

Estimativa de pulso para a deconvolução de traços sísmicos

Bousfield, M. M.¹; Cordioli, J. A.²; Barrault, G. F. G.³

¹ Lab. de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, marina.bousfield@lva.ufsc.br

² Lab. de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, julio.cordioli@ufsc.br

³ Lab. de Oceanografia Costeira, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, guillaume.barrault@ufsc.br

Resumo

O método sísmico está entre as técnicas mais utilizadas para a investigação da estrutura geológica de regiões submersas. Uma etapa importante do processamento de dados sísmicos é a deconvolução entre o traço sísmico e o pulso emitido pela fonte, capaz de retornar a refletividade do meio estudado. Essa operação possui fontes conhecidas de erros como a falta de conhecimento prévio da forma do pulso e a escolha do algoritmo de deconvolução. Tendo em vista que quando há o conhecimento sobre o pulso enviado pela fonte, técnicas mais simples e robustas para a deconvolução podem ser aplicadas, este trabalho propõe um método para obter a forma do pulso emitido pela fonte, buscando aprimorar a deconvolução. A forma de onda do pulso pode ser representada como uma combinação de funções simples. Para obter os coeficientes das funções, um filtro adaptativo alimentado por um algoritmo de mínimos quadrados (LMS) foi utilizado. Os coeficientes adaptativos do filtro são atualizados em um sistema retroalimentado, criando um estimador que reconstrói a forma de onda original, sem distorções. Para a aplicação da deconvolução, foram utilizados dados simulados e reais. O algoritmo se mostrou robusto e estável. Os resultados para a deconvolução com a utilização do pulso estimado se mostraram superiores à utilização da onda direta e à técnica probabilística.

Palavras-chave: imageamento sísmico, algoritmo adaptativo, recuperação de pulso.

1. INTRODUÇÃO

Antagonicamente à forma como são feitas as investigações geológicas em ambiente terrestre, nos submersos há dificuldade em acessar o local investigado. Com isso, é comum o uso de métodos geofísicos de investigação, aplicados indiretamente e de forma não invasiva. Dentre estes, são destacados os acústicos, que utilizam os fenômenos de propagação da onda sonora como fundamento para obtenção de informações sobre o fundo marinho (AYRES, 2001). De todas as formas de radiação conhecidas, o som é a que se propaga no ambiente submerso da melhor forma.

O método sísmico, um dos mais utilizados métodos acústicos, visa obter informações a respeito da subsuperfície marinha por meio da interação do som com as camadas geológicas, analisando tempos de retorno e amplitudes das ondas refletidas devido a contrastes de impedância acústica (SHERIFF, 2004).

De acordo com Bacon, Simm e Redshaw (2003), um levantamento sísmico baseia-se na seguinte sequência de eventos: (i) ondas acústicas com amplitude e frequência de interesse são geradas mecanicamente a partir de uma fonte e direcionadas para o fundo marinho; (ii) a onda se propaga da fonte até a região de interesse através da coluna d'água sofrendo alterações até encontrar o fundo; (iii) parte da energia é refletida e parte refratada para outras camadas do substrato com intensidades dependentes do contraste de impedância acústica do meio; (iv) o sinal retorna à superfície da água trazendo informações a respeito da propagação da onda (tempo de propagação, amplitude e fase de retorno) e é captado por receptores sensíveis à pressão sonora; e (v) os sinais recebidos, os chamados traços sísmicos, são analisados e registrados.

O correto processamento de dados sísmicos é imprescindível para que os dados de tempo e frequência possam ser convertidos em imagens que trazem informação correta a respeito da

geologia investigada. Existem várias etapas no processamento de dados sísmicos, algumas bem desenvolvidas e aprimoradas, outras demandam mais estudo. Dentre estas, destaca-se a deconvolução dos sinais, que busca remover o efeito do pulso sonoro enviado pela fonte e ressaltar as características do ambiente (YILMAZ, 1987). Na prática, a deconvolução retira o efeito borrado do dado sísmico e torna as reflexões na sub-superfície muito mais evidentes na imagem da seção geológica gerada (YILMAZ, 1987; ROBINSON, 1981).

A deconvolução possui fontes conhecidas de erros que devem ser levadas em conta na hora da aplicação, como a presença do ruído, a estimativa do pulso enviado pela fonte e a escolha do algoritmo apropriado (YILMAZ, 1987). Cada caso deve ser avaliado para que a melhor metodologia seja empregada.

Existem algumas metodologias para a deconvolução de sinais baseadas em premissas e suposições. De acordo com Wadsworth et al. (1953), é possível dividi-las em dois grandes grupos: probabilística e determinística. Segundo Yilmaz (1987), os métodos determinísticos são aplicados quando se tem conhecimento sobre a forma da onda sonora enviada pela fonte, já os métodos probabilísticos consistem na utilização de teorias estatísticas para a obtenção desta. Existem algumas formas de obter o pulso enviado pela fonte e uma delas é a medição direta no local de aquisição (ARYA, 1978). Porém, os registros do pulso no traço se sobrepõe e tornam-se complicados de se diferenciar. Além disso, as medições diretas não incluem as funções de transferência da coluna d'água e da subsuperfície (WHITE; O'BRIEN, 1974). Apesar disso, a forma do pulso permanece relativamente constante durante as medições, o que permite mediante a aplicação de algumas técnicas, que seja possível restaurá-la (WHITE; O'BRIEN, 1974).

Tendo isto em vista, o artigo tem como objetivo a aplicação de uma técnica baseada na busca de uma combinação de funções simples que recuperam a forma do pulso enviado pela fonte, visando a melhor recuperação da refletividade

do fundo marinho em investigações sísmicas.

Primeiramente a metodologia para a realização do trabalho é exposta na Seção 2 e seguida por um grande bloco de análise de técnicas de deconvolução de dados sísmicos, na Seção 3. Com isso, a teoria e desenvolvimento do algoritmo adaptativo proposto é descrita na Seção 4. Por fim, técnicas de deconvolução selecionadas e o algoritmo adaptativo são aplicados a um conjunto de dados reais da indústria do petróleo na Seção 5.

2. METODOLOGIA

De forma inicial, uma análise sobre as técnicas de deconvolução de dados sísmicos será realizada. Após esta etapa, será aplicada uma técnica baseada na busca por uma combinação de funções simples que recuperam a forma do pulso enviado pela fonte através de um filtro adaptativo alimentado por um algoritmo de mínimos quadrados, apresentada em (BOUSFIELD et al., 2016). Primeiramente, a escolha de funções simples e o algoritmo adaptativo são expostos. É utilizado um pulso de *airgun* para a aplicação da técnica de recuperação do pulso.

Com o método validado e exposto e com a utilização de um perfil de refletividade de um ambiente simulado (Figura 1), uma técnica de deconvolução determinística é aplicada com a utilização da onda direta retirada do sinal acústico e com a utilização do pulso estimado pelo algoritmo adaptativo proposto. Estes resultados são comparados aos resultados referentes à aplicação da deconvolução probabilística. Para a comparação foram criados parâmetros capazes de retornar informações sobre a semelhança do dado obtido com o desejado. O primeiro deles é a diferença entre refletividades (Δ_h), dado por

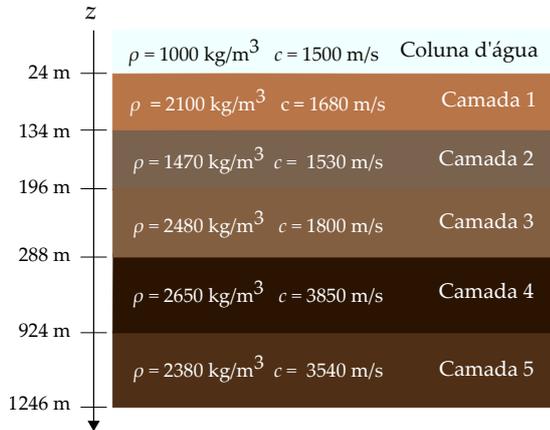
$$\Delta_h = \sum_{t=0}^T [h(t) - h_{est}(t)]^2, \quad (1)$$

na qual $h(t)$ é a refletividade simulada, $h_{est}(t)$ é a refletividade estimada, t a variável tempo e T é o tempo total do sinal. Já para obter informações sobre a precisão na detecção das amplitudes das reflexões, foi criado um parâmetro de coerência

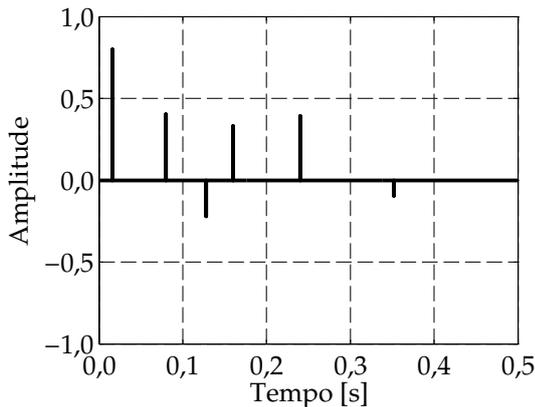
entre as amplitudes (ξ), dado por:

$$\xi = \sum_{t=0}^T \left[\frac{(h_{\text{est}}(t) + h(t))^2}{h_{\text{est}}(t)^2 + h(t)^2} - 1 \right] \frac{1}{\text{NR}}, \quad (2)$$

na qual NR é o número de reflexões.



(a) Ambiente simulado



(b) Reflexão simulada

Figura 1: Ambiente e refletividade modelados.

Por fim, o algoritmo e as deconvoluções são aplicados a dados reais de sísmica marinha para a comparação dos resultados e validação da metodologia. A análise da diferença entre os resultados é realizada visualmente por meio da localização e identificação de estruturas e de ambiguidades.

3. TÉCNICAS DE DECONVOLUÇÃO

Existem diversas técnicas de deconvolução, tanto determinísticas quanto probabilísticas. Algumas delas foram discutidas e analisadas no trabalho de Bousfield (2017) e levando em conta os resultados, neste trabalho serão aplicadas a

técnica determinística da divisão espectral e a técnica probabilística da deconvolução em impulsos.

3.1 Deconvolução via divisão espectral

Segundo Gurrola, Baker e Minster (1995) e Sipkin e Lerner-Lam (1992), a deconvolução em sua forma convencional de divisão espectral, funciona muito bem para casos em que desconsidera-se a presença de ruído:

$$H(f) = Y(f)/X(f), \quad (3)$$

na qual $H(f)$, $Y(f)$ e $X(f)$ são respectivamente os espectros da refletividade do fundo marinho, do traço sísmico e da pulso enviado pela fonte. Com isto, pelo fato de as medições tanto de $x(t)$, o pulso enviado, quanto de $y(t)$, o traço sísmico, em geral, possuírem ruído, é necessário prestar atenção neste tipo de operação.

Além disso, deve-se ressaltar, como feito por Warner (2009), que por se tratar de uma divisão espectral, caso algum dos espectros utilizados para a realização da deconvolução não apresentem componentes em determinada frequência, a divisão se torna uma indeterminação matemática, levando a uma instabilidade do método da divisão espectral. Com isso, uma das formas usuais de estabilizar a divisão espectral, é por meio de um fator de amortecimento ou de regularização, δ , para que valores próximos a zero no denominador da divisão espectral sejam evitados. Segundo Gurrola, Baker e Minster (1995) e Warner (2009), a adição do fator de amortecimento no espectro é equivalente à inserção de ruído branco no domínio do tempo, o que faz com que os pequenos valores no denominador sejam substituídos e a inversão seja estabilizada. Desta forma, o espectro da refletividade do meio investigado pode ser dado por:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f) + \delta}. \quad (4)$$

Com a adição de δ há o aumento em amplitude e suave aumento da largura do espectro, o que altera o seu efeito como um filtro passa-baixa. Esta adição auxilia na redução do ruído

de alta frequência, e conseqüentemente, leva a uma perda de amplitude da refletividade do meio. Isso se deve ao fato de que, por ser uma série de impulsos, a refletividade possui uma faixa de frequência ampla.

4. Deconvolução em impulsos

Nesse procedimento, o pulso enviado pela fonte é desconhecido e se deseja obter informações sobre a refletividade. Desta forma, estimativas estatísticas são realizadas para que resultados sejam obtidos. A deconvolução cega¹ abriu muitos caminhos nas pesquisas envolvendo processamento de dados sísmicos, porém suas premissas são frequentemente violadas, o que a torna inefetiva em muitos casos (ARYA, 1978).

Uma das técnicas probabilísticas mais utilizadas, é a deconvolução por impulsos². Segundo Mousa e Al-Shuhail (2011), para a aplicação é assumido que: (1) a Terra é composta por camadas horizontais de velocidade constante; (2) o pulso enviado é de fase mínima; (3) a refletividade do substrato é uma série de impulsos aleatórios; (4) não há componente de ruído. Esta técnica tem por objetivo converter o pulso enviado pela fonte em um Delta de Dirac ($\delta(t)$). Pode-se obter um filtro inverso que retira a parte previsível do traço sísmico, relacionada ao pulso (PEACOCK; TREITEL, 1969; WARNER, 2009). Com o efeito do pulso eliminado, se tem a informação sobre a refletividade do meio. O filtro inverso $v(t)$ é tal qual:

$$x(t) * v(t) = \delta(t). \quad (5)$$

Como não se tem a informação do pulso enviado pela fonte, é necessário estimá-lo ou encontrar relações entre espectro de amplitude ou autocorrelações do traço sísmico e o pulso. Assumindo uma série de premissas e relações, como descrito por Bousfield (2017) e Mousa e Al-Shuhail (2011), conclui-se que o espectro de amplitude do traço, $Y(f)$, é uma versão escalada do espectro de amplitude do pulso enviado pela fonte, $X(f)$. Com isso, pode-se inferir que

¹Do inglês: *Blind deconvolution*.

²Do inglês: *Spiking deconvolution*.

é possível utilizar o espectro ou a autocorrelação do traço sísmico na ausência da informação sobre o pulso para o cálculo do filtro inverso.

5. RECUPERAÇÃO DE PULSO

Levando em conta a série de premissas assumidas pelas técnicas de deconvolução probabilísticas, em geral, as técnicas determinísticas retornam melhores resultados (MOUSA; AL-SHUHAIL, 2011; YILMAZ, 1987; BOUSFIELD, 2017). Com isso, a estimativa da assinatura da fonte é um dos problemas clássicos da sísmica de exploração (IKELLE; ROBERTS; WEGLEIN, 1997). Segundo Rondenay (2009) e Warner (2009), é uma etapa importante e que pode contribuir para a inserção de erro na obtenção da refletividade do meio.

Para apresentar e validar o método de recuperação de pulso, um sinal de *airgun* foi escolhido para ser utilizado como referência. Sua escolha ocorreu devido à sua ampla utilização na investigação sísmica marinha e devido à repetibilidade e à confiabilidade da sua assinatura espectral. Pulsos emitidos por *airgun* podem ser considerados como sendo de fase mínima (LAMOUREUX; MARGRAVE, 2007), devido à sua característica de apresentar alta energia nos primeiros instantes, apresentando estabilidade para deconvolução. Apesar desta escolha, o método pode ser adaptado para ser aplicado a qualquer outro pulso.

Uma série de métodos de decomposição pode ser utilizada para modelar o sinal de referência, tais como: Fourier, Séries de Wavelet e Decomposição Empírica de Modos (BOUSFIELD et al., 2016). Contudo, é possível escolher duas ou mais funções simples que quando combinadas podem reconstruir as principais características do pulso da fonte com a utilização de menos coeficientes, o que possibilita a diminuição do ruído. O conceito de decomposição de um sinal em várias funções já foi utilizado por alguns autores em diversos campos de pesquisa como uma abordagem de decomposição de pulsos arteriais (BARUCH et al., 2011) e na confecção de métodos para comunicação em banda larga

(JIA et al., 2010).

Com isso, o método proposto faz a união de duas ou mais funções simples no domínio do tempo (t) para a reconstrução do pulso enviado pela fonte. No caso, como um pulso de *airgun* é analisado, foram escolhidos um cosseno e uma função exponencial a serem multiplicados:

$$f_1(t) = \cos(2\pi\alpha t) \quad e \quad (6)$$

$$f_2(t) = e^{-\pi^2\beta^2 t^2}, \quad (7)$$

na qual α , correspondente à frequência da função cosseno, e β à abertura da função exponencial, são os coeficientes a serem adaptados.

Deve-se ressaltar que é desejável ter um conhecimento prévio da possível forma de onda do pulso para que as funções sejam escolhidas. Com isso, qualquer outra combinação de funções que seja capaz de recuperar o pulso enviado pode ser utilizada. É importante notar que existe uma relação de compromisso: quanto menos funções simples e coeficientes a combinação tiver, mais robusto será o sistema já que menos graus de liberdade reconstruirão o padrão de ruído intrínseco ao traço, fazendo com que o sistema não seja afetado por ele. Por outro lado, o número de graus de liberdade também influencia na eficiência da fiel reprodução do pulso estimado.

5.1 Algoritmo adaptativo

Um algoritmo adaptativo foi projetado para encontrar automaticamente os coeficientes adaptativos das funções simples que minimizam o erro entre a referência e o pulso que é estimado através dos coeficientes adaptados. É possível discretizar o tempo total de medição em blocos que representam a obtenção cada traço (n).

A entrada do sistema é o pulso original enviado pela fonte \bar{x} , que passa a ser corrompido por ruído z e resulta no sinal ruidoso observado x , aqui utilizado como referência. O pulso de referência, x , pode ser obtido através da onda direta presente no traço. Tendo conhecimento da distância entre fonte e receptor e da velocidade de propagação do som na água, é possível

calcular a posição da onda direta e o pulso de referência pode ser obtido de forma simples.

A partir de análises qualitativas do pulso de referência, x , nos domínios do tempo e da frequência, definem-se as funções simples, os coeficientes de entrada a serem adaptados pelo algoritmo e um erro inicial. Estes são enviados para o filtro adaptativo para que com base nas informações dadas os coeficientes adaptativos das funções simples, v , possam ser atualizados. Os coeficientes atualizados são levados para o aplicador, que configura os novos valores na combinação de funções simples, gerando o pulso estimado, \hat{x} . Desta forma, é possível calcular o erro entre o pulso de referência, x , e o estimado, \hat{x} , que pode ser dado pela subtração vetorial

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n). \quad (8)$$

Contudo, é necessária uma função objetivo capaz de retornar um valor escalar para servir de parâmetro de semelhança entre pulso de referência e estimado e para ser utilizado na próxima iteração na descoberta dos novos coeficientes, v . Porém, a simples soma do vetor de erro (Eq. (8)) pode camuflar a diferença entre $\hat{x}(n)$ e $x(n)$ devido à interferência destrutiva. Tendo isso em vista, foi estabelecida uma função objetivo que retorna um escalar, dada pela soma do erro, $e(n)$, ao quadrado ponderada pelo tamanho do vetor de erro (T), exibida na forma vetorial:

$$e'(n) = \frac{1}{T} e^T(n) \cdot e(n). \quad (9)$$

A Figura 2 ilustra o diagrama de blocos do sistema adaptativo retroalimentado proposto, no qual as linhas grossas indicam o fluxo de um vetor e as finas indicam o fluxo de um escalar. O método para a atualização dos coeficientes adaptativos baseada nas informações pretéritas escolhido foi o Método dos Mínimos Quadrados (LMS). De implementação computacional simples e intuitiva, o LMS permite a alteração do vetor gradiente através da modificação da função objetivo (LU et al., 2007). Para que a minimização da função objetivo (Eq. (9)) fosse realizada a cada iteração, foi escolhido o Método do Gradiente de Descida, que busca o ponto mínimo da função objetivo escolhida seguindo a

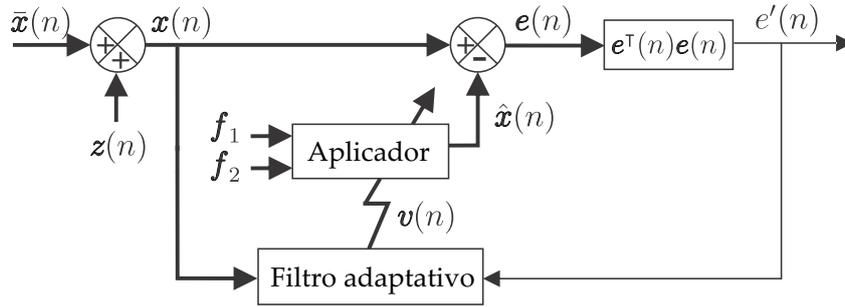


Figura 2: Diagrama de blocos do algoritmo adaptativo.

direção oposta do vetor gradiente do erro em relação aos coeficientes, gerando a atualização dos coeficientes como segue:

$$\mathbf{v}(n) = \mathbf{v}(n-1) - \mu e'(n-1) \nabla e'(n-1), \quad (10)$$

na qual

$$\mathbf{v}(n) = [\alpha \quad \beta]^T, \quad (11)$$

é o vetor de coeficientes atualizados, μ é o coeficiente de convergência e $\nabla e'(n)$ é o gradiente de $e'(n)$ ou a derivada parcial do erro instantâneo em relação ao vetor de coeficientes $\mathbf{v}(n)$. Considerando a combinação de Eq. (6) e Eq. (7), o pulso estimado (\hat{x}), as derivadas parciais da função objetivo podem ser calculadas como segue:

$$\frac{\partial e'}{\partial \alpha} = 4\mathbf{x}^T(n) \left(\pi \mathbf{t} \circ \text{sen}(2\pi\alpha\mathbf{t}) \circ e^{-\pi^2\beta^2\mathbf{t}^2} \right) - 2\pi \sum_{t_i=0}^T \left(t_i \cdot \text{sen}(4\pi\alpha t_i) \cdot e^{-2\pi^2\beta^2 t_i^2} \right); \quad (12)$$

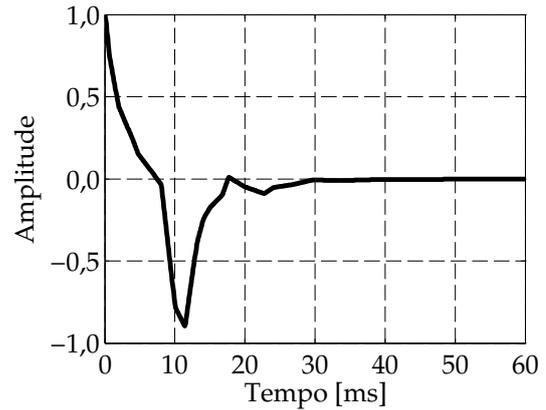
$$\frac{\partial e'}{\partial \beta} = 4\mathbf{x}^T(n) \left(\pi^2 \beta \mathbf{t}^2 \circ \cos(2\pi\alpha\mathbf{t}) \circ e^{-\pi^2\beta^2\mathbf{t}^2} \right) - 4\pi^2 \beta \sum_{t_i=0}^T \left(t_i^2 \cdot \cos^2(2\pi\alpha t_i) \cdot e^{-2\pi^2\beta^2 t_i^2} \right), \quad (13)$$

na qual \circ é o produto de Hadamard.

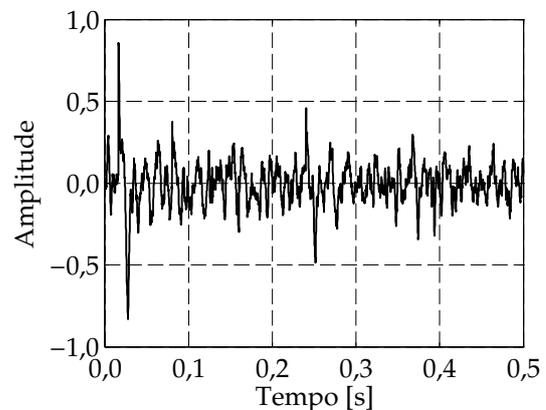
5.2 Deconvoluções com o pulso estimado

Com o método já validado em Bousfield (2017), Bousfield et al. (2016), Bousfield et al. (2016), buscou-se a simulação de um conjunto de pulsos reais. A assinatura de *airgun* registrada por Mikaelson (2013) e exposta na Figura 3 (a) foi utilizada para a geração de um traço sísmico simulado, resultado da convolução entre o pulso

e a refletividade modelada, exposta na Figura 1, com adição do ruído característico descrito por Wenz (1962), que inclui ruído de bolhas, vento, fluxo d'água e de tráfego marítimo em regiões rasas, com amplitude de 0,6. O traço sísmico resultante é exposto na Figura 3 (b).



(a) Pulso de *airgun* (MIKAELSEN, 2013)



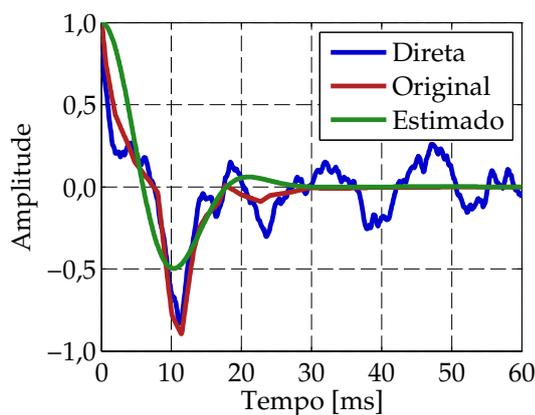
(b) Traço sísmico simulado

Figura 3: Pulso real de *airgun* e traço sísmico simulado utilizados para validação do método.

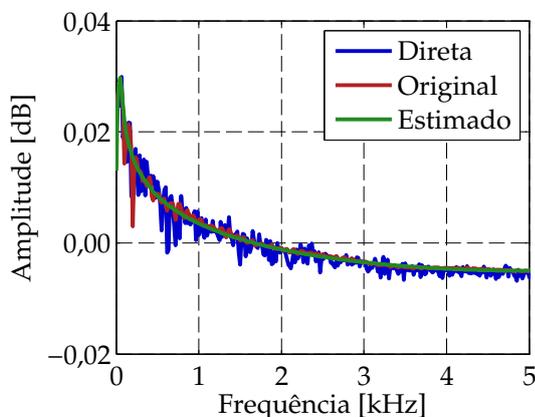
O algoritmo foi aplicado com um coeficiente

de convergência de $\mu = 3 \times 10^{-3}$ e um total de 10^3 iterações. Como referência para o algoritmo, a própria onda direta foi utilizada tendo em vista que em uma situação real se tem conhecimento sobre a geometria do problema.

A Figura 4 (a) ilustra a onda direta (pulso ruidoso) em azul, o pulso original (que se busca estimar) em vermelho e o pulso estimado através do algoritmo, em verde.



(a) Domínio do tempo



(b) Domínio da frequência

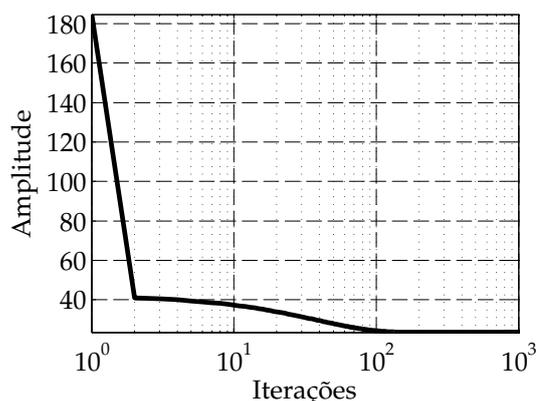
Figura 4: Comparação entre os pulsos *airgun* original, de referência e estimado.

Nessa, é qualitativamente perceptível que o pulso estimado recupera alguma informação sobre frequência e amplitude, mas não atinge o pulso original de forma exata. Isso se deve ao fato de se tratar de um pulso real de *airgun*, não tão simples de estimar através de apenas duas funções. Mais funções simples podem ser adicionadas à combinação, porém, a adição de graus de liberdade, como mencionado, além de poder

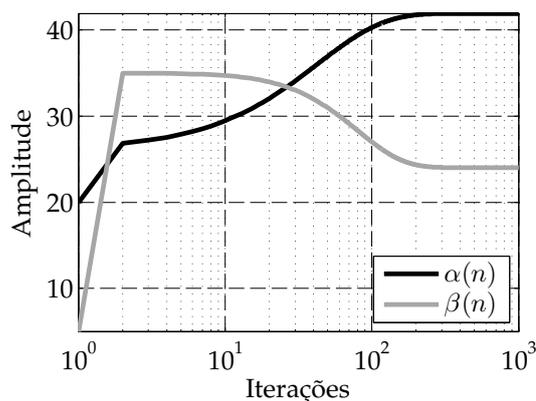
contribuir para uma estimativa melhor, poderia levar a reprodução do ruído da onda direta.

A Figura 4 (b) expõe os espectros de amplitude, mostrando que a estimativa se mantém fiel aos outros dois espectros com uma característica menos ruidosa, devido à não reprodução pelas funções simples.

A evolução do erro entre o pulso estimado e a onda direta com o número de iterações é exibida no gráfico da Figura 5 (a), na qual percebe-se que logo após a 100ª iteração há uma convergência da diferença. Já a Figura 5 (b) ilustra a evolução dos coeficientes, na qual percebe-se que o algoritmo, com o número de iterações, converge para valores únicos.



(a) Evolução do erro



(b) Evolução dos coeficientes

Figura 5: Convergência do método com pulso real de *airgun*.

Como o pulso é estimado com a utilização de funções simples, sua Transformada de Fourier pode ser facilmente calculada. Com isso, um

filtro inverso pode ser definido diretamente e os coeficientes adaptativos podem ser utilizados como entrada do filtro:

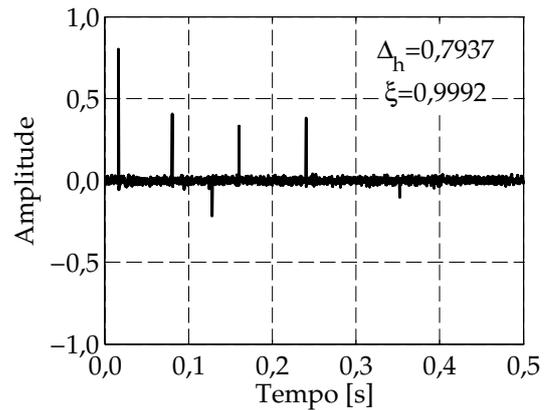
$$V(\omega) = \frac{2\sqrt{2}\pi\beta}{i} \left(\exp\left(-\frac{(\omega-2\pi\alpha)^2}{4\pi^2\beta^2}\right) + \exp\left(-\frac{(\omega+2\pi\alpha)^2}{4\pi^2\beta^2}\right) \right)^{-1} \quad (14)$$

A utilização do filtro inverso, com a inserção dos coeficientes adaptativos estimados faz com que o custo computacional seja bastante reduzido e permite a realização da deconvolução de forma prática e rápida.

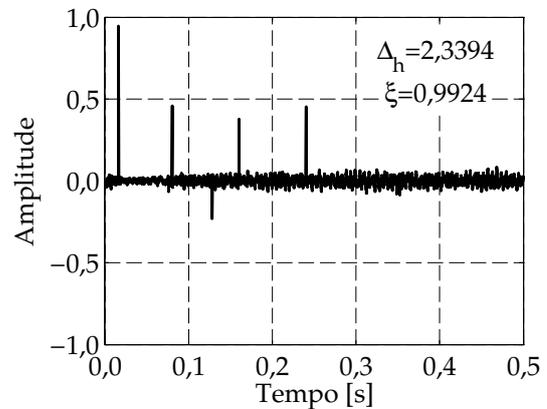
O pulso estimado foi utilizado para a aplicação do algoritmo de deconvolução determinística. Com isso, comparou-se o desempenho da operação com a utilização da onda direta e do pulso estimado e também, com a deconvolução em impulsos, técnica probabilística. A Figura 6 ilustra as refletividades estimadas através da deconvolução via divisão espectral sem amortecimento, tendo em vista que se trata de um pulso considerado de fase mínima e não necessita de fator de regularização.

Qualitativamente é possível perceber que a refletividade obtida através do pulso estimado (Figura 6 (a)) apresenta menos ruído e encontra de forma mais precisa as reflexões do ambiente simulado do que a obtida através da utilização da onda direta retirada do traço sísmico (Figura 6 (b)). A refletividade estimada (h_{est}) através da utilização do pulso estimado (\hat{x}) apresenta todas as seis reflexões, enquanto a que utiliza a onda direta (x) mascara a sexta reflexão, próxima à 0,35 s.

Fazendo uma análise quantitativa, a diferença entre as refletividades estimadas pela deconvolução e as simuladas (Δ_h) é menor quando estima-se o pulso através do algoritmo adaptativo com um valor de $\Delta_h = 0,7937$, enquanto o valor para a utilização da onda direta é de $\Delta_h = 2,3394$, aproximadamente 95% maior. O fator de coerência de picos (ξ) para o caso em que utiliza-se o pulso estimado é de $\xi = 0,9992$ enquanto para o caso da onda direta é de $\xi = 0,9924$, ou seja, as amplitudes são melhores encontradas quando utiliza-se do pulso estimado para deconvolver o traço sísmico.



(a) Com pulso estimado



(b) Com onda direta

Figura 6: Comparação dos resultados da deconvolução via divisão espectral com pulso estimado e com onda direta.

Já a Figura 7 ilustra o resultado obtido para a aplicação da deconvolução em impulsos, técnica probabilística, sem a informação do pulso.

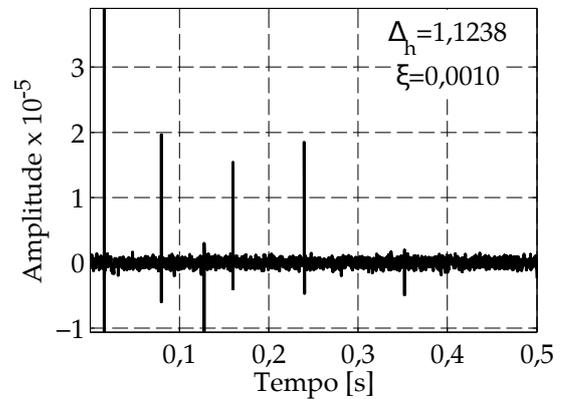


Figura 7: Aplicação a deconvolução em impulsos ao traço sísmico

Apesar de não demandar muito esforço para a

aquisição do pulso, a deconvolução em impulsos traz resultados, quando analisados qualitativamente, com ruído semelhante à técnica de divisão espectral com a onda direta, porém há a inserção de artefatos em direção oposta às reflexões, que são bem localizadas. Além disso, as amplitudes não são bem estimadas, sendo alteradas em até cinco ordens de grandeza, o que leva a um baixo valor de $\xi = 0,001$.

Deve-se levar em conta que a utilização de diversos traços sísmicos e a realização do empilhamento pretérito à deconvolução pode diminuir consideravelmente o ruído presente nas refletividades estimadas pela deconvolução.

A aplicação da deconvolução determinística se mostrou superior à probabilística. Os melhores resultados, com os menores erros e maior localização de reflexões quando às amplitudes de reflexões foram obtidos através da deconvolução determinística com a utilização do pulso estimado. Isso se deve ao fato de que a estimativa do pulso retira o ruído do sinal, deixando, na medida do possível, as características principais do pulso.

Como a onda direta está presente no traço sísmico e pode ser utilizada para estimar o pulso enviado pela fonte através do filtro adaptativo proposto, o método é promissor para a realização desta etapa do processamento sísmico.

6. APLICAÇÃO A DADOS REAIS

Para comparação e validação das técnicas de estimativa de pulso e deconvolução foram utilizadas dados sísmicos reais cedidos ao grupo. A linha sísmica de trabalho possui 150 traços sísmicos, totalizando 4 km de extensão, aquisitada do mar em direção à costa. Na Figura 8, são exibidos os traços com 4096 amostras temporais cada, totalizando uma duração de 8,2 s (tempo de propagação em duas vias) em estado bruto.

Aplicou-se aos dados, uma correção para a divergência geométrica da propagação sonora. Com os dados corrigidos, se deu início à análise por meio da aplicação do algoritmo da estima-

tiva do pulso para apenas um traço. Tomou-se cuidado em selecionar a onda direta de forma a obter um pulso de fase mínima, tendo em vista que é sabido que este tem um desempenho melhor nas técnicas de deconvolução (BOUSFIELD, 2017; MOUSA; AL-SHUHAIL, 2011).

O pulso de *airgun* pode ser estimado com as mesmas funções simples utilizadas para a exposição do método (Eq. (6) e Eq. (7)). Desta forma, o algoritmo para estimativa do pulso enviado pela fonte foi aplicado ao primeiro traço. O coeficiente de convergência utilizado foi de $\mu = 0,6$ e foram realizadas 1000 iterações.

Como a onda direta é conhecida, é possível observar o espectro de amplitude para encontrar coeficientes iniciais plausíveis. Com isso, se faz com que o algoritmo convirja e não desestabilize com a escolha de coeficientes iniciais discrepantes da solução. Com a análise, novos picos relevantes podem levar a inserção de novas funções simples que sejam capazes de reconstruir o espectro de forma mais precisa. Nesse caso, serão utilizados apenas o cosseno e a exponencial como funções para reconstrução do pulso, o que torna possível apenas a reconstrução de um pico de frequência.

A Figura 9 ilustra a onda direta e a estimativa do pulso obtida no domínio do tempo e da frequência. Mediante análise qualitativa se nota que o pulso estimado recupera a forma da onda direta de maneira satisfatória. O espectro, por ter sido utilizado apenas um cosseno para a estimativa do pulso, reproduz apenas um dos picos.

A convergência dos coeficientes α (frequência do cosseno) e β (abertura da exponencial) ocorre antes de 200 iterações e é visualizada na Figura 10. A mesma convergência é percebida para o erro (Eq. (9)) entre a onda direta e pulso estimado, que cai e estabiliza próximo a 2.

Com a estimativa do pulso, foi realizada a deconvolução de todos os traços. Aplicou-se a divisão espectral com amortecimento (devido à instabilidade de dados reais) com $\delta = 0,01$.

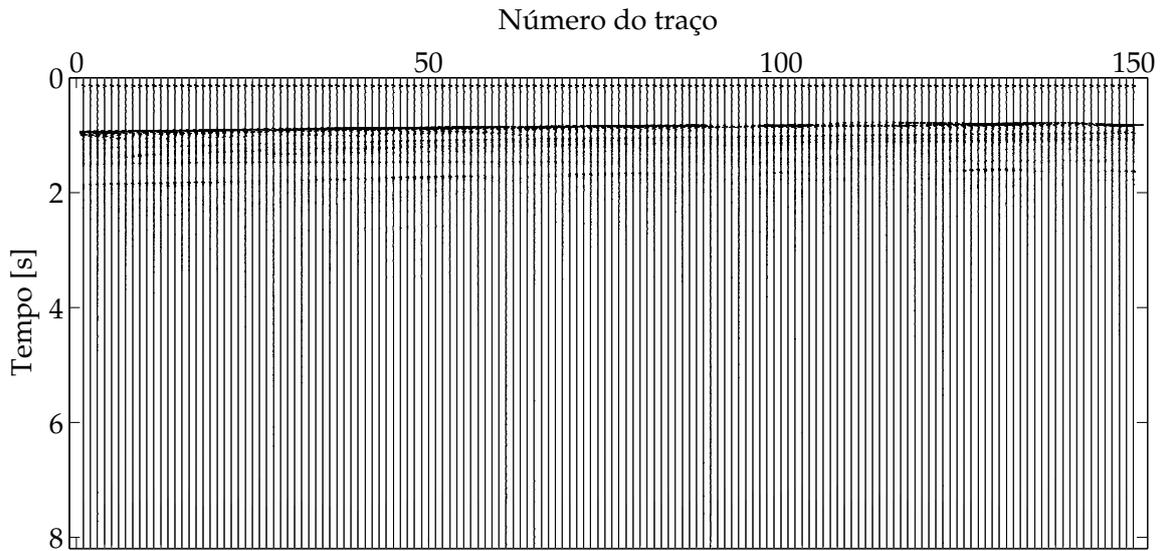
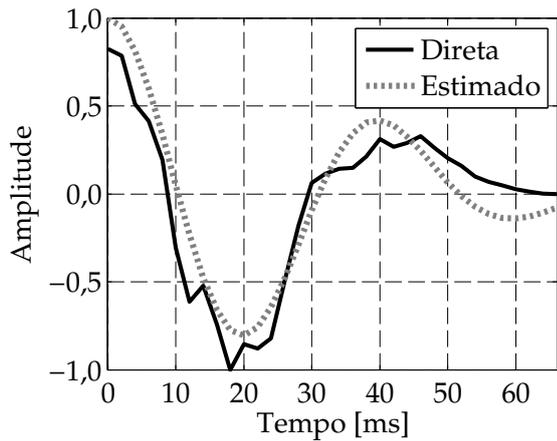
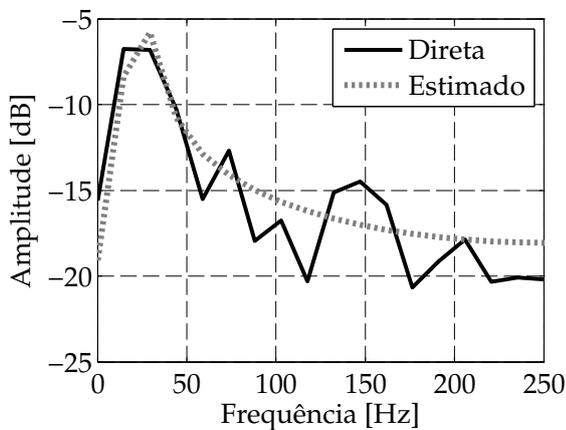


Figura 8: Traços da linha sísmica analisada em estado bruto.

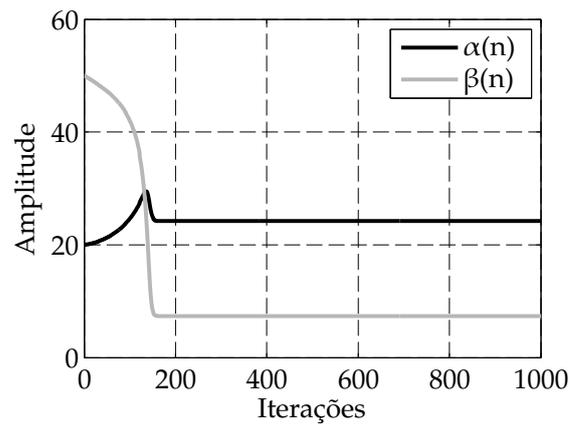


(a) Domínio do tempo

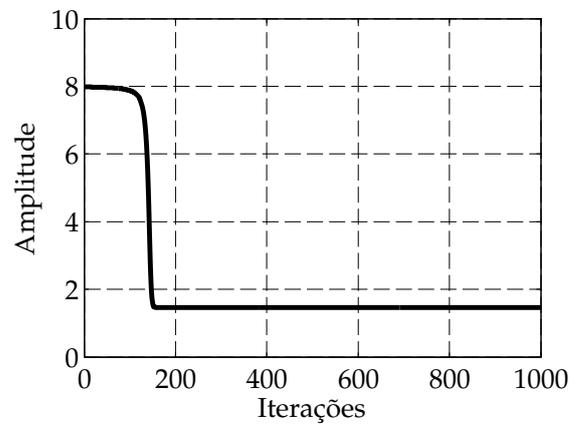


(b) Domínio da frequência

Figura 9: Estimativa do pulso enviado.



(a) Coeficientes adaptativos



(b) Erro

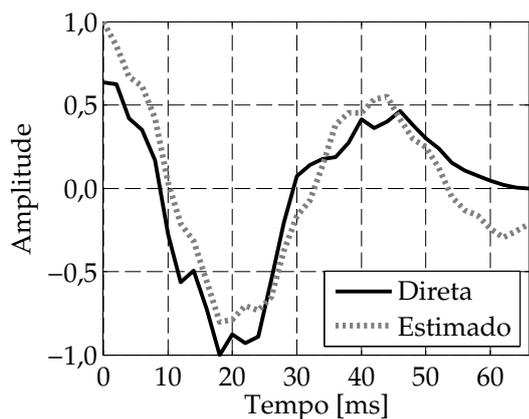
Figura 10: Convergência de coeficientes e erro.

Como espectro da onda direta (Figura 9 (b)) apresenta outros picos de frequência, foi feita uma avaliação da estimativa do pulso com a utilização de três funções simples ao invés de duas. Adicionou-se mais um cosseno com amplitude (A) de 10% da amplitude do primeiro:

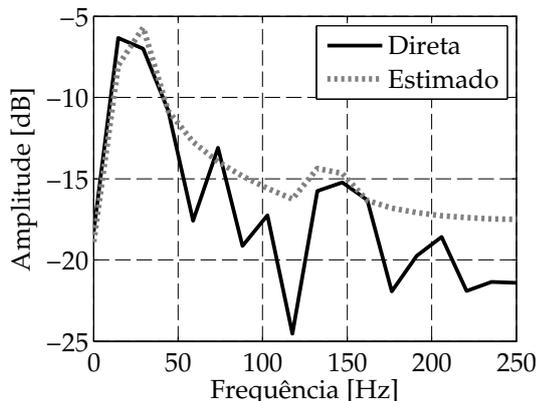
$$\hat{x} = [A \cos(2\pi\alpha t) + 0,1A \cos(2\pi\beta t)] e^{-\pi^2\gamma^2 t^2}, \quad (15)$$

na qual o coeficiente A deve ser avaliado da mesma forma como visto para α e β .

Adaptou-se as frequências dos cossenos, α e β , e a abertura da exponencial, γ . O algoritmo adaptativo foi aplicado à onda direta com 1000 iterações e com um coeficiente de convergência $\mu = 0,4$. A comparação entre a onda direta e o pulso estimado é exposta na Figura 11.



(a) Domínio do tempo



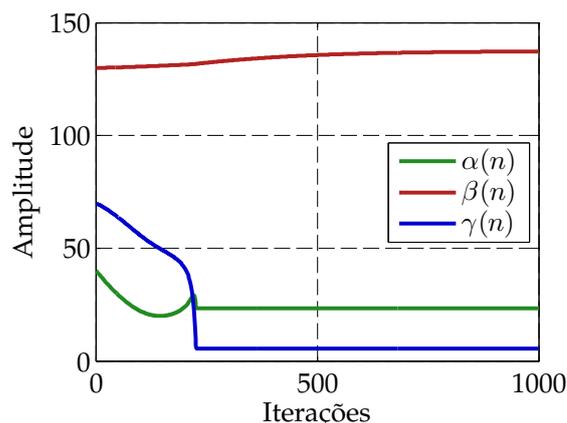
(b) Domínio da frequência

Figura 11: Estimativa do pulso enviado.

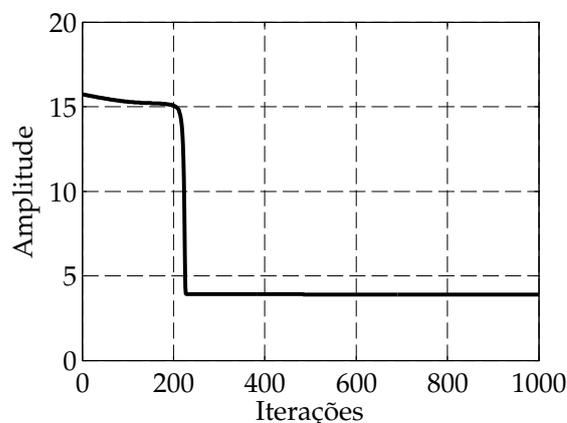
É possível perceber que para esse caso em que uma função simples a mais é utilizada, há maior

proximidade entre pulso estimado e a onda direta, quando comparado ao caso anterior.

Já as curvas para a progressão dos coeficientes e do erro com o número de iterações, estão dispostas na Figura 12. Nessas, se nota que há a convergência após a 200ª iteração, ou seja, o algoritmo se torna um pouco mais lento em relação ao caso anterior.



(a) Coeficientes adaptativos



(b) Erro

Figura 12: Convergência de coeficientes e erro.

Com um aumento na região de 3 s, o resultado para a deconvolução com a utilização do pulso estimado com duas funções simples é exposto na Figura 13, já o resultado para a utilização de três funções simples é exposto na Figura 14. É perceptível que as deconvoluções trazem melhoras na percepção das reflexões.

Algumas feições que não eram visíveis através dos dados não deconvolvidos passam a ser realçadas e ruído é removido. Contudo, nota-se que

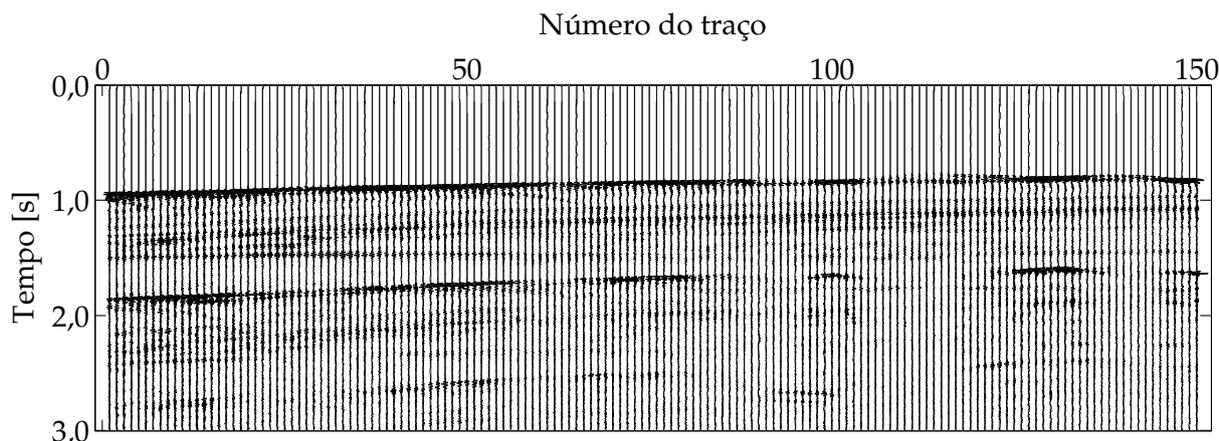


Figura 13: Deconvolução determinística com pulso estimado através da combinação de duas funções.

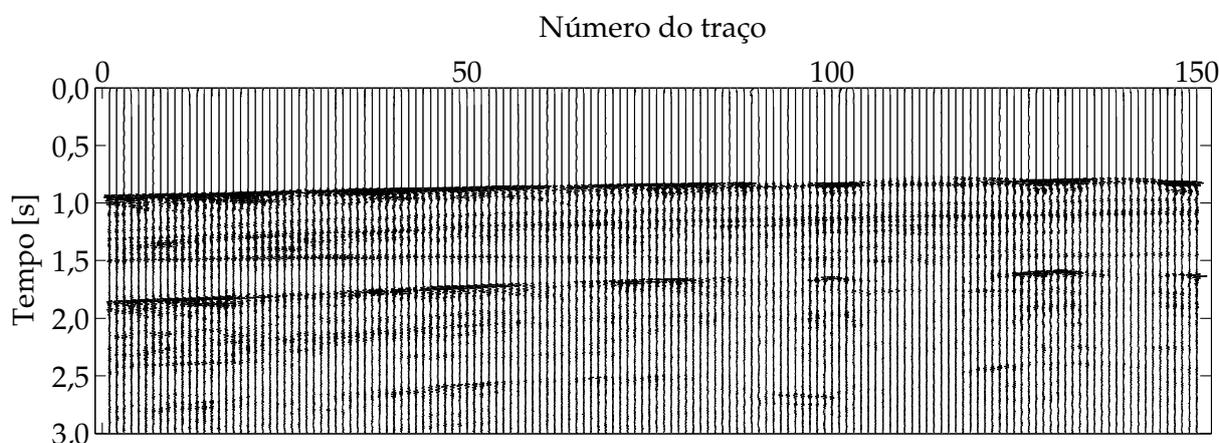


Figura 14: Deconvolução determinística com pulso estimado através da combinação de três funções.

a deconvolução utilizando três funções simples teve um desempenho não tão bom quanto a que utilizou duas funções. Ruído, principalmente abaixo das reflexões principais, começa a aparecer. Esse comportamento pode ser devido ao fato de que a utilização de três coeficientes, ao invés de dois, passou a reconstruir característica do ruído e não apenas do pulso.

Na Figura 15 esse padrão pode ser observado com mais clareza. Um destaque foi dado a uma região ao final dos conjunto de traços brutos, de traços deconvolvidos utilizando duas funções simples e de traços deconvolvidos utilizando três funções simples. Percebe-se que as deconvoluções trazem um realce das reflexões em destaque. Contudo, principalmente observando a feição 1, a utilização de três funções simples acrescentou ruído abaixo das reflexões, causando um efeito borrado. Algumas reflexões,

como a inferior dentro do 6º destaque, as inferiores do 3º destaque e a apontada pelo 2º destaque, só aparecem após a aplicação da deconvolução. Além disso, no 4º destaque, principalmente com a utilização de duas funções, pode-se observar a presença de eventos abaixo da reflexão principal, antes imperceptíveis. Apesar de pouca diferença, é possível notar que a deconvolução traz melhoras à imagem sísmica.

Como análise final, pode-se observar na Figura 16 (a), o resultado para a deconvolução com amortecimento dos traços utilizando a onda direta e na Figura 16 (b) o resultado para a deconvolução dos traços utilizando a técnica probabilística, a deconvolução em impulsos.

É possível perceber, que quando aplicada a dados reais, a deconvolução com amortecimento fazendo uso do pulso estimado através do algo-

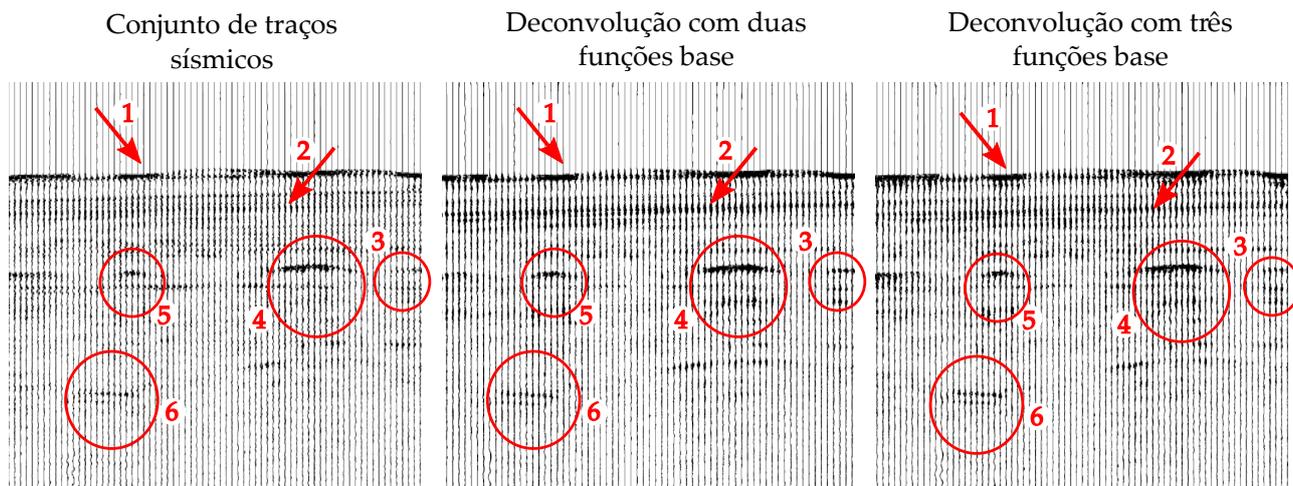
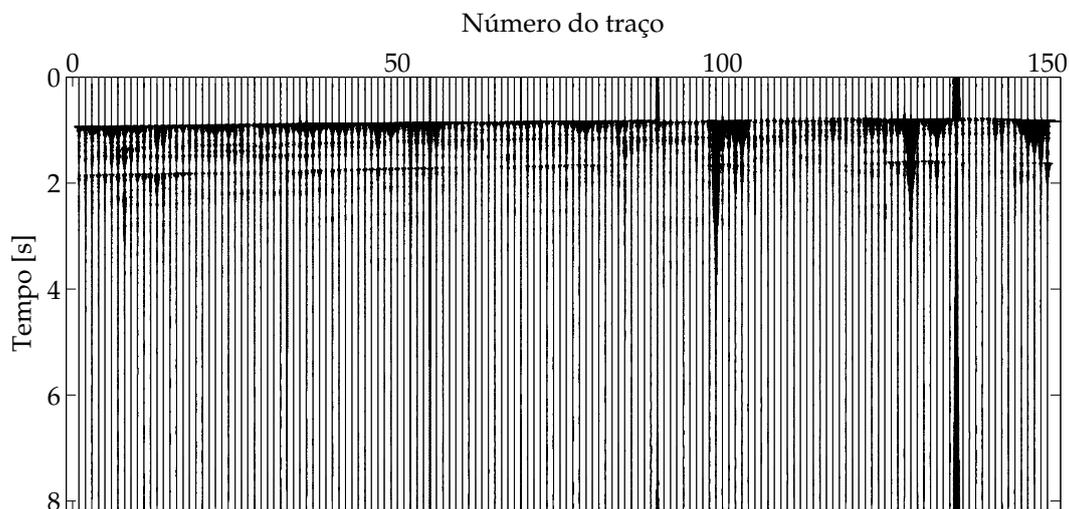
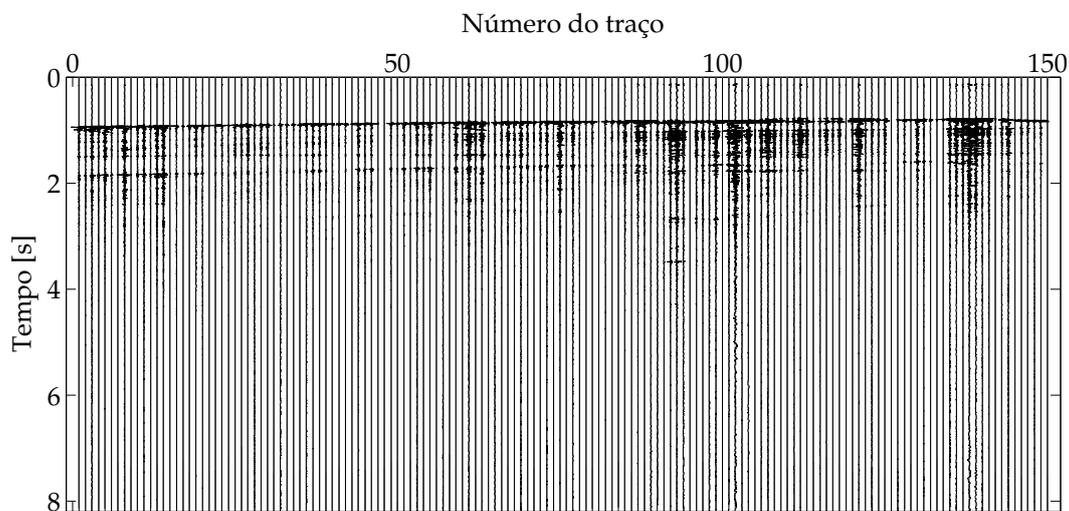


Figura 15: Destaque esquemático de traços brutos, deconvolvidos com duas e com três funções.



(a) Divisão espectral com regularização com a utilização da onda direta.



(b) Deconvolução em impulsos.

Figura 16: Resultados para aplicação de deconvolução probabilística e determinística com onda direta

ritmo proposto se mostra muito mais eficiente do que a deconvolução com amortecimento utilizando a onda direta e do que a deconvolução probabilística. Enquanto a utilização da onda direta aumenta o efeito borrado e acrescenta ruído, dificultando as identificações de feições e a deconvolução em impulsos adiciona ambiguidades e ruído, a deconvolução utilizando o pulso estimado revela feições não visíveis no dado bruto e realça feições já visíveis, melhorando a imagem sísmica. Desta forma, na ausência da informação do pulso enviado pela fonte, a aplicação da estimativa de pulso retorna melhores resultados.

7. CONCLUSÕES

Com o exposto no trabalho pode-se concluir que a técnica de deconvolução que utiliza o pulso enviado pela fonte retorna melhores resultados para a imagem sísmica quando comparada a técnicas probabilísticas. É possível utilizar a onda direta ou um pulso estimado para a realização deste tipo de operação. Todavia, o algoritmo exposto para a recuperação do pulso, estima de forma simples, robusta e eficiente o pulso descartando ruído. Com isso, os resultados da aplicação da deconvolução considerando o pulso estimado foram melhores, inclusive quando feita as comparações com a aplicação a dados reais.

Além disso, adicionalmente, a utilização de funções simples para a recuperação do pulso enviado pela fonte, permite o cálculo de um filtro inverso analítico, capaz de retornar a refletividade do meio de forma simples e direta.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), ao Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina e a Wavetech Soluções Tecnológicas pelo suporte.

REFERÊNCIAS

ARYA, V. Deconvolution of seismic data - an

overview. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, GE-16, p. 95–98, 1978.

AYRES, A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 18, n. 3, p. 16, 2001.

BACON, M.; SIMM, R.; REDSHAW, T. *3-D seismic interpretation*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.

BARUCH, M. et al. Pulse decomposition analysis of the digital arterial pulse during hemorrhage simulation. *Nonlinear Biomedical Physics*, Springer Nature, v. 5, n. 1, 2011.

BOUSFIELD, M. et al. Deconvolução utilizando filtragem adaptativa com decomposição em funções base. In: *Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina*. [S.l.: s.n.], 2016.

BOUSFIELD, M. M. *Deconvolução de traços sísmicos: análise, aplicação e estimativa de pulso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

BOUSFIELD, M. M. et al. Using base function decomposition in adaptive filter for seismic pulse retrieving. In: *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics*. [S.l.: s.n.], 2016.

GURROLA, H.; BAKER, E.; MINSTER, B. Simultaneous time-domain deconvolution with application to the computation of receiver functions. *Geophysical Journal International*, v. 120, p. 537–543, 1995.

IKELLE, L.; ROBERTS, G.; WEGLEIN, A. Source signature estimation based on the removal of first-order multiples. *Geophysics*, v. 62, n. 6, p. 1904–1920, 1997.

JIA, Z. et al. A novel pulse design based on sinusoid gaussian function for UWB communication. In: *2010 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology*. [S.l.]: (IEEE), 2010.

LAMOUREUX, M.; MARGRAVE, G. *An analytic approach to minimum phase signals*. [S.l.], 2007.

LU, W. et al. Blind wavelet estimation using a zero-lag of the fourth-order statistics. *Journal of geophysics and engineering*, v. 4, p. 24–30, 2007.

MIKAELSEN, M. *Seismic survey Greenland 2013: Underwater sound propagation for South East Greenland offshore seismic survey*. [S.l.], 2013.

MOUSA, W.; AL-SHUHAIL, A. *Processing of Seismic Reflection Data Using MATLAB*. [S.l.]: Morgan & Claypool Publishers, 2011.

PEACOCK, K. L.; TREITEL, S. Predictive deconvolution: Theory and practice. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 34, n. 2, p. 155–169, apr 1969.

ROBINSON, E. Signal processing in geophysics. In: BJØRNØ, L. (Ed.). *Underwater Acoustics and Singal Processing*. [S.l.]: D. Reidel Publishing Company, 1981. (Mathematical and Physical Sciences, v. 66), p. 669–682.

RONDENAY, S. Upper mantle imaging with array recordings of converted and scattered teleseismic waves. *Surveys in Geophysics*, v. 30, p. 377–405, 2009.

SHERIFF, R. What is deconvolution? Adaptado da coluna da AAPG Explorer de 2004 “A Demystifying of Deconvolution”. 2004.

SIPKIN, S.; LERNER-LAM, A. Pulse-shape distortion introduced by broadband deconvolution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 82, p. 238–258, 1992.

WADSWORTH, G. P. et al. Detection of reflection on seismic records by linear operators. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 18, n. 3, p. 539–586, jul 1953.

WARNER, M. *Signal processing and inverse theory*. 2009.

WENZ, G. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *The journal of the acoustical society of America*, v. 34, n. 12, 1962.

WHITE, R. E.; O'BRIEN, P. N. S. Estimation of the primary seismic pulse. *Geophysical Prospecting*, Wiley-Blackwell, v. 22, n. 4, p. 627–651, dec 1974.

YILMAZ, O. *Seismic data processing*. [S.l.]: SEG Investigations in Geophysics, 1987.