

# Sistema de Monitoramento Versátil de Conteúdo Líquido Aplicado em Separadores Primários<sup>1</sup>

Agesinaldo M. Silva Jr<sup>\*,2</sup> Naser Tanabi<sup>\*\*,3</sup> Hossein Nasiri<sup>\*\*,4</sup>  
André K. Sato<sup>\*\*,5</sup> Júlio C. Adamowski<sup>\*,6</sup>  
Luiz O. V. Pereira<sup>\*\*\*,7</sup> Marcos S. G. Tsuzuki<sup>\*\*,8</sup>

<sup>\*</sup> *Laboratory of Sensors and Actuators*

<sup>\*\*</sup> *Laboratory of Computational Geometry*

*Mechatronics and Mechanical Systems Engineering Department,  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil*  
<sup>\*\*\*</sup> *CENPES/PETROBRAS, Cidade Universitária, Quadra 7, CEP  
21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brazil*

**Abstract:** The interface detection of immiscible liquids in gravity separators is critical to operational efficiency, improve performance and prevent environmental risks. A versatile ultrasound monitoring system was developed for level detection on scaled down tests in vertical tanks with multiple piezoelectric ceramics disks installed on the external walls. The relative distance between the liquid level and the acoustic axis height of each diametrically opposed ultrasonic sensor pair is obtained based on the maximum amplitude and time of flight of transmitted pulse. The sensors were employed to detect the presence of liquid interfaces at a maximum lateral distance of 2.5 times the dimension of the applied sensors. The amplitude drops in the vicinity of the interface due to interference between the direct reception and the interface behavior. Characterization based on experiments was performed and confirmed with simulations using finite element method.

**Resumo:** A detecção de interface de líquidos imiscíveis em separadores de gravidade é fundamental para a eficiência operacional, melhora o desempenho e evita riscos ambientais. Um sistema versátil de monitoramento por ultrassom foi desenvolvido para detecção de nível em escala reduzida em reservatórios verticais com vários discos de cerâmica piezoelétrica instalados nas paredes externas. A distância relativa entre o nível do líquido e a altura do eixo acústico de cada par de sensores ultrassônicos diametralmente opostos é obtida com base na amplitude máxima e no tempo de vôo do pulso transmitido. Os sensores foram empregados para detectar a presença de interfaces líquidas a uma distância lateral máxima de 2,5 vezes a dimensão dos sensores aplicados. A amplitude cai nas proximidades da interface devido à interferência entre a recepção direta e o comportamento da interface. A caracterização baseada em experimentos foi realizada e confirmada com simulações usando o método dos elementos finitos.

*Keywords:* Ultrasound; Monitoring Systems; Primary Separators

*Palavras-chaves:* Ultrassom; Sistemas de Monitoramento; Separadores Primarios

## 1. INTRODUÇÃO

Há uma demanda no desenvolvimento de tecnologia aplicada a vasos separadores e reservatórios de armazenagem, coletivamente chamado de reservatório, de petróleo e seus derivados. As medições de altura e volume de material fluído em reservatórios geralmente são aplicadas no mo-

onitoramento durante produção de petróleo para garantir o requisitos do seus processos. O meio de vedação do recipiente, materiais de substância corrosiva, toxicidade e explosividade são alguns fatores que influenciam a precisão da medição. Para as condições de materiais inflamáveis e explosivos, baixas temperatura, alta pressão e outras características de aplicação do líquido, o armazenamento deve ser estabelecido em recipientes grandes e fechados e longe de cargas elétricas, magnéticas, colisões mecânicas, que tenham requisitos mais restritivos sobre métodos e princípios de medição de nível.

Dentre soluções industriais para problemas envolvendo armazenamento de fluidos, é comum a aplicação de sensores no monitoramento de um ou mais níveis de interface ou

<sup>1</sup> Este projeto foi suportado pela Petrobras.

<sup>2</sup> e-mail: agesinaldo.jr@gmail.com.

<sup>3</sup> e-mail: n.tanabi@gmail.com.

<sup>4</sup> e-mail: h.nasiri.ir@gmail.com.

<sup>5</sup> e-mail: andre.kubagawa@gmail.com.

<sup>6</sup> e-mail: jcadamow@usp.br.

<sup>7</sup> e-mail: jcadamow@usp.br.

<sup>8</sup> e-mail: mtsuzuki@usp.br.

alguma propriedade física dos materiais encontrados em reservatórios. Exemplos de sensores comerciais são os visores ou medidores mecânicos de nível e sensores de pressão ou capacitivos montados internamente ao reservatório, além de sensores radioativos, eletrônicos, térmicos, ópticos e hidráulico. No entanto, um dos métodos que atendem os requisitos restritivos devido à aplicação na indústria do petróleo utiliza propagação de ondas ultrassônicas empregando sensores montados externamente (Lee et al., 2005; Sakharov et al., 2003; Subhash and Balasubramaniam, 2014; Zhao et al., 2016). A aplicação do ultrassom em reservatórios de armazenamento e vasos de separação óleo-água por segregação gravitacional para caracterização das interfaces entre os diversos fluídos no interior deles e identificação de suas propriedades é um desafio que não foi totalmente superado pelas tecnologias existentes (Mukherjee et al., 2020; Alshaafi et al., 2020; Leal-Junior et al., 2018)

Sensores de ultrassom são largamente utilizados na indústria de processos e as suas diversas técnicas atualmente empregadas em monitoramento fazem dessa uma aplicação promissora (Hauptmann et al., 2001). Métodos de monitoramento de nível por ultrassom feita fora de um recipiente de metal com espessuras entre 2 e 30 mm utilizando o sinal de eco da parede interna, podem fornecer o nível de líquido com precisão de medida inferiores a 5 mm para muitos líquidos comuns encontrados na indústria (Zhang et al., 2018, 2017). Os as paredes desses reservatórios são geralmente de aço com baixa atenuação acústica e uma grande diferença de impedância acústica em relação ao meio fluído. Estes reservatórios têm grandes dimensões que implica num grande percurso da onda de ultrassom e podem conter petróleo, gás, água produzida e partículas sólidas. Assim sendo, a técnica mais indicada para o monitoramento com ultrassom é a de transmissão recepção, isto é, um transdutor emite e o outro, posicionado em lados opostos, recebe.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo baseado em técnicas de transmissão de ondas por ultrassom para determinação de interfaces entre conteúdos em reservatórios verticais para experimentos em bancada de testes. Este trabalho possui a seguinte estrutura: na Seção 2 está descrito o processo de monitoramento de conteúdos. Duas técnicas distintas são apresentadas: a técnica de pulso eco utilizada na caracterização do sistema de manipulação de conteúdo e a técnica de transmissão recepção na medição de proximidade de interfaces. Na técnica de medida de proximidade um modelo por elementos finitos é utilizado para auxiliar no entendimento da propagação de ondas no interior do reservatório. A Seção 3 explica a bancada experimental utilizada e o modelo de elementos finitos. A Seção 4 descreve os resultados de caracterização e de operação. A Seção 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## 2. PROCESSO DE MONITORAMENTO DE CONTEUDOS

Duas técnicas alternativas foram aplicadas no processo de monitoramento de conteúdo em reservatórios verticais.

A técnica de pulso eco com a direção do pulso perpendicular ao plano das interfaces (Adamowski et al., 2013) foi aplicada assumindo o conhecimento prévio das propri-

idade físicas dos materiais presentes no interior do reservatório (Behnia et al., 2019; Olmos, 2002). A altura da interface no interior do recipiente foi determinada utilizando um provador por ultrassom do tipo pistão plano circular cujo campo acústico é bem conhecido (Duran et al., 2020). O transdutor é disposto com feixe acústico na direção vertical e posicionado na parte externa e central do fundo do reservatório. A onda longitudinal gerada se propaga através das diversas camadas de fluídos presentes no interior do reservatório. Esta propagação resulta em múltiplas reflexões que são capturadas pelo mesmo transdutor no modo pulso eco.

A técnica proposta neste trabalho é uma alternativa versátil baseada na transmissão e recepção do pulso na direção paralela ao plano das interfaces e assume que as propriedades físicas dos materiais são desconhecidas. Os ensaios de monitoramento de nível de líquidos em reservatórios verticais foram realizados utilizando pares de cerâmicas piezoelétricas instaladas na parede externa do reservatório diametralmente opostas.

Um estudo foi realizado baseado em um modelo de simulação numérica utilizando o método de elementos finitos através do software COMSOL Multiphysics. O comportamento dos emissores e receptores com acoplamento junto às paredes do reservatório foi analisado usando o módulo multifísico piezolétrico. O modelo numérico utilizado representa o comportamento físico no domínio compreendido pelas paredes do reservatório, as cerâmicas nelas instaladas e o conteúdo líquido em seu interior.

Neste caso, a geometria empregada na simulação é de uma seção transversal em 2D do reservatório permitindo a modelagem de propagação de ondas no interior e ao longo de suas paredes. Este modelo foi configurado no domínio do tempo para auxiliar no entendimento dos parâmetros eletroacústicos tanto na emissão dos sinais quanto na propagação de onda no interior do reservatório utilizado no sistema de monitoramento. Para determinar o deslocamento  $\{\mathbf{U}\}_e$  e o potencial elétrico  $\{\varphi\}_e$  são utilizadas as equações a seguir

$$\begin{cases} [\mathcal{M}]_e \{\ddot{\mathbf{U}}\}_e + [\mathcal{K}_{uu}]_e \{\mathbf{U}\}_e + [\mathcal{K}_{u\varphi}]_e \{\varphi\}_e = \{\mathbf{f}\}_e \\ [\mathcal{K}_{\varphi u}]_e \{\mathbf{U}\}_e + [\mathcal{K}_{\varphi\varphi}]_e \{\varphi\}_e = \{\mathbf{q}\}_e \end{cases} \quad (1)$$

onde  $[\mathcal{M}]_e$  é a matriz de massa,  $[\mathcal{K}_{uu}]_e$  é a matriz de rigidez e  $\{\mathbf{f}\}_e$  é o vetor de forças,  $[\mathcal{K}_{\varphi u}]_e$  and  $[\mathcal{K}_{u\varphi}]_e$  são as matrizes de rigidez piezoelétricas,  $[\mathcal{K}_{\varphi\varphi}]_e$  são as matrizes de rigidez dielétricas e  $\{\mathbf{q}\}_e$  o vetor de cargas pontuais. As condições de contorno aplicadas neste modelo foi de um potencial elétrico variando no tempo  $\{\varphi\} = V(t)$  para determinar a propagação da onda de ultrassom no interior do reservatório.

Em ambas as técnicas o pós processamento dos sinais de amplitude de pressão no tempo é realizado através da obtenção do envelope. A transformação discreta de Hilbert é usada para calcular a amplitude instantânea de um sinal. A transformada discreta de Hilbert de um sinal,  $x_i$ , é dada por  $\tilde{x}_i = \sum_{m=0}^{N-1} h_{i-m} x_m$ , onde N, o comprimento do sinal, é um número par e

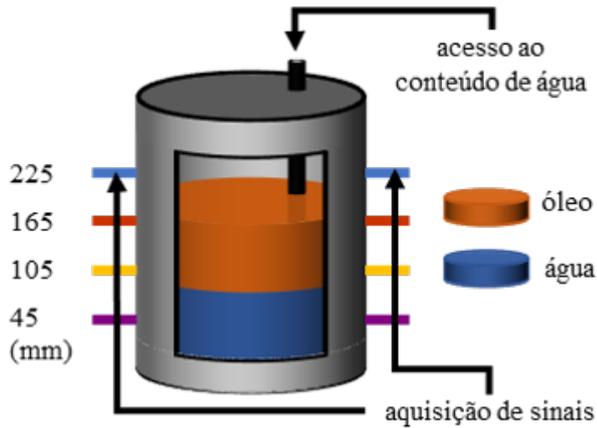


Figura 1. Esquema indicando a montagem experimental utilizada para obtenção dos resultados experimentais. O reservatório contém um volume determinado de óleo e possui acesso ao conteúdo de água que é manipulado através de um sistema tipo sifão. As linhas coloridas posicionadas na parte externa do reservatório indicam a posição das cerâmicas com suas respectivas alturas em relação ao fundo seu fundo.

$$h_i = \frac{2}{N} \sin^2 \left( \frac{\pi i}{2} \right) \cot \left( \frac{\pi i}{N} \right). \quad (2)$$

Depois que a transformada discreta de Hilbert é obtida, o envelope pode ser calculado como  $a_i^2 = x_i^2 + \tilde{x}_i^2$ . Dessa forma, a amplitude máxima do sinal e o tempo de vô são obtidos pela identificação de um máximo local no intervalo de tempo de interesse. De posse do tempo de vô  $t_f$  de um sinal de pulso de ultrassom é possível obter a distância percorrida  $d$  da propagação de um eco assumindo uma velocidade de propagação constante  $c$ . Esta relação é expressa através da função linear

$$c = \frac{d}{t_f}. \quad (3)$$

De maneira similar, a velocidade de propagação de uma propagação em um meio homogêneo no modo de transmissão dada uma distância percorrida constante.

### 3. EXPERIMENTOS

A bancada experimental consiste de um reservatório cilíndrico de 20l contendo um volume composto de camadas de água, óleo LUBRAX HYDRA 68 e ar, um conjunto de sensores emissores e receptores, os equipamentos de aquisição de sinais por ultrassom e um sistema de manipulação de altura de interfaces ilustrado na Fig. 1. As dimensões do reservatório utilizado são, diâmetro  $d = 280 \text{ mm}$ , altura  $H = 335 \text{ mm}$ , feito de aço carbono estanhada externamente e espessura de parede  $e = 0,36 \text{ mm}$ .

O conteúdo do reservatório da bancada experimental foi manipulado por um sistema de entrada e saída de água. A vazão de água armazenada em um reservatório externo foi imposta através de um conjunto de mangueiras, uma válvula de interrupção de fluxo e uma bomba de água submersa. Dessa forma, a altura da interface óleo e água



Figura 2. Visão geral da bancada experimental para os ensaios utilizando as técnicas de pulso eco e transmissão recepção.

pôde ser visualmente aferida pela altura da interface livre da água presente no reservatório externo.

Um provador por ultrassom na forma de pistão plano foi empregado para obter informações sobre as diversas interfaces desta montagem experimental. Este provador consiste de um transdutor piezoelétrico encapsulado construído com elemento ativo de  $10 \text{ mm}$  de diâmetro de face plana. Uma medição contínua foi realizada através de ensaios da resposta pulso-eco com resolução axial experimental de  $0,1 \text{ mm}$  e distância mínima de detecção de  $30 \text{ mm}$ .

Os transdutores foram operados em modo transmissão formados por cerâmicas piezoelétricas em forma de discos de  $10 \text{ mm}$  de diâmetro, fixadas diretamente na parede do reservatório por um processo de colagem com resina epoxy. O material da cerâmica utilizada será o pz37 que são consideradas cerâmica “soft” por possuírem menores qualidades mecânicas, devido ao alto fator de dissipação dielétrica, ideal construção de sensores. A largura do pulso aplicado através da eletrônica de sinais de ultrassom foi ajustada para obter máxima transmissão de energia do sinal. A frequência central dos discos de cerâmicas no modo espessura é próxima de  $1 \text{ MHz}$  e o pulso aplicado foi de  $50 \mu\text{s}$ .

Cada piezocerâmica foi conectada a um cabo coaxial para excitação ou para recepção do sinal de ultrassom. As excitações e recepções são feitas por equipamentos tipo pulsador receptor (5072, Olympus) e a aquisição por um osciloscópio digital (DSO5032A, Agilent) conectado a um microcomputador via interface ethernet. Os sinais obtidos para cada par um a um foram processados para determinação das alturas das interfaces entre líquidos e caracterização de cada camada. Os ensaios foram realizados através de uma série de ensaios repetindo o mesmo procedimento de manipulação de conteúdo no interior do reservatório. A Fig. 2 mostra um visão geral da bancada de ensaio tanto para caracterização do sistema de manipulação de conteúdo quanto para medida da proximidade de interface.

Por último, as excitações e recepções são feitas por um hardware eletrônico dedicado que permite a aquisição de sinais de ultrassom para a reconstrução das características geométricas do conteúdo do reservatório em uma dimensão. Os sinais são adquiridos usando um hardware dedi-

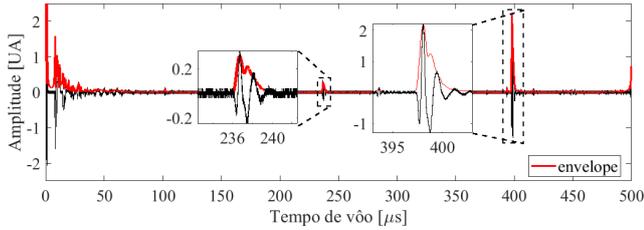


Figura 3. Amplitude do sinal de pulso eco e curva de envelope para o início do ensaio de caracterização indicando o sinal de eco das duas interfaces. O tempo de vôo do eco da interface água e óleo identificado em  $t_{a/o} = 297 \mu s$  e óleo e ar identificado em  $t_{o/a} = 297 \mu s$ .

cado (Adamowski et al., 2013) com canais multiplexados amostrados a  $80 \text{ MHz}$  para 4 emissores e 4 receptores com frequência de repetição da ordem de  $1 \text{ Hz}$ . Os sinais capturados foram analisados utilizando o mesmo processamento para determinação das alturas das interfaces entre líquidos e identificação do conteúdo através obtenção da velocidade de propagação na região próxima aos feixes dos transdutores.

#### 4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a bancada experimental e de simulação numérica multifísica através do software comercial COMSOL de elementos finitos.

##### 4.1 Caracterização do sistema de manipulação de conteúdo

Nesta seção são apresentados os resultados de caracterização do sistema que manipula o conteúdo do reservatório. As medições do tempo de vôo dos ecos sucessivos devido a presença das interfaces ar/óleo e óleo/água foram realizadas através do uso do provador por ultrassom acoplados ao fundo do reservatório operando na frequência central em torno de  $2 \text{ MHz}$ .

A manipulação de nível foi realizada de forma manual através de sifonação e do emprego de bomba d'água. O esvaziamento do conteúdo de água no interior do tanque para um reservatório externo sem controle de fluxo. O retorno deste conteúdo foi realizado aplicando um fluxo médio de aproximadamente  $20 \text{ l/h}$ . Ambos processos são realizados em um período de tempo aproximado de 28 minutos. Um exemplo de sinal adquirido no tempo utilizado na caracterização deste sistema está ilustrado na Fig. 3. Neste gráfico o sinal de pulso eco do transdutor é sobreposto a uma curva de envelope da amplitude. Através das janelas em destaque é possível identificar uma reflexão de baixa amplitude devido à interface água/óleo e outra de alta amplitude devido à interface óleo/ar.

A caracterização do sistema de manipulação de conteúdo não é uma técnica alternativa ao de monitoramento proposto neste trabalho que utiliza a transmissão e recepção de sinais. A técnica empregada nesta caracterização possivelmente não é adequada para aplicação em campo devido a diversos fenômenos de propagação. A onda de ultrassom explorada por esta técnica está sujeita a baixo coeficiente de reflexão entre interfaces e alta atenuação devido a propagação em grandes distâncias.

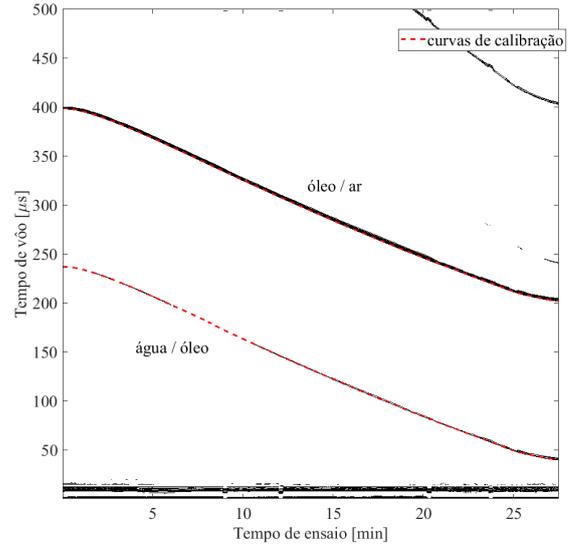


Figura 4. Gráfico de cores do envelope dos sinais pulso eco em função do tempo de ensaio indicando as curvas de caracterização com base nos máximos da curva de envelope a cada aquisição.

A Fig. 4 ilustra o gráfico de contorno do envelope dos sinais pulso eco justapostos em sequência temporal no qual níveis pretos representam amplitudes acima de um valor arbitrário e nível em branco os valores abaixo deste limite. Neste gráfico estão representadas curvas tracejadas em vermelho indicando uma função de interpolação obtida através dos níveis pretos caracterizando tanto a interface água/óleo quanto a óleo/ar. Outros níveis visíveis neste gráfico representam sinais resultantes de múltiplas reflexões entre as interfaces identificadas anteriormente. No entanto, somente será considerado a curva referente a interface água/óleo para fins de caracterização do sistema de manipulação de conteúdo líquido utilizado no monitoramento de nível.

##### 4.2 Técnica de transmissão e recepção paralela à interface

Para demonstrar a técnica de transmissão e recepção paralela à interface foram modelados uma geometria 2D da seção transversal do reservatório. Este modelo consiste de uma área circular definindo o modelo acústico de água contido em um anel de estrutura mecânica simulando o material de aço com baixo teor de carbono. Um modelo piezoelétrico simula o comportamento das cerâmicas arranjadas no exterior deste anel. Desta forma o modelo simula os resultados obtidos quando não há influência das interfaces líquidas na propagação da onda devido a sua proximidade com o eixo acústico produzido por um sinal pulsado.

Uma análise transiente aplicando um pulso senoidal estreito entre os terminais do emissor foi realizada e os resultados de pressão acústica e deslocamento das paredes do reservatório foram obtidos para o período de tempo até  $t = 210 \mu s$ . A Fig. 5 apresenta dois gráficos de cores em escala iguais para os momentos definidos pelo tempo de vôo referente à chegada dos pulsos segundo a propagação

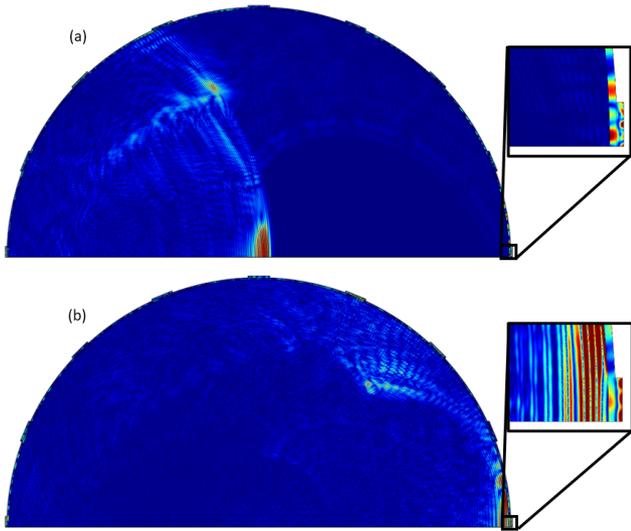


Figura 5. Gráfico de cores para os resultados de pressão acústica absoluta e deslocamento das paredes do modelo de seção transversal do interior do reservatório com 280 mm de diâmetro indicando na figura inserida a chegada do pulso propagando através das paredes no tempo  $t_f = 100\mu s$  (a) e do interior do reservatório contendo água no tempo  $t_f = 193\mu s$  (b).

da onda através das paredes e do interior do reservatório, respectivamente.

Os resultados da Fig. 6 apresentam transições de padrões de sinais que identificam a mudança de propagação das ondas transmitidas nos diferentes meios contidos no interior do reservatório de ensaio. Além de diferentes tempos de vôos devido as respectivas velocidades propagação, é possível também identificar gradientes de amplitude do sinal transmitido. Essas variações são características da propagação dos feixes acústicos em regiões próximas a interfaces e meios com diferentes viscosidades. Tais fenômenos de propagação podem ser atribuídos a interferência entre o feixe e as ondas refletidas e a atenuação devido às perdas acústicas.

Os resultados referentes aos ensaios de transmissão recepção entre os pares são mostrados na Fig. 6. Os gráficos mostram a evolução temporal da curva de envelope do sinal adquirido para cada par emissor/receptor. Estes sinais são caracterizados por um pico de máxima amplitude por volta do tempo de vôo  $t=100\mu s$  referente ao pulso transmitido através da parede do reservatório seguido de outro pico de maior amplitude no tempo  $t_a = 193\mu s$  ou  $t_o = 200\mu s$  referente à transmissão direta no interior do reservatório contendo água ou óleo respectivamente.

Os gráficos relativos ao pares  $Tx_0 Rx_0$  e  $Tx_1 Rx_1$  apresentam ao fim do período de ensaio sinais com amplitude mínima de sinal que correspondem a transmissão do pulso em contato com a camada de ar. Da mesma forma, os pares  $Tx_1 Rx_1$ ,  $Tx_2 Rx_2$  e  $Tx_3 Rx_3$  detectam no começo do período de ensaio com amplitude máxima de sinal e tempo de vôo constantes correspondendo à transmissão do pulso em contato com a camada de água. Por último, a camada de óleo pode ser identificada através sinais caracterizados pelo do atraso no tempo de vôo de  $t_{fo} - t_{fa} \approx 7\mu s$  devido a uma menor velocidade de propagação comparado com a

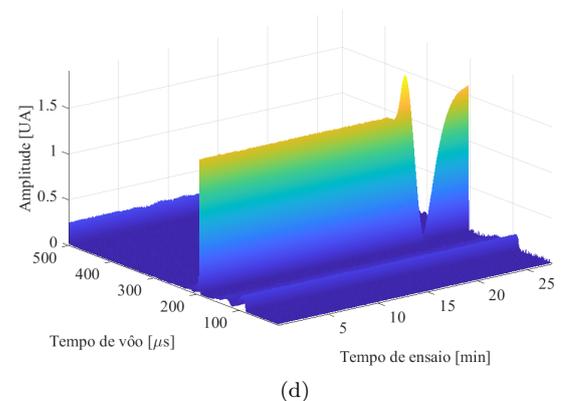
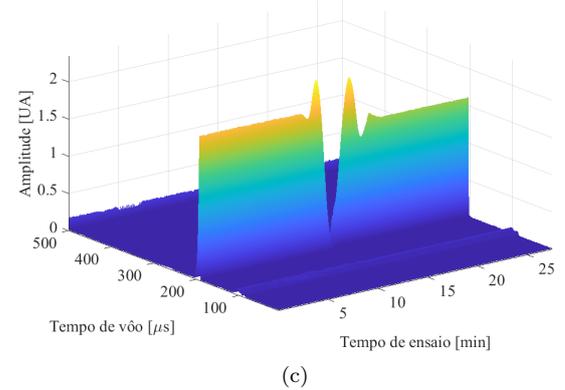
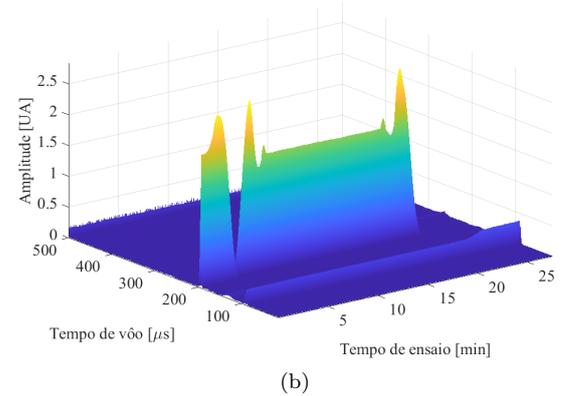
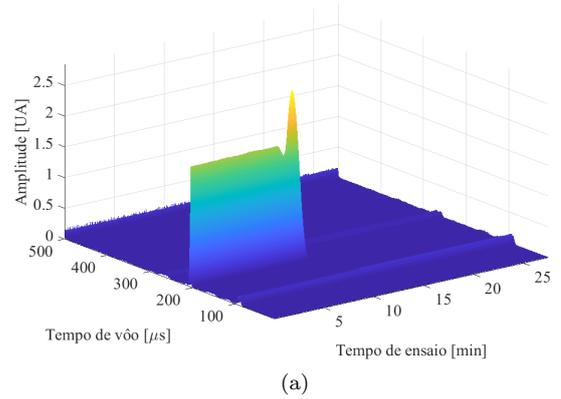


Figura 6. Amplitude do sinal de transmissão em função do tempo de vôo e tempo de ensaio entre os emissores e receptores.  $Tx_0 Rx_0$  (a),  $Tx_1 Rx_1$  (b),  $Tx_2 Rx_2$  (c),  $Tx_3 Rx_3$  (d)

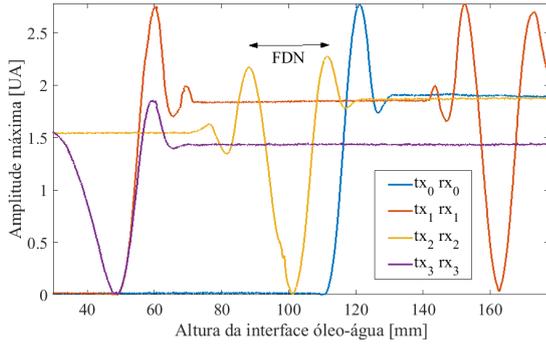


Figura 7. Amplitude máxima do sinal transmitido para os ensaios de determinação de volume indicando o parâmetro faixa dinâmica de nível (FDN).

água. Este resultado pode ser visualizado no período final do ensaio para os pares  $Tx_2 Rx_2$  e  $Tx_3 Rx_3$ , no período intermediário para o par  $Tx_1 Rx_1$  e no período inicial para o par  $Tx_0 Rx_0$ .

#### 4.3 Medida da proximidade de interface

A influência da presença de interfaces próximas às regiões do feixe acústico dos sensores instalados será discutida nesta seção. A Figura 7 mostra a amplitude máxima do sinal transmitido dos quatro pares de cerâmicas em função da altura da interface óleo / água obtida através do método de caracterização descrito na seção anterior. Nestes gráficos, o eixo horizontal indica o intervalo da coordenada referente desta interface entre  $30 \text{ mm} \leq H_{o/a} \leq 177 \text{ mm}$ .

É possível verificar através dos gráficos que há mínimos locais próximos de zero, ou vale, do valor da amplitude máxima em todos os sinais. Isto caracteriza a proximidade entre cada par emissor/receptor e a altura de nível da interface água/óleo e corresponde às posições apresentadas na Tabela 1. A separação das interfaces óleo/ar e água/óleo pode ser inferida através de uma análise dos resultados obtidos pelos sinais do par  $Tx_1 Rx_1$ . É possível notar duas características da amplitude máxima ao longo do eixo das coordenadas. Uma delas indicada pela presença de sinal a partir de uma posição da altura de  $H_a \approx 50 \text{ mm}$  correspondente a interface óleo/ar. A outra indicada por um vale em uma posição  $H_a \approx 165 \text{ mm}$  correspondente à interface água/óleo. apresenta dois os mínimos locais as posições da altura da interface água/óleo nos quais. Esta análise implica que há uma distância vertical entre as duas interfaces de  $H_o \approx 115 \text{ mm}$  assumindo que seja constante no decorrer do ensaio.

Além disso, devido a interferência entre os sinais de recepção direta e de reflexão na interface é possível distinguir a distância relativa entre o nível do líquido e a altura do eixo acústico de cada emissor. A faixa dinâmica de nível (FDN) é estimada a partir do espaçamento entre os máximos locais de amplitude e corresponde a  $FDN \geq 21 \text{ mm}$  para esta montagem experimental. Utilizando a bancada experimental é possível identificar as alturas da interface óleo / água obtidas através do processo de caracterização e do FDN dos sensores correspondente em função do posicionamento das cerâmicas instaladas, como representados na Tabela 1.

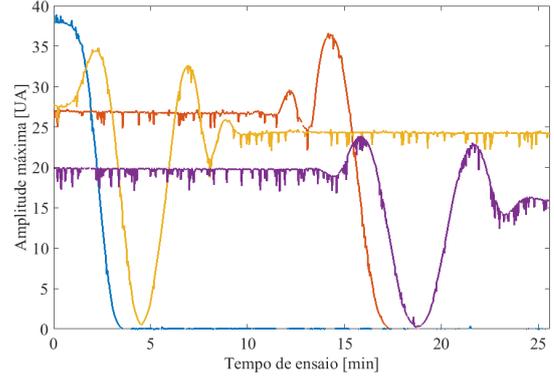


Figura 8. Amplitude máxima do sinal transmitido para os ensaios utilizando o sistema de monitoração versátil.

#### 4.4 Ensaio com o sistema de monitoramento de conteúdo

A técnica desenvolvida para o monitoramento pode ser aplicada diretamente a ensaios preparados sem o conhecimento prévio de conteúdo líquido no interior de reservatórios. Caso sensores suficientes sejam dispostos ao longo da direção longitudinal de reservatórios verticais seria possível monitorar continuamente a posição das interfaces. De forma que um pico de amplitude máxima de um sensor corresponda a outro pico de um sensor adjacente ambos com diferentes tempos de voo.

No entanto, outro experimento foi realizado para demonstrar uma aplicação da técnica desenvolvida. Desta vez, a medida de proximidade foi testada utilizando equipamentos de aquisição cuja instalação seja viável em uma planta piloto. Neste caso, os pares de cerâmicas instaladas foram mantidas e o hardware de aquisição dedicado com canais multiplexados substituiu o osciloscópio digital e o equipamento pulsador e receptor. O mesmo procedimento de manipulação de conteúdo já caracterizado foi empregado para obter os resultados com o sistema de monitoramento desenvolvido.

No gráfico da Fig. 8 as curvas representam sinais obtidos a partir de cada par de sensores e possuem a mesma relação de cores apresentadas nas Figs. 1 e 7. Os resultados desta aplicação revelam que o sistema captura informações suficientes de todos os sensores sequencialmente de maneira semelhante aos da avaliação da técnica de medida de proximidade. A técnica é caracterizada pela observação da evolução temporal da amplitude máxima dos sinais adquiridas pelos sensores durante o período de ensaio. A variação da amplitude máxima está associada a transposição das interfaces água/óleo e óleo/ar no interior do tanque.

Além disso, o processo de monitoramento estabelecido assume que o conteúdo líquido no interior dos tanques não

Tabela 1. Posicionamento das cerâmicas instaladas no reservatório de 20 l, altura obtida através da caracterização e faixa dinâmica de nível.

Tx Rx	0	1	2	3
Posição [mm]	225	165	105	45
Altura [mm]	-	162.7	101.2	48.81
FDN [mm]	-	-	23.35	21.8

sofra grandes alterações em um curto espaço de tempo. Dessa forma, é esperado que não haja algum fenômeno de propagação de onda que resulte em fortes gradientes de amplitude máxima do sinal transmitido. No entanto, pode-se notar que os sinais obtidos neste experimento apresentam pequenas variações neste parâmetro monitorado. Portanto, é razoável concluir que estas variações representam um ruído de alta frequência adicional devido a limitações do hardware implementado.

O monitoramento de conteúdo através da transmissão de onda paralela a uma interface entre dois meios depende da proximidade do sensor com esta interface. A transmissão desta onda é o mecanismo principal explorado nesta técnica devido aos fenômenos acústicos que ocorrem na propagação da onda através de meios com características acústicas diferentes. A medida de proximidade possui uma escala definida pela faixa dinâmica de nível em que depende principalmente do projeto dos sensores e dos materiais contidos no tanque. Estas características são suficientes para obter uma relação direta entre os dados obtidos pelo sistema em um determinado instante e o estado correspondente da altura das interfaces no interior dos reservatórios.

## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Os transdutores desenvolvidos para testes em escala operando no modo transmissão são capazes de detectar a presença de interfaces a uma distância relativa mínima de mais duas vezes e meia a sua própria dimensão. A técnica de pulso e eco utilizada para caracterização do sistema de manipulação de conteúdo foi suficiente para confirmar a viabilidade do sistema de monitoramento baseado na técnica proposta de proximidade. Estudos mais detalhados tanto experimentais como de simulação numérica são necessários para aprimorar esta faixa dinâmica, calcular incerteza de medição e realizar extrapolação numérica para projetar o equipamento de monitoramento mais robusto. O hardware eletrônico dedicado desenvolvido pode ser utilizado para um conjunto com quantidade maior de transdutores encapsulados e acoplada acusticamente a um reservatório em maior escala através de um material resistente às intempéries. Neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de equipamento de monitoramento para testes em campo em uma fase futura do projeto.

## AGRADECIMENTOS

Este projeto é apoiado pela Petrobras/ANP concessão 5850.0108871.18.9. A. K. Sato, A. M. Silva Jr, N. Tanaki e H. Nasiri são apoiados pela FUSP/Petrobras. M. S. G. Tsuzuki e J. C. Adamowski foram parcialmente suportados pelo CNPq (proc. 311.195/2019-9).

## REFERÊNCIAS

Adamowski, J.C., Buiochi, F., Tsuzuki, M., Perez, N., Camerini, C.S., and Patusco, C. (2013). Ultrasonic measurement of micrometric wall-thickness loss due to corrosion inside pipes. In *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS*, 1881–1884.

Alshaafi, E.A., Prakash, A., and Mercer, S.M. (2020). Ultrasonic technique for tracking oil-water emulsion

layer in separation vessels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184(October 2019), 106591.

Behnia, I., Prakash, A., and Williams, G. (2019). Ultrasonic Based Device to Monitor Oil Separation from Oily Water Discharges. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(1), 115–122.

Duran, A.L., Sato, A.K., Silva Jr, A.M., Franco Guzman, E.E., Buiochi, F., Martins, T.C., Adamowski, J.C., and Tsuzuki, M.S.G.. (2020). GPU Accelerated Acoustic Field Determination for a Continuously Excited Circular Ultrasonic Transducer. In *IFAC-PapersOnLine. 21st IFAC World Congress 2020, 12-17 Jul 2020, Berlin, Germany. International Federation of Automatic Control (IFAC)*.

Hauptmann, P., Hoppe, N., and Puettmmer, A. (2001). Ultrasonic sensors for process industry. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 1, 369–378.

Leal-Junior, A.G., Marques, C., Frizzera, A., and Pontes, M.J. (2018). Multi-interface level in oil tanks and applications of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 40(October 2017), 82–92.

Lee, D.W., No, H.C., and Song, C.H. (2005). Measurement of two-phase mixture level using an ultrasonic method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29(5), 609–614.

Mukherjee, D., Sen, N., Singh, K.K., Saha, S., Mukhopadhyay, S., Shenoy, K., and Marathe, P. (2020). Ultrasonic Method for Online Tracking of Interface and Dispersion Band in Gravity Settlers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(29), 13260–13270.

Olmos, P. (2002). Extending the accuracy of ultrasonic level meters. *Measurement Science and Technology*, 13(4), 598–602.

Sakharov, V.E., Kuznetsov, S.A., Zaitsev, B.D., Kuznetsova, I.E., and Joshi, S.G. (2003). Liquid level sensor using ultrasonic Lamb waves. *Ultrasonics*, 41(4), 319–322.

Subhash, N.N. and Balasubramaniam, K. (2014). Fluid level sensing using ultrasonic waveguides. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 56(11), 607–612.

Zhang, B., Song, W.A., Wei, Y.J., Zhang, D.S., and Liu, W.Y. (2017). A study on the model of detecting the liquid level of sealed containers based on kirchhoff approximation theory. *Sensors (Switzerland)*, 17(6).

Zhang, Y., Zhang, B., Zhang, L., Li, Y., Gao, X., and Liu, Z. (2018). Liquid level measurement model outside of closed containers based on continuous sound wave amplitude. *Sensors (Switzerland)*, 18(8).

Zhao, A., Han, Y.F., Ren, Y.Y., Zhai, L.S., and In, N.D. (2016). Ultrasonic method for measuring water holdup of low velocity and high-water-cut oil-water two-phase flow. *Applied Geophysics*, 13(1), 179–193.