



Bianca Mesquita Amaral

**Modelos VARX para Geração de Cenários de Vento e
Vazão Aplicados à Comercialização de Energia**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Álvaro de Lima Veiga Filho

Rio de Janeiro
Setembro de 2011



Bianca Mesquita Amaral

Modelos VARX para Geração de Cenários de Vento e Vazão Aplicados à Comercialização de Energia

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. Álvaro de Lima Veiga Filho
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Alexandre Street de Aguiar

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Cristiano Augusto Coelho Fernandes

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Joel Maurício Corrêa da Rosa

UFF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 14 de setembro de 2011

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

Bianca Mesquita Amaral

Graduou-se em Estatística na Escola Nacional de Ciências Estatísticas – ENCE/IBGE em 2005. Especializou-se em Finanças no Instituto Coppead de Administração em 2006.

Ficha Catalográfica

Amaral, Bianca Mesquita

Modelos VARX para geração de cenários de vento e vazão aplicados à comercialização de energia / Bianca Mesquita Amaral ; orientador: Álvaro de Lima Veiga Filho. – 2011.

155 f. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Energia eólica. 3. Energia hidrelétrica. 4. Complementaridade. 5. Estimação conjunta. 6. Cenários integrados. 7. Newave. 8. Despacho ótimo. I. Veiga Filho, Álvaro de Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha avó,
Maria da Fonseca Amaral,
In Memoriam.

Agradecimentos

Ao Prof. Álvaro Veiga, por toda a dedicação, sabedoria, motivação e amizade em todos os momentos. Agradeço pelos valiosos ensinamentos que sempre levarei comigo.

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

Ao Prof. Alexandre Street pelo incentivo e pela enorme contribuição.

À Flávia Fontanet, Nayara Lopes e Úrsulla Monteiro pelo companheirismo e eterna amizade.

Aos meus pais, Liliane M. Amaral e Josumar do Amaral, por todo apoio, carinho e amor. Á vocês que sempre me estimularam e me inspiraram a novas conquistas, incentivaram-me a prosseguir sem medo, com a certeza que eu estaria sempre amparada.

Ao meu irmão Bruno M. Amaral, pela grande torcida, amizade e amor. Pelas risadas sem fim e por toda alegria que você traz para minha vida.

Á Lourdes e Nelson Esteves pelo amor e pelas lindas palavras de força e fé.

À minha amada avó Maria, que não está presente, mas que tem meu eterno amor, gratidão e saudade. “Você estará sempre comigo.”

Ao meu marido Diego Esteves, que sempre esteve ao meu lado incondicionalmente e me motivou ao longo do desenvolvimento deste trabalho com muita paciência, companheirismo e amor.

Resumo

Amaral, Bianca Mesquita; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Orientador). **Modelos VARX para Geração de Cenários de Vento e Vazão Aplicados à Comercialização de Energia**. Rio de Janeiro, 2011. 155p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A estabilização sazonal da oferta de energia tem sido um desafio ao planejamento da operação, e dada a complementaridade existente entre as fontes hidráulica e eólica, um plano de ação integrado poderia mitigar o risco natural envolvido no processo de geração de energia. A construção de cenários integrados de vento e vazão constituiria uma importante ferramenta para o planejamento das operações e cálculo do despacho ótimo, visto que, a energia eólica tem assumido importância crescente e está, cada vez mais, inserida no ambiente de comercialização de energias. No Brasil, onde a capacidade eólica instalada vem atingindo patamares significativos, predominantemente na região Nordeste, os cenários integrados seriam incorporados ao modelo Newave utilizado pelo ONS. Este trabalho se propõe a desenvolver modelos de estimação conjunta de vento e vazão através do algoritmo recursivo de mínimos quadrados ponderados, alimentado pelas séries de fator de capacidade eólico, vazão e energia natural afluyente, as últimas provenientes do modelo Newave. Em seguida a geração de cenários integrados utiliza o método de simulação de Monte Carlo. Os resultados obtidos no processo de modelagem demonstraram bom desempenho, e as séries sintéticas simuladas preservaram as características das séries originais.

Palavras-chave

Energia eólica; energia hidrelétrica; complementaridade; estimação conjunta; cenários integrados; Newave, despacho ótimo.

Abstract

Amaral, Bianca Mesquita; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Advisor). **VARX Models for Scenario Generation of Wind and River Flow Applied to Energy Trading**. Rio de Janeiro, 2011. 155p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The seasonal stability of supply energy has been a challenge for operation planning for the electric sector. Since the existence of the complementarity between wind and hydro sources, an integrated action plan could mitigate the natural risk involved in the electricity generation process. The integrated wind and streamflow scenarios would constitute an important tool for operation planning and also would provide means to calculate the optimal dispatch. Due wind power has assume increasing importance and it has been inserted in the energy trading environment more and more. In Brazil, the installed wind power capacity has reached significant levels, predominantly in the Northeast region, the integrated scenarios would be incorporated into the Newave model, which is used by the ONS. This work aims to develop models for joint estimation of wind and streamflow through the recursive algorithm of weighted least squares, fed by the series of wind capacity factor, streamflow and natural hydro power, the latest comes from Newave model. Next, the integrated scenarios generation uses Monte Carlo simulation method. The final results in the modeling process showed good performance, and simulated synthetic series preserved the characteristics of the original series.

Keywords

Wind power; hydropower; complementarity; joint estimation; integrated scenarios; Newave; optimal dispatch.

Sumário

1	Introdução.....	17
1.1	Motivação.....	18
1.2	Estrutura da Dissertação.....	19
2	Energia Eólica	21
2.1	O Vento	21
2.2	Conversão em Energia Eólica	21
2.3	Fonte Eólica.....	22
2.4	Tipos de Aerogeradores	22
2.4.1	Eixo Vertical.....	23
2.4.2	Eixo Horizontal	27
2.5	Aproveitamento Eólico	29
2.5.1	Características do Aerogerador	29
2.5.2	Características do Local	34
2.5.3	Fator de Capacidade Eólico.....	36
2.6	Conjuntura da Energia Eólica	38
2.6.1	No Mundo.....	38
2.6.2	No Brasil.....	43
2.7	Literatura de Modelos de Previsão.....	45
2.7.1	Revisão dos Principais Modelos.....	47
2.7.2	Considerações Atuais	50
3	Energia Hidrelétrica	52
3.1	No Mundo	53
3.2	No Brasil	54
3.2.1	Planejamento do Setor Elétrico	55
3.3	Literatura de Modelos de Previsão.....	56
3.3.1	Newave.....	61
3.4	Complementaridade	66
3.5	Contribuição deste Trabalho	67
4	Metodologia	68
4.1	Mínimos Quadrados Ponderados	69
4.1.1	Recursividade	71
4.1.2	Estimação e Inferência.....	72
4.2	Testes de Especificação.....	75
4.2.1	Estacionariedade.....	75
4.2.2	Normalidade	77
4.2.3	Autocorrelação	79
4.2.4	Heterocedasticidade.....	84
4.2.5	Outliers	85
4.2.6	Critérios para Seleção de Modelos	90
4.2.7	Medidas de Aderência do Modelo.....	91
4.3	Estimação Robusta para Outliers	92
4.3.1	Procedimento Iterativo	94

5	Resultados	96
5.1	Descrição dos Dados	96
5.1.1	Fator de Capacidade Eólico e Vazão	97
5.1.2	Variáveis Exógenas	100
5.2	Modelo Proposto	102
5.2.1	Avaliação	106
5.2.2	Identificação de Outliers	109
5.3	Modelo com Correção de Outliers	112
5.3.1	Avaliação	113
5.3.2	Validação	115
6	Geração de Cenários	119
6.1	Simulação de Monte Carlo	119
6.2	Problema: Simulação Negativa	121
6.2.1	Resíduos Log-Normal	121
6.3	Cenários Integrados	123
7	Avaliação de Contratos de Energia	128
7.1	Estrutura de Comercialização de Energia	129
7.2	Preço de Liquidação de Diferenças	131
7.3	Contratos de Compra e Venda	131
7.4	Avaliação do Risco do Portfólio	132
7.5	Otimização do Portfólio Eólico-Hídrico	133
7.6	Outra Proposta para Geração de Cenários Integrados	134
7.6.1	Modelo VARX com Variáveis Transformadas	136
8	Conclusão	140
9	Referências bibliográficas	143
	Anexo I	150

Lista de Figuras

Figura 2-1 – Turbina eólica vertical Darrieus.	24
Figura 2-2 – Turbina eólica vertical Savonius.....	25
Figura 2-3 – Turbina eólica-solar vertical.	25
Figura 2-4 – Turbina eólica vertical Gorlov.....	26
Figura 2-5 – Turbina eólica vertical Giromill.	27
Figura 2-6 – Turbinas eólicas horizontais.	28
Figura 2-7 – Direção do vento em turbinas <i>upwind</i> e <i>downwind</i>	28
Figura 2-8 – Diagrama típico da curva de potência de um gerador eólico.....	30
Figura 2-9 – Perdas de velocidade do vento na turbina.....	32
Figura 2-10 – Relação entre altura e velocidade do vento.	35
Figura 2-11 – Otimização da curva de potência.	37
Figura 2-12 – Capacidade total instalada de energia eólica no mundo (MW).	40
Figura 2-13 – Nova capacidade instalada de energia eólica no mundo (MW).....	41
Figura 2-14 – Taxa de crescimento eólico mundial (%).	41
Figura 2-15 – Países com maior capacidade total instalada (MW).	41
Figura 2-16 – Capacidade eólica por área (kW / km ²).	42
Figura 2-17 – Capacidade eólica por população (kW / pessoa).	42
Figura 2-18 – Capacidade eólica por PIB (kW / milhão US\$).	43
Figura 3-1 – Matriz energética do Brasil.....	55
Figura 3-2 – Instituições do setor elétrico do Brasil.....	56
Figura 3-3 – Processo de decisão de despacho hidrotérmicos.....	57
Figura 3-4 – Principais etapas do processo de planejamento.	60
Figura 3-5 – Variáveis para cálculo de energia do subsistema.....	62
Figura 5-1 – Série histórica FC.	97
Figura 5-2 – Série histórica FC (2005-2008).	97
Figura 5-3 – Série histórica Vz.....	98
Figura 5-4 – Série histórica Vz (2005-2008).....	98
Figura 5-5 – Comparativo anual FC.....	98
Figura 5-6 – Histograma FC.....	98
Figura 5-7 – Comparativo anual Vz.	98
Figura 5-8 – Histograma Vz.	98
Figura 5-9 – Séries históricas Vz e FC.....	99

Figura 5-10 – Gráfico de dispersão (FC X Vz).	99
Figura 5-11 – Correlograma da série FC.	100
Figura 5-12 – Correlograma da série Vz.	100
Figura 5-13 – Série histórica ENA-SE.	100
Figura 5-14 – Comparativo anual ENA-SE.	100
Figura 5-15 – Série histórica ENA-S.	101
Figura 5-16 – Comparativo anual ENA-S.	101
Figura 5-17 – Série histórica ENA-NE.	101
Figura 5-18 – Comparativo anual ENA-NE.	101
Figura 5-19 – Série histórica ENA-N.	101
Figura 5-20 – Comparativo anual ENA-N.	101
Figura 5-21 – FC estimado por $MQO \times \varepsilon_{FC2}$.	105
Figura 5-22 – Vz estimado por $MQO \times \varepsilon_{Vz2}$.	105
Figura 5-23 – Dispersão dos resíduos FC.	107
Figura 5-24 – Dispersão dos resíduos Vz.	107
Figura 5-25 – Comparativo anual resíduos FC.	107
Figura 5-26 – Comparativo anual resíduos Vz.	107
Figura 5-27 – Histograma resíduos FC.	107
Figura 5-28 – Histograma resíduos Vz.	107
Figura 5-29 – Autocorrelação resíduos FC.	108
Figura 5-30 – Autocorrelação quadrado dos resíduos FC.	108
Figura 5-31 – Autocorrelação resíduos Vz.	109
Figura 5-32 – Autocorrelação quadrado dos resíduos Vz.	109
Figura 5-33 – Boxplot FC e Vz.	110
Figura 5-34 – Boxplot dos resíduos FC e Vz.	110
Figura 5-35 – Outliers série Vz.	111
Figura 5-36 – Vz original e Vz corrigida.	112
Figura 5-37 – Boxplot Vz original e Vz corrigida.	112
Figura 5-38 – Dispersão dos resíduos FC.	113
Figura 5-39 – Dispersão dos resíduos Vz.	113
Figura 5-40 – Comparativo anual resíduos FC.	113
Figura 5-41 – Comparativo anual resíduos Vz.	113
Figura 5-42 – Histograma resíduos FC.	114

Figura 5-43 – Histograma resíduos Vz.....	114
Figura 5-44 – Autocorrelação resíduos FC.....	114
Figura 5-45 – Autocorrelação quadrado dos resíduos FC.....	114
Figura 5-46 – Autocorrelação resíduos Vz.....	115
Figura 5-47 – Autocorrelação quadrado dos resíduos Vz.	115
Figura 5-48 – Erros de previsão (%) FC.	116
Figura 5-49 – Erros de previsão (%) Vz.....	116
Figura 5-50 – Erros de previsão (%) FC- antes da correção.	117
Figura 5-51 – Erros de previsão (%) Vz- antes da correção.....	117
Figura 5-52 – Desempenho do modelo FC - total.	118
Figura 5-53 – Desempenho do modelo Vz - total.	118
Figura 5-54 – Desempenho do modelo FC (IC 95%).....	118
Figura 5-55 – Desempenho do modelo Vz (IC 95%).....	118
Figura 6-1 – Comparativo anual + simulações (2011 a 2015) – ENA-SE.	124
Figura 6-2 – Comparativo anual + simulações (2011 a 2015) – ENA-S.....	124
Figura 6-3 – Comparativo anual + simulações (2011 a 2015) – ENA-NE.	124
Figura 6-4 – Comparativo anual + simulações (2011 a 2015) – ENA-N.....	124
Figura 6-5 – Cenários simulados FC.	125
Figura 6-6 – Cenários simulados Vz.	125
Figura 6-7 – Cenários simulados FC.	125
Figura 6-8 – Cenários simulados Vz.	125
Figura 6-9 – Inclusão dos cenários integrados no Newave.	126
Figura 7-1 – Diagrama da metodologia desenvolvida.....	128
Figura 7-2 – Garantia física independe da geração real.	130
Figura 7-3 – Energia comercializável da usina.	130
Figura 7-4 – FDA X receita anual.	134
Figura 7-5 – Comparativo anual resíduos FC*	136
Figura 7-6 – Comparativo anual resíduos Vz*	136
Figura 7-7 – Histograma resíduos FC*	137
Figura 7-8 – Histograma resíduos Vz*	137
Figura 7-9 – Autocorrelação resíduos FC*	137
Figura 7-10 – Autocorrelação resíduos Vz*	137
Figura 7-11 – Autocorrelação quadrado dos resíduos FC*	137
Figura 7-12 – Autocorrelação quadrado dos resíduos Vz*	137

Figura 7-13 – Desempenho do modelo FC* (a partir Jan/03).....	138
Figura 7-14 – Desempenho do modelo Vz* (a partir Jan/03).....	138
Figura 7-15 – Cenários simulados FC*	138
Figura 7-16 – Cenários simulados Vz*	138
Figura 7-17 – Comparativo anual + simulação FC* (2015).	139
Figura 7-18 – Comparativo anual + simulação Vz* (2015).....	139

Lista de Tabelas

Tabela 4-1– Teste de Durbin Watson: regras de decisão.	81
Tabela 5-1– Estatísticas descritivas FC e Vz.....	99
Tabela 5-2– Principais resultados modelos FC e Vz.....	106
Tabela 5-3– Identificação de outliers na série FC.	111
Tabela 5-4– Identificação de outliers na série Vz.	111
Tabela 5-5– Estatísticas descritivas Vz corrigida.....	112
Tabela 5-6– Principais resultados modelos FC e Vz.....	113
Tabela 5-7– Validação do modelo FC.....	116
Tabela 5-8– Validação do modelo Vz.	116
Tabela 5-9– Medidas de aderência FC e Vz.....	117
Tabela 6-1– Matriz de correlação entre resíduos FC e Vz.	120
Tabela 6-2– Matriz resultante da decomposição espectral.....	120
Tabela 6-3– Complementaridade FC por região do país.	121
Tabela 6-4– Avaliação quantitativa dos cenários FC.	126
Tabela 6-5– Avaliação quantitativa dos cenários Vz.	126

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ADF	<i>Augmented Dickey-Fuller</i>
AIC	<i>An Information Criterion</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AO	<i>Additive Outlier</i>
AR	<i>Autoregressive</i>
ARCH	<i>Autoregressive Conditional Heterocedasticity</i>
ARMA	<i>Autoregressive Moving Average</i>
AWPT	<i>Advanced Wind Power Prediction Tool</i>
BIC	<i>Bayesian Information Criterion</i>
CCEARs	Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CMO	Custo Marginal de Operação
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CVaR	<i>Conditional Value at Risk</i>
CVU	Custo Variável Unitário
DWD	Serviço Meteorológico Alemão
EERE	<i>Energy Efficiency & Renewable Energy</i>
ENA	Energia Natural Afluenta
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPREV	Previsão da Produção Elétrica de Base Eólica
EWMS	<i>Exponentially Weighted Mean Square</i>
FAC	Função de Autocorrelação
FACP	Função de Autocorrelação Parcial
FC	Fator de Capacidade
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IO	<i>Innovative Outlier</i>

MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percent Error</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MPE	<i>Mean Percent Error</i>
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
MSE	<i>Error Mean Square</i>
MSR	<i>Regression Mean Square</i>
NEWAVE	Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes Interligados
NWP	<i>Numerical Weather Prediction</i>
OECD	<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
ONS	Operador Nacional de Sistema
PAR	<i>Periodic Autoregressive</i>
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PIB	Produto Interno Bruto
PLD	Preço de Liquidação de Diferenças
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SARIMA	<i>Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SDPE	<i>Standard Deviation Percentage Error</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SSE	<i>Error Sum of Squares</i>
SSR	<i>Regression Sum of Squares</i>
SSTO	<i>Total Sum of Squares</i>
TCL	Teorema Central do Limite
VaR	<i>Value at Risk</i>
VARX	<i>Vector Autoregressive with eXternal Variables</i>
WEPROG	<i>Weather and Wind Energy PROGnosis</i>
WPMS	<i>Wind Power Management System</i>
WPPT	<i>Wind Power Prediction Tool</i>
WWEA	<i>World Wind Energy Association</i>