

## Desenvolvimento de algoritmos para processamento de sinais em ondas dispersivas

Odilon D. D. Couto. Jr <sup>1</sup>, Tobias Heimfarth <sup>2</sup>, Pablo Diniz Batista <sup>3</sup>

IBP2212\_16

Desenvolvimento de algoritmos para processamento de sinais em ondas dispersivas

Copyright 2016, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2016**, realizado no período de 24 a 27 de outubro de 2016, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas no trabalho completo submetido pelo(s) autor(es). Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2016**.

---

### Resumo

Neste trabalho investigamos dois tipos de algoritmos utilizados para determinar a velocidade da onda cisalhante em ondas dispersivas que se propagam em poços de perfuração. De uma maneira geral, serão consideradas as seguintes abordagens: (a) Weighted Spectral Semblance (WSS) e (b) Phase-based Dispersion Analysis Method (PBDA). Nosso objetivo é fazer uma análise criteriosa destes dois métodos, ponderando suas vantagens e desvantagens, de forma que a partir disso possamos ter uma plataforma própria para este tipo de estudo, que seja tão eficiente quanto ou ainda mais do que os métodos atualmente utilizados.

### Abstract

In this work we investigated two types of algorithms used to determine the velocity of shear waves in dispersive waves that propagate in drilling wells. In general, these approaches are considered: (a) Weighted Spectral Semblance (WSS) and (b) Phase-Based Dispersion Analysis Method (PBDA). Our goal is to make a thorough examination of these two methods, considering its advantages and disadvantages, so that from it we can have a proper platform for this type of study that is as efficient as or even more than the methods currently used.

### 1. Introdução

Em petrofísica, medidas acústicas revelam uma infinidade de propriedades tanto do reservatório como do poço. Para acessar quantitativamente estas propriedades, é essencial saber como as ondas acústicas se propagam na Terra. Normalmente, as principais análises para se obter tais informações são realizadas a partir de medidas das velocidades dos diferentes tipos de ondas acústicas que se propagam no meio, como a *compressional*, a cisalhante, ou a *Stoneley*. Elas são utilizadas isoladamente ou em combinação com outras medidas para inferir propriedades de formação e poço como porosidade, permeabilidade, pressão de poro, anisotropia, tipos de fluidos, direção do estresse, presença e alinhamento de fraturas e a qualidade da cimentação. Utilizando as ferramentas tradicionais de aquisição de dados nota-se que as propriedades das ondas acústicas dependem da energia da fonte, do caminho em que a onda se propaga, e das propriedades de formação e também de poço. Existem dois tipos primários de fontes: monopolo e dipolo. Para o transmissor do tipo monopolo a energia é emitida igualmente em todas as direções a partir de seu centro, enquanto que em um transmissor dipolo a energia é emitida em uma direção privilegiada.

As ferramentas atualmente utilizadas para inferir as propriedades acústicas das rochas em poços preenchidos por fluido provem da análise de dados de espalhamento de ondas acústicas. Estas ondas são geradas e detectadas durante o processo de perfuração do poço por um conjunto de geradores e receptores dispostos ao longo da ponta de prova. A partir de um enorme conjunto de dados obtidos em função a profundidade de perfuração é possível utilizar técnicas

---

<sup>1</sup> PHD, Físico, UNICAMP

<sup>2</sup> PHD, Físico, UFFS

<sup>3</sup> PHD, Físico, CBPF

computacionais para reconstruir as frentes de onda propagantes no meio e caracterizá-lo com relação ao tipo de modo acústico, velocidade, atenuação e dispersão (Assous S et. al., 2014; Tang X. M. et. al., 2010; Tang X. M and Cheng A., 2004; Haldorsen J. B. et. al., 2006; Franco J. L. A et. al., 2006).

Neste trabalho, iniciamos o desenvolvimento de ferramentas computacionais para realizar um tratamento eficiente e possivelmente mais acurado de dados acústicos. Investigamos diferentes tipos de técnicas utilizadas para o processamento de sinais e tentamos obter uma plataforma eficaz para realizar este tipo de análise. Nesta primeira abordagem realizamos nossa análise a partir de dados sintéticos gerados computacionalmente. Numa segunda etapa o método será aplicado a dados reais.

## 2. Processamento de sinais para análise de dispersão

A ferramenta de medida sônica pode gerar e detectar frentes de onda que se propagam no sistema poço/rocha. A partir das frentes de onda detectadas é possível obter a velocidade e as curvas de dispersão dos diferentes modos que se propagam no sistema. Para isso, são necessárias técnicas de processamento de sinal para calcular a amplitude e a velocidade das várias ondas em função da frequência a partir dos dados fornecidos pela ferramenta (Lang S. W. et. al (1987); Christopher V. et. al., 1984; Tang X. M., 1997; Kozak M. et. al., 2001).

Historicamente, a velocidade de chegada de um determinado modo é determinada conhecendo-se a distância entre receptores e a diferença de tempo entre os sinais. Esta simples abordagem é eficaz para o primeiro intervalo de chegada da onda compressional que possui uma alta relação sinal-ruído e pode dar uma boa resposta se a chegada deste modo for isolada por algum método de filtragem. No geral, a relação sinal-ruído e a chegada simultânea de diferentes modos fazem necessária a utilização de métodos mais sofisticados de análise das frentes de ondas detectadas. Existem hoje duas abordagens amplamente utilizadas para a extração de velocidades a partir de formas de onda: métodos baseados no domínio do tempo e no domínio da frequência.

O primeiro, chamado geralmente *slowness time coherence* (STC), é baseado em uma análise estatística para a energia do sinal e depende da similaridade no formato da onda, considerando todas as ondas captadas pelos receptores. Este método calcula, para uma grande gama de possíveis tempos de chegada, a coerência entre todas as formas de onda geradas a partir de um transmissor comum e detectadas por um conjunto de detectores. Os valores máximos da coerência, para uma determinada profundidade, identificam as velocidades dos modos que se propagam no meio. O método STC dá uma boa resposta se cada chegada sísmica é isolada, quer no domínio do tempo ou de frequência. Ele é rápido, robusto, simples de desenvolver e pode trabalhar com vários tipos de onda e com sinais de amplitudes baixas, fornecendo resultados razoavelmente confiáveis (Tang X. M. et. al., 2004; Christopher V. et. al, 1984).

No entanto, o método STC apresenta baixa resolução para a velocidade e é válido apenas para o tratamento de modos não dispersivos (onde as velocidades de fase e de grupo são independentes da frequência). No entanto, para modos dispersivos, como o flexural e o stoneley, métodos no domínio de frequência são mais desejáveis, pois permitem a obtenção da curva de dispersão ao longo da gama de frequências que são excitadas pela ferramenta. Um dos métodos utilizados nessa situação é o *Weighted Spectral Semblance* (WSS) desenvolvido usando a Transformada de Fourier Tang X. M et. al (2004); Christopher V. et. al., 1984; Kozak M. et. al., 2001). O método WSS é um dos mais comumente utilizados no estudo das propriedades acústicas de poços preenchidos por fluido. No entanto, há na literatura científica outras propostas que vêm sendo investigadas para o desenvolvimento de ferramentas computacionais voltados para análise de ondas dispersivas. Por isso, neste trabalho, investigamos e testamos também a aplicação de métodos computacionais mais atuais, como o *Phase Based Dispersion Analysis* – PBDA com o intuito de extrair de cada método o seu melhor (Assous S. et. al., 2014; Mukhopadhyay P. et. al., 2013; Bonnel J. e Chapman N. R, 2011). Detalhes desses dois métodos serão descritos a seguir.

### 2.1. Weigthed Spectral Semblance Method

Considerando um conjunto de dados  $X_n(t)$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) obtidos por uma ferramenta acústica com  $N$  receptores igualmente espaçados, deseja-se estimar a velocidade da onda para cada componente de frequência. O primeiro passo consiste em calcular o espectro dos dados  $X_n(w)$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ), que são obtidos a partir da Transformada de Fourier dos sinais  $X_n(t)$ . Em seguida, calcula-se, no domínio da frequência, a função de coerência  $\rho(w, s)$  para a velocidade usando a seguinte equação:

$$\rho(w, s) = \frac{|\sum_{n=1}^N X_n^* e^{-iw(n-1)sd}|}{\sqrt{N \sum_{n=1}^N X_n^*(w) X_n(w)}} \quad 1$$

Nesta equação,  $w$  é a frequência angular,  $d$  é o espaço entre os receptores, e  $*$  indica o conjugado complexo. As duas barras verticais indicam o valor absoluto da quantidade entre as barras. Considerando que o dado espectral  $X_n(w)$  corresponde a um modo de onda acústico com uma vagarosidade (*slowness*)  $S(w)$  o modo da onda através de cada receptor na matriz é dado por:

$$X_n(w) = A_n(w) e^{-iw(n-1)S(w)d} \quad 2$$

Onde  $w(n-1)S(w)d$  é a fase adquirida entre o primeiro e o  $n$ -ésimo detector. Assim, observa-se que se a variável *slowness*  $s$  recebe o valor de  $S(w)$  para um dado  $w$ , então a fase de  $X_n(w)$  na equação 2 será cancelada, e o valor de coerência será maximizado (pode-se mostrar que o valor máximo de  $\rho(w, s)$  é 1 para  $s = S(w)$ ). Portanto, maximizando a função coerência  $\rho(w, s)$  ao longo do eixo  $s$  para cada  $w$ , a curva de dispersão  $S(w)$  pode ser determinada.

### 2.1. Phase-based dispersion analysis (PBDA)

A técnica **PBDA** é baseada na medida da fase em cada receptor para, em seguida, convertê-la em tempo de atraso. Como a distância entre cada dois detectores é usualmente conhecida, é possível inferir a velocidade e, portanto, a vagarosidade. É uma técnica direta, não introduz erros, e não está susceptível a erros relacionados com a periodicidade da fase (uma manipulação apropriada deste aspecto constitui um elemento importante para o desenvolvimento desta técnica).

Para entender essa técnica, considere as ondas  $x_1(t), \dots, x_N(t)$  obtidas usando oito detectores igualmente espaçados. Neste caso, a Transformada de Fourier de cada um desses sinais é dada por  $X_1(f), \dots, X_N(f)$ . O objetivo consiste em determinar a mudança na fase do sinal para cada frequência, pois, a partir dessa informação, é possível determinar a velocidade da onda se a distância entre os detectores for conhecida. Sabe-se que as ondas terão um atraso de propagação de um detector para outro e, considerando o caso de dispersão, o tempo de atraso depende da frequência. A diferença de fase entre dois detectores para a mesma frequência pode ser convertida em tempo de atraso usando a seguinte equação:

$$\tau = \frac{\Delta\phi}{360f} \quad 3$$

sendo  $\Delta\phi$  a medida em graus e  $f$  a frequência em análise. Desde que a distância entre os detectores  $d$  seja conhecida para esta diferença de fase e o tempo  $\tau$ , é possível determinar a velocidade em (V) m/s e, portanto a vagarosidade ( $S=1/V$ ) em us/ft a partir da seguinte equação:

$$S(f) = \frac{1}{V} = k \frac{\Delta\phi}{360fd} \quad 4$$

$k = 304878$  é o fator de conversão entre *m/s* e *us/ft*. Usando a fase para as múltiplas frequências de  $F_s/N$  até Nyquist  $F_s/2$ , todos  $\Delta\phi_{i=1\dots n}$  entre os pares sucessivos de detectores podem ser determinados. Note que antes de processar  $\Delta\phi_{i=1\dots n}$ , as fases  $\phi_{i=1\dots n}$  precisam passar por uma etapa conhecida por *phase unwrapping*, isto é, um algoritmo para tratar a periodicidade da fase. A partir da relação entre as diferenças de fase entre cada canal sucessivo, para cada frequência obtem-se uma inclinação (*slope*) da reta  $\Delta\phi$  vs.  $d$ , a partir da qual a velocidade pode ser obtida usando a equação:

$$S = \frac{1}{V} = k \frac{|Slope|}{360fd} \quad 5$$

## 2. Geração de dados sintéticos

O primeiro passo da simulação consiste em obter o sinal no domínio do tempo para cada um dos oito detectores considerando que a distância entre eles é de 0.10 m. Para isso, cada um dos sinais é obtido a partir da soma de quarenta ondas senoidais ( $N = 40$ ) com diferentes frequências como mostra a equação 8:

$$y(t) = \sum_{i=0}^N A_i \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \quad 6$$

A amplitude de cada uma desses harmônicos depende da frequência de acordo com uma distribuição gaussiana como mostra a equação 9:

$$A(f, f_c, w) = \frac{1}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(f-f_c)^2}{2w^2}} \quad 7$$

Finalmente, a fase de cada harmônico deve ser calculada levando-se em conta tanto a frequência e a velocidade do harmônico assim como a distância do detector em questão com relação ao primeiro detector como mostra a equação 10:

$$\theta_i(f, s, d) = f(n-1)sd \quad 8$$

Observa-se assim que a dispersão da onda acústica é introduzida na simulação a partir do momento em que estabelecemos que para cada frequência teremos uma velocidade específica. Essa equação consideramos que a distância entre os detectores é a mesma, assim, o termo  $n$  corresponde ao número do detector a partir do primeiro. A dispersão é obtida a partir da função *sigmoidal* como mostra a equação 11:

$$s(f) = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(f-f_0)/dx}} + A_2 \quad 9$$

A partir dessas equações a Figura 1-a apresenta o sinal do domínio do tempo para cada um dos detectores, enquanto que a relação entre a velocidade e a frequência do sinal utilizada nessa simulação está apresentada na Figura 1-b. A Figura 1-c mostra a amplitude dos harmônicos obtidos através da equação 9 e a figura 1-d destaca como o valor da fase de cada um dos harmônicos depende tanto da frequência assim como da posição dos detectores. Esses dados são utilizados para testar ambos os algoritmos.

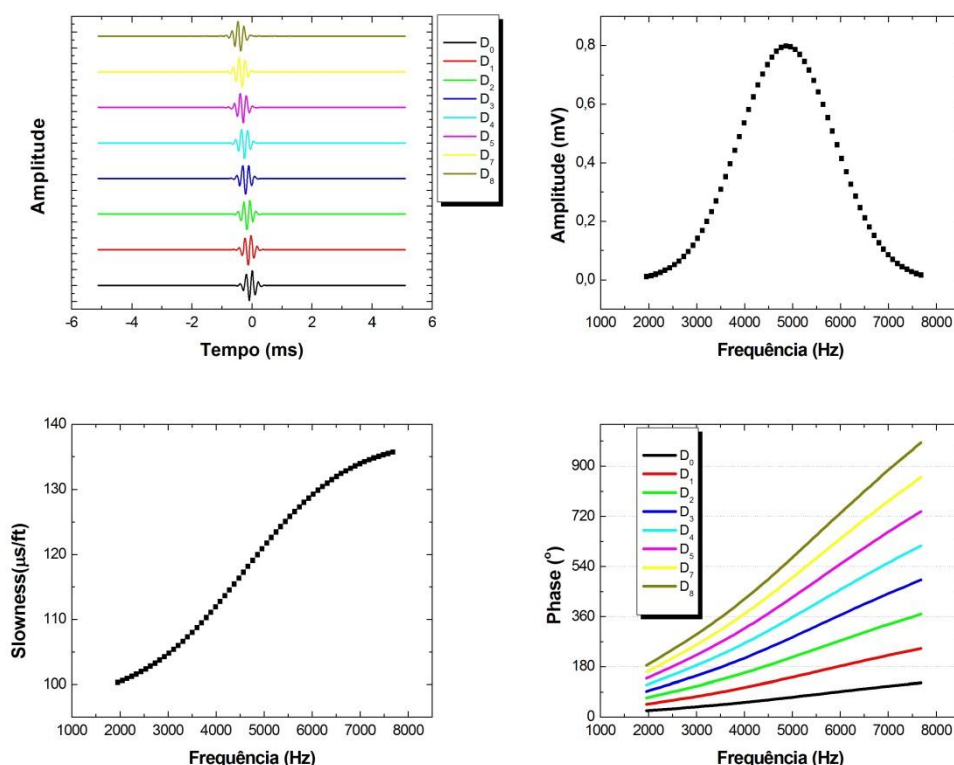


Figura 1. (a) representação do sinal no domínio do tempo para oito detectores. (b) curva de dispersão da vagarosidade em relação a frequência. (c) Amplitude dos todos os harmônicos que compõem o sinal. (d) Valor da fase para cada um dos harmônicos em função da distância dos detectores.

## 6. Análise do WSS e do PBDA

A figura 2-a apresenta em diagrama de blocos a ideia geral para a simulação dos dados seguida pela implementação dos algoritmos WSS e PBDA. Primeiramente os dados são simulados no domínio do tempo de acordo com a curva de dispersão e, em seguida duas sequencias diferentes são realizadas para obter a curva de vagarosidade de acordo com os dois métodos propostos. A análise do WSS deve ser dividida em dois passos, são eles: o cálculo do (a) semblance e da (b) velocidade, enquanto que, o PBDA determina diretamente a velocidade em função da frequência a partir da diferença de fase entre os sinais. Entretanto, ambos os algoritmos usam a Transformada Discreta de Fourier como principal ferramenta para representar os sinais no domínio da frequência. A implementação dessa rotina pode ser realizada diretamente a partir das seguintes equações (Smith S. W, 1998; Embree P. M and Danieli D.,1999).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-2\pi i k n / N} \quad 10$$

e

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{2\pi i k n / N} \quad 11$$

Futuramente, essas rotinas serão implementadas a partir do algoritmo para a Transformada Rápida de Fourier. A partir dessa representação sabemos que a diferença de fase entre dois sinais para uma frequência específica pode ser determinada usando seguinte relação:

$$\theta[k] = \text{atan} \left( \frac{\text{Im}(X[k])}{\text{Re}(X[k])} \right) \quad 12$$

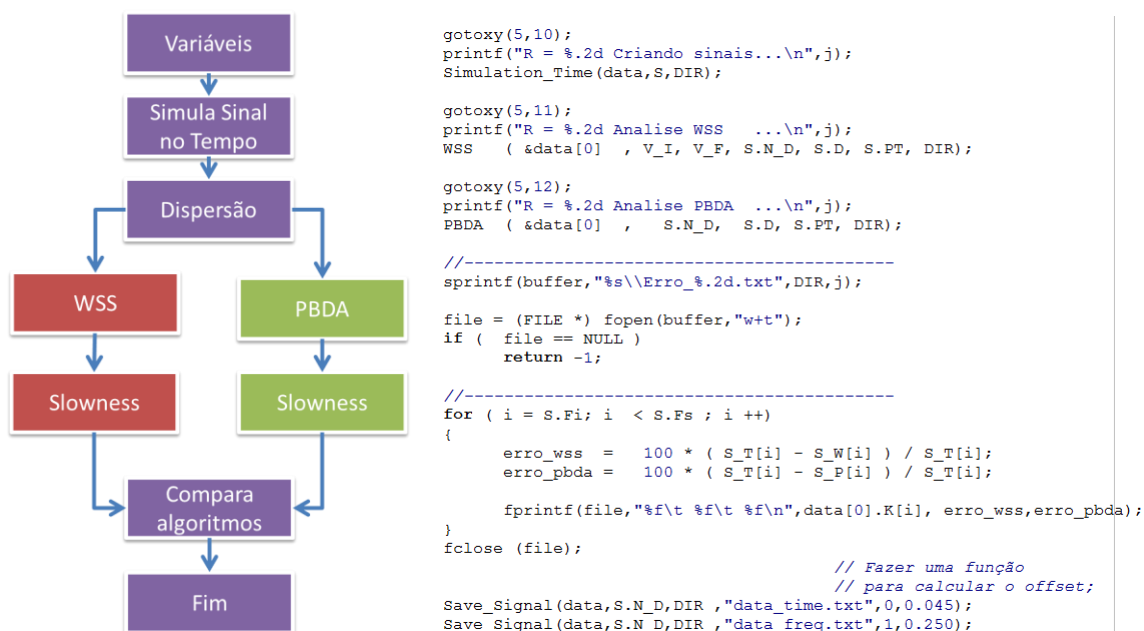


Figura 2. À esquerda apresentamos o fluxograma para a simulação dos dados e análise dos métodos WSS e PBDA. À direita está parte do código principal do programa desenvolvido em linguagem C responsável gerar os dados sintéticos e realizar as análises a partir do WSS e PBDA.

A figura 3-a mostra a matriz do semblance calculada a partir da equação 1 usando os dados simulados como discutido anteriormente. É importante citar que o passo utilizado para a velocidade nesta equação é o único parâmetro escolhido pelo usuário. Assim, a velocidade varia 0 até 5000 m/s com passos de X m/s. A velocidade em função da frequência é determinada procurando o ponto em que o *semblance* alcança seu maior valor como mostra a figura 3-b. Em seguida, a vagarosidade em função da frequência é obtida lembrando apenas que a primeira é o inverso da segunda (ver figura 3-c). Finalmente, a figura 3-d apresenta o resultado obtido a partir do método PBDA

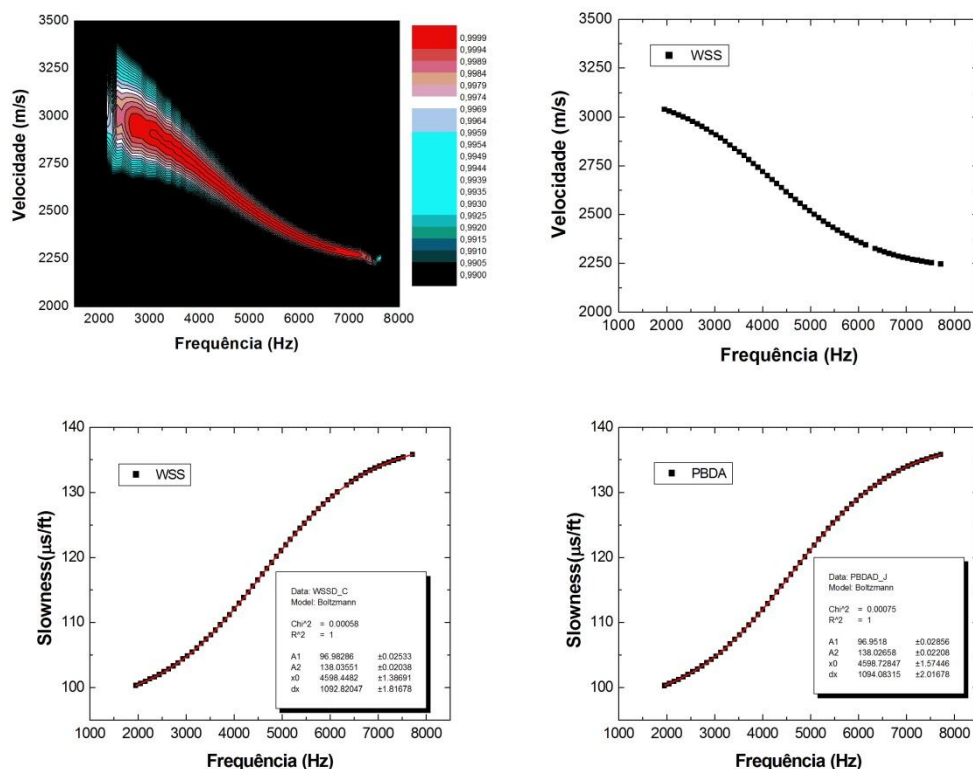
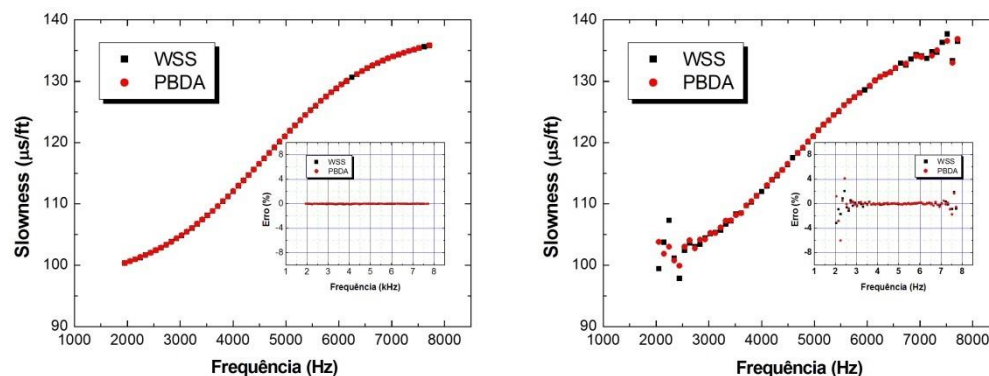


Figura 3. Análise de resultados a partir do método WSS e PBDA

De uma maneira geral os resultados obtidos após a simulação mostram que ambos os algoritmos determinam com uma boa precisão a relação entre a vagarosidade e a frequência utilizada para simular os dados no domínio do tempo (figura 1-b). Entretanto, a primeira diferença observada entre os dois algoritmos está relacionada com o tempo de processamento, desde que o método PBDA é *x* vezes mais rápido que o WSS. Porém, observamos também que quando um ruído é adicionado ao sinal no domínio do tempo ambos os algoritmos têm dificuldade para determinar a vagarosidade nos extremos da curva (baixa e alta frequência) como mostra a figura 4. Provavelmente, o erro pode ser reduzido utilizando filtros para o sinal no domínio do tempo antes que o mesmo seja processado.



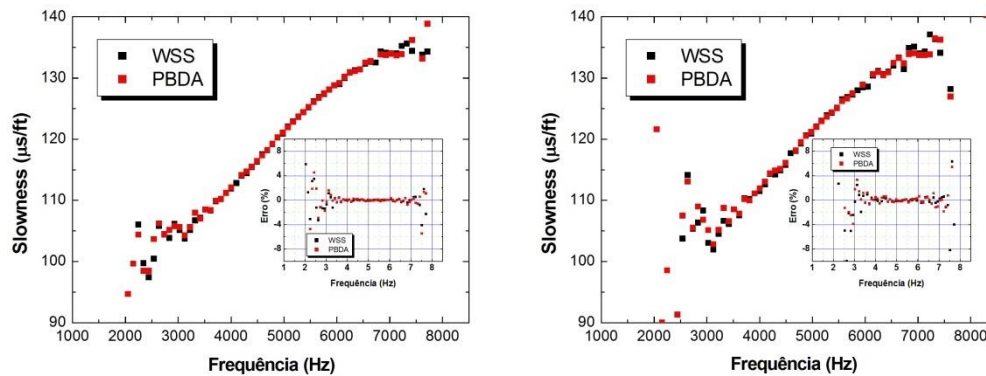


Figura 4. Resposta dos algoritmos WSS e PBDA para dados simulados com ruído de 1, 3, 5 e 10 % com relação a amplitude do sinal

## 6. Conclusão

Nesse trabalho apresentamos o desempenho de dois algoritmos implementados em Linguagem C/C++ desenvolvidos para determinar a velocidade da onda cisalhante em ondas dispersivas que se propagam em poços de perfuração. A perspectiva futura é testar e otimizar ambos os algoritmos para processar dados reais que serão obtidos em colaboração com a Petrobras.

## 8. Referências

- ASSOUS S., ELKINGTON P., LINNETT L., Phase-based dispersion analysis for acoustic array borehole logging data, *J. Acoust. Soc. Am.* 135 (4), April 2014.
- TANG X. M., CHEN L. I., PATTERSON J., A curve-fitting technique for determining dispersion characteristics of guided elastic waves, *Geophysics* Vol 75, No 3 (2010).
- TANG X. M., CHENG A., Quantitative Borehole Acoustic Methods in Handbook of Geophysical Exploration: *Seismic Exploration*, edited by K. Helbig and S. Treitel (2004).
- HALDORSEN J. B. U., JOHNSON D. L., PLOMA T., SINHA B., VALERO H. P., WINKLER K.. Borehole acoustic waves. *Oilfield Review*, 2006.
- FRANCO J. L. A., ORTIZ M. A. M., RENLIE G. S. DE, L., WILLIAMS S.. Sonic investigations in a around the borehole. *Oilfield Review*, 2006.
- LANG S. W., KURKJIAN A. L., MCCLELLAN J. H., MORRIS C.F., PARKS T. W., Estimating slowness dispersion from arrays of sonic logging waveforms, *Geophysics*, Vol 52, No 4 (1987).
- CHRISTOPHER V. KIMBALL, MARZETTA T. L., Semblance processing of borehole acoustic array data, *Geophysics*, Vol 49. No 3 (1984).
- TANG X. M., Predictive processing of array acoustic waveform data, Geophysics, MA, 1997.
- KOZAK M., BOONEN P., SEIFERT D., Phase velocity processing for acoustic logging-while-drilling full waveform data, *SPWLA 42th Annual Logging Symposium*, June 17-20, Houston, Texas (2001).
- MUKHOPADYWAY P., CHENG A., TRACADAS P., The differential-phase based time and frequency semblance algorithm for array acoustic processing and its application for formation-slowness measurement, *Petrophysics* 54 (5), 475-481 (2013).
- BONNEL J., CHAPMAN N. R., Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators, *J. Acoust. Soc. Am.* 130 (2) EL 101-EL107 (2011).
- SMITH S. W., *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, (1998).
- EMBREE P. M., DANIELI D., *C++ Algorithms for Digital Signal Processing 2nd Edition* (1999), Prentice Hall PTR.