



# Inversão de coeficientes de reflexão em meios fraturados usando algoritmo genético

Julio Setsuo Tinen<sup>1</sup>, Ivan Simões Filho<sup>2</sup>, Fernando Neves<sup>3</sup>, João Protázio<sup>4</sup>,  
Jessé Costa<sup>4</sup>

(1) PETROBRAS S/A, (2) UNICAMP, (3) PGS Reservoir, (4) UFPA; Brasil

## Abstract

It is presented here a method for the inversion of multi-azimuthal qP-wave reflection coefficients at an interface separating two anisotropic media with at least one of its planes of symmetry parallel to the interface, i.e., monoclinic or higher symmetries. To illustrate the procedure, we compute qP-wave reflection coefficients at an interface separating anisotropic medium, representing a seal rock, from an anisotropic medium, representing a reservoir rock with vertical aligned fractures.

It was used a global optimization technique (genetic algorithm) to invert the wide-angle AVO from synthetic data, in three azimuths on the data acquisition plane. As result of that technique it was possible to observe that such configuration is the minimum number of acquisition planes and the minimum distance of the far offset required to invert AVO/AVA data is about 45 degrees.

The model space consists of the mass density and five elastic parameters of a transversely isotropic medium presenting a horizontal symmetry axis; such medium represents the fractured reservoir rock. The parameters of the fractured rock are computed using real data from an oil reservoir. There are no prior information on the values of the model space parameters, except for reasonable value of wave velocities in crustal rocks and constraints of elastic stability of solid media. Mild anisotropy is also assumed, i.e., shear waves are slower than compressional waves for any direction of propagation and neither anomalous polarizations nor triplications occur.

After inversion of the model space parameters, statistics of the thirty best models and likelihood functions were computed, and indicate the quality of the AVO/AVA inverse problem.

---

## INTRODUÇÃO

A inversão geofísica tem como objetivo estimar os valores numéricos desconhecidos dos parâmetros do modelo e não propriamente o modelo. Para entendermos como os dados são afetados pelo modelo, devemos calcular os resultados teóricos do modelo assumido, resolvendo assim o problema direto. Como a Terra apresenta grande complexidade e heterogeneidade, as soluções analíticas tornam-se complicadas, o que nos leva a empregar técnicas numéricas na solução desses problemas.

Atualmente, uma nova classe de métodos para resolver os problemas de otimização não linear tem despertado interesse no campo da inteligência artificial. Estes métodos de otimização não dependem de um modelo inicial e pesquisam todo o espaço de modelos, através de um processo aleatório inicial de busca do extremo global de uma função multi-modal.

Os estudos experimentais do algoritmo genético têm mostrado grande eficiência em problemas de otimização que envolvam descontinuidades de funções, ruídos e funções multi-dimensionais. Neste trabalho o AG é utilizado na inversão dos coeficientes de reflexão, simulando um levantamento de três azimutes e afastamentos de um modelo fraturado com óleo, representado por um meio anisotrópico transversalmente isotrópico com eixo de simetria horizontal (TIH), dos quais buscamos estimar os cinco parâmetros elásticos e a densidade. Nenhuma informação *a priori* é introduzida no espaço de modelos dos parâmetros, a não ser o conhecimento da faixa de variação das velocidades e densidade na crosta terrestre e restrições quanto a estabilidade elástica em meios sólidos.

Uma das vantagens desta abordagem, é que a inversão não linear possibilita uma análise estatística completa dos erros e da resolução do modelo. Neste trabalho, ainda é efetuada uma avaliação estatística dos melhores modelos e análise da incerteza dos resultados através da Função de Verossimilhança, mostrando a não unicidade do problema da inversão AVO e AVA (azimute versus amplitude).

## ALGORITMO GENÉTICO

O AG baseia-se nos mecanismos da teoria da seleção natural de Darwin e na genética, e foi desenvolvido a partir da década de 70, na tentativa de simular os processos naturais destas duas áreas. A analogia com a genética fundamenta-se na representação binária de um conjunto de parâmetros como um indivíduo (modelo). Desta forma, na população (espaço de modelos), cada indivíduo é descrito através do seu cromossomo específico, isto é através dos seus genes (parâmetros). Cada parâmetro é representado por uma cadeia de binária (gene), onde cada posição da cadeia é preenchida por um ou zero (alelo – forma alternativa do gene).

O AG faz uso de três processos, análogos ao processo natural de evolução, denominados de operadores genéticos: seleção, cruzamento e mutação. Um grupo de indivíduos é selecionado aleatoriamente da população e os operadores genéticos são aplicados a esta população, resultando em uma nova geração de indivíduos, onde os mais aptos têm maiores chances de estarem presentes nas gerações seguintes. O algoritmo é repetido de forma iterativa, até que a convergência para o extremo global ocorra. O AG atua com um conjunto de parâmetros em vez de tratá-los individual-

mente, com os modelos definidos na forma de conjuntos de cadeias binárias, sendo assim, capaz de representar as características dos modelos originais, permitindo a manipulação direta de toda faixa de variabilidade de cada parâmetro.

O objetivo do operador de seleção é aumentar a chance de reproduzir indivíduos de melhor performance para a próxima geração. Este operador genético nada mais é que a versão artificial da seleção natural de Darwin, onde ocorre sobrevivência dos indivíduos mais aptos (Goldberg, 1989). O cruzamento consiste na troca de parte da cadeia binária entre dois indivíduos, semelhante ao processo natural de *crossover*, onde parte da cadeia de cada indivíduo são trocados entre si, gerando novos indivíduos mais aptos ou não. A mutação é uma alteração da paridade (um ou zero) de um determinado *bit* da cadeia, definido através de uma probabilidade de ocorrência da mutação.

Enquanto a seleção afeta a sobrevivência dos melhores indivíduos entre gerações sucessivas, o cruzamento compartilha as informações entre os indivíduos. O propósito da mutação é garantir uma certa diversidade na população, que seria gradualmente homogeneizada pelos dois processos anteriores e particularmente pode ser útil na introdução de novo "material genético" na nova geração de indivíduos, implicando em uma convergência mais rápida.

A função objetivo mede as diferenças entre os coeficientes de reflexão das ondas compressoriais observados e calculados. Assumindo-se que os erros têm uma distribuição gaussiana, é utilizado a norma L2 para encontrar um modelo ótimo que minimize as diferenças para cada azimuth e ângulo de incidência..

### PARAMETRIZAÇÃO DO ESPAÇO DE MODELOS

O modelo utilizado é de uma rocha capeadora isotrópica, sobreposto à rocha reservatório preenchido por óleo nas fraturas plano paralelas verticais (tabela 1). Esta simulação é realizada com as equações de Schoenberg & Protázio (1992) e os parâmetros equivalentes da rocha fraturada são calculados através da formulação de Hudson (1980,1981).

O espaço de modelos utilizado foi definido em termos dos cinco parâmetros elásticos e densidade equivalente, escolhidos de modo a permitir uma ampla variação de valores compatíveis com que encontramos nas rochas. Desta forma, os valores mínimo e máximo dos parâmetros elásticos foram escolhidos com base nos limites da propagação observável das ondas sísmicas (tabela 2). A cadeia binária tem tamanho 12 ( $2^{12}$  valores possíveis) para o parâmetro elástico e tamanho 7 ( $2^7$  valores) para a densidade, totalizando um espaço de modelos de  $2^{67}$ , aproximadamente,  $10^{20}$  modelos possíveis para este problema.

|  |
|--|
| <p>-----<br/>                 Camada Isotrópica<br/>                 -----<br/> <math>V_p = 2540</math> m/s<br/> <math>V_s = 1490</math> m/s<br/> <math>\rho = 2,25</math> g/cm<sup>3</sup></p>  |
| <p>-----<br/>                 Camada fraturada<br/>                 -----<br/> <math>V_p = 3810</math> m/s<br/> <math>V_s = 2140</math> m/s<br/> <math>\rho = 2,40</math> g/cm<sup>3</sup><br/>                 Densidade do óleo = 0,75 g/cm<sup>3</sup><br/>                 Densidade de Fraturamento = 5 %<br/>                 Razão de Aspecto = 0,05</p>  |
| <p>-----<br/>                 Parâmetros Elásticos Equivalentes<br/>                 (x10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>)<br/>                 -----<br/> <math>C_{11} = 29,52</math> N/m<sup>2</sup><br/> <math>C_{12} = 10,89</math> N/m<sup>2</sup><br/> <math>C_{22} = 34,11</math> N/m<sup>2</sup><br/> <math>C_{44} = 10,99</math> N/m<sup>2</sup><br/> <math>C_{55} = 9,82</math> N/m<sup>2</sup><br/>                 Densidade Equivalente = 2,32 g/cm<sup>3</sup></p> |

Tabela 1 – Modelo de um reservatório da Bacia de Campos e parâmetros do meio equivalente utilizado para gerar os dados observados dos coeficientes de reflexão.

| Parâmetro       | Tamanho da cadeia binária | $\Delta C$<br>x10 <sup>9</sup> [N/m <sup>2</sup> ] | Faixa de variação<br>x10 <sup>9</sup> [N/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|---------------------------|--|---|
| C <sub>11</sub> | 12                        | ± 20,48  | 5,22 – 46,17  |
| C <sub>12</sub> | 12                        | ± 20,48  | -5,00 – 35,95   |
| C <sub>22</sub> | 12                        | ± 20,48  | 5,22 – 46,17  |
| C <sub>44</sub> | 12                        | ± 20,48  | 1,88 – 42,83  |
| C <sub>55</sub> | 12                        | ± 20,48  | 1,88 – 42,83  |
| $\rho_{eq}$     | 7                         | ± 0,64   | 1,61 – 2,88 [g/cm <sup>3</sup> ]                          |

Tabela 2 – Faixa de variação dos parâmetros e codificação binária no espaço dos modelos.

### RESULTADOS

A inversão realizada em função do número de azimutes e ângulo de incidência mostram baixa performance para pequeno número de azimutes e para incidência angular próxima à normal. A medida que estes parâmetros aumentam, os erros decrescem, e a tendência é de que a convergência atinja o valor ótimo procurado. Os resultados mostram que há necessidade de pelo menos três azimutes para uma inversão satisfatória.

O melhor resultado é obtido com três azimutes (0, 45 e 90 graus), incidência máxima de 45 graus e cobertura angular do ângulo de incidência a cada 2 graus, com o valor do erro muito pequena, na ordem de  $10^{-3}$ . A figura 1, compara os dados observados com os dados calculados, exemplificado para o azimuth de 60 graus. Os dados calculados são obtidos através da modelagem direta dos parâmetros do melhor modelo obtido pela inversão. O ajuste para ângulos de incidência inferiores a 45 graus é excelente, correspondendo a faixa de incidência dos dados observados.

Analisando-se a estatística dos 30 melhores resultados para este modelo, notamos que a inversão é bastante robusta para a densidade, bem como para os demais parâmetros elásticos, com pequenos valores de desvio padrão, com exceção do parâmetro C<sub>12</sub>, mesmo assim, com boa performance (Tabela 3).

A descrição da solução não é completa sem a atribuição das incertezas da resposta obtida. A abordagem utilizada neste trabalho é probabilístico, combinando a informação *a priori* do modelo e os dados com a Função Verossimilhança (definida nos termos da função objetivo) de modo a produzir a probabilidade *a posteriori*. A análise completa dos erros, envolveria o cálculo da Função Verossimilhança (FV) para todos modelos possíveis, o que é uma tarefa exaustiva, para um espaço de  $10^{20}$  modelos possíveis. Além disso, a FV é multi-modal de ordem seis, não havendo uma forma analítica simples para analisar este domínio multi-dimensional. O procedimento consiste em analisar cada parâmetro individualmente, dentro dos limites estabelecidos da tabela 2, permanecendo os outros parâmetros fixos. Desta forma são calculados seis funções de probabilidade, sendo cada uma delas, uma “seção” cortando o espaço de modelos multi-dimensional do melhor modelo invertido

A figura 2 mostra os seis parâmetros invertidos no espaço de modelos. Com exceção do parâmetro  $C_{12}$ , que não tem uma inflexão bem definida, os demais parâmetros têm a moda bem definida, o que é atestado pelo valor alto do desvio padrão da tabela 3. As curvas mostram que os parâmetros densidade e  $C_{22}$  têm a moda muito bem definida, indicando que estes parâmetros estão bem definidos pela inversão AVO e AVA. Podemos notar o caráter bimodal do parâmetro  $C_{55}$ , evidenciando que um processo linearizado de inversão poderia ser trapeado em um mínimo local, a depender da escolha do modelo inicial, mostrando que a técnica de otimização global de inversão é mais adequada para a inversão multi-azimutal dos coeficientes de reflexão quando comparada aos algoritmos linearizados.

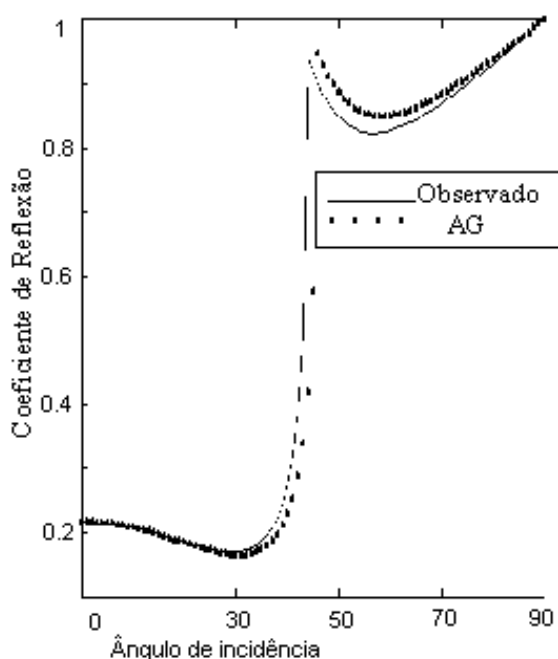


Figura 1 – Coeficiente de reflexão versus ângulo de incidência. Comparação entre os dados observados e calculados. Os dados calculados são obtidos através da modelagem direta dos parâmetros do melhor modelo invertido. Exemplo para o azimute de 60 graus.

|                               | $\rho$ | $C_{11}$ | $C_{12}$ | $C_{22}$ | $C_{44}$ | $C_{55}$ |
|-------------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| MODELO ORIGINAL               | 2,32   | 29,32    | 10,89    | 34,11    | 10,99    | 9,82     |
| Melhor resultado invertido    | 2,32   | 29,49    | 10,99    | 34,11    | 11,05    | 9,83     |
| Média dos melhores resultados | 2,32   | 29,48    | 10,96    | 34,15    | 11,04    | 9,83     |
| Desvio Padrão                 | 0,00   | 0,016    | 0,037    | 0,009    | 0,007    | 0,015    |

Tabela 3 – Comparação entre os parâmetros do modelo original e os parâmetros do melhor modelo invertido. Na primeira linha temos os parâmetros do modelo original comparados com os 30 melhores resultados da inversão.

## CONCLUSÕES

O algoritmo genético demonstrou ser bastante robusto na inversão dos coeficientes de reflexão. O AG é apropriado nas mais diversas áreas onde a solução do problema inverso dependa de muitos parâmetros, ou seja em inversões altamente não lineares, particularmente na área de reservatórios, onde a estimativa das suas propriedades é de fundamental importância.

Verifica-se que menos de três azimutes são insuficientes para suportar uma inversão AVO e AVA, e que baixos ângulos de incidência também não contribuem para uma melhor performance dos valores da função objetivo.

A simples análise do valor da função objetivo não satisfaz a solução do problema de inversão. Pela característica não determinística deste processo de inversão, os resultados devem ser avaliados segundo o grau de incerteza associado à solução da inversão. A análise probabilística indica que alguns dos parâmetros invertidos obtidos possuem mínimos locais que não seriam bem resolvidos usando por exemplo, uma técnica linear de inversão. Isto demonstra que a técnica de otimização global de inversão é mais adequada para a inversão multi-azimutal dos coeficientes de reflexão.

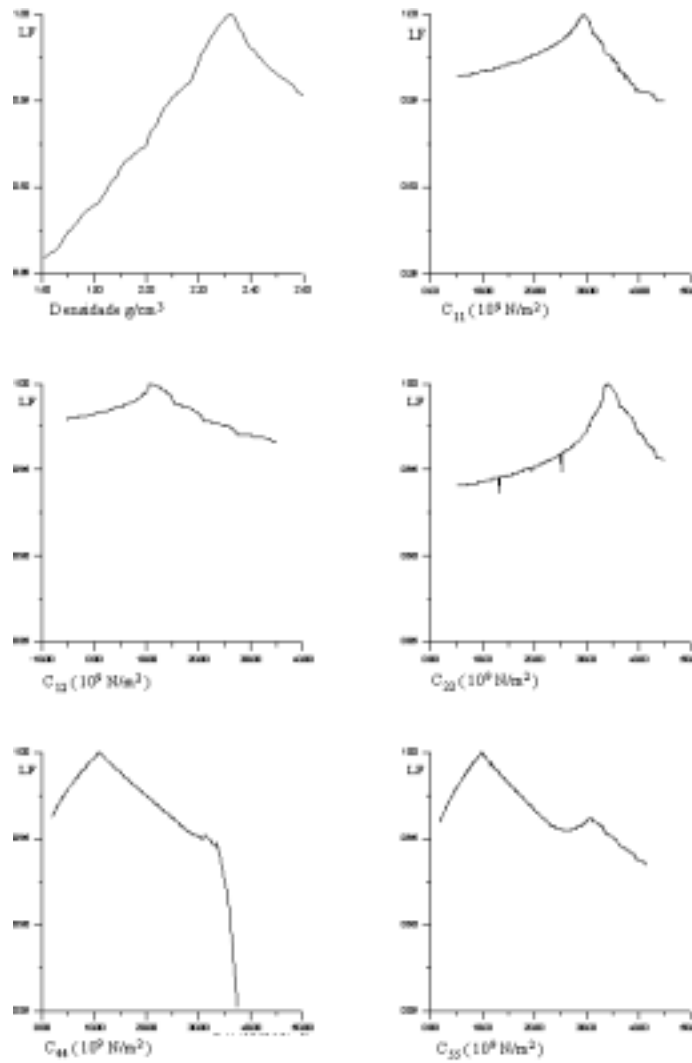


Figura 2 – Função Verossimilhança para os seis parâmetros elásticos e densidade invertidos.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Goldberg, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Reading, MA.

Holland, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor.

Hudson, J. <sup>a</sup>, 1980. Overall properties of a cracked solid. *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, 88, 371-384

Hudson, J.<sup>a</sup>, 1981. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 64, 133-150.

Schoenberg, M. & Protázio, J. S., 1992. 'Zoeppritz' rationalized and generalized to anisotropy. *Journal of Seismic Exploration*, 1, 125-144.

Sen, M. & Stoffa, P. L., 1995. *Global optimization methods in geophysical inversion*. Institute for geophysics, The University of Texas at Austin. *Advances in Exploration Geophysics*.

Tinen, J. S., 1998. *Modelagem e inversão de coeficientes de reflexão em meios fraturados usando algoritmo genético*. Tese de mestrado, UNICAMP, Campinas, SP.