



SORAIDA AGUILAR VARGAS

**Previsão da distribuição da densidade de
probabilidade da Geração de Energia Eólica
usando técnicas não paramétricas**

Tese de Doutorado

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

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2015



Soraida Aguilar Vargas

**Previsão da distribuição da densidade de
probabilidade da Geração de Energia Eólica
usando técnicas não paramétricas**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do 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.^a Monica Barros
ENCE

Prof. José Francisco Pessanha
UERJ

Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Dr. Plutarcho Maravilha Lorenzo
IE-PUC

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 26 Fevereiro de 2015

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

Soraida Aguilar Vargas

Graduou-se em Engenharia Administrativa com ênfase em Pesquisa Operacional e possui Mestrado em Engenharia de Sistemas, ambos títulos outorgados pela Universidade Nacional da Colômbia sede Medellín. Doutoranda em Engenharia Elétrica na área de Métodos de Apoio à Decisão pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ficha Catalográfica

Aguilar Vargas, Soraida

Previsão da Distribuição da Densidade de Probabilidade da Geração de Energia Eólica usando Técnicas não Paramétricas / Soraida Aguilar Vargas; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2015.

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

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Energia Eólica. 3. Velocidade do Vento. 4. Previsão. 5. Previsão Probabilística. 6. Análise Espectral Singular. 7. Estimção Condicional de Núcleo. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

*Para minha família, vocês que
representam minha força e
inspiração.*

Agradecimentos

Agradeço infinitamente a Deus porque nele eu sou, sem ele, eu me perco.

Aos meus pais, Adalgiza e Juvenal, pois nunca vi amor tão puro e verdadeiro como este que tenho recebido de vocês.

Às minhas amadas irmãs Catalina e Andrea, por compreender e apoiar amorosamente o meu processo.

A Marcela, por permitir que a nossa amizade superasse os limites do tempo e o espaço.

A Zoe, por ser minha irmã do coração e me dar um lar longe de casa.

A Daiane, por ser meu outro pê, sem você eu teria desistido.

Ao meu orientador Reinaldo Castro Souza, pelo acolhimento, apoio e confiança ao longo deste doutorado.

Ao professor José Francisco, pelo apoio, orientação, paciência e disponibilidade. Levo como ensinamento sua integridade.

Ao Fernando Cyrino, Joel Rosas e Juan David Velásquez, pelas ajudas nos momentos de maior desespero, além dos ensinamentos e confiança outorgados.

A Ana Paiva e funcionários do DEE, pelo seu assertivo apoio e ajuda.

Aos meus amigos e colegas da PUC, por compartilhar suas experiências e conselhos comigo. Seu carinho e palavras de encorajamento fizeram meu caminho mais leve.

Aos meus amigos e amigas da Colômbia, que mesmo longe, levo vocês no coração, especialmente meu amigo Carlos, por compreender minhas ausências, mas por ser meu cúmplice eterno.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio por enriquecer minha formação.

Aos meus grandes amigos Mónica Guerra e Paul Antezana, meus presentes que a PUC-Rio me deu.

Aos membros da Banca Examinadora pelas importantes contribuições.

À CAPES PEC-PG pelo suporte financeiro que fez possível a realização deste doutorado, deste sonho.

Resumo

Aguilar Vargas, Soraida; Souza, Reinaldo Castro (Orientador). **Previsão da distribuição da densidade de probabilidade da Geração de Energia Eólica usando técnicas não paramétricas**. Rio de Janeiro, 2015, 191p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Como resultado do processo de contratação de novos Leilões de energia eólica e a entrada em operação de novos parques eólicos ao sistema elétrico Brasileiro, é necessário que o planejamento da operação das atividades de curto prazo como a regulação, atendimento da carga, balanceamento e programação do despacho das unidades geradoras entre outras atividades, seja efetuado de tal que os riscos técnicos e financeiros sejam minimizados. Porém esta não é uma tarefa simples, já que fornecer previsões exatas para esse processo apresenta uma série de desafios, como a incorporação da incerteza no cálculo das previsões. Daqui que a literatura técnica reporta diversas técnicas que proporcionam estimativas da densidade de probabilidade de geração de energia eólica, pois tais estimações permitem obter previsões da densidade de probabilidade para a energia eólica. Neste contexto, a previsão da velocidade do vento nos aproveitamentos eólicos passa a ser uma informação fundamental para os modelos de apoio à decisão que suportam a operação econômica e segura dos sistemas elétricos, pois a maioria dos modelos precisa da previsão da velocidade do vento para calcular a previsão da energia eólica. Este trabalho apresenta uma proposta uma estratégia de especificação não paramétrica para a previsão da geração de energia eólica, empregando a comumente conhecida densidade condicional por *kernel*, o qual permite calcular a função densidade de probabilidade da produção eólica para qualquer horizonte de tempo, condicionada à previsão da velocidade do vento obtida através da aplicação da metodologia de Análise Espectral Singular (SSA) para previsão. A metodologia foi validada com sucesso usando a série temporal das medias horárias da velocidade do vento e da produção eólica de um parque eólico Brasileiro. Os resultados foram comparados contra outras metodologias para a previsão da velocidade do vento, onde a abordagem não paramétrica proposta produz resultados muito proeminentes.

Palavras-chave

Energia Eólica; velocidade do vento; previsão; previsão probabilística; análise espectral singular; estimação condicional de núcleo.

Abstract

Aguilar Vargas, Soraida; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **Forecasting probabilistic density distribution of wind power generation using non-parametric techniques.** Rio de Janeiro, 2015, 191p. Doctorate Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As a result of the new contracting process wind power auctions and the entrance into operation of new wind farms to the Brazilian electrical system, it is required that the planning of the operation of short-term activities such as regulation, balancing and programming dispatch of units commitment among other activities, is made such that the technical and financial risks are minimized. But this is not a simple task, since providing accurate forecasts for this process presents several challenges, as the incorporation of uncertainty in the calculation of the forecasts. Hence the technical literature reports several techniques that provide estimates of the probability of wind power generation density, because such estimates allow to obtain forecasts of the wind power probability density function. In this context, wind speed forecasting in wind farms becomes essential information for decision support models which helps the economic and safe operation of electrical systems, due to the fact that most of the models need to the wind speed predictions for forecasting wind energy. This thesis proposes a non-parametric specification strategy for forecasting of wind power generation, using the commonly known conditional kernel density estimation, which allows the estimation of the probability density function of wind power generation for any time horizon, conditioned on wind speed forecast obtained by applying the Singular Spectrum Analysis methodology (SSA). The methodology has been successfully validated using the time series of wind speed and hourly averages of wind production of a Brazilian wind farm. The results were compared against other methodologies for wind speed prediction, and the proposed non-parametric approach produced very prominent results.

Keywords

Wind power; wind speed; forecasting; probabilistic forecasting; singular spectrum analysis; conditional kernel estimation.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Energia Eólica em Cifras	20
1.2. Motivação	28
1.3. Objetivo do Trabalho.....	31
1.4. Organização da Tese.....	32
2. ENERGIA EÓLICA	34
2.1. Origem do Vento.....	34
2.2. Conversão da Energia Eólica	36
2.3. Potência Extraída do Vento	37
2.3.1. Curva de Potência	38
2.3.2. Distribuição de Weibull	40
2.3.3. Lei da Potência	41
2.3.4. Fator de Capacidade Eólica	42
3. PREVISÃO DE CURTO PRAZO DA PRODUÇÃO EÓLICA.....	47
3.1. Previsão de Energia Eólica.....	47
3.2. Previsão Pontual e Previsão Probabilística	50
3.3. Numerical Weather Prediction (NWP).....	52
3.4. Modelos Estatísticos de Previsão de Energia Eólica	53
4. ANÁLISE ESPECTRAL SINGULAR (SSA)	58
4.1. Metodologia SSA	59
4.1.1. Decomposição	61
4.1.1.1. Incorporação	61
4.1.1.2. Decomposição em Valores Singulares (SVD)	62
4.1.2. Reconstrução	65
4.1.2.1. Agrupamento das Autotriplas	66
4.1.2.2. Média Diagonal Secundária	67
4.1.3. Previsão.....	71
4.1.3.1. Algoritmo de Previsão Recorrente.....	72

4.2.	Tamanho do Parâmetro L de Defasagem.....	75
4.3.	Separabilidade.....	76
4.4.	Informação Complementar	78
4.4.1.	Valores Singulares.....	79
4.4.2.	Correlação Ponderada.....	81
4.4.3.	Gráficos de Dispersão de Autovetores Pareados.....	83
4.4.4.	Análise do Periodograma	84
5.	MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE DENSIDADE.....	86
5.1.	Estimação de Densidade de Probabilidade	86
5.2.	Estimador Inocente.....	87
5.3.	Estimador <i>Kernel</i> Univariado	89
5.4.	Estimador <i>Kernel</i> para Dados Bivariados	95
5.5.	Estimação da Densidade Condicional por <i>Kernel</i>	97
6.	ESTRATÉGIA DE ESPECIFICAÇÃO METODOLÓGICA	102
6.1.	Primeiro Estágio: Previsão Horária da Velocidade do Vento.....	103
6.2.	Segundo Estágio: Estimação Estocástica da Curva de Potência	107
6.3.	Terceiro Estágio: Previsão Probabilística da Geração Eólica 110	
7.	RESULTADOS	112
7.1.	Descrição da Base de Dados	112
7.2.	Resultados do Primeiro Estágio: Previsão da Velocidade do Vento	115
7.2.1.	Resultados da Primeira Fase da Metodologia de <i>SSA Sequencial</i>	115
7.2.2.	Resultados da Segunda Fase da Metodologia de <i>SSA Sequencial</i>	121
7.3.	Segundo Estágio: Estimação Estocástica da Curva de Potência.....	131
7.4.	Terceiro Estágio: Previsão Probabilística da Geração Eólica	132

8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
---	------------

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
---	------------

10. APÊNDICES	164
----------------------------	------------

10.1. Apêndice A – Análise de Clusters Usando Métodos Hierárquicos Aglomerativos.....	164
10.1.1. Medidas de Similaridade	165
10.1.2. Similaridades e Dissimilaridades entre Indivíduos	170
10.1.3. Métodos Hierárquicos.....	171
10.1.3.1. Métodos Aglomerativos	172
10.1.3.2. Métodos Divisivos.....	173
10.1.4. Critérios de (Des)Agregação de Clusters	174
10.1.4.1. Método do Vizinho mais Próximo	174
10.1.4.2. Método do Vizinho mais Distante	175
10.1.4.3. Método das Distâncias Médias entre Grupos	175
10.1.4.4. Método da Inércia Mínima (Método de Ward)	176
10.1.4.5. Método dos Centroides	177
10.1.5. Matriz de Correlação Ponderada e o Coeficiente de Correlação Angular	179
10.2. Apêndice B – Dendrogramas	182
10.3. Apêndice C – Modelos de Box & Jenkins.....	187
10.4. Apêndice D – Métodos de alisamento exponencial: Double Seasonal Holt-Winters.....	189

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Matriz Elétrica Brasileira para ano 2015.....	18
Figura 1.2 – Complementaridade entre Geração Hidrelétrica e Eólica. ...	19
Figura 1.3 – Principais Países geradores de energia eólica no mundo....	21
Figura 1.4 – Capacidade total acumulada instalada de energia eólica no mundo (MW).....	22
Figura 1.5 – Nova capacidade instalada de energia eólica no mundo (MW).....	22
Figura 1.6 – Taxa de crescimento eólico mundial (%).....	22
Figura 1.7 – Atlas do potencial eólico brasileiro.	23
Figura 1.8 – Capacidade total instala no Brasil	24
Figura 1.9 – Capacidade de energia eólica instalada projetada no Brasil	25
Figura 1.10 – Capacidade instalada contratada em Leilões no Brasil.....	27
Figura 2.1 – Formação dos ventos na terra	35
Figura 2.2 – Forma típica de uma curva de potência	39
Figura 2.3 – Função de densidade de probabilidade Weibull para diferentes valores de k e c	41
Figura 2.4 – Fator de capacidade eólico no Brasil.	43
Figura 4.1 – Estágios da Metodologia SSA para previsão	60
Figura 4.2 – Número mensal de mortes acidentais nos EUA entre 1973 e 1978	80
Figura 4.3 – Autovalores resultantes da decomposição da série em 24 componentes.....	80
Figura 4.4 – Matriz de <i>correlações ponderadas</i> para 24 componentes reconstruídas.	82
Figura 4.5 – Gráficos de dispersão dos autovetores harmônicos pareados	83
Figura 4.6 – Periodogramas dos autovalores parados (2-3, 4-5, 7-8, 9-10, 11-12).....	84
Figura 5.1 – Funções <i>Kernel</i>	92
Figura 6.1 – Diagrama da metodologia proposta.	103

Figura 6.2 – Diagrama do processo de SSA <i>Sequencial</i>	104
Figura 6.3 – Estimação da densidade probabilidade condicional da geração de energia eólica dada a velocidade do vento.	109
Figura 6.4 – Densidade de probabilidade para a geração de energia eólica dada uma velocidade do vento de 7 m/s.....	110
Figura 6.5 – Densidade de probabilidade para a geração de energia eólica dada uma velocidade do vento de 12 m/s.....	111
Figura 7.1 – Séries temporais da velocidade do vento (m/s) e da potência gerada (kWh).	112
Figura 7.2 – Curva de potência (Diagrama de dispersão da Velocidade do Vento (m/s) e a Potência (kWh)).....	113
Figura 7.3 – Histograma da velocidade do Vento (m/s).	113
Figura 7.4 – Autovetores da SVD para um $L = 720$	116
Figura 7.5 – Valores singulares para $L = 720$	118
Figura 7.6 – Valores singulares para $L = 36$	119
Figura 7.7 – Autovetores pareados.	120
Figura 7.8 – Matriz de correlações ponderadas.	120
Figura 7.9 – Dendrograma das autotriplas 1 até 50.	123
Figura 7.10 – Autovetores emparelhados.	125
Figura 7.11 – Previsão 8 horas à frente da Velocidade do Vento usando SSA <i>sequencial</i>	126
Figura 7.12 – Previsão 24 horas à frente da Velocidade do Vento usando SSA <i>sequencial</i>	127
Figura 7.13 – Previsão 72 horas à frente da Velocidade do Vento usando SSA <i>sequencial</i>	127
Figura 7.14 – Previsão 168 horas à frente da Velocidade do Vento usando SSA <i>sequencial</i>	128
Figura 7.15 – Previsão 24 horas à frente da Velocidade do Vento para diferentes modelos.....	129
Figura 7.16 – Previsão 72 horas à frente da Velocidade do Vento para diferentes modelos.....	130
Figura 7.17 – Densidade Condicional da Potência calculada com estimador <i>Nadaya-Watson</i>	132

Figura 7.18 – Densidade Condicional da Potência calculada com estimador <i>Nadaya-Watson</i>	132
Figura 7.19 – Previsão 24 horas à frente da geração de energia eólica usando <i>SSA sequencial</i>	133
Figura 7.20 – Previsão da potência média horária (kWh) gerada pela turbina eólica 24 horas à frente.	134
Figura 7.21 – Previsão da potência média horária (kWh) gerada pela turbina eólica 72 horas à frente.	135
Figura 7.22 – Potência média condicional calculada com estimador <i>Nadaya-Watson</i> (vermelho) vs Curva de potência do histórico (azul)....	136
Figura 10.1 – Exemplificação de um dendrograma.....	172
Figura 10.2 – Dendrograma das autotriplas 51 até 100.	182
Figura 10.3 – Dendrograma das autotriplas 101 até 150.	182
Figura 10.4 – Dendrograma das autotriplas 151 até 200.	183
Figura 10.5– Dendrograma das autotriplas 201 até 250.	183
Figura 10.6 – Dendrograma das autotriplas 251 até 300.	183
Figura 10.7 – Dendrograma das autotriplas 301 até 350.	184
Figura 10.8 – Dendrograma das autotriplas 351 até 400.	184
Figura 10.9 – Dendrograma das autotriplas 401 até 450.	184
Figura 10.10 – Dendrograma das autotriplas 451 até 500.	185
Figura 10.11 – Dendrograma das autotriplas 501 até 550.	185
Figura 10.12 – Dendrograma das autotriplas 551 até 600.	185
Figura 10.13 – Dendrograma das autotriplas 601 até 650.	186
Figura 10.14 – Dendrograma das autotriplas 651 até 720.	186
Figura 10.15 – Função de Autocorrelação (FAC) e função de autocorrelação parcial (FACP) da série temporal da velocidade do vento.....	188

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Potência em operação em 31/12/2010 e potência esperada para o ano 2013.	26
Tabela 1.2 – Investimento e capacidade no Brasil.	27
Tabela 1.3 – Evolução da Energia Eólica nos Leilões.....	28
Tabela 2.1 – Superfície do terreno.	35
Tabela 3.1 – Classificação horizonte de previsão da geração de energia eólica.	50
Tabela 7.1 – Estatísticas descritivas da velocidade do vento (m/s).	114
Tabela 7.2 – Estatísticas descritivas da potência gerada (kWh).	114
Tabela 7.3 – Parâmetro de defasagem L	117
Tabela 7.4 – Autotriplas que conformam o sinal referente às componentes harmônicas escolhidas pelo Método Hierárquico.....	126
Tabela 7.5 – Medidas de erro das previsões da Velocidade do Vento para diferentes horizontes de tempo.....	128
Tabela 7.6 – Medidas de erro das previsões 24 horas à frente da Velocidade do Vento para diferentes modelos.	130
Tabela 7.7 – Medidas de erro das previsões 72 horas à frente da Velocidade do Vento para diferentes modelos.	130
Tabela 7.8 – Medidas de erro das previsões pontuais 24 horas à frente da Geração de Energia Eólica para diferentes modelos.	133
Tabela 7.9 – Medidas de erro das previsões pontuais 72 horas à frente da Geração de Energia Eólica para diferentes modelos.	135
Tabela 10.1 – Matriz de dados para construir a matriz de similaridades.	180
Tabela 10.2 – Modelo ajustado SARIMA(2, 0, 0)x(1,1,1) ₂₄	189
Tabela 10.3 – Valores das constantes de alisamento	191

"[...] Nuestro mayor miedo no es que no encajemos. Nuestro mayor miedo es que tenemos una fuerza desmesurada. Es nuestra luz y no nuestra oscuridad lo que más nos asusta. Empequeñecerse no ayuda al mundo; no hay nada inteligente en encogerse para que otros no se sientan inseguros a tu alrededor. Todos deberíamos brillar como hacen los niños; no es cosa de unos pocos, sino de todos. Y al dejar brillar nuestra propia luz, inconscientemente damos permiso a otros para hacer lo mismo. Al liberarnos de nuestro propio miedo, nuestra presencia libera automáticamente a otros [...]"

Coach Carter, Timo Cruz