



Samuel Gustavo Huamán Bustamante

Previsão de Medições Geofísicas: Pseudo-Poços

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco
Co-Orientador: Antonio Abel González Carrasquilla

Rio de Janeiro
Setembro de 2012



Samuel Gustavo Huamán Bustamante

Previsão de Medições Geofísicas: Pseudo-Poços

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Antonio Abel González Carrasquilla

Co-Orientador

UENF

Prof. Hélio Côrtes Vieira Lopes

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Eugênio da Silva

Centro Universitário Estadual da Zona Oeste

Prof. Juan Guillermo Lazo Lazo

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

André Bulcão

Petróleo Brasileiro

Prof. Adalberto da Silva

Departamento de Geologia – UFF

Luiz Fernando Araujo Oliveira

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguêz de Mello

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de setembro de 2012.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Samuel Gustavo Huamán Bustamante

Possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Nacional de Engenharia de Lima no Peru (1999) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro no Brasil (2008). Participou de projetos de pesquisa nas áreas de prospecção elétrica e sísmica na Universidade Nacional de Engenharia e na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ficha Catalográfica

| |
|---|
| <p>Huamán Bustamante, Samuel Gustavo</p> <p>Previsão de medições geofísicas: pseudo-poços / Samuel Gustavo Huamán Bustamante; orientadores: Marco Aurélio C. Pacheco, Antônio Abel G. Carrasquilla. – 2012.</p> <p>204 f. : il. (color.) ; 30 cm</p> <p>Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.</p> <p>Inclui bibliografia</p> <p>1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Pseudo-poços. 3. Correlação lateral de poços. 4. Algoritmos genéticos. 5. Ondeletas. 6. Filtragem. 7. Sísmica. 8. Interpolação de Shepard. 9. Reamostragem. I. Pacheco, Marco Aurélio C. II. Carrasquilla, Antônio Abel G. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.</p> |
|---|

CDD: 621.3

Aos meus pais, Hilda e Samuel, pelos ensinamentos.

Agradecimentos

Ao meu orientador professor Marco Aurélio C. Pacheco pela confiança e apoio para realizar este trabalho.

Ao meu co-orientador professor Antônio Abel G. Carrasquilla pelo apoio e pelas sugestões.

Ao CNPq e à PUC-Rio pelos auxílios financeiros concedidos.

À ANP pela informação concedida para produzir os resultados deste trabalho.

À equipe do ICA / PUC-Rio, pelo auxílio técnico.

Ao professor Ricardo Tanscheit, Juan Lazo Lazo, Eugênio Silva, Eric Praxedes, Fabio M. de Lima e Carolina A. Abreu pelas sugestões e tempo dedicados para melhorar este trabalho de pesquisa.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A Deus pela paz de espírito nestes últimos anos.

Resumo

Bustamante, Samuel Gustavo Huamán; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; Carrasquilla, Antonio Abel González. **Previsão de Medições Geofísicas: Pseudo-Poços**. Rio de Janeiro, 2012. 204p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No presente trabalho de tese é apresentado, analisado e avaliado um método inédito para prever perfis de poço (para um pseudo-poço), a partir de informações dos poços verticais vizinhos e dados de sísmica 3D. Este método é formado por quatro partes principais. Na primeira parte são processados os perfis de raio gama dos poços para produzir um conjunto de sinais estratificados. Estes resultados são utilizados na segunda parte para realizar a correlação lateral de poços, com um método baseado em Algoritmos Genéticos, cujos resultados são intervalos de estratos semelhantes que indicariam a existência de estruturas rochosas contínuas na subsuperfície. Na terceira parte são estimados os deslocamentos, em profundidade, entre alguns estratos do pseudo-poço e dos poços reais. Isto é realizado com um método, baseado em Algoritmos Genéticos, para correlacionar eventos entre traços sísmicos 3D nas posições próximas aos poços reais e ao pseudo-poço. Na quarta parte são utilizados os resultados das outras três partes para interpolar vários tipos de perfis do pseudo-poço, primeiramente, dos estratos semelhantes e, em seguida, dos estratos não semelhantes, ajustados em profundidade. Os resultados desta parte constituem as medições previstas. Os pesos para a interpolação, pelo método de Shepard, são calculados através de uma função que depende da distância entre o pseudo-poço e cada um dos poços utilizados. Um estudo de sete casos é apresentado para avaliar a eficácia do método de previsão. Esses casos utilizam arranjos de dois e três poços do Campo de Namorado na Bacia de Campos (RJ) e, adicionalmente, um poço próximo a cada arranjo serve de padrão para avaliar as medições previstas através do coeficiente de correlação e da média dos erros percentuais absolutos. Em termos globais os resultados das previsões apresentam correlação linear forte e os erros percentuais absolutos estão entre 5% e 30% em relação aos padrões.

Palavras-chave

Pseudo-poços; correlação lateral de poços; Algoritmos Genéticos; ondeletas, filtragem; sísmica; interpolação de Shepard; reamostragem.

Abstract

Bustamante, Samuel Gustavo Huamán; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti (Advisor); Carrasquilla, Antonio Abel González (Co-Advisor). **Forecasting Geophysical Measurements: Pseudo-wells**. Rio de Janeiro, 2012. 204p. Doctoral Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this thesis is presented, analyzed and evaluated a new method to forecast well logs (for a pseudo-well), based on information of the neighboring vertical wells and the 3D seismic data. This method consists of four main parts. In the first part, the gamma ray logs from wellbores are processed to produce a stratified set of signals. In the second part, the stratified signals are used to perform a method of lateral correlation of wells with Genetic Algorithms; whose results are similar intervals strata that would indicate the existence of continuous rock structures in the subsurface. In the third part, a method, based on Genetic Algorithms, are used to estimate displacements in depth between some strata of the pseudo-well and real wells. That method correlates events between 3D seismic traces at positions near the real wells and the pseudo-well. In the fourth part, results from the other three parts are used to interpolate several types of logs of the pseudo-well, first of the similar strata and then of the not similar strata, adjusted in depth. The results of this part are the forecasted measurements. The weights for interpolation, by the method of Shepard, are calculated using a function that depends on the distance between the pseudo-well and each real well. A study of seven cases is presented to evaluate the effectiveness of the forecasting method. These cases use arrangements of two and three wells of the Namorado Field in the Campos Basin (RJ) and additionally a real well near each array serves as a standard for evaluating the forecasted measurements by the correlation coefficient and the mean absolute percentage error. Overall the results showed a strong linear correlation and the mean absolute percentage errors are between 5% and 30% in relation of standard data.

Keywords

Pseudo-wells; lateral correlation of wells; Genetic Algorithms; wavelets; filtering; seismic; Shepard's interpolator; resampling.

Sumário

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Introdução | 27 |
| 1.1. | Motivação | 29 |
| 1.2. | Objetivos | 30 |
| 1.3. | Descrição da Tese | 31 |
| 1.4. | Contribuições da Tese | 32 |
| 2 | Sísmica | 33 |
| 2.1. | Propagação de Ondas | 33 |
| 2.2. | Levantamentos de Reflexão Sísmica | 35 |
| 2.2.1. | Métodos de Levantamento em Duas (2D) e Três Dimensões (3D) | 38 |
| 2.3. | Integração da Sísmica e dos Perfis de Poço | 42 |
| 2.4. | Processamento dos Dados Sísmicos | 44 |
| 2.4.1. | Atributos | 45 |
| 3 | Perfilagem de Poços | 46 |
| 3.1. | Perfil de Raio Gama (GR) | 48 |
| 3.2. | Perfil Sônico (DT) | 50 |
| 3.3. | Perfis de Indução (ILD) | 52 |
| 3.4. | Perfil de Densidade (RHOB) | 53 |
| 4 | Técnicas de Processamento de Sinais e Otimização | 55 |
| 4.1. | Amostragem | 55 |
| 4.2. | Convolução | 56 |
| 4.3. | Filtragem | 58 |
| 4.3.1. | Filtro Binomial | 59 |
| 4.3.2. | Filtro de <i>Kalman</i> | 60 |
| 4.3.3. | Ondeletas ou <i>Wavelets</i> | 62 |
| 4.4. | Filtragem Multitaxa | 64 |
| 4.5. | O <i>Spectrum</i> e o <i>Cepstrum</i> de Potência | 66 |
| 4.6. | Algoritmos Genéticos | 67 |
| 4.7. | Métricas | 71 |

| | |
|--|-----|
| 5 Metodologia Proposta para Previsão de Medições dos Perfis de Poço | 75 |
| 5.1. Interpolação de Sinais com o Método de Shepard | 76 |
| 5.1.1. Estimativa do Número de Amostras n | 80 |
| 5.2. Filtragem e Estratigrafia | 83 |
| 5.2.1. Análise das Medições de Raio Gama e sua Filtragem | 83 |
| 5.2.2. Sinal Estratificado | 85 |
| 5.3. Correlação Lateral de Poços com Algoritmos Genéticos | 88 |
| 5.3.1. Cromossomos, Funções de Avaliação e Parâmetros do Algoritmo Genético | 90 |
| 5.3.2. Testes Preliminares para a Correlação Lateral de Poços | 95 |
| 5.4. Correlação Lateral Sísmica 3D com Algoritmos Genéticos | 100 |
| 5.4.1. Correlação Lateral Entre Dois Traços Sísmicos Distantes | 101 |
| 5.4.2. Estimativa dos Deslocamentos dos Eventos Sísmicos em Profundidade, com Traços Sísmicos Sintéticos | 106 |
| 6 Estudo de Casos | 113 |
| 6.1. Descrição do Campo para os Testes | 113 |
| 6.2. Arranjo de Dois Poços | 117 |
| 6.2.1. Caso A1 | 118 |
| 6.2.2. Caso A2 | 125 |
| 6.2.3. Caso A3 | 131 |
| 6.2.4. Análise de Correlação para os Três Casos | 137 |
| 6.3. Arranjo de Três Poços | 140 |
| 6.3.1. Caso B1 | 140 |
| 6.3.2. Caso B2 | 147 |
| 6.3.3. Análise de Correlação para o Caso B2 | 152 |
| 6.3.4. Caso C | 154 |
| 6.4. Caso Especial | 161 |
| 6.4.1. Caso D | 161 |
| 7 Conclusões | 166 |
| 7.1. Recomendações | 167 |
| 7.2. Trabalhos Futuros | 168 |
| Referências Bibliográficas | 170 |

| | |
|---|-----|
| Apêndice I – Exemplos de Interpolação de Sinais | 179 |
| Apêndice II – Comparação dos Filtros Binomial, de <i>Kalman</i> e com Ondeletas | 182 |
| Apêndice III – Teste de Correlação Lateral de poço com Algoritmos Genéticos e representação Binária | 188 |
| Apêndice IV – Teste de Frequência dos Traços Sísmicos | 194 |
| Anexo A – Expressões Matemáticas e Informações das Ondeletas | 197 |
| A.1. Propriedades da Convolução | 197 |
| A.2. Tipos de Ondeletas | 197 |
| A.3. Funções de Avaliação | 198 |
| Anexo B – Informações dos Poços e dos Traços Sísmicos | 200 |
| B.1. Perfis Elétricos | 200 |
| B.2. Dados dos Poços e dos Traços Sísmicos | 201 |
| B.3. Correlações Laterais de Perfis de Poços Utilizadas como Referências | 203 |

Lista de Figuras

- Figura 2.1 – Representação da propagação de uma onda incidente P. Depois de chegar à interface, outras ondas de tipo P e S são refletidas e transmitidas de acordo com os ângulos $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$. 34
- Figura 2.2- Uma frente de ondas é gerada na subsuperfície por uma fonte e é refletida nas interfaces entre camadas. A distância de cobertura dos geofones (G) na interface entre camadas é a metade da distância coberta pelos geofones. 37
- Figura 2.3 - Levantamento sísmico marítimo com deslocamento constante para amostrar os mesmos pontos (CMP) na subsuperfície e a correção NMO para o empilhamento (Schlumberger, 2012). Os elementos para aquisição são a fonte (S), o hidrofone (H) e o ponto refletor (R) 38
- Figura 2.4 - Imagem de uma seção sísmica (2D) depois do processamento dos traços sísmicos (Margrave, 2001) 39
- Figura 2.5 - Malha do levantamento 3D terrestre e suas divisões. O X_{min} é a distância mínima de fonte-receptor. O X_{max} é a distância útil máxima de perfil (Cordsen et al., 2011). Os blocos A e B representam o modelo do conjunto de fontes e receptores que se deslocam sobre a superfície. 40
- Figura 2.6 – (a) Distribuição dos cabos (*streamers*) múltiplos para levantamentos marítimos 3D. Cada cabo tem uma serie de bússolas magnéticas com as que possível determinar a posição de cada elemento do cabo (Reynolds, 1997). (b) Um exemplo da sequência de disparos da uma matriz de quatro fontes (*airgun*) para obter a cobertura completa da subsuperfície com o sistema Quad/Quad. As sequências de disparo são f1, f3, f4, f2 (Hansen et al., 1989). 42
- Figura 3.1 - As partes de uma sonda de perfuração com as ferramentas LWD (Seminar, 2008). 47
- Figura 3.2 - Exemplo do efeito da velocidade de registro sobre as curvas de radiação registradas para uma formação de folhelho (Bassiouni, 1994). 48
- Figura 3.2– Alterações das curvas de raio gama. À esquerda, o efeito da posição da ferramenta dentro do poço. À direita o efeito do tipo de lama entre dois poços (um com lama comum e outro com agredado de KCl) afastados 3 Km. Os perfis deveriam ser muito parecidos, mas a diferença

- Δ é causada pelo agregado na lama (Rider, 2002). 50
- Figura 4.1 - Filtragem do sinal $R(\omega)$ na frequência ω . H_{HP} , bloco passa altas, H_{LP} bloco passa baixas. $Y_H(\omega)$ sinal de altas frequências e $Y_B(\omega)$ sinal de baixas frequências. 58
- Figura 4.2 - Diagrama de blocos do sistema, do modelo de medição e do filtro discreto de *Kalman*. 61
- Figura 4.3 - Forma de Onda de seis ondeletas da família Daubechies. 64
- Figura 4.4 - Diagrama de blocos do expansor. H representa o filtro discreto passa baixa na frequência ω e $y(l)$ a saída a uma taxa de amostragem maior. 65
- Figura 4.5 - Diagrama de blocos do dizimador. H representa o filtro discreto passa baixa na frequência ω , e $y(l)$ a saída a uma taxa de amostragem menor. 65
- Figura 4.6 - Diagrama de blocos para a reamostragem a taxa fracionária (M/L). Combinação dos componentes expansor e dizimador. 66
- Figura 4.7 – Operação de Cruzamento de um ponto para indivíduos binários 69
- Figura 4.8 – Operação de Mutação de um indivíduo binário 70
- Figura 4.9 - Diagrama de blocos das etapas do ciclo evolutivo do algoritmo genético. 71
- Figura 5.1 - Diagrama de blocos das partes, do método proposto, para a previsão de medições num pseudo-poço. 76
- Figura 5.2 - Superfícies que representam as variações de u_i em função da variação do ponto (x_f, y_f) . Como exemplo desenha-se u_1 para quatro valores de p e $\beta = 2$. Os poços estão nos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 . 78
- Figura 5.3 - Perfil atravessado por dois poços $P1$ e $P2$, e a aproximação geométrica do número de amostras, para os pseudo-poços aa' , bb' ou cc' . 81
- Figura 5.4 – Diagrama de blocos da interpolação de sinais com o método de Shepard (1968) de três perfis de poço ($p = 3$). As caixas em cinza representam procedimentos que estão ligados com outras etapas de método de previsão. 82
- Figura 5.5 - Processamento do sinal de raio gama para obter a estratigrafia. Da esquerda para a direita: o perfil original $\{r_k\}$ o perfil filtrado $\{y_k\}$ a derivada do perfil e o perfil estratificado S_i com os degraus dos possíveis estratos e suas amplitudes. 87
- Figura 5.6 – Diagrama de blocos da filtragem e a estratificação do sinal de um

perfil de raio gama $\{r_k\}$. Os resultados deste procedimento são os sinais estratificados S_i e I_{S_i} . 88

Figura 5.7 - Relações geométricas para o cálculo dos intervalos de exploração de três poços para a correlação lateral. O poço central é a referência porque sua primeira amostra está a maior profundidade (Z_r) do que as amostras dos outros poços. As distâncias entre os poços são d_{12} e d_{13} ($d_{12} < d_{13}$); Z_{1n} , Z_{2n} e Z_{3n} são trechos semelhantes com n estratos. 89

Figura 5.8 – Superfícies do comportamento das funções f_{S_1, S_2} e F_A geradas com o deslocamento do vetor estratificado sintético S_1 sobre o vetor idêntico S_2 e com variações do número de estratos n . 93

Figura 5.9 – Superfícies do comportamento das funções f_{S_1, S_2} e F_A geradas com o deslocamento do vetor estratificado sintético S_1 sobre o S_2 , com média equivalente, e com variações do número de estratos n . 94

Figura 5.10 – Resultados do Teste 1 para a representação real. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama dos poços RJS42 e NA02, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 97

Figura 5.11 - Resultados do Teste 2 para a representação real. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama dos poços RJS42 e NA02, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 98

Figura 5.12 – Resultados do Teste 3 para a representação real. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama dos poços RJS42, NA02 e RJS19, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 98

Figura 5.13 – Diagrama de Blocos dos procedimentos de correlação lateral de poços com Algoritmos Genéticos. As caixas em cinza representam procedimentos que estão ligados com outras etapas de método de previsão. 99

Figura 5.14 – Trechos de dois traços sísmicos com três eventos positivos cada. Acima, o traço sísmico padrão. Abaixo, o traço sísmico, com os eventos correspondentes. 102

Figura 5.15 – Comparação de resultados gráficos do Teste 1 (à esquerda) e 2

(à direita). De acima para baixo, os menores valores da função de avaliação F_s para os dez experimentos, os valores do melhor cromossomo e a curvas de desempenho do Algoritmo Genético. 105

Figura 5.16 – Resultado da correlação lateral de eventos padrão (+) do traço sísmico 70 com os eventos (x) de outros oito traços sísmicos. À direita os resultados dos deslocamentos sobre a imagem do perfil, e à esquerda a média da função de avaliação de vários experimentos para os oito traços sísmicos em relação à distância no perfil. 106

Figura 5.17 – Curva de velocidade e densidade obtida com o perfil sísmico (DT). 107

Figura 5.18 – Processamento de trecho da primeira reflexão do traço sísmico utilizado como ondeleta para gerar o traço sísmico sintético de poço. 109

Figura 5.19 – Curvas para a correlação dos traços sísmicos. Acima a curva dos coeficientes de reflexão em profundidade; abaixo o resultado da máxima correlação do traço sísmico 3D, próximo ao poço, e do sintético gerado com a curva Λ_j . 111

Figura 5.20 – Diagrama de blocos dos procedimentos para a correlação lateral sísmica 3D. Para obter os resultados, dos deslocamentos em profundidade Ze_f , são necessários os traços sísmicos g_i , g_{pseudo} , o perfil sísmico (DT) e de densidade (RHOB). 112

Figura 6.1 – Localização reservatório do Campo de Namorado (indicado pela seta) na Bacia de Campos (Dutra et al. 2012). 114

Figura 6.2 – Perfil sísmico do Campo de Namorado e identificação litológica dos reservatórios produtores. (Guardado et al. 1990). 114

Figura 6.3 – Arcabouço estrutural e os limites dos reservatórios do Campo de Namorado (Guardado et al. 1990). 115

Figura 6.4 – Localização dos poços (com quadrados e números) e do levantamento sísmico 3D (pontos) do Campo de Namorado para fins acadêmicos. As coordenadas estão no sistema de coordenadas UTM, fuso 24 e zona K (hemisfério sul). Com *Datum* SAD 69 e elipsoide UGGI (1967) ou *International* (1924). 116

Figura 6.5 – Imagem gerada com dados sísmicos 3D do Campo de Namorado, Bacia de Campos, RJ (Da Cruz, 2003). 117

Figura 6.6 – Distribuição dos poços NA11A, NA13A, NA17A e NA21A. Os arranjos de dois poços são formados com os poços NA11A, NA13A e NA21A. Os arranjos com três poços são formados a partir dos quatro

poços. O sistema de coordenadas é UTM, fuso 24 e zona K (hemisfério sul). 118

Figura 6.7 – Dois agrupamentos de estratos semelhantes encontrados nos perfis de raios gama dos poços NA11A e NA13A. Os agrupamentos começam com um traço contínuo e finalizam com um traço descontínuo. 120

Figura 6.8 – Curvas de desempenho dos Algoritmos Genéticos para a correlação lateral. Da esquerda para a direita, curvas dos melhores experimentos para o primeiro e do segundo agrupamento. 120

Figura 6.9 - Curvas de Desempenho do Algoritmo Genético para correlação lateral sísmica dos traços S41–NA11A e S54–NA13A com o traço S70–NA21A. 121

Figura 6.10 – Curvas do perfil do raio gama do poço NA21A e do perfil previsto com um arranjo de dois poços (NA11A e NA13A). O perfil previsto foi ajustado em profundidade com a informação sísmica. As métricas, acima, são do perfil completo com $u = \{0,6932; 0,3068\}$. 122

Figura 6.11 – Histogramas do perfil de raio gama padrão do poço NA21A e o perfil previsto com o arranjo de dois poços e $u = \{0,6932; 0,3068\}$. 123

Figura 6.12 – Curvas do perfil do raio gama (linha contínua) do poço NA21A e do perfil previsto com um arranjo de dois poços (NA11A e NA13A). O perfil previsto foi ajustado em profundidade com a informação sísmica. As métricas, mostradas acima são do perfil completo, com $u = \{0,3; 0,7\}$. 125

Figura 6.13 – Histogramas do perfil de raio gama padrão do poço NA21A e o perfil previsto com o arranjo de dois poços e $u = \{0,3; 0,7\}$. 125

Figura 6.14 – Cinco agrupamentos de estratos semelhantes encontrados nas diferentes curvas estratificadas (S_i) dos perfis de raios gama dos poços NA11A e NA21A. Os agrupamentos começam com um traço contínuo e finalizam com um traço descontínuo. 126

Figura 6.15 – Curvas de desempenho dos Algoritmos Genéticos para a correlação lateral dos perfis dos poços NA11A e NA21A. Da esquerda para a direita e de acima para baixo, as curvas dos melhores experimentos para os cinco agrupamentos. 127

Figura 6.16 - Curvas de Desempenho do Algoritmo Genético para correlação lateral sísmica dos traços S41–NA11A e S70–NA21A com o traço S54–NA13A. 128

Figura 6.17 – Curvas do perfil do raio gama do poço NA13A e do perfil previsto com um arranjo de dois poços (NA11A e NA21A). O perfil

- previsto foi ajustado em profundidade com a informação sísmica. As métricas, acima, são para o perfil completo. 129
- Figura 6.18 – Histogramas do perfil de raio gama padrão do poço NA13A e o perfil previsto com o arranjo de dois poços e $u = \{0,3359; 0,6641\}$. 130
- Figura 6.19 - Curvas de desempenho dos Algoritmos Genéticos para a correlação lateral dos perfis dos poços NA13A e NA21A. Da esquerda para a direita e de cima para baixo, as curvas dos melhores experimentos para os cinco agrupamentos. 132
- Figura 6.20 – Três agrupamentos de estratos semelhantes encontrados nas diferentes curvas estratificadas (S_i) dos perfis de raios gama dos poços NA13A e NA21A. Os agrupamentos começam com um traço contínuo e finalizam com um traço descontínuo. 132
- Figura 6.21 - Curvas de Desempenho do Algoritmo Genético para correlação lateral sísmica dos traços S54–NA13A e S70–NA21A com o traço S41–NA11A. 133
- Figura 6.22 – Curvas do perfil do raio gama do poço NA11A e do perfil previsto com um arranjo de dois poços (NA13A e NA21A). O perfil previsto foi ajustado em profundidade com a informação sísmica. As métricas, acima, são para perfil completo com $u = \{0,1829; 0,8171\}$. 134
- Figura 6.23 – Histogramas do perfil de raio gama padrão do poço NA11A e o perfil previsto com o arranjo de dois poços e $u = \{0,1829; 0,8171\}$. 135
- Figura 6.24 – Curvas das médias móveis dos perfis de raio gama dos poços NA11A, NA21A, NA13A e PS13. 136
- Figura 6.25 – Curvas de desempenho dos Algoritmos Genéticos para a correlação lateral dos perfis de poços NA11A, NA13A e NA17A. Da esquerda para a direita, curvas dos melhores experimentos para os três agrupamentos. 141
- Figura 6.26 – Três agrupamentos de estratos semelhantes encontrados nas diferentes curvas estratificadas (S_i) dos perfis de raios gama dos poços NA11A, NA13A e NA17A. Os agrupamentos começam com um traço contínuo e finalizam com um traço descontínuo. 142
- Figura 6.27 - Curvas de desempenho do Algoritmo Genético para correlação lateral sísmica dos traços S41–NA11A, S54–NA13A e S79-NA17A (respectivamente) com o traço S70–NA21A. 143
- Figura 6.28 – Localização, no Campo de Namorado, dos três traços sísmicos correlacionados com o traço sísmico padrão S70-NA21A. Os traços

- sísmicos sintéticos aparecem ao lado dos reais e as retas unem os primeiros e os últimos eventos da Tabela 6.18. Sistema de coordenadas UTM, fuso 24 e zona K (hemisfério sul). 144
- Figura 6.29 – Curvas do perfil do raio gama do poço NA21A e do perfil previsto com um arranjo de três poços (NA11A, NA13A e NA17A), e ajustado em profundidade. As métricas, mostradas no topo, são do perfil completo. 145
- Figura 6.30 – Histogramas do perfil de raio gama padrão do poço NA21A e o perfil previsto para o pseudo-poço PS21, com $u = \{0,6107; 0,2703; 0,1190\}$. 146
- Figura 6.31 – Três agrupamentos de estratos semelhantes encontrados nas diferentes curvas estratificadas (S_i) dos perfis de raios gama dos poços NA13A, NA21A e NA17A. Os agrupamentos começam com um traço contínuo e finalizam com um traço descontínuo. 147
- Figura 6.32 – Curvas de desempenho dos Algoritmos Genéticos para a correlação lateral dos perfis dos poços NA13A, NA21A e NA17A. Da esquerda para a direita, as curvas dos melhores experimentos para os três agrupamentos. 148
- Figura 6.33 - Curvas de desempenho do Algoritmo Genético para correlação lateral sísmica dos traços S54–NA13A, S70-NA21A e S79-NA17A com o traço S41–NA11A. 149
- Figura 6.34 – Curvas do perfil do raio gama do poço NA11A e do perfil previsto com um arranjo de três poços (NA13A, NA21A e NA17A), e ajustado em profundidade. As métricas, mostradas no topo, são do perfil completo. 151
- Figura 6.35 – Histogramas do perfil de raio gama padrão do poço NA11A e do perfil previsto para o pseudo-poço PS11, com $u = \{0,14289; 0,63849; 0,21862\}$. 151
- Figura 6.36 – Distribuição dos arranjos de três poços NA11A, NA17A, NA21A e o poço padrão NA22, do Campo de Namorado. Sistema de coordenadas UTM, fuso 24 e zona K (hemisfério sul). 155
- Figura 6.37 – Curvas de desempenho dos Algoritmos Genéticos para a correlação lateral dos poços NA11A, NA17A e NA21A. Da esquerda para a direita, curvas dos melhores experimentos para o primeiro e do segundo agrupamento. 156
- Figura 6.38 – Cinco agrupamentos de estratos semelhantes encontrados nas

- diferentes curvas estratificadas (S_i) dos perfis de raios gama dos poços NA11A, NA17A e NA21A. Os agrupamentos começam com um traço contínuo e finalizam com um traço descontínuo. 157
- Figura 6.39 - Curvas de desempenho do Algoritmo Genético para correlação lateral sísmica dos traços S41–NA11A, S79-NA17A e S70–NA21A com o traço S57–NA22. 158
- Figura 6.40 – Curvas do perfil do raio gama do poço NA22 e do perfil previsto com um arranjo de três poços (NA11A, NA17A e NA21A). 159
- Figura 6.41 – Histogramas do perfil de raio gama padrão do poço NA22 e o perfil previsto do pseudo-poço PS22, com $u = \{0,2966; 0,5989; 0,1045\}$. 160
- Figura 6.42 – Distribuição dos quatro poços (RJS19, NA01A, NA03D e NA03), no Campo de Namorado para o teste de correlação lateral de poços. Sistema de coordenadas UTM, fuso 24 e zona K (hemisfério sul). 161
- Figura 6.43 – Resultados da correlação lateral de poços com Algoritmos Genéticos sobre perfis de raios gama dos poços RJS19, NA01A e NA03D. O agrupamento começa com um traço contínuo e termina com um descontínuo. 162
- Figura 6.44 – Resultados da correlação lateral de três poços com Algoritmos Genéticos e perfis de raios gama. Neste caso, a filtragem é realizada apenas no poço NA01A. O agrupamento começa com um traço contínuo e termina com um descontínuo. 163
- Figura I.1 – Sinal interpolado R_f a partir de três sinais semelhantes, de raio gama, R_1 , R_2 , e R_3 . Para $u_1 = 1/3$, $u_2 = 1/3$, $u_3 = 1/3$. 180
- Figura I.2 – Sinal interpolado R_f a partir de três sinais não semelhantes, de raio gama, R_1 , R_2 , e R_3 . Para $u_1 = 1/3$, $u_2 = 1/3$, $u_3 = 1/3$. 181
- Figura II.1 – Sinal original e filtrado do perfil de raio gama. No lado esquerdo o sinal original $\{r_{kj}\}$, e o sinal filtrado $\{y_j\}$ com o filtro binomial; no lado direito os espectros de frequência relativas f (ou f_r) dos mesmos (sem unidades). 183
- Figura II.2 – Sinais filtrados do perfil de raio gama com filtro de *Kalman*. No lado esquerdo os sinais $\{\hat{y}_{kj}\}$; para $\Gamma = 1$ e $\Gamma = 0,1428$; no lado direito os espectros dos mesmos (frequência relativa ou normalizada f). 184
- Figura II.3 – Sinais filtrados do perfil de raio gama com ondeleta *db4*. No lado esquerdo os sinais \hat{y} ; com $J = 1$ e $J = 3$; no lado direito os espectros dos mesmos (frequência relativa ou normalizada f). 185
- Figura II.4 – Curvas dos três resultados: o filtro binomial ($m = 20$), filtro de

Kalman ($\Gamma = 0,25$) e do filtro com ondeletas (*db4*, $J = 3$). A curva de potencial espontâneo está correlacionada com os perfis filtrados. 186

Figura III.1 – Resultados do Teste 1 para a representação binária. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama do poço RJS42, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 191

Figura III.2 – Resultados do Teste 2 para a representação binária. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama do poço RJS42, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 191

Figura III.3 - Resultados do Teste 3 para a representação binária. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama dos poços RJS42 e NA02, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 192

Figura. III.4 - Resultados do Teste 4 para a representação binária. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama dos poços RJS42 e NA02, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 192

Figura III.5 – Resultados do Teste 5 para a representação binária. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama dos poços RJS42 e NA02, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 193

Figura III.6 - Resultados do Teste 6 para a representação binária. À esquerda, a correlação das curvas estratificadas (S_i) de raio gama dos poços RJS42 e NA02, com segmentos de reta que indicam o início e o fim do agrupamento semelhante. À direita a curva de desempenho do Algoritmo Genético. 193

Figura IV.1 – O *Spectrum* G_{xx} e o *Cepstrum* $C_{p_{xx}}$ de potência dos traços sísmicos 41 e 54, das linhas 2745 e 2718 respectivamente, do Campo de Namorado Bacia de Campos. 194

Figura. IV.2 – Comparação de dois resultados da correlação de um traço

sísmico próximo ao poço e outro traço sintético do poço. À esquerda com o traço sísmico sintético gerado com a ondeleta *Ricker*. À direita com o traço sísmico sintético gerado com a ondeleta de Fase Mínima, ambas com a frequência de 35,70 Hz. 196

Figura A.1 - Formas de onda das ondeletas *Ricker* e de Fase Mínima utilizadas na criação dos traços sísmicos sintéticos (Margrave, 2003). 198

Figura B.1 - Correlação lateral de poços com perfis de raio gama (GR) e densidade (RHOB). Exemplo de correlação entre os poços: RJS42, Na02, Na19, Na04 (Da Cruz, 2003). 203

Figura B.2. Seção estratigráfica B-B' do Campo de Namorado realizado por De Lima (2004). 204

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1 - Velocidades Acústicas Compressionais (onda P) e tempos de trânsito, em algumas matrizes de rocha, utilizados como referência para o ajuste dos perfis sônicos (Bassiouni, 1994; Schlumberger, 1998). | 51 |
| Tabela 3.2 - Valores comuns da densidade matriz ρ_{ma} para ajuste da ferramenta de medição de densidade. | 54 |
| Tabela 5.1 – Características e parâmetros dos Algoritmos Genéticos para a correlação lateral de dois e três poços com representação real. | 96 |
| Tabela 5.2 – Os melhores resultados numéricos da correlação lateral de poços com Algoritmos Genéticos para três testes, com os poços 1 (RJS42), 2 (NA02) e 3 (RJS19). | 97 |
| Tabela 5.3 – Características e parâmetros dos Algoritmos Genéticos para dois testes da correlação lateral sísmica 3D com representação real. | 104 |
| Tabela 6.1 – Parâmetros e características dos Algoritmos Genéticos para a correlação lateral de poços e correlação lateral sísmica para todos os casos. | 119 |
| Tabela 6.2 – Resultados numéricos da correlação lateral de dois poços com Algoritmos Genéticos entre os poços NA11A e NA13A. | 119 |
| Tabela 6.3 – Índices dos eventos padrão do traço sísmico 70 (próximo de PS21) e os deslocamentos nos traços sísmicos 41 e 54. Esses são para os eventos que aparecem nos traços sísmicos sintéticos dos dois poços próximos. | 121 |
| Tabela 6.4 – Índices e deslocamentos para estimar a profundidade Z_{e_j} do perfil previsto, a partir dos deslocamentos dos eventos nos traços sísmicos 41 e 54, em relação aos eventos do traço sísmico 70, próximo ao pseudo-poço PS21. | 122 |
| Tabela 6.5 – Comparação de métricas dos perfis previstos para o pseudo-poço (PS21). Os perfis do poço NA21A são utilizados como padrões. | 124 |
| Tabela 6.6 – Resultados numéricos da correlação lateral de dois poços com Algoritmos Genéticos entre os poços NA11A e NA21A. | 126 |
| Tabela 6.7 – Índices dos eventos padrão do traço sísmico 54 (próximo de PS13) e os deslocamentos nos traços sísmicos 41 e 70. Esses são para os eventos que aparecem nos traços sísmicos sintéticos dos dois poços | |

| | |
|--|-----|
| próximos. | 128 |
| Tabela 6.8 – Índices e deslocamentos para estimar a profundidade Z_{e_f} do perfil previsto, a partir dos deslocamentos dos eventos nos traços sísmicos 41 e 70, em relação aos eventos do traço sísmico 54, próximo ao pseudo-poço PS13. | 129 |
| Tabela 6.9 – Comparação de métricas dos perfis previstos para o pseudo-poço (PS13). As métricas são calculadas utilizando os perfis previstos e os perfis padrões do poço NA13A. | 130 |
| Tabela 6.10 – Resultados numéricos da correlação lateral de dois poços com Algoritmos Genéticos entre os poços NA13A e NA21A. | 131 |
| Tabela 6.11 – Índices dos eventos padrão do traço sísmico 41 (próximo de PS11) e os deslocamentos nos traços sísmicos 54 e 70. Esses são para os eventos que aparecem nos traços sísmicos sintéticos dos dois poços próximos. | 133 |
| Tabela 6.12 – Índices e deslocamentos para estimar a profundidade Z_{e_f} do perfil previsto, a partir dos deslocamentos dos eventos nos traços sísmicos 54 e 70, em relação aos eventos do traço sísmico 41, próximo ao pseudo-poço PS11. | 134 |
| Tabela 6.13 – Comparação de métricas dos perfis previstos para o pseudo-poço (PS11). As métricas são calculadas utilizando os perfis previstos e os perfis padrões do poço NA11A. | 136 |
| Tabela 6.14 – Coeficientes de correlação $\rho_{r,y}$ e correlação parcial $\rho_{r,y,z}$ entre os perfis de raio gama dos poços NA11A, NA13A (dados) e NA21A (padrão para a previsão). Para os agrupamentos semelhantes encontrados na correlação lateral de poços. | 137 |
| Tabela 6.15 – Coeficientes de correlação $\rho_{r,y}$ e correlação parcial $\rho_{r,y,z}$ entre os perfis de raio gama dos poços NA11A, NA21A (dados) e NA13A (padrão para a previsão). Para os agrupamentos semelhantes encontrados na correlação lateral de poços. | 138 |
| Tabela 6.16 – Coeficientes de correlação $\rho_{r,y}$ e correlação parcial $\rho_{r,y,z}$ entre os perfis de raio gama dos poços NA13A, NA21A (dados) e NA11A (padrão para a previsão). Para os agrupamentos semelhantes encontrados na correlação lateral de poços. | 139 |
| Tabela 6.17 – Resultados numéricos da correlação lateral de poços com Algoritmos Genéticos entre os poços NA11A, NA13A e NA17A. | 140 |
| Tabela 6.18 – Índices dos eventos padrão no traço sísmico 70 (próximo de | |

- PS21) e os deslocamentos nos traços sísmicos 41, 54 e 79, para os eventos que aparecem nos traços sísmicos sintéticos de poço. 143
- Tabela 6.19 – Valores para estimar a profundidade Z_{e_f} , do perfil previsto, a partir dos deslocamentos dos eventos nos traços sísmicos 41, 54 e 79, em relação aos eventos do traço sísmico 70, próximo ao pseudo-poço PS21 (e do padrão NA21A). 144
- Tabela 6.20 – Comparação das métricas dos perfis previstos para o pseudo-poço (PS21) utilizando o arranjo de três poços NA11A, NA13A e NA17A; os perfis do poço NA21A são utilizados como padrões. 146
- Tabela 6.21 – Resultados numéricos da correlação lateral de poços com Algoritmos Genéticos entre os poços NA13A, NA21A e NA17A. 148
- Tabela 6.22 – Índices dos eventos padrão no traço sísmico 41 (próximo de PS11) e os deslocamentos nos traços sísmicos 54, 70 e 79 para os eventos que aparecem nos traços sísmicos sintéticos de poço. 150
- Tabela 6.23 – Valores para estimar a profundidade Z_{e_f} , do perfil previsto, a partir dos deslocamentos dos eventos nos traços sísmicos 54, 70 e 79, em relação aos eventos do traço sísmico 41, próximo ao pseudo-poço PS11 (e do padrão NA11A). 150
- Tabela 6.24 – Comparação das métricas dos perfis previstos para o pseudo-poço (PS11). Os perfis do poço NA11A são utilizados como padrões. 152
- Tabela 6.25 – Coeficientes de correlação $\rho_{r,y}$ e correlação parcial $\rho_{r,y,z}$ entre os perfis de raio gama dos poços NA13A, NA21A (dados) e NA11A (padrão para a previsão). Para os agrupamentos semelhantes encontrados na correlação lateral de poços. 153
- Tabela 6.26 – Coeficientes de correlação $\rho_{r,y}$ e correlação parcial $\rho_{r,y,z}$ entre os perfis de raio gama dos poços NA13A, NA17A (dados) e NA11A (padrão para a previsão). Para os agrupamentos semelhantes encontrados na correlação lateral de poços. 153
- Tabela 6.27 – Coeficientes de correlação $\rho_{r,y}$ e correlação de parcial $\rho_{r,y,z}$ entre os perfis de raio gama dos poços NA17A, NA21A (dados) e NA11A (padrão para a previsão). Para os agrupamentos semelhantes encontrados na correlação lateral de poços. 154
- Tabela 6.28 – Resultados numéricos da correlação lateral de três poços com Algoritmos Genéticos entre os poços NA11A, NA17A e NA21A. 155
- Tabela 6.29 – Índices dos eventos padrão no traço sísmico 57 (próximo de PS22) e os deslocamentos nos traços sísmicos 41, 79 e 70, para os

| | |
|--|-----|
| eventos que aparecem nos traços sísmicos sintéticos de poço. | 158 |
| Tabela 6.30 – Valores para estimar a profundidade Z_{ef} do perfil previsto, a partir dos deslocamentos dos eventos nos traços sísmicos 41, 79 e 70, em relação aos eventos do traço sísmico 57, próximo ao pseudo-poço PS22 (e do padrão NA22). | 159 |
| Tabela 6.31 – Comparação de métricas dos perfis previstos para o pseudo-poço (PS22) utilizando o arranjo de três poços NA11A, NA17A e NA21A; os perfis do poço NA22 são utilizados como padrões. | 160 |
| Tabela 6.32 – Resultados numéricos da correlação lateral de poço com Algoritmos Genéticos entre os poços RJS19, NA01A e NA03D. | 163 |
| Tabela 6.33 – Comparação dos coeficientes de variabilidade (CV) em porcentagem para o arenito (A) e o folhelho (F) dos poços NA11A, NA17A e Oceanview-174AX. | 165 |
| Tabela II.1 – Coeficientes de correlação $\rho_{r,y}$ entre o sinal original e filtrado para 6 ondeletas (<i>db</i>) e cinco níveis. | 185 |
| Tabela II.2 – Comparação qualitativa dos resultados dos três filtros. | 187 |
| Tabela III.1 – Parâmetros e características dos Algoritmos Genéticos para seis testes da correlação lateral de poços com representação binária. | 190 |
| Tabela III.2 – Os melhores resultados numéricos, de cinco experimentos, da correlação lateral de poços com Algoritmos Genéticos para seis testes, com os poço 1 (RJS42) e 2 (NA02). | 190 |
| Tabela IV.1 – Resultados das correlações máximas do traço sísmico real e outros traços sintéticos criados com as ondeletas <i>Ricker</i> e de Fase Mínima. As frequências das ondeletas são de quatro harmônicos, observados no <i>Cepstrum</i> do traço sísmico real. | 195 |
| Tabela A.1 – Propriedades da convolução para as funções contínuas: $x_1(t)$, $x_2(t)$ e $h(t)$. | 197 |
| Tabela A.2 - Nomes e abreviações das ondeletas utilizadas nos testes. (Misiti et al., 2007) | 198 |
| Tabela B.1 - Características do poço Oceanview-174AX (IODP, 2012). | 201 |
| Tabela B.2 – Coordenadas no sistema UTM (X , Y), boca do poço (Z) e tipos de perfis disponíveis para os poços do Campo do Namorado. No Fuso 24 e zona K (hemisfério sul). Com <i>Datum</i> SAD 69 e elipsoide UGGI (1967) ou <i>International</i> (1924). | 202 |

Tabela B.3 - Dados dos traços sísmicos próximos aos poços do Campo do Namorado: Nomes, dados de localização do traço sísmico, o poço próximo e as coordenadas UTM no Fuso 24 e zona K (hemisfério sul). Com *Datum* SAD 69 e elipsoide UGGI (1967) ou *International* (1924). 202

Lista de Siglas

| | |
|------|---|
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustível |
| API | Instituto Americano de Petróleo (<i>American Petroleum Institute</i>) |
| BLUE | Melhor Estimador Linear Imparcial (<i>Best, Linear, Unbiased, Estimator</i>) |
| CMP | Ponto Médio Comum (<i>Common Midpoint</i>) |
| DFT | Transformada Discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>) |
| DT | Tempo Delta ou Diferencial de Tempo (<i>Delta Time</i>) |
| DTFT | Transformada de Fourier de Tempo Discreto (<i>Discrete Time Fourier Transform</i>) |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>) |
| FIR | Resposta ao Impulso Finito (<i>Finite Impulse Response</i>) |
| GPS | Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>) |
| GR | Raio Gama (<i>Gamma Ray</i>) |
| ILD | Registro Indução Profunda (<i>Induction Log Deep</i>) |
| ILM | Registro de Indução Média (<i>Induction Log Medium</i>) |
| IODP | Programa Integrado de Perfuração Submarina (<i>Integrated Ocean Drilling Program</i>) |
| LWD | Registro Durante a Perfuração (<i>Logging While Drilling</i>) |
| MAPE | Erro Absoluto Médio Percentual (<i>Mean Absolute Percentage Error</i>) |
| MWD | Medição Durante a Perfuração (<i>Measurement While Drilling</i>) |
| NMO | Afastamento da (Reta) Normal (<i>Normal Moveout</i>) |
| NMR | Ressonância Magnética Nuclear (<i>Nuclear magnetic resonance</i>) |
| ONIP | Organização Nacional da Indústria do Petróleo |
| RHOB | Densidade da Massa (<i>Rho Bulk</i>) |
| SP | Potencial Espontâneo (<i>Spontaneous Potential</i>) |
| UGGI | União Geodésica e Geofísica Internacional |
| UTM | Universal Transverso de Mercator (<i>Universal Transverse Mercator</i>) |
| VSP | Perfilagem Sísmica Vertical (<i>Vertical Seismic Profiling</i>) |
| WST | Teste de Disparo no Poço (<i>Well shoot test</i>) |