

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Luciana Faletti Almeida**

**Sistema Híbrido de Otimização de Estratégias de Controle  
de Válvulas de Poços Inteligentes sob Incertezas**

**Tese de Doutorado**

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

Orientadores: Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco  
Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco

Rio de Janeiro  
Junho de 2007



**Luciana Faletti Almeida**

## **Sistema Híbrido de Otimização de Estratégias de Controle de Válvulas de Poços Inteligentes sob Incertezas**

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

**Dr. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco**  
Orientador, PUC-Rio

**Dra. Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco**  
Orientadora, PUC-Rio

**Dr. Yván Jesús Túpac Valdivia**  
ELE/ PUC-Rio

**Dr. Juan Guillermo Lazo Lazo**  
ELE/ PUC-Rio

**Dr. Denis José Schiozer**  
UNICAMP

**Dr. Antônio Carlos Bittencourt de Andrade Filho**  
PETROBRÁS

**Dr. Luiz Satoru Ochi**  
UFF

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 Junho de 2007

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

### **Luciana Faletti Almeida**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro) em 1999. Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2003, tendo como área de concentração: Métodos de apoio à Decisão e como linha de pesquisa: Inteligência Computacional. Desenvolveu junto com seus orientadores diversos projetos voltados para a indústria.

### Ficha Catalográfica

Almeida, Luciana Faletti

Sistema híbrido de otimização de estratégias de controle de válvulas de poços inteligentes sob incertezas / Lucia Faletti Almeida; orientadores: Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco, Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco. – 2007.

146 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Otimização. 3. Algoritmos genéticos. 4. Computação evolucionária. 5. Engenharia de reservatórios. 6. Campos de petróleo inteligentes. 7. Tratamento de incertezas. I. Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti II. Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuszi. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Para meu amado filho Giovanni Faletti Almeida.

## Agradecimentos

Aos meus orientadores: professores Marco Aurélio C. Pacheco e Marley M. B. R. Vellasco pelo apoio na realização deste trabalho.

À CAPES e FAPERJ pelo auxílio financeiro concedido.

Aos engenheiros Ricardo Portella e Alexandre Emerick do CENPES/PETROBRAS pelas valiosas sugestões durante a realização deste trabalho.

À corporação *Computer Modelling Group* (CMG) pelo suporte concedido no software simulador de reserva petrolífera CMG/IMEX.

Aos meus queridos pais Dante Roberto Faletti e Marly Weber Faletti, por todo amor, dedicação e confiança.

A minha querida tia Terezinha Marturelli Weber pelo seu amor e eterna dedicação.

Ao meu querido marido Alexandre de Castro Almeida, pelo seu amor, confiança e paciência.

Aos queridos irmãos, Leonora, Leonardo, Simone e Mauricio.

Aos amigos do ICA pelo apoio e amizade oferecidos.

Aos queridos amigos André Vargas Abs da Cruz, Dilza Szwarcman, Juan Lazo Lazo, Karla Figueiredo, Yván Jesús Túpac Valdivia.

Ao pessoal de suporte técnico e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

## Resumo

Almeida, Luciana Faletti; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi. **Sistema Híbrido de Otimização de Estratégias de Controle de Válvulas de Poços Inteligentes sob Incertezas**. Rio de Janeiro, 2007. 146p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A atividade de gerenciamento de reservatórios é uma tarefa essencial que visa o desafio da otimização da exploração de reservatórios de petróleo. Como resposta a tal desafio a indústria de óleo e gás vem desenvolvendo novas tecnologias, como a de poços inteligentes. Esses poços tem objetivo de baratear as operações de restaurações mais corriqueiras através do controle de sua tecnologia. Assim, este trabalho trata do desenvolvimento de campos inteligentes e apresenta um sistema de apoio à decisão capaz de otimizar, através de algoritmos evolucionários, o processo de controle da tecnologia de poços inteligentes considerando incertezas de falha e geológica. Além disso, o sistema se propõe a apoiar na tomada de decisão pelo uso ou não de poços inteligentes, dado um reservatório pronto para ser explorado ou para receber investimentos de expansão. O controle da tecnologia de poços inteligentes (IWT - *Intelligent Wells Technology*) empregado nesse estudo, refere-se à operação de abertura e fechamento dos dispositivos (válvulas) existentes nesses tipos de poços. Através da otimização com algoritmos genéticos se busca uma estratégia de controle pró-ativo, em outras palavras, agir antes do efeito, onde se busca nos tempos iniciais de produção uma configuração de válvulas que seja capaz de: atrasar a chegada da frente de água aos poços produtores, antecipar a produção de óleo ou melhorar a recuperação de óleo do campo; em consequência, uma operação que leve à maximização do valor presente líquido (VPL). O emprego de estratégias de controle que visam beneficiar a completação identifica o campo como inteligente. Outros trabalhos abordam o problema de otimização de controle de válvulas em poços inteligentes, porém eles utilizam métodos clássicos de otimização que limitam o número de válvulas ou ainda otimizam estratégias sem considerar os intervalos de tempo desejados para manutenção das válvulas. O modelo evolucionário empregado nesse estudo, baseado em algoritmos genéticos, consegue formular uma estratégia de controle para todas as válvulas presentes em uma determinada configuração de

produção, em qualquer intervalo de tempo desejado, atendendo ao critério econômico de maximizar o VPL. Para apoiar a tomada de decisão, pelo uso ou não de poços inteligentes, consideram-se incertezas de falha e geológica. O modelo proposto foi avaliado em três reservatórios petrolíferos, sendo o primeiro um reservatório sintético, e os outros dois reservatórios mais complexos com características mais próximas das reais. Os resultados encontrados indicam que o modelo proposto permite alcançar boas estratégias de controle que levam a um aumento do VPL. A principal contribuição deste trabalho é a concepção e implementação de um sistema baseado em técnicas inteligentes capaz de apoiar no desenvolvimento e gerenciamento de reservatórios petrolíferos inteligentes considerando incertezas.

### **Palavras-chave**

Otimização, Algoritmos Genéticos, Computação Evolucionária, Engenharia de Reservatórios, Campos de Petróleo Inteligentes, Tratamento de Incertezas.

## Abstract

Almeida, Luciana Faletti; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi. **Hybrid Optimization System for the Control Strategies of Intelligent Wells under Uncertainties**. Rio de Janeiro, 2007.146p. PhD Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The reservoir management is an important task that aims at the optimization of oil reservoir exploitation. To support this challenging mission, the oil and gas industry has been developing new technologies such as intelligent wells. The purpose of these wells is to reduce costs of the most common restoring operations by control of their actuators. Thus, this work deals with intelligent fields development and presents a decision support system able to optimize, by using evolutionary algorithms, the intelligent wells technology control process considering geological and technical uncertainties. In addition, the system gives support for the decision of rather to use or not intelligent wells, given a reservoir ready to be explored or to receive expansion investments. The control of Intelligent Wells Technology (IWT), as applied in this study, refers to the opening and closing operations of valves in these types of wells. An optimization based on genetic algorithms is used to produce a pro-active control strategy, that is, one that anticipates the actions to be taken in present time in order to achieve better results in the future. Such a strategy proposes a valve configuration that will be able to: delay the water cut on producer wells, advance the oil production or benefit the oil recuperation. As a result, the obtained configuration leads to a maximization of the NPV (Net Present Value). The usage of control strategies that aim to benefit completion identifies the oil field as intelligent. Other works also deal with valve control optimization problems in intelligent wells. However, they use classical optimization methods; these methods limit the number of valves or optimize strategies without considering time. The evolutionary model, based on genetic algorithm, applied in this study, can formulate a control strategy for all valves in a certain production configuration, for any desired time interval, according to the economical criteria of NPV maximization. In order to support the decision making for the use or not of intelligent wells, technical and geological uncertainties are considered. The proposed model was evaluated in three oil reservoirs. The first one is a synthetic reservoir, simple and not real; the other two are more complex with close to real



characteristics. The results obtained indicate that the proposed model allows good control strategies that increase the NPV. The main contribution of this work is the conception and implementation of a system based on intelligent techniques that is able to support the development and management of intelligent oil reservoirs considering uncertainties.

## **Keywords**

Optimization, Genetic Algorithms, Evolutionary Computation, Reservoir Engineering, Intelligent Fields, Uncertainties.

## Sumário

1. Introdução	19
1.1 Motivação	19
1.2 Objetivos	20
1.3 Contribuições	21
1.4 Descrição da Tese	22
1.5 Organização da Tese	23
2. Poços Inteligentes no Desenvolvimento de Campos Petrolíferos	25
2.1 Introdução	25
2.2 Poços Inteligentes	25
2.3 Otimização do Controle de Poços	29
2.4 Incertezas no Controle dos Poços	31
2.5 Estratégias de Controle	32
3. Computação Evolucionária	34
3.1 Algoritmos Genéticos	34
3.1.1 Representação	36
3.1.2 Decodificação	36
3.1.3 Função de Avaliação	36
3.1.4 Operadores Genéticos	37
3.1.5 Parâmetros da Evolução	39
3.1.6 Avaliação de um Algoritmo Genético	40
3.2 Algoritmos Genéticos Distribuídos	40
3.2.1 Modelos de Algoritmos Genéticos Distribuídos	41
3.2.2 Algoritmos Genéticos Distribuídos Globais	42
4. Sistema Híbrido de Otimização de Estratégia de Controle de Válvulas de Poços Inteligentes sob Incertezas	44
4.1 Módulo Otimização de Controle de Válvulas de Poços Inteligentes	46

4.1.1	Representação das Válvulas no Simulador	47
4.1.2	Representação do Cromossomo	48
4.1.3	Decodificação do Cromossomo	49
4.1.4	Operadores Genéticos	50
4.1.5	Função de Avaliação	50
4.2	Módulo Função Objetivo	51
4.2.1	Cálculo do VPL	51
4.2.2	Simulador de Reservatório	53
4.3	Módulo de Tratamento da Incerteza de Falha	54
4.3.1	Modelo Probabilístico para Confiabilidade de Válvulas	54
4.3.2	Cálculo das Probabilidades de Falhas	56
4.3.3	Algoritmo de Simulação de Falhas sem Reparação de Válvulas	57
4.3.4	Algoritmo de Simulação de Falhas com Reparação de Válvulas	58
4.4	Módulo Tratamento das Incertezas Geológicas	60
5.	Estudo de Caso	62
5.1	Definição dos Reservatórios	62
5.2	Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes	65
5.2.1	Representação das Válvulas no Imex	65
5.2.2	Função de Avaliação	66
5.2.3	Apresentação dos Resultados	67
5.2.4	Discussões	99
5.3	Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes com Incerteza de Falha	101
5.3.1	Análise sem reparação de válvula	101
5.3.1.1	Função de Avaliação	101
5.3.1.2	Apresentação dos Resultados	102
5.3.1.3	Discussões	104
5.3.2	Análise com reparação de válvula	105
5.3.2.1	Função de Avaliação	105
5.3.2.2	Apresentação dos Resultados	105
5.3.2.3	Discussões	107
5.4	Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes com incerteza Geológica	108

5.4.1 Função de Avaliação	108
5.4.2 Apresentação dos Resultados	108
5.4.3 Discussões	112
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	113
6.1 Conclusões	113
6.2 Trabalhos Futuros	115
Referências Bibliográficas	117
Apêndice A – Tratamento de incertezas	122
Apêndice B – Simulador de Reservatório IMEX	130

## Lista de Figuras

Figura 1. Exemplo de Completação de um poço Horizontal Inteligente	26
Figura 2. Exemplo de Completação de um poço Multilateral Inteligente.	26
Figura 3 . Procedimento Básico do Algoritmo Genético.	35
Figura 4. Cruzamento de um Ponto.	37
Figura 5. Mutação.	38
Figura 6. Arquitetura Master-Slave.	43
Figura 7. Pseudo-código: Algoritmo Genético Global.	43
Figura 8. Principais módulos do sistema otimizador proposto.	45
Figura 9. Representação do Cromossomo de otimização de válvulas on/ off.	49
Figura 10. Representação do Cromossomo de otimização de válvulas de abertura contínua.	49
Figura 11. Distribuição de Probabilidade Weibull.	55
Figura 12. Comparação de duas amostras de uma distribuição Weibull obtidas de uma seqüência pseudo aleatória e seqüência quase Monte Carlo de Sobol.	56
Figura 13. Representação do Cromossomo de otimização de válvulas com incerteza de falha.	57
Figura 14. Diagrama de fluxos da otimização considerando incerteza de falhas sem reparação.	58
Figura 15. Diagrama de fluxos da otimização considerando incerteza de falhas com reparação.	60
Figura 16. Modelo do Reservatório sintético.	63
Figura 17. Modelo do Reservatório real.	64
Figura 18. Modelo do Reservatório com Aquífero.	64
Figura 19. Exemplo de representação de válvula on/off no IMEX.	65
Figura 20. Exemplo de representação de válvula de abertura	66

contínua no IMEX através da alteração do operador *STW.	
Figura 21. Exemplo de representação de válvula de abertura contínua no IMEX através da alteração do índice de injetividade (FF).	66
Figura 22. Alternativa utilizada nos testes do reservatório sintético.	68
Figura 23. Curvas Algoritmo Genético Teste 1.	70
Figura 24. Curva de Óleo e Água Acumulado Caso Base x Caso Controlado Teste 1.	71
Figura 25. Condição do Campo Caso base – teste 1.	71
Figura 26. Condição do Campo Caso Controlado – teste 1.	71
Figura 27. Curvas Algoritmo Genético teste 2.	72
Figura 28. Curvas Algoritmo Genético teste 3.	74
Figura 29. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 3.	74
Figura 30. Condição do Campo Caso base – teste 3.	75
Figura 31. Condição do Campo Caso Controlado – teste 3.	75
Figura 32. Curvas Algoritmo Genético teste 4.	77
Figura 33. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 4.	77
Figura 34. Condição do Campo Caso base – teste 4.	78
Figura 35. Condição do Campo Caso Controlado – teste 4.	78
Figura 36. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Controlado teste 3 x Caso Controlado teste 4.	79
Figura 37. Curvas Algoritmo Genético teste 5.	80
Figura 38. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado teste 5.	81
Figura 39. Condição do Campo Caso base – teste 5.	81
Figura 40. Condição do Campo Caso Controlado – teste 5.	81
Figura 41. Curva Score teste 6.	83
Figura 42. Curvas OnLine e OffLine teste 6.	84
Figura 43. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado teste 6.	84
Figura 44. Condição do Campo Caso base – teste 6.	85
Figura 45. Condição do Campo Caso Controlado – teste 6.	85

Figura 46. Alternativa utilizada nos testes do reservatório real.	86
Figura 47. Curva Score teste 7.	88
Figura 48. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado teste 7.	89
Figura 49. Condição do Campo Caso base – teste 7.	89
Figura 50. Condição do Campo Caso Controlado – teste 7.	89
Figura 51. Curvas Algoritmo Genético teste 8.	91
Figura 52. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado teste 8.	91
Figura 53. Condição do Campo Caso base – teste 8.	92
Figura 54. Condição do Campo Caso Controlado – teste 8.	92
Figura 55. Alternativa utilizada nos testes do reservatório fictício.	93
Figura 56. Curvas Algoritmo Genético teste 9.	95
Figura 57. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado teste 9.	96
Figura 58. Condição do Campo Caso base – teste 9.	96
Figura 59. Condição do Campo Caso Controlado – teste 9.	96
Figura 60. Curvas Algoritmo Genético teste 10.	98
Figura 61. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado teste 10.	99
Figura 62. Condição do Campo Caso base – teste 10.	99
Figura 63. Condição do Campo Caso Controlado – teste 10.	99
Figura 64. Histograma VPLs – Incerteza Técnica sem substituição de válvulas.	104
Figura 65. Histograma VPLs – Incerteza Técnica com substituição de válvulas.	107
Figura 66. Curvas Algoritmo Genético Teste 11.	111
Figura 67. Curvas Algoritmo Genético Teste 12.	112
Figura 68. Curva bathtub.	123
Figura 69. Função de densidade de probabilidade da curva bathtub.	123
Figura 70. Funções de densidade de probabilidade variando $\alpha$ .	125
Figura 71. Funções de densidade de probabilidade variando $\beta$ .	125
Figura 72. Distribuição de Probabilidade Weibull utilizada nos testes	127

do modelo de otimização sob incerteza técnica.

Figura 73. Distribuição Cumulativa Weibull utilizada nos testes do modelo de otimização sob incerteza técnica. 127

Figura 74. Arquivos de entrada e saída do IMEX. 132



## Lista de Tabelas

Tabela 1. Valores dos Parâmetros do VPL	67
Tabela 2. Tempo de simulação em cada Reservatório	67
Tabela 3. Principais características dos testes do reservatório sintético	68
Tabela 4. Parâmetros do AG	69
Tabela 5. Resultados Teste 1 (reservatório sintético – válvulas on/off)	69
Tabela 6. Melhor Configuração de Válvulas (Teste 1)	70
Tabela 7. Resultados Teste 3 (reservatório sintético – válvulas abertura contínua - STW)	73
Tabela 8. Melhor Configuração de Válvulas Teste 3	73
Tabela 9. Resultados Teste 4 (reservatório sintético – válvulas abertura contínua)	76
Tabela 10. Melhor Configuração de Válvulas Teste 4	76
Tabela 11. Resultados Teste 5 (reservatório sintético – válvulas abertura contínua (FF))	79
Tabela 12. Melhor Configuração de Válvulas Teste 5	80
Tabela 13. Resultados Teste 6 (reservatório sintético – válvulas abertura contínua (FF))	82
Tabela 14. Melhor Configuração de Válvulas Teste 6	83
Tabela 15. Principais características dos testes do reservatório real	86
Tabela 16. Parâmetros do AG	87
Tabela 17. Resultados Teste 7 (reservatório real – válvulas abertura contínua (FF))	87
Tabela 18. Melhor Configuração de Válvulas Teste 7	87
Tabela 19. Resultados Teste 8 (reservatório real – válvulas abertura contínua (FF))	90
Tabela 20. Melhor Configuração de Válvulas Teste 8	90

Tabela 21. Principais características dos testes do reservatório com aquífero	93
Tabela 22. Parâmetros do AG	93
Tabela 23. Resultados Teste 9 (reservatório aquífero – válvulas abertura contínua (FF))	94
Tabela 24. Resultados Teste 9 (reservatório com aquífero – válvulas abertura contínua (FF) – controlado produção de 18 anos)	94
Tabela 25. Melhor Configuração de Válvulas Teste 9	95
Tabela 26. Resultados Teste 10 (reservatório aquífero – válvulas abertura contínua (FF))	97
Tabela 27. Resultados Teste 10 (reservatório com aquífero – válvulas abertura contínua (FF) - controlado produção de 18 anos)	97
Tabela 28. Melhor Configuração de Válvulas Teste 10	98
Tabela 29. Parâmetros do AG	103
Tabela 30. Resultados Teste sob incerteza de falha, sem reposição de válvula.	103
Tabela 31. Parâmetros do AG	106
Tabela 32. Resultados teste sob incerteza de falha com reposição de válvula	106
Tabela 33. Comparação Resultados Modelo sob Incerteza de Falha	108
Tabela 34. Principais características dos testes com incerteza geológica	109
Tabela 35. Parâmetros do AG	109
Tabela 36. Resultado alcançado pela solução otimizada – teste 11	110
Tabela 37. Resultados Teste 11 (Cenário1 x Controlado Médio)	110
Tabela 38. Resultados Teste 11 (Cenário2 x Controlado Médio)	110
Tabela 39. Resultados Teste 11 (Cenário3 x Controlado Médio)	110
Tabela 40. Resultado alcançado pela solução otimizada – teste 12	111
Tabela 41. Resultados Teste 12 (Cenário1 x Controlado Médio)	111
Tabela 42. Resultados Teste 12 (Cenário2 x Controlado Médio)	111
Tabela 43. Resultados Teste 12 (Cenário3 x Cont.Médio)	112
Tabela 44. Valores dos parâmetros da weibull	126
Tabela 45. Tipos de dados existentes no arquivo .DAT	132