

# ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL DE BAIXO CUSTO E BAIXA ROTAÇÃO

Luiz André da S. Lima<sup>1</sup>, Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Valéria L. da Silva<sup>2</sup> e Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Maiana B. de Matos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculdade SENAI CIMATEC, E-mail: [luiz.lima@al.senai.br](mailto:luiz.lima@al.senai.br);

<sup>2</sup> Faculdade SENAI CIMATEC, E-mail: [valeria.dasilva@fieb.org.br](mailto:valeria.dasilva@fieb.org.br);

<sup>3</sup> Faculdade SENAI CIMATEC, E-mail: [maiana.matos@fieb.org.br](mailto:maiana.matos@fieb.org.br);

## STUDY FEASIBILITY OF A SMALL WIND TURBINE PORTE ELECTRICITY RENEWABLE LOW COST AND LOW ROTATION

**Resumo:** O presente trabalho tem como objetivo a montagem e testes do aerogerador de pequeno porte, onde levantou-se o gráfico de desempenho que apresenta o coeficiente de potência, gerado no eixo do aerogerador em uma bancada, cuja meta é o estudo de viabilidade técnica para aplicação. Os resultados dos experimentos realizados na caracterização (micro aerogerador de energia elétrica renovável de baixo custo e baixa rotação). Com uma potência inicial de 250Watts a 500 Watts, velocidade nominal 500rpm, tensão de saída 24 V pelo o alternador trifásico de corrente alterna (AC), sendo posteriormente retificado para corrente contínua (DC) que alimenta um controlador de carga das baterias, usado para ajudar a carregar um banco da bateria, onde os testes foram serão obtidos no laboratório do Centro de Formação Profissional Gustavo Paiva (CFP-GP) SENAI em bancadas. Que pode ser usado para fornecer energia uma casa em regime de offgrid.

**Palavras-Chaves:** *Aerogerador; Fonte Alternativa; Fontes Renováveis de Energia e Energia eólica.*

**Abstract:** This work consisted of assembling and small wind turbine tests, had raised its performance graph, which shows the power coefficient generated in the turbine shaft in a bench whose objective is the technical feasibility study for application. The results of experiments carried out in the characterization (micro renewable electricity wind turbine with low cost and low speed), with an initial power 250Watts 500 Watts, nominal speed 500rpm, output voltage 24 V for three-phase alternator alternating current ( AC), subsequently rectified to direct current (DC) feeding a charge controller batteries, used to help charge a battery bank, where the tests were obtained in the laboratory of the Vocational Training Centre Gustavo Paiva (CFP-GP) SENAI countertops. Which can be used to power a home in offgrid regime.

This work will be presented in technical feasibility study for implementation of small wind turbine in front of the above, experiments will be conducted to support the analysis of the results. The results of experiments carried out in the characterization (micro renewable electricity wind turbine with low cost and low speed), with an initial power 250Watts 500 Watts, nominal speed 500rpm, 24 V

output voltage for the three-phase alternator current alternating (AC), subsequently rectified to direct current (DC) feeding a charge controller batteries, used to help charge a battery bank, where the tests will be obtained in the Vocational Training Centre of laboratory Gustavo Paiva (CFP- GP) SENAI in the stands. Which can be used to power a home in offgrid regime.

**Keywords:** *wind turbine; Alternative source; Renewable energy sources and wind power.*

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das primeiras estratégias empregadas pelo homem para utilizar a força dos ventos veio através dos barcos à vela. Com a utilização dos moinhos de grãos e aparatos de bombeamento de água, o objetivo era diminuir todos os esforços físicos. O primeiro moinho de vento foi movido pela força humana, os escravos e também alguns animais eram usados para girarem em círculos. Os moinhos em poste ou pilastra, os seus mancais, era parte do capitel (parte superior) que segurava as lâminas. Os trabalhadores tiveram que direcionar sua máquina de vento até a invenção da ventoinha. Após o ano de 1750, o sistema ficou automático direcionado e acionado pelo próprio vento

A figura [1] mostra moinhos em poste, ou pilastra, envolvidos dentro de um capitel, no qual os mancais eram partes do mesmo onde seguravam as lâminas. A ventoinha, um direcionador automático, direcionado e acionado pelo próprio vento. Os primeiros moinhos de vento foram de eixo vertical e depois de eixo horizontais[1].



Figura 1- Moinho de ventos. Fonte:

<http://br.freepik.com/index.php?goto=41&idd=613957&url=aHR0cDovL3d3dy5zeGMuaHUvcGhvdG8vOTk1NDM4>, acesso em: 06 julho. 2016<sup>a</sup>. Atualmente estamos passando por um dos maiores problemas de energia elétrica. Os tipos de fonte de energia ( FE) mais utilizados são de origem não renovável, onde existe um grande desafio: o de produzir cada vez mais energia de forma limpa e inesgotável. Além disso, é inviável um desenvolvimento econômico se todas as formas de energia não forem consideradas, ou se o fornecimento de água de qualidade não for mantido (superficial ou subterrânea) – tanto para o abastecimento humano, quanto para a indústria ou para a agricultura.

No Brasil, a capacidade instalada das FE renováveis como a energia elétrica eólica, ainda é bastante pequena quando comparada aos países líderes em geração deste recurso, todavia incentivos para a produção de resultados estão sendo divulgados através de políticas, e com isso espera-se um crescimento da exploração deste recurso posteriormente [3].

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica do governo federal (PROINFA) é considerado como uma das melhores políticas do governo federal que pelo Decreto nº 5.025, de 2004, tem o objetivo de aumentar a participação de FE produzida por empreendimentos concebidos com base na EE, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN). O intuito do PROINFA é promover a diversificação da Matriz Energética Brasileira, como fonte alternativa de aumento com segurança do abastecimento de energia elétrica, valorizando potencialidades regionais e locais do território nacional [64].

No Brasil, algumas normas da IEC sobre energia eólica foram traduzidas e denominadas NBR IEC 61400-1, NBR IEC 61400-12-1. A IEC 61400-2 referem-se a aerogeradores de pequeno porte. O mercado de aerogeradores de grande porte tem se tornado significativo, principalmente em função dos leilões de energia de reserva e de FE renováveis [74]. Todavia a comercialização no mercado de aerogeradores de pequeno porte no país (APP) não tem muita procura no mercado Brasileiro, é praticamente inexistente, uma vez que a geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente, predominantemente centralizada [85].

Partindo dessa indagação concebeu-se a pergunta problema o que fazer? Surgiu assim, o objeto deste artigo, que é a montagem e testes do aerogerador de pequeno porte, fazendo o levantamento do seu gráfico de desempenho, em uma bancada, cujo objetivo é o estudo de viabilidade técnica para aplicação de um aerogerador de energia elétrica renovável de baixo custo e baixa rotação, ajudando as comunidades sem acesso a esse serviço, pois estas áreas são consideradas de baixo consumo e que não justifica investimentos em infraestrutura pelas empresas responsáveis. Muitas comunidades estão localizadas em regiões de elevado potencial de EE (litoral e planaltos), considerando que em algumas regiões a velocidade do vento é abaixo de 4 m/s [6]

Como hipótese de pesquisa baseada nas literaturas, pressupõem-se que após a criação do aerogerador de energia elétrica renovável de baixo custo e baixa rotação, ajudaria a carregar um banco de baterias que pode ser usado para fornecer energia a uma casa em regime de offgrid (**um sistema que não é conectado à rede da concessionária**).

Com seu sistema isolado, há um, que é monitorado para controlar a carga, (**controlador de carga**) sua principal função é bloquear a corrente reversa e prevenir a sobrecarga das baterias, também prevenir o excesso de descarga e sinalizar o estado da bateria e fluxo de carga através de mostrador. O aerogerador gera corrente alternada. Seu sistema é alimentado em corrente contínua (CC/DC), é necessário à utilização de um inverso, onde, ele converte

a baixa energia DC armazenada nas baterias em CA padronizada para os equipamentos funciona em 220/127V - 60Hz, corrente alternada (CA) [1167].

Na figura 2, podemos ver a configuração de um sistema eólico isolado, na figura abaixo.

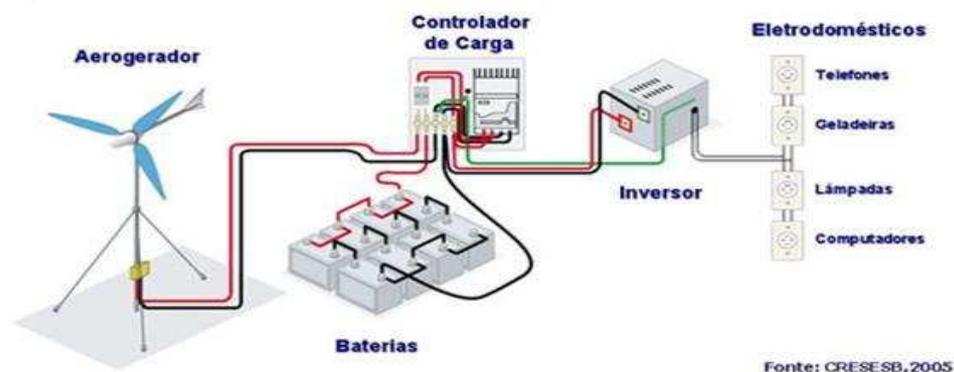


Figura 2. Configuração de um sistema isolado. Fonte: [11] CRESESB, 2005

## 1.1. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O Brasil em 2014 foi o quarto colocado na expansão de energia eólica no mundo. Subindo no ranking mundial, já está na lista de maiores produtores de energia em todo o planeta. O levantamento “EE no Brasil e Mundo”, foi feito pelo Ministério de Minas e Energia e aponta que o país foi o quarto colocado no ranking mundial de expansão de potência eólica em 2014. Os países, as nações que produziram mais e que realizaram um avanço superior ao Brasil em 2014, foram a China (23.149 megawatts), Alemanha (6.184 megawatts) e Estados Unidos (4.854 megawatts). No mesmo período, o Brasil teve uma expansão de potência instalada de 2.686 megawatts (MW) [1278].

O Brasil já contratou cerca de 16,6 mil MW de EE em leilões, sendo que aproximadamente 1,4 mil MW foram assegurados por meio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa). Do total contratado, 7,8 mil MW já estão em operação. O total contratado equivale à energia gerada pela usina hidrelétrica de Itaipu ([139]; [1410]).

O avanço do setor de energia eólica no Brasil também ajuda no processo de desenvolvimento social e econômico de regiões carentes do País. A afirmação é do presidente da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Maurício Tolmasquim [101].

.Atualmente o Brasil está produzindo aproximadamente 7,8 mil megawatts energia eólica. A previsão do governo é que a EE seja a segunda maior fonte de energia elétrica [09].

Por ser uma das regiões mais pobres do país, no Nordeste encontram-se (ele explica), os maiores potenciais de expansão do setor eólico do Brasil. Citando o caso do semiárido nordestino; **São regiões onde vivem, principalmente, pequenos agricultores. A chegada de parques eólicos garante renda complementar, devido o arrendamento de parte da terra para a instalação das torres ([13]; [14]; [15]).**

“Isso não impede que esse pequeno agricultor continue com sua agricultura, com sua criação de boi, com seus animais, porque não existe incompatibilidade entre o aerogerador e essas atividades”. Essa renda extra muitas vezes corresponde mais que o dobro da renda usual obtida pelo agricultor, e, ao final colabora com o desenvolvimento econômico de toda a região([139]; [1410]; [151]).

Podemos dizer que a energia eólica é importante não só pela contribuição para com o planeta, mas sobretudo para o bolso do consumidor, contribuindo também para o desenvolvimento do interior do Brasil e pelo impacto social” .A previsão do governo é que a energia elétrica produzida a partir dos ventos seja a segunda maior fonte de energia elétrica brasileira em poucos anos. Atualmente o País conta com aproximadamente 7,8 mil megawatts de produção eólica 101([13]; [14]; [15]).

Inesgotáveis, não emite gases poluentes nem gera resíduos e não afeta o efeito estufa, seu desenvolvimento garante giro de dinheiro no interior do Brasil, onde assegura **mais um tipo de renda extra devido o arrendamento de parte da terra para a instalação das torres. [10]; [11].**

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. Sistema Experimental**

Para avaliar a viabilidade técnica de se utilizar um aerogerador eólico de pequeno porte e de baixo custo e baixa rotação, foi montada uma bancada de testes, conforme a figura x. Foram utilizados dois tipos de teste de conceito, analisando a diferença entre potência em relação a rotação por minuto (RPM), no outro teste foi utilizado a relação de tensão com RPM.

**Explicar como foi feita cada um destes testes em detalhe! Descrever cada bancada e condições do teste.**

### **2.2. Aerogerador Eólico de Pequeno Porte**

O Aerogerador Eólico de Pequeno Porte para o desenvolvimento experimental foi inicialmente dimensionado para uma potência de 250Watts e 500Watts de potência, tensão de saída 24 Volts trifásica e rotação nominal 500RPM, inversor de 12/24V – 220V AC -60Hz, mas tem capacidade de 600 Wp. Tem como objetivo suprir comunidades isoladas de energia. Esse equipamento tem também duas baterias de 150Ah em série de 12V.

Foi utilizando imã permanente de neodímio número N50, comprimento: 50mm, largura:25mm e espessura:12,5mm, que apresenta alta capacidade na sua curva de magnetização o que possibilitará uma maior eficiência do sistema com menor tamanho, peso e custo. Estes imãs foram fixados com resina acrílica

em dois discos de aço de 7mm de espessura, constituindo assim o rotor que será acoplado a um eixo horizontal que por sua vez será acoplado a fonte mecânica rotacional, podendo esta ser eólica ou hidráulica. A indução nos ímãs,  $B_m$  é dada em função do campo magnético dos ímãs, denominado  $H_m$ , assim ficar  $B_m = \mu_{OHM} B_m$  [11].

Nesta expressão,  $B_r$  é a indução remanente. A permeabilidade magnética relativa dos ímãs é em geral pouco maior que a do ar. A IEC404-5 é a única norma disponível de medição e caracterização de ímãs permanentes.

As perdas por correntes parasitas ( $P_e$ ) são proporcionais ao quadrado da velocidade rotacional ( $\omega_e$ ), da densidade de fluxo ( $B_e$ ) e do diâmetro do condutor ( $d_c$ ), conforme a equação abaixo:

Onde  $\rho_c$  é a resistividade do condutor e a constante 32 é utilizada para condutores circulares. Caso os condutores sejam retangulares, esse valor deve ser substituído por 24.

Já o estator foi constituído de nove bobinas de fio esmaltado de 14AWG 1,8mm de espessura que, conectadas as três bobinas em série, duas a duas, formarão um estator trifásico. O número de espirais e a espessura de cada bobina foram dimensionados considerando as leis de indução magnética, a limitação da potência máxima do gerador e a rotação máxima operacional.

Dimensionamento do rotor

$Pot = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$  onde,  $V$  = velocidade do vento,  $P$  = potência mecânica extraída pelo rotor = densidade do ar,  $A$  = área "varrida" pelo rotor, Onde: Energia = Pot x Horas x FC => FC = fator de capacidade.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

4

As bobinas foram fixadas em um molde de resina e fibra de vidro que darão a sustentação estrutural do estator. O fio esmaltado que foi utilizado é 14AWG (70 espiras, dando 24V fio simples (1 fio)), precisou de 115 metros para fabricar as 9 bobinas, para melhor eficiência, a tensão/corrente trifásica e alternada gerada no estator foi retificada por uma ponte retificadora trifásica, tornando assim a tensão/corrente contínua adequada ao banco de baterias, via controlador de carga. As variáveis de tensão, corrente, potência e rotação foram medidas por meio de amperímetro, voltímetro e torquímetro dinâmico, que foram acoplados ao sistema simultaneamente.

Todos os testes feitos foram obtidos no laboratório do Centro de Formação Profissional Gustavo Paiva (CFP-GP) SENAI, na Rua Pedro Américo, nº. 18, Poço, Maceió – Alagoas. Simulando as condições reais do vento, onde o eixo do aerogerador foram acoplados a um eixo de um motor trifásico, com capacidade de 1800RPM e 1 CV, em uma bancada de simulação, aonde o motor foi acionado por um inversor de frequência, para coletar dados suficientes das características nominais do aerogerador, de várias situações, tais como:

- Ensaio a vazio;
- Ensaio em curto-circuito;
- Tensões de saída;
- Correntes de saída;
- Analisando o nível de estabilidade do mesmo;
- Ensaio em carga com fator de potência unitário e nulo;
- Ensaio em carga para determinação de eficiência;
- Ensaio de carregamento térmico nominal do aerogerador;
- Ensaio de carregamento térmico variável do aerogerador;
- Avaliação da operação em sobre velocidade;
- Controle de velocidade de rotação;
- Verificação de curva de potência segundo IEC 61400-12-1.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para utilização do aerogerador eólico que inicialmente gera 250 à 500Watts, tensão de saída 12/24 V pelo o alternador trifásico de corrente alterna (CA) (normalmente senoidal), sendo posteriormente retificado para corrente contínua (DC) que alimenta um controlador de carga das baterias, usado para ajudar a carregar um banco da baterias que pode ser usado para fornecer energia a uma casa em regime de offgrid, velocidade nominal 500rpm.

A figura 173, indica um retificador trifásico de onda completa não controlada. É assim chamado por que é usado em sistema trifásico e onda completa, pois aproveita todo o ciclo da onda, tanto positivo quanto negativo e não controlado, uma vez usa diodos os quais são dispositivos não controlados.

Veja abaixo o esquema de retificador trifásico de onda completa não

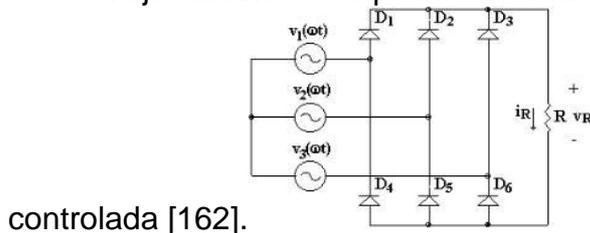


Figura 317. Configuração de um sistema isolado. Fonte: [172]

#### 3.1. Teste do Sistema

Você precisa explicar o que está sendo simulado, como a simulação foi feita e os parâmetros utilizados na simulação.

Os dados das simulações realizadas para estudo da viabilidade técnica do aerogerador de pequeno porte estão propostos na tabela abaixo.

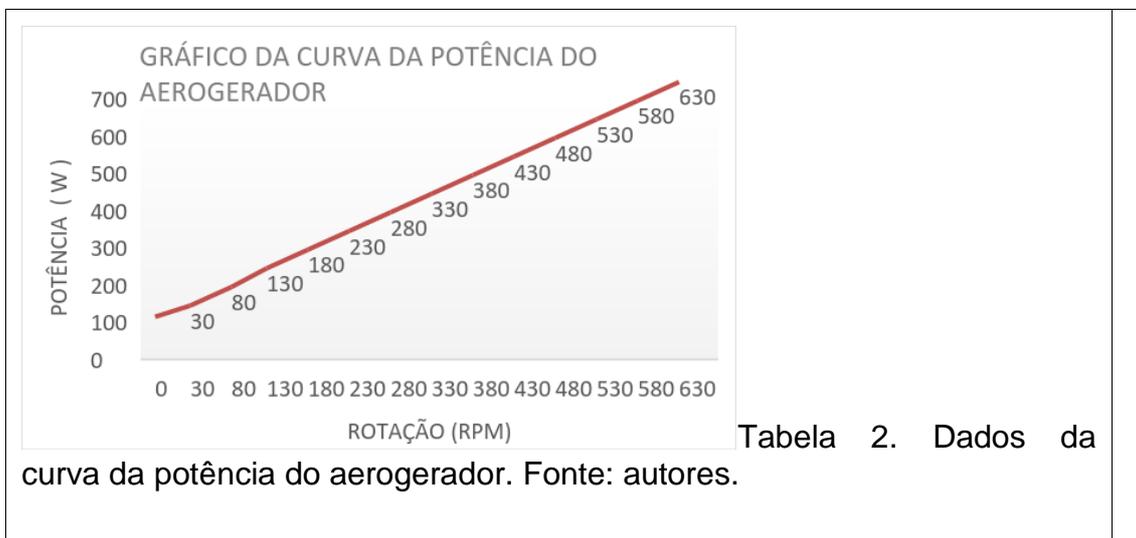
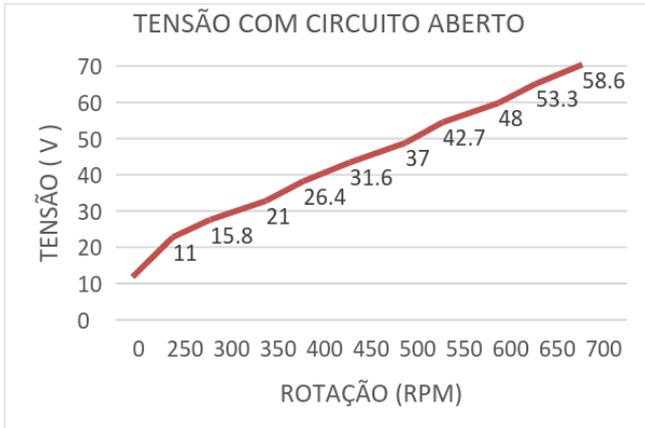


Tabela 1. Dados Resultados de simulação para o estudo de viabilidade técnica do aerogerador, de tensão com circuito aberto. Fonte: autores.

Discutir os resultados apresentados, u seja, explicar o que é visto e quais conclusões você pode tirar.

Espera-se que este trabalho resulte numa melhor compreensão dos limites técnicos e financeiros para aerogeradores de pequeno porte tanto quanto possa subsidiar a concepção de e aerogeradores de baixo custo e baixa rotação e Por fim, tornar mais viável a instalação dos mesmos em regiões com baixas velocidades de ventos.

#### 4. CONCLUSÃO

Para a realização deste trabalho, inicialmente efetuou-se uma bancada para os testes, com viabilidade técnica para aplicação do aerogerador de

pequeno porte (aerogerador de energia elétrica renovável com baixo custo e baixa rotação), com sua potência (250Watts e 500Watts), velocidade nominal 500rpm, tensão de saída 24 V pelo o alternador trifásico de corrente alterna (AC), sendo posteriormente retificado para corrente contínua (DC) que alimenta um controlador de carga, com isto, carregará um banco da baterias que pode ser usado para fornecer energia a uma casa em regime de offgrid (um sistema que não é conectada à rede da concessionária).

Após ser testado até a carga máxima que esta poderia suportar, seu desempenho foi medido e exibido no gráfico do coeficiente de potência versus a velocidade específica.

Enfim, a bancada e o sistema desenvolvidos para o levantamento da carga apresentaram a vantagem de poderem ser usados para determinação de curvas de desempenho de outros aerogeradores.

Avaliando os resultados obtidos compreendemos que auxiliando as comunidades sem acesso à EE, em áreas as quais são consideradas de baixo consumo o que não justifica investimentos em infraestrutura pelas concessionárias de energia elétricas, resultarão em uma expansão das aplicabilidades dessa tecnologia em diversos locais e ampla será a contribuição para com a descentralização da energia.

## 5. REFERÊNCIAS

<sup>1</sup> FIORILLO, Celso Antonio Pacheco. Tutela jurídica do ar(vento) e a energia eólica em face do direito ambiental brasileiro. **NOMOS: Revista do Programa de Pós-Graduação em Direito da UFC**, Fortaleza, v.30, n.2,2010, p.15-24.

<sup>2</sup> Vento. Disponível em: <http://br.freepik.com/index.php?goto=41&idd=613957&url=aHR0cDovL3d3dy5zeGMuaHUvcGhvdG8vOTk1NDM4>

<sup>3</sup>5 COSTA, G. B. **Análise espacial e temporal do vento no Estado de Alagoas**. 2009, 116 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2009.

<sup>4</sup>6 BRASIL. Ministério das minas e energia. **Balanco energético nacional: BEN**, 2015. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/>

1143895/2.1+-+BEN+2015+-+Documento+ Completo+em+ Portugu%C3% Completo+em+Portugu%C3% AAs+-

<sup>85</sup> VIEIRA, Julio Cesar da Silva Freitas. **Planejamento de cenários adotando a metodologia Shell no setor de energia elétrica**: visualizações da geração distribuída no Brasil. 2013.

<sup>6</sup> BARBIRATO, Gianna Melo; DE SOUZA, Léa Cristina Lucas; TORRES, Simone Carnaúba. **Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. UFAL, 2007. FADIGAS, E. A. **Energia Eólica**. Baueri. São Paulo. Editora: Manole, 2011.

<sup>9</sup> LYRA, R. F. F. Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 27, n. 31, p. 31-38, 2012.

<sup>10</sup> URSAIA, Guilherme Crippa et al. O quadro político e institucional do setor energético brasileiro. Unisul de Fato e de Direito: **revista jurídica da Universidade do Sul de Santa Catarina**, v. 2, n. 4, p. 27-56, 2012.

<sup>116</sup> R. Marques, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, "**Energia eólica princípios e tecnologias**", Revisão, Ampliação e Atualização por CEPEL/CRESESB, Maio 2008

<sup>12 7</sup> DE CASTRO SILVA, João Pedro; DOS SANTOS COURA, Maria Rosilene. DIREITO DE ENERGIA: MICROGERAÇÃO ENERGÉTICA-UMA SOLUÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Revista Científica da FEPI**, v. 6, n. 1, 2015.

<sup>13 8</sup> BRASIL. **Ministério das minas e energia. Energia eólica impulsiona o desenvolvimento social em regiões mais pobres**: BEN, 2016. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/energia-eolica-impulsiona-o-desenvolvimento-social>

<sup>14 9</sup> BRASIL. **Capacidade de geração eólica cresce 56,9% no Brasil em 2015** BEN, 2016. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/capacidade-de-geracao-eolica-tem-crescimento-de-56-9-em-2015>

<sup>15 10</sup> TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142012000100017](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100017)>. Acesso em: 25 ago. 2015.

<sup>11</sup> ANOCIBAR, Héctor Rolando. Histerisímetro de Entreferro Variável HEV: uma proposta alternativa para a caracterização de ímãs permanentes. 2007.

<sup>1612</sup> AHMED, Ashfad. **Eletrônica de potencia**. Pearson prentice hall. São Paulo, 2000 [w.corradi.junior.nom.br/ELITrifasico](http://w.corradi.junior.nom.br/ELITrifasico)