda não-intrusiva para aquisição e tratamento de dados de ultra-som em tempo real, com velocidade de aquisição e capacidade de armazenamento de dados compatíveis com as aplicações reais da indústria petrolífera. Os principais tópicos abordados neste artigo são os que se referem à análise do estado da arte das técnicas de medição em escoamento bifásico utilizadas atualmente na área de instrumentação industrial, apresentados no item 2, e a montagem experimental que foi desenvolvida para esta aplicação no item 3. Os experimentos e resultados obtidos são apresentados no item 4. O item 5 traz algumas conclusões sobre o projeto e trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Muitas aplicações industriais envolvem fenômenos com duas ou mais fases. Entre estes, o escoamento bifásico de líquido e gás representa um papel importante na indústria petrolífera, assim como em reatores nucleares e na indústria química. Esta importância tem levado muitos pesquisadores a estudarem vários métodos de medição da fração de vazio nestes padrões de escoamento para melhor entendimento da dinâmica deste tipo de fenômeno.

Várias técnicas e aproximações têm se desenvolvido nos últimos anos, buscando soluções para aplicações em laboratórios de pesquisa e/ou ambientes industriais. Diversos pesquisadores vêm trabalhando com transdutores baseados em princípios elétricos e sônicos para estudo destes fenômenos.

Zhiao *et al.* (2003) utilizam 12 sensores capacitivos em um tomógrafo por capacitância elétrica (*Electrical Capacitance Tomography - ECT*) que é uma das classes de tomografia disponível. De acordo com Zhiao *et al.* (2003), a precisão e a qualidade da reconstrução da imagem em sistemas de tomografia por capacitância elétrica ainda não são satisfatórias. Assim são propostos um novo modelo matemático e um novo algoritmo de reconstrução de imagem que fornecem dados quantitativos em diversos padrões de escoamentos bifásicos, tais como óleo e gás, que ocorrem na indústria de petróleo. Em experimento dinâmico com óleo e gás, os autores obtiveram erros inferiores a 5 % na determinação da fração de vazios. Este método demonstra potencial em aplicações de laboratório. No entanto a seção de teste utiliza como isolante o acrílico e assim o experimento ainda não pode ser reproduzido em ambientes industriais.

Uma imagem tomográfica pode utilizar medidas de resistência em um método análogo ao ECT chamado tomografia por resistência elétrica (*Electrical Resistance Tomography - ERT*). Dong *et al.* (2006) utilizam dois métodos para estimar a fração de vazio local e a velocidade média da fase dispersa para obter a vazão da fase gasosa. O experimento é realizado com água e ar, onde somente o ar movimenta-se ficando a água estática. O primeiro método chamado de “Método da Correlação de Pixels” é utilizado quando a distribuição espacial da vazão e da fração de vazios não é uniforme. Neste método, para se medir a fração de vazios é utilizada uma limiarização da imagem tomográfica em tons de cinza. O segundo método chamado de “Correlação de Valor Característico” é utilizado quando a distribuição de vazios e vazão é uniforme na seção em análise. Neste método é utilizada uma medida da variação de tensão em relação ao líquido puro para determinar a fração de vazios. Como o ECT, o ERT ainda é um método para ser utilizado em laboratório. Outro ponto importante é que sua utilidade se limita a líquidos condutores assim como o ECT se limita a líquidos isolantes.

Também são propostas soluções mais robustas para ambientes industriais como o uso de sensor eletromagnético não intrusivo de baixa potência que trabalha na faixa de 100-350 MHz. Este sistema é apresentado por Wylie *et al.* (2006) onde um sinal de RF de 100-350 MHz aplicado a uma cavidade eletromagnética não intrusiva atravessa o escoamento e é recebido por uma antena também não intrusiva. É analisado o espectro de frequência onde se mede o desvio da frequência de ressonância. Este desvio é função da fração de vazio. Uma vantagem deste tipo de instrumento é a faixa de medição, que vai do tubo completamente cheio de líquido até completamente vazio, ou seja, somente com o gás. Uma dificuldade é que o desvio de frequência depende da permissividade do meio ou em outras palavras dos fluidos do escoamento. No escoamento água do mar e gás, o desvio foi de 70 MHz, enquanto no escoamento óleo e gás, este desvio foi de apenas 2 MHz, reduzindo assim a sensibilidade da medição, mas atingindo precisão de 2 %.

Além das técnicas baseadas em princípios elétricos, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com sensores baseados em princípios mecânicos, especialmente utilizando tecnologia de ultra-som, devido à sua robustez, não invasividade e independência das características elétricas do fluido.

Jones *et al.* (1986) estudaram a interação de uma onda ultra-sônica com escoamentos de água com bolhas de ar. Os autores afirmam que não existe relação entre a atenuação da onda e a área de interface volumétrica em um escoamento com bolhas. Deste modo, se a atenuação da onda for usada para realizar medições de fração de vazio da fase dispersa, estimativas do tamanho médio e formato das bolhas serão necessárias. Jones *et al.* (1986) também discutiram a física envolvendo a passagem de uma única bolha através do campo acústico não plano gerado por um transdutor de ultra-som em forma de pistão. Segundo seus estudos, duas bolhas idênticas passando entre o transdutor emissor e o receptor em posições diferentes ao longo do eixo conectando-os produzem efeitos diferentes. Assim, os sinais transmitidos através de escoamentos com bolhas são ambíguos, se as bolhas não estão distribuídas uniformemente ou distribuídas identicamente durante o tempo total da medição.

Murakawa *et al.* (2005) utilizaram dois transdutores ultra-sônicos diferentes e métodos estatísticos para determinar a distribuição de velocidade em escoamentos de água com bolhas de ar. Foi verificado o efeito da frequência e diâmetro do transdutor na precisão da medição. Como a probabilidade de bolhas cruzarem o feixe ultra-sônico aumenta com o diâmetro do transdutor, os autores obtiveram diferentes resultados para medições realizadas em escoamentos com as mesmas condições.

Zheng e Zhang (2004) usaram o ultra-som para medir a fração de vazio das fases dispersas em escoamentos bifásicos e trifásicos. Resultados experimentais para escoamentos ar-óleo e microesferas de vidro-óleo indicaram que as bolhas de ar são o fator predominante na atenuação acústica. Entretanto, em escoamentos trifásicos ar-microesferas de vidro-óleo, parece existir uma interação entre as bolhas de ar e as microesferas de vidro de modo que a atenuação do sinal resultante é maior que a soma dos efeitos isolados de cada uma. Eles observaram também existir um aumento exponencial da atenuação com o aumento da área interfacial das fases sólida e líquida. Além disso, as bolhas de ar causaram um aumento no tempo de trânsito das ondas ultra-sônicas. Vatanakul *et al.* (2004) realizaram experimentos similares aos de Zheng e Zhang (2004) utilizando esferas de vidro maiores. Além de confirmar os resultados obtidos por estes, eles observaram que o espalhamento no tempo de trânsito aumenta à medida que os percentuais das fases gasosa e sólida aumentam. Observaram também que esta última possui um efeito mais pronunciado e imediato que a outra. Com relação à amplitude do sinal, o espalhamento nos dados para gás-líquido aumentou rapidamente com o aumento da fração de vazio. Foi observada uma tendência oposta para o sistema sólido-líquido.

Supardan *et al.* (2007) utilizam tomografia computadorizada por ultra-som (*Ultrasonic Computed Tomography – UCT*). Como as outras técnicas de tomografia, este sistema necessita de vários transdutores de ultra-som. Foram utilizados seis pares de transdutores de 2 MHz no modo transmissão que são rotacionados 20° até completar 180° para gerar a imagem. Com isto adquire-se uma matriz 9 x 6 de medidas que, por interpolação utilizando o método de Lagrange, é ampliado para 36 x 11 medidas. Para cada caminho é utilizada uma média de cinco minutos da atenuação da energia do sinal de ultra-som. Com estes dados é possível reconstruir uma imagem com a distribuição de gás.

3. METODOLOGIA

3.1 Aparato Experimental

Um conjunto experimental foi projetado e construído especificamente para o estudo de medições ultra-sônicas de frações de vazio em escoamentos bifásicos água-ar verticais para cima. A Figura 1 representa uma visão esquemática do equipamento de testes. O misturador água-ar consiste de um tanque de água no qual a parte inferior de um duto de acrílico com 54 mm de diâmetro interno está inserida. Dentro deste duto existe um meio poroso cilíndrico através do qual é injetado ar comprimido no fluxo de água. A mistura ar - água ocorre no espaço anelar entre o meio poroso e o duto acrílico e rapidamente evolui para o padrão de escoamento com bolhas. O espaço anelar foi projetado de modo a garantir uma velocidade mínima do líquido, assegurando assim um processo de mistura adequado e estável. Seguindo o fluxo a partir do misturador, uma seção com 3,5 m de comprimento do duto acrílico assegura o desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento com bolhas antes que este entre na seção de teste para medição da fração de vazio. A seção de teste é na verdade um segmento com 10 cm de comprimento do mesmo duto acrílico de 54 mm de diâmetro interno, no qual os transdutores de ultra-som estão localizados. Além disso, um transdutor de pressão por relutância variável inserido logo em seguida aos transdutores de ultra-som mede a pressão do fluxo; esta leitura é necessária para o cálculo da vazão durante a realização dos testes. Após a seção de testes, uma seção de duto acrílico de 1,6 m de comprimento descarrega o escoamento bifásico água-ar em um separador de fase. Um dispositivo instalado nesta parte do sistema permite realizar medições do volume da fração de vazio, as quais podem ser usadas para corroborar os resultados obtidos com os sensores ultra-sônicos.

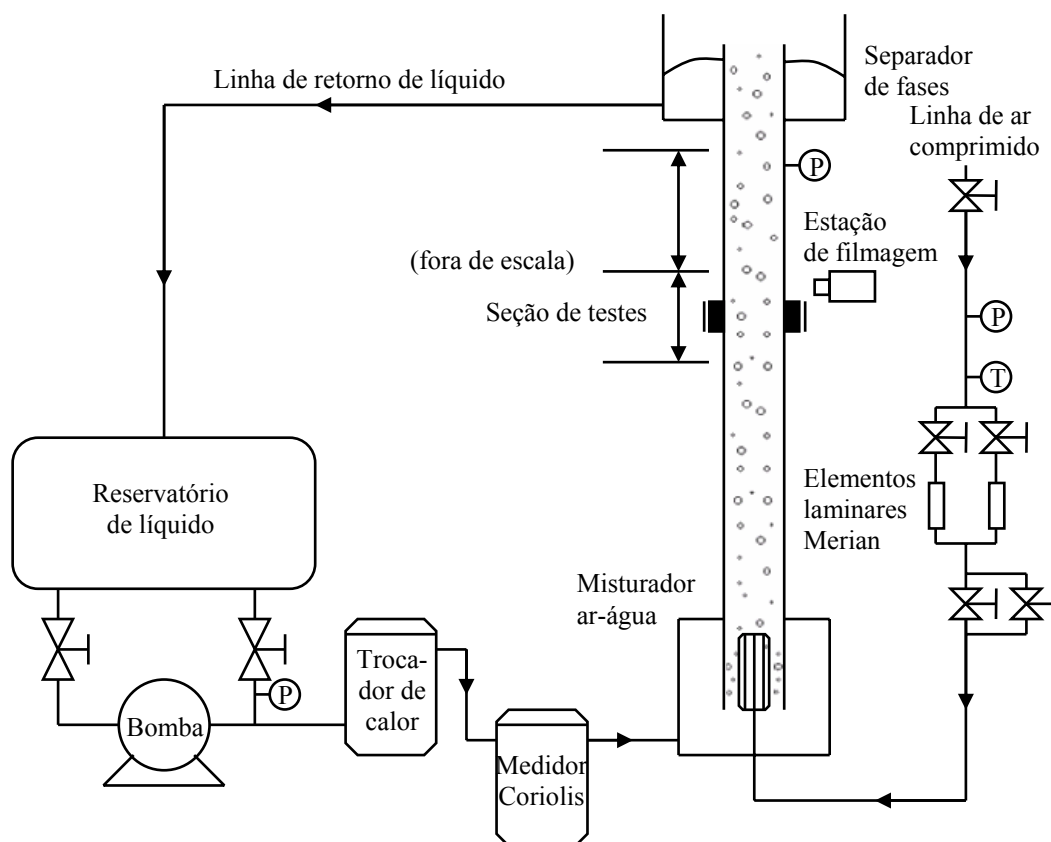


Figura 1. Esquemático do conjunto experimental construído.

No separador, o ar é liberado para a atmosfera enquanto a água retorna por gravidade ao reservatório de líquido. Uma bomba centrífuga força então a água novamente para o misturador água-ar, fechando assim o circuito. Um trocador de calor localizado na saída da bomba é usado para restringir variações na temperatura da água; o meio refrigerante é água corrente à temperatura ambiente. Um *driver* de velocidade variável permite uma variação na vazão de água de 0 a 5000 kg/hr. A vazão da água é medida por um medidor de vazão por efeito Coriolis modelo Rheonik RHM12, o qual inclui um RTD para medições de temperatura. A vazão de ar é medida pelos elementos de vazão laminar modelos 50MJ10-9 e 50MJ10-12. Transdutores de pressão modelo PX 750 Omega, medindo de 0 a 700 mmH₂O, são usados para medir a diferença de pressão entre os elementos de vazão laminar. Um transdutor de pressão idêntico, situado logo após os elementos de vazão laminar, faz a leitura da pressão na vazão de ar. Medições da pressão atmosférica provêm da estação meteorológica da Universidade Estadual de Campinas, informadas continuamente pela Internet. Um termopar tipo J mede a temperatura do ar fluindo. Manômetros tipo Bourdon e termopares permitem uma verificação de redundância destes parâmetros digitais automáticos bem como um monitoramento visual da correta operação do circuito. As frações de vazio para as mesmas condições de operação foram calculadas de acordo com Dias *et al.* (2000).

3.2 Instrumentação Ultra-Sônica

A Figura 2 mostra um esquemático da instrumentação na seção de teste. Dois adaptadores em *plexiglass*, com 40 mm e 10 mm de comprimento, foram desgastados com o uso de máquinas em um dos lados para se adaptar exatamente à superfície externa dos dutos de *plexiglass*. Os transdutores de ultra-som, emissor e receptor, foram então fixados nas superfícies opostas dos adaptadores de 40 mm e 10 mm, respectivamente; particularmente para o transdutor emissor esta montagem garante que o campo próximo do campo acústico localize-se no bloco de 40 mm de *plexiglass*, e não no escoamento bifásico (Panametrics, 2005). Uma fina camada de gel foi aplicada à face frontal dos transdutores antes da montagem para melhorar o acoplamento acústico do arranjo. O trajeto ultra-sônico emissor-receptor é composto por 40 mm de bloco de acrílico no lado do emissor, 3 mm de acrílico da parede do duto, 54 mm de escoamento bifásico dentro do duto, mais 3 mm de acrílico da parede do duto, e 10 mm de bloco de acrílico no lado do receptor. Em outras palavras, o caminho completo percorrido pela onda ultra-sônica consiste de um segmento de 43 mm através do acrílico na parte do emissor, 54 mm através do escoamento, e outro segmento de 13 mm através do acrílico na parte do receptor. Ao se verificar o tempo de trânsito da onda ultra-sônica a espessura da camada de gel foi desconsiderada.

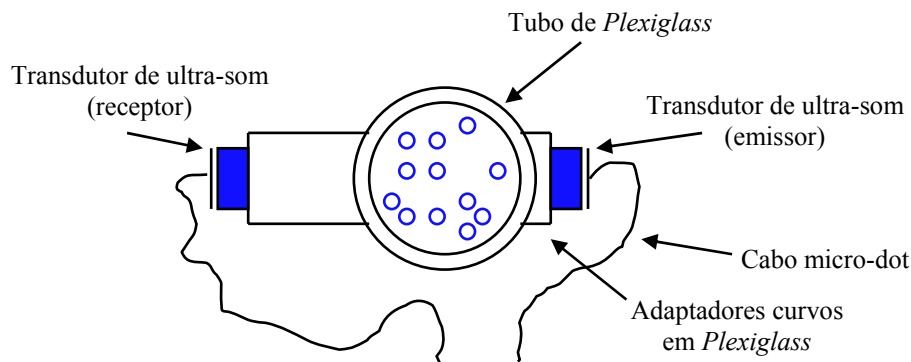


Figura 2. Montagem da instrumentação ultra-sônica.

O transdutor emissor gera um pulso de ultra-som dentro da faixa recomendada para sinais transmitidos na água. Para a excitação dos transdutores e aquisição dos sinais de ultra-som provenientes dos receptores foi usado um sistema desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná com 3 canais de ultra-som no modo transmissão-recepção. Neste sistema apenas um canal foi utilizado. O sistema é capaz de excitar um transdutor de ultra-som a uma frequência de 4,1 kHz, frequência suficiente para se observar as variações ocorridas durante o escoamento. A aquisição dos sinais pode ser realizada a uma taxa de 20, 40 ou 80 MSPS (milhões de amostras por segundo) e os sinais adquiridos são guardados em memória com capacidade de 64 Mbytes para posteriormente serem transferidos a um computador via interface USB 2.0. No computador os dados são armazenados em arquivos que podem ser lidos em softwares para análise e tratamento de sinais, como o MATLAB e similares.

3.3 Características do Sinal de Ultra-som em Escoamento Bifásico

O sinal de ultra-som é gerado excitando-se um transdutor piezelétrico com um sinal elétrico. Do mesmo modo, quando estes transdutores recebem um sinal de ultra-som é possível medir uma variação de sinal elétrico. Como o sinal de ultra-som emitido atravessa um percurso no sistema, o sinal recebido carrega diversas informações sobre a influência do padrão de escoamento na onda de ultra-som. Assim, analisando-se características da onda de ultra-som recebida é possível obter informações sobre o material ou escoamento que está sendo investigado.

As medidas básicas realizadas nos sinais de ultra-som são as seguintes (Bond *et al.*, 2003):

- Amplitude do sinal;
- Tempo de chegada do sinal.

Através das medidas da atenuação de amplitude do sinal determina-se a perda de energia que o sinal sofreu durante seu percurso. Em líquidos homogêneos esta perda se dá principalmente devido à viscosidade do líquido e a sua condutividade térmica, chamadas de atenuação clássica (Cheeke, 2002). Também ocorre redução de intensidade do sinal quando este encontra interfaces durante seu percurso, ocasionando reflexões do sinal.

Em escoamentos gás líquido borbulhante, a energia média tem uma dependência exponencial em relação à fração de vazios (Xu *et al.*, 1985) devido a perdas por espalhamento do sinal de ultra-som.

Outra característica que é alterada no sinal de ultra-som é o tempo que a onda de ultra-som leva para atravessar o meio. Este tempo, chamado de tempo de trânsito, é utilizado para calcular a velocidade do som.

Em geral, a velocidade do som em um meio depende da frequência fundamental do pulso ultra-sônico. Nestes casos é importante levar em consideração as diferentes velocidades apresentadas pelo sinal, como a velocidade de fase (velocidade de uma componente de frequência), velocidade de grupo (velocidade do centro do pulso) e velocidade de propagação (velocidade da frente de onda) (Wear, 2000).

Geralmente para realizar medidas da velocidade da onda de ultra-som no meio utiliza-se o tempo de trânsito do sinal comparando-o com alguma referência onde este tempo é previamente conhecido. Para se determinar o tempo de trânsito normalmente utiliza-se alguma marca no sinal tais que (Wear, 2000):

- Primeiro desvio detectável do zero;
- Limiar de 10 % do máximo valor;
- Limiar de 3 desvios padrões do ruído;
- Primeiro cruzamento com zero;
- Cruzamento “específico” com zero;
- Primeiro ao quarto cruzamento com zero;
- Primeiro ou segundo máximo ou mínimo do sinal;
- Cruzamento com zero da primeira inclinação negativa.

Além das marcas citadas acima é possível medir este tempo através das seguintes técnicas abaixo:

- Pico da envoltória;
- Atraso na correlação com um sinal de referência.

Estas formas de medidas resultam em uma velocidade que está entre a velocidade de grupo e a velocidade de propagação. Em sistema água-ar, com temperatura constante, utilizando ondas de ultra-som na faixa dos MHz, o tempo de trânsito da onda é praticamente o valor do tempo de trânsito na água pura (Hoppe *et al.*, 2001). Mas embora não haja alteração no tempo de trânsito, diversos pesquisadores (Hoppe *et al.*, 2001, Gulshc *et al.*, 2005, Carvalho *et al.*, 2007) encontraram alterações na forma de onda recebida que atravessa o escoamento bifásico em relação à onda ultra-sônica que passa pela água pura. Estas alterações, aliadas a algumas das técnicas citadas, como por exemplo o cruzamento com zero, podem levar à conclusão errônea de que o tempo de trânsito está se alterando. Desta forma, a escolha da técnica de medição pode influenciar o sucesso dos experimentos. Hoppe *et al.* (2001) e Gulshc *et al.* (2005) também estudaram maneiras de contornar estas mudanças no formato da onda para compensar medidas de tempo de trânsito, e assim obter um valor de velocidade da onda de ultra-som que não se altere para escoamentos bifásicos água-ar. Esta alteração no formato da onda indica uma dependência da velocidade de fase do som com a frequência. Esta dependência é representada pela relação de dispersão, onde a velocidade de fase é dependente da frequência.

4. RESULTADOS

4.1 Medidas da Energia Média e Amplitude Máxima

A Figura 3 apresenta os resultados da razão de energia média e de amplitude máxima do sinal de ultra-som na faixa de fração de vazio de 0 % a 15 %. Foram realizados 10 experimentos para cada fração de vazio num total de 160. É verificado que a energia média decresce exponencialmente estando de acordo com Xu *et al.* (1985). Também se verifica o fim deste decaimento a partir de 11% de fração de vazio, isso ocorre provavelmente devido a aglomeração das bolhas em estruturas maiores, indicando a possibilidade de se usar estas variáveis para determinar a mudança do padrão de escoamento.

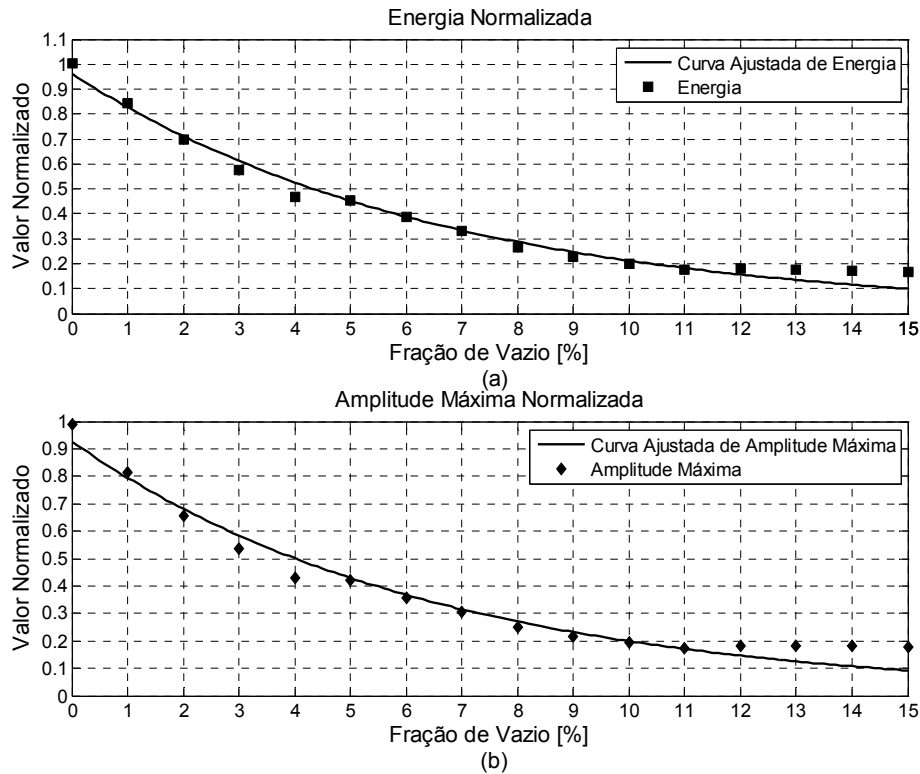


Figura 3. Energia e amplitude máxima normalizada.

Para se obter um modelo de decaimento exponencial, os pontos das curvas acima foram ajustados em duas funções exponenciais similares:

$$E(\alpha) = 0.9624 \times e^{-15.12 \times \alpha} \quad (1)$$

$$r^2 = 0.9830$$

$$AMax(\alpha) = 0.9271 \times e^{-15.39 \times \alpha} \quad (2)$$

$$r^2 = 0.9672$$

Onde:

- E : Energia normalizada do sinal de ultra-som em relação à água pura;
- AMax : Amplitude máxima do sinal de ultra som normalizada em relação à água pura;
- α : Fração de vazio;
- r : Coeficiente de correlação de Pearson.

O decaimento exponencial destas curvas, de acordo com Xu *et al.* (1985, citando Mason *et al.*, 1976), é o coeficiente de atenuação da pressão acústica que pode ser separado em duas parcelas, uma devido à absorção do meio e a outra devido ao espalhamento causado pelas bolhas de ar. Este coeficiente depende de diversos fatores, como a fase contínua do escoamento, geometria da tubulação e geometria das bolhas.

4.2 Alterações no Formato da Onda de Ultra-som

Para cada conjunto de experimentos foi realizada uma média do sinal, utilizando 71680 sinais de ultra-som que foram adquiridos em 10 experimentos para cada fração de vazios, obtendo um sinal médio para cada fração de vazio. Estas médias foram amostradas a 20 MHz e depois interpoladas 10 pontos entre cada ponto amostrado, o que é equivalente a uma taxa de amostragem de 200 MHz. Estas curvas, apresentadas na Figura 4a, demonstram o comportamento médio da onda de ultra-som para cada fração de vazio ensaiada. Como pode ser observado nesta figura, para os diversos escoamentos existe uma redução na intensidade do sinal, concordando com os cálculos anteriores de energia e amplitude. Os sinais foram em seguida normalizados pelo primeiro vale da onda, como em Hoppe *et al.* (2003), pois o início do sinal sofre menor influência do escoamento bifásico. Com esta normalização observa-se uma distorção no formato da onda (Figura 4b). Esta distorção é acentuada nos dois lóbulos finais do sinal, apresentando deformação em seu formato no sentido do eixo y. Observa-se também

que o pacote de onda inicia e termina no mesmo tempo independente da fração de vazios, indicando que o sinal mantém sua velocidade de grupo e de propagação.

Para analisar o formato do espectro de frequência do sinal é aplicada a transformada de Fourier normalizando seu módulo em relação a seu valor em 0 dB. Com isto é possível verificar como as modificações no tempo influenciam no domínio da frequência (Figura 4c). Observa-se que formato do espectro de frequência praticamente não se alterou em função da fração de vazios, apesar da onda ter se modificado no domínio do tempo. Esta pequena alteração no formato do espectro não está associada à mesma alteração que ocorreu no sinal normalizado no domínio do tempo, já que a Transformada de Fourier é calculada em uma janela temporal, gerando uma média das frequências que vão aparecendo em tempos diferentes.

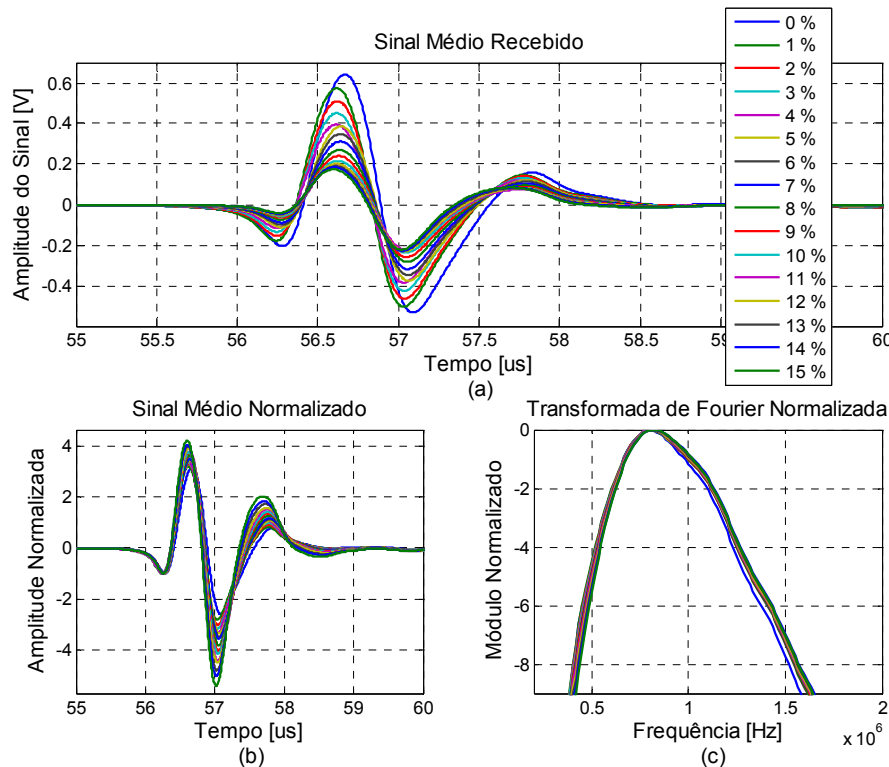


Figura 4. Sinal médio para várias frações de vazio.

4.3 Medidas de Tempo de Trânsito

A fim de se selecionar o melhor método para medição de tempo de trânsito, uma avaliação dos diversos métodos de cálculo de tempo de trânsito é apresentada na Figura 5, onde se observa para cada método, um tempo médio diferente. Essa diferença gera cálculos de velocidade do som diferentes, onde a velocidade calculada está entre a velocidade do sinal e a velocidade de grupo. Também se observa que o tempo de trânsito se mantém praticamente constante para cada método. As flutuações em relação a uma média nos valores provavelmente são devido a alteração na temperatura da água durante o experimento, onde as medidas de 1 a 4 % de fração de vazios foram realizadas com a água em 27,5 °C e as outras medidas a 27,9 °C. Em Belogol'skii *et al.* (1999) a variação de velocidade do som entre 27 °C e 28 °C é de 1501,90 m/s para 1504,39 m/s. Esta flutuação de 0,996 m/s equivale a uma variação de aproximadamente 0,24 μ s no tempo de trânsito.

4.4 Envolvimento do Sinal de Energia

Outra variável que pode ser analisada é o comportamento da energia do sinal. Durante o escoamento, uma quantidade aleatória de bolhas atravessa o caminho do sinal de ultra-som. Esta quantidade em conjunto com sua forma estabelece um padrão de escoamento. A passagem aleatória de bolha no caminho do feixe de ultra-som provoca flutuações aleatórias na energia do sinal que chega ao transdutor. A Figura 6 mostra estas flutuações para escoamentos com 2 % e 8 % de fração de vazio durante a aquisição de 7168 sinais em 1,75 s. Cada ponto representa a energia calculada de um sinal de ultra-som recebido. Esta figura também indica a média móvel do sinal que se estabilizou com um pouco mais de 1000 pontos, o que equivale a aproximadamente 250 ms. A taxa de 4100 ondas por segundos foi suficiente para captar o comportamento aleatório da passagem das bolhas. Observa-se no escoamento de 8 % que em alguns pontos, como próximo ao ponto 2000, o sinal de ultra-som é

totalmente bloqueado. Isso ocorre porque as bolhas se aglomeram e formam estruturas maiores, bloqueando inteiramente o sinal de ultra-som. Este padrão aleatório pode indicar qual padrão de escoamento está atravessando a tubulação. No entanto ainda são necessários outros estudos mais criteriosos que permitam associar um comportamento aleatório a uma fração de vazio nos diversos padrões de escoamento.

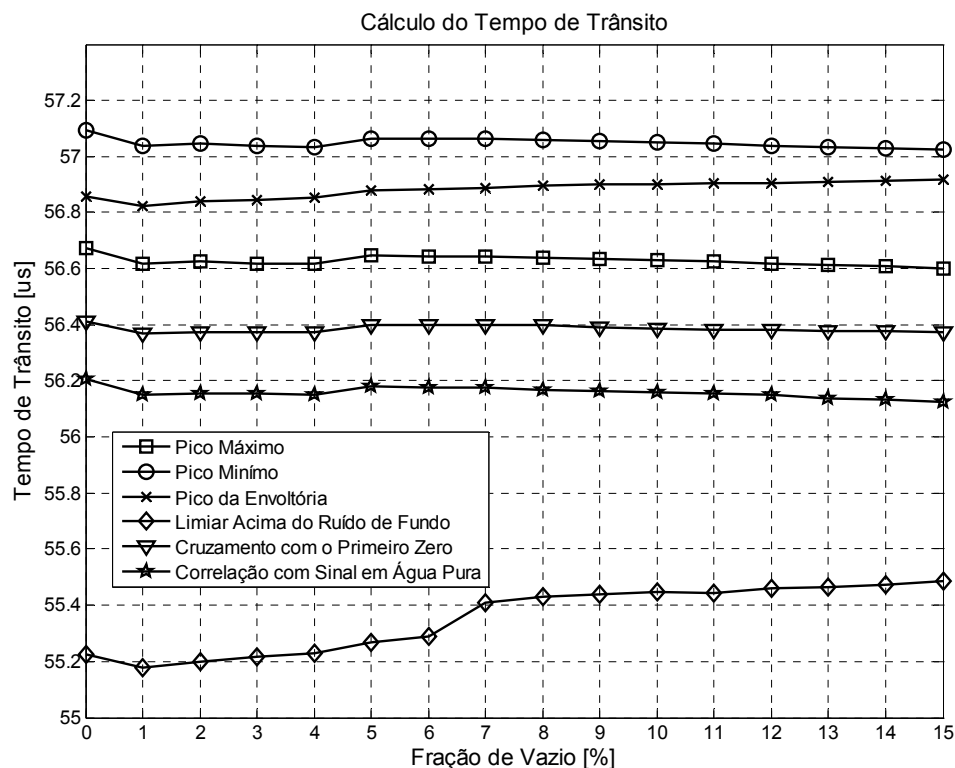


Figura 5. Gráfico tempo de trânsito versus fração de vazio para diferentes métodos de cálculo.

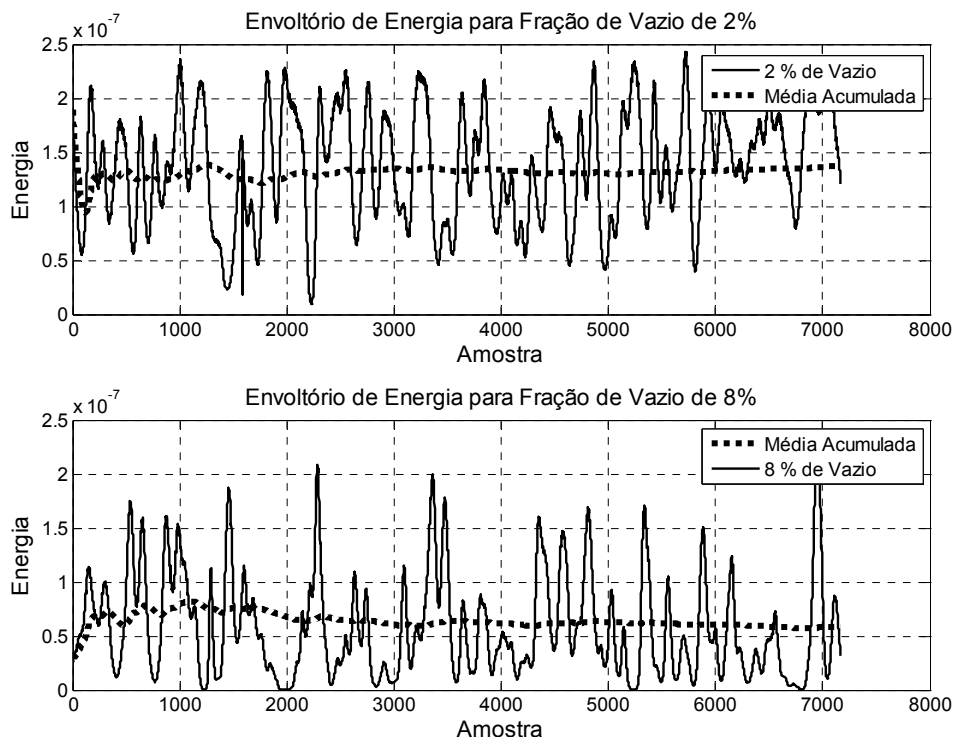


Figura 6. Envoltório da energia do sinal para $j_{\text{água}} = 26 \text{ cm/s}$.

5. CONCLUSÃO

Foram realizados 160 ensaios com frações de vazios de 0 a 15 %. Para cada ensaio foram adquiridas 7168 ondas, o equivalente a 1,75 s de aquisição contínua. O dispositivo de aquisição desenvolvido para esta aplicação permitiu captar um padrão aleatório na energia que chega ao transdutor de recepção. O valor da energia do sinal aliado a uma técnica de classificação como, por exemplo, Redes Neurais Artificiais, poderá ser usado futuramente para detectar qual o tipo de escoamento está fluindo por uma tubulação. Também foi observado que o escoamento bifásico altera o formato do sinal de ultra-som que atinge o receptor. Esta mudança ainda não foi correlacionada com a fração de vazio, mas ela foi detectada no domínio do tempo indicando que o sinal está sofrendo dispersão devido ao meio. O módulo do espectro não fornece informações suficientes para analisar o escoamento bifásico. Uma análise em frequência e tempo como, por exemplo, a Transformada de *Wavelet*, pode fornecer informações mais precisas sobre o processo de dispersão que está ocorrendo.

Em relação ao tempo de trânsito é evidente que dependendo do método pelo qual este é calculado altera-se o valor final obtido. Também se observou que a velocidade de grupo e a velocidade do sinal não são alteradas pelo escoamento bifásico. Entretanto a velocidade de fase pode ser um indicador da dispersão causada pelas bolhas de ar, pois como há alteração no formato da onda, algumas componentes de frequências estão viajando a uma velocidade diferente do que atravessava a água pura.

A análise da energia do sinal está de acordo com a literatura, mas é limitada ao sistema para o qual foi calibrado. Assim para se utilizar o ultra-som na medida de fração de vazios deve-se aliar diversas técnicas e analisar as diversas variáveis da onda de ultra-som, para se obter um sistema robusto, confiável e facilmente calibrável permitindo futuras instalações em campos de produção.

A continuação deste trabalho requer o entendimento dos fenômenos acústicos em situações mais complexas, voltadas para as necessidades das aplicações reais, como escoamentos de líquido com sólido particulado, de água com óleo disperso e de água com óleo e sólido particulado disperso, e ainda escoamentos líquido-sólido-gás. Estas informações devem permitir uma análise de viabilidade do desenvolvimento de sondas ultra-sônicas não-intrusivas para medição multifásica e caracterização de escoamentos em situações reais da indústria petrolífera.

6. AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP – da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT (UTFPR-PRH10).

Os autores agradecem também o apoio proveniente da PETROBRAS, que tornou possível este estudo.

7. REFERÊNCIAS

- BELOGOL'SKII, V. A.; SEKOYAN, S. S.; SAMORUKOVA, L. M.; STEFANOV, S. R.; LEVTSOV, V. I. Pressure dependence of the sound velocity in distilled water. **Acoustical Measurements**. Kluwer Academic/Plenum Publishers, v.42 n.4, p.66-69, april 1999.
- BOND, L. J.; MORRA, M.; GREENWOOD, M. S.; BAMBERGER, J. A.; PAPPAS, R. A. Ultrasonic technologies for advanced process monitoring, measurement, and control. **Proceedings 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference**. Vail: IEEE, v.3, p.1288-1293, may 2003.
- CARVALHO, R. D. M.; VENTURINI, O. J.; NEVES JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; FRANÇA, F. A. Experimental Study of ultrasonic signals characteristics in air-water bubbly flows. **5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics**. South Africa, v.1, p.42-47, may 2007.
- CHEEKE, J.; DAVID N. **Fundamental and Application of Ultrasonic Waves**. United States: CRC Press LLC, 2002.
- CHANG, J. S.; ICHIKAWA, Y.; IRONS, G. A. Flow Regime Characterization and liquid film thickness measurement in horizontal gas-liquid two-phase flow by an ultrasonic method. **AIAA/ASME Joint Plasma Thermophysics HTC**. Hong Kong: Elsevier, v.2, p.12-17, may 1982.
- DIAS, S.; FRANÇA, F. A.; ROSA, E. S. Statistical Method to Calculate Local Interfacial Variables in Two-Phase Bubbly Flows Using Intrusive Crossing Probes. **International Journal of Multiphase Flow**, vol. 26 (11), p. 1797-1830, 2000.
- DONG, F.; XU, Y.; HUA, L.; WANG, H. Two methods for measurement of gas-liquid flows in vertical upward pipe using dual-plane ERT system. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.55 n.5, p.1576-1585, october 2006.
- GULSCH, M.; HENNING, B. Bubble detection and gas volume measurement in bubble loaded liquids with pulse driven measurement devices. **IEEE Ultrasonics Symposium**, v.2, p.780-782, september 2005.

- HOPPE, N.; SCHÖNFELDER, G.; PÜTTMER, A.; HAUPTMANN, P. Ultrasonic Density Sensor – Higher Accuracy by Minimizing Error Influences. **IEEE Ultrasonics Symposium**, v.1, p.361-364, october 2001.
- HUANG, Z.; WANG, B.; LI, H. Application of electrical capacitance tomography to the void fraction measurement of two-phase flow. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.52 n.1, p.7-12, february 2003.
- JONES, S. W.; AMBLARD, A.; FAVREAU, C. Interaction of an ultrasonic wave with a bubbly mixture. **Experiments in Fluids**. France: Elsevier, v.4, p.341-349, may 1986.
- MURAKAWA, H.; KIKURA, H.; ARITOMI, A. Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies. **Experimental Thermal and Fluid Science**. Tokyo: Elsevier, v.29, p.843-850, may 2005.
- PANAMETRICS. Technical Notes, p.40, 2005.
- SUPARDAN, M. D.; MASUDA, Y.; MAEZAWA, A.; UCHIDA, S. The investigation of gas holdup distribution in a two-phase bubble column using ultrasonic computed tomography. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier B. V., v.10, p.1016-1025, october 2006.
- VATANAKUL, M.; ZHENG, Y.; COUTURIER, M. Application of ultrasonic technique in multiphase flow. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v.43, p.5681-5691, june 2004.
- WEAR, K. A. The effects of frequency-dependent attenuation and dispersion on sound speed measurements: applications in human trabecular bone. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.47 n.1, p.265-273, january 2000.
- WYLIE, S. R.; SHAW, A.; AL-SHAMMA'A, A. I. RF Sensor for multiphase flow measurement through an oil pipeline. **Measurement Science and Technology**. United Kingdom: IOP Publishing Ltd, v.17, p.2141-2149, february 2006.
- XU, L. A.; GREEN, R. G.; PLASKOWSKI, A.; BECK, M. S. The pulsed ultrasonic cross-correlation flowmeter for two-phase flow measurement. **Journal of Physics and Scientific Instrumentation**, v.21, p.406-414, february 1988.
- ZHENG, Y.; ZHANG, Q. Simultaneous measurement of gas and solid holdups in multiphase systems using ultrasonic technique. **Chemical Engineering Science**, v.59, p.3505-3514, may 2004.

VOID FRACTION MEASUREMENTS IN BUBBLY TWO-PHASE FLOWS USING ULTRASOUND

Two-phase flows are frequently found in production columns and pipes at oil-wells. Offshore production results in long distance transportation of gas-liquid mixtures before both phases can be separated. Therefore, to improve oil production performance there is a need to test the different equipment, like Subsea Centrifugal Pumps for instance, at the several flow conditions to determine the equipment's optimum project and operating parameters. Since oil is a hueless medium, image based techniques don't apply to void fraction determination on two-phase flows. Therefore, a study of the interaction among two-phase flows and the acoustic field is a need to determine which kind of oil-gas flows are running through the pipes and to test the equipment. Ultrasonic instrumentation has many advantages like robustness, non-invasiveness and transducer simplicity, allowing its use on oil wells. This paper presents the results obtained from testing on two-phase air-water flows from zero to 15% void fraction in vertical circular section piping using pulsed ultrasound techniques and transmit-receive mode for to understand the interaction between the ultrasonic wave and the two-phase flow and then measure the flow's void fraction. From the received signal numeric and digital signal processing techniques are used to study it. Among the studied parameters are the signal's average energy, fly time, the received signal's contour and Fourier Transform. The resulted data are treated and compared to high speed image recordings of the flow to validate its pattern. In the future, glycerin-gas and oil-gas flows will be studied for to obtain phenomenological understanding in flows containing more viscous liquids and approach the real oil producing wells situation.

two-phase flows, ultrasound, instrumentation

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.