



**Samuel Gustavo Huamán Bustamante**

**Inversão de Parâmetros Geofísicos em  
Três Dimensões a partir de Dados de  
Reflexão Sísmica por Algoritmos  
Genéticos Híbridos**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco

Rio de Janeiro, agosto 2008



**Samuel Gustavo Huamán Bustamante**

**Inversão de Parâmetros Geofísicos em Três Dimensões a partir de Dados de Reflexão Sísmica por Algoritmos Genéticos Híbridos**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Dr. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. Marco Antonio Cetale Santos**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Dr. Yván Jesús Túpac Valdivia**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. Wilson Mouzer Figueiró**

UFBA

**Dr. André Bulcão**

CENPES/Petrobrás

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de agosto de 2008

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 Perú (1999). Participou em projetos de pesquisa nas áreas de prospecção elétrica e sísmica.

#### Ficha Catalográfica

Huamán Bustamante, Samuel Gustavo

Inversão de parâmetros geofísicos em três dimensões a partir de dados de reflexão sísmica por algoritmos genéticos híbridos / Samuel Gustavo Huamán Bustamante ; orientador: Marco Aurélio C. Pacheco. – 2008.

93 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Algoritmos genéticos híbridos. 3. Inversão de parâmetros sísmicos. 4. Reflexão sísmica. 5. Análise de velocidade. 6. Projeções ortogonais. I. Pacheco, Marco Aurélio C. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para os meus pais, Hilda e Samuel,  
pelos ensinamentos

## Agradecimentos

Ao Deus pela paz espiritual.

Ao meu orientador Professor Marco Aurélio C. Pacheco pela confiança e parceria para realizar este trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À equipe do ICA - PUC, pelo auxílio técnico.

À Shelly Medeiros, pelas importantes contribuições de seu trabalho de pesquisa.

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

## Resumo

Huamán Bustamante, Samuel Gustavo. **Inversão de parâmetros geofísicos em três dimensões a partir de dados de reflexão sísmica por algoritmos genéticos híbridos.** Rio de Janeiro, 2008. 93p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem por objetivo investigar um método para auxiliar na quantificação de características sísmicas do subsolo. O modelo sísmico bidimensional de reflexão usa a equação *Normal Move Out* (NMO), para calcular os tempos de trânsito das ondas sísmicas, tipo P, refletidas em camadas isotrópicas e inclinadas. Essa equação usa a velocidade raiz quadrática média RMS como valor representativo das velocidades intervalares das camadas unidas. No processo de inversão para múltiplas camadas, as velocidades RMS representam o problema principal para estimar as velocidades intervalares. Conseqüentemente, o método proposto estima seqüencialmente os parâmetros do modelo sísmico, para resolver esse problema a partir dos tempos de trânsito com Algoritmos Genéticos Híbridos (algoritmo genético e algoritmo *Nelder Mead Simplex*). Os tempos de trânsito são sintéticos e a estimação de parâmetros é tratada como um problema de minimização. Com o método proposto foi obtido um alto grau de exatidão, além de reduzir o tempo de computação em 98,4 % em comparação com um método de estimação simultânea de parâmetros. Para aliviar a complexidade e a demora na geração de um modelo em três dimensões se contrói um modelo sísmico em três dimensões formado com modelos bidimensionais, sob cada unidade retangular da malha de receptores do levantamento sísmico, para camadas isotrópicas curvadas, com variações suaves das pendentes e sem discontinuidades. Os modelos bidimensionais formam polígonos que representam as superfícies de interface que são projetadas sob os retângulos da malha. Dois conjuntos de superfícies poligonais são gerados para auxiliar na localização das camadas.

## Palavras-chave

Algoritmos genéticos híbridos; inversão de parâmetros sísmicos; reflexão sísmica; análise de velocidade; projeções ortogonais.

## Abstract

Huamán Bustamante, Samuel Gustavo. **Inversion of geophysics parameters in three dimensions from seismic reflection data by hybrid genetic algorithms.** Rio de Janeiro, 2008. 93p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

The objective of the present work is to investigate a method to help in the quantification of seismic characteristics underground. The two-dimensional seismic model of reflection employs the equation *Normal Move Out* (NMO) to calculate the travel times of P waves reflected on inclined and isotropic layers. This equation uses the root mean square velocity as a representative value of the joined layers velocities. At the inversion process, for multiple layers, the root mean square velocities are the main problem to estimate the layer velocities. Consequently, to solve that problem, the proposed method estimates sequentially the parameters of the seismic model using travel times and the Hybrid Genetic Algorithms (Genetic algorithm and the *Nelder Mead Simplex* algorithm). The travel times are synthetic and the estimation of parameters is treated as a minimization problem. With proposed method was obtained high grade of accurate, and the reduction of 98.4 % of computing time when it was compared to a simultaneous parameters estimation method. For decreasing the complexity and the delay to generate the models in three dimensions is proposed the construction of a three-dimensional seismic model formed with two-dimensional models, under every rectangular cell of the mesh of receptors of the seismic survey, for curved isotropic layers with soft variations in the gradient and without discontinuities. The two-dimensional models form polygons that represent the surfaces of interfaces that are designed under the rectangles of the surface or soil. Two sets of polygonal surfaces are generated to help at the geometric localization of layers.

## Keywords

Hybrid genetic algorithms; inversion of seismic parameters; seismic reflection; velocity analysis; orthogonal projections.

## Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Motivação	15
1.2.	Objetivos do Trabalho	16
1.3.	Descrição do Trabalho	16
1.4.	Organização da Dissertação	18
2	Métodos e Técnicas Sísmicas e de Estimação de Parâmetros	19
2.1.	Métodos e Técnicas de Sísmica de Reflexão	19
2.1.1.	Sísmica de Reflexão	22
2.1.2.	Equações de Modelos Sísmicos de Reflexão	24
2.1.3.	Preprocessamento de Sinais Sísmicos	27
2.1.4.	Levantamentos Sísmicos	29
2.1.5.	Estruturas Geológicas	38
2.2.	Métodos e Técnicas de Estimação de Parâmetros Geofísicos	41
2.2.1.	Algoritmos Genéticos Híbridos	43
3	Método Proposto para Estimação de Parâmetros Sísmicos em três Dimensões	51
3.1.	Adaptação das Equações para Modelos de Múltiplas Camadas	51
3.1.1.	Camadas Horizontais Isotrópicas e Anisotrópicas	52
3.1.2.	Camadas Inclinação Isotrópicas	54
3.2.	Método de Estimação de Parâmetros	59
3.2.1.	Estrutura do Cromossomo	62
3.2.2.	Operadores Genéticos	64
3.2.3.	Parâmetros da Evolução	65
3.2.4.	Parâmetros do Algoritmo Nelder Mead Simplex	66
3.2.5.	Estudo de Casos	67
3.3.	Método de Levantamento Sísmico	73
4	Estudo de Caso	77
4.1.	Modelo de Referência em Três Dimensões	77

4.1.1. Geração de Dados de Referência	79
4.2. Estimação dos Parâmetros da estrutura Tridimensional	80
4.3. Geração das Superfícies Estimadas	81
4.4. Avaliação de Resultados	84
5 Conclusões e Trabalhos Futuros.	88
5.1. Trabalhos Futuros	89
6 Referências Bibliográficas	91

## Lista de figuras

- Figura 1 - Propagação de uma onda sísmica a partir de uma fonte pontual num meio homogêneo. A onda se propaga como onda de corpo no volume do meio e como uma onda superficial em sua superfície livre. 20
- Figura 2 – Esquema de partição de energia sísmica. Geração de ondas P e S refletidas e transmitidas a partir de uma onda P incidente numa interface plana. 23
- Figura 3 – Quando uma onda é gerada por uma fonte na superfície é refletida nas interfaces entre camadas. A distância de cobertura de geofones na interface de camadas é menor do que a metade da distância de distribuição dos geofones. 24
- Figura 4 - (a) Caminho do raio refletido na interface da camada horizontal. (b) Eixo de Sistema de coordenadas onde  $n$  é o vetor unitário da propagação com inclinação  $\theta$  e azimute  $\lambda$ . 25
- Figura 5 - Curvas traçadas com as frentes das ondas para a análise do ruído. 28
- Figura 6 - Esquema básico de aquisição terrestre de dados sísmicos. A distância entre a fonte e o arranjo de geofones pode variar em cada disparo. As ondas são refletidas com maior intensidade quando as características das camadas são marcantes (Cajueiro, 2008). 29
- Figura 7 - Esquema básico de aquisição marítima de dados sísmicos. A distância do arranjo de hidrofones e da fonte é fixa enquanto o conjunto avança com velocidade constante e baixa (Pereira, 2008). 30
- Figura 8 - Conjunto de tiros sísmicos justapostos em uma linha para gerar uma imagem de uma seção sísmica antes do processamento. 31
- Figura 9 - Imagem de uma seção sísmica depois do processamento dos traços sísmicos (Margrave, 2003). 31
- Figura 10 – Imagem de uma seção sísmica representada por camadas. As interfaces são aproximadas com retas (Behera, 2007). 32
- Figura 11 – Cubo Sísmico construído depois do processamento dos traços sísmicos. Pode-se usar para identificar estruturas rochosas específicas (Cajueiro, 2008). 33
- Figura 12 – Interseção de faixas de registro ou gravação com

deslocamento utilizável. Quatro relações podem ser identificadas dependendo do deslocamento utilizável (R) em relação à metade da altura da faixa de registro (H) e da metade da largura (W) (Cooper, 2004). 34

Figura 13 – Densidade de Fontes em relação à densidade de Receptores. No quadro superior esquerdo está a distribuição convencional ‘*spider plot*’ para um modelo 3D. No quadro superior direito, os vetores foram apagados e só as coordenadas polares lembram para cada traço em cada caixa. O quadro inferior esquerdo representa o mesmo cubo de 30 m mas usando um intervalo de receptores de 30 m, duplicando o numero de receptores. No quadro inferior direito, foi apagado cada segundo disparo ou fonte (Cooper, 2004). 37

Figura 14 - Quatro tipos de arranjos bidimensionais de receptores: triangular, circular, perpendicular e linhas paralelas (Seisimager/sw<sup>im</sup>, 2005). 38

Figura 15 – Tipos de dobras: a) sinclinal simétrico, b) anticlinal simétrico, c) homoclinal, d) sinclinal assimétrico, e) anticlinal assimétrico, f) monoclinial, g) dobra recostada, h) forma de dobradura de leque (Aragón et al., 1961). 40

Figura 16 – Operação de cruzamento de um ponto para indivíduos binários. 45

Figura 17 – Operação de mutação de um indivíduo binário. 46

Figura 18 - Pontos depois de uma reflexão ou uma expansão. O simplex original é mostrado com linha tracejada. 49

Figure 19 - Pontos depois de uma contração exterior, uma contração interior ou um encolhimento. O simplex original é mostrado com linha tracejada. 50

Figura 20 - Distribuição de três camadas horizontais representando meios VTI e parâmetros. 53

Figura 21 - Relação geométrica do caminho que percorre a onda sísmica desde a fonte, até o receptor e uma camada inclinada em função de seus parâmetros. 54

Figura 22 - Parâmetros sísmicos para múltiplas camadas inclinadas e deslocamentos entre fonte e receptores. 55

Figura 23 - Seção com camadas inclinadas com interfaces retas com os parâmetros que descrevem o modelo de sísmico. 56

Figura 24 – Projeção geométrica do parâmetro da camada para determinar

o peso da velocidade $V_{rms}$ .	57
Figura 25 - Diagrama dos blocos do programa para estimação dos parâmetros sísmicos, de três camadas, para um tiro sísmico usando AGH.	61
Figura 26 – Representação do cubo sísmico para o levantamento proposto. Distribuição das fontes e receptores para cada unidade ou dobra da malha que cobre a área do levantamento.	74
Figura 27 – Representação dos polígonos que formam a superfície de interface (ou de reflexão) entre camadas, construídos com os parâmetros estimados.	74
Figura 28 – Cubóide Sísmico sintético com a distribuição de três camadas.	78
Figura 29 – Distribuição das superfícies de interface entre camadas, espessuras e pontos onde os ângulos de inclinação são mínimos e máximos.	78
Figura 30 – Distribuição de receptores e trajetórias que percorrem as frentes das ondas (raios) para cada tiro sísmico.	80
Figura 31 – Interpolação com retas das interfaces das camadas da seção paralela ao eixo $X$ localizada em $Y = 0$ . À esquerda as retas estimadas e à direita os pontos de interseção	83
Figura 32 – Três Superfícies Estimadas das interfaces entre camadas para cada conjunto de superfícies geradas uma com os modelos $X$ (esquerda) e a outra como os modelos $Y$ (direita).	83
Figura 33 - Superposição das superfícies estimadas (linha azul para secções paralelas ao eixo $X$ e linha vermelha para secções paralelas ao eixo $Y$ ) superfícies originais.	84
Figura 34 – Representação da cadeia $A$ e da corda $B$ para calcular a Rugosidade.	85

## Lista de tabelas

Tabela 1 – A matriz de dados contém os tempos de referência dos eventos de reflexão que os receptores ( $R_i$ ), para um tiro sísmico, registram.	60
Tabela 2 – Descrição da matriz que representa a estrutura da solução geral para o modelo de camadas horizontais com anisotropia VTI. Um cromossomo para cada camada.	63
Tabela 3 - Descrição da matriz que representa a estrutura da solução geral para o modelo de camadas inclinadas e isotrópicas. Um cromossomo para cada camada.	63
Tabela 4 - Descrição dos tipos de genes, os limites dos intervalos e as unidades físicas dos parâmetros que representam.	64
Tabela 5 - Parâmetros do AG e recursos de computação para duas estruturas de cromossomos com parâmetros de um modelo sísmico de três camadas VTI.	68
Tabela 6 - Resultados da estimação de parâmetros com diferentes métodos e técnicas, onde UCM significa um cromossomo por modelo e UCC significa um cromossomo por camada. Na segunda coluna o modelo de referência com camadas horizontais anisotrópicas VTI é apresentado.	69
Tabela 7 - Parâmetros do AG e AGH para o método seqüencial aplicado ao modelo sísmico de três camadas inclinadas isotrópicas.	70
Tabela 8 - Resultados da estimação de parâmetros para um modelo de referencia isotrópico e com camadas inclinadas; onde UCC significa um cromossomo por camada.	71
Tabela 9 – Erros msMAPE e tempos de execução para tiros sísmicos com diferente número de receptores.	72
Tabela 10 – Erros msMAPE da estimação dos parâmetros e tempos de execução para três tiros sísmicos com tempos de trânsito com a amplitude do ruído limitado a duas faixas.	72
Tabela 11 – Intervalos dos parâmetros Sísmicos da estrutura de camadas curvas e isotrópicas em três dimensões.	77
Tabela 12 – Estrutura com os resultados da estimação para os tiros sísmicos paralelos ao eixo X. A ordem das matrizes está invertida em	

Y, para encaixar na posição dos tiros sísmicos da Figura 30. Por exemplo, a matriz (3; 1) contém os parâmetros do modelo paralelo ao eixo X do quadrado da malha (3;1). 81

Tabela 13 - Estrutura com os resultados da estimação para os tiros sísmicos paralelos ao eixo Y. A ordem das matrizes está invertida em Y, para encaixar na posição dos tiros sísmicos da Figura 30. Por exemplo, a matriz (3 ; 2) contém os parâmetros do modelo paralelo ao eixo Y do quadrado da malha (3 ; 2). 81

Tabela 14 – Erros de estimação das velocidades intervalares, MAPE, para cada modelo sísmico segundo a posição na malha de receptores. 85

Tabela 15 – Erros percentuais absolutos para as componentes em Z de cada vértice das superfícies estimadas, MAPEs, erros máximos e rugosidades para cada superfície de interface construída a partir de modelos sísmicos paralelos ao eixo X. 86

Tabela 16 - Erros percentuais absolutos para as componentes em Z de cada vértice das superfícies estimadas, MAPEs, erros máximos e rugosidades para cada superfície de interface construída a partir de modelos sísmicos paralelos ao eixo Y. 86