



**Fernando Luiz Cyrino Oliveira**

**Nova abordagem para geração de cenários de afluições  
no planejamento da operação energética de médio prazo**

**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

Rio de Janeiro, 12 de março de 2010



**Fernando Luiz Cyrino Oliveira**

**Nova abordagem para geração de cenários de  
afliuências no planejamento da operação  
energética de médio prazo**

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. André Luís Marques Marcato**  
Departamento de Energia – UFJF

**Profa. Monica Barros**  
ENCE

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

Rio de Janeiro, 12 de março de 2010.

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

### **Fernando Luiz Cyrino Oliveira**

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2007. Especialista em Métodos Estatísticos Computacionais pela mesma instituição em 2008. Durante o Mestrado na PUC-Rio atuou em projetos de P&D no mercado de energia elétrica.

#### Ficha Catalográfica

Oliveira, Fernando Luiz Cyrino

Nova abordagem para geração de cenários de afluências no planejamento da operação energética de médio prazo / Fernando Luiz Cyrino Oliveira ; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2010.

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

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. PAR (p). 3. Ordem p. 4. Geração de cenários. 5. Bootstrap. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

*À memória da minha avó, Dila Araújo Oliveira,  
por ter deixado tudo melhor do que encontrou.*

## Agradecimentos

Referenciar alguns daqueles que me são queridos e eternos é a parte mais feliz de todo esse processo de aprendizado, iniciado com a coragem de trocar o certo pelo duvidoso na busca de um sonho.

A Deus, por me guiar com perfeição.

Aos meus pais, Armando e Maria Inêz, por serem incondicionais e presentes em todos os momentos da minha história. Meus maiores exemplos, meus heróis, meus amigos. Pensá-los já é suficiente para me deixar feliz.

À minha irmã, Fabiana, por nos entendermos como ninguém será capaz de fazê-lo em qualquer tempo.

À minha tia, Badinha, pela referência que representa para mim e pelo o apoio constante a todas as etapas da minha caminhada.

À minha avó, Celina, pelo exemplo de coragem e determinação em favor da vida.

Ao meu orientador, amigo e exemplo de profissional, Prof. Reinaldo Castro Souza, pelos ensinamentos, confiança, autonomia e oportunidades.

À CAPES e à PUC-Rio pelo apoio financeiro e oportunidade de formação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, pelos ensinamentos, receptividade e presteza com que sempre me trataram.

Aos professores André Marcato e Monica Barros, membros da banca, por aceitarem o convite e pelas contribuições de alto valor.

À amiga Luciana Campos, pela parceria fundamental na realização deste trabalho.

Aos amigos da PUC-Rio, em especial à Schaiane Nogueira Ouverney Barroso e Alexandre José dos Santos, pelos conhecimentos divididos, pelas dificuldades e satisfações que passamos juntos.

Aos colegas Cristina Vidigal, Pedro Guilherme Ferreira e Rodrigo Calili, pelas discussões, ideias e contribuições no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu amigo Thiago Senador, pela amizade, parceria, cervejas, momentos e histórias que vivemos juntos neste Rio de Janeiro.

Aos meus amigos Amanda Martins, Diego Zanotti e Lucas Soares pelas horas de conversas, confidências e tantas alegrias e angústias divididas.

Aos amigos Alexandre e Joana, pela amizade jurássica e leal e pela companhia constante na BR-040.

Aos amigos Edmar, João Cechin e Rodrigo Piubello, pela convivência, paciência e excelente recepção.

A todos os meus leais amigos, de perto e de longe, de pouco e de muito tempo, por tudo que representam na minha vida. Enumerá-los seria injusto.

À minha família, meus tios, primos e “agregados”, por, juntos, sermos muito melhores do que somos sozinhos.

Finalmente, considerando a dimensão deste Universo, sinto-me honrado, privilegiado e sobretudo feliz em dividir este mundo com vocês.

Sinceramente, obrigado!

## Resumo

Oliveira, Fernando Luiz Cyrino; Souza, Reinaldo Castro. **Nova abordagem para geração de cenários de aflúncias no planejamento da operação energética de médio prazo.** Rio de Janeiro, 2010. 108p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O modelo autorregressivo periódico da família Box & Jenkins, PAR(p), é empregado na modelagem e geração das séries de vazões hidrológicas e/ou de energias naturais afluentes utilizadas no modelo de otimização do despacho hidrotérmico no Brasil. Recentemente, alguns aspectos da modelagem têm sido alvo de estudos e diversas pesquisas vêm sendo realizados. Inicialmente, este trabalho visou o estudo da fase de identificação das ordens  $p$  dos modelos, fundamental para a correta definição da estrutura de modelagem e para a geração de cenários sintéticos. Atualmente, a identificação é feita com base na avaliação da significância dos coeficientes da função de autocorrelação parcial (FACP), baseados na aproximação assintótica de Quenouille. A proposta deste estudo foi a aplicação da técnica de computação intensiva *Bootstrap* para estimar a real significância dos referidos coeficientes. O segundo objetivo deste trabalho foi o emprego da mesma técnica com vistas à geração de cenários. A metodologia adotada atualmente ajusta uma distribuição Lognormal com três parâmetros para a geração de ruídos aleatórios, o que parece causar uma não-linearidade indesejável ao modelo original. Neste trabalho, os próprios resíduos gerados pelo modelo PAR(p), quando aplicado às séries históricas, foram utilizados na geração dos cenários. Os resultados mostraram que o *Bootstrap* levou à identificação de ordens inferiores na maioria dos casos e que os cenários conservaram satisfatoriamente as propriedades estatísticas das séries originais. Finalmente, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, corroborando alguns pontos levantados em estudos anteriores sobre a abordagem tradicional.

## Palavras-chave

PAR (p), Ordem  $p$ , geração de cenários, *Bootstrap*.

## Abstract

Oliveira, Fernando Luiz Cyrino; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **New approach to generating streamflow scenario to long-term energetic operation planning**. Rio de Janeiro, 2010. 108p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The periodic autoregressive model, a particular structure of the Box & Jenkins family, denoted by PAR( $p$ ), is employed to model the series of hydrological streamflow used for estimating the operational costs of the Brazilian hydro-thermal optimal dispatch. Recently, some aspects of this approach began to be studied and several researches on this topic are being developed. This work focused on the identification phase of the order “ $p$ ” of the PAR( $p$ ), essential to the correct definition of the model structure, as well as to generate synthetic scenarios to be used in the optimization procedure. Nowadays, the identification is based on evaluating the significance of the estimated partial autocorrelation coefficients function (PACF), based on the asymptotic result of Quenouille. The purpose of this study was on the application of a computer-intensive technique, called Bootstrap, to estimate the real statistical significance of such the estimated. The second goal of this study was use the Bootstrap technique in order to generate synthetic scenarios. The current methodology uses an approach for noise generation through a three parameters Lognormal distribution. Such approach seems to cause an undesirable non-linearity in the model. In this work, the PAR ( $p$ ) resulted noises were used during the scenarios generation. The results showed that the Bootstrap led to the identification of lower orders models, in comparison with the traditional approach, in almost all cases. In addition, the scenarios retained the statistical characteristics of the original series. The obtained results were quite satisfactory, corroborating some points raised in previous studies about the traditional approach.

## Keywords

PAR ( $p$ ), order  $p$ , scenarios generation, Bootstrap.



## Sumário

1	Introdução	16
2	O modelo autorregressivo periódico – PAR ( $p$ )	19
2.1	A metodologia Box & Jenkins	19
2.2	O modelo PAR ( $p$ )	22
2.2.1	Identificação das ordens “ $p$ ”	25
2.2.2	Resultados assintóticos para a distribuição de probabilidades de autocorrelação e autocorrelação parcial	27
2.2.3	Geração de cenários hidrológicos sintéticos	30
2.2.4	A estrutura não-linear do PAR ( $p$ )	34
3	A técnica de computação intensiva <i>Bootstrap</i>	38
3.1	<i>Bootstrap</i> em séries temporais	39
3.2	<i>Bootstrap</i> na identificação da ordem dos modelos	40
4	Modelo proposto	43
4.1	<i>Bootstrap</i> na identificação das ordens “ $p$ ”	43
4.2	<i>Bootstrap</i> na geração de cenários hidrológicos sintéticos	46
4.3	Avaliação de desempenho do modelo	49
4.3.1	Testes de médias	50
4.3.2	Testes de variância	51
4.3.3	Testes de aderência	52
4.3.4	Análise de correlação cruzada	54
4.3.4	Análise de sequências	55
5	Resultados obtidos	58
5.1	Identificação das ordens “ $p$ ”	58
5.2	Geração de cenários hidrológicos sintéticos	62
5.2.1	Envoltória e média dos cenários	62

5.2.2 Desvio-padrão dos cenários	76
5.2.3 Distribuição univariada dos cenários	86
5.2.4 Correlação cruzada dos cenários	91
5.2.5 Análise de sequências	98
6 Conclusões e considerações finais	101
7 Referências Bibliográficas	104

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Os filtros do modelo ARIMA (p,d,q)	20
Figura 2.2 – Estágios da metodologia Box & Jenkins	22
Figura 4.1 – Algoritmo <i>Bootstrap</i> para estimação de $\rho_k$ e $\varphi_{kk}$	44
Figura 4.2 – FAC dos ruídos de janeiro, Sudeste/Centro-Oeste	49
Figura 4.3 – Esquema de uma sequência negativa	55
Figura 5.1 – Ordens subsistema Sudeste/Centro-Oeste	59
Figura 5.2 – Ordens subsistema Sul	60
Figura 5.3 – Ordens subsistema Nordeste	60
Figura 5.4 – Ordens subsistema Norte	61
Figura 5.5 – Envoltória e médias sudeste via Lognormal	63
Figura 5.6 – Envoltória e médias sudeste via <i>Bootstrap</i>	63
Figura 5.7 – Envoltória e médias sul via Lognormal	64
Figura 5.8 – Envoltória e médias sul via <i>Bootstrap</i>	64
Figura 5.9 – Envoltória e médias nordeste via Lognormal	65
Figura 5.10 – Envoltória e médias nordeste via <i>Bootstrap</i>	65
Figura 5.11 – Envoltória e médias norte via Lognormal	66
Figura 5.12 – Envoltória e médias norte via <i>Bootstrap</i>	66
Figura 5.13 – Médias sudeste via Lognormal	67
Figura 5.14 – Médias sudeste via <i>Bootstrap</i>	67
Figura 5.15 – Médias sul via Lognormal	68
Figura 5.16 – Médias sul via <i>Bootstrap</i>	68
Figura 5.17 – Médias nordeste via Lognormal	69
Figura 5.18 – Médias nordeste via <i>Bootstrap</i>	69
Figura 5.19 – Médias norte via Lognormal	70
Figura 5.20 – Médias norte via <i>Bootstrap</i>	70
Figura 5.21 – Testes estatísticos para as médias via Lognormal	71
Figura 5.22 – Testes estatísticos para as médias via <i>Bootstrap</i>	71
Figura 5.23 – <i>p-values</i> do <i>T-Test</i> , sudeste, via Lognormal	72
Figura 5.24 – <i>p-values</i> do <i>T-Test</i> , sudeste, via <i>Bootstrap</i>	72
Figura 5.25 – <i>p-values</i> do <i>T-Test</i> , sul, via Lognormal	73

Figura 5.26 – <i>p-values</i> do <i>T-Test</i> , sul, via <i>Bootstrap</i>	73
Figura 5.27 – <i>p-values</i> do <i>T-Test</i> , nordeste, via Lognormal	74
Figura 5.28 – <i>p-values</i> do <i>T-Test</i> , nordeste, via <i>Bootstrap</i>	74
Figura 5.29 – <i>p-values</i> do <i>T-Test</i> , norte, via Lognormal	75
Figura 5.30 – <i>p-values</i> do <i>T-Test</i> , norte, via <i>Bootstrap</i>	75
Figura 5.31 – Desvio-padrão sudeste via Lognormal	77
Figura 5.32 – Desvio-padrão sudeste via <i>Bootstrap</i>	77
Figura 5.33 – Desvio-padrão sul via Lognormal	78
Figura 5.34 – Desvio-padrão sul via <i>Bootstrap</i>	78
Figura 5.35 – Desvio-padrão nordeste via Lognormal	79
Figura 5.36 – Desvio-padrão nordeste via <i>Bootstrap</i>	79
Figura 5.37 – Desvio-padrão norte via Lognormal	80
Figura 5.38 – Desvio-padrão nordeste via <i>Bootstrap</i>	80
Figura 5.39 – Testes estatísticos para o desvio-padrão via Lognormal	81
Figura 5.40 – Testes estatísticos para o desvio-padrão via <i>Bootstrap</i>	81
Figura 5.41 – <i>p-values</i> do Teste de Levene, sudeste, via Lognormal	82
Figura 5.42 – <i>p-values</i> do Teste de Levene, sudeste, via <i>Bootstrap</i>	82
Figura 5.43 – <i>p-values</i> do Teste de Levene, sul, via Lognormal	83
Figura 5.44 – <i>p-values</i> do Teste de Levene, sul, via <i>Bootstrap</i>	83
Figura 5.45 – <i>p-values</i> do Teste de Levene, nordeste, via Lognormal	84
Figura 5.46 – <i>p-values</i> do Teste de Levene, nordeste, via <i>Bootstrap</i>	84
Figura 5.47 – <i>p-values</i> do Teste de Levene, norte, via Lognormal	85
Figura 5.48 – <i>p-values</i> do Teste de Levene, norte, via <i>Bootstrap</i>	85
Figura 5.49 – Testes para a distribuição das médias via Lognormal	86
Figura 5.50 – Testes para a distribuição das médias via <i>Bootstrap</i>	86
Figura 5.51 – <i>p-values</i> do Teste de K-S, sudeste, via Lognormal	87
Figura 5.52 – <i>p-values</i> do Teste de K-S, sudeste, via <i>Bootstrap</i>	87
Figura 5.53 – <i>p-values</i> do Teste de K-S, sul, via Lognormal	88
Figura 5.54 – <i>p-values</i> do Teste de K-S, sul, via <i>Bootstrap</i>	88
Figura 5.55 – <i>p-values</i> do Teste de K-S, nordeste, via Lognormal	89
Figura 5.56 – <i>p-values</i> do Teste de K-S, nordeste, via <i>Bootstrap</i>	89
Figura 5.57 – <i>p-values</i> do Teste de K-S, norte, via Lognormal	90
Figura 5.58 – <i>p-values</i> do Teste de K-S, norte, via <i>Bootstrap</i>	90

Figura 5.59 – Correlação cruzada: sudeste x sul, via Lognormal	92
Figura 5.60 – Correlação cruzada: sudeste x sul, via <i>Bootstrap</i>	92
Figura 5.61 – Correlação cruzada: sudeste x nordeste, via Lognormal	93
Figura 5.62 – Correlação cruzada: sudeste x nordeste, via <i>Bootstrap</i>	93
Figura 5.63 – Correlação cruzada: sudeste x norte, via Lognormal	94
Figura 5.64 – Correlação cruzada: sudeste x norte, via <i>Bootstrap</i>	94
Figura 5.65 – Correlação cruzada: sul x nordeste, via Lognormal	95
Figura 5.66 – Correlação cruzada: sul x nordeste, via <i>Bootstrap</i>	95
Figura 5.67 – Correlação cruzada: sul x norte, via Lognormal	96
Figura 5.68 – Correlação cruzada: sul x norte, via <i>Bootstrap</i>	96
Figura 5.69 – Correlação cruzada: nordeste x norte, via Lognormal	97
Figura 5.70 – Correlação cruzada: nordeste x norte, via <i>Bootstrap</i>	97

## Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Estatísticas descritivas amostra de cenários positivos	47
Tabela 4.2 – Proporção elementos negativos na matriz de cenários	47
Tabela 4.3 – Modelagem das sequências negativas	56
Tabela 5.1 – Análise das sequências negativas, via Lognormal	98
Tabela 5.2 – Análise das sequências negativas, via <i>Bootstrap</i>	99
Tabela 5.3 – Testes de máximos de sequências negativas, Lognormal	99
Tabela 5.4 – Testes de máximos de sequências negativas, <i>Bootstrap</i>	100

*“O saber a gente aprende  
com os mestres e com os livros.  
A sabedoria se aprende é com  
a vida e com os humildes.  
Feliz aquele que transfere o que sabe  
e aprende o que ensina.”*

Cora Coralina