

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Bruno Messer

**Projeto de Poços Multilaterais em Reservatórios de
Petróleo Otimizados por Algoritmos Genéticos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Marco Aurélio C. Pacheco
Co-Orientadora: Luciana Faletti Almeida

Rio de Janeiro
Agosto de 2008



Bruno Messer

Projeto de Poços Multilaterais em Reservatórios de Petróleo Otimizados por Algoritmos Genéticos

Dissertação 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 C. Pacheco

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dra. Luciana Faletti Almeida

Co-Orientadora

CEFET/RJ

Dr. Leandro Costa Reis

Petrobras

Dr. Carlos Fernando Fontenelle Dumans

Petrobras

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de Agosto de 2009

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

Bruno Messer

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2007. Desenvolveu junto com seus orientadores diversos projetos voltados para a indústria.

Ficha Catalográfica

Messer, Bruno

Projeto de poços multilaterais em reservatórios de petróleo otimizados por algoritmos genéticos / Bruno Messer ; orientadores: Marco Aurélio C. Pacheco, Luciana Faletti Aalmeida. – 2009.

146 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Otimização. 3. Algoritmos genéticos. 4. Reservatório de petróleo. 5. Poços multilaterais. 6. Fator de recuperação. I. Pacheco, Marco Aurélio C.. II. Almeida, Luciana Faletti. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Para meus pais.

Agradecimentos

Aos meus Orientadores Prof. Marco Aurélio Pacheco e Luciana Faletti Almeida pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

À Dra. Dilza de Mattos Szwarcman, Prof. Eugênio Silva e Dr. Omar Paranaíba Vilela Neto pelos conhecimentos e sugestões fornecidas durante o desenvolvimento do trabalho.

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

À Petrobras pelo apoio técnico.

Ao ICA pelo conhecimento e treinamento.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam e ajudaram.

Resumo

Messer, Bruno; Pacheco, Marco Aurélio C. **Projeto de Poços Multilaterais em Reservatórios de Petróleo Otimizados por Algoritmos Genéticos**. Rio de Janeiro, 2009. 146p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos fatores mais importantes para recuperação de óleo de reservatórios petrolíferos é a configuração dos poços. Atualmente, na indústria, esse processo é feito de forma manual onde um especialista gera algumas poucas opções de configurações e utiliza a de melhor resultado. Este trabalho se propõe a investigar um sistema de apoio à decisão para otimizar a configuração dos poços utilizando Algoritmos Genéticos e o simulador de reservatórios IMEX. Os parâmetros otimizados são: o número de poços produtores e injetores, a posição, a inclinação, a direção e o comprimento de cada poço, o número de laterais de cada poço e o ponto da junta, a inclinação relativa ao poço, a direção e o comprimento de cada lateral. Na busca pela configuração ótima dos poços, o objetivo da otimização é minimizar o investimento inicial, minimizar a produção de água e maximizar a produção de óleo buscando maximizar o VPL do empreendimento. A otimização é conduzida respeitando as restrições de projeto, dadas por um engenheiro, e restrições de simulação, dadas pelo próprio modelo de reservatório. O modelo proposto foi avaliado utilizando-se sete reservatórios. Cinco destes são sintéticos cujas configurações ótimas são conhecidas, um semi-sintético e um reservatório real. Foram conduzidos testes de convergência onde o modelo se mostrou capaz de localizar e otimizar as zonas produtoras, chegando à alternativa ótima até 80% das vezes. Nos últimos dois reservatórios os resultados indicam que o sistema consegue encontrar configurações de poços com altos valores de VPL, superiores a soluções propostas por especialistas e por outros sistemas de otimização, com ganhos de VPL de até 37% sobre a alternativa proposta por um especialista para o reservatório real.

Palavras-chave

Otimização; Algoritmos Genéticos; Reservatório de Petróleo; Poços multilaterais; Fator de Recuperação.

Abstract

Messer, Bruno; Pacheco, Marco Aurélio C. (Advisor). **Multilateral Wells Design in Oil Reservoir through Genetic Algorithms Optimization**. Rio de Janeiro, 2009. 146p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the most important factors for recovering oil from oil reservoirs is the wells' configuration. Now a days, on the industry, this process is conducted manually, where a specialist generates a few configuration options and uses the best one with best results. This work proposes to investigate a decision support system to optimize the wells' configuration using Genetic Algorithms and the reservoir simulator IMEX. The optimized parameters include: the number of producers and injectors wells, the position, the inclination, the direction and the length of each well, the number of laterals for each well and the junction point, the inclination relative to the well and the length of each lateral. On the search of the optimal configuration of wells, the objective of the optimization is to minimize the initial investment, minimize the water production and maximize the oil production towards the maximization of the venture's NPV. The optimization is conducted respecting the project's restrictions, stated by an engineer, and the simulation's restrictions, imposed by the reservoir model. The optimization model proposed was evaluated using seven reservoirs. Five of them are synthetic which the optimum well's configuration are known, one semi-synthetic and one real reservoir. Convergence tests were conducted where the model confirmed to be able to locate and optimize the production zones, achieving the optimum alternative 80% of the times. On the last two reservoirs the results indicate that the system was able to achieve well configurations with high values of NPV, superiors from solutions given by specialists and by other optimization systems, with NPV's increase reaching 37% over the specialist's purposed alternative for the real reservoir case.

Keywords

Optimization; Genetic Algorithms; Oil Reservoir; Multilateral Wells; Recovery Factor.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Motivação	15
1.2.	Objetivos	16
1.3.	Descrição da Dissertação	17
1.4.	Organização da Dissertação	19
2	Planos de Desenvolvimento com Poços Multilaterais	20
2.1.	Introdução	20
2.2.	Poços de Petróleo	21
2.2.1.	Poços Verticais	23
2.2.2.	Poços Direcionais	24
2.2.3.	Poços Multilaterais	26
2.3.	Reservatórios de Petróleo	32
2.3.1.	Características	33
2.3.2.	Modelagem e Simulação	33
2.3.3.	Restrições	35
3	Otimização Evolucionária de Problemas com Restrição	44
3.1.	Introdução	44
3.2.	Algoritmos Genéticos	44
3.2.1.	Representação	46
3.2.2.	Avaliação	47
3.2.3.	Operadores	48
3.2.4.	Parâmetros da Evolução	49
3.2.5.	Tratamento de Restrições	51
4	Modelo de Otimização da Quantidade, Localização, Tipo e Geometria de Poços de Petróleo incluindo Poços Multilaterais	55
4.1.	Introdução	55
4.2.	Representação do Cromossomo	58
4.2.1.	Representação 1	64

4.2.2. Representação 2	65
4.2.3. Representação 3	68
4.2.4. Representação 4	69
4.3. Geração da População Inicial	72
4.4. Operadores Genéticos	76
4.5. Função de Avaliação	83
4.5.1. Decodificação e Validação do Cromossomo	84
4.5.2. Geração das Curvas de Produção	88
4.5.3. Cálculo da Função de Avaliação	90
4.6. Considerações de Implementação	95
5 Estudo de Casos	96
5.1. Definição dos Reservatórios	96
5.2. Testes Realizados	102
5.2.1. Comparativo Entre Representações	102
5.2.2. Validação da Representação Seleccionada	105
5.2.3. Testes com Modelo Heterogêneo	114
5.2.4. Testes com Modelo Real	121
6 Conclusão e Trabalhos Futuros	131
7 Referências Bibliográficas	134
8 Apêndice A	137
8.1. Reservatório 2	137
8.2. Reservatório 3	139
8.3. Reservatório 4	141
8.4. Reservatório 5	144

Lista de Figuras

Figura 1. Pontos básicos de uma trajetória de poço direcional (ROCHA 2008)	22
Figura 2. Poço Vertical	23
Figura 3. (a) um <i>five spot</i> . (b) série de <i>five spots</i> .	24
Figura 4. (a) Poço tipo I. (b) Poço tipo II. (c) Poço tipo III.	25
Figura 5. Comprimento exposto ao reservatório	26
Figura 6. Classificação de junções de acordo com TAML	29
Figura 7. Geometria de poços multilaterais (ROCHA 2008)	30
Figura 8. Pontos de interesse de poços multilaterais	31
Figura 9: Disposição dos fluidos em reservatório de petróleo	32
Figura 10. Malha de duas e três dimensões, (a) e (b) respectivamente.	34
Figura 11. Restrições do tipo região nula	36
Figura 12. Restrição do tipo sem completação	37
Figura 13. Restrição do tipo dupla completação	37
Figura 14. Restrição de domínio do reservatório	38
Figura 15. Restrição de distância entre poços	39
Figura 16. Restrição de poço ascendente	39
Figura 17. Restrição de ângulo máximo de saída de lateral	40
Figura 18. Restrição de ângulo mínimo de lateral	41
Figura 19. Restrição de distância mínima entre pontos de saída de laterais para mesma direção	41
Figura 20. Restrição de distância mínima de saídas de laterais para direções diferentes	42
Figura 21. Fluxo básico de um algoritmo genético.	46
Figura 22. Cruzamento de um Ponto.	48
Figura 23. Mutação.	49
Figura 24. Procedimento GACOM com Restrições – Construção de indivíduos válidos.	53
Figura 25. Procedimento GACOM com Restrições – Representação gráfica.	53
Figura 26. GACOM com Restrições – Diagrama do procedimento com múltiplos segmentos	54
Figura 27. Diagrama do modelo evolucionário	58

Figura 28. Poços no <i>grid</i> . (a) Poço com lateral do tipo paralela. (b) Poço com lateral do tipo perpendicular. (c) Poço com lateral do tipo diagonal. (d) Poço com lateral formando poço curvo.	60
Figura 29. Pontos utilizados na representação 1.	64
Figura 30. Cromossomo da representação 1.	65
Figura 31. Cromossomo da representação 2.	66
Figura 32. Validação de laterais.	67
Figura 33. Pontos utilizados na representação 3.	68
Figura 34. Cromossomo da representação 3.	68
Figura 35. Cromossomo da representação 4.	70
Figura 36. Tratamento de número de laterais por índice.	71
Figura 37. Variáveis sorteadas no poço principal	73
Figura 38. Criação de poço válido	74
Figura 39. Geração de alternativa válida	75
Figura 40. Cruzamento de um ponto.	78
Figura 41. Cruzamento de dois pontos.	78
Figura 42. Cruzamento de ponto inicial por fenótipo (a) e por genótipo (b)	79
Figura 43. Mutação uniforme por fenótipo (a) e por genótipo (b)	81
Figura 44. Cruzamento entre população de busca e referência por fenótipo (a) e por genótipo (b).	83
Figura 45. Decodificação de poços multilaterais	86
Figura 46. Decodificação de um cromossomo	88
Figura 47. Codificação de poços no formato IMEX	89
Figura 48. Diagrama de pontos para cálculo do VPL	90
Figura 49. Saturação de óleo na segunda camada do Reservatório 1.	97
Figura 50. Saturação de óleo do Reservatório 2.	98
Figura 51. Saturação de óleo do Reservatório 3.	98
Figura 52. Saturação de óleo do Reservatório 4.	99
Figura 53. Saturação de óleo do Reservatório 5.	100
Figura 54. Modelo em 3D do mapa de porosidade do Reservatório 6	101
Figura 55. Vista superior da primeira camada do Reservatório 7.	102
Figura 56. Zonas produtoras.	103
Figura 57. Evolução da melhor rodada com o reservatório 2	106
Figura 58. Evolução das melhores rodadas com o reservatório 3	107

Figura 59. Cromossomos ótimos das melhores rodadas do Reservatório 3	108
Figura 60. Evolução da melhor rodada com o reservatório 4	109
Figura 61. Evolução da melhor rodada com o reservatório 5	110
Figura 62. Cromossomo ótimo da melhor rodada do Reservatório 5	110
Figura 63. Ótimo local durante a evolução do Reservatório 3	113
Figura 64. Ótimo local durante a evolução do Reservatório 5	113
Figura 65. Melhor indivíduo da geração 13 da evolução do Reservatório 5	113
Figura 66. Vista 3D do caso base (a) e da alternativa otimizada (b)	116
Figura 67. Curvas de produção para o caso base e alternativa otimizada para o Reservatório 6.	117
Figura 68. Curvas de evolução sem laterais (a) e com laterais (b).	119
Figura 69. Vista 3D das alternativas otimizadas sem laterais (a) e com laterais (b).	119
Figura 70. Vista 3D das alternativas de (TÚPAC 2005). Solução sem semente inicial (a), solução com semente inicial (b) e solução com mapa de qualidade (c).	120
Figura 71. Curvas de produção para comparação com (TÚPAC 2005).	121
Figura 72. Evoluções do Reservatório 7. Sem a opção de laterais (a). Com a opção de laterais (b).	123
Figura 73. Resultados gráfico da produção de óleo das alternativas do Reservatório 7	124
Figura 74. Projeções das alternativas no reservatório. Caso base (a), sem laterais (b), com laterais (c)	125
Figura 75. Evoluções do Reservatório 7 com parâmetros modificados. Sem a opção de laterais (a). Com a opção de laterais (b).	127
Figura 76. Resultados gráfico da produção de óleo do caso base e das alternativas otimizadas para comparação com (EMERICK 2009).	128
Figura 77. Projeção das alternativas no reservatório. Caso base (a), sem laterais (b), com laterais (c)	129

Lista de Tabelas

Tabela 1. Classificação da trajetória em função do raio (ROCHA 2008).	25
Tabela 2. Interpretação dos Tipos de Lateral.	87
Tabela 3. Propriedades do Reservatório 1.	96
Tabela 4. Propriedades do Reservatório 2.	97
Tabela 5. Propriedades do Reservatório 3.	99
Tabela 6. Propriedades do Reservatório 4.	100
Tabela 7. Propriedades do Reservatório 5.	100
Tabela 8. Propriedade do reservatório 6.	101
Tabela 9. Propriedades do reservatório 7.	102
Tabela 10. Resultados da comparação entre representações.	103
Tabela 11. Resultados gerais da comparação entre representações	104
Tabela 12. Parâmetros das evoluções do Reservatório 1.	104
Tabela 13. Parâmetros gerais para os reservatórios 2, 3, 4 e 5	105
Tabela 14. Parâmetros da otimização do reservatório 2.	106
Tabela 15. Resultados do reservatório 2.	106
Tabela 16. Parâmetros da otimização do reservatório 3.	107
Tabela 17. Resultados do reservatório 3	107
Tabela 18. Parâmetros da otimização do reservatório 4	108
Tabela 19. Resultados do reservatório 4	108
Tabela 20. Parâmetros da otimização do reservatório 5	109
Tabela 21. Resultados do reservatório 5	109
Tabela 22. Parâmetros de teste com e sem laterais no Reservatório 6.	114
Tabela 23. Resultados de teste com e sem laterais no Reservatório 6.	114
Tabela 24. Comparação caso base com alternativa otimizada para o Reservatório 6.	116
Tabela 25. Parâmetros utilizados para comparação com (TÚPAC 2005).	118
Tabela 26. Resultados para comparação com (TÚPAC 2005).	120
Tabela 27. Parâmetros da otimização do Reservatório 7	122
Tabela 28. Resultados da comparação com caso base do Reservatório 7.	123

Tabela 29. Parâmetros utilizados para comparação com soluções alcançadas em (EMERICK 2009). 126

Tabela 30. Resultados para comparação com soluções alcançadas em (EMERICK 2009). 128