

Universidade de São Paulo

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP

Departamento de Geofísica

Dissertação de Mestrado

**Identificação e Caracterização de Comportamentos  
Não-Lineares de Vibrações Sísmicas Ambientais**

Aluno

Cleiton Kefrof Pavan

Orientador

Eder Cassola Molina

\*\*\*\*\* SÃO PAULO \*\*\*\*\*

2013

CLEITON KEFROF PAVAN

# **Identificação e Caracterização de Comportamentos Não-Lineares de Vibrações Sísmicas Ambientais**

**Dissertação apresentada ao Instituto  
de Astronomia, Geofísica e Ciências  
Atmosféricas da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Ciências na área de  
Geofísica.**

\*\*\*\*\* SÃO PAULO \*\*\*\*\*

2013

## Sumário

Lista de Figuras .....	iii
Lista de Tabelas .....	vi
Dedicatória .....	viii
Agradecimentos .....	ix
Epígrafe .....	x
Resumo .....	xi
Abstract .....	xii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Sísmica Passiva .....	1
1.2 Objetivos .....	6
1.3 Geologia regional .....	7
<b>2. METODOLOGIA .....</b>	<b>9</b>
2.1 Procedimentos computacionais .....	11
2.1.1 SAC ( <i>Seismic Analysis Code</i> ) .....	11
2.1.2 MATLAB .....	11
2.2 Métodos de estimativa espectral .....	12
2.2.1 FFT ( <i>Fast Fourier Transform</i> ) .....	12
2.2.2 PSD ( <i>Power Spectral Densities</i> ) .....	12
2.2.3 MEM ( <i>Maximum Entropy Method</i> ) .....	13
2.2.4 MLM ( <i>Maximum Likelihood Method</i> ) .....	14
2.2.5 Espectrograma .....	14
2.3 Métodos para análise do comportamento da anomalia espectral .....	16
2.3.1 Expoente de Hurst .....	17
2.3.2 Expoente de Lyapunov .....	18
2.3.3 Biespectro e Bicoerência .....	20
<b>3 AQUISIÇÃO DE DADOS .....</b>	<b>24</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>26</b>
4.1 Pré-processamento e qualidade dos dados .....	26
4.1.1 Sismogramas completos ou em partes .....	31
4.2 Comparação dos métodos de estimativa espectral .....	34
4.3 Identificação das anomalias espectrais .....	39
4.4 Comportamento das anomalias espectrais .....	43

4.4.1 Espectrograma .....	43
4.4.2 Expoente de Hurst .....	45
4.4.3 Expoente de Lyapunov .....	48
4.5 Comportamento não linear das anomalias espectrais .....	53
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	58
6 REFERÊNCIAS .....	60

## Lista de Figuras

- Figura 1.1** – Ilustração simplificada sobre o método de análise de anomalia espectral das vibrações sísmicas ambientais para se identificar reservatórios hidrocarbonetos. No canto esquerdo superior é apresentado o espectro do sinal adquirido em uma região onde não há reservatório de petróleo, e no canto direito é apresentado o espectro adquirido sobre um reservatório de petróleo. Note-se que há uma amplificação do sinal nas frequências próximas de 3 Hz. (Figura adaptada de **Graf et al., 2007**).....2
- Figura 1.2** – Exemplo de espectrograma para os registros sísmicos a) vertical e b) horizontal. As cores quentes indicam amplitudes espectrais grandes, e as frias mostram as regiões do espectro com amplitudes menores, permitindo observar a variação do espectro das vibrações sísmicas ambientais no tempo. Note-se que a anomalia relacionada à presença de reservatório de hidrocarboneto é mais clara a partir das 6:30h, quando o ruído antrópico é maior (retirado de **Lambert et al., 2009**).....3
- Figura 1.3** – Resultados obtidos em um campo de gás da PEMEX no México. Os gráficos (A) e (C) são as assinaturas espectrais das vibrações sísmicas ambientais nos pontos 70575 e 70139, respectivamente. Os gráficos (B) e (D) são estimativas do mergulho dessas vibrações nos pontos 70575 e 70139, respectivamente. Neste caso entende-se mergulho como o ângulo de chegada das ondas com o conteúdo espectral na banda de 3 Hz . Em (E) é mostrado o mapa com as posições das medidas. As estrelas representam a posição de medidas de sísmica passiva, a estrela branca é o ponto 70575 e a estrela azul é o ponto 70139. As cores representam a frequência do pico principal da anomalia, e os círculos pretos, cinzas e brancos representam poços de alta produtividade, baixa produtividade e seco, respectivamente, perfurados após o levantamento de sísmica passiva. Figura adaptada de **Saenger et al. (2009)**.....5
- Figura 1.4** – (a) Mapa geológico da área de estudo, mostrando a região da aquisição de dados (quadrado preto), sendo os triângulos a representação da localização dos 18 pontos estudados e GG' o perfil geológico apresentado em (b). (b) Perfil geológico GG' com as principais estruturas. (adaptado de **Lopes & Nunes (2010)**, figura originalmente em inglês).....7
- Figura 2.1** – Domínio principal do método biespectro e bicoerência (**Collis et al., 1998**).....23
- Figura 3.1** – Mapa ampliado da área de estudo com a localização e numeração de cada estação sísmográfica. As regiões em cinza são locais com reservatórios conhecidos.....25
- Figura 4.1** – (A) sismograma do ponto MS18 componente vertical. (B) Espectrograma, com o método MEM, do ponto MS18 componente vertical para exemplificar como foi feito o corte dos sismogramas. O MS18 foi dividido em quatro partes por apresentar três pontos com ruído. Os ruídos são identificados pelas amplitudes altas no espectrograma e a correlação com o sismograma; os mesmos estão entre as marcas T2 e T3, T4 e T5 e entre as marcações T6 e T7.....30

**Figura 4.2** – Comparação entre as estimativas espectrais do sismograma MS02b completo ou por partes (A) PSD do sismograma completo, (B) PSD da parte 1 do sismograma, (C) PSD da parte 2 do sismograma, (D) PSD da parte 3 sismograma, (E) PSD da parte 4 do sismograma e (F) PSD da parte 5 do sismograma.....32

**Figura 4.3** – Comparação entre as estimativas espectrais do sismograma MS05 completo. (A) FFT do sismograma completo, (B) FFT da parte 1 do sismograma.....33

**Figura 4.4** – Comparação entre as estimativas espectrais do sismograma MS017 completo ou por partes (A) MEM do sismograma completo, (B) MEM da parte 1 do sismograma, (C) MEM da parte 2 do sismograma, (D) MEM da parte 3 sismograma e (E) MEM da parte 4 do sismograma.....33

**Figura 4.5** – Comparação dos resultados obtidos com os métodos: (A) FFT resultados em preto, (B) PDS resultados em vermelho, (C) MLM resultados em azul e (D) MEM resultados em verde, para o ponto MS09 componente vertical.....36

**Figura 4.6** – Comparação dos resultados obtidos com os métodos: (A) FFT resultados em preto, (B) PDS resultados em vermelho, (C) MLM resultados em azul e (D) MEM resultados em verde, para o ponto MS13 componente vertical.....37

**Figura 4.7** – Comparação dos espectrogramas calculados para o ponto MS09, componente vertical. Os métodos de estimativa espectrais aplicados são : A) PDS, B) MLM e C) MEM.....38

**Figura 4.8** – Comparação dos espectrogramas calculados para o ponto MS13a, componente vertical. Os métodos de estimativa espectrais aplicados são : A) PDS, B) MLM e C) MEM.....38

**Figura 4.9** – Mapa ampliado da área de estudo com a localização e numeração de cada estação sismográfica. Os traços em vermelho são análises qualitativas das magnitudes das amplitudes dos espectrogramas: Norte-Sul; Leste-Oeste; e Vertical, indicando então as direções possíveis das vibrações associadas a presença de reservatórios de hidrocarbonetos. Os traços em amarelo são os sentidos das vibrações estudadas que apresentaram correlação/intersecção com outra estação sismográfica. Círculos em verde representam as regiões sugeridas como as localizações dos reservatórios de hidrocarbonetos que geraram as anomalias espectrais observadas nas estações MS07, MS10, MS11, MS12, MS 13 e MS 15. As regiões circuladas em azul são as regiões em que as direções das vibrações com anomalia espectral condizem com o sentido de um reservatório previamente conhecido e próximo.....42

**Figura 4.10** – Espectrograma MEM no ponto MS13a das componentes (A) Gráfico da componente Z, (B) Gráfico da componente N e (C) Gráfico da componente E. A barra de cores ao lado de cada gráfico corresponde a escala de valores de amplitudes observados no espectrograma.....44

**Figura 4.11** – Gráficos A, B, e C são os resultados do método biespectro da parte 3 do sismograma do ponto MS11, para as componentes Z, N e E, respectivamente. Gráficos D, E, e F são os resultados do método da bicoerência da parte 3 do sismograma do ponto MS11, para as componentes Z, N e E, respectivamente. A região dentro do triângulo representa o domínio principal dos métodos (Collis et al., 1998). As linhas tracejadas definem a região entre as frequências 2 e 8 Hz.....54

**Figura 4.12** – Exemplos dos AFQs identificados no método da bicoerência. (A) Gráfico da bicoerência do ponto 13b parte 2 componente Z. (B) Gráfico da bicoerência do ponto 13a parte 1 componente Z. (C) Gráfico da bicoerência do ponto 18 parte 1 componente N. (D) Gráfico da bicoerência do ponto 14 parte 2 componente N. (E) Gráfico da bicoerência do ponto 06 parte 2 componente N. (F) Gráfico da bicoerência do ponto 02b parte 3 componente N. A região dentro triângulo representa o domínio principal do método (Collis et al., 1998). As linhas tracejadas definem a região entre as frequências 2 e 8 Hz.....56

## Lista de Tabelas

**Tabela 2.1** – A tabela apresenta alguns exemplos de interpretação do sistema físico, segundo o expoente de Lyapunov, para um sistema de três dimensões (X, Y e Z).  $\lambda_1$  é o maior expoente de Lyapunov dentre os três calculados, o segundo maior é o  $\lambda_2$  e o menor é o  $\lambda_3$ .....20

**Tabela 4.1** – Valores das coordenadas e altitudes dos pontos MS01 ao MS11, e suas observações mais importantes como presença de cavalos de pau e sua frequência de bombeamento do poço, chuvas, presença de tubulações e etc.....27

**Tabela 4.2** – Valores das coordenadas e altitudes dos pontos MS12 ao MS18, e suas observações mais importantes como presença de cavalos de pau e sua frequência de bombeamento do poço, chuvas, presença de tubulações e etc.....28

**Tabela 4.3** – Duração total e parcial de cada sismograma e em quantas partes o mesmo foi dividido.....29

**Tabela 4.4** – Comparação entre os métodos de estimativa espectral (FFT, PSD, MLM, MEM e ESPECTROGRAMAS (PSD, MLM e MEM)), sintetizando quais foram os métodos que mais identificaram anomalias na componente Z das estações sismográficas. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.....35

**Tabela 4.5** – Resumo simplificado da identificação espectral para as três componentes de cada estação sismográfica, contendo as informações da existência da anomalia espectral e seu pico central. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**. Os valores em verde são as anomalias espectrais entre 2,0 e 3,5 Hz, pertencentes à chamada janela de hidrocarbonetos.....40

**Tabela 4.6** – Valores obtidos no método expoente de Hurst e seu erro, para os dados da componente Z do sismograma de cada estação sismográfica, e sua possível interpretação ( S.P. - Sistema Probabilístico/ Movimento Browniano e S.D. - Sistema Determinístico). A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.....46

**Tabela 4.7** – Valores obtidos no método expoente de Hurst e seu erro, para os dados das componentes N e E do sismograma de cada estação sismográfica, e sua possível interpretação (S.P. - Sistema Probabilístico/ Movimento Browniano e S.D. - Sistema Determinístico). A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.....47

**Tabela 4.8** – Comparação dos resultados dos expoentes de Lyapunov para os dados da componente Z das séries temporais estudadas, e também sua possível interpretação (S.P.C. - Sistema Probabilístico Caótico, S.D.E. - Sistema Determinístico Estável e S.D.P. - Sistema Determinístico Periódico). A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.....51

**Tabela 4.9** – Interpretação dos resultados dos expoentes de Lyapunov para os dados da componente N e E das séries temporais estudadas, e também sua possível interpretação (S.P.C. - Sistema Probabilístico Caótico, S.D.E. - Sistema Determinístico Estável e S.D.P. - Sistema Determinístico Periódico). A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.....52

**Tabela 4.10** – Resultados dos AFQs identificados no gráfico da bicoerência e suas respectivas frequências. A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**. .....57

Dedico este trabalho a todos os professores que passaram pela minha vida, desde a pré-escola até a pós-graduação, pois estes são os pilares que de maneira direta ou indireta definiram o meu eu e sedimentaram a existência deste trabalho.

## **Agradecimentos**

Agradeço a CNPq e a CAPES pela bolsa concedida.

Agradeço a Deus, por ter me dado a oportunidade de concluir meus estudos, e por dar muita paciência à minha mãe para poder conseguir me ouvir, me advertir, cuidar de mim e me amparar ininterruptamente, e ao meu pai, porque, mesmo ele lá de cima eu sei que ele me ajudou muito.

Agradeço minha namorada Maisa, por ser uma mulher super especial em minha vida. Ela me dá uma força incrível, e é quem me faz criar forças todos os dias para alcançar meus sonhos, e também por ter muita paciência comigo, mas ultimamente me dá muito trabalho para eu falar, pois não me deixa concluir meus monólogos, querendo dar ideias no meio da conversa.

Agradeço a todos os meus amigos que ajudaram a esse momento se tornar realidade (Camilla Factori, Carlos Alberto Moreno Chaves "Carlão", Franklin Bispo dos Santos, Henrique Bueno dos Santos, Renata Constantino, Victor Sacek, etc.).

Agradeço ao Prof. Dr. Eder Cassola Molina porque ele não foi apenas o orientador desta dissertação, pois com ele também aprendi a crescer tanto profissionalmente, quanto pessoalmente. E o melhor, como todo mundo sabe, o Prof. Eder é um paizão.

Um super agradecimento a uma pessoa que SEMPRE terá um super agradecimento em meus trabalhos: a Prof(a). Dr. Leila Soares Marques, pois, sem ela, talvez eu nem estaria aqui, e ainda por ser minha amiga e minha segunda mãe.

Agradeço a todos os docentes que contribuíram para minha formação e toda a equipe técnica do laboratório de sismologia que sempre esteve disponível para ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

*"Não tenho medo dos grandões de 2 metros  
e sim dos baixinhos que fazem cálculos difíceis"*

*Chapolin Colorado*

## RESUMO

Este trabalho consiste em (re)avaliar o melhor método para identificação das anomalias espectrais na banda de 2 a 8 Hz, e identificar o Sistema Físico que rege as anomalias espectrais observadas em Sísmica Passiva, pois até o momento a Sísmica Passiva é somente um potencial método geofísico de exploração de hidrocarbonetos empírico. Para a identificação das anomalias espectrais compararam-se os métodos FFT (*Fast Fourier Transform*), PSD (*Power Spectral Densities*), MEM (*Maximum Entropy Method*), MLM (*Maximum Likelihood Method*) e os espectrogramas calculados por PSD, MEM E MLM. Para determinar o Sistema Físico usaram-se os métodos: expoente de Hurst; expoente de Lyapunov; Biespectro; e Bicoerência. Todos os métodos foram aplicados nas séries temporais obtidas a partir de 18 estações sismográficas localizadas em uma região de petróleo ativa, localizada na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte, Norte do Brasil. O melhor método de identificação espectral do trabalho foi o espectrograma calculado com MEM, e o Sistema Físico da Sísmica Passiva é provavelmente um Sistema Determinístico pertencente a um processo não gaussiano, que apresenta um tipo específico de não linearidade denominada acoplamento de fase quadrática (AFQ).

**Palavras chave:** Sísmica Passiva; Expoente de Lyapunov; Expoente de Hurst; Espectrograma; e estimativa espectral.

## **ABSTRACT**

This work aims to evaluate the best method for identifying anomalies in the spectral band of 2-8 Hz, and identify the physical system governing the spectral anomalies observed in the Passive Seismic, because so far the Passive Seismic is only an empirical geophysical method of exploration of hydrocarbon. For the identification of the spectral anomalies the methods FFT (Fast Fourier Transform), PSD (Power Spectral Densities), MEM (Maximum Entropy Method), MLM (Maximum Likelihood Method) and spectrograms calculated by PSD, MEM and MLM were compared. To find out the physical system were used the methods: Hurst exponent, Lyapunov exponent, bispectrum, and bicoherence. All the methods were applied to the time series obtained from 18 seismograph stations located in a region with active production of oil, located in the city of Mossoró, Rio Grande do Norte, Northern Brazil. The best method of spectral identification obtained was calculated with the MEM spectrogram, and the physical system determined from Passive Seismic was a deterministic system that does not belong to a Gaussian process, which presents a specific type of nonlinearity, known as quadratic phase coupling.

**Keywords:** Passive Seismic; Hurst exponent; Lyapunov exponent; spectrogram; e spectral estimative.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Sísmica Passiva

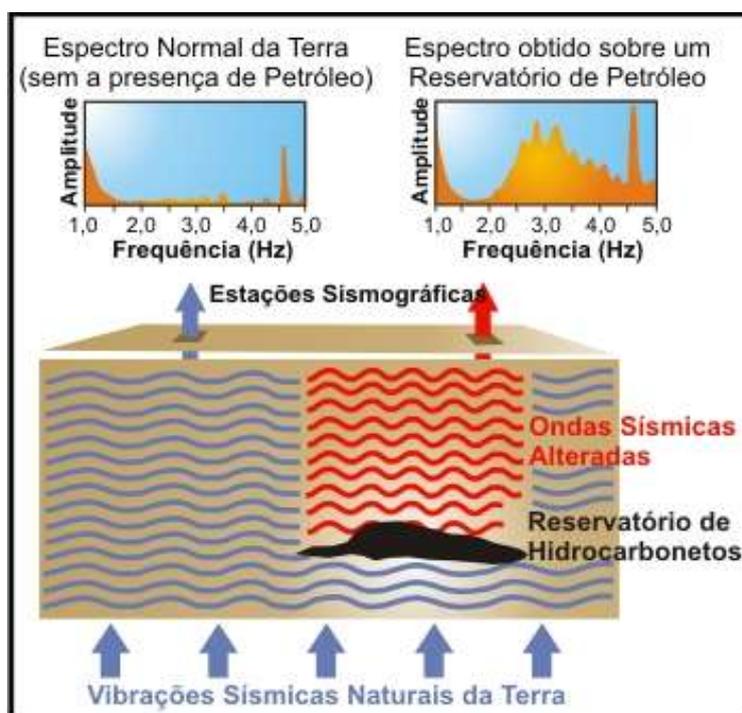
Nos dias de hoje a grande valorização do meio ambiente gera diversas dificuldades para o licenciamento ambiental necessário para a realização de levantamentos sísmicos convencionais, pois os mesmos normalmente utilizam explosivos. É nesse contexto que a Sísmica Passiva adquire importância. Este método não gera impactos ambientais por não utilizar fontes sísmicas artificiais, e sim as vibrações sísmicas naturais da Terra. Nesta técnica, o que antes era visto como ruído sísmico agora é visto como o dado a ser processado e interpretado, ou seja, o levantamento de dados da sísmica passiva consiste basicamente na instalação de uma rede de estações sismográficas para medir o “ruído” local continuamente.

A Sísmica Passiva é um método geofísico emergente que promete revolucionar a exploração de reservatórios de hidrocarbonetos em ambientes *onshore*. O grande desenvolvimento desta tecnologia ocorreu após a descoberta da relação entre as anomalias sísmicas na banda de 3 Hz e reservatórios de hidrocarbonetos (**Dangel *et al.*, 2003**), quando foi mostrado que em áreas sobre reservatórios de hidrocarbonetos o espectro das vibrações sísmicas ambientais possui uma anomalia positiva nas frequências próximas de 3 Hz (**Figura 1.1**). Por enquanto, esse método é empírico, pois nenhum dos modelos físicos propostos obteve sucesso em explicá-lo, e há muitas variáveis a serem estudadas antes da formulação definitiva do problema direto, como por exemplo o meio geológico gera esse fenômeno.

Segundo **Chutov *et al.* (2000)**, a liberação de energia que produz as vibrações sísmicas ambientais características de reservatórios de petróleo, amplamente conhecidas como *hydrocarbon-microtremor*, possui um comportamento dinâmico, e a energia absorvida pelo reservatório depende de vibrações externas ao mesmo, sendo que a frequência de liberação da energia sísmica pode ser associada à geometria do reservatório.

O processo de absorção e liberação de energia pelo sistema de fluidos do reservatório, que representa o meio de transmissão da energia, é considerado não-linear, sendo que as vibrações sísmicas naturais da Terra (ruído sísmico de fundo) são moduladas com uma frequência característica do sistema de fluidos, quando essas ondas penetram no reservatório. Essa frequência característica do sistema pode ser alterada

devido à dependência da composição do sistema de fluidos, e por este motivo, a mesma varia com a posição de medida no reservatório.



**Figura 1.1** – Ilustração simplificada sobre o método de análise de anomalia espectral das vibrações sísmicas ambientais para se identificar reservatórios hidrocarbonetos. No canto esquerdo superior é apresentado o espectro do sinal adquirido em uma região onde não há reservatório de petróleo, e no canto direito é apresentado o espectro adquirido sobre um reservatório de petróleo. Nota-se que há uma amplificação do sinal nas frequências próximas de 3 Hz. (Figura adaptada de **Graf et al., 2007**).

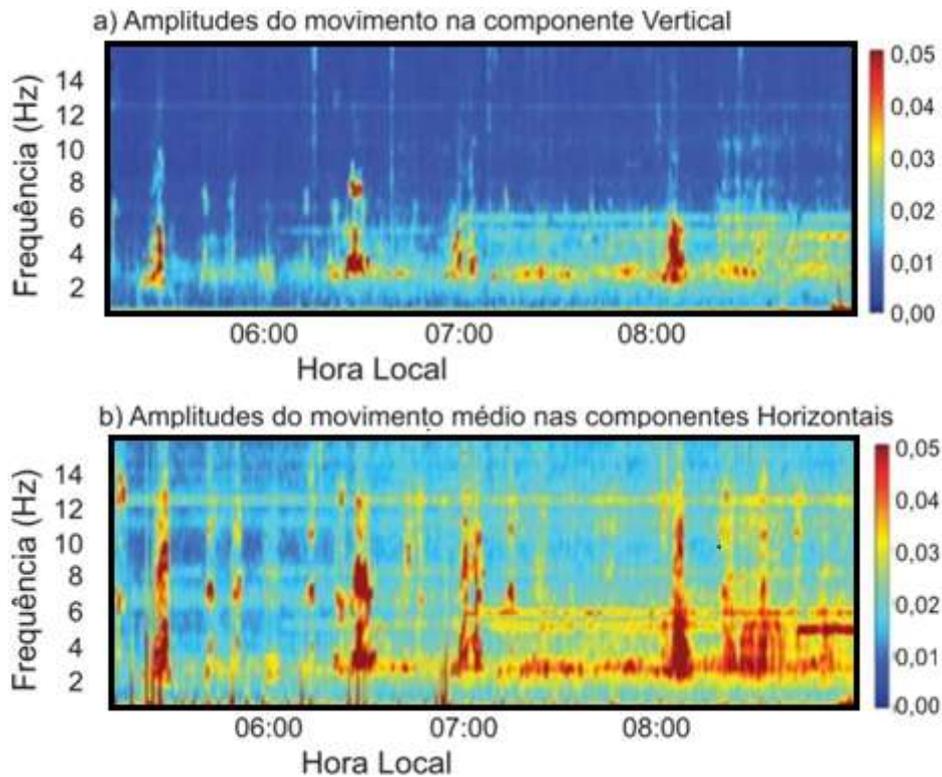
Na maioria das vezes os hidrocarbonetos ocorrem junto com água, no mesmo reservatório, mas ambos os fluidos possuem frequências características distintas. Desta forma, **Chutov et al. (2000)** associam de forma genérica as anomalias entre 2,0 e 3,5 Hz à chamada “janela de hidrocarbonetos”, e entre 4,5 e 6,5 Hz à chamada “janela da água”.

Alguns autores, como **Dangel et al. (2003)** e **Graf et al. (2007)**, sugerem que a amplitude da anomalia espectral pode ser relacionada diretamente à espessura do reservatório de hidrocarbonetos. Segundo **Chutov et al. (2000)**, é possível identificar o tipo de fluido no reservatório utilizando a frequência central da anomalia espectral observada, sendo que o picos com frequência próxima de 2,8 Hz estão associados a hidrocarbonetos, e os próximos de 4,0 Hz estão associados à presença de água no reservatório. Por outro lado, os mesmos autores afirmam que esses valores sofrem variações de reservatório para reservatório, pois dependem de suas propriedades

morfológicas, hidrostáticas e hidrodinâmicas, que por sua vez dependem da porosidade, permeabilidade e viscosidade dos fluidos, e das dimensões, pressão de poro e temperatura do reservatório. Estes autores também propõem que a frequência do pico da anomalia é maior na presença de gás do que de óleo, porém essa proposta é tentativa e não está clara em trabalhos como o de **Dangel et al. (2003)**.

**Lambert et al. (2009)** mostraram que a anomalia relacionada à presença de reservatório de hidrocarboneto apresenta flutuações durante o registro, sendo que a maior amplitude é no período da manhã, quando o ruído antrópico é maior (**Figura 1.2**).

A confirmação do potencial do método é obtida em de mais de 20 resultados positivos observados em diferentes reservatórios petrolíferos em várias regiões da Terra (**Dangel et al., 2003; Akrawi & Bloch, 2006; Graf et al., 2007; Ali, et al., 2007; Saenger et al., 2009**).

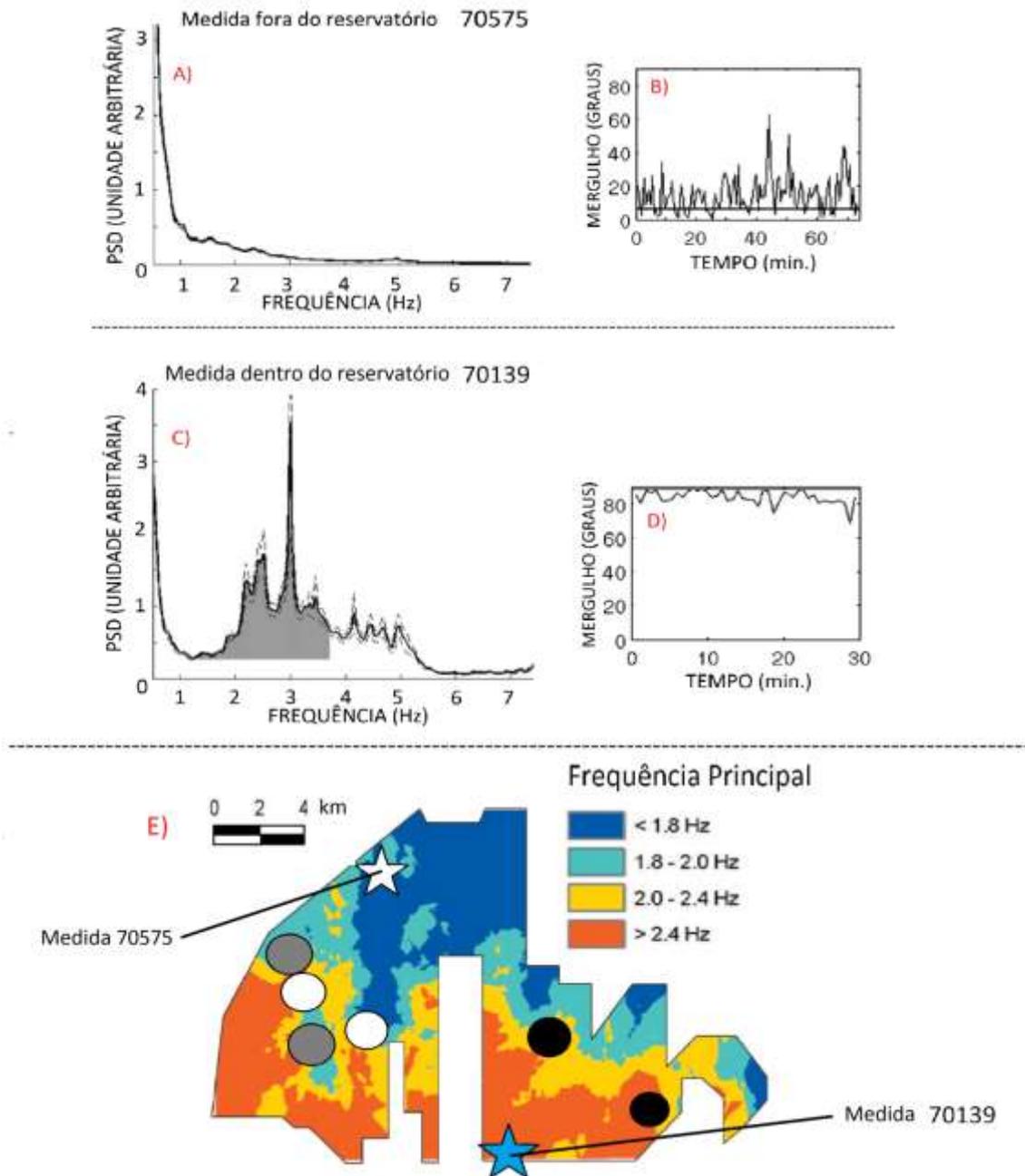


**Figura 1.2** – Exemplo de espectrograma para os registros sísmicos a) vertical e b) horizontal. As cores quentes indicam amplitudes espectrais grandes, e as frias mostram as regiões do espectro com amplitudes menores, permitindo observar a variação do espectro das vibrações sísmicas ambientais no tempo. Nota-se que a anomalia relacionada à presença de reservatório de hidrocarboneto é mais clara a partir das 6:30h, quando o ruído antrópico é maior (retirado de **Lambert et al., 2009**).

**Saenger et al. (2009)** publicaram os resultados de um dos trabalhos mais completos sobre a aplicação da sísmica passiva em um campo de gás da PEMEX no

México. Alguns resultados desse estudo são apresentados na **Figura 1.3**, onde é possível observar a diferença marcante do espectro das vibrações sísmicas ambientais dentro (**Figura 1.3c**) e fora (**Figura 1.3a**) dos limites de um reservatório de gás. Outra observação importante se refere ao azimute das vibrações, que indica que as vibrações associadas à presença de reservatório de hidrocarbonetos são produzidas logo abaixo das estações com registro de anomalias (**Figura 1.3d**), enquanto que as vibrações registradas nas estações sismográficas localizadas fora dos limites do reservatório são compostas por vibrações com baixo mergulhos, ou seja, propagam-se quase que horizontalmente (**Figura 1.3b**).

Os estudos onde o método não obteve sucesso ainda são raros na literatura, porém existem casos que vêm a possibilidade de o ruído antropogênico se sobrepor à anomalia espectral e poder assim ser confundido como indicador de hidrocarbonetos (**Ali, et al., 2007; Hanssen & Bussat, 2008; Lambert et al. 2011**). Além disso, há casos como o descrito por **Martini et al., (2012)** em que o ruído local possivelmente se sobrepôs à anomalia espectral.



**Figura 1.3** – Resultados obtidos em um campo de gás da PEMEX no México. Os gráficos (A) e (C) são as assinaturas espectrais das vibrações sísmicas ambientais nos pontos 70575 e 70139, respectivamente. Os gráficos (B) e (D) são estimativas do mergulho dessas vibrações nos pontos 70575 e 70139, respectivamente. Neste caso entende-se mergulho como o ângulo de chegada das ondas com o conteúdo espectral na banda de 3 Hz . Em (E) é mostrado o mapa com as posições das medidas. As estrelas representam a posição de medidas de sísmica passiva, a estrela branca é o ponto 70575 e a estrela azul é o ponto 70139. As cores representam a frequência do pico principal da anomalia, e os círculos pretos, cinzas e brancos representam poços de alta produtividade, baixa produtividade e seco, respectivamente, perfurados após o levantamento de sísmica passiva. Figura adaptada de **Saenger et al. (2009)**.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são (re)avaliar o melhor método para identificação das anomalias espectrais na banda de 2 a 8 Hz, (re)avaliar a afirmação de que a anomalia espectral é melhor identificada na componente vertical, e determinar o sistema físico que representa o comportamento da anomalia espectral associada à Sísmica Passiva.

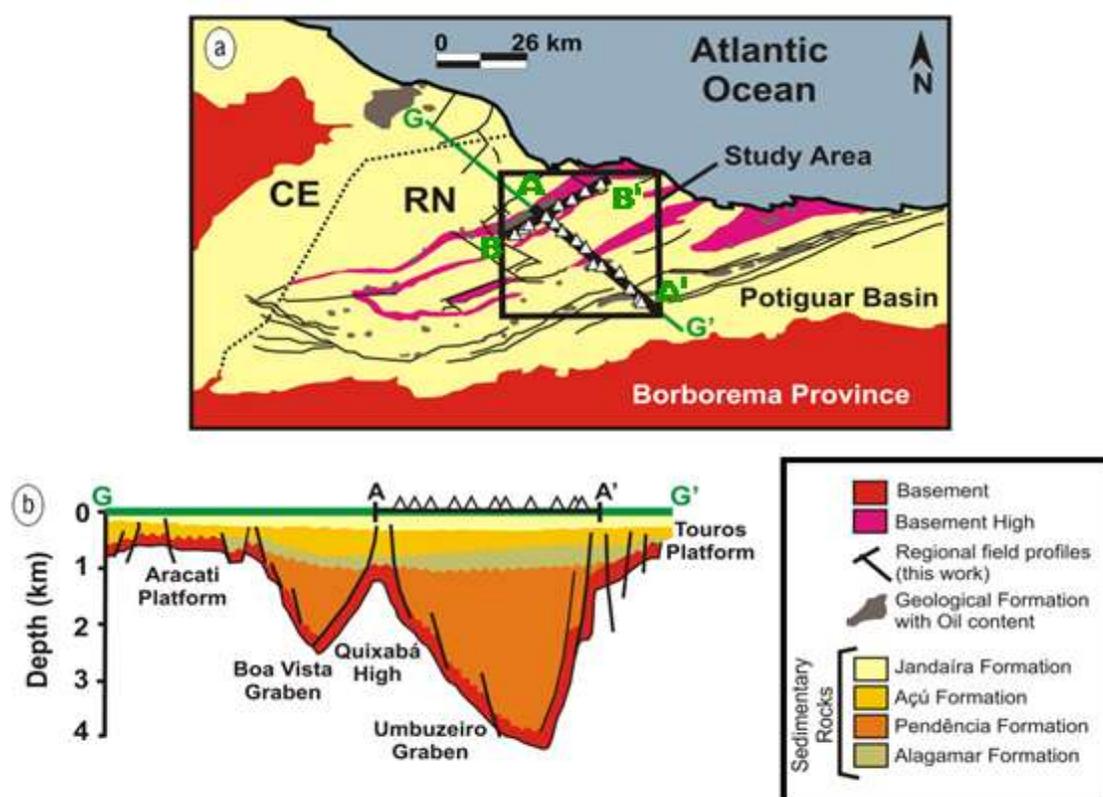
Para alcançar esses objetivos o trabalho foi dividido em cinco partes: na primeira parte será apresentado um pré-processamento dos sismogramas; a segunda parte consistirá na definição do melhor método de estimativa espectral, comparando-se os métodos FFT (*Fast Fourier Transform*), PSD (*Power Spectral Densities*), MEM (*Maximum Entropy Method*), MLM (*Maximum Likelihood Method*) e os espectrogramas calculados por PSD, MEM E MLM; na terceira parte será apresentada a identificação da anomalia espectral com o melhor método de estimativa espectral para dados de sísmica passiva; a quarta parte apresentará a análise do comportamento das anomalias espectrais identificadas com os métodos espectrograma, expoente de Hurst e expoente de Lyapunov (o expoente de Lyapunov será calculado por redes neurais e por expansão Volterra afim de compará-las e confirmar a interpretação final dos valores obtidos para cada série temporal estudada); a quinta parte explorará a possibilidade de um tipo específico de comportamento não-linear através dos métodos biespectro e bicoerência.

Embora a formulação da sísmica passiva seja relativamente simples, até o momento nenhum dos modelos propostos para explicar a origem das vibrações sísmicas de baixas frequências (entre 2 e 8 Hz) obteve sucesso, sendo uma etapa fundamental para a compreensão do fenômeno e utilização do método de forma eficiente. A falta de um modelo para a Sísmica Passiva é exatamente o que impulsionou a proposta deste trabalho. Assim, torna-se importante pesquisar como as anomalias espectrais se comportam, ou seja, qual modelo de série temporal se aplica aos dados de Sísmica Passiva. Para isso serão usadas ferramentas matemáticas para indicar se a série temporal apresenta comportamento de um sistema determinístico e portanto, possível de ser descrita por alguma(s) lei(s), ou se a série temporal se comporta como um sistema probabilístico / caótico, podendo ser descrita por equações matemáticas da área de estatística / caos. Deste modo, os resultados obtidos poderão orientar o rumo a ser seguido nas pesquisas do desenvolvimento de uma teoria capaz de explicar as anomalias espectrais observadas na Sísmica Passiva, principalmente para a aplicação à exploração de petróleo.

### 1.3 Geologia regional

A área de estudo está localizada na bacia do Potiguar (**Figura 1.4**), nordeste do Brasil, que possui uma área de 119.300 km<sup>2</sup>, sendo 33.200 km<sup>2</sup> emersa e 86.100 km<sup>2</sup> submersa, abrangendo os estados do Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE).

A bacia do Potiguar foi formada a partir da ruptura do supercontinente Gondwana, que resultou em um *rift* Neocomiano com direção NE-SW. O embasamento desta bacia é dividido em três partes: (1) grabens preenchidos por sedimentos do Cretáceo Inferior, (2) topo do embasamento composto por gnaiss e migmatitos soerguidos por falhas normais e (3) base do embasamento delimitando os grabens centrais para leste e oeste, chamados de plataformas Touros e Aracati (**Bertani et al. (1990)**).



**Figura 1.4** – (a) Mapa geológico da área de estudo, mostrando a região da aquisição de dados (quadrado preto), sendo os triângulos a representação da localização dos 18 pontos estudados e GG' o perfil geológico apresentado em (b). (b) Perfil geológico GG' com as principais estruturas. (adaptado de **Lopes & Nunes (2010)**, figura originalmente em inglês).

Atualmente, a Bacia do Potiguar é uma região com produção ativa de hidrocarbonetos com 686 milhões de barris de óleo produzidos e de 371 milhões de barris em reservas confirmadas. No local existem 77 campos em desenvolvimento e

produção. Com estes números, a bacia do Potiguar é responsável por quase 10% da produção brasileira. Seus principais reservatórios encontram-se na Formação Açu, que é composta principalmente por arenitos fluviais a deltaicos e representa 80% da produção desta região. As áreas restantes são: Formação Pendência responsável por 15% da produção (composta principalmente por turbiditos) e a Formação Alagamar responsável por 5% da produção (**Lopes & Nunes, 2010**).

Na **Figura 1.4** também é apresentada a localização dos perfis do experimento deste trabalho AA' e BB'. No perfil AA' a profundidade das formações fica entre 1,5 e 4 km, e sabe-se que quatro das estações sismográficas estão sobre campos de petróleo (pontos MS04, MS09, MS14 e MS17). Os pontos restantes igualmente podem estar sobre reservatórios, ainda não identificados. O perfil BB', por estar em uma região de reservas confirmadas, não permite acesso às profundidades e a outros dados das formações.

## 2. METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo identificar, com precisão, anomalias espectrais na banda de 2 a 8 Hz, e apresentar uma análise do comportamento estático da anomalia espectral. A identificação será feita após testes com os métodos FFT, PSD, MEM, MLM e espectrograma, e a análise do comportamento da anomalia espectral será realizada com os métodos espectrograma, expoente de Hurst, expoente de Lyapunov, biespectro e bicoerência.

Na primeira parte do processamento (**seção 4.1**), os dados passarão por um pré-processamento com a finalidade de preparar os sismogramas para se aplicar os métodos de estudo. Esse pré-processamento consistirá na aplicação das rotinas básicas de sismologia e também na análise da qualidade dos dados. Ainda nesta etapa será evidenciada e discutida a necessidade de usar os sismogramas completos ou em partes para o estudo da identificação e do comportamento da anomalia espectral

A melhor metodologia para análise espectral a ser aplicada nos dados de sísmica passiva será avaliada na **seção 4.2**. Após a definição do melhor método de estimativa espectral para dados de sísmica passiva, na **seção 4.3**, serão apresentados os resultados da identificação espectral dos 18 pontos e suas componentes (Vertical (Z), Norte-Sul (N) e Leste-Oeste (E)) com o melhor método de estimativa espectral definido na seção anterior.

O comportamento das anomalias espectrais identificadas na **seção 4.3** será analisado na **seção 4.4**.

Nesta análise serão utilizados os expoente de Hurst e o expoente de Lyapunov, que são as duas ferramentas capazes de indicar se uma série temporal se comporta como um sistema determinístico, probabilístico ou caótico.

Por fim, na **seção 4.5** explora-se a possibilidade de que a anomalia espectral possa apresentar um determinado comportamento não-linear, e para isso serão utilizados os métodos biespectro e bicoerência.

O biespectro e a bicoerência são métodos classificados como Análise Espectral de Alta Ordem (HOSA - Higher Order Spectral Analysis), usados para testar gaussianidade e linearidade de uma amostra.

Para alcançar esses objetivos foram usados os softwares SAC (*Seismic Analysis Code*, e.g., Goldstein *et al.*, 1999) e MATLAB (MATrix LABoratory, e.g., Gilat (2004)), sendo que todos os métodos de estimativa espectral e o espectrograma foram

calculados com o programa SAC e os últimos quatro métodos foram calculados no software MATLAB.

O expoente de Hurst foi calculado com o algoritmo computacional escrito por **Davidson (2005)**.

O expoente de Lyapunov tem como método clássico o cálculo desenvolvido por **Wolf (1985)**, porém precisa-se das Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) do sistema estudado. Como o comportamento da anomalia espectral ainda não foi explicado, não se tem essas EDOs, então neste trabalho o expoente de Lyapunov foi calculado por duas metodologias diferentes: a primeira técnica consiste de um algoritmo que calcula o expoente de Lyapunov através de expansão de Volterra (**Mohammadi, 2009a**); o segundo procedimento analisa o expoente de Lyapunov por redes neurais (**Mohammadi, 2009b**). Os dois algoritmos foram utilizados com o propósito de comparação para dar maior segurança na interpretação dos dados.

Os métodos biespectro e bicoerência foram calculados com o pacote HOSA (Higher Order Spectral Analysis) desenvolvido por **Swami (1995)**.

## 2.1 Procedimentos computacionais

### 2.1.1 SAC (*Seismic Analysis Code*)

O SAC é um programa interativo de análise de dados sísmológicos, projetado para o estudo de dados sequenciais, especialmente os dados de séries temporais. O mesmo tem capacidade de realizar operações aritméticas, transformadas de Fourier, métodos de estimativas espectrais (MEM, MLM e PSD), espectrograma (através dos métodos MEM, MLM e PSD), filtragem, empilhamento de sinal, interpolação, correlação e diversos outros procedimentos.

O software pode ser utilizado tanto para criação de dados sintéticos e manuseio de dados reais, quanto para fazer o cálculo da FFT e do espectro de potência. Neste software há um subprocesso chamado SPE (*Spectral Estimation*) que é um pacote de estimativa espectral destinado principalmente para o uso de processos aleatórios e estacionários, que contém três diferentes técnicas de estimativa espectral: MEM (*Maximum Entropy Method*); MLM (*Maximum Likelihood Method*); e PSD (*Power Spectral Densities*).

Estes três métodos são chamados de indiretos ou paramétricos, porque usam uma função de autocorrelação da amostra, em vez dos dados em si, para estimar o conteúdo espectral.

### 2.1.2 MATLAB

Os algoritmos para o cálculo dos métodos biespectro, bicoerência e expoente de Hurst foram desenvolvidos por pesquisadores em MATLAB e disponibilizados no site de desenvolvedores desse software ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)).

## 2.2 Métodos de estimativa espectral

Os métodos de estimativa espectral são feitos supondo que o sinal tem um tamanho infinito no tempo; porém, todos os sinais sísmicos registrados têm um tamanho finito, e, por isso, todos os métodos de estimativa espectral oferecem estimativas com diferentes tipos de precisão e resolução.

As explicações dos métodos apresentados a seguir, bem como descrições de seus parâmetros, procedimentos, aplicações, vantagens e desvantagens são baseadas nas informações do manual do software SAC (Goldstein *et al.*, 1999, Kantor & Trivedi, 1980, e Portugal, 1995).

### 2.2.1 FFT (*Fast Fourier Transform*)

Há várias formas de se fazer uma estimativa espectral, sendo que o método mais usado é a FFT (*Fast Fourier Transform*), que é um método rápido e eficiente. A série de Fourier decompõe qualquer sinal periódico em funções senos e cossenos e por isso apresenta diversas aplicações nas áreas de engenharia elétrica, acústica, ótica, processamento de sinais, análise de vibração, etc. (Goldstein *et al.*, 1999). Como a vibração sísmica natural da Terra apresenta periodicidade, pode-se expandi-la em uma série de senos e cossenos e aplicar este método.

Os métodos de estimativa espectral apresentam uma série de aplicações para o cálculo de espectro de potência, espectro cruzado, filtragem de dados, transmissão de sinais e cancelamento de ruído (Goldstein *et al.*, 1999).

A estimativa espectral por FFT é feita com o SAC utilizando o algoritmo de Bendat & Piersol (1971) baseado na transformada de Fourier (eq. 1) representada por:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (\text{eq. 1})$$

em que  $X(\omega)$  é a transformada de Fourier e  $x(t)$  é a função de entrada.

### 2.2.2 PSD (*Power Spectral Densities*)

A estimativa espectral PSD descreve a potência do sinal como função da frequência e é dada pelo resultado da FFT calculada sobre a função de autocorrelação (Ricker, 2003).

A função de autocorrelação descreve como o sinal varia com o tempo e é calculada da seguinte forma (Leite, 1998):

$$R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t + \tau)dt \quad (\text{eq. 2})$$

em que  $R(t)$  é a função de autocorrelação,  $x(t)$  sinal de entrada e  $\tau$  é a defasagem no tempo.

Neste trabalho, o cálculo da PSD foi feito com o algoritmo de Jenkins & Watts (1968), e tem dimensões de potência por frequência, ou energia por frequência. O

método permite definir o comprimento de janela, a defasagem, o número de pontos a serem utilizados na estimativa e o tipo de janela de transformação (*hamming*, *hanning*, cosseno, retângulo e triângulo). A janela de transformação é caracterizada por um lobo central, que controla a resolução e lóbulos laterais, que refletem fuga de energia.

### 2.2.3 MEM (*Maximum Entropy Method*)

O MEM é baseado em um processo autorregressivo (AR) em que a informação dos dados anteriores armazenados e processados fornece informações sobre o próximo dado. A estimativa espectral MEM foi calculada através do algoritmo de **Childers et al. (1978)**, que tem como base a equação de entropia:

$$H = \int_{-f_N}^{+f_N} \log P(f) df \quad (\text{eq. 3})$$

em que  $H$  é a entropia,  $f_N$  é a frequência de Nyquist e  $P(f)$  é o espectro de potência. O método consiste em encontrar um valor de  $P(f)$  que maximize  $H$ , e este procedimento é feito através de filtros de predição, iterações matriciais e processos autorregressivos. Os parâmetros de ordem do erro de previsão e número de pontos a serem utilizados na estimativa são de livre escolha do usuário.

A principal vantagem deste método é a alta resolução que se pode conseguir com uma quantidade relativamente pequena de dados. A desvantagem é que esse método é pouco descrito na literatura, havendo falta de informações teóricas, principalmente quando comparado com outros métodos (**Goldstein et al., 1999**).

#### 2.2.4 MLM (*Maximum Likelihood Method*)

A estimativa MLM é um método que estima os parâmetros de um modelo estatístico. Dados o conjunto de dados e o modelo estatístico, o método calcula os parâmetros que produzem uma distribuição que fornece a maior probabilidade do evento ocorrer.

O MLM calcula a estimativa espectral através do algoritmo de **Childers et al. (1978)** fundamentado na função de verossimilhança:

$$L = \prod_{t=1}^T f(\mu, \sigma^2; y_t) \quad (\text{eq. 4})$$

em que  $y_t$  é o dado de entrada,  $T$  o número de amostras,  $\mu$  é a média e  $\sigma^2$  é a variância da amostra. A finalidade do método é maximizar o valor do vetor com os parâmetros  $\mu$  e  $\sigma^2$ . A maximização desses valores é feita através de cálculos que usam derivadas de primeira e segunda ordem, iterativamente, até encontrar um valor para os parâmetros  $\mu$  e  $\sigma^2$  (**Portugal, 1995**).

A estimativa espectral MLM feita com o software SAC é o resultado de um filtro passa-banda estreito que rejeita potências fora dessa banda. O resultado é uma suavização da estimativa da densidade de potência espectral PSD. Os parâmetros são os coeficientes dos filtros passa-banda, com um estreito intervalo de frequência. O usuário pode escolher a defasagem da estimativa e o número de pontos a serem utilizados para a estimativa espectral. A grande dificuldade do método é encontrar os parâmetros que otimizam a estimativa espectral. Por outro lado, este método tem resolução melhor do que o método paramétrico convencional (PSD), e reduz de forma eficaz o lóbulo lateral (**Goldstein et al., 1999**).

#### 2.2.5 Espectrograma

O espectrograma é a apresentação do comportamento do espectro durante o tempo. Diferentemente dos métodos das seções **2.2.1-2.2.4**, que fazem uma estimativa espectral para o sinal inteiro, o espectrograma faz estimativas espectrais da série temporal para curtos intervalos de tempo, percorrendo todo o sismograma. Isso permite ver as flutuações do espectro e sua variação dentro do período de registro. O cálculo e o gráfico do método foram elaborados com a rotina SPECTROGRAM do programa SAC

(*Goldstein et al., 1999*). A rotina ainda permite calcular o espectrograma por meio dos métodos MEM, MLM e PDS. No presente trabalho calculou-se o espectrograma com essas três técnicas

Na Sísmica Passiva essa técnica é importante, pois a anomalia associada a reservatórios de hidrocarbonetos aparentemente não é contínua no tempo, e pode depender de fatores externos, como o nível de ruído antrópico, ou das características do reservatório, como a sua espessura ou tipos de fluidos.

### 2.3 Métodos para análise do comportamento da anomalia espectral

O método do espectrograma descrito na seção 2.2.5, além de ter sido usado para identificação da anomalia espectral, foi usado também para analisar o comportamento da anomalia na banda de 3Hz, porém somente para detectar flutuações na amplitude da anomalia.

Os métodos descritos a seguir são técnicas matemáticas usadas para o estudo do comportamento dinâmico de séries temporais. O expoente de Hurst e expoente de Lyapunov serão usados para reconhecer o sistema físico que rege as séries temporais neste trabalho, entretanto podem também ser aplicados para o estudo de fractais.

Estes métodos são usados para encontrar a qual sistema físico o objeto de estudo pertence. No caso, permitem definir se uma série temporal pertence ao sistema Determinístico, Probabilístico ou Caótico Determinístico (ou simplesmente Caótico).

A definição de cada sistema é da seguinte forma:

**Sistemas Determinísticos** são aqueles nos quais o comportamento do objeto de estudo apresenta comportamento simples e previsível (por exemplo, jogo de bilhar);

**Sistemas Probabilísticos** são aqueles em que o comportamento do objeto de estudo apresenta comportamento não previsível (por exemplo, jogo de dados), ou seja, para descrever o comportamento é necessário o uso de equações de estatística; e

**Sistemas Caóticos** são aqueles que apresentam comportamento complexo, podendo ser descritos através de equações diferenciais (por exemplo, na previsão meteorológica), ou seja, são sistemas que são previsíveis, porém para a descrição do comportamento dos mesmos é necessário o uso metodologias que envolvem, por exemplo, espaço de estados, atrator, bifurcação, dimensão fractal e etc.

Espaço de estados ou espaço de fase é um sistema de coordenadas associado às variáveis independentes que descrevem a dinâmica do sistema. Por exemplo, o espaço de estados de um pêndulo simples é definido por suas coordenadas de posição e velocidade.

O atrator é uma trajetória formada no espaço de fases pela solução de um sistema de equações diferenciais de evolução temporal da série estudada, ou seja, é a representação da dinâmica de um sistema no espaço de fases. Sistemas que apresentam comportamento estável, periódico ou caótico possuem atratores característicos.

Bifurcação é uma mudança no estado do atrator, e ocorre quando o sistema de equações diferenciais de evolução temporal, que descrevem o atrator, sofre uma mudança em seus parâmetros.

Dimensão fractal é a dimensão de um objeto que não preenche completamente um volume no espaço. Por exemplo, uma folha de papel amassada em forma de esfera, possuirá uma dimensão fracionária entre 2 e 3, pois no processo de amassar o papel tenta-se transformar um objeto de duas dimensões em um de três dimensões.

O biespectro e a bicoerência testam a gaussianidade e linearidade dos dados, respectivamente.

### 2.3.1 Expoente de Hurst

O expoente de Hurst permite identificar as relações de dependência ou independência de uma série temporal, descrevendo a regularidade, a aleatoriedade e também a memória de longo prazo das séries (**Hurst, 1951; Favaretto, 2004**). Quando uma série temporal se comportar como um sistema determinístico, cada observação possuirá uma memória de longa duração de todos os eventos que a precederam. Nesse contexto, eventos recentes têm maior impacto que os eventos mais distantes, mas sempre com a propagação da influência residual.

Em geral a estimativa do expoente de Hurst ( $H$  para os dados deste trabalho) é dada por:

$$\log\left(\frac{R}{S}\right) = H \log N + \log k \quad (\text{eq. 5})$$

em que  $R$  é uma medida da amplitude máxima de um determinado intervalo do sismograma,  $S$  o desvio padrão da série temporal,  $\log k$  uma constante, e  $N$  o número de pontos da série. Portanto, no gráfico log-log de  $R/S$  em função de  $N$ , a inclinação define o expoente de Hurst.

Se  $H = 0.5$ , o sistema é probabilístico, como no movimento browniano (MB), em que o sinal muda aleatoriamente. O MB é considerado como uma série temporal com variações irregulares e aleatórias.

Se  $H \neq 0.5$ , o sistema é considerado determinístico.

De acordo com **Lo (1991)**, o método pode identificar a memória de longo prazo em séries temporais altamente afastadas da normalidade e com grande assimetria e curtose. Segundo **Mandelbrot (1975)**, a análise dos dados por este método pode detectar ciclos não periódicos e ciclos com período igual ou maior que o período da amostra. O cálculo do expoente de Hurst também pode ser usado em métodos que analisam a rugosidade de uma série temporal, grandeza que os físicos trabalham no estudo do crescimento de superfícies fractais (**Barabási & Stanley, 1995**).

### 2.3.2 Expoente de Lyapunov

A principal característica de um sistema caótico é a sensibilidade às condições iniciais. **Lorenz (1963)** demonstrou que a dinâmica gerada pelo modelo de previsão do tempo exibia uma característica singular: dois pontos localizados a uma distância muito próxima seguiam rotas temporais bastante divergentes. O expoente de Lyapunov fornece a taxa média de divergência dessas rotas temporais e então pode ser usado para caracterizar a dinâmica de uma determinada série temporal. Seu conceito foi introduzido por **Lyapunov (1892)** ao estudar a estabilidade das soluções não estacionárias de equações diferenciais ordinárias, e tem sido amplamente utilizado no estudo de sistemas dinâmicos desde então.

Descreve-se a evolução temporal de um sistema dinâmico a partir de duas condições iniciais muito próximas,  $x_0$  e  $x_0 + \varepsilon_0$ . Decorrido um intervalo de tempo  $t$  tem-se:

$$\varepsilon(t) \sim \varepsilon_0 e^{\lambda t} \tag{eq. 6}$$

em que  $\lambda$  é o expoente de Lyapunov.

Os expoentes de Lyapunov são os autovalores da matriz Jacobiana calculados pelas equações diferenciais do sistema dinâmico. No caso de séries temporais nas quais não se têm as EDOs, podemos obter as matrizes Jacobianas através de uma estimativa local da dinâmica da série temporal.

O método clássico do cálculo do expoente de Lyapunov é descrito em **Wolf (1985)**, porém precisa-se das EDOs e das matrizes Jacobianas do sistema estudado. Como no caso da Sísmica Passiva o comportamento da anomalia espectral ainda não foi explicado, não se dispõe dessas EDOs e matrizes, então neste trabalho serão usados

métodos que fazem estimativas das EDOs e das matrizes Jacobianas para a série temporal. Assim, o expoente de Lyapunov foi calculado por duas metodologias diferentes: a primeira técnica consiste de um algoritmo que calcula o expoente de Lyapunov através de expansão de Volterra (**Mohammadi, 2009a**); o segundo procedimento analisa o expoente de Lyapunov por redes neurais (**Mohammadi, 2009b**).

O cálculo do expoente de Lyapunov através de expansão de Volterra é feito de acordo com o procedimento proposto por **Lai & Chen (1998)**, que aplica o método dos mínimos quadrados na série temporal para encontrar a ordem e o grau corretos a serem aplicados em uma série de Volterra autoregressiva não-linear, uma vez que qualquer sistema não-linear pode ser representado como uma série de Volterra AR não-linear de ordem infinita (**Hunt et al., 1995**). Essa série de Volterra será a representação da dinâmica da série temporal e com ela é feita uma estimativa da matriz Jacobiana, e o expoente de Lyapunov é o calculado pelos autovalores dessa matriz Jacobiana.

O segundo procedimento analisa o expoente de Lyapunov por redes neurais, tendo como etapas de processamento as descritas por **Shintani & Linton (2004)**, que através de redes neurais faz uma estimativa da matriz Jacobiana representante da série temporal e com a mesma realiza a estimativa dos expoentes de Lyapunov.

Para o expoente de Lyapunov  $\lambda$ , tem-se:

Se  $\lambda < 0$ , o sistema é determinístico (estável), e converge para um valor fixo. Quanto mais negativo o  $\lambda$ , mais rápido o sistema converge para o valor fixo, e o mesmo é representado por um ponto no espaço de fases;

Se  $\lambda = 0$ , o sistema é determinístico (periódico), e apresenta comportamento cíclico. Este sistema é representado por uma trajetória fechada no espaço de fases.

Se  $0 < \lambda < \infty$ , o sistema é caótico determinístico apresenta comportamento complexo, porém determinístico. Para se fazer o estudo de sistemas caóticos usa-se, por exemplo, o método denominado atrator. As trajetórias do atrator nunca reproduzem o mesmo percurso, entretanto as órbitas estão em uma região limitada do espaço de fases. Atratores de sistemas caóticos são denominados *atratores estranhos*, terminologia introduzida por **Ruelle & Takens (1971)**, e os mesmos possuem uma dimensão fractal associada.

Se  $\lambda \rightarrow \infty$ , o sistema é probabilístico (ruído ou hipercaótico), e não apresenta atrator.

De acordo com **Sprott (2003)**, em um sistema de três dimensões (X, Y e Z), tem-se três expoentes de Lyapunov, um para cada eixo. A interpretação para o sistema físico que rege a série temporal é dada pelo maior expoente de Lyapunov encontrado (**Tabela 2.1**). Por exemplo, quando existir pelo menos um expoente de Lyapunov positivo na série temporal estudada, o sistema deve ser considerado caótico.

**Tabela 2.1** – A tabela apresenta alguns exemplos de interpretação do sistema físico, segundo o expoente de Lyapunov, para um sistema de três dimensões (X, Y e Z).  $\lambda_1$  é o maior expoente de Lyapunov dentre os três calculados, o segundo maior é o  $\lambda_2$  e o menor é o  $\lambda_3$ .

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	Sistema Físico
negativo	negativo	negativo	Sistema Determinístico (Estável)
0	negativo	negativo	Sistema Determinístico (Periódico)
0	0	negativo	Sistema Determinístico (Periódico)
positivo	0	negativo	Sistema Caótico Determinístico (Caos)

### 2.3.3 Biespectro e Bicoerência

Os métodos do biespectro e bicoerência são considerados Análises Espectrais de Alta Ordem, (HOSA, Higher Order Spectral Analysis). O conceito de HOSA foi introduzido por **Brillinger (1965, 1969)** com o objetivo de detectar gaussianidade e comportamentos não lineares em séries temporais.

O biespectro é uma análise espectral de 3ª ordem, e é definido como a transformada de Fourier do cumulante de terceira ordem da série temporal com média zero. O método é usado para identificar não-linearidades assimétricas de uma amostra; entretanto, somente fornece informações se a série temporal apresentar distribuição simétrica (**Collis et al., 1998**).

Para determinar o biespectro, primeiramente calcula-se o momento de terceira ordem, definido como:

$$R_{xxx}(\tau_1, \tau_2) = E[x(t)x(t - \tau_1)x(t - \tau_2)] \quad (\text{eq. 7})$$

em que  $R_{xxx}$  é o momento de terceira ordem,  $E$  é o operador expectativa,  $x(t)$  é a série temporal de entrada, e  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são as defasagens no tempo.

Quando a série temporal  $x(t)$  apresentar média zero, o cumulante de terceira ordem é igual ao momento de terceira ordem:

$$C_{xxx}(\tau_1, \tau_2) = R_{xxx}(\tau_1, \tau_2) \quad (\text{eq. 8})$$

sendo  $C_{xxx}$  o cumulante de terceira ordem,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  as defasagens e  $R_{xxx}$  o momento de terceira ordem.

Por fim, o biespectro é definido como a transformada de Fourier do cumulante de terceira ordem.

$$B_{xxx}(f_1, f_2) = FFT[C_{xxx}(\tau_1, \tau_2)] \quad (\text{eq. 9})$$

em que  $B_{xxx}$  é o biespectro,  $f_1$  e  $f_2$  são as frequências analisadas, FFT é a Transformada Rápida de Fourier,  $C_{xxx}$  é o cumulante de terceira ordem e os parâmetros  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são as defasagens no tempo.

A bicoerência é a versão normalizada do biespectro, ou seja, apresenta valores entre 0 e 1, e é definida como:

$$bic^2(f_1, f_2) = \frac{|B_{xxx}(f_1, f_2)|^2}{E[|X(f_1)X(f_2)|^2]E[|X(f_1 + f_2)|^2]} \quad (\text{eq. 10})$$

em que  $bic$  é a bicoerência,  $f_1$  e  $f_2$  são as frequências analisadas,  $B_{xxx}$  é o biespectro e  $X$  é a FFT de  $x(t)$ .

As interpretações possíveis do biespectro e bicoerência em relação à gaussianidade e linearidade são (**Hinich, 1982**):

Se biespectro = 0 → processo gaussiano, que pode ser descrito através da média e variância dos dados (por ex., movimento browniano);

Se biespectro  $\neq$  0 → processo não-gaussiano, que é descrito com os momentos de terceira e quarta ordem, pois os mesmos descrevem o grau de assimetria e achatamento da função de distribuição de probabilidades (por ex., bolsa de valores).

Se o biespectro for diferente de zero então pode-se testar mais facilmente a linearidade com o método da bicoerência. Tem-se neste caso:

Se bicoerência constante  $\rightarrow$  processo linear, que pode ser descrito por um sistema determinístico (por ex., jogo de bilhar); e

Se bicoerência não-constante  $\rightarrow$  processo não-linear, que pode ser descrito por um sistema caótico, apresentando estruturas que não tem uma única solução para um dado sistema (por ex., mudança do tempo meteorológico).

Sinais com valores diferentes de zero nos gráficos do biespectro e valores não constantes na bicoerência indicam a presença de acoplamento de fase quadrática, que é um tipo específico de não-linearidade. Essa não-linearidade acontece quando tem-se um sinal composto por três senóides com frequências e fases  $(\omega_1, \phi_1)$ ,  $(\omega_2, \phi_2)$  e  $(\omega_3, \phi_3)$  respectivamente. As senóides 1 e 2 estarão acopladas de fase quadrática, se (**Swami et al., 1995**):

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3; e$$

$$\phi_1 + \phi_2 = \phi_3;$$

ou

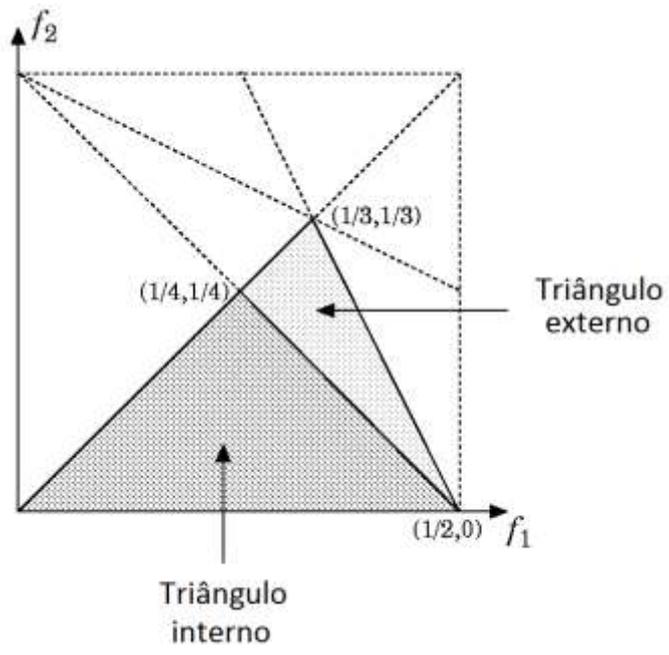
(eq. 11)

$$\omega_1 - \omega_2 = \omega_3; e$$

$$\phi_1 - \phi_2 = \phi_3;$$

De acordo com **Collis et al., (1998)** a variância da estimativa biespectral sofre influência do espectro de potência do próprio sinal, sendo assim difícil de identificar as anomalias. Entretanto, como a bicoerência é o valor normalizado da estimativa biespectral, essa influência é reduzida.

O gráfico gerado pelo método do biespectro e bicoerência apresenta 12 regiões de simetria (**Collis et al., 1998**). O domínio principal é apresentado na **Figura 2.1**. Para as interpretações dos resultados obtidos nesta metodologia, será usada esta região do gráfico para tentar encontrar o acoplamento de fase quadrática.



**Figura 2.1** – Domínio principal do método biespectro e bicoerência (Collis et al., 1998).

### 3 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados utilizados neste trabalho foram adquiridos entre 11 e 22 de maio de 2009, em uma área de produção ativa de óleo, localizada na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte, Norte do Brasil (**Figura 1.4**). Estes dados foram discutidos por **Lopes & Nunes (2010)** que utilizaram o método Fast Fourier Transform (FFT) para identificar a presença de anomalias espectrais sobre regiões com a presença de hidrocarbonetos.

Os registros das três componentes (Leste-Oeste (E), Norte-Sul (N) e Vertical (Z)) foram obtidos em 18 pontos diferentes com o auxílio de uma estação sismográfica móvel, e foram denominados MS (e.g., MS01 a MS18). Os sismogramas foram gravados com o sismômetro Guralp CMG-6TD com velocidade de resposta de 0,03 a 100Hz, uma sensibilidade de 1600V/m/s e taxa de 100 amostras por segundo.

Os registros possuem uma duração entre 0,4 e 3,1 horas; porém, para uma identificação espectral e uma análise completa do comportamento da anomalia é necessário um sismograma com duração de alguns dias. O motivo dessa necessidade é a anomalia espectral apresentar variações na amplitude ao longo do tempo, sendo que a mesma apresenta maior intensidade no período da manhã, chegando até a desaparecer em certas ocasiões, (**Lambert *et al.*, 2009**), ou seja, se o sismograma for de curta duração, existe a possibilidade de que no momento da coleta dos dados, o ponto estudado não esteja apresentando a anomalia espectral. Neste caso os dados, de certa forma, seriam incompletos, por serem dados de curta duração, pois nenhum sismograma apresenta período de pelo menos 24 horas em um mesmo ponto, assim não sendo possível o estudo do comportamento da anomalia espectral no período da manhã, tarde e noite. O conjunto de dados disponível consiste de sismogramas coletados na parte da manhã, tarde ou noite, sendo que somente os pontos MS07, MS08 E MS10 foram coletados no período da tarde, e apenas o ponto MS09 foi coletado no período noturno.

A localização, a geometria das linhas sísmicas e a geologia regional podem ser observadas nas **Figura 1.4 e 3.1**.



**Figura 3.1** – Mapa ampliado da área de estudo com a localização e numeração de cada estação sismográfica. As regiões em cinza são locais com reservatórios conhecidos.

**Lopes & Nunes (2010)** concluíram em laboratório que o melhor modo de instalação dos sismômetros era enterrar o sensor diretamente em terra firme a uma profundidade de 60 cm, com proteção de plástico, e cobri-lo com 30-40 cm de solo, para reduzir o máximo possível as influências externas no sismograma (por ex., variações de temperatura e fenômenos atmosféricos).

Logo após a instalação, a equipe sempre esperava no mínimo a 20 metros da estação para evitar a geração de ruídos nos dados, pois como a Sísmica Passiva utiliza como dados o “ruído sísmico”, a maior preocupação na aquisição dos dados é reduzir ao máximo as influências externas, pois algumas fontes de ruído podem camuflar a anomalia na banda de 3 Hz. Em alguns pontos quando houve ruído como cavalo de pau de bombeamento poço, moto, carro, caminhão, chuva, e etc, os mesmos tiveram seus horários anotados e foram posteriormente editados quando necessário.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Pré-processamento e qualidade dos dados

Antes de usar os sismogramas nos métodos deste trabalho, um pré-processamento dos dados foi realizado no software SAC, da seguinte forma: os dados foram adquiridos no formato GCF e foram convertidos para o formato SAC; porém, esses arquivos tinham a duração de três minutos cada, e foram utilizados para criar um arquivo único de cada estação. Em seguida, foram removidas a parte inicial e final dos sismogramas para eliminar a influência da instalação e desinstalação da estação sismográfica. Os arquivos em seguida tiveram a escala modificada de "counts" para velocidade em  $\mu\text{m/s}$ , e posteriormente esse dado foi filtrado com um filtro passa alta de frequência 0.03 Hz, sendo depois convertido em deslocamento do chão em  $\mu\text{m/s}$ .

Após este processamento, todos os sismogramas tiveram a média e as tendências retiradas. Ainda no pré-processamento, conferiu-se a qualidade dos dados com as anotações de campo (**tabelas 4.1 e 4.2**), e para avaliar o nível de ruído/ influências externas usou-se o método espectrograma, o que levou os sismogramas a serem divididos em alguns segmentos. Entende-se dividir os sismogramas como retirar a parte com alto ruído ou influências externas do sismograma, e com isso decompô-lo em algumas partes. Os ruídos retirados foram identificados por uma análise visual dos sismogramas juntamente com as anotações de campo, e também pelas amplitudes altas no espectrograma.

Para finalizar o pré-processamento, os arquivos finais obtidos após os procedimentos descritos foram convertidos do formato SAC para o formato XY, que é o formato usado no software MATLAB, onde foram realizados os cálculos dos parâmetros a serem analisados neste trabalho.

**Tabela 4.1** – Valores das coordenadas e altitudes dos pontos MS01 ao MS11, e suas observações mais importantes como presença de cavalos de pau e sua frequência de bombeamento do poço, chuvas, presença de tubulações e etc.

<b>Nponto</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude</b>	<b>Observações</b>
<b>MS01</b>	-5,17526	-37,24628	17	A 70 metros do ponto há um cavalo de pau, com uma frequência de 0,24 Hz.
<b>MS02a</b>	-5,15649	-37,22334	16	Este ponto fica próximo (100-200) metros de uma estrada principal. O computador só registrou 30 minutos.
<b>MS02b</b>	-5,15648	-37,22332	12	O ponto foi retomado, com dados de 3 h
<b>MS03</b>	-5,14263	-37,21007	22	Há um cavalo de pau próximo, a uns 30 metros, com uma frequência de giro de 0,32 Hz. Devido a problemas com o notebook, o registro foi de apenas 33 min.
<b>MS04</b>	-5,11645	-37,16603	49	O ponto está muito próximo a um cavalo de pau (cerca de 30 metros), com uma frequência de 0,13 Hz. Nos 20 minutos finais da aquisição houve chuva forte.
<b>MS05</b>	-5,07787	-37,13336	41	Esse ponto estava muito ruidoso e foi feito um registro mais curto, pois parecia ter apenas influência do cavalo de pau, com uma frequência de 0,19 Hz.
<b>MS06</b>	-5,05879	-37,10002	86	Ponto com tubulação, aparentemente de gás.
<b>MS07</b>	-5,03099	-37,06680	84	Tinha um cavalo de pau, mas não estava funcionando. A medida foi realizada à tarde.
<b>MS08</b>	-5,00840	-37,02548	156	Tinha um cavalo de pau a uns 70 metros do sensor. A medida foi realizada à tarde.
<b>MS09</b>	-5,13761	-37,14470	106	Ponto em uma abertura com canos centrais, porém sem cavalo de pau. A medida foi realizada à noite.
<b>MS10</b>	-5,16467	-37,12633	176	Este ponto ficou em um local longe de reservatórios, e relativamente alto. Outro ponto importante é que há uma estrada asfaltada com muito movimento a aproximadamente 450 metros do sensor. A medida foi realizada à tarde.
<b>MS11</b>	-5,19674	-37,08895	245	Este ponto está dentro de uma plantação de caju, ou seja, perto de muitas árvores baixas, e a 235 metros de um estrada, além de estar longe de reservatórios conhecidos. Trata-se do ponto mais alto onde executou-se medidas. O terreno no local de medida é composto por uma espécie de areião (parece uma duna).

**Tabela 4.2** – Valores das coordenadas e altitudes dos pontos MS12 ao MS18, e suas observações mais importantes como presença de cavalos de pau e sua frequência de bombeamento do poço, chuvas, presença de tubulações e etc.

<b>Nponto</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude</b>	<b>Observações</b>
<b>MS12</b>	-5,22235	-37,06639	233	Assim como o ponto MS11, este ponto está dentro de uma plantação de caju. Trata-se de um dos pontos mais altos onde executou-se medidas. O terreno no local de medida e em toda a extensão da estrada é composto por uma espécie de areião (parece uma duna).
<b>MS13a</b>	-5,27774	-37,04700	148	Este ponto está localizado em local discreto e sem cavalo de pau. O notebook e o sensor travaram. Não se sabe se foi por que o cabo estava a 50 graus, ou por que o notebook estava a 100 graus, mas devido a esse calor o registro acabou sendo curto.
<b>MS13b</b>	-5,27782	-37,04684	148	O ponto MS13b é a retomada do ponto MS13, porém com um deslocamento espacial de alguns metros (5 metros), devido a dificuldade de se escavar em terreno com muitas pedras.
<b>MS14</b>	-5,28315	-37,02652	103	O cavalo mais próximo a este ponto, na data de medida, encontrava-se desligado. Houve uma carreta carregada de dutos para o oleoduto, e começou a descarregar. A cada 14 metros era descarregado um tubo de ferro de mesma dimensão, o que deve ter acarretado em algum ruído durante algum tempo. Outro evento importante foi uma breve chuva de apenas 3 minutos.
<b>MS15</b>	-5,30459	-36,98014	49	Neste ponto havia um rio a 50 metros de distância, que é um rio muito tranquilo. A estação foi instalada abaixo de um grupo de árvores pequenas, com menos de 2 metros de altura. Não foram identificadas fontes de ruído, embora na lateral da estrada haja indícios de haver dutos enterrados.
<b>MS16</b>	-5,35948	-36,95441	75	A estação foi instalada próxima a uma cerca, e a sede da fazenda está a uns 100 metros da estação. O registro foi de 1 hora, pois havia acabado a bateria do notebook.
<b>MS17</b>	-5,39504	-36,93335	67	No local onde a estação foi instalada a uns 50 metros tem um cavalo de pau, porém, em toda a volta da estação há outros cavalos, com uma frequência de 0,19 Hz. A componente N-S travou.
<b>MS18</b>	-5,40707	-36,92640	62	Não havia cavalos de pau por perto.

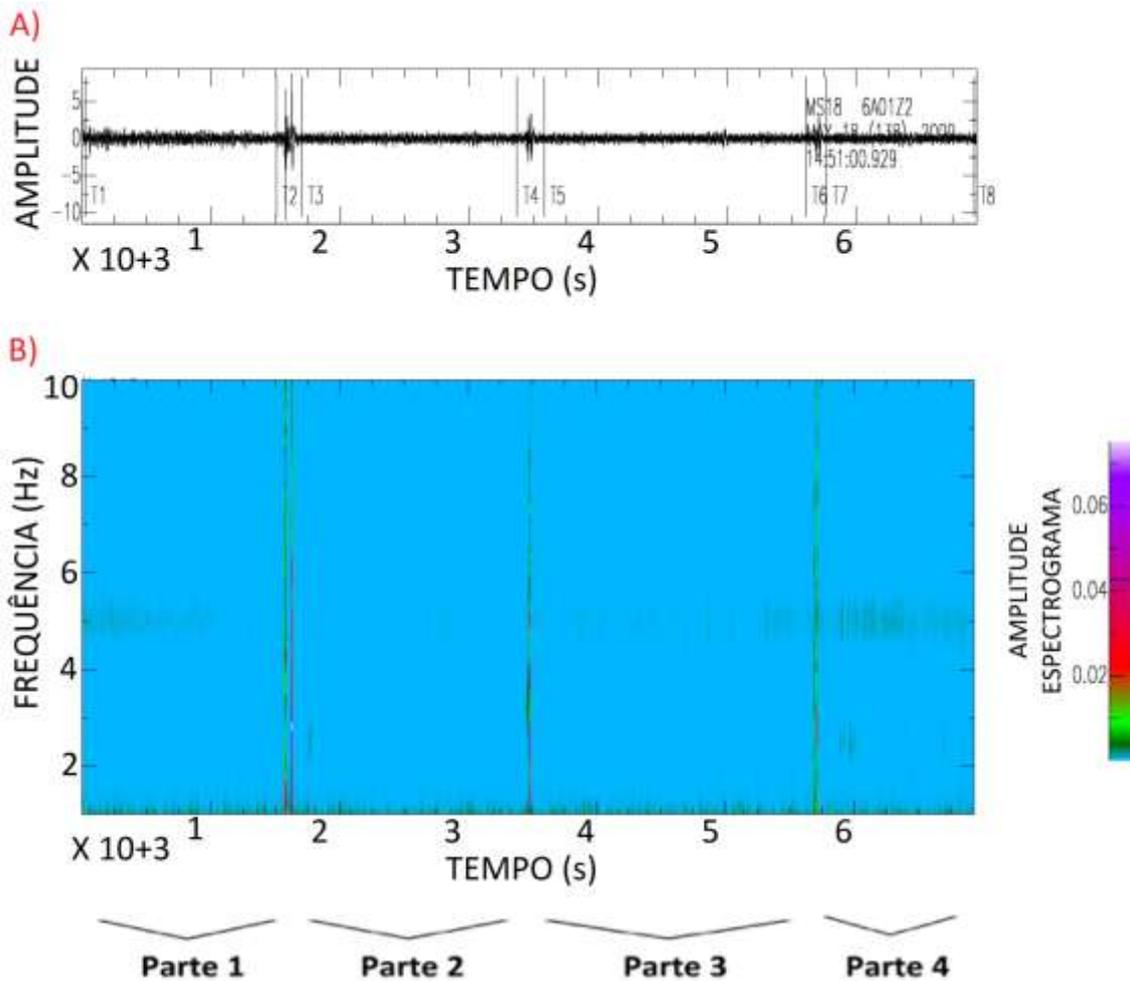
Analisando as **tabelas 4.1 e 4.2** nota-se que as frequências do ruído de cavalos de pau eram de no máximo 0,32 Hz, ou seja, sempre estavam abaixo da banda de observação da sísmica passiva (2 a 8 Hz). Todos os outros ruídos citados quando identificados levaram os sismogramas a serem cortados. Ainda nessas tabelas observamos que os pontos MS02 e MS13 foram divididos em duas aquisições por problemas no campo (MS02a, MS02b, MS13a e MS13b), e que o ponto MS08 foi o único ponto com aquisição noturna.

Repetiu-se o processo acima para todos os 18 pontos e suas componentes horizontais e verticais, ou seja, calcularam-se todos os espectrogramas e foram correlacionados com os próprios sismogramas e suas anotações de campo das **tabelas 4.1 e 4.2**. Esse processo gerou o corte de todos os sismogramas, e em alguns casos a segmentação do mesmo. Na **tabela 4.3** pode-se conferir os resultados do processo descrito, com a duração de cada sismograma e em quantas partes os mesmos foram divididos.

**Tabela 4.3** – Duração total e parcial de cada sismograma e em quantas partes o mesmo foi dividido.

Estação Sismográfica	Tamanho do registro em horas	Número de partes do sismograma	Número de partes do sismograma e seu tamanho em minutos				
			Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4	Parte 5
MS01	3,1	2	132	45	-	-	-
MS02a	0.5	1	5	-	-	-	-
MS02b	2.7	5	30	23	40	33	36
MS03	0.4	2	3	13	-	-	-
MS04	2.6	4	18	65	14	35	-
MS05	0.7	1	40	-	-	-	-
MS06	2.3	3	36	29	66	-	-
MS07	2.5	1	118	-	-	-	-
MS08	1.5	2	83	7	-	-	-
MS09	3.0	2	34	86	-	-	-
MS10	1.7	3	14	20	18	-	-
MS11	2.9	5	31	26	28	27	16
MS12	0.5	3	11	8	4	-	-
MS13a	1.0	2	49	11	-	-	-
MS13b	1.6	4	25	28	17	18	-
MS14	2.3	4	8	21	30	28	-
MS15	2.2	4	26	26	33	42	-
MS16	1.3	4	25	12	15	20	-
MS17	2.0	4	30	33	23	18	-
MS18	1.9	4	25	28	34	19	-

Como exemplo tem-se o espectrograma do ponto MS18, componente Z, que indicou três ruídos no meio do sismograma, mesmo sem apresentar nenhuma observação na **tabela 4.2**. O mesmo foi dividido em quatro partes (**Figura 4.1**), ou seja, para a **seção 4.1.1** tem-se a série temporal pré-processada completa e também seus segmentos, então isso significa que serão obtidos os sismogramas: MS18Z completa; MS18Z parte 1; MS18Z parte 2; MS18Z parte 3; e MS18Z parte 4.



**Figura 4.1** – (A) sismograma do ponto MS18 componente vertical. (B) Espectrograma, com o método MEM, do ponto MS18 componente vertical para exemplificar como foi feito o corte dos sismogramas. O MS18 foi dividido em quatro partes por apresentar três pontos com ruído. Os ruídos são identificados pelas amplitudes altas no espectrograma e a correlação com o sismograma; os mesmos estão entre as marcas T2 e T3, T4 e T5 e entre as marcações T6 e T7.

O exemplo da **Figura 4.1** é significativo, pois para todos os outros dados os resultados foram semelhantes, sendo assim, o procedimento adotado foi eficaz para todos os sismogramas.

Deve-se destacar que todas as séries temporais apresentam até 5 partes e com no mínimo um segmento de 11 minutos de duração (com exceção do ponto MS02a, que possui somente 5 minutos de duração). O ponto MS02a, após o controle de qualidade, ficou com apenas 5 minutos de duração, porém foi mantido como forma de comparação para avaliar se um sismograma pequeno gera a mesma interpretação do que um sismograma grande. Este sismograma será comparado com o ponto MS02b, pois estes têm a mesma localização, só diferindo o dia de aquisição.

Além disso, outro fato importante é que as estações sismográficas foram divididas em três grupos. Este procedimento foi adotado, pois alguns sismogramas, mesmo após passarem por procedimentos de qualidades e serem "cortados", ainda apresentam ruído, porém ainda serão usados para todos os métodos, pois os mesmos encontram-se logo acima de reservatórios de hidrocarbonetos conhecidos (**Figura 3.1**). Entretanto, deve-se ressaltar que essas séries temporais apresentam ruídos, e sendo assim, neste caso, as estações foram divididas do seguinte modo:

Grupo 1 - Estações sismográficas com nível de ruído baixo; pontos MS03, MS09, MS10, MS11, MS12, MS13a, MS13b, MS15, MS16 e MS18.

Grupo 2 - Estações sismográficas com nível de ruído médio; pontos MS01, MS02a, MS02b, MS04 e MS14.

Grupo 3 - Estações sismográficas com nível de ruído alto; pontos MS05, MS06, MS07, MS08 e MS17.

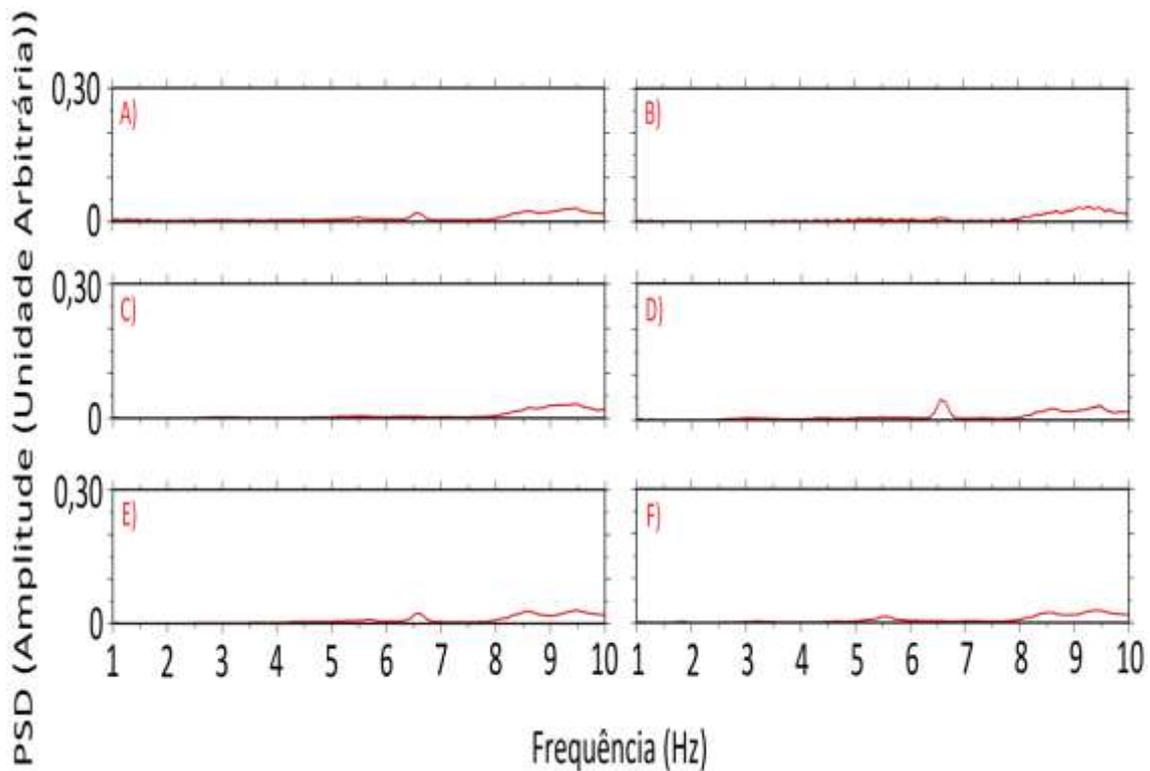
O nível de ruído foi determinado com a amplitude média observada na estimativa espectral FFT e também com a análise do sismograma de cada estação sismográfica.

#### **4.1.1 Sismogramas completos ou em partes**

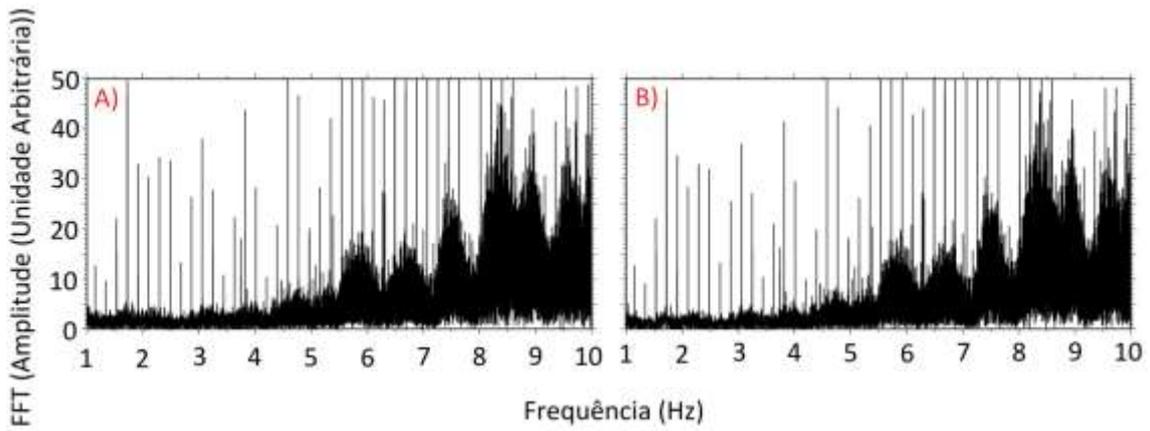
Um fato importante a ser lembrado é que, para a Sísmica Passiva, quanto maior for a duração do sismograma, melhor será para a análise dos dados. Então, nesta seção será analisado (para todos os métodos de estimativas espectrais) se os sismogramas cortados na seção anterior geram resultados e interpretações diferentes do sismograma completo.

Os gráficos da **Figura 4.2** apresentam os resultados da estimativa espectral no método PSD do ponto MS02b, componente Z, tanto para o sismograma inteiro quanto para suas 4 divisões. Os gráficos da **Figura 4.3** expõem as estimativas espectrais do ponto MS05 e sua única parte, através do método FFT, e os gráficos da **Figura 4.4** são as estimativas espectrais através do método MEM para o ponto MS17 e seus segmentos.

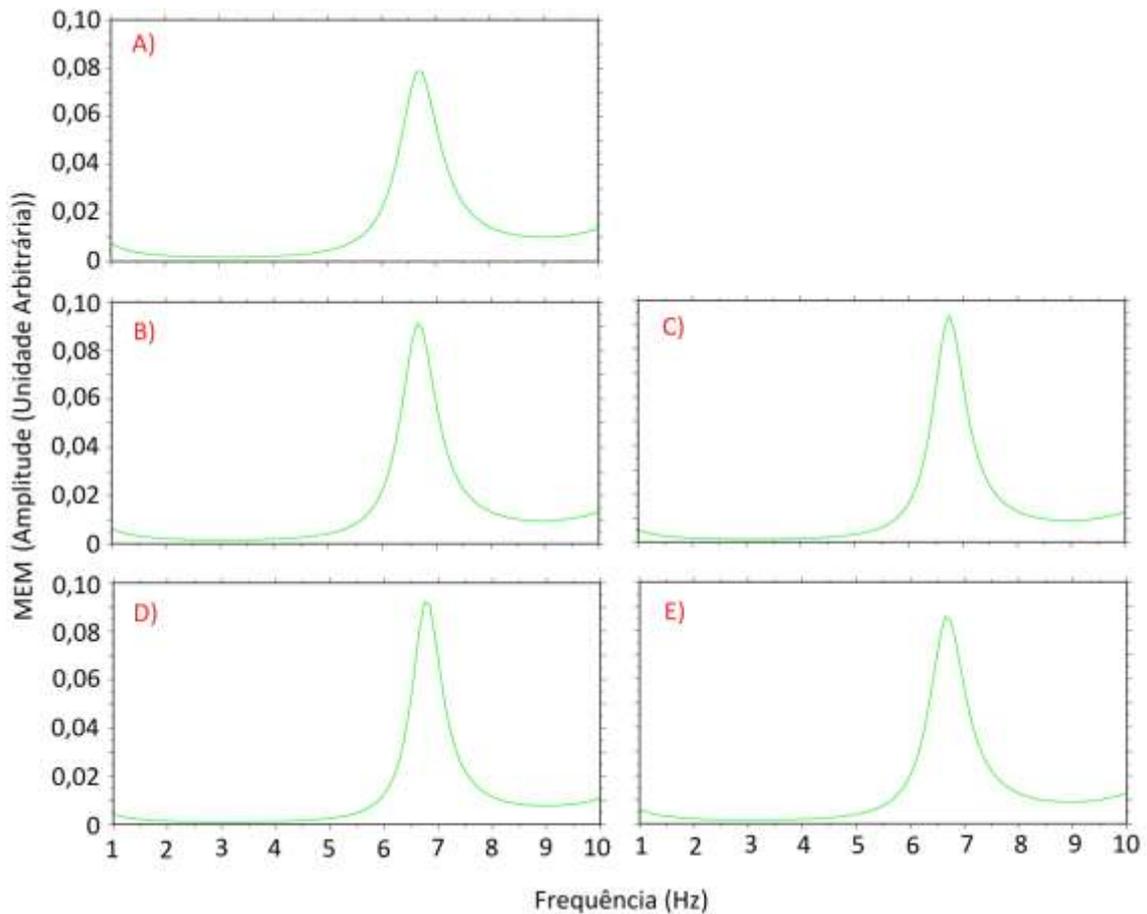
Analisando conjuntamente os dados apresentados nessas três figuras, comprovamos que não será necessário usar os sismogramas cortados, pois nota-se, por exemplo, nos sismogramas do ponto MS05 componente Z com o método FFT (**Figura 4.3**) e também nos dados do ponto MS17 componente Z através do método MEM (**Figura 4.4**), que a variação na assinatura espectral é mínima.



**Figura 4.2** – Comparação entre as estimativas espectrais do sismograma MS02b completo ou por partes (A) PSD do sismograma completo, (B) PSD da parte 1 do sismograma, (C) PSD da parte 2 do sismograma, (D) PSD da parte 3 sismograma, (E) PSD da parte 4 do sismograma e (F) PSD da parte 5 do sismograma.



**Figura 4.3** – Comparação entre as estimativas espectrais do sismograma MS05 completo. (A) FFT do sismograma completo, (B) FFT da parte 1 do sismograma.



**Figura 4.4** – Comparação entre as estimativas espectrais do sismograma MS017 completo ou por partes (A) MEM do sismograma completo, (B) MEM da parte 1 do sismograma, (C) MEM da parte 2 do sismograma, (D) MEM da parte 3 sismograma e (E) MEM da parte 4 do sismograma.

Os gráficos da **Figura 4.2** quando comparados apresentam uma pequena diferença. O gráfico (a) identifica algo bem suave nas regiões dos 5,5 Hz e 6,5 Hz, e também uma região entre 8 e 10 Hz. Os gráficos (b), (c) e (f) não identificam a região dos 6,5 Hz. Somente o gráfico (f) identifica a região dos 5,5 Hz, porém melhor do que o gráfico (a), e todos os gráficos identificaram a região entre 8 e 10 Hz. Entretanto, essas variações são pequenas e também são aceitáveis, até mesmo porque **Lambert et al., (2009)** mostraram que a anomalia relacionada à presença de reservatório de hidrocarboneto apresenta flutuações durante o registro. Essa flutuação também pode ocorrer até mesmo porque os dados são séries temporais de vibrações naturais da Terra. Portanto, ao variar a quantidade de dados e/ou o tempo, haverá alterações no mesmo e com isso existirão diferenças na assinatura espectral.

Nesta seção pode-se concluir que os ruídos retirados na **seção 4.1** não são prejudiciais aos dados e não comprometem a estimativa espectral (**seção 4.2 e 4.3**). No entanto nas **seções 4.4 e 4.5** serão usados os sismogramas cortados para analisar o comportamento da anomalia, com o intuito de aumentar a precisão da interpretação final, pois esse é o principal foco deste trabalho.

#### **4.2 Comparação dos métodos de estimativa espectral**

Nesta seção serão comparados os métodos FFT, PSD, MLM, MEM e ESPECTROGRAMAS (PSD, MLM e MEM) e será definido o melhor método de estimativa espectral para a identificação da anomalia observada em Sísmica Passiva. A comparação entre os métodos foi feita para determinar o método com maior precisão, clareza e facilidade de identificar anomalias espectrais na faixa de 2 a 8 Hz.

Para alcançar o objetivo de determinar qual será o melhor dos métodos citados, a **tabela 4.4** exhibe sinteticamente os resultados obtidos para todos os sismogramas de componente vertical, para todos os métodos citados.

**Tabela 4.4** – Comparação entre os métodos de estimativa espectral (FFT, PSD, MLM, MEM e ESPECTROGRAMAS (PSD, MLM e MEM)), sintetizando quais foram os métodos que mais identificaram anomalias na componente Z das estações sismográficas. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.

Estação sismográfica componente Z	Presença de anomalia entre 2 e 8 Hz						
	FFT	PDS	MLM	MEM	ESPECTROGRAMA		
					PDS	MLM	MEM
Grupo 1	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO BAIXO						
MS03	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
MS09	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
MS10	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
MS11	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
MS12	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
MS13a	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
MS13b	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
MS15	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
MS16	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
MS18	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
Grupo 2	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO MÉDIO						
MS01	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim
MS02a	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim
MS02b	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim
MS04	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
MS14	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Grupo 3	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO ALTO						
MS05	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
MS06	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
MS07	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
MS08	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
MS17	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Número de pontos com anomalia identificada	15	15	6	11	14	16	16

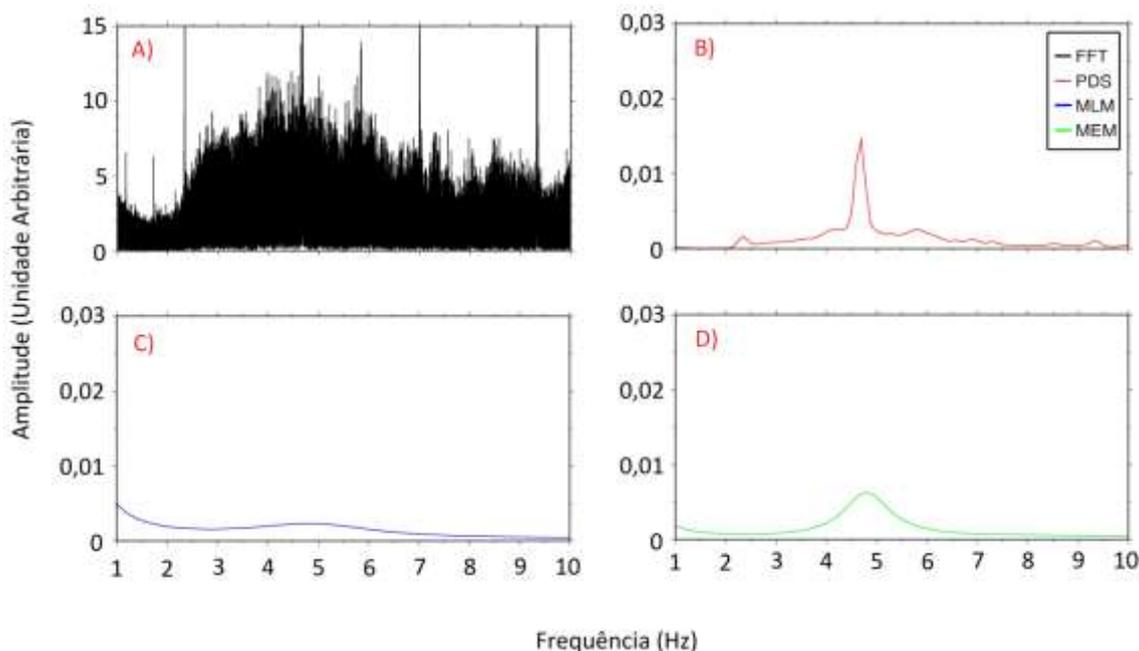
Nota-se que na **tabela 4.4**, os métodos que identificaram o maior número de anomalias na banda de 3 Hz foram os métodos do espectrograma (calculado com MLM e MEM), identificando 16 pontos com a presença da anomalia espectral, contra 15 identificações via FFT e PSD, e menos de 14 identificações com os métodos restantes.

**Pavan (2011)** comparou somente os métodos FFT, PDS, MLM e MEM em dados sintéticos concluindo que o FFT era o método com tempo de processamento mais rápido e também a melhor estimativa espectral para casos em que o sismograma continha um nível alto de ruído. Porém, a FFT apresenta muito ruído em seu resultado. O MEM apresentou melhor resultado para estimativas espectrais de séries temporais pequenas; porém, generalizando, o PDS é dito como melhor método para identificação

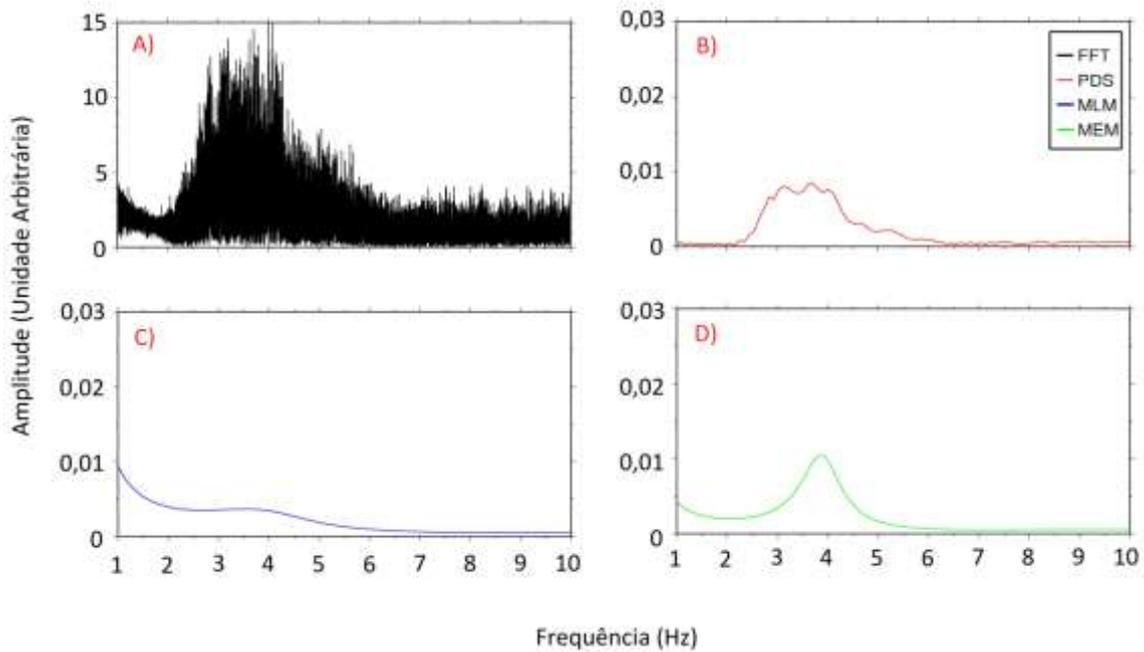
da anomalia espectral, pois seu resultado é próximo ao da FFT, a estimativa espectral quase não apresenta ruído e proporciona resultados próximos ao MEM para séries temporais pequenas.

Ao avaliar a teoria dos métodos FFT e PSD, era de se esperar que eles identificassem o mesmo número de anomalias. Porém, eles foram contraditórios nos pontos MS08 e MS17, mas há um aviso para usá-los com cautela (**seção 4.1**). Então, comparando somente os métodos FFT, PDS, MLM e MEM como pode ser visto nas **Figuras 4.5 e 4.6 e tabela 4.4**, o PSD demonstra melhor definição na estimativa espectral, corroborando o resultado obtido por **Pavan (2011)**.

Um fato importante observado é que o método MLM demonstrou baixa eficiência ao identificar a anomalia espectral; entretanto, como em teoria o método encontra a assinatura espectral da série temporal que estima os parâmetros (média e variância), então, espera-se que os dados tenham uma distribuição gaussiana. A justificativa da baixa eficiência do MLM é que, possivelmente, os dados não possuam gaussianidade (o teste de gaussianidade dos sismogramas será testado com o método do biespectro (**seção 4.5**)).

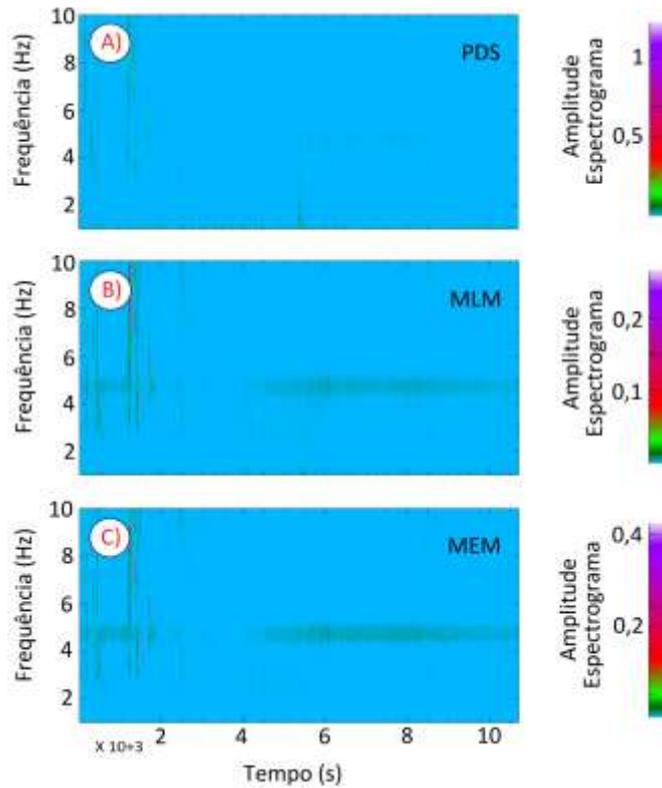


**Figura 4.5** – Comparação dos resultados obtidos com os métodos: (A) FFT resultados em preto, (B) PDS resultados em vermelho, (C) MLM resultados em azul e (D) MEM resultados em verde, para o ponto MS09 componente vertical.

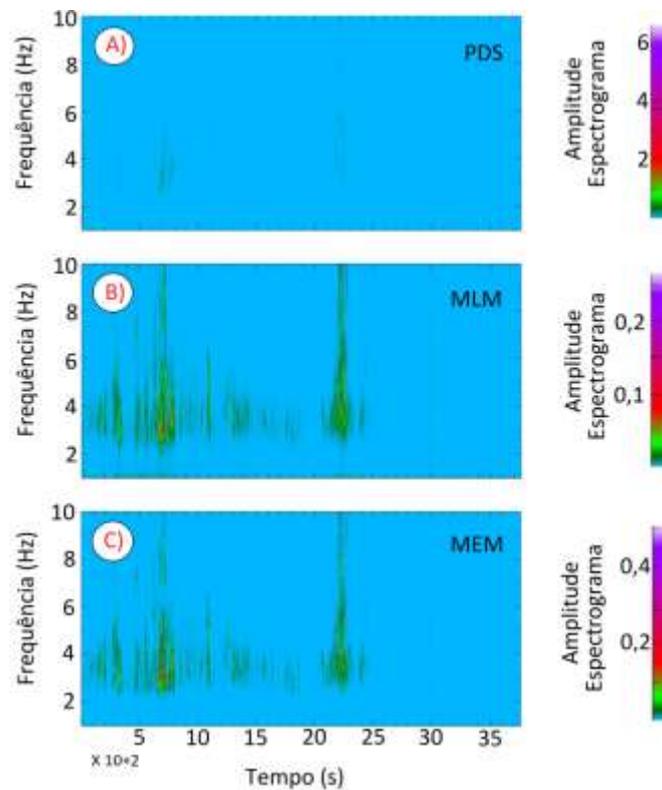


**Figura 4.6** – Comparação dos resultados obtidos com os métodos: (A) FFT resultados em preto, (B) PDS resultados em vermelho, (C) MLM resultados em azul e (D) MEM resultados em verde, para o ponto MS13 componente vertical.

Nas **Figuras 4.7 e 4.8** tem-se alguns exemplos da comparação entre as possíveis estimativas espectrais do espectrograma, onde observa-se que o melhor resultado quanto ao número de identificações de anomalia espectral é obtido com os espectrogramas calculados com o MEM e MLM, mas quanto à amplitude o MEM apresentou melhores resultados.



**Figura 4.7** – Comparação dos espectrogramas calculados para o ponto MS09, componente vertical. Os métodos de estimativa espectrais aplicados são : A) PDS, B) MLM e C) MEM.



**Figura 4.8** – Comparação dos espectrogramas calculados para o ponto MS13a, componente vertical. Os métodos de estimativa espectrais aplicados são : A) PDS, B) MLM e C) MEM.

Então, ao comparar todos os métodos apresentados, comprovou-se que o melhor método de estimativa espectral é o espectrograma calculado com MEM, pois o espectrograma trabalha com dados relativamente pequenos, e apresenta melhor estimativa espectral para séries temporais curtas.

### 4.3 Identificação das anomalias espectrais

Esta seção irá apresentar os resultados obtidos da estimativa espectral do método espectrograma MEM para as 18 estações sismográficas e suas componentes.

**Saenger *et al.*, (2009)** demonstraram que as anomalias espectrais variam com o tempo, e em alguns momentos até desaparecem. Além disso os autores afirmam que as vibrações associadas à presença de reservatório de hidrocarbonetos são produzidas logo abaixo das estações com registro de anomalias espectrais na banda de 3 Hz. Desta seção em diante, como forma suplementar de dados, além da componente Z, serão apresentados os resultados para as componentes horizontais.

A **tabela 4.5** proporciona o resumo simplificado da identificação da anomalia espectral e o pico central da mesma, para as três componentes de cada estação sismográfica. Nota-se que a anomalia é identificada em 12 pontos nas três componentes Z, N e E, e que os pontos MS07, MS09 e MS18 são identificados com anomalia espectral em pelo menos duas componentes, totalizando assim 15 estações sismográficas com a presença de anomalia espectral entre 2 e 8 Hz. Dessas 15 estações sismográficas, somente 7 pontos (MS06, MS07, MS10, MS11, MS12, MS13 e MS18) apresentaram pico central das anomalias espectrais entre 2,0 e 3,5 Hz, a chamada janela de hidrocarbonetos (valores em verde).

Os pontos 2a, 2b, 13a e 13b foram apresentados como os pontos 2 e 13, respectivamente, pois os mesmos apresentaram resultados semelhantes.

**Tabela 4.5** – Resumo simplificado da identificação espectral para as três componentes de cada estação sismográfica, contendo as informações da existência da anomalia espectral e seu pico central. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**. Os valores em verde são as anomalias espectrais entre 2,0 e 3,5 Hz, pertencentes à chamada janela de hidrocarbonetos.

Estação sismográfica	Presença da anomalia no espectrograma MEM						Maior amplitude na direção
	Comp. Z	Pico central da anomalia (Hz)	Comp. N	Pico central da anomalia (Hz)	Comp. E	Pico central da anomalia (Hz)	
Grupo 1 ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO BAIXO							
MS03	Não	-	Não	-	Não	-	-
MS09	Sim	4.7	Não	-	Sim	4.7	E
MS10	Sim	3.0 e 4.7	Sim	3.0, 3.5, 4.7 e 6.0	Sim	3.0, 4.7 e 7.0	Z
MS11	Sim	3.0, 4.5 e 8.0	Sim	3.0, 4.5 e 8.0	Sim	3.0, 4.5 e 8.0	N
MS12	Sim	2.7, 4.5 e 8.0	Sim	2.7, 4.5 e 8.0	Sim	2.7, 4.5 e 8.0	E
MS13	Sim	3.2 e 4.5	Sim	3.2 e 4.5	Sim	3.2 e 4.5	E
MS15	Sim	4.5	Sim	4.5	Sim	4.5	Z
MS16	Não	-	Não	-	Não	-	-
MS18	Sim	2.5 e 5.0	Sim	5.0	Não	-	N
Grupo 2 ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO MÉDIO							
MS01	Sim	6	Sim	4.0 e 6.7	Sim	8.0	Z
MS02	Sim	5.5 e 6.7	Sim	5.5 e 6.7	Sim	6.7	N
MS04	Não	-	Não	-	Não	-	-
MS14	Sim	6.0 e 8.0	Sim	6.0 e 8.0	Sim	6.0 e 8.0	N
Grupo 3 ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO ALTO							
MS05	Sim	5.7	Sim	5.2 e 6.2	Sim	6.2	E
MS06	Sim	2.7 e 4.2	Sim	2.7 e 4.2	Sim	2.7 e 4.2	N
MS07	Não	-	Sim	2.5, 4.5 e 6.5	Sim	2.0, 4.5 e 7.0	N
MS08	Sim	5.0	Sim	5.0	Sim	5.0	E
MS17	Sim	5.0 e 7.0	Sim	5.0 e 7.0	Sim	5.0	E

Os pontos MS07, MS09 e MS18 não apresentaram anomalias espectrais nas componentes Z, N e E, respectivamente, porém isso foi interpretado como indicativo da direção da origem da anomalia espectral. Nos outros 12 pontos sempre as três componentes identificavam juntas as anomalias, variando somente nas amplitudes entre elas, e esta informação foi usada como indicativo da direção da origem da anomalia espectral (**Tabela 4.5 e Figura 4.9**), uma vez que **Saenger et al. (2009)** demonstraram que as vibrações associadas a presença de reservatório de hidrocarbonetos são produzidas logo abaixo das estações com registro de anomalias (**Figura 1.3d**). As vibrações registradas nas estações sismográficas localizadas fora dos limites do

reservatório são compostas por vibrações com baixo mergulhos, ou seja, propagam-se quase que horizontalmente (**Figura 1.3b**). Neste trabalho foi feita, para todas as estações que apresentaram anomalia espectral, somente uma análise qualitativa das magnitudes das amplitudes dos espectrogramas: Norte-Sul; Leste-Oeste; e Vertical (**Figura 4.9**).

Com essas informações foram obtidas somente as direções possíveis dos reservatórios (traços vermelhos sobre cada estação sismográfica (**Figura 4.9**)), e não sendo possível determinar o sentido das vibrações. A partir disso, as direções possíveis foram interpretadas conjuntamente com as áreas de reservatórios de hidrocarbonetos. As áreas circuladas em azul são as regiões em que as direções das vibrações com anomalia espectral condizem com o sentido de um reservatório previamente conhecido e próximo.

Para as estações sismográficas que não permitiram a correlação com algum dos reservatórios conhecidos, como forma de eliminar ambiguidades das direções, inferiu-se então que os pontos de cruzamentos dos possíveis sentidos das vibrações em cada estação sismográfica, representam a localização de um reservatório ainda não conhecido (regiões circuladas em verde (**Figura 4.9**)). Como só estão disponíveis as direções de propagação das vibrações e não o sentido, mesmo após a busca aos pontos de intersecção com outras estações como forma de “filtrar” ambiguidades, ainda persistem ambiguidades. Por exemplo, para a estação MS12, existem quatro sentidos possíveis de onde as vibrações podem ter sido geradas, e quando se procura por intersecções com outras estações a mesma ainda indica três possíveis sentidos (traços amarelos). Porém mesmo apresentando tais ambiguidades, pode-se sugerir seis áreas para futuros levantamentos sísmicos (regiões circuladas em verde).



**Figura 4.9** – Mapa ampliado da área de estudo com a localização e numeração de cada estação sismográfica. Os traços em vermelho são análises qualitativas das magnitudes das amplitudes dos espectrogramas: Norte-Sul; Leste-Oeste; e Vertical, indicando então as direções possíveis das vibrações associadas a presença de reservatórios de hidrocarbonetos. Os traços em amarelo são os sentidos das vibrações estudadas que apresentaram correlação/intersecção com outra estação sismográfica. Círculos em verde representam as regiões sugeridas como as localizações dos reservatórios de hidrocarbonetos que geraram as anomalias espectrais observadas nas estações MS07, MS10, MS11, MS12, MS13 e MS15. As regiões circuladas em azul são as regiões em que as direções das vibrações com anomalia espectral condizem com o sentido de um reservatório previamente conhecido e próximo.

## 4.4 Comportamento das anomalias espectrais

Esta parte do trabalho traz os resultados do espectrograma, expoente de Hurst e expoente de Lyapunov, para avaliação das flutuações nas amplitudes da anomalia espectral, e também se a série temporal estudada pertence a um sistema probabilístico ou caótico, respectivamente.

### 4.4.1 Espectrograma

Além do espectrograma demonstrar ser o método mais eficiente na identificação de anomalias espectrais, também foi usado para verificar possíveis variações nas amplitudes das anomalias espectrais na banda de 3Hz.

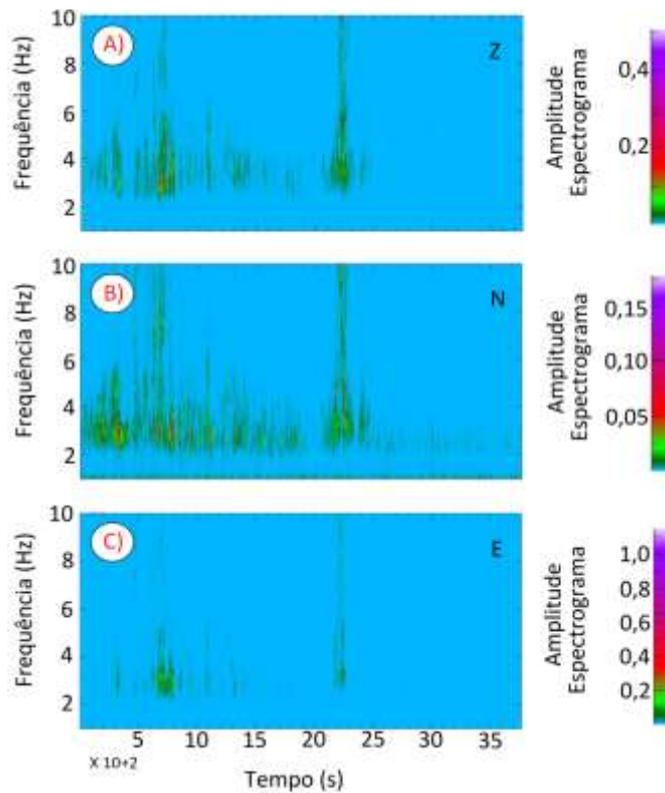
Nesta seção confirmou-se que todos os sismogramas que foram identificados com anomalia espectral apresentaram variações nas amplitudes entre 2 e 8 Hz, e que em todas as estações os métodos MEM apresentaram maior evidência nas flutuações das anomalias espectrais como por exemplo na **Figura 4.8**.

Nas **Figuras 4.7 e 4.8** tem-se os dois exemplos com as maiores variações nas amplitudes, e conseqüentemente também a confirmação de **Saenger et al., (2009)**, de que há um comportamento dinâmico da anomalia espectral, ou seja, existem variações nas amplitudes da anomalia espectral ao longo do tempo. Observou-se que em alguns momentos a anomalia até desaparece, como por exemplo na estação MS13a, a partir de 2500s na **Figura 4.8**.

O comportamento dinâmico observado na componente Z também é notado nas componentes horizontais (**Figura 4.10**), sendo muitas vezes com maior amplitude e maior variação na amplitude do que a componente Z (**tabela 4.5**).

Até o momento não existe explicação para estas variações nas amplitudes das anomalias espectrais; no entanto, os trabalhos mais recentes sugerem que esse fenômeno é maior no período da manhã, gerado por ruídos culturais de origem antrópica.

O ruído cultural é uma das fontes mais comuns de ruído sísmico, sendo vibrações sísmicas geradas pelas ações dos seres humanos sobre a superfície da Terra, incluindo vibrações geradas pela movimentação de veículos, atividades de mineração, indústrias, entre outras. Por isso, essas vibrações têm fortes variações de amplitude entre o dia e a noite. Este tipo de vibração se propaga principalmente através de ondas de superfície de altas frequências (1 a 60 Hz) que sofrem atenuação rápida, sofrendo decaimento rápido de amplitude com a distância (e.g., alguns quilômetros) e profundidade.



**Figura 4.10** – Espectrograma MEM no ponto MS13a das componentes (A) Gráfico da componente Z, (B) Gráfico da componente N e (C) Gráfico da componente E. A barra de cores ao lado de cada gráfico corresponde a escala de valores de amplitudes observados no espectrograma.

Deve-se notar que todos os pontos que não apresentaram anomalia ou até mesmo os pontos que apresentaram anomalia, porém fora da janela de hidrocarbonetos, não necessariamente não possuem anomalias na banda de 2 a 3,5 Hz, pois como já dito no capítulo 3, os dados deste trabalho são de certa forma incompletos/curtos, ou seja, como a presença da anomalia varia com o tempo, então existe a possibilidade de alguns dos sismogramas usados terem sido coletados exatamente no momento em que a anomalia espectral estava ausente.

#### 4.4.2 Expoente de Hurst

Neste item será apresentada a interpretação do sistema físico que rege a série temporal estudada segundo o expoente de Hurst, o qual é usado para definir se um sistema físico é probabilístico ou não.

Nesta seção, os dados utilizados serão sempre os sismogramas cortados iguais aos apresentados na **seção 4.1 - Tabela 4.3**, porém os resultados serão apresentados por estação sismográfica, representando a média geométrica dos valores obtidos das partes do sismograma. O erro do método associado a cada estação foi obtido pelo desvio padrão dos resultados ao identificar séries temporais brownianas sintéticas com duração do tempo igual à dos sismogramas estudados.

A **Tabela 4.6 e 4.7** apresenta os valores do expoente de Hurst obtidos para cada estação sismográfica e uma possível interpretação para um sistema que represente a série temporal. As anomalias espectrais foram encontradas em 15 de 18 estações sismográficas com o método espectrograma MEM. Desses 15 locais, nenhum apresentou exatamente o resultado 0,5 para o expoente de Hurst (valor necessário para que uma série temporal seja considerada como um sistema probabilístico), porém com a análise da incerteza do método, alguns pontos apresentam a possibilidade de ser um sistema probabilístico. Sendo assim, 7 deles, se comportam como um sistema determinístico (MS01, MS08, MS10, MS12, MS15, MS17 E MS18). O ponto MS09 apresentou uma ambiguidade, em que as três componentes indicaram que o sistema pode ser de sistema determinístico à sistema probabilístico. As 7 estações sismográficas restantes (MS02, MS05, MS06, MS07, MS11, MS13, MS14), apresentam no mínimo uma componente indicando a possibilidade de ser um sistema probabilístico.

Ao analisar somente os 7 pontos que fazem parte da janela de hidrocarbonetos, MS06, MS07, MS10, MS11, MS12, MS13 e MS18, as interpretações do expoente de Hurst mantém praticamente a mesma proporção da discussão acima, pois os pontos MS10, MS12 e MS18 são sistemas determinísticos e os restantes apresentaram a possibilidade de ser um sistema probabilístico, com pelo menos uma das componentes indicando tal possibilidade.

**Tabela 4.6** – Valores obtidos no método expoente de Hurst e seu erro, para os dados da componente Z do sismograma de cada estação sismográfica, e sua possível interpretação ( S.P. - Sistema Probabilístico/ Movimento Browniano e S.D. - Sistema Determinístico). A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.

Estação sismográfica	Componente Z			
	Exp. de Hurst	Erro	Anomalia	Interpretação
Grupo 1	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO BAIXO			
MS03	0,666	0,06	Não	S.D.
MS09	0,527	0,03	Sim	S.D. a S.P.
MS10	0,587	0,05	Sim	S.D.
MS11	0,524	0,03	Sim	S.D. a S.P.
MS12	0,653	0,06	Sim	S.D.
MS13	0,583	0,05	Sim	S.D.
MS15	0,551	0,04	Sim	S.D.
MS16	0,624	0,05	Não	S.D.
MS18	0,605	0,04	Sim	S.D.
Grupo 2	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO MÉDIO			
MS01	0,455	0,03	Sim	S.D.
MS02	0,563	0,06	Sim	S.D.
MS04	0,51	0,04	Não	S.D. a S.P.
MS14	0,564	0,04	Sim	S.D.
Grupo 3	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO ALTO			
MS05	0,36	0,06	Sim	S.D.
MS06	0,448	0,04	Sim	S.D.
MS07	0,45	0,04	Não	S.D.
MS08	0,421	0,05	Sim	S.D.
MS17	0,243	0,04	Sim	S.D.

Da análise das **tabelas 4.6 e 4.7** pode-se observar que existe ~74% de chance de que todos os sismogramas com anomalias espectrais identificadas, pertençam a um sistema determinístico, e ~26% de chance de que os dados possam pertencer de sistema determinístico a sistema probabilístico. Mas, analisando somente as séries temporais que apresentaram anomalias espectrais na janela de hidrocarbonetos, este valor cai para ~65% de que os sismogramas pertençam a um sistema determinístico, e ~35% de que os dados possam pertencer de sistema determinístico à sistema probabilístico, ou seja, há uma probabilidade muito pequena de que a anomalia espectral observada na sísmica passiva seja modelada por um sistema probabilístico.

A anomalia espectral observada provavelmente deve ter seu comportamento determinado com um conjunto fixo de parâmetros (volume do reservatório, porosidade,

viscosidade do fluido, etc. ). Então deve existir um modelo de como a anomalia espectral é gerada. Em um sistema determinístico, quando forem fixadas quais são os parâmetros de entrada, e saída do modelo será bem previsível/fixa, e em um sistema probabilístico o modelo apresentará possíveis saídas. Neste caso a saída será composta pelos parâmetros que caracterizam o reservatório de hidrocarbonetos .

**Tabela 4.7** – Valores obtidos no método expoente de Hurst e seu erro, para os dados das componentes N e E do sismograma de cada estação sismográfica, e sua possível interpretação (S.P. - Sistema Probabilístico/ Movimento Browniano e S.D. - Sistema Determinístico). A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.

Estação sismográfica	Componente N				Componente E			
	Exp. de Hurst	Erro	Anomalia	Interpretação	Exp. de Hurst	Erro	Anomalia	Interpretação
Grupo 1	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO BAIXO							
MS03	0,617	0,06	Não	S.D.	0,609	0,06	Não	S.D.
MS09	0,527	0,03	Não	S.D. à S.P.	0,514	0,03	Sim	S.D. a S.P.
MS10	0,586	0,05	Sim	S.D.	0,591	0,05	Sim	S.D.
MS11	0,49	0,03	Sim	S.D. à S.P.	0,538	0,03	Sim	S.D.
MS12	0,712	0,06	Sim	S.D.	0,693	0,06	Sim	S.D.
MS13	0,531	0,05	Sim	S.D. à S.P.	0,561	0,05	Sim	S.D.
MS15	0,577	0,04	Sim	S.D.	0,551	0,04	Sim	S.D.
MS16	0,634	0,05	Não	S.D.	0,649	0,05	Não	S.D.
MS18	0,637	0,04	Sim	S.D.	0,642	0,04	Não	S.D.
Grupo 2	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO MÉDIO							
MS01	0,403	0,03	Sim	S.D.	0,43	0,03	Sim	S.D.
MS02	0,497	0,06	Sim	S.D. à S.P.	0,56	0,06	Sim	S.D. a S.P.
MS04	0,484	0,04	Não	S.D. à S.P.	0,537	0,04	Não	S.D. a S.P.
MS14	0,447	0,04	Sim	S.D.	0,524	0,04	Sim	S.D. a S.P.
Grupo 3	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO ALTO							
MS05	0,47	0,06	Sim	S.D. à S.P.	0,39	0,06	Sim	S.D.
MS06	0,43	0,04	Sim	S.D.	0,467	0,04	Sim	S.D. a S.P.
MS07	0,44	0,04	Sim	S.D.	0,46	0,04	Sim	S.D. a S.P.
MS08	0,397	0,05	Sim	S.D.	0,34	0,05	Sim	S.D.
MS17	0,298	0,04	Sim	S.D.	0,209	0,04	Sim	S.D.

#### 4.4.3 Expoente de Lyapunov

Nesta seção, será verificado se as séries temporais são sistemas caóticos ou não, e para isso, será aplicado o método expoente de Lyapunov aos dados, utilizando duas metodologias diferentes, que serão comparadas e interpretadas conjuntamente.

Primeiramente, os expoentes de Lyapunov calculados com redes neurais serão apresentados, e posteriormente, serão exibidos os expoentes de Lyapunov avaliado por expansão de Volterra.

Os dados utilizados nesta seção serão sempre os sismogramas cortados iguais aos apresentados na **seção 4.1 - Tabela 4.3**, porém, os resultados serão apresentados por estação sismográfica, que é a média geométrica dos valores obtidos das partes do sismograma.

Os erros dos métodos associado a cada estação foram adquiridos da seguinte maneira:

**Expoente de Lyapunov por redes neurais** - o erro foi o desvio padrão dos resultados ao identificar duas séries temporais brownianas sintéticas, a primeira com duração do tempo igual ao menor dos sismogramas, e a segunda igual ao maior sismograma estudado. Após esta etapa foi feita a suposição de um decaimento linear, admitindo que quanto maior o sismograma menor o erro. Ao determinar a equação da reta infere-se os valores de erro para cada parte do sismograma de acordo com a duração do mesmo;

**Expoente de Lyapunov por expansão de Volterra** - No caso desta metodologia o desvio padrão dos resultados ao identificar séries temporais brownianas sintéticas, e com duração do tempo igual aos dos sismogramas estudados, foi muito pequeno, na ordem de  $10^{-5}$ , então o erro deste método foi o desvio padrão dos resultados obtidos entre as partes do sismograma, da ordem de  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$ .

No estudo prévio da implementação dos algoritmos citados acima, percebemos que a metodologia por redes neurais apresenta uma variação de resultados muito alta quando comparada ao método por expansão de Volterra.

Os resultados por redes neurais variaram na ordem de 10 quando calculado mais de uma vez para uma mesma série browniana, e quando se passava para outra série temporal de mesma duração, muitas vezes havia problema no cálculo (não gerava

resultados), ou seja, esta metodologia apresentava muita sensibilidade quando variávamos a série temporal, enquanto por expansão de Volterra essa variação era de  $10^{-9}$  quando aplicado mais de uma vez para uma mesma série browniana e um desvio padrão de  $10^{-5}$  quando se alterava as séries temporais.

Como os métodos apresentaram grandes diferenças na questão da precisão, então, primeiramente, foram comparados os resultados obtidos na componente Z para as duas metodologias, a fim de verificar se ao menos os resultados e as interpretações são próximas.

Na **tabela 4.8** são apresentados os resultados da componente Z e verifica-se também que os expoentes de Lyapunov estimados pelos dois métodos são muito próximos, porém a metodologia de redes neurais, por apresentar uma margem de erro muito grande e pelos expoentes de Lyapunov serem próximos de zero, não consegue diferenciar o sistema físico que regue nossas séries temporais, pois em todos os casos, analisando junto ao erro do método, as séries temporais apresentam a probabilidade de pertencer a um Sistema Probabilístico Caótico (S.P.C.), ou a um Sistema Determinístico Estável (S.D.E.), ou a um Sistema Determinístico Periódico (S.D.P.). Por outro lado, na metodologia que utilizou expansão de Volterra, apresentou um erro menor, somente os pontos MS13 e MS16 exibem a possibilidade de pertencer aos três sistemas citados acima.

Após a análise da **tabela 4.8** observa-se que só será viável o uso dos resultados dos expoentes de Lyapunov através do método de Volterra, pois o mesmo apresentou um erro muito menor e conseqüentemente definiu melhor a interpretação do sistema físico de nossos sismogramas, uma vez que todos os expoentes de Lyapunov calculados para os dois métodos foram negativos e muito próximos de zero. Então, daqui em diante serão apresentados somente os resultados e interpretações do Expoente de Lyapunov através do método de expansão de Volterra. Sendo assim, na **tabela 4.9** são apresentados os resultados do expoente de Lyapunov para as componentes N e E de todas as estações sismográficas e sua possível interpretação.

Na **tabela 4.9** pode-se inferir que na componente E, a interpretação para o sistema físico que rege os dados é idêntica à da componente Z (**tabela 4.8**), ou seja, só os pontos MS13 e MS16 exibem a possibilidade de pertencer aos sistemas S.P.C., S.D.E. ou S.D.P. Já na componente N, o único ponto que difere na possível interpretação é o ponto MS13, que só foi classificado como S.D.E.

Por fim, interpretou-se que os resultados do expoente de Lyapunov sugerem que todos os sismogramas provavelmente não pertencem a sistemas caóticos, porém é importante ressaltar que o ponto MS16 é o ponto com maior probabilidade de pertencer a um sistema caótico e o mesmo não apresentou anomalia espectral. Da mesma forma, pode-se interpretar que todos os sismogramas que apresentam anomalia espectral pertencem a um S.D.E, com exceção do ponto MS13, que apresenta uma pequena probabilidade de pertencer a um sistema caótico.

**Tabela 4.8** – Comparação dos resultados dos expoentes de Lyapunov para os dados da componente Z das séries temporais estudadas, e também sua possível interpretação (S.P.C. - Sistema Probabilístico Caótico, S.D.E. - Sistema Determinístico Estável e S.D.P. - Sistema Determinístico Periódico). A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.

Estação sismográfica	Componente Z						
	Anomalia	Exp. de Lyapunov por expansão de Volterra	Erro	Interpretação	Exp. de Lyapunov por redes neurais	Erro	Interpretação
<b>Grupo 1</b> ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO BAIXO							
MS03	Não	-2,102	0,134	S.D.E	-2,134	17,241	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS09	Sim	-0,224	0,191	S.D.E	-0,224	13,408	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS10	Sim	-0,051	0,01	S.D.E	-0,051	16,553	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS11	Sim	-0,07	0,041	S.D.E	-0,07	15,944	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS12	Sim	-0,105	0,062	S.D.E	-0,101	17,265	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS13	Sim	-0,007	0,014	S.D.E., S.D.P ou S.P.C	-0,007	15,619	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS15	Sim	-0,057	0,033	S.D.E	-0,057	15,49	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS16	Não	-0,041	0,042	S.D.E., S.D.P ou S.P.C	-0,041	16,504	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS18	Sim	-0,023	0,01	S.D.E	-0,023	15,877	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
<b>Grupo 2</b> ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO MÉDIO							
MS01	Sim	-0,877	0,007	S.D.E	-0,877	11,307	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS02	Sim	-0,682	0,001	S.D.E	-0,698	17,462	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS04	Não	-0,263	0,042	S.D.E	-0,263	15,398	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS14	Sim	-0,09	0,043	S.D.E	-0,088	16,227	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
<b>Grupo 3</b> ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO ALTO							
MS05	Sim	-1,84	0,001	S.D.E	-1,89	14,882	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS06	Sim	-0,613	0,006	S.D.E	-0,613	14,612	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS07	Não	-0,95	0,001	S.D.E	-0,95	9,132	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS08	Sim	-0,999	0,007	S.D.E	-0,999	14,513	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS17	Sim	-1,503	0,013	S.D.E	-1,484	15,914	S.D.E., S.D.P ou S.P.C

**Tabela 4.9** – Interpretação dos resultados dos expoentes de Lyapunov para os dados da componente N e E das séries temporais estudadas, e também sua possível interpretação (S.P.C. - Sistema Probabilístico Caótico, S.D.E. - Sistema Determinístico Estável e S.D.P. - Sistema Determinístico Periódico). A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.

Estação sismográfica	Componente N				Componente E			
	Exp. de Lyapunov por expansão de Volterra	Erro	Anomalia	Interpretação	Exp. de Lyapunov por expansão de Volterra	Erro	Anomalia	Interpretação
Grupo 1	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO BAIXO							
MS03	-4,241	1,124	Não	S.D.E	-1,781	0,049	Não	S.D.E
MS09	-0,354	0,29	Não	S.D.E	-0,209	0,177	Sim	S.D.E
MS10	-0,071	0,01	Sim	S.D.E	-0,057	0,006	Sim	S.D.E
MS11	-0,152	0,096	Sim	S.D.E	-0,142	0,095	Sim	S.D.E
MS12	-0,131	0,055	Sim	S.D.E	-0,113	0,047	Sim	S.D.E
MS13	-0,012	0,007	Sim	S.D.E	-0,003	0,007	Sim	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS15	-0,166	0,123	Sim	S.D.E	-0,137	0,106	Sim	S.D.E
MS16	-0,032	0,045	Não	S.D.E. a S.P.C	-0,011	0,02	Não	S.D.E., S.D.P ou S.P.C
MS18	-0,045	0,021	Sim	S.D.E	-0,03	0,012	Não	S.D.E
Grupo 2	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO MÉDIO							
MS01	-1,23	0,035	Sim	S.D.E	-0,965	0,007	Sim	S.D.E
MS02	-0,683	0	Sim	S.D.E	-0,359	0	Sim	S.D.E
MS04	-0,352	0,015	Não	S.D.E	-0,316	0,034	Não	S.D.E
MS14	-0,083	0,029	Sim	S.D.E	-0,065	0,038	Sim	S.D.E
Grupo 3	ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO ALTO							
MS05	-1,29	0	Sim	S.D.E	-1,36	0	Sim	S.D.E
MS06	-0,575	0,006	Sim	S.D.E	-0,615	0,006	Sim	S.D.E
MS07	-1,01	0	Sim	S.D.E	-0,94	0	Sim	S.D.E
MS08	-0,761	0,007	Sim	S.D.E	-0,76	0	Sim	S.D.E
MS17	-1,684	0,047	Sim	S.D.E	-1,118	0	Sim	S.D.E

#### 4.5 Comportamento não linear das anomalias espectrais

Nesta seção serão apresentados os resultados dos métodos biespectro e bicoerência. Com o método do biespectro, será avaliado se os sismogramas deste trabalho representam processos gaussianos, e com o método da bicoerência, se os mesmos representam a processos lineares.

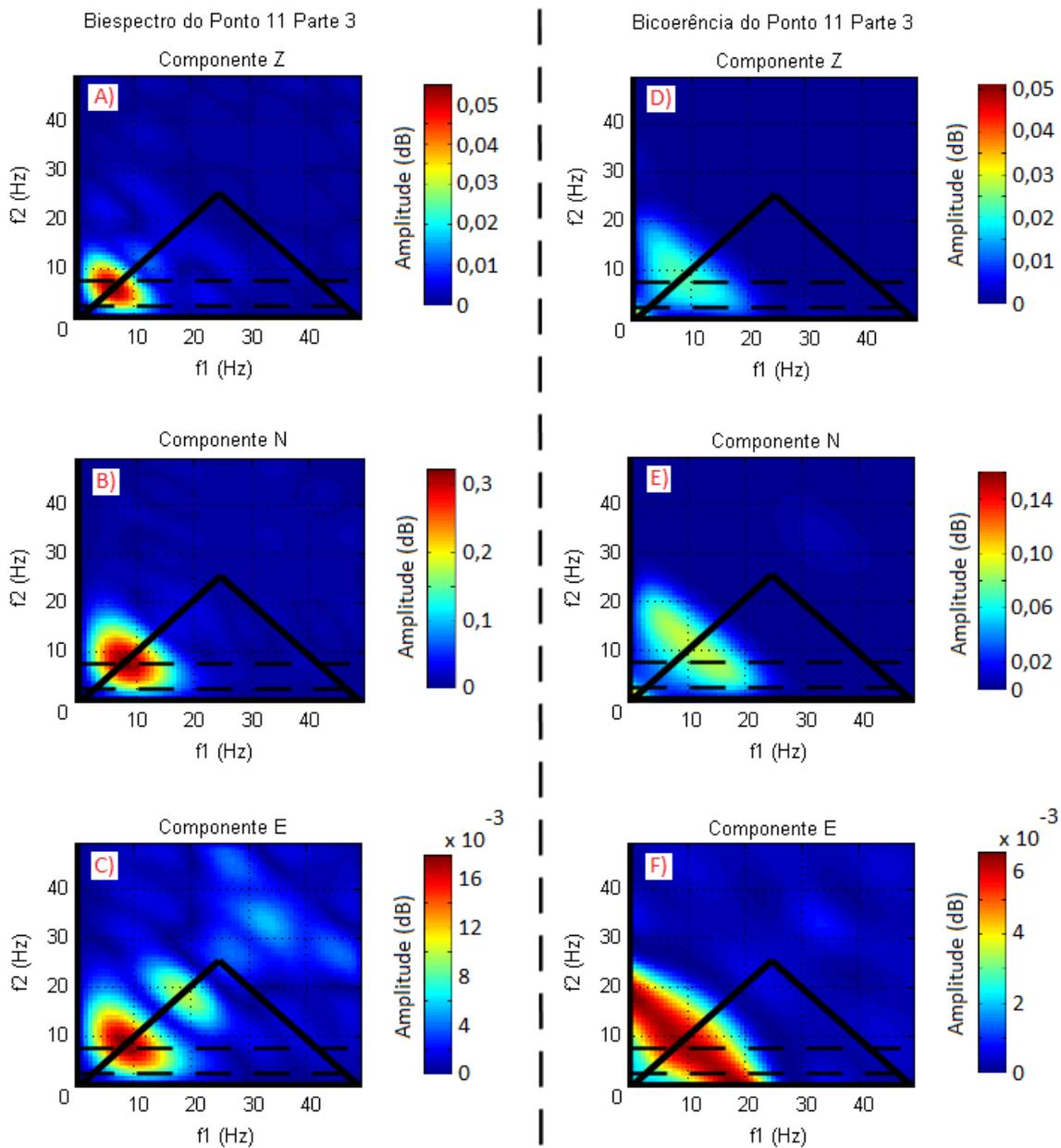
Os dados avaliados nesta seção serão os sismogramas "cortados" iguais aos apresentados na **seção 4.1 - Tabela 4.3**.

O julgamento dos resultados do biespectro e da bicoerência será restringido à região do domínio principal dos métodos (Collis et al., 1998) (Figura 2.1), e esta análise também consistirá na observação da gaussianidade ou linearidade somente entre as frequências das anomalias espectrais estudadas neste trabalho ( $f_2$  entre 2 e 8 Hz), e outras frequências ( $f_1$ ) entre 0 e 50 Hz (50 Hz é a frequência de Nyquist para os sismogramas utilizados neste trabalho).

Primeiramente foi investigada a gaussianidade das séries temporais estudadas. Nesta avaliação observou-se que todos os sismogramas apresentaram valores diferentes de zero no gráfico do biespectro, ou seja, a anomalia espectral observada na sísmica passiva pertence a um processo não gaussiano, confirmando a hipótese da **seção 4.1**.

Após a constatação de que os sismogramas pertencem a um processo não gaussiano, foi calculada a bicoerência para os dados, e verificou-se que eles representam processos não lineares, apresentando um tipo específico de não linearidade, que é o acoplamento de fase quadrática (AFQ).

Como exemplo dessa identificação pode-se observar os gráficos dos métodos biespectro e bicoerência de todas as componentes da parte 3 do ponto MS11 (Figura 4.11). Nesta figura claramente verifica-se que o biespectro é diferente de zero, e também que existe um pico no gráfico da bicoerência, em todas componentes, entre as frequências  $f_2 = 5\text{Hz} \pm 2,5\text{Hz}$  e  $f_1 = 15\text{Hz} \pm 2,5\text{Hz}$ . Nem todas as partes do sismograma apresentam claramente o AFQ, em algumas partes não é possível detectar esse AFQ. O fato de algumas partes não poder identificar o AFQ deve vir do dinamismo da anomalia espectral, que já foi comprovado na **seção 4.4.1**.



**Figura 4.11** – Gráficos A, B, e C são os resultados do método biespectro da parte 3 do sismograma do ponto MS11, para as componentes Z, N e E, respectivamente. Gráficos D, E, e F são os resultados do método da bicoerência da parte 3 do sismograma do ponto MS11, para as componentes Z, N e E, respectivamente. A região dentro do triângulo representa o domínio principal dos métodos (Collis et al., 1998). As linhas tracejadas definem a região entre as frequências 2 e 8 Hz.

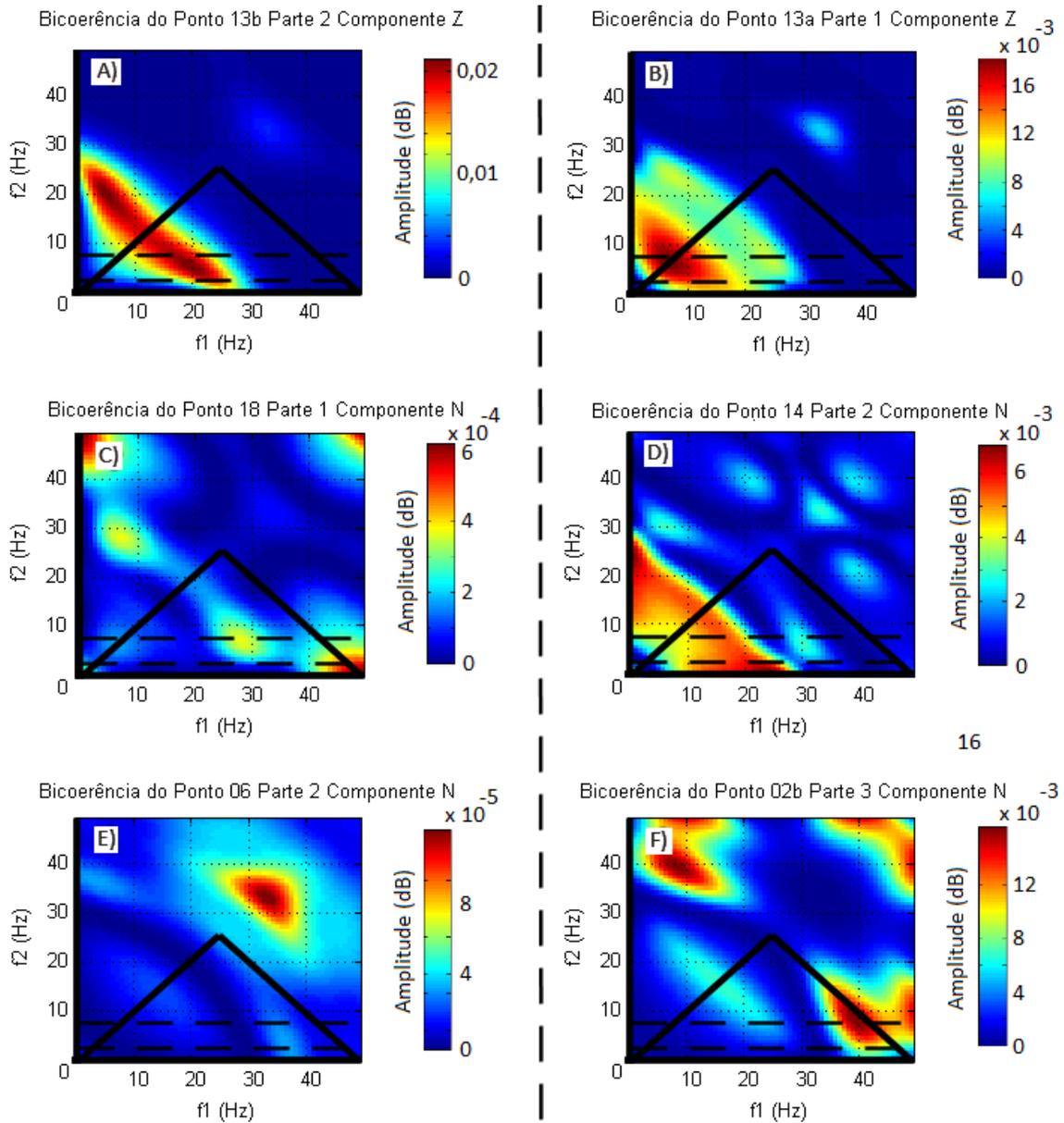
Todos os gráficos da bicoerência para todos os sismogramas exibiram valores não constantes, e portanto, nossas séries temporais são regidas por processos não lineares. No caso deste estudo, a bicoerência indicou alguns AFQs (**Tabela 4.10**), e esses valores identificados foram entre as frequências  $f_1$ , iguais a:

- 15Hz (Exemplo Figura 4.11 Gráfico (F));
- 20Hz (Exemplo Figura 4.12 Gráfico (A));
- 25Hz (Exemplo Figura 4.12 Gráfico (B));
- 27,5Hz (Exemplo Figura 4.12 Gráfico (C));
- 30Hz (Exemplo Figura 4.12 Gráfico (D));
- 35Hz (Exemplo Figura 4.12 Gráfico (E)); e
- 40Hz (Exemplo Figura 4.12 Gráfico (F)).

Estas frequências apresentam uma precisão de  $\pm 2,5\text{Hz}$  e estão sempre acopladas a  $f_2 = 5\text{Hz} \pm 2,5\text{Hz}$ .

Na **Tabela 4.10** verifica-se que as anomalias espectrais observadas na sísmica passiva (frequências entre 2 e 8 Hz ( $f_2$ )) apresentam AFQ com as frequências entre 15 e 40 Hz ( $f_1$ ), e entre 10 e 45 Hz ( $f_3$ ), ou seja, as frequências observadas pela sísmica passiva podem ser geradas por interações de frequências entre 10 e 45 Hz e os reservatórios de hidrocarbonetos.

Cabe ressaltar que os AFQs identificados parecem sofrer influências da quantidade de ruído do sismograma, pois em estações sismográficas do grupo 1 os AFQs ficaram entre frequências ( $f_1$ ) entre 15 e 35 Hz, em dados do grupo 2 foram frequências ( $f_1$ ) entre 15 e 40 Hz, e em sismogramas do grupo 3 tiveram frequências ( $f_1$ ) entre 30 e 40 Hz, ou seja, quanto maior o ruído do sismograma, maior parece ser a frequência ( $f_1$ ) acoplada às frequências ( $f_2$ ) observadas na sísmica passiva.



**Figura 4.12** – Exemplos dos AFQs identificados no método da bicoerência. (A) Gráfico da bicoerência do ponto 13b parte 2 componente Z. (B) Gráfico da bicoerência do ponto 13a parte 1 componente Z. (C) Gráfico da bicoerência do ponto 18 parte 1 componente N. (D) Gráfico da bicoerência do ponto 14 parte 2 componente N. (E) Gráfico da bicoerência do ponto 06 parte 2 componente N. (F) Gráfico da bicoerência do ponto 02b parte 3 componente N. A região dentro triângulo representa o domínio principal do método (Collis et al., 1998). As linhas tracejadas definem a região entre as frequências 2 e 8 Hz.

**Tabela 4.10** – Resultados dos AFQs identificados no gráfico da bicoerência e suas respectivas frequências. A coluna contendo a informação da presença de anomalia (resultados do espectrograma MEM) apresenta alguns valores em verde, que são as anomalias espectrais da janela de hidrocarbonetos. As estações sismográficas estão divididas em três grupos de acordo com a **seção 4.1**.

Estação sismográfica	Apresenta anomalia espectral (ESPECTROGRAMA)	Bicoerência		AFQ (Hz)	
		f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 = f1 - f2	f3 = f1 + f2
Grupo 1		ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO BAIXO			
MS03	-	-	-	-	-
MS09	Sim	15	5	10	20
MS10	Sim	35	5	30	40
MS11	Sim	15	5	10	20
MS12	Sim	20	5	15	25
MS13	Sim	20 e 25	5	15 e 20	25 e 30
MS15	Sim	20	5	15	25
MS16	-	-	-	-	-
MS18	Sim	27,5	5	22,5	32,5
Grupo 2		ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO MÉDIO			
MS01	Sim	15	5	10	20
MS02	Sim	40	5	35	45
MS04	-	-	-	-	-
MS14	Sim	20 e 30	5	15 e 25	20 e 35
Grupo 3		ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS COM RUÍDO ALTO			
MS05	Sim	40	5	35	45
MS06	Sim	40 e 35	5	35 e 30	45 e 40
MS07	Sim	40	5	35	45
MS08	Sim	40	5	35	45
MS17	Sim	30	5	25	35

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em vista do exposto pode-se concluir que ao comparar todos os métodos de estimativa espectral, o melhor método analisado é o espectrograma calculado com MEM.

O espectrograma através do MEM foi então usado como o método padrão para identificação das anomalias espectrais, que determinou 15 estações sismográficas com a presença de anomalia espectral entre 2 e 8 Hz. Dessas 15 estações sismográficas, somente 7 pontos (MS06, MS07, MS10, MS11, MS12, MS13 e MS18) apresentaram pico central das anomalias espectrais entre 2,0 e 3,5 Hz, a chamada janela de hidrocarbonetos.

Além disso, verifica-se com o espectrograma a existência de um comportamento dinâmico da anomalia espectral, pois todas as estações que foram identificadas com anomalia espectral também apresentaram flutuações nas amplitudes, evidências que corroboram **Saenger et al. (2009)**. Outro fato importante a ser ressaltado é que todos os pontos que não apresentaram anomalia na janela de hidrocarbonetos, não necessariamente não possuem anomalias na banda de 2 a 3,5 Hz, pois como mencionado no capítulo 3, os dados são de certa forma incompletos/curtos, ou seja, como a presença da anomalia varia com o tempo, então existe a possibilidade de alguns dos sismogramas terem sido coletados no momento em que a anomalia espectral estava ausente.

Em relação ao sistema físico que rege as séries temporais (com anomalias espectrais identificadas entre 2 e 8 Hz), conclui-se que os dois métodos aplicados, expoente de Hurst e expoente de Lyapunov, sugerem que as características do sistema investigado seja de origem determinística, visto que:

- o expoente de Hurst indicou que aproximadamente 74% dos sismogramas com anomalias espectrais identificadas pertencem a um sistema determinístico, e que o percentual restante (~26%) dos dados podem pertencer a um sistema dual variando do determinístico ao probabilístico. Para as séries temporais que apresentaram anomalias espectrais na janela de hidrocarbonetos este valor decresce para ~65% de probabilidade dos sismogramas pertencerem a um sistema determinístico, e o restante dos dados aumentam para ~35% sugerindo um sistema determinístico a probabilístico; e

- de acordo com o expoente de Lyapunov, todos os sismogramas investigados possivelmente não pertencem a sistemas caóticos, visto que, das estações sismográficas analisadas que apresentam anomalia espectral, 14 pertencem a um S.D.E e somente uma estação sismográfica, o ponto MS13, apresenta uma pequena probabilidade de pertencer a um sistema determinístico caótico.

Desta forma, conclui-se que a criação de um modelo teórico para a sísmica passiva terá que ser desenvolvido por ferramentas matemáticas convencionais.

Os métodos biespectro e bicoerência sugerem que os dados pertencem a processos não-gaussianos, e que apresentam um tipo específico de não-linearidade, denominada acoplamento de fase quadrática (AFQ). Além disso, esses dois métodos corroboram a possibilidade das anomalias espectrais pertencerem a um sistema determinístico, como foi observado nas análises dos expoentes de Hurst e de Lyapunov.

As anomalias espectrais observadas na sísmica passiva, para frequências entre 2 e 8 Hz ( $f_2$ ), apresentam AFQ com as frequências entre 15 e 40 Hz ( $f_1$ ), e entre 10 e 45 Hz ( $f_3$ ), ou seja, as frequências observadas pela sísmica passiva podem ser geradas por interações de frequências entre 10 e 45 Hz e os reservatórios de hidrocarbonetos.

## 6 REFERÊNCIAS

- Akrawi, K. & Bloch, G., (2006). *Application of passive seismic (IPDS) surveys in Arabian Peninsula*. EAGE Workshop on Passive Seismic: Exploration and Monitoring Applications, Dubai. Extended Abstract, A28.
- Ali, M.Y.; Berteussen, K.A.; Small, J. & Barkat, B., (2007). *A low frequency, passive seismic experiment over a carbonate reservoir in Abu Dhabi*. First Break 25 pp 71-73.
- Barabási, A.L. & Stanley, H.E., (1995). *Fractal concepts in surface growth*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1 edicao.
- Bendat, J.S. & Piersol, A.G., (1971). *Random data: Analysis and measurement procedures*. John Wiley and Sons, New York, 407p.
- Bertani, R.T.; Costa, I.G. & Matos, R.M.D., (1990). *Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar*. in Origem e Evolução de Bacias Sedimentares: Petrobras, 291–310.
- Brillinger, D.R., (1965). *An Introduction to Polyspectra*. The Annals of Mathematical Statistics Vol. 36, No. 5.
- Brillinger, D.R., (1969). *A search for a relationship between monthly sunspot numbers and certain climatic series*. Bull. Inst. int. Statist., 37 , p. 293.
- Childers, D.G., (1978). *Modern spectrum analysis*. IEEE Press, Piscataway, N. J.
- Collis, W.B.; White, P.R. & Hammond, J.K., (1998). *Higher order spectra: the bispectrum and trispectrum*. Mech. Syst. Signal Process. 12, 375–394. (doi:10.1006/mssp.1997.0145).
- Chutov, G.J.; Rode, E.D. & Moritz, J., (2000). *Method for Direct Hydrocarbon Reservoir Detection and Delineation by Low Frequency Acoustic Spectroscopy*. United States Patent, Patente No. US 6,473,695 B1, 10p.

Dangel, S.; Schaepman, M.E.; Stoll, E.P.; Carniel, R.; Barzandji, O.; Rode, E.D. & Singer, J.M., (2003). *Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 128, 135-158.

Davidson, B., (2005). *Matlab program for Hurst exponent*. (www.mathworks.com)

Favaretto, A.B., (2004). *Estimativa do expoente de Hurst de séries temporais de chuvas do Estado de São Paulo usando as transformadas de Fourier, wavelets e análise R/S*. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 89p.

Gilat, A., (2004). *MATLAB: An Introduction with Applications*. 2nd Edition. John Wiley & Sons.

Goldstein, P.; Dodge, D. & Firpo, M., (1999). *SAC2000: signal processing and analysis tools for seismologist and engineers*: UCRLJC-135963, Invited Contribution to the IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology.

Graf, R.; Schmalholz, S.M.; Podladchikov, Y. & Saenger, E.H., (2007). *Passive low frequency spectral analysis: Exploring a new field in geophysics*. World Oil, 228, 47-52.

Hanssen, P. & Bussat, S., (2008). *Pitfalls in the analysis of low frequency passive seismic data*. First Break, 26, 111-119.

Hinich, M.J., (1982). *Testing for Gaussianity and linearity of a stationary time series*. Journal of Time Series Analysis, 3(3), pp 169-176.

Hunt, L.R.; DeGroat, R.D. & Linebarger, D.A., (1995). *Nonlinear AR modeling*, Circuits, Systems and Signal Processing 14, 689-705.

Hurst, E., (1951). *Long term storage capacity of reservoir*. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 116, 770-799.

Jenkins, G.M. & Watts, D.G., (1968). *Spectral analysis and its applications*. Holden-Day, San Francisco, California.

Kantor, I.J. & Trivedi, N.B., (1980). *Espectro de potência do campo geomagnético pelo método da entropia máxima*. Revista brasileira de física, Vol. 10, 3.

Lai, D. & Chen, G., (1998). *Statistical Analysis of Lyapunov Exponents from Time Series: A Jacobian Approach*. Mathl. Comput. Modelling Vol. 27, No. 7, pp. 1-9.

Lambert, M. A., Nguyen, T.; Saenger, E.H. & Schmalholz, S. M., (2011). *Spectral analysis of ambient ground-motion-noise reduction techniques and a methodology for mapping horizontal inhomogeneity*. Journal of Applied Geophysics, v. 74, n. 2-3, p. 100-113.

Lambert, M. A.; Schmalholz, S. M.; Saenger, E. H. & Stainer, B., (2009). *Low-frequency microtremor anomalies at an oil and gas field in Voitsdorf, Austria*. Geophysical Prospecting, v. 57, n. 3, p. 393-411.

Leite, L.W.B., (1998). *Introdução à análise espectral em geofísica*. Belém, Pará, MCT/CNPq/PADCT-II/GMT, p. 424 il.

Lo, A.W., (1991). *Long-term memory in stock market prices*. Econometrica, 59(5), 1279-1313.

Lopes, A.E.V. & Nunes, L.C., (2010). *Pitfalls of tremor-like signals for hydrocarbon exploration in production oil fields in Potiguar Basin*. Northeast Brazil, The Leading Edge, doi: 10.1190/1.3462786, 29(7), 826-830.

Lorenz, E., (1963). *Deterministic nonperiodic flow*. J. Atmospheric Sci. 20, 130-141.

Lyapunov, A.M., (1892). *A general task about the stability of motion (in Russian)*. PhD Thesis.

Mandelbrot, B.B., (1975). *Limit theorems on the self-normalized range for weakly and strongly dependent processes*. *Z. Wahr. Verw.Geb.*, 31, 271-285.

Martini, F., Lokmer, I.; Jonsdottir, K.; Barros, L. De; Möllhoff, M.; Bean, C. J.; Hauser, F.; Doherty, J.; Ryan, C. & Mongan, J., (2012). *A passive low-frequency seismic experiment in the Albertine Graben, Uganda*. *Geophysical Prospecting Early View*. *Geophysical Prospecting*, p. no, 01.

Mohammadi, S., (2009a). *LYAPEXPAN: MATLAB function to calculate Lyapunov exponents with Volterra expansion*. <http://EconPapers.repec.org/RePEc:boc:bocode:t741505>.

Mohammadi, S., (2009b). *ANNLYAP: MATLAB function to calculate Lyapunov exponents*. <http://EconPapers.repec.org/RePEc:boc:bocode:t741512>.

Pavan, C. K., (2011). *Caracterização espaço-temporal das vibrações sísmicas ambientais em Goiás*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Trabalho de conclusão de curso, 32p.

Portugal, M. S., (1995). *Notas introdutórias sobre o princípio de máxima verossimilhança: Estimação e teste de hipóteses*. DECON / UFRGS, Porto Alegre.

Ricker, D. W., (2003). *Echo signal processing*, The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science; SECS 725, ISBN 1-4020-7395-X (alk. paper).

Ruelle, D. & Takens, F., (1971). *Nature of turbulence*. *Commun. Math. Phys.* 23 (4), 343.

Saenger, E.H.; Schmalholz, S.M.; Lambert, M.; Nguyen, T.T.; Torres, A.; Metzger, S.; Habiger, R.M.; Müller, T.; Rentsch, S. & Méndez-Hernández, E., (2009). *A passive seismic survey over a gas field: Analysis of low-frequency anomalies*. *Geophysics*, 74(2), O29-O40.

Shintani, M. & Linton, O., (2004). *Nonparametric neural network estimation of Lyapunov exponents and a direct test for chaos*. Journal of Econometrics 120 (2004) 1 – 33.

Sprott, J. C., (2003). *Chaos and Time Series Analysis*. Oxford University Press.

Swami A., Mendel J.M. & Nikias C.L., (1995). *Higher-Order Spectral Analysis Toolbox*. The MathWorks Inc., Natick, MA.

Wolf, A.; Swift, J.B.; Swinney, H.L. & Vastano, J.A., (1985). *Determining Lyapunov exponents from a time series*. Physica D, 16:285–317.