



Marcella Lanzetti Daher de Deus

**Séries Temporais Aplicadas ao Planejamento da
Operação do Sistema Interligado Nacional – SIN**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro
Abril de 2008



Marcella Lanzetti Daher de Deus

**Séries Temporais Aplicadas ao Planejamento da
Operação do Sistema Interligado Nacional-SIN**

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.

Prof. Reinaldo Castro Souza
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Ricardo Tanscheit

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Luiz Guilherme Barbosa Marzano
CEPEL

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 24 de abril de 2008

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

Marcella Lanzetti Daher de Deus

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal Fluminense em 2005. Atualmente trabalha como Analista de Gestão de Processos no Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Ficha Catalográfica

Deus, Marcella Lanzetti Daher de

Séries temporais aplicadas ao Planejamento da Operação do Sistema Interligado Nacional - SIN / Marcella Lanzetti Daher de Deus ; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2008.

130 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Séries temporais. 3. Modelos estocásticos. 4. Afluências. 5. Planejamento energético. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Dedicatória

À minha família querida e amada pelo apoio, carinho e compreensão,
e por nunca terem me deixado desistir.

Agradecimentos

A Deus, por ter me apontado o caminho a ser seguido, por ter colocado as pessoas certas na minha vida, e por sempre me ajudar a alcançar meus objetivos.

A minha amada família que sempre me incentivou e me deu a base necessária para concretizar este projeto.

Em especial, agradeço à minha irmã a Engenheira Flávia Lanzetti Daher de Deus por ter me incentivado e me ajudado durante a confecção deste trabalho.

Aos amigos antigos, agradeço pelo apoio e incentivo durante todo o mestrado.

Aos novos amigos, que me ajudaram durante a tese, em especial os engenheiros Murilo Pereira Soares e Luiz Guilherme Ferreira Guilhon e o Meteorologista Márcio Cataldi, agradeço pela ajuda e comprometimento gratuito, sem os quais não seria possível terminar este trabalho.

Ao Engenheiro Mário Jorge Daher, agradeço pela ajuda em busca de um tema.

Aos colegas de trabalho que aceitaram minhas ausências e sempre me incentivaram.

Ao meu Co-orientador, Francisco José Arteiro de Oliveira, que apesar da escassez de tempo, me ajudou a concretizar este estudo.

Ao meu Orientador pela confiança depositada.

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

Resumo

Deus, Marcella Lanzetti Daher; Souza, Reinaldo Castro. **Séries Temporais Aplicadas ao Planejamento da Operação do Sistema Interligado Nacional – SIN**. Rio de Janeiro, 2008. 130p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A vocação natural do Brasil para a hidroeletricidade fez com que o Sistema Interligado Nacional – SIN fosse desenvolvido com forte predominância de geração de origem hidroelétrica. Entretanto, ao se optar por uma base hidroelétrica há de se lidar com as significativas incertezas associadas às afluições futuras aos rios e, por extensão, a todas as bacias hidrográficas do país. Logo, a estrutura de produção de energia hidroelétrica do Brasil foi concebida de forma a minimizar os riscos associados ao comportamento aleatório das afluições. Para contemplar a estocasticidade das afluições no Planejamento da Operação do SIN, o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS utiliza uma cadeia de modelos dentre os quais estão contidos o modelo de previsões de vazões determinísticas para o curto prazo, e os modelos de geração de cenários de afluições. Estes modelos fornecem insumos para que os modelos de otimização possam estabelecer as Estratégias e Políticas de Operação para o médio e curto prazo, considerando a volatilidade das afluições. Esta dissertação descreve os processos de séries temporais empregados no modelo de previsões determinísticas para o curto prazo e nos modelos de geração de cenários de afluições para o médio e curto prazo. Além disso, é apresentado um estudo de casos do Planejamento da Operação do SIN que avalia o acoplamento feito entre os modelos de otimização de médio e curto prazo através dos cenários hidrológicos de médio e curto prazo. Com esta análise, é possível verificar como o acoplamento entre os modelos de otimização pode impactar as Estratégias e Políticas de Operação para o médio e curto prazo.

Palavras - chave

Séries temporais, previsão de vazões, modelos estocásticos, afluições, planejamento energético.

Abstract

Deus, Marcella Lanzetti Daher; Souza Reinaldo Castro. **Time Series Applied to Operation Planning of the National Interconnected Electric System**. Rio de Janeiro, 2008. 130p. M.Sc. Dissertation - Electrical Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The natural vocation of Brazil for the hydroelectricity made the National Interconnected Electric System – NIS to be developed with strong predominance of hydroelectric origin creation. However, choosing for a hydroelectricity base you have to deal with significant uncertainty associated to the rivers inflows and all hydrographical basins of the country. Therefore, the production structure of Brazilian hydroelectric energy was created to minimize the risks associated to the random behavior of inflows. To contemplate the inflows stochasticity in the operation planning of NIS, the National Operator of the Electrical System - ONS uses a chain of models that contains a model of inflows forecasting for the short term, and a model to generate scenarios of inflows. These models provide inputs for the optimizations model can establish the strategies and policies for the operation of medium and short term, contemplating the volatility of inputs. This dissertation describes the time series processes used in the model of inflows forecasting for the short term and in the models to generate scenarios of inflows for the medium and short term. Moreover, this paper presents a study of cases of Operation Planning of the NIS that analyze the coupling made between the models for optimization of medium and short term through the hydrological scenarios for medium and short term. By this analysis, is possible realize how the coupling between the models of optimization can impact the strategies and policies for the operation of medium and short term.

Key-Words

Time Series, forecasting inflows, stochastic models, inflows, energetic planning.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE FIGURAS	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2 OBJETIVO	15
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL – SIN ..	17
2.1 VOCAÇÃO À HIDROELETRICIDADE	17
2.2 DIMENSÃO DO SISTEMA	18
2.3 OTIMIZAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS RECURSOS ENERGÉTICOS ..	25
3 O PROBLEMA DO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E A FUNÇÃO DE CUSTO FUTURO	29
3.1 INTRODUÇÃO	29
3.2 SISTEMAS PURAMENTE TÉRMICOS	30
3.3 SISTEMAS HIDROTÉRMICOS	32
3.4 FUNÇÃO DE CUSTO FUTURO – MINIMIZAÇÃO DO CUSTO TOTAL DE OPERAÇÃO	36
4 SÉRIES TEMPORAIS APLICADAS AO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO DA OPERAÇÃO DO SIN	48
4.1 INTRODUÇÃO	48
4.2 SÉRIES TEMPORAIS	49
4.3 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS	49
4.4 ESTACIONARIEDADE	50
4.5 PROCESSO ESTOCÁSTICO RUÍDO BRANCO	51
4.6 PROPRIEDADES ESTATÍSTICAS	52
4.6.1 MÉDIA E VARIÂNCIA	52
4.6.2 AUTOCOVARIANÇA E AUTOCORRELAÇÃO	52
4.6.3 PROCESSOS ERGÓTICOS	53
4.7 MODELOS LINEARES ESTACIONÁRIOS	53
4.7.1 MODELOS AUTO-REGRESSIVOS AR (p)	53
4.7.2 MODELOS MÉDIAS MÓVEIS MA (q)	59
4.7.3 MODELOS AUTO REGRESSIVOS MÉDIAS MÓVEIS ARMA (p,q) ..	63
4.8 MODELOS PERIÓDICOS	68
4.8.1 MODELOS AUTO-REGRESSIVOS PERIÓDICOS – PAR (p)	69
4.8.2 MODELOS AUTO-REGRESSIVOS MÉDIAS-MÓVEIS PERIÓDICOS – PARMA (p,1)	73
4.9 ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DE PREVISÃO	77
5 MODELOS UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DO SIN	79
5.1 MODELOS HIDROLÓGICOS – PREVISÃO DE VAZÕES E GERAÇÃO DE CENÁRIOS NO ONS	79
5.1.1 MODELO PREVIVAZH	80
5.1.2 MODELO PREVIVAZ	81
5.1.3 MODELO PREVIVAZM	87

5.1.4 MODELO GEVAZP.....	88
5.2 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA	91
5.2.1 MODELO NEWAVE	94
5.2.2 MODELO DECOMP	95
6 ESTUDO DE CASOS – ANÁLISE DO ACOPLAMENTO ENTRE OS MODELOS DE MÉDIO E CURTO PRAZO.....	99
6.1 INTRODUÇÃO.....	99
6.2 PREMISSAS.....	103
6.3 METODOLOGIA	104
6.4 RESULTADOS.....	105
6.4.1 Caso I – PMO Outubro de 2007	105
6.4.2 Caso II – PMO Janeiro de 2008.....	111
7 CONCLUSÕES	117
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
ANEXOS	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Empreendimentos em Operação na Matriz Energética Brasileira.....	19
Tabela 4.1: Resumo das Características dos Modelos AR(p), MA (q) e ARMA (p,q).....	65
Tabela 5.1: Modelos Implementados no PREVIVAZM	83
Tabela 5.2: Resumo das Características dos Modelos Utilizados no Planejamento Energético do SIN	88
Tabela 6.1: Número de Cenários do DECOMP por Mês.....	104
Tabela 6.2: Número de Cenários do DECOMP que Extrapolaram o NEWAVE	105
Tabela 6.3: Custo Total de Operação.....	100
Tabela 6.4: Variação Percentual do Custo Total de Operação (%)	108
Tabela 6.5: Custo Marginal de Operação do Subsistema Sudeste	109
Tabela 6.6: Custo Marginal de Operação do Subsistema Nordeste	109
Tabela 6.7: Energia Natural Afluente Prevista e Verificada – Caso I	110
Tabela 6.8 – Atualização dos Dados Diários de Vazão	110
Tabela 6.9: Número de Cenários do DECOMP que Extrapolaram o NEWAVE Caso II.....	112
Tabela 6.10: Custo Total de Operação – Caso II	115
Tabela 6.11: Variação Percentual do Custo Total de Operação (%) – Caso II.....	115
Tabela 6.12: Custo Marginal de Operação do Subsistema Sudeste – Caso II.....	116
Tabela 6.13: Custo Marginal de Operação do Subsistema Nordeste – Caso II.....	116
Tabela 6.14: Energia Natural Afluente Prevista e Verificada – Caso II.....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Comparação Brasil – Europa	19
Figura 2.2: Energias Naturais Afluentes	20
Figura 2.3: Malha de Interligação do SIN	22
Figura 2.4: Integração das Bacias Hidrográficas	23
Figura 2.5: Principais Usinas em Operação	24
Figura 2.6: Capacidade de Armazenamento	25
Figura 2.7: Importância das Interligações de Bacias.....	27
Figura 3.1: Mecanismo de Despacho de Usinas Térmicas em Função do Preço.....	31
Figura 3.2: Associação Presente e Futuro.....	33
Figura 3.3: Curva do Custo Total	38
Figura 3.4: Hipóteses de Afluências Para o Cálculo do Custo Futuro Médio.....	39
Figura 3.5: Derivada da Função de Custo Futuro	40
Figura 3.6: Problema da Otimização.....	40
Figura 3.7: Derivada da Função de Custo Futuro	41
Figura 3.8: Enfoques Árvore e Pente	42
Figura 3.9: Construção da Função de Custo Futuro.....	44
Figura 3.10: Construção da Função de Custo Futuro para Todas as Hipóteses de Afluência	44
Figura 3.11: Construção da Função de Custo Futuro para o Enfoque Pente	45
Figura 3.12: Uma Função de Custo Futuro por Etapa no Enfoque Pente	46
Figura 3.13: Enfoque Árvore X Pente.....	47
Figura 4.1: Autocorrelação do Ruído Branco.....	51
Figura 4.2: Autocorrelação do Modelo AR (p)	57
Figura 4.3: Função Teórica da Autocorrelação Parcial do Modelo AR (p)	59
Figura 4.4: Função Teórica da Autocorrelação Parcial do Modelo MA (2).....	63
Figura 4.5: Função Teórica da Autocorrelação do Modelo ARMA (p,q).....	66
Figura 4.6: Função Teórica da Autocorrelação Parcial de um Modelo ARMA (1,1).....	67
Figura 5.1: Possíveis Estruturas de Correlação do PREVIVAZ	83
Figura 5.2: Critério de Seleção do Sistema de Modelos PREVIVAZ.....	85
Figura 5.3: Cadeia de Modelos Hidrológicos	87
Figura 5.4: Cadeia de Modelos Hidrológicos	89
Figura 5.5: Interação do GEVAZP com o DECOMP.....	90
Figura 5.6: Interação do GEVAZP com o NEWAVE	91
Figura 5.7: Cadeia de Modelos de Otimização	92
Figura 6.1: Simulação Forward – Determinação dos Estados de Armazenamento.....	101
Figura 6.2: Simulação Backward – Cálculo da Função de Custo Futuro.....	102
Figura 6.3: Desacoplamento Parcial entre NEWAVE e DECOMP na Região SE.....	106
Figura 6.4: Desacoplamento Parcial entre NEWAVE e DECOMP na Região NE	107
Figura 6.5: Variação do Custo Total de Operação	108
Figura 6.6: Desacoplamento Parcial entre NEWAVE e DECOMP na Região SE – Caso II	112
Figura 6.7: Desacoplamento Parcial entre NEWAVE e DECOMP na Região NE – Caso II.....	113
Figura 6.8: Variação do Custo Total de Operação – Caso II.....	114