



Moisés Lima de Menezes

**Abordagem PAR(p) e Singular Spectrum
Analysis na Modelagem e Geração de Cenários**

Tese de Doutorado

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

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

Rio de Janeiro
Janeiro de 2014



Moisés Lima de Menezes

**Abordagem PAR(p) e Singular Spectrum
Analysis na Modelagem e Geração de Cenários**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção grau de Doutor 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 Luiz Marques Marcato

UFJF

Prof. Delberis Araújo Lima

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC - Rio

Prof. Ivo Chaves da Silva Junior

UFJF

Dr. Joari Paulo da Costa

ONS

Prof. José Francisco Moreira Pessanha

UERJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de janeiro de 2014.

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

Moisés Lima de Menezes

Graduou-se em Licenciatura em Matemática na UFPE, possui Especialização em Matemática pela UFRPE e Mestrado em Estatística pela UFPE. Desenvolveu junto com o seu orientador uma grande quantidade de trabalhos e artigos científicos apresentados em congressos nacionais e internacionais. Também publicou vários artigos em revistas internacionais durante o Doutorado em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Menezes, Moisés Lima de

Abordagem PAR(ρ) e Singular Spectrum Analysis na Modelagem e Geração de Cenários / Moisés Lima de Menezes; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2014.

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

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Singular Spectrum Analysis. 3. Modelagem PAR(ρ). 4. Energia Natural Afluente. 5. Energia Eólica. 6. Geração de cenários. 7. Teste BDS. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo sopro da vida a mim concedido e pela capacidade de pensar e lutar o suficiente para chegar até aqui.

Aos meus pais, José Menezes e Judite Lima, por aceitarem esta missão de me criar, cuidar, dar educação e me apoiar em todos os momentos.

À minha querida esposa Keila, que sempre lutou comigo ao longo destes longos anos e a quem eu devo muito deste doutorado, pois soube superar de forma inteligente os momentos mais difíceis e me apoiar fortemente nas principais decisões.

Aos meus queridos e amados filhos Pedro Arthur e Matheus Henrique que sempre iluminaram meus dias trazendo momentos agradáveis para equilibrar as tensões dos longos períodos de estudos e terem a paciência de dividir o pai com a PUC-Rio.

Agradeço também ao meu orientador e professor Reinaldo Castro Souza, pela confiança depositada em mim desde o início desta jornada e sempre resolver com serenidade os grandes desafios encontrados no meio do caminho.

A UFF por permitir que eu pudesse me dedicar exclusivamente ao doutorado e manter o suporte financeiro.

Aos membros da Banca Examinadora pela rica e diversificada contribuição.

Ao Professor José Francisco Moreira Pessanha, que acompanhou de perto esta trajetória e auxiliou em diversos trabalhos e artigos que publicamos juntos.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio e aos colegas que conviveram esses anos vivendo no mesmo ritmo alucinado.

Muito obrigado a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta na conclusão desta tese.

Resumo

Menezes, Moisés Lima de; Souza, Reinaldo Castro (Orientador). **Abordagem PAR(p) e Singular Spectrum Analysis na Modelagem e Geração de Cenários.** Rio de Janeiro, 2014, 122p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em função da predominância das fontes hidráulicas no sistema elétrico brasileiro, há uma grande incerteza na oferta futura de energia. Para lidar com a incerteza hidrológica, a política ótima de operação do sistema elétrico brasileiro é fruto de um sofisticado modelo de otimização estocástica no qual são considerados um amplo conjunto de séries sintéticas (cenários) de Energia Natural Afluente (ENA). Tradicionalmente, as séries sintéticas de ENA têm sido geradas por modelos periódicos autorregressivos PAR(p). Recentemente, o advento da energia eólica e o crescimento da sua participação no sistema elétrico brasileiro apontam para a necessidade de métodos capazes de gerar séries sintéticas de velocidade do vento. Assim, nesta tese propõe-se uma metodologia para geração de séries sintéticas baseada no uso combinado da modelagem PAR(p) e da análise espectral singular. A metodologia proposta é geral e pode ser usada na geração de séries sintéticas da ENA e da velocidade de vento. A análise espectral singular ou Singular Spectrum Analysis (SSA) é uma metodologia recente em séries temporais. Através de SSA pode-se extrair tendências ou sazonalidades bem como suavizar a série através da remoção de componentes ruidosas. SSA vem sendo aplicado com sucesso em diversas áreas do conhecimento como em Hidrologia e Economia. A Multi-channel Singular Spectrum Analysis (MSSA) é uma extensão natural do SSA quando aplicada a múltiplas séries simultaneamente. A metodologia proposta foi aplicada às séries de ENA dos quatro subsistemas elétricos (Nordeste, Norte, Sudeste/Centro-Oeste e Sul) e comparada ao modelo PAR(p) já existente. Adicionalmente, a metodologia proposta foi aplicada na geração de séries sintéticas de velocidade do vento em duas localidades situadas no Nordeste brasileiro. Os bons resultados alcançados indicam que a metodologia proposta pode ser utilizada na geração de

séries sintéticas de ENA e de energia eólica consideradas nos modelos de otimização estocástica que auxiliam o planejamento da operação energética do sistema elétrico brasileiro.

Palavras-chave

Singular Spectrum Analysis; Modelagem PAR(p); Energia Natural Afluente; Energia Eólica; Geração de Cenários; Teste BDS.

Abstract

Menezes, Moisés Lima de; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **PAR(p) and Singular Spectrum Analysis Approach in the Modeling and Scenarios Generation.** Rio de Janeiro, 2014, 122p. Doctorate Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Due to the predominance of hydraulic sources in the Brazilian electrical system, there is a large uncertainty in future energy supply. To deal with hydrologic uncertainty, the optimal operation policy of the Brazilian electric system is the result of a sophisticated stochastic optimization where are considered a large set of synthetic series (scenarios) of Affluent Natural Energy (ENA). Traditionally, synthetic ENA series have been generated by periodic autoregressive models PAR (p). Recently, the advent of wind energy and its growth of participation in Brazilian electrical system indicate to the need for methods to generate synthetic series of wind speed. Thus, this thesis proposes a methodology for generating synthetic series based on the combined use of PAR (p) models and the Singular Spectrum Analysis (SSA). The proposed methodology is general and can be used to generate synthetic series of ENA and wind speed. SSA is a recent methodology in time series. Through SSA it can extract trends or seasonality and smoothing by removing the series of noisy components. SSA has been successfully applied in various fields of knowledge as in Hydrology and Economics. Multi-channel Singular Spectrum Analysis (MSSA) is a natural extension of the SSA when applied to multiple series simultaneously. The proposed methodology was applied to the ENA series of four electric subsystems (Northeast, North, Southeast / Midwest and South) and compared to the PAR (p) existing model. Additionally, the proposed methodology was applied to the generation of synthetic series of wind speed at two sites located in the Brazilian Northeast. The good results achieved demonstrate that the proposed methodology can be used to generate synthetic series of ENA and wind energy considered in stochastic optimization models that assist planning the operation of the Brazilian electric energy system.

Keywords

Singular Spectrum Analysis; PAR(p) Modeling; Affluent Natural Energy;
Wind Power; Scenarios Generation; BDS Test.

Sumário

1. Introdução	18
1.1. Motivação	18
1.2. Utilização de SSA na Geração de Séries Sintéticas	19
1.3. Objetivo do Trabalho	21
1.4. Relevância do Tema	21
1.5. Organização da Tese	22
2. Modelos Periódicos Autorregressivos	24
2.1. Planejamento da Operação do Sistema Interligado Nacional	24
2.2. Modelagem de Energia Natural Afluente	25
2.3. Geração de Séries Sintéticas de Energia Natural Afluente	27
2.4. Metodologia PAR(p)	27
2.4.1. Processos Estocásticos e Séries Temporais	27
2.4.2. Modelagem de Box & Jenkins	29
2.4.3. Modelo PAR(p)	31
2.4.4. Identificação do Modelo PAR(p)	31
2.4.5. Estimação do Modelo PAR(p)	33
2.4.6. Verificação do Modelo PAR(p)	33
2.4.7. Geração de Séries Sintéticas com o Modelo PAR(p)	34
2.5. Avaliação do Desempenho do Modelo	35
2.5.1. Testes da Média	36
2.5.2. Testes da Variância	36
2.5.3. Testes de Aderência	37
2.5.4. Análise de Sequências	39
3. Singular Spectrum Analysis (SSA)	41
3.1. SSA	42
3.1.1. Decomposição SSA	42
3.1.2. Reconstrução SSA	45
3.1.3. Métodos de Agrupamentos	47

3.1.3.1. Agrupamento por Análise de Componentes Principais	48
3.1.3.2. Agrupamento por Clusterização Hierárquica	48
3.1.3.3. Agrupamento por Análise Gráfica dos Vetores Singulares	49
3.1.3.4. Informação Suplementar: Análise de Periodograma	50
3.1.4. Separabilidade	50
3.2. Multi-Channel Singular Spectrum Analysis (MSSA)	51
3.3. Escolha do Valor do Parâmetro L de Defasagem	53
4. Metodologia Proposta	57
4.1. Modelo PAR(p) - MSSA/SSA Proposto	57
4.2. Geração de Cenários	59
5. Aplicação à Energia Natural Afluente (ENA)	61
5.1. Modelagem PAR(p) - MSSA	64
5.2. Geração de Cenários PAR(p) - MSSA	75
5.3. Análise do Desempenho do Modelo	79
5.4. Abordagem PAR(p) - MSSA/SSA com Filtragem do Subistema Sul Separadamente	81
6. Aplicação à Séries de Velocidade do Vento	91
6.1. Modelagem PAR(p) - MSSA	94
6.2. Geração de Cenários Eólicos	106
6.3. Análise do Desempenho do Modelo	108
7. Conclusões	111
8. Referências Bibliográficas	114
9. Apêndices	121
9.1. Apêndice A – O Teste BDS	121

Lista de figuras

Figura 2.1 – Sequências Negativas.....	39
Figura 4.1 – Passos na estimação de L e filtragem SSA da série.....	58
Figura 5.1 – Série original de médias mensais ENA do Subsistema Norte (N).....	61
Figura 5.2 – Série original de médias mensais ENA do Subsistema Nordeste (NE).....	62
Figura 5.3 – Série original de médias mensais ENA do Subsistema Sudeste/Centro-Oeste (SE).....	62
Figura 5.4 – Série original de médias mensais ENA do Subsistema Sul (S).....	63
Figura 5.5 – Os nove primeiros vetores singulares na filtragem MSSA.....	65
Figura 5.6 – Alguns pares de vetores singulares na filtragem MSSA.....	65
Figura 5.7 – Periodograma dos vetores singulares (2 e 3) na filtragem MSSA.....	66
Figura 5.8 – Periodograma dos vetores singulares (4 e 5) na filtragem MSSA.....	66
Figura 5.9 – Componentes de tendência dos quatro subsistemas na abordagem MSSA.....	67
Figura 5.10 – Componentes harmônicas dos quatro subsistemas na abordagem MSSA.....	68
Figura 5.11 – Componentes ruidosas dos quatro subsistemas na abordagem MSSA.....	68
Figura 5.12 – Comparação gráfica entre série original e série filtrada via MSSA do subsistema Norte.....	70
Figura 5.13 – Comparação gráfica entre série original e série filtrada via MSSA do subsistema Nordeste.....	70
Figura 5.14 – Comparação gráfica entre série original e série filtrada via	

MSSA do subsistema Sudeste/Centro-Oeste.....	70
Figura 5.15 – Comparação gráfica entre série original e série filtrada via MSSA do subsistema Sul.....	71
Figura 5.16 – Comparação gráfica entre os intervalos ($\mu \pm \sigma$) na série original e na série filtrada MSSA do subsistema (N).....	71
Figura 5.17 – Comparação gráfica entre os intervalos ($\mu \pm \sigma$) na série original e na série filtrada MSSA do subsistema (NE).....	72
Figura 5.18 – Comparação gráfica entre os intervalos ($\mu \pm \sigma$) na série original e na série filtrada MSSA do subsistema (SE).....	72
Figura 5.19 – Comparação gráfica entre os intervalos ($\mu \pm \sigma$) na série original e na série filtrada MSSA do subsistema (S).....	72
Figura 5.20 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica do subsistema Norte.....	75
Figura 5.21 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica do subsistema Nordeste.....	76
Figura 5.22 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica do subsistema Sudeste/Centro-Oeste.....	76
Figura 5.23 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica do subsistema Sul.....	76
Figura 5.24 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico do subsistema (N).....	77
Figura 5.25 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico do subsistema (NE).....	77
Figura 5.26 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico do subsistema (SE).....	78
Figura 5.27 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico do subsistema (S).....	78
Figura 5.28 – Comparação Gráfica entre a série original e a série filtrada através da nova abordagem MSSA no subsistema (N).....	83
Figura 5.29 – Comparação Gráfica entre a série original e a série filtrada através da nova abordagem MSSA no subsistema (NE).....	83
Figura 5.30 – Comparação Gráfica entre a série original e a série filtrada através da nova abordagem MSSA no subsistema (SE).....	83

Figura 5.31 – Comparação Gráfica entre a série original e a série filtrada através da nova abordagem SSA no subsistema (S).....	84
Figura 5.32 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica do subsistema (N) na nova abordagem MSSA.....	86
Figura 5.33 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica do subsistema (NE) na nova abordagem MSSA.....	86
Figura 5.34 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica do subsistema (SE) na nova abordagem MSSA.....	86
Figura 5.35 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica do subsistema (S) na nova abordagem SSA.....	87
Figura 5.36 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico do subsistema (N) sob a nova abordagem MSSA.....	88
Figura 5.37 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico do subsistema (NE) sob a nova abordagem MSSA.....	88
Figura 5.38 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico do subsistema (SE) sob a nova abordagem MSSA.....	88
Figura 5.39 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico do subsistema (S) sob a nova abordagem SSA.....	89
Figura 6.1 – Curva de Potência.....	91
Figura 6.2 – Médias mensais de velocidade do vento na estação Petrolina.....	92
Figura 6.3 – Médias mensais de velocidade do vento na estação Pesqueira.....	93
Figura 6.4 – Os nove primeiros vetores singulares na filtragem MSSA.....	94
Figura 6.5 – Alguns pares de vetores singulares na filtragem MSSA.....	95
Figura 6.6 – Periodogramas dos pares de vetores singulares (2 e 3) e (7 e 8) na filtragem MSSA.....	96
Figura 6.7 – Componentes MSSA de Tendência.....	96
Figura 6.8 – Componente MSSA Harmônica.....	96

Figura 6.9 – Componente MSSA de Ruído.....	97
Figura 6.10 – Comparação gráfica entre série original e série filtrada MSSA - Petrolina.....	98
Figura 6.11 – Comparação gráfica entre série original e série filtrada MSSA - Pesqueira.....	98
Figura 6.12 – Comparação gráfica entre série original e série Filtrada SSA – Petrolina.....	99
Figura 6.13 – Comparação gráfica entre série original e série Filtrada SSA – Pesqueira.....	99
Figura 6.14 – Comparação gráfica entre o MAPE <i>in sample</i> nas Modelagens – Petrolina	102
Figura 6.15 – Comparação gráfica entre o RMSE <i>in sample</i> nas Modelagens – Petrolina.....	102
Figura 6.16 – Comparação gráfica entre o MAPE <i>in sample</i> nas Modelagens – Pesqueira	104
Figura 6.17 – Comparação gráfica entre o RMSE <i>in sample</i> nas Modelagens – Pesqueira.....	104
Figura 6.18 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica de velocidade do vento – Petrolina.....	106
Figura 6.19 – Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica de velocidade do vento – Pesqueira.....	107
Figura 6.20 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico de velocidade do vento – Petrolina	108
Figura 6.21 – Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico de velocidade do vento - Pesqueira.....	108

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Variáveis aleatórias da sequência negativa.....	40
Tabela 5.1 - Medidas estatísticas das quatro séries de ENA.....	63
Tabela 5.2 - Correlação entre as séries de ENA dos quatro subsistemas.....	64
Tabela 5.3 - Componentes geradas na abordagem MSSA.....	67
Tabela 5.4 - Correlação ponderada entre as componentes MSSA.....	69
Tabela 5.5 - Teste BDS para as séries de ruídos dos quatro subsistemas.....	69
Tabela 5.6 - MAPE (%) <i>in sample</i> dos meses para os modelos PAR(p) e PAR(p) - MSSA nos quatro subsistemas.....	73
Tabela 5.7 - MAPE (%) <i>in sample</i> dos meses para os modelos PAR(p) - Wavelet e PAR(p) – MSSA nos quatro subsistemas.....	74
Tabela 5.8 - Percentuais de não rejeição da hipótese nula de igualdade entre as médias no teste <i>t</i> -Student em comparação com a série histórica	79
Tabela 5.9 - Percentuais de não rejeição da hipótese nula de igualdade entre as variâncias no teste de Levene em comparação com a série histórica.....	79
Tabela 5.10 - Testes das sequências negativas para o modelo PAR(p).....	81
Tabela 5.11 - Testes das sequências negativas para o modelo PAR(p) - MSSA.....	81
Tabela 5.12 - Componentes geradas na abordagem MSSA para os subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste.....	82
Tabela 5.13 - teste BDS para as séries de ruídos dos subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste na filtragem MSSA.....	82
Tabela 5.14 - Componentes geradas na abordagem SSA para o subsistema Sul.....	84
Tabela 5.15 - Teste BDS para a série de ruído do subsistema Sul na filtragem SSA.....	84

Tabela 5.16 - MAPE (%) <i>in sample</i> dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) – SSA para o subsistema Sul e PAR(p) – MSSA para os demais subsistemas.....	85
Tabela 5.17 - Percentuais de não rejeição da hipótese nula de igualdade entre as médias no teste <i>t</i> -Student em comparação com a série histórica com a nova abordagem.....	89
Tabela 5.18 - Percentuais de não rejeição da hipótese nula de igualdade entre as variâncias no teste de Levene em comparação com a série histórica com a nova abordagem.....	89
Tabela 5.19 - Testes das sequências negativas para o modelo PAR(p) – MSSA/SSA.....	90
Tabela 6.1(a) - Estatísticas da série original de Petrolina.....	93
Tabela 6.1(b) - Estatísticas da série original de Pesqueira.....	93
Tabela 6.2 - Componentes geradas na abordagem MSSA.....	96
Tabela 6.3 - Correlação ponderada entre as componentes MSSA.....	97
Tabela 6.4 - Teste BDS para as séries de ruídos das estações anemométricas.....	97
Tabela 6.5 - Ordem AR por mês para cada abordagem PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) - MSSA na estação Petrolina.....	100
Tabela 6.6 - Ordem AR por mês para cada abordagem PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) - MSSA na estação Pesqueira.....	100
Tabela 6.7 - MAPE (%) <i>in sample</i> dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) - MSSA. Estação Petrolina.....	101
Tabela 6.8 - RMSE <i>in sample</i> dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) - MSSA. Estação Petrolina.....	101
Tabela 6.9 - MAPE (%) <i>in sample</i> dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) - MSSA. Estação Pesqueira.....	103
Tabela 6.10 - RMSE <i>in sample</i> dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) - MSSA. Estação Pesqueira.....	103
Tabela 6.11 - Média e desvio-padrão para os dados originais, filtrados SSA e filtrados MSSA da estação Petrolina.....	105
Tabela 6.12 - Média e desvio-padrão para os dados originais, filtrados SSA e filtrados MSSA da estação Pesqueira.....	105

Tabela 6.13 - Percentuais de não rejeição da hipótese nula entre as médias no teste t -Student em comparação com a série histórica.....	109
Tabela 6.14 - Percentuais de não rejeição da hipótese nula entre as variâncias no teste de Levene em comparação com a série histórica....	109
Tabela 6.15 - Teste de Sequências negativas para o modelo PAR(p)...	109
Tabela 6.16 - Teste de Sequências negativas para o modelo PAR(p) - SSA.....	109
Tabela 6.17 - Teste de Sequências negativas para o modelo PAR(p) - MSSA	110