

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Fernando Ormonde Teixeira

**Otimização Financeira de Parque Eólico no
mercado de energia do Brasil**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Administração de Empresas da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Administração de Empresas

Orientador: Prof. Leonardo Lima Gomes

Rio de Janeiro
Abril de 2015



Fernando Ormonde Teixeira

**Otimização Financeira de Parque Eólico no
mercado de energia do Brasil**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Administração de Empresas da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Leonardo Lima Gomes

Orientador
Departamento de Administração – PUC-Rio

Prof. Marcelo Cabus Klotzle

Departamento de Administração - PUC-Rio

Prof. Mario Domingues de Paula Simões

Prof^a. Mônica Herz

Vice-Decana de Pós-Graduação do CCS – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de abril de 2015

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

Fernando Ormonde Teixeira

Graduado em Economia pela PUC-Rio (2012), mestre em Administração de Empresas pela PUC-Rio com ênfase em Finanças da Energia (2015). É Pesquisador pelo Núcleo de Pesquisa em Energia e Infraestrutura (NUPEI) da PUC-Rio atuando em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na área de Finanças da Energia. Também efetua pesquisas pelo Instituto Brasileiro de Economia (IBRE).

Ficha Catalográfica

Teixeira, Fernando Ormonde

Otimização financeira de parque eólico no mercado de energia do Brasil / Fernando Ormonde Teixeira ; orientador: Leonardo Lima Gomes. – 2015.
62 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Administração, 2015.
Inclui bibliografia

1. Administração – Teses. 2. Vento. 3. Parque eólico. 4. Finanças. 5. Energia. 6. VaR. 7. CVaR. 8. Brasil. 9. Ceará I. Gomes, Leonardo Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Administração. III. Título.

CDD: 658

Agradecimentos

Há momentos na vida em que escrevemos longos textos para agradecer a todos aqueles que, em certo ponto, fizeram diferença em nossas vidas. Evidenciamos, através de uma amostra não aleatória de acontecimentos explicitada, o porquê de estas pessoas merecerem menção.

Este não é um destes momentos. Não por não ter a quem agradecer, longe disso. Não construímos nada sozinhos. Eu apenas não consigo organizar em minha mente as muitas situações vivenciadas de forma a escolher as que merecem registro.

Listo abaixo aqueles que gostaria de agradecer:

- Minha família – Vania, José Carlos e Ana Paula.
- Meu Orientador – Leonardo Lima.
- Membros do NUPEL.
- Aos amigos – Tomás Urani, Gabriel Vasconcelos, Patrícia Caldas, Jefferson Brito, Daniel Camargo, Michelle Bandarra, Gláucia Fernandes, Luciana Pereira e Ralph Stier.

Por fim, um agradecimento especial à Queiroz Galvão Energias Renováveis e ao projeto de P&D da ANEEL que disponibilizaram todo o suporte necessário para que este trabalho se concretizasse.

Resumo

Teixeira, Fernando Ormonde; Gomes, Leonardo Lima. **Otimização Financeira de Parque Eólico no mercado de energia do Brasil**. Rio de Janeiro, 2015. 62p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Investigam-se modelos econométricos que sejam capazes de efetuar uma previsão mensal de vento em um parque eólico no Ceará. São testados modelos da família ARMA que consigam capturar a sazonalidade inerente ao movimento das massas de ar e que tragam benefícios aos empreendimentos eólicos localizados no Brasil e na região. Para tal, a previsão de vento é transformada em previsão de geração de energia. Em seguida, é elaborada uma metodologia para encontrar a melhor estratégia de ação a qual maximize o resultado da empresa tendo-se como meta o lucro e restrições de *Value at Risk* (VaR) e *Conditional Value at Risk* (CVaR). Os possíveis resultados de geração de energia são simulados concomitantemente com a simulação de preços de liquidação (PLD).

Palavras-chave

Vento; Parque Eólico; Finanças; Energia; VaR; CVaR; Brasil; Ceará.

Abstract

Teixeira, Fernando Ormonde; Gomes, Leonardo Lima. (Advisor). **Financial Optimization of a Wind Farm in the brazilian energy market.** Rio de Janeiro, 2015. 62p. MSc. Dissertation – Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

We investigate econometric models that are capable of predicting the wind speed in a wind farm located in the state of Ceará, Brazil. ARMA models are tested to try to capture the seasonality inherent to the wind and that bring benefits to the firms operating wind farms in the region. Wind is converted in power generation to allow predictions to be more precise. Then, a methodology is created to find the best strategy, the one that maximizes the firm's profit. An optimization is made with VaR and CVaR as constraints. The simulated results of power generation are then put together with a simulation of liquidation's price (PLD).

Keywords

Wind; Wind Farm; Finance; Energy; VaR; CVaR; Brazil; Ceará.

Sumário

1. Introdução	11
2. Referencial Teórico	18
2.1. Energia Eólica	18
2.2. Tipos de Modelos de Previsão	21
2.2.1. Modelos de Previsão Físicos (Determinísticos)	22
2.2.2. Modelos de Previsão Estatísticos (Estocásticos)	23
2.2.3. Modelos de Redes Neurais e Modelos Híbridos	25
2.3. Otimização	26
2.3.1. Problemas de Otimização	26
2.3.2. Programação Linear (LP)	28
2.3.3. Value at Risk – VaR	30
2.3.4. Conditional Value at Risk – CvaR	31
3. Metodologia	34
3.1. Seleção da Série	34
3.2. Seleção de Modelo de Previsão	35
3.3. Otimização	36
3.4. Passos Metodológicos	38
4. Resultados	41
4.1. Estatísticas Descritivas	41
4.2. Análise de Resultado	44
5. Conclusão	54
6. Referência Bibliográfica	56
Apêndice	59

Lista de figuras

Figura 1 – Complementaridade entre regime de ventos e capacidade hídrica de geração	12
Figura 2 – Sistema elétrico	17
Figura 3 – Solução de problema de otimização	29
Figura 4 – VaR e CVaR	38
Figura 5 – Implementação do modelo de otimização	59

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre ambiente livre e regulado	16
Tabela 2 – Teste de Pearson de correlação	43
Tabela 3 – Teste ADF de raiz unitária	44
Tabela 4 – Critérios para escolha de modelo	44
Tabela 5 – Teste de resíduos	45
Tabela 6 – Teste de resíduos	45
Tabela 7 – Coeficientes do modelo	60

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Série MERRA concatenada com medições anemométricas	42
Gráfico 2 – Comparativo entre série MERRA e a medida pelo anemômetro	43
Gráfico 3 – Teste de capacidade preditiva dos modelos	44
Gráfico 4 – Função de autocorrelação	45
Gráfico 5 – Previsão de geração de energia	46
Gráfico 6 – Comparativo entre geração prevista e realizada	46
Gráfico 7 – Histograma de simulação de potência gerada para um período à frente por um aerogerador	47
Gráfico 8 – Simulação de potência gerada por um aerogerador	48
Gráfico 9 – Comparativo de lucro entre modelo 'ingênuo' e resultado da otimização	49
Gráfico 10 – Comparativo entre quantidade gerada e atuação no mercado a termo	50
Gráfico 11 – Análise de sensibilidade do lucro - α	51
Gráfico 12 – Quantidade comprada líquida – sensibilidade em α	51
Gráfico 13 – Análise de sensibilidade do lucro - CVaR	52
Gráfico 14 – Comparativo de preços	53
Gráfico 15 – FAC e FACP da série	60
Gráfico 16 – Previsão de vento	61
Gráfico 17 – Histograma de previsão de vento um período à frente	61
Gráfico 18 – Simulação velocidade de vento	62
Gráfico 19 – Comparativo entre realizado e previsto - vento	62