



Jorge Luiz Corrêa Montechiari

**Metodologia para Previsão de
Reservas de Petróleo: Propostas de
Melhorias para os Métodos de Knoring
e Barcelos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Silvio Hamacher

Rio de Janeiro
Janeiro de 2013



Jorge Luiz Corrêa Montechiari

**Metodologia para Previsão de Reservas de Petróleo:
Propostas de Melhorias para os Métodos de Knoring e
Barcelos**

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

Prof. Silvio Hamacher
Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Leonardo Junqueira Lustosa

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Fabrício Broseghini Barcelos

Instituto Federal de Educação do Espírito Santo - IFES

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de janeiro de 2013

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

Jorge Luiz Corrêa Montechiari

Graduou-se em Engenharia de Produção pela PUC-Rio em 2011. Desenvolveu projetos para a Petrobras sobre agregação probabilística e análise de sensibilidade de reservas. Publicou trabalhos em congressos como Rio Oil & Gas (2010, Rio de Janeiro), Offshore Technology Conference (Houston, 2012) e European Unconventional Resources Conference and Exhibition (Vienna, 2012). É coordenador de projetos no NExO (Núcleo de Excelência em Otimização) desenvolvendo pesquisas e projetos nas áreas de óleo & gás e logística.

Ficha Catalográfica

Montechiari, Jorge Luiz Corrêa

Metodologia para previsão de reservas de petróleo: propostas de melhorias para os métodos de Knoring e Barcelos / Jorge Luiz Corrêa Montechiari ; orientador: Silvio Hamacher. – 2013.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2013.

Inclui bibliografia

CDD: 658.5

Agradecimentos

Ao meu orientador e amigo Professor Silvio Hamacher pela orientação e pelos ensinamentos transmitidos durante todos os trabalhos que desenvolvemos juntos.

Ao CNPq, ao Programa Bragecrim (CAPES), à PUC-Rio e à Petrobras, pelos auxílios concedidos, sem os quais o desenvolvimento desse trabalho não seria possível.

Aos professores que participaram da comissão examinadora.

Aos meus pais por me ensinarem que sem esforço não há vitória.

Ao meu grande amigo e irmão Thiago Werneck por sempre estar me apoiando em todos os momentos.

Aos meus colegas de trabalho do NExO.

Resumo

Montechiari, Jorge Luiz Corrêa; Hamacher, Silvio. **Metodologia para Previsão de Reservas de Petróleo: Propostas de Melhorias para os Métodos de Knoring e Barcelos**. Rio de Janeiro, 2013. 149p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As reservas são os principais ativos responsáveis pela valoração das companhias petrolíferas frente ao mercado mundial. No entanto, para definir qualquer volume de hidrocarboneto como reserva, se faz necessária a construção de um plano de desenvolvimento para explorar e comercializar todo óleo e gás disponíveis. Com isso, o conhecimento prévio do volume de hidrocarbonetos se torna estratégico para antecipar o desenvolvimento e facilitar a obtenção de investimentos. O objetivo dessa dissertação é propor uma metodologia de previsão de reservas através de melhorias nos métodos propostos por Knoring et al. (1999) e Barcelos (2006). A primeira melhoria se refere à otimização do ajuste dos modelos propostos às séries históricas de volume recuperável através de um método iterativo para fornecer soluções iniciais ao método de estimativa dos mínimos quadrados não lineares. A segunda melhoria ocorre no processo de escolha do melhor modelo, evitando que todo o processo necessite ser revisto após a inserção de novos dados às series históricas a cada ano. Para analisar a eficácia do trabalho proposto, o método é aplicado à 7 séries históricas de volume recuperável e comparadas com a atual metodologia de previsão de reservas utilizada pela companhia patrocinadora do estudo.

Palavras-chave

Previsão; estimação; reservas; volume recuperável; óleo e gás; hidrocarbonetos; petróleo.

Abstract

Montechiari, Jorge Luiz Corrêa; Hamacher, Silvio. **Oil Reserves Forecasting Methodology: Improvements Proposes to Knoring and Barcelos**. Rio de Janeiro, 2013. 149p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Reserves are the main assets responsible for valuation of oil companies in the world market. However, to set any volume of hydrocarbon as reserves, it is necessary to develop a business plan to exploit and commercialize all oil and gas available. Therefore, the prior knowledge of the volume of hydrocarbons becomes strategic to anticipate the development and facilitate the acquisition of investments. The goal of this dissertation is to propose a methodology for reserves forecasting through improvements in the methods proposed by Knoring et al. (1999) and Barcelos (2006). The first improvement is related to optimize the fit of the proposed models for recoverable volume time series via an iterative method to provide initial solutions to the nonlinear least squares estimation method. The second improvement occurs in the process of choosing the best model avoiding the whole process needs to be revised after inserting new data to historical series each year. To analyze the effectiveness of the proposed work, the method is applied to seven recoverable volume time series and compared with the current methodology of reserves forecasting used by the company sponsoring the study.

Keywords

Forecast; estimation; reserves; recoverable volume, oil and gas, hydrocarbons, petroleum.

Sumário

1. Introdução.....	16
1.1. Objetivo Geral	18
1.2. Objetivos Específicos	18
1.3. Organização da Pesquisa	18
2. Revisão Bibliográfica.....	20
2.1. Definições, Conceitos e Classificações dos Recursos de Petróleo.....	20
2.1.1. Projeto.....	21
2.1.2. Classificação dos Projetos	21
2.1.3. Abordagens para a Estimativa de Incerteza do Volume Recuperável	23
2.2. Estimativa de Reservas.....	25
2.2.1. Métodos Determinísticos	26
2.2.2. Métodos Probabilísticos	32
3. Previsão de Reservas	35
3.1. Curva de Hubbert.....	35
3.2. Método “Creaming”	37
3.3. Arrington Modificado	39
3.4. Considerações	40
4. Metodologia	41
4.1. Processo de Previsão.....	41
4.2. Modelos de Previsão	45
4.2.1. Knoring et al. (1999).....	46
4.2.2. Barcelos (2006).....	47
5. Propostas de Melhorias	49
5.1. Algoritmo de Melhoria do Ajuste.....	50

5.2. Metodologia de Escolha do Modelo	54
6. Estudo de Caso	59
6.1. Análise dos Ajustes	60
6.2. Análise de Previsões	61
6.2.1. UO-Amazonas.....	61
6.2.2. UO-Bacia de Campos.....	62
6.2.3. UO-Bahia.....	64
6.2.4. UO-Espírito Santo	65
6.2.5. UO-Rio de Janeiro.....	67
6.2.6. UO-Rio Grande do Norte e Ceará	68
6.2.7. UO-Sergipe e Alagoas.....	70
6.3. Análise de Resultados.....	71
7. Conclusões e Recomendações.....	75
8. Referências Bibliográficas	78
Apêndice A – Modelos de Barcelos.....	83
Apêndice B – Soma do Quadrado dos Resíduos	87
Apêndice C – Mean Absolute Percentage Error (MAPE).....	143

Lista de Figuras

Figura 1 – Classificação de Recursos segundo o PRMS	22
Figura 2 – Abordagem Determinística Incremental	24
Figura 3 – Linha do Tempo para Métodos de Estimativas e Estágios de um Projeto de E&P	27
Figura 4 – Comportamento pressão versus produção acumulada de um reservatório volumétrico de gás seco.....	29
Figura 5 – Método dos Cenários	33
Figura 6 – Método Probabilístico.....	34
Figura 7 – Curvas de Hubbert para as reservas norte-americanas.....	36
Figura 8 – Fenômeno Creaming.....	37
Figura 9 – Processo de Previsão	41
Figura 10 – Gráfico para análise de dados	43
Figura 11 – Partição temporal da série	44
Figura 12 – Método de Knoring	46
Figura 13 – Processo de Decisão de Estratégia e Tecnologia	48
Figura 14 – Algoritmo de Melhoria do Ajuste.....	51
Figura 15 – Resumo de Informações do Ajuste	52
Figura 16 – Análise de Tendência de Crescimento da Série	54
Figura 17 – Etapas da Metodologia de Escolha do Modelo	55
Figura 18 – Algoritmo de Previsão	56
Figura 19 – Quadro resumo com o número de modelos que apresentaram melhoria no ajuste com a aplicação do algoritmo de otimização da estimação	60
Figura 20 – Comparativo dos valores reais da série UO-Amazonas e dos valores ajustados do modelo Barcelos 7x8 para o período de ajuste 1986-2005 e previsão 2006-2010	61
Figura 21 – Comparativo dos valores reais da série UO-Bacia de Campos e dos valores ajustados do modelo Barcelos 1x9 para o período de ajuste 1974-2005 e previsão 2006-2010.....	63
Figura 22 – Comparativo dos valores reais da série UO-Bahia e	

dos valores ajustados do modelo Barcelos 7x1 para o período de ajuste 1964-2005 e previsão 2006-2010	64
Figura 23 – Comparativo dos valores reais da série UO-Espírito Santo e dos valores ajustados do modelo Barcelos 7x3 para o período de ajuste 1969-2005 e previsão 2006-2010	65
Figura 24 – Comparativo dos valores reais da série UO-Rio de Janeiro e dos valores ajustados do modelo Barcelos 6x9 para o período de ajuste 1993-2005 e previsão 2006-2010	67
Figura 25 – Comparativo dos valores reais da série UO-Rio Grande do Norte e Ceará e dos valores ajustados do modelo Barcelos 7x8 para o período de ajuste 1974-2005 e previsão 2006-2010	68
Figura 26 – Comparativo dos valores reais da série UO-Sergipe e Alagoas e dos valores ajustados do modelo Barcelos 1x9 para o período de ajuste 1964-2005 e previsão 2006-2010	70
Figura 27 – Variação do erro percentual absoluto médio com adoção dos modelos propostos.....	73
Figura 28 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1986-2002 da UO-Amazonas sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	87
Figura 29 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1986-2002 da UO-Amazonas com o algoritmo de otimização do ajuste.....	88
Figura 30 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1986-2003 da UO-Amazonas sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	89
Figura 31 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1986-2003 da UO-Amazonas com o algoritmo de otimização do ajuste.....	90
Figura 32 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1986-2004 da UO-Amazonas sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	91
Figura 33 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1986-2004 da UO-Amazonas com o algoritmo de otimização do ajuste.....	92

Figura 34 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1986-2005 da UO-Amazonas sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	93
Figura 35 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1986-2005 da UO-Amazonas com o algoritmo de otimização do ajuste.....	94
Figura 36 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2002 da UO-Bacia de Campos sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	95
Figura 37 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2002 da UO-Bacia de Campos com o algoritmo de otimização do ajuste.....	96
Figura 38 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2003 da UO-Bacia de Campos sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	97
Figura 39 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2003 da UO-Bacia de Campos com o algoritmo de otimização do ajuste.....	98
Figura 40 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2004 da UO-Bacia de Campos sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	99
Figura 41 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2004 da UO-Bacia de Campos com o algoritmo de otimização do ajuste.....	100
Figura 42 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2005 da UO-Bacia de Campos sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	101
Figura 43 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2005 da UO-Bacia de Campos com o algoritmo de otimização do ajuste.....	102
Figura 44 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2002 da UO-Bahia sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	103
Figura 45 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2002 da UO-Bahia com o algoritmo de otimização do ajuste.....	104

Figura 46 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2003 da UO-Bahia sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	105
Figura 47 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2003 da UO-Bahia com o algoritmo de otimização do ajuste.....	106
Figura 48 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2004 da UO-Bahia sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	107
Figura 49 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2004 da UO-Bahia com o algoritmo de otimização do ajuste.....	108
Figura 50 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2005 da UO-Bahia sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	109
Figura 51 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2005 da UO-Bahia com o algoritmo de otimização do ajuste.....	110
Figura 52 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1969-2002 da UO-ES sem o algoritmo de otimização do ajuste	111
Figura 53 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1969-2002 da UO-ES com o algoritmo de otimização do ajuste	112
Figura 54 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1969-2003 da UO-ES sem o algoritmo de otimização do ajuste	113
Figura 55 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1969-2003 da UO-ES com o algoritmo de otimização do ajuste	114
Figura 56 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1969-2004 da UO-ES sem o algoritmo de otimização do ajuste	115
Figura 57 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1969-2004 da UO-ES com o algoritmo de otimização do ajuste	116
Figura 58 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1969-2005 da UO-ES sem o algoritmo de otimização do ajuste	117
Figura 59 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1969-2005 da UO-ES com o algoritmo de otimização do ajuste	118
Figura 60 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1993-2002 da UO-RIO sem o algoritmo de otimização do ajuste	119
Figura 61 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1993-2002 da UO-RIO com o algoritmo de otimização do ajuste	120
Figura 62 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1993-2003 da UO-RIO sem o algoritmo de otimização do ajuste	121

Figura 63 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1993-2003 da UO-RIO com o algoritmo de otimização do ajuste	122
Figura 64 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1993-2004 da UO-RIO sem o algoritmo de otimização do ajuste	123
Figura 65 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1993-2004 da UO-RIO com o algoritmo de otimização do ajuste	124
Figura 66 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1993-2005 da UO-RIO sem o algoritmo de otimização do ajuste	125
Figura 67 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1993-2005 da UO-RIO com o algoritmo de otimização do ajuste	126
Figura 68 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2002 da UO-Rio Grande do Norte e Ceará sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	127
Figura 69 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2002 da UO-Rio Grande do Norte e Ceará com o algoritmo de otimização do ajuste.....	128
Figura 70 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2003 da UO-Rio Grande do Norte e Ceará sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	129
Figura 71 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2003 da UO-Rio Grande do Norte e Ceará com o algoritmo de otimização do ajuste.....	130
Figura 72 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2004 da UO-Rio Grande do Norte e Ceará sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	131
Figura 73 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2004 da UO-Rio Grande do Norte e Ceará com o algoritmo de otimização do ajuste.....	132
Figura 74 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2005 da UO-Rio Grande do Norte e Ceará sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	133
Figura 75 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1974-2005 da UO-Rio Grande do Norte e Ceará com o algoritmo de otimização do ajuste.....	134

Figura 76 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2002 da UO-Sergipe e Alagoas sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	135
Figura 77 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2002 da UO-Sergipe e Alagoas com o algoritmo de otimização do ajuste.....	136
Figura 78 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2003 da UO-Sergipe e Alagoas sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	137
Figura 79 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2003 da UO-Sergipe e Alagoas com o algoritmo de otimização do ajuste.....	138
Figura 80 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2004 da UO-Sergipe e Alagoas sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	139
Figura 81 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2004 da UO-Sergipe e Alagoas com o algoritmo de otimização do ajuste.....	140
Figura 82 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2005 da UO-Sergipe e Alagoas sem o algoritmo de otimização do ajuste.....	141
Figura 83 – Quadro resumo do SQR para o ajuste do período de 1964-2005 da UO-Sergipe e Alagoas com o algoritmo de otimização do ajuste.....	142
Figura 84 – Quadro resumo do MAPE para a UO-Amazonas.....	143
Figura 85 – Quadro resumo do MAPE para a UO-Bacia de Campos.....	144
Figura 86 – Quadro resumo do MAPE para a UO-Bahia	145
Figura 87 – Quadro resumo do MAPE para a UO-ES.....	146
Figura 88 – Quadro resumo do MAPE para a UO-RIO	147
Figura 89 – Quadro resumo do MAPE para a UO-Rio Grande do Norte e Ceará.....	148
Figura 90 – Quadro resumo do MAPE para a UO-Sergipe e Alagoas ...	149

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Análise do SQR.....	57
Tabela 2 – Análise pelo MAPE.....	58
Tabela 3 – Erro Percentual Absoluto Médio das Previsões de Volume Recuperável para a UO-Amazonas	62
Tabela 4 – Erro Percentual Absoluto Médio das Previsões de Volume Recuperável para a UO-Bacia de Campos	63
Tabela 5 – Erro Percentual Absoluto Médio das Previsões de Volume Recuperável para a UO-Bahia	65
Tabela 6 – Erro Percentual Absoluto Médio das Previsões de Volume Recuperável para a UO-Espírito Santo	66
Tabela 7 – Erro Percentual Absoluto Médio das Previsões de Volume Recuperável para a UO-Rio de Janeiro	68
Tabela 8 – Erro Percentual Absoluto Médio das Previsões de Volume Recuperável para a UO- Rio Grande do Norte e Ceará	69
Tabela 9 – Erro Percentual Absoluto Médio das Previsões de Volume Recuperável para a UO-Sergipe e Alagoas	71
Tabela 10 – Número médio de modelos que sofreram melhora do ajuste com a aplicação do algoritmo de otimização da estimação	71
Tabela 11 – Modelos vencedores e métodos utilizados para a escolha.....	72
Tabela 12 – Erro Percentual Absoluto Médio das Previsões do Volume Recuperável para a Companhia.....	73