

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Utilização da técnica ultrassônica para medição da concentração da fase dispersa em misturas bifásicas óleo-ar e óleo-água

AUTORES:

GONÇALVES, José L.; ISNARD, Ricardo P. D.; COSTA, Gabriel C.; CARVALHO, Ricardo D. M.

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI
Instituto de Engenharia Mecânica
Av. BPS, n 1303 – 37500-093, Pinheirinho. Fone: +55-35-3629-1304

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA PARA MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DA FASE DISPERSA EM MISTURAS BIFÁSICAS ÓLEO-AR E ÓLEO-ÁGUA

Resumo

A técnica ultrassônica vem recebendo cada vez mais atenção nos últimos anos como método de medição multifásica na indústria petrolífera por ser não invasiva, de resposta rápida e passível de ser usada em ambientes hostis. Neste contexto, este trabalho apresenta dados de atenuação acústica em misturas óleo-ar e óleo-água (óleo fase contínua) para concentrações de até 12% da fase dispersa. A fim de se obter também imagens dos padrões de escoamento, os experimentos foram realizados em uma tubulação de Plexiglas de 54 mm de diâmetro; óleo mineral USP foi utilizado para simular o petróleo. Os padrões de escoamentos para os dois tipos de mistura são então discutidos e comparados bem como a possível correlação entre a atenuação acústica e a concentração da fase dispersa.

Abstract

The ultrasonic technique has been receiving increasing attention in the past years because as a possible multiphase flow meter in the oil industry because it is noninvasive, fast responding, and suitable for operation in harsh environments. In this context, this paper presents acoustic attenuation data for oil-continuous oil-air and oil-water mixtures for concentrations up to 12%. In order to obtain visual data, the experiments were conducted in a 54-mm diameter Plexiglas pipe; USP mineral oil was used to simulate. The flow patterns for both mixtures are then discussed and compared as well as the possible correlation between the acoustic attenuation and the dispersed phase concentration.

Introdução

Uma vista simplificada de uma instalação de produção de óleo e gás é mostrada na Figura 1. As cabeças de poço à esquerda alimentam as linhas de teste e produção; o restante da figura corresponde à instalação de separação de óleo e gás (GOSP) propriamente dita. Muitas vezes, o fluxo do poço consiste de uma grande variedade de hidrocarbonetos e componentes indesejáveis como água, dióxido de carbono (CO_2), sais, enxofre (S) e areia [1]. Neste ponto, a medição monofásica de alta precisão fornece valores para a produção de hidrocarbonetos. A necessidade de medição multifásica (MFM) surge quando é necessário ou desejável proceder à medição do escoamento a montante dos separadores. Métodos de MFM possibilitam a medição de escoamentos multifásicos não processados em posições muito próximas ao poço, permitindo o monitoramento contínuo do desempenho do poço e, desta forma, melhorar a exploração e drenagem do poço. De maneira geral, as técnicas de medição multifásica devem ser de resposta rápida e não invasivas. A técnica ultrassônica cumpre esses requisitos, podendo fornecer as informações desejadas sobre as vazões das fases. Transdutores ultrassônicos e a eletrônica envolvida são prontamente disponíveis comercialmente a custos relativamente baixos; esses sistemas são também compactos e robustos. O inconveniente das técnicas ultra-sônicas atuais é a necessidade de aferição dos valores de atenuação acústica em função da concentração das fases dispersas. No entanto, outras técnicas de MFM também têm a mesma limitação e isto não deve ser um motivo para não se dar a devida importância ao grande potencial exibido pela técnica ultrassônica. Como contribuição ao desenvolvimento da técnica ultrassônica para aplicação na indústria petrolífera, este trabalho apresenta dados de atenuação acústica em misturas óleo-ar e óleo-água (óleo fase contínua) para concentrações de até 12% da fase dispersa. Os padrões de escoamentos observados para os dois tipos de mistura são então discutidos e comparados bem como a possível correlação entre a atenuação acústica e a concentração da fase dispersa. Finalmente, é feita uma avaliação do potencial da técnica ultrassônica para medição nestas misturas bifásicas.

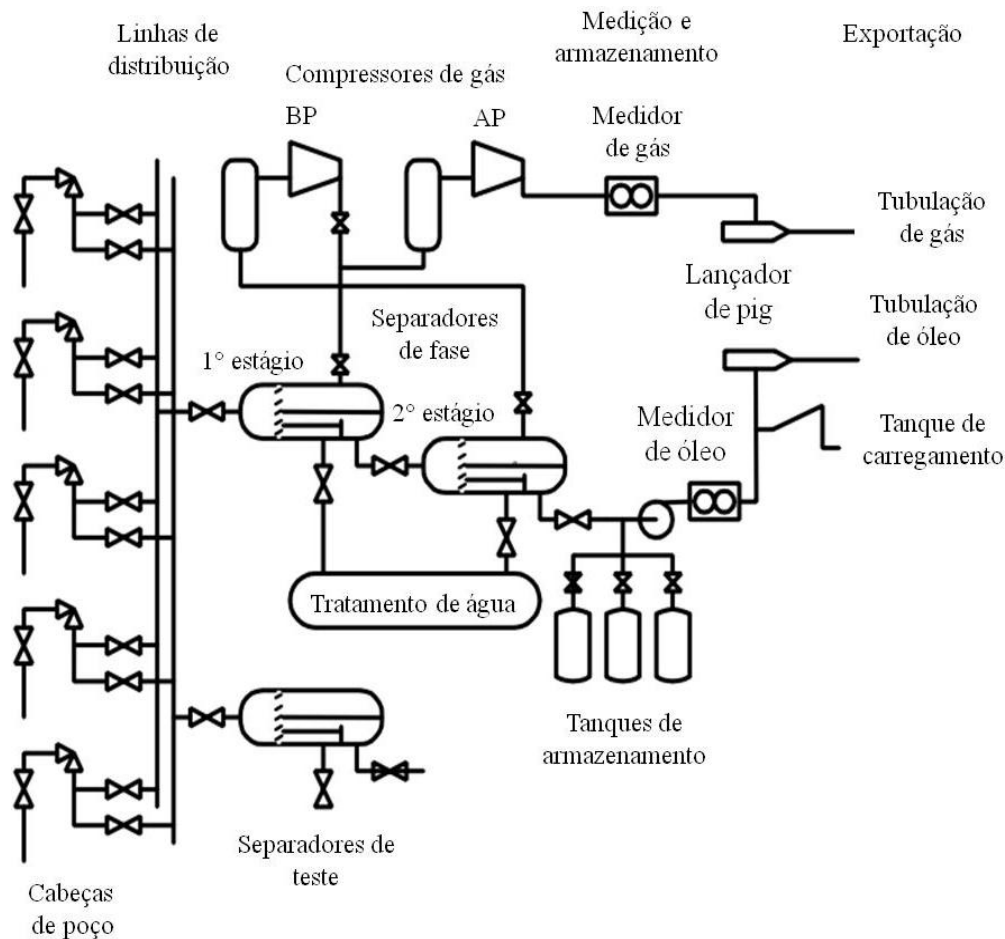


Figura 1. Vista esquemática de uma planta de produção de óleo e gás – adaptado de [2].

Dispositivo Experimental e Procedimento de Teste

O dispositivo experimental construído para a aquisição de dados ultrassônicos em escoamentos água-ar e em suspensões de areia em água já foi descrito anteriormente [3, 4]. Na presente investigação, devido à dificuldade de se trabalhar com óleo, foi projetado e construído um dispositivo experimental mais simples (Figura 2). O objetivo principal era certificar-se de que sinais ultrassônicos confiáveis e repetitivos poderiam ser obtidos a partir dos quais poderiam ser deduzidas informações sobre o padrão do escoamento e concentração das fases dispersas. Referindo à Figura 2, um segmento de tubulação de Plexiglas com 2,5 m de comprimento e 54 mm de diâmetro interno foi montado verticalmente em uma base contendo um meio poroso e pelo qual ar era borbulhado no óleo em repouso. Óleo mineral USP ($814,5 \text{ kg/m}^3$ e $41,36 \text{ mPa.s}$ a 20°C) foi usado para simular petróleo. O ar borbulhado era descarregado na atmosfera pelo topo da tubulação e sua vazão monitorada por rotâmetros Rheotest Haake 513. A fração de vazio média era calculada pelo inchamento da coluna de óleo. Água proveniente de um reservatório com nível constante também era alimentada pelo topo da tubulação e sua vazão controlada por meio de uma válvula globo. A descarga da água pela base da tubulação era ajustada por meio de outra válvula globo de modo que a vazão através da massa de óleo permanecesse constante. A fração de água no tubo também foi medida pelo inchamento na coluna de óleo. A seção de testes onde foram posicionados os sensores ultrassônicos localizava-se aproximadamente 1 m abaixo da extremidade superior do tubo a fim de manter a mistura mais uniforme e menos perturbada na posição da tomada de dados. A temperatura da mistura era medida por um termômetro digital com resolução de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ localizado 0,5 m abaixo da extremidade superior do tubo.

Transdutores ultra-sônicos Panametric Videoscan de 2,25 MHz foram montados em suportes conforme mostrado na Figura 2. Esta configuração foi projetada com base na hipótese de que a maior parte da energia acústica transmitida seria capturada pelo receptor de transmissão direta ($\theta = 180^\circ$) enquanto o transdutor de duplo elemento emissor/receptor ($\theta = 0^\circ$) receberia informações complementares sobre as reflexões nas heterogeneidades presentes no caminho ultrassônico. Os sensores laterais ($\theta = 45^\circ$ e 135°) receberiam pelo menos parte da energia dispersa para as laterais e, assim, forneceriam informações adicionais a respeito da interação entre a onda ultrassônica e o escoamento bifásico. As frações de vazio testadas para as misturas óleo-ar variaram entre 0 e 12% em passos de 1%; o borbulhamento de ar no topo da coluna de óleo dificultava a leitura da altura da coluna e, por esta razão, a incerteza nos valores correspondentes de fração de vazio variou de cerca de 0,7% para baixas frações de vazio a 1,4% para frações de vazio acima de 6%. A fração de água nos experimentos com misturas óleo-água variou de 0 a 12% também em passos de 1% e a incerteza nestes valores foi estimada em cerca de 0,25%. A taxa de aquisição de dados ultrassônicos foi mantida em 20 MHz a fim de evitar quaisquer efeitos de “aliasing”. O período de amostragem e a taxa de geração de pulsos foram de 1,5 segundos e 2 kHz, respectivamente, o que perfaz 3000 pulsos em cada amostra acústica. Seis amostras foram obtidas para cada condição de operação. As razões de energia aqui apresentadas são as médias dessas amostras e o intervalo de incerteza associado foi calculado para nível de confiança de 90%. No cálculo das razões de energia acústica, os sinais de referência para os sensores a 0° e 180° foram aqueles obtidos para óleo monofásico, condição para a qual tem-se o máximo de energia recebida por estes transdutores. Para os sensores a 45° e 135° , a referência utilizada foram os sinais obtidos para 10% de fração de vazio em misturas óleo-ar e 12% de concentração de água em misturas óleo-água, condições estas para as quais também tem-se o máximo de energia recebida por estes mesmos sensores. Para óleo monofásico, os sensores a 45° e 135° não recebem energia acústica já que não há heterogeneidades para dispersar a energia acústica para os lados e, portanto, esta condição não pode servir de referência para estes transdutores. As medidas de temperatura foram feitas no começo e fim de cada série de testes para obtenção das propriedades físicas dos fluidos. Os dados ultrassônicos foram adquiridos por meio de uma placa de aquisição de dados PXIe- 1062Q da *National Instruments*, utilizando-se o programa computacional LabView como interface. Os dados foram armazenados em planilhas do Microsoft Excel e tratados posteriormente no programa MatLab a fim de se reduzir o ruído nos sinais.

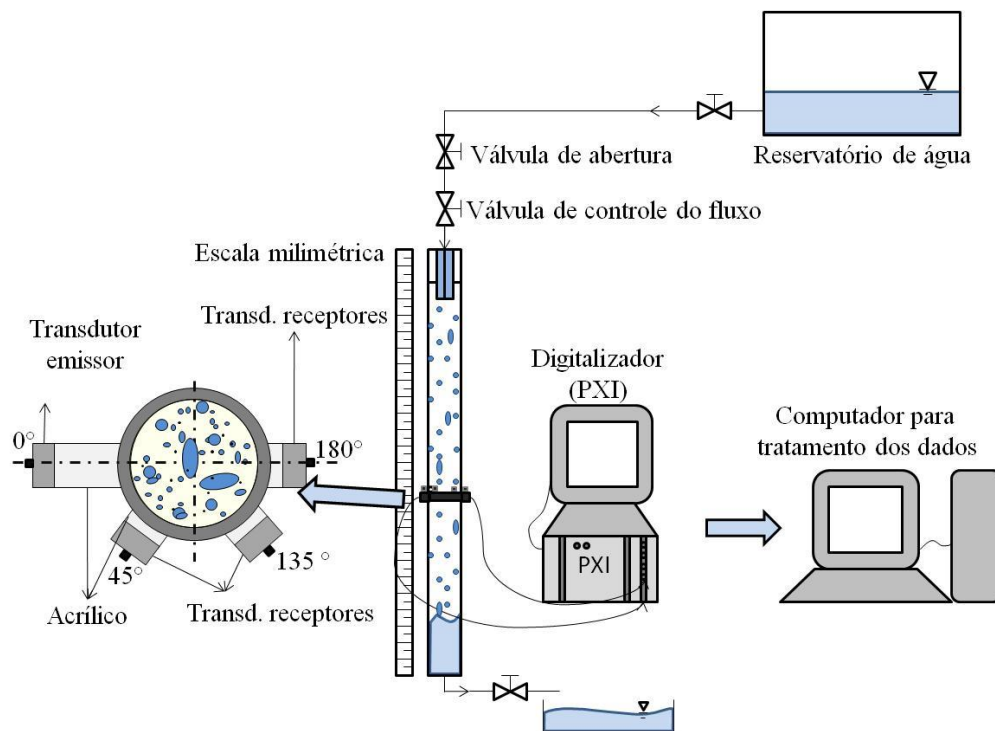


Figura 2. Vista esquemática do dispositivo experimental.

Resultados e Discussão

Padrões de Escoamento e Sinais Ultrassônicos Típicos no Sensor a 180° em Misturas Bifásicas Líquido-Gás e Líquido-Líquido

Inicialmente, foram obtidos dados para misturas óleo-ar e óleo-água em tubos de Plexiglas a fim de se proceder a uma avaliação visual da evolução dos padrões de escoamento com o aumento da concentração da fase dispersa (Figura 3 e Figura 4). Nas misturas óleo-ar, observou-se que, até 3% de fração de vazio, bolhas com diâmetro de aproximadamente 10 mm se mostravam bem distribuídas pela seção transversal da tubulação (Figura 3a). Para cerca de 4%, as bolhas coalesciam em calotas (“cap bubbles”) e escoavam acompanhadas de bolhas bem pequenas ($0,1 < d < 2\text{mm}$) como mostrado na Figura 3b. Em todas as séries de medidas, a população destas pequenas bolhas aumentou com o aumento da fração de vazio. Em cerca de 8% de fração de vazio, apareceram os primeiros pistões de ar acompanhados por uma quantidade bem maior de bolhas pequenas ($0,1 < d < 2\text{mm}$) do que a quantidade observada entre 4% e 8% (Figura 3c).

Com relação às misturas óleo-água, com o aumento da fração de água observou-se que o número de gotas aumentava rapidamente enquanto seu tamanho médio diminuía (Figura 4). Em até 3% de fração de água, as gotas apresentaram diâmetros entre 0,5 e 1,3 cm e seguiam uma trajetória regular de queda (Figura 4a). Entre 3 e 10%, as gotas de água se dividiam logo na injeção da água na extremidade superior da coluna de óleo. Isto intensificou o aparecimento de bolhas com diâmetros menores ($d \sim 0,2\text{ cm}$), havendo também a presença de bolhas com diâmetros entre 0,5 e 1,3 cm (Figura 4b). Para concentrações acima de 10% de frações de água, observou-se a coalescência de gotas com a formação de pequenas calotas; observou-se também a predominância em número de bolhas pequenas ($d \sim 0,2$) causada principalmente pela quebra das gotas. A água escoava, portanto, na forma de uma mistura de bolhas pequenas ($d \sim 0,2$), bolhas médias ($d \sim 0,8$) e pequenas calotas ($d \sim 2,5\text{ cm}$) – Figura 4c.

A fim de relacionar a atenuação acústica com estes subpadrões de escoamento e com a concentração das fases dispersas, analisou-se primeiramente um sinal acústico típico para a fase contínua monofásica (apenas óleo). Uma vez que o sensor a 180° é tido como aquele que carrega as principais informações sobre o escoamento, esta análise é feita em termos deste sensor (Figura 5). A Figura 5a mostra um sinal típico obtido em óleo monofásico. O disparo corresponde ao instante em que o pulso ultrassônico deixa o sensor emissor. O primeiro pulso a chegar ao sensor a 180° é a onda longitudinal que atravessa o escoamento e é atenuada por este e pelos elementos em Plexiglas (tubulação e suportes). O segundo pulso que chega é a onda transversal gerada quando a onda longitudinal atinge a interface entre o óleo e a tubulação de acrílico logo antes do sensor a 180°. A onda transversal se propaga a uma velocidade menor e, por conseguinte, atinge o sensor após a onda longitudinal. Medindo-se o tempo entre o disparo e o instante em que a onda longitudinal começa a chegar ao transdutor a 180° (tempo de trânsito inicial) e conhecendo-se o comprimento deste trajeto acústico, foi possível calcular a velocidade de propagação da onda longitudinal no óleo USP. O valor obtido foi $1422 \pm 3\text{m/s}$ a 24,5 °C. Este valor é importante para outras análises do tempo de trânsito da onda nos escoamentos multifásicos.

A Figura 5b e a Figura 5c mostram a onda longitudinal ampliada para diferentes concentrações da fase dispersa em misturas óleo-ar e óleo-água, respectivamente. Observou-se que, nas misturas óleo-ar, valores crescentes da fração de vazio atenuam gradualmente a amplitude dos vários picos positivos e negativos ao mesmo tempo em que estes vão sendo deslocados mais para a direita, isto é, a energia demora mais para chegar ao transdutor embora a duração do pulso praticamente inalterada. Observou-se ainda que o primeiro pulso negativo é mais sensível a variações da fração de vazio do que todos os outros. Nas misturas óleo-água, a atenuação do primeiro pico negativo é mais lenta à medida que se aumenta a concentração de água na mistura e, contrariamente às misturas óleo-ar, ocorre um aumento

da amplitude dos picos subsequentes. Aparentemente, a água facilita a chegada da energia acústica ao transdutor de modo a aumentar a amplitude destes picos. Esta diferença básica de comportamento pode ter implicações muito importantes na maneira como a técnica ultrassônica é usada nestes diferentes tipos de escoamento.

As razões de energia no sensor a 180° em função da concentração da fase dispersa para os dois tipos de mistura podem ser vistas na Figura 6. Na Figura 6a, os dados obtidos para misturas óleo-ar são bem ajustados por uma reta ($R = 0,97$) apesar da grande dispersão. Este decaimento linear contrasta com o decaimento exponencial observado em [3] para misturas água-ar; neste caso, o ritmo de decaimento parecia mudar em função do subpadrão de escoamento. No presente caso de misturas óleo-ar, não há uma diferenciação tão nítida na configuração do escoamento em função da fração de vazio na faixa estudada. As mudanças são mais graduais, caracterizando mais uma evolução contínua do que uma mudança abrupta de padrão de escoamento. Este comportamento se reflete então no decaimento linear das razões de energia em função da fração de vazio. Já no caso das misturas óleo-água (Figura 6b), a diferença marcante é atenuação acústica muito menor comparada às misturas óleo-ar. Este resultado era de certa forma esperado, pois o coeficiente de transmissão acústica em uma interface plana óleo-ar é quase nulo enquanto na interface óleo-água é de aproximadamente 97% a $24,5^\circ\text{C}$. Além disto, o decaimento das razões de energia na faixa estudada não parece seguir a tendência linear. O aparecimento de calotas de água parece interromper a tendência de queda, dando início a um ligeiro aumento nas razões de energia. A curva de ajuste mostrada, com um ponto de mínimo em aproximadamente 10% de fração de água, tem coeficiente de correlação $R = 0,91$. Especula-se que, nas misturas óleo-água, haja dois efeitos contrários: o espalhamento acústico na interface óleo-água das gotas atuaria no sentido de diminuir a intensidade da onda sonora no transdutor a 180° ; por outro lado, a propagação desta onda por uma massa contínua de água reduziria a atenuação comparada com a propagação por uma massa contínua de óleo. Logo, à medida que a fase discreta água passa a escoar na forma de massas maiores como as calotas, a atenuação acústica global diminuiria e as razões de energia começam a aumentar. Do ponto de vista prático da medição multifásica, a maior atenuação observada em misturas óleo-ar significa que a fração da fase dispersa em escoamentos líquido-gás poderia ser medida mais facilmente por atenuação acústica do que em escoamentos líquido-líquido. Pode-se dizer ainda que a presença de heterogeneidades muito pequenas, sejam elas pequeníssimas bolhas de ar ou pequeníssimas gotas de água, leva a uma rápida atenuação do sinal do acústico e, portanto, não favorecem a medição ultrassônica da concentração da fase dispersa. Este comportamento foi verificado em [5] para misturas aquosas de glicerina contendo um grande número de minúsculas bolhas de ar arrastadas pelo escoamento.

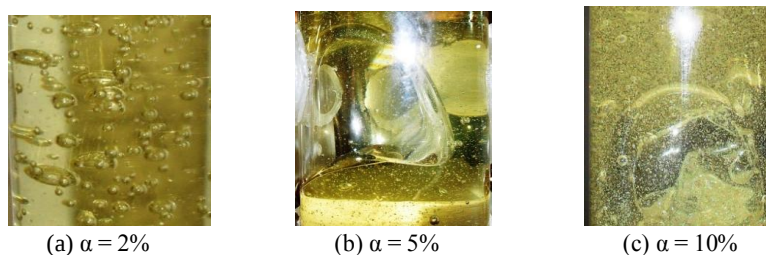


Figura 3. Padrões de escoamento típicos para misturas óleo-ar.

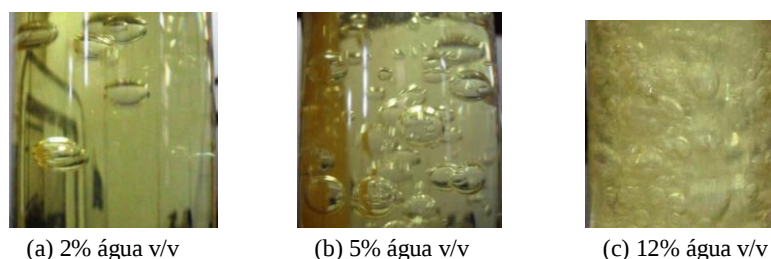


Figura 4. Padrões de escoamento típicos para misturas óleo-água.

Atenuação nos Sensores a 0°, 45° e 135° em Misturas Líquido-Gás e Líquido-Líquido

Com relação às misturas óleo-ar, as tendências globais expostas na Figura 7a estão de acordo com aquelas verificadas em [3] para escoamentos água-ar. As razões de energia para os transdutores a 0° e 180° diminuem com a fração de vazio devido à obstrução crescente do caminho ultrassônico pela fase gasosa; entretanto para o transdutor a 0°, as razões de energia tenderam a se nivelar devido ao aumento das reflexões dos sinais ultra-sônicos pelas bolhas de ar. Deve-se enfatizar que este fenômeno ocorreu mais cedo para misturas óleo-ar, aproximadamente para 4% de fração de vazio, do que para as misturas água-ar em [3]. Além disso, os sensores a 0° e 180° exibiram um decaimento aproximadamente linear nas misturas óleo-ar contrariamente ao decaimento exponencial observado em misturas água-ar. Acredita-se que o espalhamento acústico causado por bolhas muito pequenas ($0,1 < d < 2$ mm) pode ter originado esta diferença de comportamento. Como essas bolhas não estavam presentes nas misturas óleo-ar para frações de vazio abaixo de 4%, a atenuação do sinal acústico foi mais gradual do que aquela observada em [3] para misturas água-ar. Neste caso, pequenas bolhas estavam presentes desde o começo e sua população aumentou rapidamente. Em misturas óleo-ar, o padrão de escoamento é geralmente caracterizado por grandes bolhas em pequena quantidade. Por outro lado, o aumento no número de bolhas leva a um aumento contínuo nas razões de energia nos transdutores a 45° e 135° já que o sinal ultra-sônico é cada vez mais disperso para as laterais. O aparecimento das pequenas bolhas para frações de vazio a partir de 4% pode ter causado o rápido aumento das razões de energia neste ponto.

Com relação às misturas óleo-água, a Figura 7b mostra que as razões de energia nos transdutores a 0° e 45° são praticamente insensíveis à presença de água no óleo; nestes transdutores, as razões de energia variaram muito pouco comparadas às variações sofridas nas misturas óleo-ar. O transdutor a 135° apresentou um ligeiro aumento na razão de energia em função do aumento da fração de água, tendo este aumento se tornado mais acentuado e mais aleatório com o aparecimento de gotas maiores. O aumento mais acentuado pode ser explicado, talvez, pela atenuação reduzida durante a propagação da onda pelas gotas de água comparada com o mesmo trajeto em óleo; a aleatoriedade pode ter sido causada pelo posicionamento errático das gotas na seção transversal da tubulação. Conforme discutido acima, o transdutor a 180° apresentou um ponto de mínimo coincidente com o aparecimento das calotas de água.

De qualquer modo, há uma coerência e uma interrelação no comportamento dos quatro sensores em função da concentração da fase dispersa tanto em misturas óleo-ar como em misturas óleo-água. Mais uma vez, em vista da maior sensibilidade do ultrassom nas misturas óleo-ar, estas se prestam mais facilmente à medida ultrassônica da fração da fase dispersa do que as misturas óleo-água. Neste caso, está-se estudando atualmente a utilização do tempo de trânsito como parâmetro de medição acústica. Este será o assunto de um próximo trabalho.

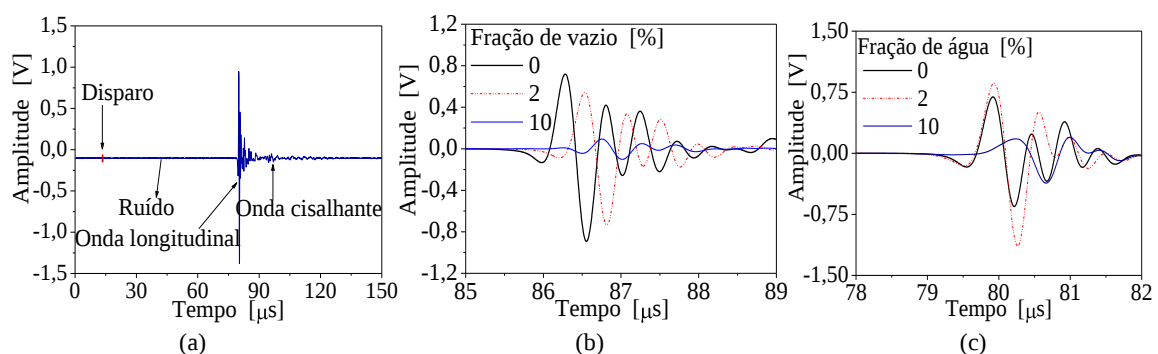


Figura 5. Sinal característico recebido pelo sensor a 180°: (a) sinal típico de um único pulso no óleo USP monofásico; (b) atenuação da onda longitudinal em misturas óleo-ar e (c) em mistura óleo-água.

Conclusões

Esse apresenta dados visuais e de atenuação acústica para misturas bifásicas óleo-ar e óleo-água. Verificou-se que bolhas de ar atenuam o sinal acústico bem mais do que gotas de água sem, todavia, atenuá-lo por completo. Isto significaria que a concentração da fase dispersa pode ser medida mais facilmente por atenuação acústica em escoamentos líquido-gás do que em escoamentos líquido-líquido. Para este último caso, será apresentada em um trabalho futuro a medição da fase dispersa pelo tempo de trânsito da onda sonora.

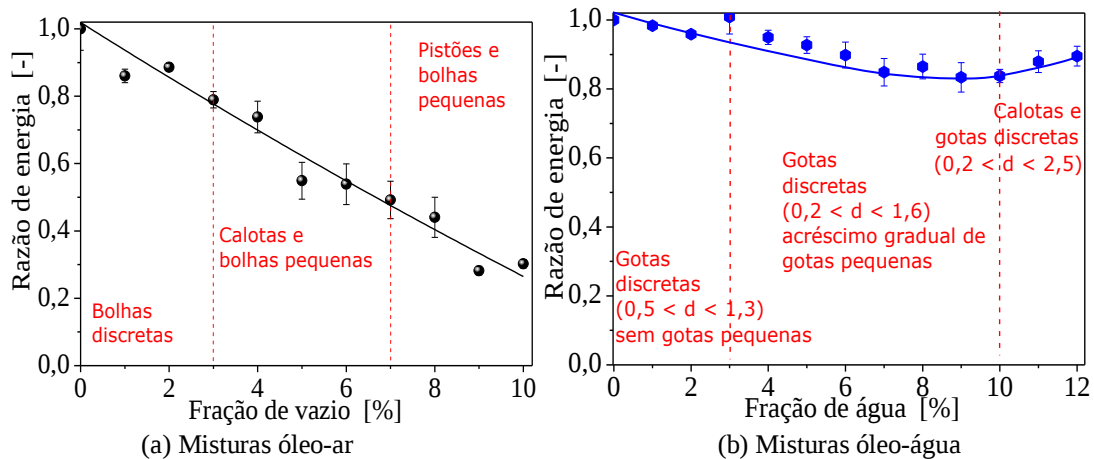


Figura 6. Razão de energia no sensor a 180° em função da concentração da fase dispersa.

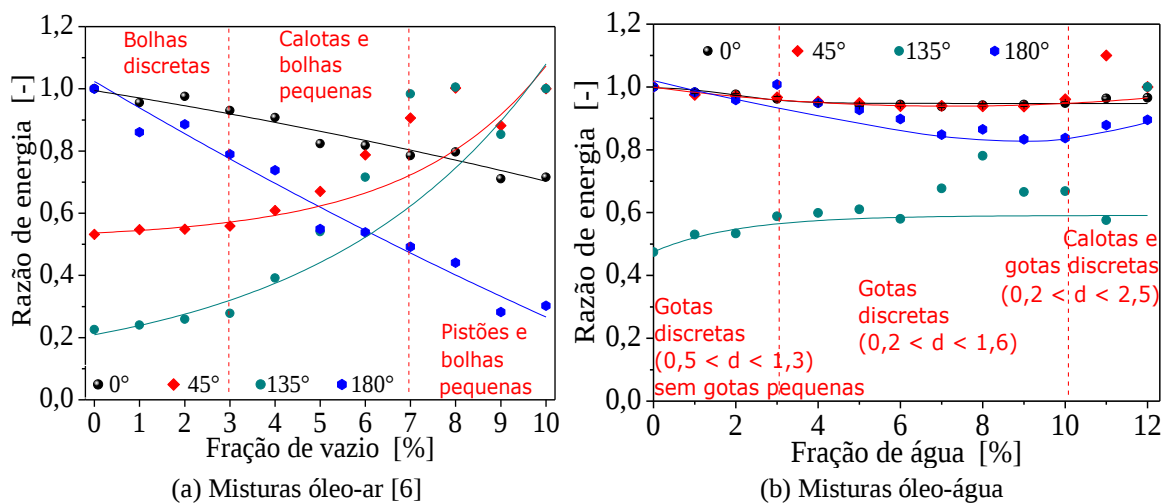


Figura 7. Razão de energia em todos os sensores em função da concentração da fase dispersa.

Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por meio do Programa de Recursos Humanos para o Setor Petróleo e Gás (PRH-ANP/MCT) pelas bolsas aos alunos IC; à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e à Petrobras pela infraestrutura física.

Referências Bibliográficas

1. Falcone, G.; Hewitt, G. F. and Alimonti, C. *Multiphase Flow Metering, Principles and Applications*. First ed. Developments in Petroleum Science. Vol. 54. 2010.

2. Devold, H. *Oil and Gas Production Handbook, An Introduction to Oil and Gas Production*. 3 ed. ABB ATPA Oil and Gas 2006.
3. Carvalho, R. D. M. d. et al. *Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air–water bubbly flows*. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2009. 33: p. 1065-1086.
4. Tanahashi, E. I. et al. *Application of the Ultrasonic Technique for Monitoring Intermittent Liquid-Gas Flows and Liquid-Solid Flows*. In *7th North American Conference on Multiphase Technology (MPNA 2010)*. Banff, Canada: BHR Group. 2010.
5. Carvalho, R. D. M. d. *Técnicas Ultra-Sônicas para Medição de Fração de Vazio e Concentração de Particulados em Escoamentos em Escoamentos Multifásicos*, Convênio FINEP/PETROBRAS 01.07.0131.00: Itajubá. 2010.
6. Gonçalves, J.L., et al. *Development of a Multiphase Flow Metering Procedure Based on the Ultrasonic Technique*. in *15th International Conference on Multiphase Production Technology (MPT 2011)*. Cannes, France: BHR Group Limited. 2011.