



## Aplicação da Decomposição Espectral de Dados Sísmicos no Estudo das Acumulações de Hidratos de Gás da Bacia de Pelotas

Odilla Magalhães Vilhena de Oliveira e Sérgio Adriano Moura Oliveira. Laboratório de Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo, Universidade Estadual Norte Fluminense - LENEPU/UFPA

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

In the last years, seismic researches are producing more detailed and precise information for characterization and reservoir management. The spectral decomposition have been recently applied in seismic data as a powerful tool to interpret the properties of reservoirs, to determine the thickness of layers, to detect accumulations of hydrocarbon and to show stratigraphic details not visible in their original form. There are a lot of spectral decomposition methods that can be used but in this work we will apply the Continuous Wavelet Transform (CWT) in seismic data of the Pelotas Basin to check how this technique responds to accumulations of gas hydrates in Brazilian coast.

### Introdução

A decomposição espectral refere-se a uma técnica que permite a análise contínua de sinais não-estacionários no domínio tempo x frequência, ou seja, possibilita a obtenção de informações sobre a variação do conteúdo de frequência do sinal ao longo do tempo. Quando aplicado em dados sísmicos esta técnica pode apontar anomalias geradas, por exemplo, devido à atenuação em reservatórios espessos, a frequência de “*tuning*” de reservatórios com acunhamento e as sombras de baixa frequência normalmente associadas com acumulações de gás (ver por exemplo: Sun *et al.*, 2002)

Neste trabalho, aplicamos a decomposição espectral em dados sísmicos da Bacia de Pelotas. Esta região, apesar de relativamente pouco estudada, apresenta indícios de ser potencialmente produtora de gás e/ou óleo, e de hidratos de gás no subsolo marinho; sendo este último confirmado pela presença do BSR (*Bottom Simulating Reflector*) nas seções sísmicas.

O hidrato de gás ou clatrato é um material cristalino como o gelo, consistindo da associação de moléculas de água, formando “gaiolas” que encapsulam moléculas de gás (geralmente o metano). Estudos focalizados nesta fonte de energia alternativa tem sido de interesse crescente, pois, estimativas publicadas sugerem que a energia representada pelo hidrato deve exceder o dobro da

energia proveniente de combustíveis fósseis (Hardage e Roberts, 2006).

### Decomposição Espectral Tempo x Frequência

A decomposição espectral desvenda o sinal sísmico dentro de seus componentes de frequência. Permite que o intérprete veja a fase e a amplitude de fenômenos físicos, “sintonizadas” a um comprimento de onda, assim como um rádio pode escolher uma única estação ou um prisma uma única cor (Hall e Trouillot, 2004).

Existem vários métodos de decomposição espectral. Os mais conhecidos são os baseados em transformações lineares, tais como: STFT (*Short Time Fourier Transform*), CWT (*Continuous Wavelet Transform*) e ST (*S Transform*); e os métodos baseados em algoritmos não lineares, entre eles: MPD (*Matching Pursuit Decomposition*) e EPD (*Exponential Pursuit Decomposition*), que associados com a distribuição de Wigner-Ville, geram espectrogramas de alta resolução. Segundo Castagna, *et al.* (2006), nenhum destes métodos são considerados certos ou errados. Cada um tem sua própria vantagem e desvantagem, dependendo do objetivo da aplicação.

Um dos métodos convencionais mais antigos para produzir um mapa no domínio tempo x frequência é a transformada de Fourier por janela (STFT), que limita seu poder de resolução devido ao comprimento de sua “janela” ser pré-definido. A transformada contínua de *wavelet* baseia-se na dilatação e translação de uma função mãe para produzir um mapa em termos de tempo x escala ou tempo x frequência. Esta técnica possui uma melhor resolução no domínio tempo x frequência, pois, não precisa da pré-seleção de um comprimento de janela.

A função *wavelet* geradora é definida como  $\psi(t)$ . Dilatando e transladando  $\psi(t)$ , uma forma de onda similar é produzida tal que:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

Onde  $a$  é o parâmetro de dilatação ou escala e  $b$  é o parâmetro de translação. A transformada contínua de *wavelet* é então estabelecida como o produto interno da família de *wavelets*  $\psi_{a,b}(t)$ , com o sinal  $x(t)$ , dado por (ver por exemplo: Mallat, 1999):

$$F(a,b) = \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

Onde  $\bar{\psi}$  é o complexo conjugado de  $\psi$  e  $F(a,b)$  é o mapa tempo-escala (escalograma). Para obter o mapa tempo-frequência (espectrograma)  $F(f,b)$ , é preciso definir a frequência central da *wavelet* mãe  $f_c$  e associá-la com a escala  $a$  usando a seguinte relação:

$$f = \frac{f_c}{a} \quad (3)$$

A figura 1c ilustra o espectrograma do traço sísmico da figura 1a calculado através da transformada contínua de *wavelet*, sendo comparado com o seu respectivo espectro de frequência calculado com a transformada de Fourier. O espectro de amplitude meramente informa quais as componentes harmônicas presentes no sinal e qual a relação de amplitudes entre eles. Esta análise não é muito informativa para o sinal sísmico que é não-estacionário. Já no espectrograma é possível localizar temporalmente as mudanças das características espectrais das reflexões e observar, por exemplo, como a largura de banda diminui devido à atenuação. É possível visualizar e interpretar os resultados da decomposição de cada traço de uma seção sísmica criando-se um cubo de dados tempo x frequência x distância conforme figura 2. O resultado pode ser visto através de “fatias” de frequência e a animação das imagens, variando-se a frequência, permite detectar características estratigráficas e sutis discontinuidades.

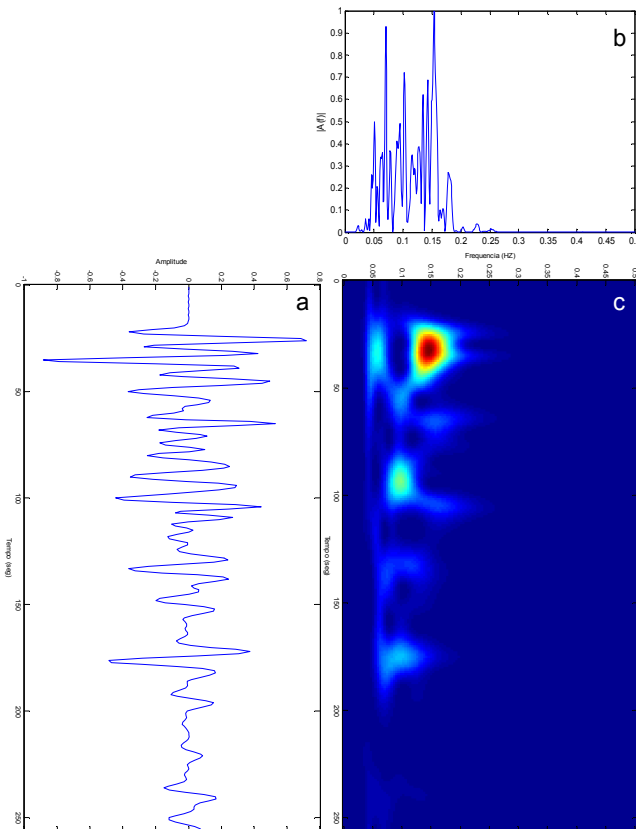


Figura 1 – Ilustração gráfica de um (a) Traço Sísmico, (b) Espectro de Frequência e (c) Espectrograma.

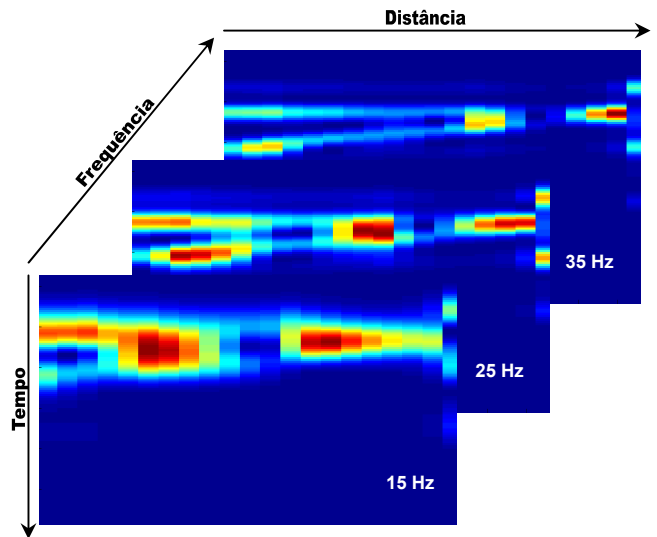


Figura 2 – Gráfico ilustrando a decomposição espectral de um sismograma sintético sendo analisado através de um cubo de dados tempo x frequência x distância.

**Propriedades e Atributos Sísmicos dos Hidratos**

As condições de estabilidade dos clatratos geralmente são encontradas por volta de até 500m abaixo do fundo do mar, variando de acordo com as condições climáticas de cada região, pressão, temperatura e o grau geotérmico da água. Nas regiões polares, por exemplo, podem ocorrer em profundidades e pressões menores porque a temperatura da água é menor.

Quando o clatrato sai da zona de estabilidade ele se dissocia, liberando os gases que estavam “engaiolados”, deixando-os livres dentro do espaço poroso. Desta maneira surge um cenário no qual passa a existir uma zona de estabilidade de hidratos e logo abaixo a zona de gás livre. A zona que separa estes dois ambientes gera uma reflexão sísmica característica, conhecida como BSR (*Bottom Simulating Reflection*).

Alguns atributos sísmicos que ajudam a identificar a presença de hidratos de gás são: velocidade sísmica; impedância acústica; amplitude e atenuação das ondas. Valores encontrados da velocidade sísmica em um clatrato são de aproximadamente 3300 à 3800 m/s (Hardage e Roberts, 2006). Entretanto, o valor da velocidade do gás livre de metano está por volta de 400 à 1200 m/s. Esta é a razão pela qual ocorre um amplo contraste de impedância que origina a BSR.

Como a amplitude sísmica é uma função do contraste de impedância em qualquer interface acústica, a reflexão BSR também se caracteriza por ter sua polaridade oposta a do fundo do mar. Outra característica da BSR é que ela tende a ser paralelo ao fundo do mar porque sua posição, em geral, é controlada pelo gradiente geotérmico regional e pela pressão hidrostática, e não por fatores geológicos.

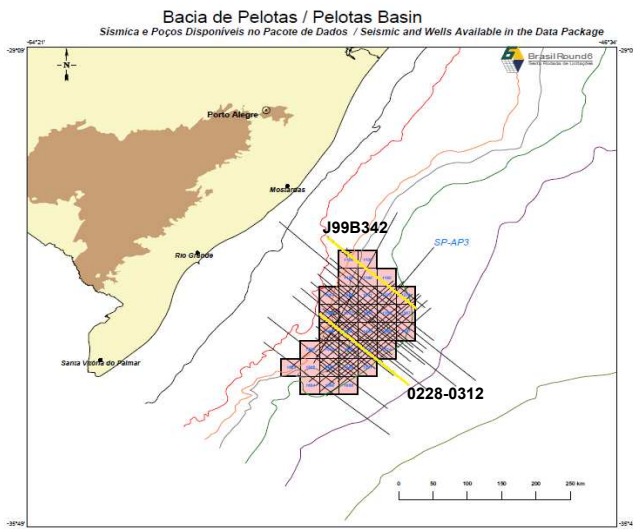
Com relação à atenuação, nos casos gerais ela diminui quando a velocidade da onda sísmica aumenta, significando que a rocha ficou mais compacta e menos

porosa, sofrendo uma perda menor de energia elástica. Entretanto o que acontece quando se trata de reservatórios de hidratos é o oposto. A velocidade é alta porque o hidrato de gás é um sólido, porém, de acordo com dados experimentais (ver Dvorkin e Uden, 2004), a atenuação da onda também aumenta. Na região abaixo do BSR onde os clatratos já se dissociaram, ocorre o fenômeno normal esperado; a velocidade diminui bruscamente, indicando que há um aumento significativo da porosidade devido à presença de gases livres, aumentando ainda mais a atenuação.

Diante destas informações, já é possível identificar as possíveis concentrações de hidratos e os respectivos BSRs através da decomposição espectral, conforme pode ser observado na análise da atenuação anômala realizada por Hato *et. al.* (2006) em acumulações de hidrato de metano localizado em Nankai, no Japão.

### Aplicação da Decomposição nos Dados de Pelotas

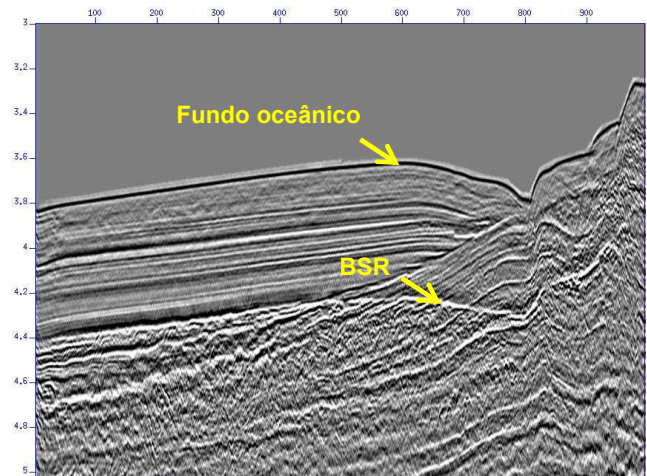
A região de estudo deste trabalho refere-se a um leque submarino conhecido como Cone do Rio Grande, localizado na Bacia de Pelotas. Esta área de exploração na qual podem vir a ser encontrados reservatórios foi parcialmente arrematada na Sexta Rodada de Licitações da Agência Nacional de Petróleo (ANP) em 2004. Utilizamos duas linhas sísmicas neste trabalho: J99B342 e a 0228-0312, destacadas em amarelo na figura 3.



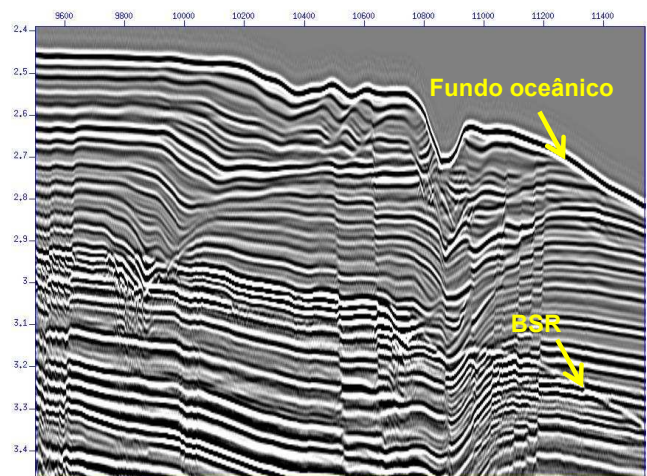
**Figura 3** - Mapa de localização dos blocos oferecidos na Sexta Rodada de Licitações da ANP. Em amarelo estão destacadas as linhas sísmicas J99B342 e 0228-0312, utilizadas neste trabalho (mapa da sexta rodada de licitações).

Neste trabalho serão apresentados resultados da decomposição espectral aplicada em trechos curtos destes dados, pois estas linhas são regionais e possuem comprimento muito longo (mais de 100 km). A decomposição de todo este dado, embora possível, exigiria muito recurso computacional para o cálculo e armazenamento do cubo de frequências.

Na linha sísmica n° 312 (figura 4), é possível identificar nitidamente uma BSR com características típicas; paralela ao fundo do mar cortando as camadas sedimentares e com polaridade invertida. Entretanto, na seção n° 342 (figura 5) é difícil identificar com precisão a BSR ao longo de todo o trecho estudado. A decomposição foi realizada utilizando-se a transformada contínua de *wavelet* com a forma de onda complexa de *Morlet*. Esta função se ajusta bem aos objetivos deste trabalho, pois apresenta características temporais e espectrais que se assemelham a de um pulso sísmico. Nos dois casos o cubo de frequência foi montado com intervalo de um em um Hertz. Algumas seções de iso-frequência contendo anomalias significativas são exibidas nas figuras 6 a 8 (linha 312) e nas figuras 9 a 11 (linha 342).

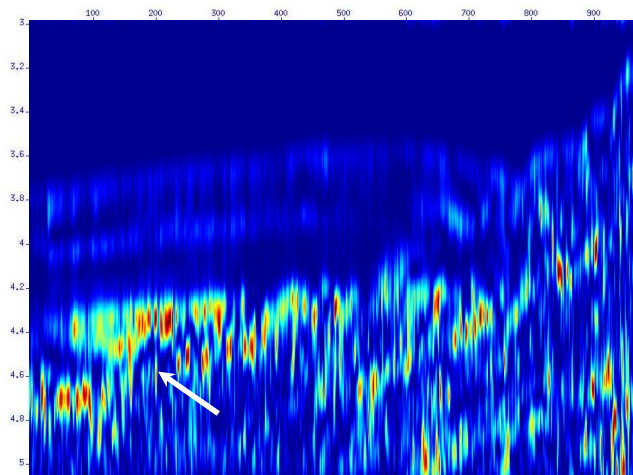


**Figura 4** - Uma pequena janela da linha sísmica 0228-0312 mostrando o BSR. As flechas amarelas apontam para as mudanças nas cores das polaridades; no fundo oceânico (preto) e no BSR (branco).

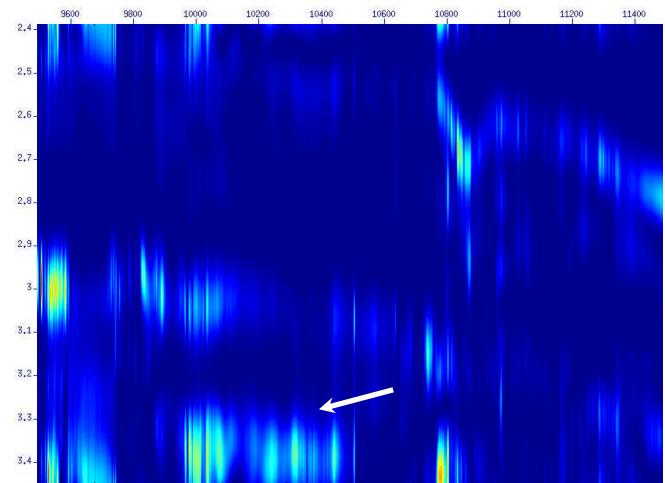


**Figura 5** - Um corte da seção sísmica J99B342 mostrando o possível BSR. As flechas amarelas apontam para as mudanças nas cores das polaridades; no fundo oceânico (preto) e no BSR (branco).

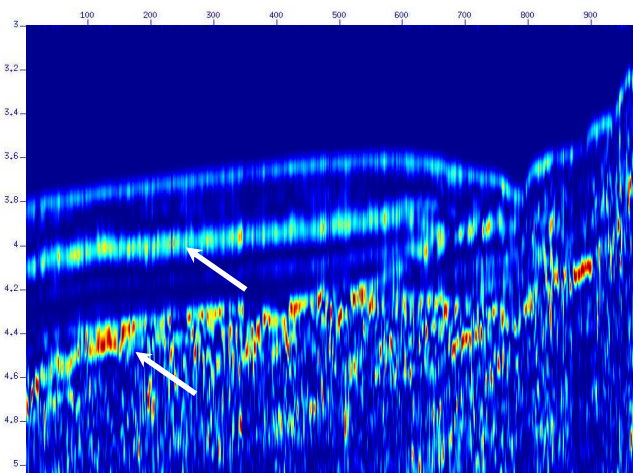




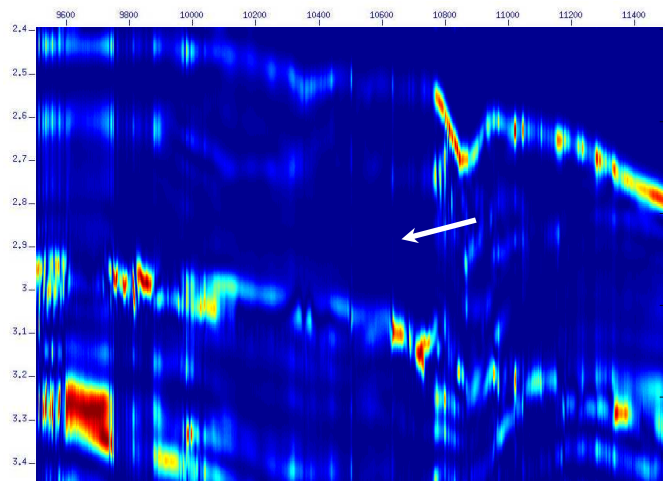
**Figura 6** - Decomposição espectral da seção 0228-0312 a 12 Hz, mostrando a região onde aparecem sombras de baixa frequência.



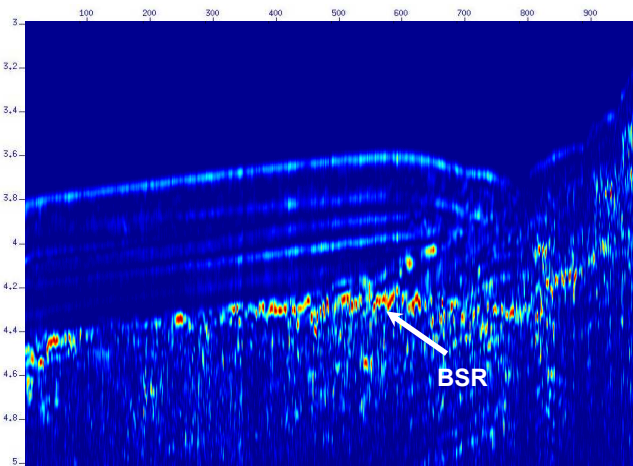
**Figura 9** - Decomposição espectral da seção sísmica J99B342 a 14 Hz, apontando para uma anomalia de baixa frequência.



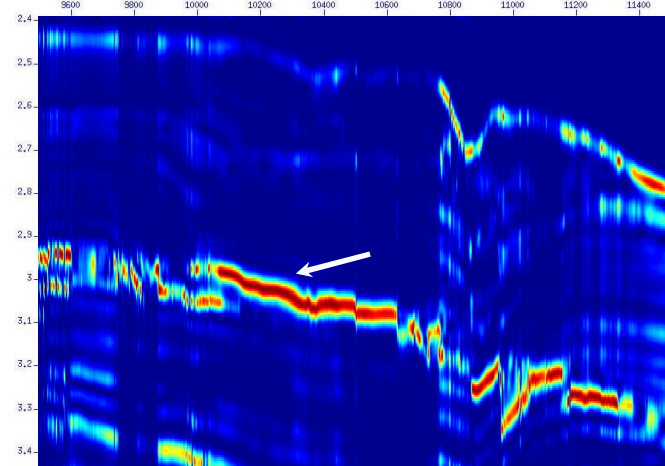
**Figura 7** - Decomposição espectral da seção 0228-0312 a 20 Hz, apontando uma anomalia de alta intensidade acima e a zona de gás livre abaixo.



**Figura 10** - Decomposição espectral da seção J99B342 a 31 Hz, apontando para uma zona de sombra dentro da zona de estabilidade dos hidratos.



**Figura 8** - Decomposição espectral da seção 0228-0312 a 37 Hz, marcando a região do BSR.



**Figura 11** - Decomposição espectral da seção sísmica J99B342 a 47 Hz, indicando anomalias na base da zona de estabilidade dos hidratos.

## Análise dos Resultados

De um modo geral, as anomalias resultantes da decomposição das duas linhas puderam ser associadas a três faixas distintas de frequência. Nas baixas frequências (de 0 a 20 Hz) foram acesas estruturas abaixo da zona de estabilidade dos hidratos (figuras 6 e 9). Na faixa das médias frequências (de 20 a 35 Hz) foram evidenciadas, principalmente, anomalias dentro da zona de estabilidade (figuras 7 e 10). Já a decomposição na faixa das altas frequências (acima de 35 Hz), permitiu assinalar muito bem a BSR e estruturas ao longo desta (ver figuras 8 e 11). As anomalias de baixa frequência possuem a forma clássica da sombra de baixas frequências, ou seja, concentração da energia do sinal nas baixas frequências, que é causada pela passagem da onda por acumulações de gás. Este fenômeno é muito bem documentado, mas as suas causas continuam sem uma explicação definitiva (Ebrom, 2004). Na linha 312, tais anomalias se evidenciam da frequência de 12 Hz e se apresentam disseminadas. Já na linha 342 estas são mais localizadas e se evidenciam melhor na frequência de 14 Hz. Na linha 312 a principal anomalia espectral na zona de estabilidade dos hidratos é de alta intensidade e corresponde a uma camada de alta refletividade que ocorre por volta de  $t=4$  segundos (comparar figuras 4 e 7) e que talvez possa ser atribuída ao efeito de *tuning*. Já na linha 342 foram realçadas zonas de sombra (ver figuras 10 e 11). Um fato interessante observado nas duas linhas estudadas é que as altas frequências destacaram muito bem anomalias ao longo da BSR. Na linha 342 isto tornou bem visível a separação entre a zona de estabilidade dos hidratos e a zona de gás livre, já que a BSR não estava bem aparente ao longo de todo trecho estudado desta linha. Tais anomalias podem estar relacionadas com acumulações de gás logo abaixo da zona de estabilidade dos hidratos.

## Conclusões

A decomposição espectral acendeu anomalias muito bem destacadas nas duas linhas sísmicas proveniente da bacia de Pelotas. Anomalias de baixas frequências apareceram abaixo da zona de estabilidade dos hidratos de gás e possuem as feições típicas da sombra de baixa frequência. Ao que tudo indica, estas devem estar associadas com a presença de gás. A varredura da faixa de frequências que vai de 20 a 35 Hz apontou anomalias dentro da zona de estabilidade dos hidratos. Estas se apresentaram na forma de zonas de sombra (linha 342) e também na forma de anomalias de alta intensidade (linha 312). Já a decomposição na faixa das altas frequências (acima de 35 Hz), permitiu assinalar muito bem estruturas ao longo da zona de transição entre a zona de estabilidade dos hidratos e de gás livre. Neste trabalho foram levantadas algumas hipóteses para explicar tais anomalias, no entanto faz-se necessário um estudo mais aprofundado incluindo dados de poços para saber até que ponto tais anomalias correspondem a concentrações de hidratos ou gás.

## Agradecimentos

Agradecemos a Agência Nacional de Petróleo (ANP) pela liberação dos dados sísmicos utilizados neste trabalho e a CAPES pela concessão de bolsa à primeira autora deste trabalho.

## Referências

- Castagna, J. P.; Sun, S.** – Comparison of Spectral Decomposition Methods: Technology Feature, First Break Vol. 24, 75-79. Março, 2006.
- Dvorkin, J.; Uden, R.** – Seismic Wave Attenuation in a Methane Hydrate Reservoir: The Leading Edge, Vol. 23, 730-732. USA, Agosto, 2004.
- Ebrom, D.** – The Low-Frequency Gas Shadow on Seismic Sections: The Leading Edge, Vol. 23, 772. USA, Agosto, 2004.
- Hall, M.; Trouillot, E.** – Predicting Stratigraphy with Spectral Decomposition: 2004 CSEG National Convention. Calgary, Canada, 2004.
- Hato, M.; Matsuoka, T.; Inamori, T.; Saeki, T.** – Detection of Methane-Hydrate-Bearing Zones Using Seismic Attributes Analysis: The Leading Edge, Vol. 25, nº5, 607-609. Maio, 2006.
- Hardage, B. A.; Roberts, H. H.** – Gas Hydrate in the Gulf of Mexico: What and Where is the Seismic Target?: The Leading Edge, Vol. 25, nº 5, 566-571. Maio, 2006.
- Mallat, S.** – A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press. Second Edition. Courant Institute, New York University, École Polytechnique. Paris, 1999.
- Sun, S.; Castagna, J.; Robrt, W.** – Examples of Wavelet Transform Time-Frequency Analysis in Direct Hydrocarbon Detection: 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 457-460. Salt Lake City, USA, 2002.