



**Guilherme Armando de Almeida Pereira**

**Modelos de Memória Longa Para Geração de Cenários  
Hidrológicos Sintéticos**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza, Ph.D.

Rio de Janeiro  
Março de 2011



**Guilherme Armando de Almeida Pereira**

**Modelos de Memória Longa Para Geração de Cenários  
Hidrológicos Sintéticos**

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, Ph.D.**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Profa. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco, Ph.D.**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. André Luís Marques Marcato, D.Sc.**

UFJF

**Prof. Plutarcho M. Lourenço, D.Sc.**

Cepel

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico-Científico

Rio de Janeiro, 21 de março de 2011.

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

### **Guilherme Armando de Almeida Pereira**

Graduou-se em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Juiz de Fora, em 2008. Especialista em Métodos Estatísticos Computacionais pela mesma instituição, em 2010.

#### Ficha Catalográfica

Pereira, Guilherme Armando de Almeida

Modelos de Memória Longa para Geração de Cenários Hidrológicos Sintéticos / Guilherme Armando de Almeida Pereira ; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2011.

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

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Modelos de Memória Longa. 3. Bootstrap. 4. Critérios para Avaliação dos Cenários. 5. Resultados. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

*À minha família*

## Agradecimentos

À Deus, por me dar uma família maravilhosa.

Aos meus pais, Armando Eugênio e Maria Fátima, por me apoiarem e serem exemplos de vida, mesmo nas situações mais adversas.

Ao meu irmão Rodolfo Armando, pela sua cumplicidade, apoio e ajuda.

Ao meu orientador, Prof. Ph.D. Reinaldo Castro Souza, pela oportunidade concedida.

Aos meus grandes amigos Eduardo Dessupoio Moreira Dias, Fernando Luiz Cyrino de Oliveira, Pedro Guilherme Costa Ferreira, Rafael Moraes de Souza e Victor Coutinho Lage, pelos momentos felizes e descontraídos que passamos nesta caminhada e pela ajuda nos momentos difíceis.

A Kelly, pelo carinho, pela atenção e pelo companherismo.

Aos meus colegas Rodrigo Calili e Luciana Campos, pelas contribuições a este trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À PUC-Rio, pelo apoio durante as atividades exercidas no decorrer do curso.

Muito Obrigado a todos, por tornarem este sonho uma realidade!

## Resumo

Pereira, Guilherme Armando de Almeida; Souza, Reinaldo Castro. **Modelos de Memória Longa para Geração de Cenários Hidrológicos Sintéticos**. Rio de Janeiro, 2011. 73p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem como objetivo o estudo das séries de energia natural afluyente (ENAs) por meio de modelos de memória longa, no intuito de gerar cenários hidrológicos sintéticos. Séries temporais com memória longa são definidas como séries que apresentam persistente dependência entre observações afastadas por um longo período de tempo. Inicialmente procedeu-se uma análise exploratória através da qual foi possível encontrar características de série temporais com longa dependência. Os modelos empregados nesta dissertação foram os  $SARFIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ , em que os parâmetros  $\hat{d}$  e  $\hat{D}$  assumem valores fracionários, para que seja possível a incorporação de efeitos de longa dependência e/ou cíclicos. Também foi utilizada a técnica de computação intensiva *bootstrap* em diversas etapas, dentre elas a construção de um teste não paramétrico para significância dos parâmetros fracionários, assim como *bootstrap* nos resíduos do modelo para a geração de séries hidrológicas sintéticas. Para averiguar a adequabilidade dos cenários gerados, foram realizados testes estatísticos de igualdade de médias, igualdade de variâncias, testes de aderência e análise de sequências. Por meio destes, pode-se concluir que os modelos empregados nesta dissertação conseguiram reproduzir de maneira satisfatória o histórico disponível de ENAs.

## Palavras-chave

Modelos de Memória Longa; SARFIMA; Geração de Cenários Hidrológicos; *Bootstrap*.

## Abstract

Pereira, Guilherme Armando de Almeida Pereira; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **Long memory models to generating streamflow scenario**. Rio de Janeiro, 2011. 73p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this thesis is to study the series of natural energy surging (NES) through long memory models, whose interest is to fit models capable of generating synthetic hydrological series. Time Series with long memory are defined as a series which have persistent dependence between observations separated by a long period of time. Firstly, we proceed to the exploration analysis where we found particulars of long memory time series. The models employed in this work were  $SARFIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ , where parameters  $d$  and  $D$  assume fractional values so as to incorporate long memory and/or cycles effects. It was also used an intensive computational technique called bootstrap in various stages, among them the construction of a non-parametric test for the significance of fractional parameters and the bootstrap in the residual models for generating synthetic hydrological series. In order to verify the accuracy of the scenarios generated, statistical tests were performed for equal means, equal variance, adherence test and sequence analysis. Through these, we can conclude that the models used in this thesis could satisfactorily reproduce the history of natural energy surging available.

## Keywords

Long Memory Models; SARFIMA; Generation of Hydrologic Scenarios; Bootstrap.

## Sumário

1	Introdução	14
2	Modelos de Memória Longa	17
2.1	Análise Espectral	19
2.2	O Modelo <i>ARFIMA</i>	22
2.2.1	Método de Regressão do Parâmetro Fracionário <i>d</i>	24
2.2.1.1	Método de Regressão Utilizando a Função Periodograma	25
2.2.1.2	Método de Regressão Utilizando a Função Periodograma Suavizado	27
2.3	O Modelo <i>SARFIMA</i>	29
2.3.1	Estimadores de <i>d</i> & <i>D</i>	30
3	Bootstrap	33
3.1	<i>Bootstrap</i> em Modelos de Regressão Linear	35
3.1.1	<i>Bootstrap</i> para os Parâmetros Fracionários <i>d</i> & <i>D</i>	35
3.1.1	Intervalos de Confiança <i>Bootstrap</i>	37
3.2	<i>Bootstrap</i> na Geração de Cenários Hidrológicos Sintéticos	38
3.3	<i>Bootstrap</i> para Seleção de Cenários	40
4	Critérios para Avaliação dos Cenários	42
4.1	Teste de Médias	42
4.2	Teste de Variâncias	43
4.3	Análise de Aderência	44
4.4	Análise de Sequência	45
5	Resultados	48
5.1	Análise Exploratória	49
5.2	Modelos Estimados	51
5.2.1	Parâmetros Fracionários Estimados	51

5.2.2 Teste Não Paramétrico para $d$ & $D$	52
5.2.3 Modelo Final	54
5.3 Seleção de Cenários	54
5.4 Geração de Cenários	56
5.4.1 Testes de Igualdade de Médias	57
5.4.2 Testes para Igualdade de Variâncias	59
5.4.3 Testes de Kolmogorov-Sminov	61
5.4.4 Análise de Sequências	62
6 Conclusões e Considerações Finais	66
7 Referências	68

## Lista de figuras

Figura 3.1 – Esquema do Processo <i>Bootstrap</i>	34
Figura 3.2 – Média histórica e média dos cenários (valores positivos e negativos)	40
Figura 3.3 – Média histórica e média dos cenários (somente valores positivos)	40
Figura 4.1 – Representação de Sequência Negativa	46
Figura 5.1 – ENA Sudeste/Centro-Oeste	48
Figura 5.2 – ENA Sul	48
Figura 5.3 – ENA Nordeste	49
Figura 5.4 – ENA Norte	49
Figura 5.5 – P. Suavizado – Sudeste/Centro-Oeste	49
Figura 5.6 – P. Suavizado - Sul	49
Figura 5.7 – P. Suavizado – Nordeste	50
Figura 5.8 – P. Suavizado – Norte	50
Figura 5.9 – Log (Periodograma) vs Log ( $w$ ) – Sudeste/Centro-Oeste	50
Figura 5.10 – Log (Periodograma) vs Log ( $w$ ) – Sul	50
Figura 5.11 – Log (Periodograma) vs Log ( $w$ ) – Nordeste	50
Figura 5.12 – Log (Periodograma) vs Log ( $w$ ) – Norte	50
Figura 5.13 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para o parâmetro $d$ - Sudeste/Centro - Oeste	52
Figura 5.14 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para o parâmetro $D$ - Sudeste/Centro - Oeste	52
Figura 5.15 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para o parâmetro $d$ - Sul	52
Figura 5.16 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para o parâmetro $D$ - Sul	52
Figura 5.17 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para o parâmetro $d$ - Nordeste	53
Figura 5.18 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para o parâmetro $D$ - Nordeste	53
Figura 5.19 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para o parâmetro $d$ - Norte	53
Figura 5.20 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para o parâmetro $D$ - Norte	53
Figura 5.21 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para Seleção de Cenários – Sudeste/Centro-Oeste	56
Figura 5.22 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para Seleção de Cenários – Sul	56

Figura 5.23 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para Seleção de Cenários – Nordeste	56
Figura 5.24 – Distribuição <i>Bootstrap</i> para Seleção de Cenários – Norte	56
Figura 5.25 – Envoltória e Médias – Sudeste/Centro-Oeste	57
Figura 5.26 – Envoltória e Médias – Sul	57
Figura 5.27 – Envoltória e Médias – Nordeste	57
Figura 5.28 – Envoltória e Médias – Norte	57
Figura 5.29 – Teste de Médias – Sudeste/Centro-Oeste	58
Figura 5.30 – Teste de Médias – Sul	58
Figura 5.31 – Teste de Médias – Nordeste	59
Figura 5.32 – Teste de Médias – Norte	59
Figura 5.33 – Teste de Levene – Sudeste/Centro-Oeste	60
Figura 5.34 – Teste de Levene – Sul	60
Figura 5.35 – Teste de Levene – Nordeste	60
Figura 5.36 – Teste de Levene – Norte	60
Figura 5.37 – Teste Kolmogorov -Sminorv – Sudeste/Centro-Oeste	62
Figura 5.38 – Teste Kolmogorov -Sminorv – Sul	62
Figura 5.39 – Teste Kolmogorov -Sminorv – Nordeste	62
Figura 5.40 – Teste Kolmogorov -Sminorv – Norte	62

## Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Variáveis para Análise de Sequência Negativa	46
Tabela 5.1 – Parâmetros Fracionários Estimados	51
Tabela 5.2 – Intervalos de Confiança para $d$ & $D$	53
Tabela 5.3 – Modelos Finais	54
Tabela 5.4 – Mínimo e Máximo para Seleção de Cenários	55
Tabela 5.5 – Testes Médias (Global)	58
Tabela 5.6 – Testes Médias (Periódico)	59
Tabela 5.7 – Testes Variâncias (Global)	59
Tabela 5.8 – Testes Variâncias (Periódico)	61
Tabela 5.9 – Teste Kolmogorov-Sminorv (Global)	61
Tabela 5.10 – Teste Kolmogorov-Sminorv (Periódico)	62
Tabela 5.11 – Análise de Sequências Negativas	63
Tabela 5.12 – Testes de Máximo de Sequências Negativas	64
Tabela 5.13 – Comparação com outros Modelos	65

*Tenha em mente que tudo que  
você aprende na escola é  
trabalho de muitas gerações.  
Receba essa herança, honre-a,  
acrescente a ela e, um dia,  
fielmente, deposite-a nas mãos  
de seus filhos.*

*Albert Einstein*