

Estudo de Um Projeto para Geração de Energia Eólica no Brasil: Viabilidade Econômica e Emissões Evitadas¹

Danielle Rodrigues Raimundo², Ivan Felipe Silva dos Santos³

¹Aceito para Publicação no 4º Trimestre de 2015

²Estudante de Engenharia Ambiental. Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá (MG). Email: daniellerraimundo@yahoo.com.br

³Engenheiro Hídrico e Mestrando em Engenharia de energia. Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá (MG). Email: ivanfelipece@hotmail.com.

Resumo

O desenvolvimento de energias renováveis é uma das questões mais importantes atualmente devido a necessidade de diminuição das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de reservas de combustíveis fósseis. Dentre as diversas fontes renováveis, a energia eólica caracteriza como uma fonte limpa de geração de energia e de crescimento intenso no Brasil nos últimos anos. Sendo assim, estudos relacionados à energia eólica devem ser realizados e incentivados. Neste contexto, o presente artigo compreende a análise econômica e de emissões evitadas por um projeto de energia eólica dentro do contexto energético brasileiro, mais especificamente, na cidade de Marataízes (ES). Os resultados obtidos demonstram que o desenvolvimento de energia eólica é, de modo geral, viável no atual cenário do mercado energético brasileiro e que as emissões evitadas devido à geração de energia eólica neste empreendimento podem representar até 0,17 % das emissões totais do estado.

Palavras Chave: Energia eólica, viabilidade econômica, emissões evitadas.

Abstract

The development of renewable energies is one of the most important issues today because of the need to reduce emissions of greenhouse gases and consumption of fossil fuel reserves. Among the various renewable sources, wind power is characterized as a clean source of power generation and strong growth in Brazil in recent years. Thus, studies related to wind power must be carried out and encouraged. In this context, this article comprises the economic analysis and emissions avoided by a wind power project in the Brazilian energy context, more specifically in the city of Marataízes (ES). The results show that wind power development is generally feasible in the current situation of the Brazilian energy market and emissions avoided due to the wind power generation in this enterprise can represent up to 0.17% of total state emissions.

Keywords: wind power, economic viability, avoided emissions.

1. Introdução

A busca por fontes de energia para as necessidades da economia é uma das questões-chave de nossa civilização. Problemas como desastres ambientais, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e poluição estão associados com uma geração energética baseada em combustíveis fósseis. Desta forma, a necessidade de uma geração energética baseada em fontes renováveis deve ser ampliada, a fim de que se atinja um desenvolvimento sustentável.

Dentre as principais fontes de energia renovável estão: Energia solar, as PCHs, a energia de biomassa e a energia eólica. A energia eólica provém dos ventos, ou seja, da movimentação das massas de ar. Por princípio, a geração elétrica a partir dos ventos se dá da seguinte maneira: o ar em movimento rotaciona as pás do aerogerador, convertendo a energia cinética dos ventos em energia mecânica nas pás. Essa energia mecânica percorre um multiplicador, dentro da estrutura do aerogerador, que aumentará a velocidade de giro e transmitirá a energia para um gerador, que a transformará em energia elétrica, sendo esta distribuída para a rede. A energia eólica é aproveitada desde a Antiguidade, com o impulsionamento de embarcações e de moinhos de vento. A primeira usina eólica do mundo foi instalada na Dinamarca, em 1976. Atualmente, existem mais de 30 mil turbinas em operação espalhadas pelo mundo todo (ANEEL, S/d).

A energia eólica é uma das principais energias renováveis em crescimento no Brasil. De acordo com o BEN (2013), a produção brasileira de energia eólica aumentou aproximadamente 87% entre 2011 e 2012. No Brasil, a energia eólica responde por 1,1% da matriz elétrica brasileira (BEN, 2014). A figura 1 abaixo apresenta o Atlas Eólico Brasileiro, apresentado por CRESESB (2001). As regiões no mapa em cores vermelhas apresentam os maiores valores de velocidade média anual do vento, a uma altura de 50 metros, seguidas pelas regiões de cor alaranjado, amarelo e por fim a cor verde, representando os mais baixos valores de velocidade média anual do vento, para a mesma altura. Observa-se que as regiões de maior potencial eólico se encontram no litoral do Nordeste, Sudeste e região Sul, com destaque para os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, interior da Bahia e o estado do Rio Grande do Sul.

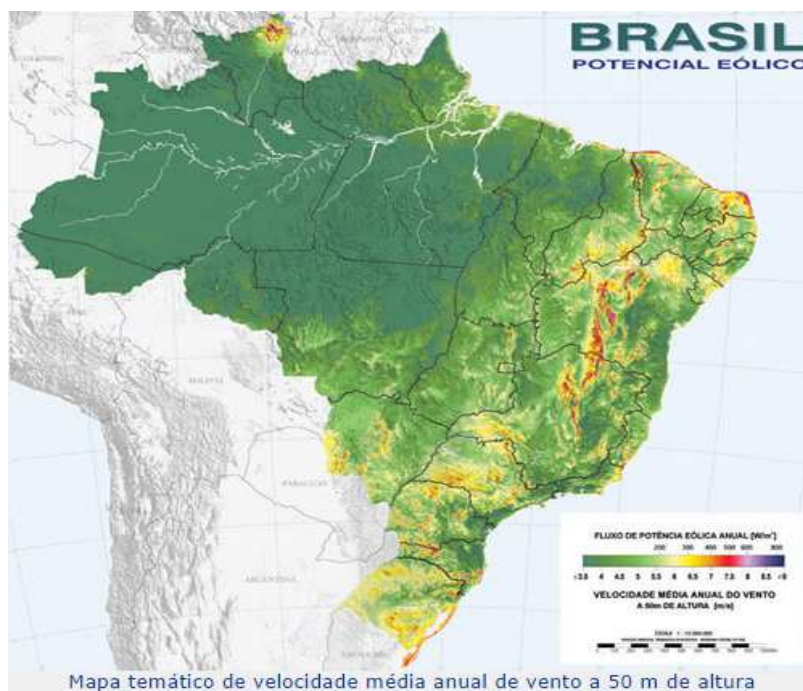


Figura 01 – Velocidade Média Anual do Vento no Brasil; FONTE: **CRESESB (2001)**

As usinas eólicas apresentam ainda baixo impacto ambiental, sendo assim uma importante opção para geração limpa e renovável. De acordo com a Agência internacional de Energia - IEA (1998, *apud* Akella et al., 2012), as emissões ao longo de todo ciclo de vida das usinas eólicas variam entre: 7 e 9 [gCO₂/kWh], 0,02 e 0,09 [gSO₂/kWh] 0,02 e 0,06 [gNO_x/kWh].

O presente artigo compreende a análise econômica e de emissões evitadas por um projeto de energia eólica dentro do contexto energético brasileiro.

2. Metodologia

Para a estimativa energética do presente trabalho foi escolhida a cidade Marataízes (ES) devido à alta velocidade do vento naquela região e a disponibilidade de áreas livres na mesma (Verificadas por meio do software Google Earth, 2015). A cidade de Marataízes está localizada nas coordenadas 21,04° Sul e 40,82° Oeste. A figura 2 abaixo apresenta a distribuição das velocidades médias do vento em Marataízes.

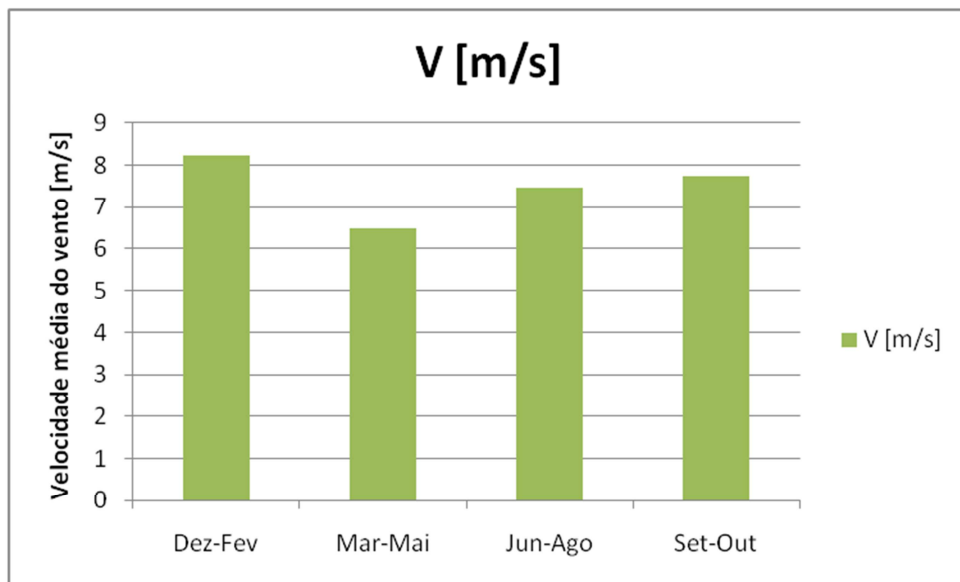


Figura 02- Distribuição da velocidade média do vento em Marataízes (ES); Fonte: **CRESESB (2015)**

A avaliação do potencial energético do vento nesta cidade foi realizada por meio da aplicação da distribuição de frequências de Weibull. Esta distribuição estatística é aquela que melhor assimila os dados de vento (Conforme discorre Sucharovet al. s/d e resultados obtidos por Celik et al., 2003). A aplicação desta foi realizada por meio da equação 1.

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

Onde: c = parâmetro de escala e k = parâmetro de forma.

Inúmeros fatores influenciam na velocidade do vento, entre eles, a altitude. Quanto maior for a altura, maior será a velocidade do vento, pela diminuição do atrito com a superfície, até se atingir uma altura onde a velocidade se estabiliza (BOLZANO, 2013). Como as velocidades médias cedidas pelo CRESESB (2015) são relativas a uma altura de 50 [m], foi necessária a aplicação da lei da potência, equação 2, para transposição dos dados de vento para uma altura de 100 [m], altura típica de implantação de aerogeradores para aproveitamento energético. Com a transposição da velocidade também deve ser realizada a transposição do parâmetro de escala, pela equação 3.

$$V(100\text{ m}) = V(50\text{ m}) \left(\frac{H2}{H1} \right)^\alpha \quad (2)$$

$$c(100\text{ m}) = \frac{V(100\text{ m})}{B} \quad (3)$$

Onde α = coeficiente de rugosidade e B = fator de transposição obtido em Duarte (2014) = 0,89169.

De posse da distribuição de frequências de Weibull, deve-se selecionar um aerogerador. Esta relaciona sua velocidade à potência do mesmo, segundo a equação teórica da potência do vento, equação 4, considerando contudo as velocidades mínimas e máximas de trabalho do aerogerador. Com a curva do trabalho do aerogerador e os dados de frequência do vento obtidos pela distribuição de Weibull, pode-se calcular a energia anual produzida pelo aerogerador na cidade de Marataízes (equação 5).

$$P(V) = \rho \cdot \eta \cdot A \cdot \frac{V^3}{2} \quad (4)$$

$$E = \sum_{i=1}^n f(V) \cdot P(V) \quad (5)$$

Onde: P = potência, η = rendimento do sistema, A = área do rotor e V = velocidade do vento.

Supondo-se que esta energia elétrica limpa produzida por meio dos ventos anualmente substitui a energia da rede e, portanto acarreta uma econômica de emissões de CO_2 que pode ser calculada pelo produto entre a energia e o fator de emissão da matriz energética brasileira (FE) (Equação 6).

$$E_{ev} = E \cdot FE \quad (6)$$

Por fim, utilizou-se o Valor Presente Líquido (VPL) para análise de viabilidade econômica (Equação 7), após todas estas serem transferidas para o ano inicial de implantação do empreendimento, por meio da taxa de juros “i”. Este se refere ao somatório das receitas líquidas. Quando o VPL é positivo, o empreendimento é rentável e viável economicamente. Caso contrário, o empreendimento não é atrativo economicamente.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{E.T - C_{om}}{(1+i)^t} - I \quad (7)$$

Onde: i = taxa de juros, T = tarifa de venda de energia e C_{om} = Custo de operação e manutenção.

3. Resultados

A distribuição de Weibull dos ventos de Marataízes foi calculada pelo procedimento anteriormente descrito e está apresentada na figura 3. O aerogerador escolhido para o aproveitamento foi um aerogerador de modelo E82 E2(ENERCON, S/d) cuja curva de trabalho é apresentada na figura 4. Nesta, observamos que a velocidade mínima de funcionamento do aerogerador é 2[m/s] e que a partir de 13 [m/s] a potência do gerador se estabiliza em 2050 [kW] por questões de segurança.

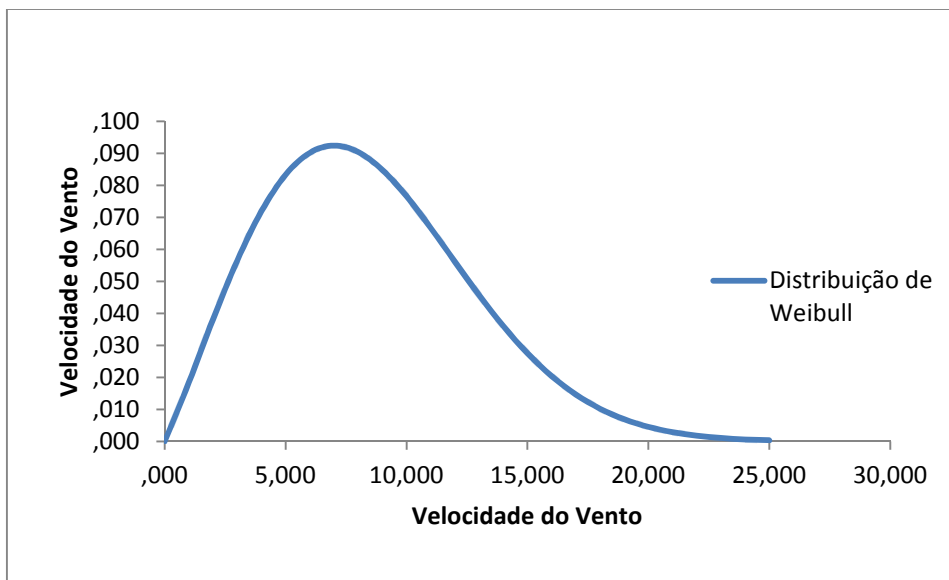


Figura 03: Distribuição de Weibull dos ventos em Maracaízes, a 100 [m] de altura.

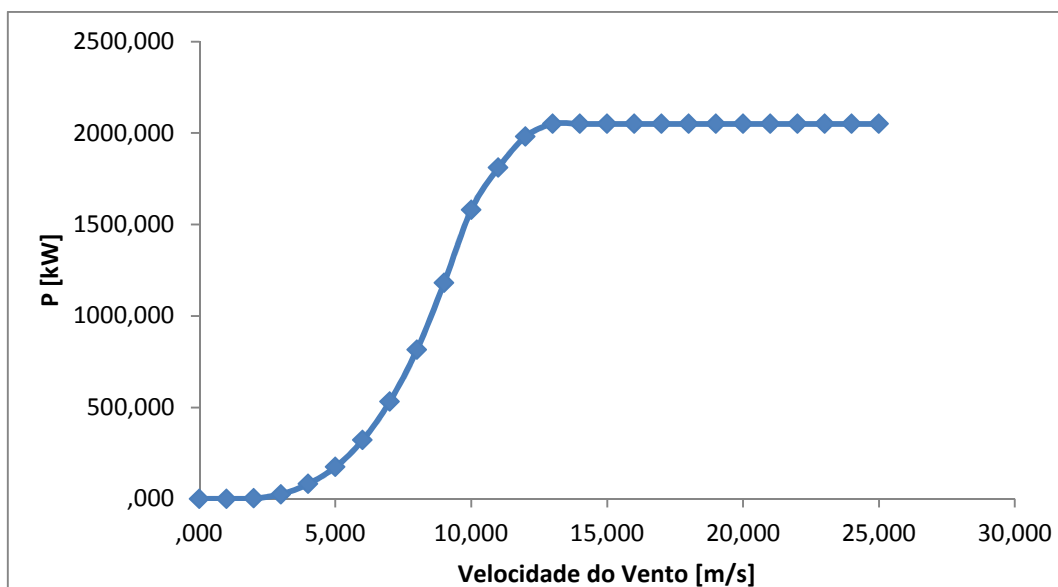


Figura 4- Curva de trabalho do aerogerador escolhido; FONTE: ENERCON(S/d)

De posse das figuras 3 e 4, pode-se calcular a energia gerada por cada velocidade de vento ao longo do ano. Esta é apresentada na tabela 1. A soma das energias da tabela 1 permitiram o cálculo da energia total produzida em um aerogerador que foi igual a 8,6 [GWh]. Adotou-se 14 aerogeradores a fim de que a potência se aproximasse ao máximo de 30 [MW] (Mais precisamente 28,7 [MW]), valor típico de potência de um parque gerador no Brasil. A energia total produzida anualmente por este parque será então igual a 120,3 [GWh].

Tabela 1: Energia produzida por cada velocidade de vento ao longo do ano

F [/l]	V [m/s]	P [kW]	E [kWh]
0,00	0,00	0,00	0,00
0,02	1,00	0,00	0,00
0,04	2,00	3,00	1.004,56
0,06	3,00	25,00	12.380,19
0,07	4,00	82,00	51.646,18
0,08	5,00	174,00	126.958,19
0,09	6,00	321,00	253.498,98
0,09	7,00	532,00	430.560,61
0,09	8,00	815,00	645.138,35
0,08	9,00	1180,00	876.292,79
0,08	10,00	1580,00	1.059.391,27
0,07	11,00	1810,00	1.057.037,26
0,06	12,00	1980,00	973.206,77
0,05	13,00	2050,00	820.504,98
0,04	14,00	2050,00	647.049,34
0,03	15,00	2050,00	494.510,87
0,02	16,00	2050,00	366.470,94
0,01	17,00	2050,00	263.462,42
0,01	18,00	2050,00	183.807,46
0,01	19,00	2050,00	124.477,72
0,00	20,00	2050,00	81.846,20
0,00	21,00	2050,00	52.258,70
0,00	22,00	2050,00	32.406,45
0,00	23,00	2050,00	19.519,28
0,00	24,00	2050,00	11.420,68
0,00	25,00	2050,00	6.491,50

Para análise econômica, torna-se necessária a determinação do custo de implantação do parque eólico. Para tal, utilizou-se a estimativa desenvolvida por Santos et al. (2015) com base em dados de custos de projetos brasileiros (Equação 8). O custo total de implantação do empreendimento pode ser calculado por meio do produto entre o custo unitário e a potência do parque eólico. A vida útil adotada para o parque foi de 25 anos. A taxa de desconto e a tarifa de venda de energia foram adotadas como sendo respectivamente: 10% [a.a] e 144 [R\$/MWh] (Tarifa obtida no último leilão de energia reserva - EBC, 2014). Os custos de operação de manutenção foram adotados como sendo 1,5% do custo de implantação inicial (Conforme Machado, 2012).

$$C_{un} \left[\frac{R\$}{kW} \right] = 2402,6 \cdot P^{0.058} (8)$$

O fluxo de caixa resultante do empreendimento foi calculado e está apresentado na figura 5. De posse da energia, pode-se calcular ainda as emissões evitadas pela geração desta por meio da equação 6. O fator de emissão brasileiro da matriz energética brasileira foi obtido em BEN (2014), igual a 0,12 [tCO₂/MWh]. Os resultados da análise de viabilidade econômica e emissões evitadas estão apresentados na tabela 2.

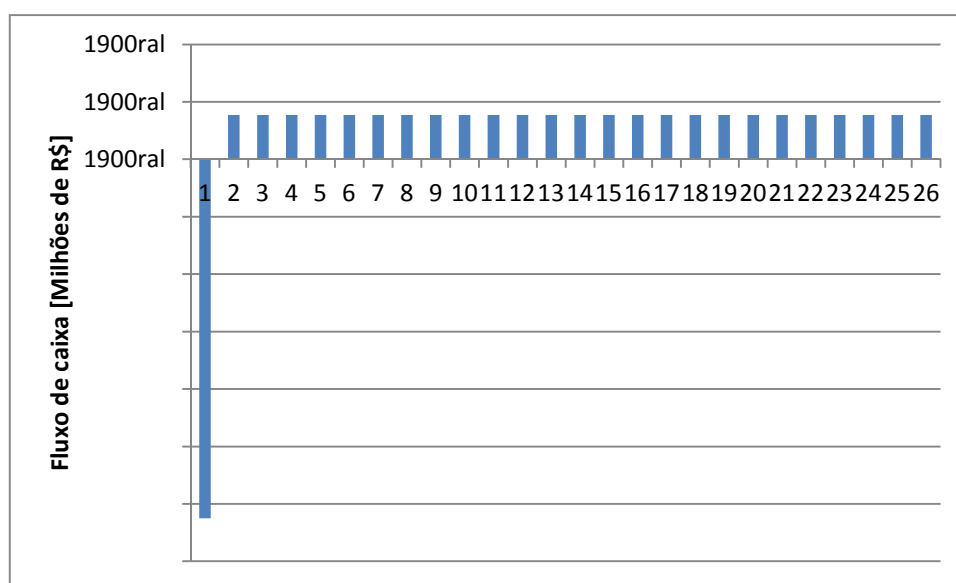


Figura 5- Fluxo de caixa do empreendimento.

Tabela 3 - Resultados

Parâmetro	Valor
Investimento [10 ⁶ R\$]	125,1
Fator de capacidade (E/P)	0,48
E _{ev} [1000 tCO ₂ /ano]	14,4
E _{ev} [MtCO ₂ totais]	0,36
VPL [10 ⁶ R\$]	13,75

Pela análise dos dados da tabela 2, observamos que o empreendimento é viável para o cenário adotado (VPL > 0). Contudo, a viabilidade do empreendimento não é mais assegurada para taxas de juros superiores a 11,6%, o que mostra a sensibilidade do VPL e da viabilidade econômica às condições de mercado. Se as emissões evitadas do empreendimento forem divididas pela população do estado de Espírito Santo (Igual a 3.885.049 habitantes, IBGE, 2014) será obtido um valor de 0,00371 [ton CO₂/hab], valor que corresponde a 0,17% das emissões de CO₂ per capita no estado.

4. Conclusões

O presente trabalho avaliou o potencial energético, as emissões evitadas e a viabilidade econômica de um projeto de geração eólica na cidade de Marataízes no Espírito Santo. A viabilidade do projeto foi assegurada para taxas de juros até 11,6% e as emissões evitadas por este único projeto podem chegar a abater 0,17% das emissões per capita totais do estado do Espírito Santo. Conclui-se, portanto, que o aproveitamento energético do vento colabora com a diminuição das emissões de gases de efeito estufa em uma região e apresenta viabilidade econômica em seu desenvolvimento.

5. Referências

- AKELLA, A. K. et al. **Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems**. Renewable Energy. V. 34, pp.390-396, 2009.
- BEN. **Balanco Energético Nacional, 2013**. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/default2013.aspx>>. Acesso: 10/05/2015.
- BEN. **Balanco Energético Nacional, 2014**. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese2014.aspx>>. Acesso: 10/05/2015.
- BOLZANO, Fabrina. **Unidade 6 – Ventos**. Arquivo em PowerPoint. Acervo Pessoal, 2013.
- CELIK, A. N. **A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey**. Renewable Energy, V. 29, p. 593-604, 2003.
- CRESESB. **Centro de Referência para Energia Eólica e Solar Sérgio Brito**. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.
- CRESESB. **Centro de Referência para Energia Eólica e Solar Sérgio Brito**. Dados de Potencial Eólico, 2015. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico>. Acesso: 10/05/2015.
- DUARTE, P. M. **Energia Eólica**. Arquivo em PowerPoint. Apresentação realizada na disciplina de Energias Renováveis, Mestrado em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá (MG).

- EBC. **EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO, 2014.** Disponível em <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2014-10/aneel-faz-leilao-para-contratacao-de-energia-de-reserva>>. Acesso dia 22/01/2015.

- IEA. **International Energy Agency.** Benign energy? The environmental implications of renewables. Paris: OECD; 1998

- MACHADO, I. M. **Análise de viabilidade econômico-financeira de uma usina eólio-elétrica de 30MW.** Monografia para obtenção do título de engenheiro (a) de produção e sistemas. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brasil, 2012.

- SANTOS, I.F.S. **Análises econômicas, de sensibilidade e elasticidade em projetos de energias renováveis no Brasil.** Artigo Submetido e em processo de avaliação na Revista Brasileira de Energia, 2015.

- Sucharov, E. C. et al. **O modelo Weibull para distribuições de velocidade de vento no estado do Rio de Janeiro.** CBMET. Congresso Brasileiro de Meteorologia, S/d. Disponível em <<http://www.cbmet.com/cbm-files/18-672030eedd54b54508dd89ba60985710.pdf>>. Acesso: 10/05/2015.

- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Estados: Espírito Santo. 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?lang=&sigla=es>> Acesso: 11/05/2015.

- ENERCON. **Aerogeradores Enercon.** Modelo E82 E2. Alemanha, S/d. Disponível em: <http://www.enercon.de/p/downloads/ENE_Produnkt_port.pdf> Acesso: 11/05/2015.