

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TURBINAS EÓLICAS PARA APLICAÇÃO RESIDENCIAL NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

Rosângela P. Sousa¹, Ernano Arrais Junior², Mônica Paula de Sousa²

¹ Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)
Mossoró – RN – Brazil

² Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)
Pau dos Ferros – RN – Brazil

laninha-tab@hotmail.com, {ernano.arrais, monica.sousa}@ufersa.edu.br

Abstract. *Without current scenario, the generation of distributed energy comes with space with renewable sources, among them and wind energy. As small turbines are preferred because they have a wind speed and low speed system. These are classified according to their constructive form: horizontal or vertical axis, presenting several construction models. The present work presents a comparative study among several topologies of wind turbines, emphasizing a residential application in the region of the Potiguar Semi-arid, being a city of Pau dos Ferros as an analysis model. Thus, they are analyzed as main topologies and their performances against the behavior of the air masses of the region. As a result, a turbine is presented that presents the best cost-benefit for application in the region of the Potiguar Semi-arid..*

Resumo. *No cenário atual a geração de energia distribuída vem tomando espaço com as fontes renováveis, entre elas a energia eólica. As turbinas de pequeno porte são utilizadas em residências por possuir um sistema de aproveitamento do vento com baixa velocidade. Estas são classificadas quanto à sua forma construtiva: de eixo horizontal ou vertical, apresentando diversos modelos construtivos. O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre diversas topologias de turbinas eólicas, enfatizando a aplicação residencial na região do Semiárido Potiguar, sendo a cidade de Pau dos Ferros utilizada como local de análise. Assim, são analisadas as principais topologias e seus desempenhos frente ao comportamento das massas de ar da região. Como resultado, será mostrada a turbina que apresenta o melhor custo-benefício para aplicação na região do Semiárido Potiguar.*

1. Introdução

Durante séculos a energia obtida a partir dos combustíveis fósseis deu suporte ao crescimento econômico mundial. Com o passar dos anos, devido às inúmeras alterações climáticas, surgiu a necessidade de recorrer as fontes renováveis, como por exemplo a solar, geotérmica, maremotriz, hidráulica e eólica. Nesse sentido, a fonte de energia eólica vem sendo incluída na matriz energética por ser uma energia limpa e uma alternativa a sustentabilidade ambiental na geração de energia elétrica (ANEEL, 2008).

A geração de energia eólica foi crescendo com grandes parques longes dos centros urbanos necessitando de linhas de transmissão e distribuição. Hoje, a fim de evitar as perdas de energia na transmissão e distribuição, ou até mesmo levar energia a lugares onde não tem acesso á eletricidade, a geração está voltando a ser próxima às residências, a chamada Geração Distribuída (JUNIOR, 2008).

O termo geração distribuída é caracterizado pela instalação de geradores de pequeno porte em residências, unidades comerciais ou unidades industriais para atender parte da demanda local. Os benefícios estão relacionados com baixo impacto ambiental, a diversificação da matriz energética, a diminuição das perdas associadas ao transporte de energia elétrica, entre outros (ANEEL, 2016) (FILHO E AZEVEDO, 2013).

No contexto internacional, de acordo com Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia - SPE/MME, tem-se, como hipótese para a geração de energia total, o equivalente a 15 % proveniente de fonte eólica (7.300 TWh) com fator de capacidade de 32 %, o que resultaria na possibilidade da capacidade instalada chegar a 2.600 GW, representando expansão média anual de 75 GW entre os anos de 2040 e 2050 (MME, 2015).

Fato que já pode ser observado no Brasil, pois ocupou em 2016 a 5ª posição no ranking mundial de capacidade instalada, de acordo Global Wind Energy Council (GWEC), organização internacional especializada em energia eólica. Destaca-se a região Nordeste com o maior potencial, sendo o estado do Rio Grande do Norte a ocupar o topo dos estados (ANEEL, 2017).

Essa geração pode causar impactos ambientais, e dentre eles destacam-se os sonoros e os visuais. Em suma, para os grandes parques eólicos pode-se dizer que os impactos ambientais variam de acordo com o local a ser instalado, o arranjo, e as especificações das turbinas. Já se tratando da geração distribuída, ou seja, a instalação de micro e minigeradores eólicos os impactos ambientais são reduzidos (ARAÚJO, 1996 apud ANEEL, 2005) (ANEEL, 2005).

As principais tecnologias de turbinas eólicas de pequeno porte são formadas por eixo horizontal ou vertical e funcionam com velocidade fixa ou variável. As de eixos horizontais são mais comuns no mercado e possuem maior eficiência, já as de eixo vertical interagem melhor com as edificações, porém possui baixa eficiência (INSTITUTO IDEAL, 2014) (WENZEL, 2007). A eficiência mencionada está relacionada a seu formato construtivo, uma vez que a área de varredura, que varia de acordo com o eixo vertical ou horizontal, irá influenciar no seu desempenho.

Visando contribuir com o desenvolvimento social e econômico da região do Semiárido Potiguar, o presente trabalho busca analisar o potencial eólico da região e com isso disponibilizar um material que reúna características de uma topologia de turbina mais eficiente aplicada a residências para o potencial eólico disponível.

Sendo as turbinas de pequeno porte aplicadas a residências o foco desse trabalho, tem como principal objetivo analisar as topologias das turbinas eólicas e apontar a melhor opção a ser aplicada para uso residencial na região do Semiárido Potiguar, tomando como base a cidade de Pau dos Ferros.

O presente trabalho inicia com o estudo das topologias de turbinas eólicas, seguido pela aplicabilidade na região do semiárido potiguar, onde é discutido qual a topologia mais eficiente concluindo o estudo.

2. Topologias de Turbinas Eólicas

As topologias de turbinas diferenciam-se, além de outros fatores, principalmente pelo seu eixo de rotação: horizontal ou vertical. De acordo com Carmo (2012), nas turbinas de eixo horizontal o eixo de rotação é perpendicular à torre e as pás devem sempre ser orientadas segundo a direção do vento. Já as de eixo vertical possuem o eixo de rotação orientado na mesma direção da torre, que seria na direção perpendicular à direção do movimento do vento, e por esse motivo não necessitam de ser orientadas na direção do vento.

Cada topologia de turbinas comporta-se em meio ao fluido (massas de ar) com características particulares impulsionadas tanto por força de arrasto como por força de sustentação, e também estando sob forças de empuxo, toque e centrífuga, esta última sendo uma carga estática perpendicular ao eixo de rotação, que influenciam direta ou indiretamente na potência elétrica gerada (JUNIOR, 2008).

Independente da turbina ser de eixo horizontal ou vertical, a potência será igual ao trabalho dividido pela variação de tempo. Por tratar-se de massas de ar e encontrar-se em movimento, o trabalho realizado será definido pela energia cinética, uma vez que não há variação de pressão nem variação de altitude. Logo, a potência final será, de acordo com Simonsen (2009):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p(\gamma, \beta) \quad (1)$$

em que c_p é o coeficiente de potência da turbina, γ (TSR- tip speed ratio) é o coeficiente de velocidade de ponta, β (pitch) é o ângulo de passo das pás, A é a área varrida pelas pás da turbina [m²], ρ é a densidade do ar [Kg/m³] e v é a velocidade do vento incidente na aerogerador [m/s] (CRESESEB, 2008). A seguir, detalha-se as topologias de turbinas.

- **Rotor Horizontal:** As microturbinas de eixo horizontal não possuem sistema de controle das pás ou eixo interno, pode ser mais ruidoso do que as outras topologias, é inadequado para locais com ventos turbulentos e Giram pela predominância de forças de sustentação. Os seus componentes são semelhantes às de grande porte, em escala reduzida e está representada na Figura 1 (a).

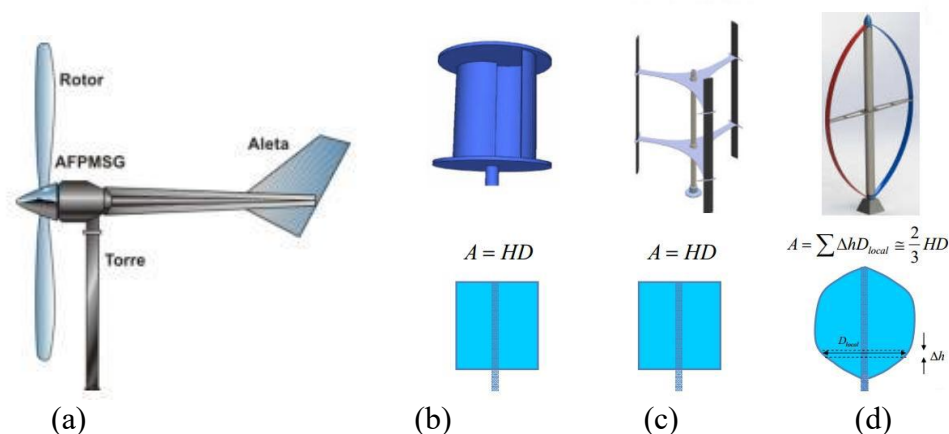


Figura 1: Representação das topologias de turbinas
Fonte: Adaptador de PUCRS (2012)

- **Rotor Savonius:** A turbina Savonius é uma das topologias de eixo vertical, formado por duas ou mais pás no formato de conchas, que aproveita a força de arrasto como força motriz para o seu rotor representada na Figura 1(b). Essa topologia pode ser feita também com conchas torcidas, tornando o projeto um pouco mais complexo do que o das turbinas normais, porém considera-se a resistência estrutural do rotor mais elevada (CARMO, 2012). Essa topologia apresenta baixo rendimento energético, a fabricação é mais econômica se comparada com as demais e suporta melhor os ventos mais turbulentos.
- **Rotor Darrieus:** A turbina Darrieus é uma das topologias de eixo vertical que possuem duas ou três pás curvadas (helicoidal) atadas pelas duas pontas ao eixo vertical, onde a força motriz é a força de sustentação aerodinâmica que se exerce sobre as pás, representada na Figura 1 (d). Essa turbina possui resistência estrutural do rotor, necessita de um motor de partida, muitos dos modelos são ruidosos e geralmente é mais caro que os outros tipos. (CARMO, 2012).
- **Rotor H-Darrieus:** A turbina H-Darrieus também é uma das topologias de eixo vertical e possui suas pás verticais posicionadas em paralelo, representada na Figura 1(c). Por conta da sua geometria a cada posição que a pá se posiciona enxerga a chegada do vento de uma forma diferente e apresenta um rendimento energético ligeiramente superior ao da turbina Darrieus de pás curvas, devido sua área de passagem de escoamento ser maior e assim sendo mais eficiente. Apresentam um formato simétrico, criando sustentação independente da direção do vento, os esforços estruturais a que estas turbinas estão sujeitas são mais elevados (CARMO, 2012).

3. Método de Pesquisa

Para verificar qual topologia apresenta a maior potência, dado a disponibilidade dos ventos, foram considerados para o cálculo os valores aproximados do diâmetro, da potência nominal e da velocidade de partida. Já o coeficiente de potência variou de acordo com cada topologia. Vale salientar que os valores utilizados foram dados na ficha técnica da mesma e o detalhamento de cada modelo matemático para cada topologia pode ser encontrado no trabalho de Junior (2008).

Para o cálculo da potência deve-se considerar dois fatores que variam de região para região: velocidade do vento e densidade relativa do ar. Na região semiárida potiguar, tomando como base a cidade de Pau dos Ferros, de acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CRESESB, 2018), a velocidade do vento está com média anual de 3,93 m/s. O outro fator determinante é a densidade relativa do ar que para casos práticos, de acordo com Sousa (2014), é de 1,225 kg/m³. Com base nesses dados calculou-se a potência a partir da Equação 1, exposta na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo das topologias analisadas.

Topologia de Turbina	Diâmetro (m)	Potência (W)	RPM
Eixo Horizontal	2,46	84,77	456,5
Savonius	2,0	34,57	561,5
Darrieus	2,5	49,57	449,2
H-Darrieus	2,66	79,11	422,18

Fonte: Autoria própria

A turbina Darrieus, além da potência gerada ser baixa, apresenta deficiência na partida de funcionamento sendo necessário um motor de partida, assim inviabilizando a sua utilização. Já a turbina Savonius apesar de possuir um baixo torque de partida, apresenta-se com baixo rendimento devido seu coeficiente de potência não sendo viável também a sua utilização.

A turbina H-Darrieus apresenta-se mais eficiente que a Darrieus, e não precisa de um sistema inicial de aceleração. O seu cálculo de potência, como mostra na Tabela 1, viabiliza sua instalação devido ter sido relativamente alto, quando comparados às demais topologias, porém com potência um pouco inferior a turbina de eixo horizontal.

Por fim, a turbina de Eixo Horizontal, entre as demais topologia foi a que apresentou maior potência. Vale salientar que apesar de não serem indicadas para ventos turbulentos, essa topologia geralmente possui uma maior eficiência devido ser mais comum no mercado e estar sendo desenvolvida tecnologias que viabiliza a sua utilização.

4. Resultados e Discursões

Sabendo que as turbinas H-Darrieus e de Eixo Horizontal foram as que apresentaram maior potência, para determinar a mais viável para aplicação residência, escolheu-se uma residência na cidade de Pau dos Ferros e fez-se o estudo do local. Diante disso, será calculado a potência de ambas as turbinas considerando a velocidade do vento mensal, subdividido em períodos, e diária.

Os dados das velocidades dos ventos utilizados na pesquisa foram obtidos a partir do levantamento meteorológico da CRESESB, observado na Figura 2, que é referente a uma altura de aproximadamente 50 metros em relação ao nível do mar, e para a uma análise detalhada foi usado o Meteoblue, conforme apresentado na Figura 3, ambos voltados para a cidade de Pau dos Ferros, nos meses de janeiro a dezembro.

Supondo que seria nessas condições o funcionamento da turbina realizando trabalho, considerou-se também que o vento possui sempre direção paralela ao eixo de rotação.

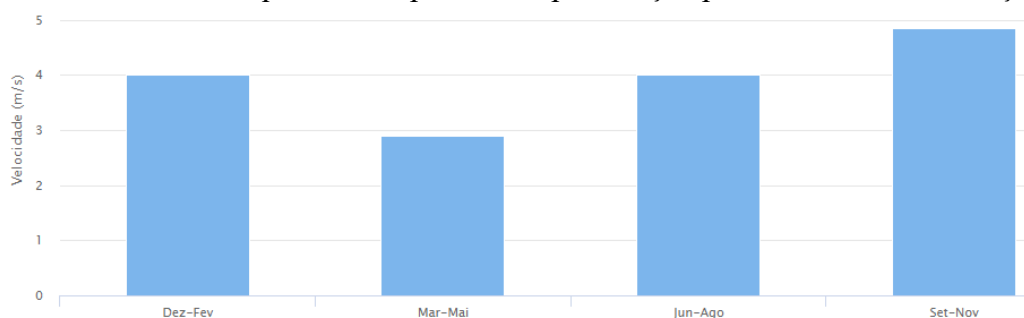


Figura 2: Velocidade Média Sazonal de Vento [m/s]

Vale salientar que os sistemas eólicos de pequeno porte estão mais próximos do solo se comparados aos grandes aerogeradores, por esse motivo o local de instalação deve ser analisado visando possíveis obstáculos que venham a influenciar no comportamento dos ventos. Dessa forma, a instalação das turbinas eólicas é indicada para o topo das edificações, mantendo-se distantes de outros edifícios, árvores e eventuais obstáculos (INSTITUTO IDEAL, 2014).

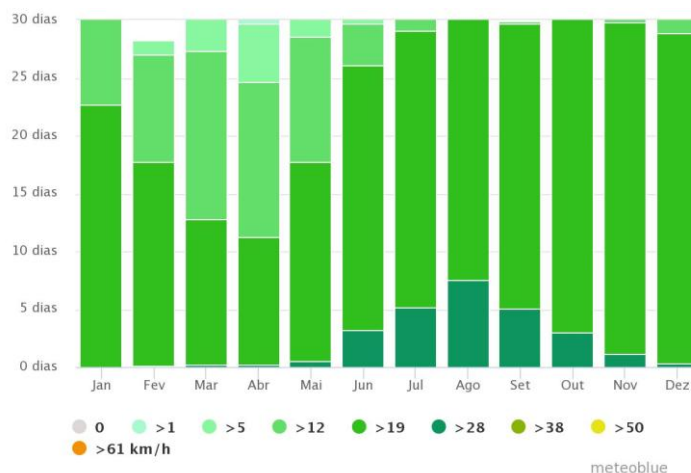
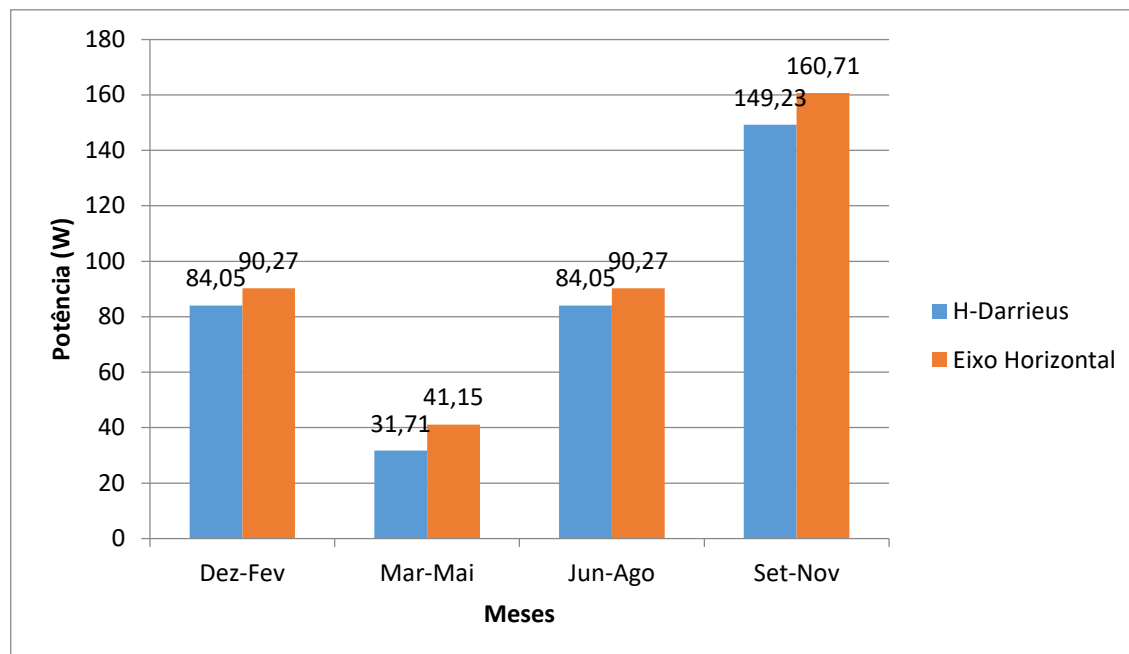


Figura 3: Velocidade dos Ventos na cidade de Pau dos Ferros/RN
Fonte: Meteoblue

Na Figura 4 está representado o comportamento da turbina H-Darrieus e a de Eixo Horizontal dada às variações da velocidade do vento disponível no atlas do potencial eólico Brasileiro no período de janeiro a dezembro. Foi subdividido as velocidades médias dos ventos referentes a três meses consecutivos e inseridos no eixo horizontal, sendo a primeira coluna a velocidade de 4,01 m/s, seguido de 2,90 m/s, 4,01 m/s e 4,86 m/s.

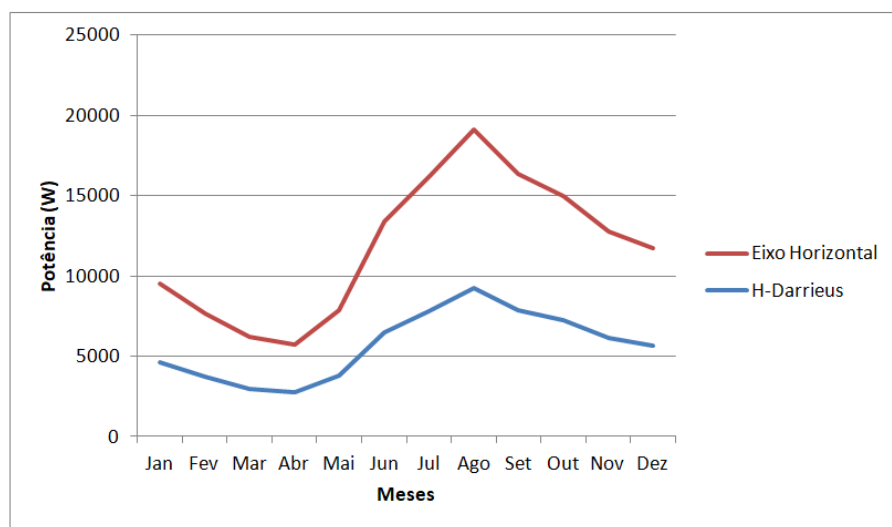
Figura 4: Comportamento da turbina H-Darrieus e a de Eixo Horizontal dada as variações da velocidade do vento



Observa-se que existe uma variação na velocidade média para cada período mencionado, isso resultará no desempenho da turbina, uma vez que a velocidade do vento é diretamente proporcional a potência gerada pela turbina. Sabe-se que não é viável fazer uma turbina onde as pás se adaptem a cada variação de velocidade, uma vez que irá ter perdas significantes, portando a potência gerada pela turbina será analisada a partir da velocidade média anual, pois o vento não é contínuo e é sazonal.

Para uma análise mais detalhada das turbinas, levando-se em consideração que estas funcionaram todos os dias durante um ano, conforme apresentado na Figura 5, está descrito a potência total gerada em cada mês de acordo com a variação de velocidade do vento diária. Para isso foi calculado a potência teórica com a velocidade do vento no dia, e a partir de então, a potência mensal que foi o resultado do somatório das potências diárias.

Figura 5: Potência total gerada em cada mês de acordo com a variação de velocidade do vento diária para as turbinas



Sabendo que cada topologia é projetada para uma determinada faixa de variação da velocidade do vento, acima desta faixa, os componentes passam a funcionar com sobrecarga e abaixo da faixa não é viável gerar energia. Em suma, de acordo com a Neoelica (2011), só podemos retirar no máximo 45 % da potência contida no vento, mas, além disso, tem-se de considerar algumas perdas como aerodinâmicas, elétricas, resistivas e qualidade do vento.

Portanto, fazendo uma análise superficial a partir dos gráficos, verifica-se que a turbina de eixo horizontal está superior a de eixo vertical H-Darrieus, e, contudo fornecerá de forma contínua no máximo 10 % de sua potência nominal, ou seja, em locais com média de vento anual de 3,93 m/s a potência será de 84,77W.

4. Conclusão

O presente estudo buscou analisar se a região do Semiárido Potiguar possuía capacidade de gerar energia elétrica, utilizando turbinas de pequeno porte, a partir da fonte eólica. Tomando como referência a cidade de Pau dos ferros, para os cálculos, foi usado a velocidade média anual dos ventos e a densidade relativa do ar. Visto que é possível gerar energia, buscou-se determinar qual turbina, aplicada a residências, apresentaria uma maior capacidade de potência gerada.

Dadas as microturbinas analisadas, obteve-se com maior eficiência a topologia de eixo horizontal. No caso do funcionamento com máxima eficiência, ou seja, com as perdas mínimas e com velocidade do vento máxima permitida, a potência nominal, de acordo com dados de fábrica, corresponde a 1 kW. Já para a velocidade local, gerou 84,77 W. Vale ressaltar que a potência pode variar mensalmente, podendo vir a produzir uma maior quantidade de energia para períodos diferentes.

Portanto, pode se concluir que a finalidade de analisar a eficiência das turbinas eólicas para aplicação residencial na região do Semiárido Potiguar foi atingida contribuindo com os estudos na geração da energia elétrica residencial a partir da energia eólica. E uma proposta para trabalhos futuros está no estudo da possibilidade de

geração mista, incluindo a fonte eólica com outra fonte renovável, como por exemplo a solar. Uma vez que na região do Semiárido Potiguar a irradiação média é considerável para tal geração.

7. Referências Bibliográficas

- ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. – Brasília : ANEEL, 2008. 236 p.
- ANEEL. Matriz de Energia Elétrica. 2017. Disponível em:<
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acessado em 20 de Agosto de 2017.
- ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2. ed. – Brasília : ANEEL, 2016. 31 p.
- CARMO, D. M. F.G. Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para aplicação em meio urbano. 2012, 32 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnica de Lisboa, 2012.
- CRESESB. Aplicação dos Sistemas Eólicos. 2008. Disponível em: <
http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=251>. Acessado em 17 de Agosto de 2017.
- FILHO, W. P. B. e AZEVEDO, A. C. S. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: VANTAGENS E DESVANTAGENS. In: II Simpósio de Estudo e Pesquisa em Ciências Ambientais, 2013, Amazônia.
- JUNIOR, E. R.N. Metodologia de projeto de turbinas eólicas de pequeno porte. 2008. 188 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.
- METEOBLUE. Clima Pau dos Ferros. Disponível em:<
https://www.meteoblue.com/pt/tempo/previsao/modelclimate/pau-dos-ferros_brasil_3392775>. Acessado em 14 de Jul de 2017.
- MME. Energia Eólica no Brasil e Mundo. Ano base 2015. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE. 2016.
- SIMONSEN, H. Projeto e construção de turbina eólica de baixa Potência. [2009]. Disponível em:<
http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2009/Artigos/Art_TCC_039_2009.pdf>. Acessado em 01 de Agosto de 2017.
- WENZEL, G.M. Projeto Aerodinâmico de pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal. 2007. 74 p. TCC (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio grande do Sul. Porto Alegre, Novembro, de 2007.
- INSTITUTO IDEAL. Como faço para ter Energia Eólica em minha Casa? . Disponível em:<
<http://institutoideal.org/guiaeolica/>>. Acessado em 28 de Jul de 2017.