



Eugênio da Silva

**Ajuste de Histórico em Modelos de Simulação
de Reservatórios por Algoritmos Genéticos e
Geoestatística de Múltiplos Pontos**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Marco Aurélio C. Pacheco

Rio de Janeiro
Abril de 2011



Eugênio da Silva

**Ajuste de Histórico em Modelos de Simulação
de Reservatórios por Algoritmos Genéticos e
Geoestatística de Múltiplos Pontos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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.

Prof. Marco Aurélio C. Pacheco

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Célio Maschio

Departamento de Engenharia de Petróleo – UNICAMP

Prof. Marco Antonio Cardoso

CENPES – Petrobras

Prof. Ricardo Alexandre Passos Chaves

UO-RIO – Petrobras

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. André Vargas Abs da Cruz

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de Abril de 2011

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

Eugênio da Silva

Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Ouro Preto e Mestre em Sistemas e Computação pelo Instituto Militar de Engenharia.

Ficha Catalográfica

Silva, Eugênio da

Ajuste de Histórico em Modelos de Simulação de Reservatórios por Algoritmos Genéticos e Geoestatística de Múltiplos Pontos / Eugênio da Silva; orientador: Marco Aurélio C. Pacheco. – 2011.

124 f. il. (color) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.
Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Ajuste de Histórico. 3. Algoritmos Genéticos. 4. Geoestatística Multiponto. I. Pacheco, Marco Aurélio C.. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À Vovó Luzia (*in memoriam*).

Agradecimentos

A Deus por sempre me proteger, iluminar meus passos e me guiar pelo caminho certo.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro para a realização deste trabalho.

À PUC-Rio, especialmente ao DEE, pela oportunidade de aprimorar minha formação acadêmica em uma instituição de tanto prestígio.

Ao Prof. Marco Aurélio pela orientação e pela oportunidade de poder fazer parte da equipe do Laboratório ICA.

À Petrobras, pelo incentivo ao projeto SMART E&P, do qual este trabalho faz parte, aos funcionários Alexandre Emerick (CENPES), Daniel Brito (CENPES) e Luis Carlos da Silva (CENPES) pelo fornecimento de material para a realização do trabalho e, especialmente, ao funcionário Ricardo Chaves (UO-RIO) pelos ensinamentos sobre reservatórios.

À amiga e colega de trabalho Dilza pela sua competência, boa vontade e, sobretudo, pelo entusiasmo com que sempre discutia comigo os rumos do trabalho.

Aos demais amigos do Laboratório ICA, que fazem dele um ambiente de constante aprendizagem.

À minha namorada Soraia pelo carinho, apoio incondicional e, sobretudo, pela paciência que sempre teve comigo nos meus momentos de irritação e desânimo.

Aos meus amigos de apartamento, Donizeti e Onerino, pela ótima convivência ao longo de muitos anos.

À minha família que, mesmo distante, é sempre presente e me incentiva a conquistar todas as minhas metas.

Resumo

Silva, Eugênio da; Pacheco, Marco Aurélio C., **Ajuste de Histórico em Modelos de Simulação de Reservatórios por Algoritmos Genéticos e Geoestatística de Múltiplos Pontos**. Rio de Janeiro, 2011. 124p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Na área de Exploração e Produção (E&P) de petróleo, o estudo minucioso das características de um reservatório é imperativo para a criação de modelos de simulação que representem adequadamente as suas propriedades petrofísicas. A disponibilidade de um modelo adequado é fundamental para a obtenção de previsões acertadas acerca da produção do reservatório, e isso impacta diretamente a tomada de decisões gerenciais. Devido às incertezas inerentes ao processo de caracterização, ao longo da vida produtiva do reservatório, periodicamente o seu modelo de simulação correspondente precisa ser ajustado. Todavia, a tarefa de ajustar as propriedades do modelo se traduz em um problema de otimização complexo, onde o número de variáveis envolvidas é tão maior quanto maior for a quantidade de blocos que compõem a malha do modelo de simulação. Na maioria das vezes esses ajustes envolvem processos empíricos que demandam elevada carga de trabalho do especialista. Esta pesquisa investiga e avalia uma nova técnica computacional híbrida, que combina Algoritmos Genéticos e Geoestatística Multiponto, para a otimização de propriedades em modelos de reservatórios. Os resultados obtidos demonstram a robustez e a confiabilidade da solução proposta, uma vez que, diferentemente das abordagens tradicionalmente adotadas, é capaz de gerar modelos que não apenas proporcionam um ajuste adequado das curvas de produção, mas também que respeitam as características geológicas do reservatório.

Palavras-chave

Ajuste de Histórico; Algoritmos Genéticos; Geoestatística Multiponto.

Abstract

Silva, Eugênio da; Pacheco, Marco Aurélio C., **History Matching in Reservoir Simulation Models by Genetic Algorithms and Multiple-Point Geostatistics**. Rio de Janeiro, 2011. 124p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the Exploration and Production (E&P) of oil, the detailed study of reservoir characteristics is imperative for the creation of simulation models that adequately represent their petrophysical properties. The availability of an appropriate model is fundamental to obtaining accurate predictions about the reservoir production. In addition, this impacts directly the management decisions. Due to the uncertainties inherent in the characterization process, along the productive period of the reservoir, its corresponding simulation model needs to be matched periodically. However, the task of matching the model properties represents a complex optimization problem. In this case, the number of variables involved increases with the number of blocks that make up the grid of the simulation model. In most cases these matches involve empirical processes that take too much time of an expert. This research investigates and evaluates a new hybrid computer technique, which combines Genetic Algorithms and Multipoint Geostatistics, for the optimization of properties in reservoir models. The results demonstrate the robustness and reliability of the proposed solution. Unlike traditional approaches, it is able to generate models that not only provide a proper match of the production curves, but also satisfies the geological characteristics of the reservoir.

Keywords

History Matching; Genetic Algorithms; Multiple-Point Geostatistics.

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Contexto Geral	13
1.2	Motivações	14
1.3	Objetivos	15
1.4	Organização do Trabalho	16
2	Engenharia de Reservatórios	18
2.1	Exploração de Petróleo	18
2.2	Reservatórios	18
2.3	Caracterização de Reservatórios	22
2.4	Estimativa da Reserva	24
3	Revisão Bibliográfica	27
3.1	Ajuste de Histórico	27
3.2	Abordagens para o Ajuste de Histórico	29
4	Fundamentação Teórica	38
4.1	Geoestatística	38
4.2	Inteligência Computacional	53
5	Modelo de Solução	62
5.1	Considerações Iniciais	62
5.2	Representação da Solução	62
5.3	Função Objetivo	64
5.4	Geração da População Inicial	64
5.5	Descrição dos Operadores Genéticos	67
5.6	Características do Modelo de Solução	71
5.7	Detalhes de Implementação	72
6	Estudo de Casos	85
6.1	Caso 1 - Modelo Xadrez	85
6.2	Caso 2 - Modelo PUNQ-S3	96
7	Considerações Finais	105
7.1	Conclusões	105
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	106
7.3	Sistema <i>OCTOPUS 2.0</i>	108
A	Especificação dos Arquivos do <i>SGeMS</i>	118
A.1	Arquivo <i>.gslib</i> para <i>set point</i>	118
A.2	Arquivo <i>.gslib</i> para <i>cartesian grid</i>	119
A.3	<i>Script Python</i> para o <i>FILTERSIM</i>	119
B	Algoritmo de <i>Lloyd</i>	122
B.1	Análise de Grupos	122

Lista de figuras

2.1	Reservatório de petróleo	19
2.2	Representação de uma rocha porosa	20
2.3	Representação de uma rocha permeável	21
2.4	Escoamento de um fluido em meio poroso	22
3.1	Progresso do ajuste de histórico assistido (<i>Adaptado de Schulze-Riegert e Ghedan, 2007</i>)	29
4.1	Distribuições de pontos diferentes com os mesmos valores de média e de variância (<i>Fonte: Chambers, 2000</i>)	38
4.2	Estimação do ponto x_0 por <i>krigagem</i>	42
4.3	Mapa construído através de <i>krigagem</i>	42
4.4	Fluxograma da simulação sequencial	44
4.5	Imagens de treinamento para propriedades categórica e contínua (<i>Fonte: Switzer, 2008</i>)	47
4.6	Filtros a serem aplicados à imagem de treinamento (<i>Adaptado de Switzer, 2008</i>)	49
4.7	Aplicação do filtro à imagem de treinamento (<i>Adaptado de Switzer, 2008</i>)	50
4.8	Particionamento das distribuições de frequência	51
4.9	Padrões pertencentes a uma classe e seu protótipo correspondente (<i>Adaptado de Switzer, 2008</i>)	51
4.10	Fluxograma da etapa de classificação do algoritmo <i>FILTERSIM</i>	52
4.11	Fluxograma da etapa de simulação do algoritmo <i>FILTERSIM</i>	54
4.12	Roleta de seleção dos indivíduos mais aptos	57
4.13	Operador clássico de cruzamento	58
4.14	Operador clássico de mutação	58
4.15	Fluxograma de um algoritmo genético clássico	59
5.1	Fluxograma do modelo de solução	63
5.2	Representação e decodificação do cromossomo	63
5.3	Fluxograma de geração da população inicial	66
5.4	Geração da população inicial	66
5.5	Operador de cruzamento	68
5.6	Operador de mutação	68
5.7	Fluxograma de cálculo da taxa de anulação adaptativa	70
5.8	Distribuição das taxas de anulação em uma camada do reservatório	71
5.9	Arquitetura do sistema <i>OCTOPUS 2.0</i>	73
5.10	Exemplo da geração de um indivíduo da população inicial	77
5.11	Exemplo da aplicação do operador de cruzamento	78
5.12	Exemplo da aplicação do operador de mutação	79
5.13	Grade e dados condicionantes nulos criados no <i>SGeMS</i>	80
5.14	Imagem de treinamento criada no <i>SGeMS</i>	81
5.15	Resultado da reconstrução do indivíduo da população inicial	82

5.16	Resultado da reconstrução dos indivíduos submetidos ao operador de cruzamento	82
5.17	Resultado da reconstrução do indivíduo submetido ao operador de mutação	82
5.18	Fluxograma do módulo de avaliação	84
6.1	Mapa de permeabilidade e posições dos poços do modelo Xadrez	85
6.2	Mapa de permeabilidade de cada camada do caso base do modelo Xadrez	87
6.3	Curvas de produção de água dos casos alvo e base do modelo Xadrez	88
6.4	Imagem de treinamento para o modelo Xadrez	90
6.5	Curvas de produção de água dos casos alvo e otimizado do modelo Xadrez	94
6.6	Mapa de permeabilidade do caso otimizado do modelo Xadrez	95
6.7	Curva de evolução do algoritmo genético para o modelo Xadrez	96
6.8	Distribuição dos poços produtores no modelo PUNQ-S3	97
6.9	Mapa de permeabilidade vertical de cada camada do modelo PUNQ-S3	98
6.10	Mapa de permeabilidade vertical do caso base do modelo PUNQ-S3	99
6.11	Curvas de produção de água dos casos alvo e base do modelo PUNQ-S3	100
6.12	Imagem de treinamento para o modelo PUNQ-S3	101
6.13	Curvas de produção de água dos casos alvo e otimizado do modelo PUNQ-S3	103
6.14	Mapa de permeabilidade vertical do caso otimizado do modelo PUNQ-S3	104
6.15	Curva de evolução do algoritmo genético para o modelo PUNQ-S3	104
B.1	Fluxograma do algoritmo de <i>Lloyd</i>	124

