



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Estudo Técnico Avaliativo Sobre Turbinas Eólicas

Marco Aurélio da Silva Paula

João Monlevade, MG
2018

Marco Aurélio da Silva Paula

Estudo Técnico Avaliativo Sobre Turbinas Eólicas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Figueira Corrêa

Coorientador: Prof. Welbert Alves Rodrigues

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2018

P324e

Paula, Marco Aurélio da Silva.

Estudo técnico avaliativo sobre turbinas eólicas [manuscrito] / Marco Aurélio da Silva Paula. - 2018.

61f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Figueira Corrêa.

Coorientador: Prof. MSc. Welbert Alves Rodrigues.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Energia elétrica. 2. Energia eólica. 3. Recursos energéticos. I. Corrêa, Sávio Figueira. II. Rodrigues, Welbert Alves. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 621.311.24

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ATA DE DEFESA

Aos 09 dias do mês de julho de 2018, às 14:00 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **Marco Auréio da Silva Paula**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Savio Figueira Corrêa, Welbert Alves Rodrigues, Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho e Cecilia Silva Monnerat. O aluno apresentou o projeto de monografia intitulado: **Estudo técnico avaliativo sobre turbinas eólicas**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovado do aluno, com a nota média 9,5, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela formanda.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca examinadora	Nota
Savio Figueira Corrêa	9,5
Welbert Alves Rodrigues	9,5
Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho	9,5
Cecilia Silva Monnerat	9,5
Média	9,5

João Monlevade, 09 de julho de 2018.

Savio Figueira Corrêa
Savio Figueira Corrêa (Orientador)

Welbert Alves Rodrigues
Welbert Alves Rodrigues (Co-orientador)

Francisco Ricardo A.C. Baracho
Francisco R. A. Couy Baracho (Convidado)

Cecilia Monnerat
Cecilia Silva Monnerat (Convidada)

Marco Auréio da Silva Paula
Marco Auréio da Silva Paula (Aluno)



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado
“ ESTUDO TÉCNICO AVALIATIVO SOBRE TURBINAS EÓLICAS ”
é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto,
material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida
citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 09 de Julho de 2018 .

Marcos Aurélio da Silva Paula
Nome completo do(a) aluno(a)

*"A alegria está na luta, na tentativa,
no sofrimento envolvido e não na
vitória propriamente dita."
Mahatma Gandhi*

Resumo

O trabalho apresenta um estudo sobre a geração de energia elétrica por meio dos ventos, dando ênfase aos aspectos técnicos dos aerogeradores e impactos políticos e sociais causados pela implantação de parques eólicos. Dessa maneira, foi realizado um estudo detalhado sobre os componentes utilizados na montagem dos aerogeradores e feita uma análise comparativa entre os modelos de eixo vertical e horizontal quanto à viabilidade de implantação. Ao analisar os aspectos técnicos, verificou-se que apesar de ambos os modelos serem capazes de operar em cenários semelhantes, o melhor rendimento para cada modelo é obtido em condições bem distintas. Em relação aos aspectos políticos e sociais, foi feito um estudo, e posteriormente uma análise comparativa, acerca das políticas de incentivos desenvolvidas pelo governo ao longo da expansão do sistema eólico nacional e dos impactos positivos e negativos vivenciados pela sociedade nas regiões vizinhas aos parques. Com isso, foi constatado que as políticas de expansão foram eficientes no desenvolvimento das usinas. A implantação dos parques eólicos trouxe diversos benefícios à população, principalmente relacionados à oferta de empregos e aumento da renda. Porém, a falta de planejamento na expansão da infra-estrutura e dos serviços públicos locais gerou, principalmente, sobrecarga em hospitais e graves problemas de segurança.

Palavras-chave: Aerogerador, Energia Eólica, Energias Renováveis, Comportamento do Vento, Geração de Energia.

Abstract

The research presents a study on the generation of electric energy through the wind, emphasizing the technical aspects of wind turbines and the political and social impacts caused by the implementation of wind farms. In this way, a detailed study was carried out on the components used in the assembly of wind turbines and a comparative analysis was made between the vertical and horizontal axis models regarding the feasibility of implantation. When analyzing the technical aspects, it was verified that although both models are able to operate in similar scenarios, the efficiency for each model is obtained in very different conditions. Regarding the political and social aspects, a study was done, and later a comparative analysis, on the political incentives developed by the government along the expansion of the national wind system and the positive and negative impacts of society in the regions neighboring the parks. With this, it was verified that the expansion policies were efficient in the development of the mills. The implementation of wind farms has brought several benefits to the population, mainly related to the supply of jobs and increase of income. However, the lack of planning in the expansion of infrastructure and local public services has generated, mainly, overload in hospitals and serious security problems.

Keywords: Wind Turbine, Wind Energy, Renewable Energy, Wind Behavior, Energy Generation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ventos de circulação global.	5
Figura 2 – Brisas marinhas e terrestres.	6
Figura 3 – Brisas de vales e montanhas.	6
Figura 4 – Influência da rugosidade da superfície no perfil vertical do vento.	8
Figura 5 – Potência extraída do vento.	11
Figura 6 – Características operacionais de um aerogerador.	12
Figura 7 – Mapa eólico do Brasil.	13
Figura 8 – Matriz energética brasileira (GW) em fevereiro de 2018.	16
Figura 9 – Comparativo do fator de capacidade entre os anos de 2016 e 2017.	17
Figura 10 – Evolução da capacidade instalada (GW).	17
Figura 11 – Aerogerador de eixo vertical do tipo Darrieus.	20
Figura 12 – Aerogerador de eixo vertical do tipo Savonius.	21
Figura 13 – Aerogerador de eixo horizontal.	22
Figura 14 – Componentes de um aerogerador de eixo horizontal.	23
Figura 15 – Controle de velocidade Stall de um aerogerador.	25
Figura 16 – Controle de velocidade Pitch de um aerogerador.	25
Figura 17 – Aerogerador de eixo horizontal com rotor à montante e à jusante, respectivamente.	26
Figura 18 – Gerador síncrono acoplado diretamente na rede elétrica.	30
Figura 19 – Gerador síncrono de rotor bobinado.	32
Figura 20 – Gerador de indução duplamente alimentado.	32
Figura 21 – Gerador síncrono de ímã permanente.	33
Figura 22 – Investimento em energia eólica em relação às demais renováveis.	42
Figura 23 – Sistema offshore flutuante.	50
Figura 24 – Modelo de lente eólica desenvolvida na Universidade de Kyushu.	52

Lista de tabelas

Tabela 1 – Fator n para diferentes tipos de superfícies.	9
Tabela 2 – Relação de tamanho e potência instalada	14
Tabela 3 – Comparativo entre aerogeradores de eixo vertical e horizontal	34
Tabela 4 – Comparativo entre acopladores dos aerogeradores	35
Tabela 5 – Pontos positivos e negativos da implantação dos parques eólicos no Nordeste brasileiro.	43

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Estrutura do Trabalho	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Energia Eólica	3
2.2	Caracterização dos Ventos	4
2.2.1	Circulação do Vento	4
2.2.2	Parâmetros que Influenciam no Perfil do Vento	7
2.2.3	Análise Estatística: Densidade de Probabilidade de Weibull	9
2.3	Potência Eólica Extraída	10
2.4	Classificação dos Sistemas Eólicos	13
2.4.1	Classificação quanto ao tamanho e potência	13
2.4.2	Classificação quanto às aplicações para produção de eletricidade	14
2.4.3	Classificação quanto ao local de instalação	14
2.5	Cenário Eólico Brasileiro	15
3	METODOLOGIA	18
4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL E HORIZONTAL	19
4.1	Turbinas de eixo vertical	19
4.1.1	Turbinas Darrieus	19
4.1.2	Turbinas Savonius	20
4.2	Turbinas de eixo horizontal	21
4.3	Componentes de uma turbina	22
4.3.1	Torre	23
4.3.2	Transmissão e Caixa Multiplicadora	23
4.3.3	Sistema de frenagem	24
4.3.4	Controle de posição	26
4.3.5	Sensores de vento	26
4.3.6	Geradores	27
4.3.6.1	Geradores de corrente contínua	27
4.3.6.2	Geradores de ímã permanente	28
4.3.6.3	Geradores síncronos	28

4.3.6.4	Geradores de indução	28
4.4	Conexão das turbinas eólicas na rede elétrica	29
4.4.1	Sistema gerador com velocidade fixa	29
4.4.1.1	Gerador Síncrono acoplado diretamente à rede elétrica	29
4.4.1.2	Gerador de indução com rotor gaiola de esquilo acoplado diretamente à rede elétrica	30
4.4.1.3	Gerador de indução com rotor bobinado acoplado diretamente à rede elétrica	31
4.4.2	Sistema gerador com velocidade variável	31
4.4.2.1	Gerador síncrono com inversor	31
4.4.2.2	Gerador de indução com rotor de gaiola com inversor	32
4.4.2.3	Gerador de indução com rotor bobinado duplamente alimentado	32
4.4.2.4	Turbina com rotor acoplado diretamente no gerador elétrico	33
4.5	Análise comparativa	34
5	ANÁLISE POLÍTICA E SOCIAL DA GERAÇÃO EÓLICA	37
5.1	Aspectos políticos	37
5.1.1	Políticas públicas	38
5.1.2	Políticas industriais	39
5.2	Aspectos sociais	40
5.3	Análise comparativa	41
6	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS	47
	Anexos	50

1 Introdução

A questão energética é um dos tópicos de maior importância na atualidade. A qualidade de vida de uma sociedade está fortemente relacionada com seu consumo de energia. Em todo o mundo, com as sociedades cada vez mais industrializadas, a demanda por energia elétrica tem aumentado a cada ano. Segundo Fadigas (2011), nas últimas décadas, as perspectivas de esgotamento das reservas de petróleo, a elevação dos preços de mercado para combustíveis fósseis em consequência de problemas políticos e sociais e as preocupações com os impactos ambientais, fizeram com que as fontes de energia alternativas ganhassem cada vez mais destaque. De fato, as problemáticas associadas a esses fatores fizeram com que as sociedades mais desenvolvidas encarassem com atenção a urgente necessidade de utilização de energias renováveis. A inserção de recursos complementares na matriz energética de um país, com a adoção de fontes renováveis, deve minimizar impactos causados por crises internacionais que afetam o mercado de combustíveis fósseis ou por instabilidades na geração hidroelétrica em épocas de estiagem.

A energia mecânica contida no vento demonstra potencial para contribuir significativamente no atendimento dos requisitos necessários quanto à segurança de fornecimento e sustentabilidade ambiental, conforme Martins, Guarnieri e Pereira (2008).

O Brasil é um país rico em recursos energéticos renováveis. Com exceção da energia hidráulica, que já é bem explorada, fontes como solar, eólica, biomassa e oceânica podem ser exploradas em maior escala por meio de políticas de incentivo, de modo que possam ter maior participação na matriz energética nacional, uma vez que segundo Abeeólica (2018a), consiste de aproximadamente 60,9% hidráulica.

1.1 Objetivos

A inserção de fontes alternativas de energia na diversificação da matriz energética de um país é assunto de grande relevância atualmente. A energia eólica tem se destacado e vários estudos se concentram nesta área por se tratar de energia limpa, renovável e bastante competitiva, tornando cada vez mais promissora. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo avaliativo e crítico sobre a energia eólica, com ênfase nos tipos de turbinas eólicas utilizadas, analisando diversos equipamentos que compõem um aerogerador, seus aspectos técnicos, e os impactos políticos e sociais causados pela implantação desse sistema.

1.2 Objetivos Específicos

1. Fazer uma revisão bibliográfica para contextualizar o assunto abordado;
2. Reunir artigos relevantes que abordam aspectos técnicos de aerogeradores e seus impactos político-sociais;
3. Comparar os aerogeradores de eixo vertical e horizontal;
4. Realizar análise comparativa dos impactos mencionados.

1.3 Estrutura do Trabalho

Para o bom entendimento do trabalho, os critérios adotados para a divisão do conteúdo apresentado foram definidos buscando um desenvolvimento progressivo do assunto abordado.

No capítulo 2, é apresentada a energia eólica desde seus primórdios e sua utilização até a geração da energia elétrica. Posteriormente, são descritas de forma resumida a formação dos ventos nas camadas da atmosfera e os parâmetros que influenciam na intensidade e direção dos ventos. É apresentado o equacionamento para o cálculo da produção de energia e descritos os procedimentos adotados para a coleta de dados e levantamento do potencial eólico de uma determinada região. Em seguida, são apresentados aspectos relacionados à aerodinâmica dos aerogeradores, introduzindo conceitos importantes que ilustram o processo de conversão da energia contida nos ventos em energia mecânica no eixo de um aerogerador. São classificados os sistemas eólicos e dada uma visão geral do potencial elétrico brasileiro, seu desenvolvimento e um comparativo da evolução observada nos últimos anos.

O capítulo 3 descreve a metodologia a ser aplicada na continuidade do trabalho. Nela será apresentada a divisão detalhada das pesquisas a serem realizadas e, em seguida, dos critérios adotados para as análises.

No capítulo 4 são apresentados os tipos de turbinas eólicas utilizados atualmente, detalhando seus componentes e aspecto construtivo. São demonstrados os geradores utilizados e seus acoplamentos com a rede elétrica.

O capítulo 5 procura demonstrar as questões mais relevantes dos aspectos político e social com relação à implantação e desenvolvimento dos parques eólicos e apresenta uma análise comparativa acerca dos impactos gerados.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e considerações finais extraídas do trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico necessário para a compreensão do trabalho. Nas seções à seguir serão demonstrados: como é gerada a energia elétrica à partir do vento, suas condições e o panorama atual brasileiro da geração de energia pelas usinas eólicas.

2.1 Energia Eólica

Segundo Fadigas (2011), não é sabido quando nem onde foi dado início à utilização da energia eólica. A primeira informação extraída de fontes históricas afirma que a utilização da energia eólica iniciou-se na Pérsia, na moagem de grãos e bombeamento d'água, tendo forte influência na economia agrícola Europeia por vários séculos, substituindo a força humana e animal.

Especificamente na Holanda, os moinhos tiveram importância ainda maior. Além da moagem de grãos, devido às terras holandesas ficarem abaixo do nível do mar, a drenagem das terras foi sua segunda maior aplicação. Com o surgimento da máquina a vapor no século XIX, iniciou-se o declínio da energia eólica na Holanda. Porém, mesmo com o declínio no uso desses equipamentos na Europa, países com grandes extensões territoriais, como os Estados Unidos, buscavam uma solução para levar energia elétrica às áreas rurais que não eram interligadas à rede elétrica.

Conforme apresentado em Fadigas (2011), o marco inicial para o desenvolvimento de aerogeradores se deu na Dinamarca, quando o professor Poul La Cour construiu um protótipo de turbina eólica para realizar seus experimentos, onde uma turbina eólica era acoplada a um gerador de corrente contínua (CC). A partir daí, países como Dinamarca e Alemanha passaram a investir em pesquisas nesse âmbito. Enquanto os alemães elaboravam teorias e grandes planos para a década de 1930, cientistas de vários países desenvolviam também suas turbinas eólicas.

Quando a energia elétrica oriunda dos ventos começou a ser utilizada na segunda metade do século XX, as cidades de grande porte já possuíam eletrificação gerada através de usinas hidrelétricas e termelétricas, porém devido à dificuldade de levar energia elétrica até as áreas rurais, estas por sua vez tinham a geração eólica como sua fonte de energia.

Para países de grandes extensões territoriais como Estados Unidos e Rússia, os aerogeradores constituíam uma ótima alternativa para a alimentação de edificações rurais isoladas gerando sua própria energia elétrica em corrente contínua e armazenando o excesso em baterias para eventuais períodos de baixa incidência de ventos.

No entanto, a utilização de aerogeradores até aquele momento era apenas em sistemas isolados e de pequeno porte. Fadigas (2011) relata que na década de 1970 a

economia mundial ficou severamente abalada em função da crise do petróleo provocada pelas altas sucessivas no preço desse combustível, que motivaram a retomada de investimentos em energia eólica, bem como o investimento em outras fontes geradoras de energia por vários países. Desde então, foram desenvolvidas turbinas eólicas de potência maior e conectadas à rede.

No Brasil, a capacidade instalada ainda é pequena se comparada aos países líderes em geração eólica, porém esse cenário vem mudando atualmente, devido às políticas de incentivos estarem aumentando a exploração deste recurso.

O Boletim Mensal de Geração Eólica, conforme Abeeólica (2017b), relata que em dezembro de 2017 foi atingida a marca de 503 parques eólicos instalados no Brasil com aproximadamente 6500 aerogeradores e capacidade instalada de 12,7 GW. No caso do Brasil, um país fortemente dependente da matriz hídrica, é fundamental a diversificação. Como não são mais possíveis novos projetos de grandes hidrelétricas devido às restrições ambientais no Brasil, as eólicas surgem como a opção mais barata para expandir a capacidade instalada na matriz elétrica.

2.2 Caracterização dos Ventos

No passado, as avaliações realizadas sobre os recursos eólicos eram feitas exclusivamente através do ponto de vista meteorológico. No entanto, as informações necessárias para avaliar o potencial de transformação desses recursos em energia elétrica por meio de aerogeradores eram insuficientes. Informações como condições do vento, tipo de terreno e variação de sua velocidade em relação a altura não eram fornecidas pelas torres meteorológicas (FADIGAS, 2011).

Atualmente, existem bases de dados e mapas eólicos com informações de vários anos provenientes de torres anemométricas com avaliações mais minuciosas das condições de vento em diferentes tipos de relevo, rugosidade de solo e em diferentes alturas, com a finalidade de obter uma avaliação mais precisa do aproveitamento energético dos ventos.

No entanto, o projeto de uma central eólica não é baseado exclusivamente nesses dados. Quando um local de interesse para implantação de aerogeradores é definido, são instaladas no local uma ou mais torres anemométricas com sensores posicionados na altura do cubo do aerogerador por um período de aproximadamente um ano. É de extrema importância que a análise dos dados coletados seja minuciosa, pois a potência contida no vento é proporcional ao cubo de sua velocidade, podendo haver grandes variações na potência com pequena variação na velocidade do vento.

2.2.1 Circulação do Vento

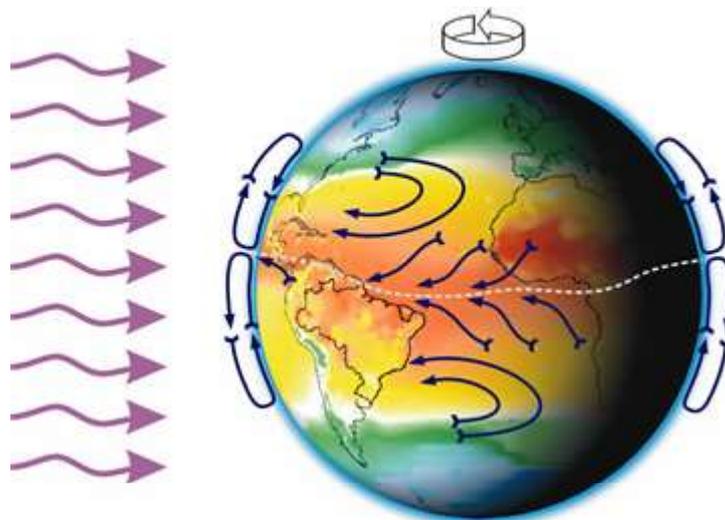
O movimento das massas de ar é causado por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre devido ao fenômeno de convecção e rotação da Terra. O fenômeno

ocorre da seguinte maneira: o ar mais frio é mais denso, e tende a descer, enquanto que o ar mais quente, menos denso, tende a subir. Com isso, é criada uma diferença de pressão atmosférica, fazendo com que o ar se desloque da zona de maior pressão para a de menor pressão, propiciando a formação dos ventos.

Os ventos podem ser classificados como de circulação global ou local.

Segundo Fadigas (2011), os ventos de circulação global são resultantes das variações de pressão, temperatura e densidade causadas pelo aquecimento desigual da Terra por meio de radiação solar, que varia em função da distribuição geográfica. As regiões próximas à linha do Equador recebem maior incidência de radiação solar que os pólos. Isso faz com que as massas de ar frias circulem dos pólos para o Equador. Outro fator que afeta a movimentação dos ventos é a rotação da Terra. A inércia do ar frio, que se move perto da superfície em direção ao Equador, tende a ser girado para oeste, enquanto o ar quente tende a ser desviado para leste.

Figura 1 – Ventos de circulação global.



Fonte: (FADIGAS, 2011).

Os ventos de circulação local são causados por brisas marítimas e terrestres ou diferença entre vales e montanhas.

As brisas marítimas e terrestres resultam da diferença de capacidade de absorção de calor da terra e do mar. Conforme a figura 2, durante o dia, devido à terra possuir maior capacidade de reflexão de raios solares que o mar, a temperatura do ar aumenta e uma corrente de ar se forma em direção a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente que a do mar, criando uma corrente de ar no sentido oposto (brisa terrestre).

A formação das correntes de ar entre vales e montanhas é feita também em dois períodos. Durante o dia, o ar frio da montanha se aquece e em seguida dá lugar ao ar frio

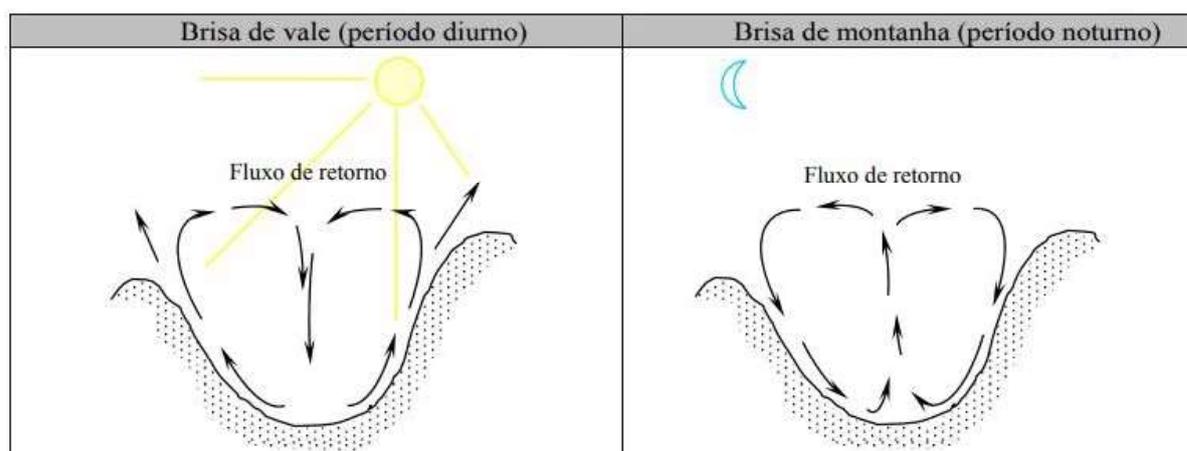
Figura 2 – Brisas marinhas e terrestres.



Fonte: (SILVA, 2003).

dos vales. No período noturno, o ar frio da montanha penetra nos vales e o ar quente dos vales sobe em direção às montanhas, invertendo o fluxo das correntes de ar.

Figura 3 – Brisas de vales e montanhas.



Fonte: (SILVA, 2003).

Outro fator importante a ser analisado quanto ao comportamento dos ventos é sua variação temporal de velocidade. Em Mendonça e Danni-Oliveira (2017), as variações temporais são classificadas em variações interanuais, sazonais, diárias e de curta duração.

- Variações interanuais: ocorrem em escalas de tempo superiores a um ano. O conhecimento dessa variação é de grande importância para a estimativa de viabilidade técnica e econômica a longo prazo de um aerogerador. Segundo Silva (2003), as variações interanuais estão ligadas às mudanças permanentes nos padrões climáticos do planeta, por exemplo, à elevação da temperatura global. Entretanto, essas variações são mais brandas em regiões próximas à linha do Equador.

- Variações sazonais: ocorrem em escalas mensais e ao longo de um ano. Conforme Silva (2003), essas variações estão associadas principalmente à movimentação da zona de convergência intertropical (zona compreendida entre as latitudes 30° Norte e 30° Sul) e gradientes térmicos oceano-continente. No caso do Nordeste brasileiro, que possui quase a totalidade da geração do país, as variações sazonais possuem forte regularidade. Nos meses de fevereiro e março, a intensidade dos ventos tende a diminuir devido às chuvas contínuas e, em agosto e setembro, a intensidade e constância dos ventos atingem seu ápice. Devido à variação da geração hidrelétrica no Brasil, principalmente no período de estiagem, esse estudo torna-se importante na análise da complementariedade da demanda energética entre as gerações eólica e hidrelétrica, visto que os períodos de maior estiagem são justamente os de maior intensidade de vento.
- Variações diárias: ocorrem em função do aquecimento desigual da superfície terrestre ao longo do dia. Em regiões litorâneas essas variações são causadas principalmente por brisas marítimas e terrestres, que podem penetrar até 100 km para dentro do continente ou do oceano. Nas demais regiões ocorrem fortes ciclos térmicos em montanhas e vales, associados a efeitos de canalização, que se originam no encontro das correntes de ar com cadeias de montanhas e vales. Dependendo da topografia e orientação do vento, as massas de ar podem ser canalizadas de forma a acelerar a velocidade do vento.
- Variações de curta duração: são variações devido a turbulências e rajadas de vento. A velocidade do vento é sempre flutuante, logo a energia disponível do vento está sempre variando. Essas variações são associadas diretamente às condições da superfície local, como rugosidade e obstáculos, e podem causar problemas de estresse e fadiga como consequência de forças cíclicas induzidas pelo vento.

2.2.2 Parâmetros que Influenciam no Perfil do Vento

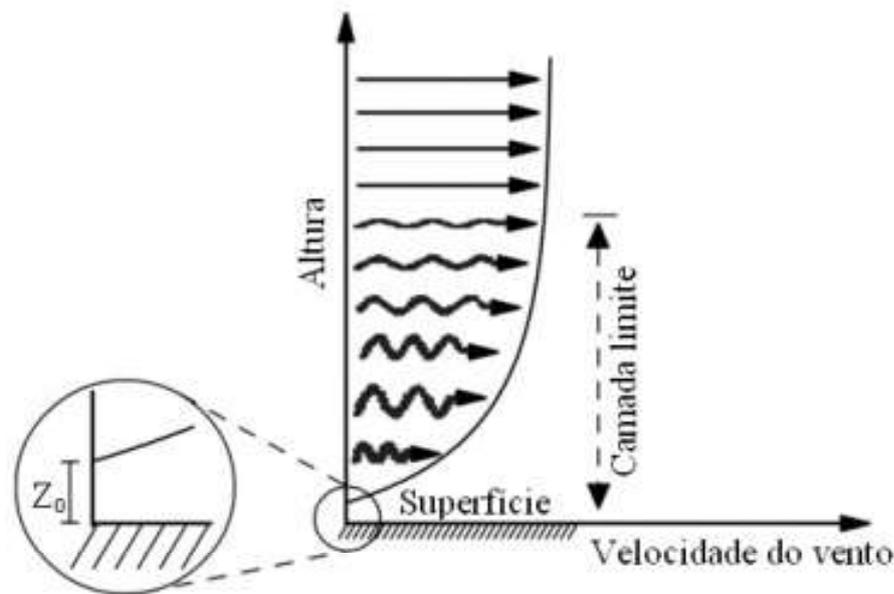
A identificação do potencial eólico de uma dada localidade é tarefa fundamental e tem como requisito básico e indispensável a existência de uma série temporal de observações da velocidade e direção do vento à altura adequada.

No aproveitamento da energia eólica para fins de geração de eletricidade, torna-se importante estimar o comportamento do vento. A variação da velocidade do vento com a altura em relação ao solo influencia não apenas na avaliação do fluxo de vento, mas também no projeto da turbina eólica. Jervell et al. (2012) verifica que, no sentido perpendicular à altura, a velocidade passa de um valor nulo e atinge uma velocidade de escoamento V . Essa mudança é mais acentuada próxima a superfície e menos em alturas elevadas, conforme a Figura 4. A região junto à superfície onde ocorre essa rápida mudança no valor da velocidade é conhecida como camada limite.

Os fatores que influenciam no perfil vertical da velocidade dos ventos em um determinado local são:

- Obstáculos próximos ao local de medição;
- Rugosidade do terreno: tipo de vegetação e construções;
- Existência de depressões.

Figura 4 – Influência da rugosidade da superfície no perfil vertical do vento.



Fonte: (WAGNER; BAREISS; GUIDATI, 2012).

Para operação comercial, os aerogeradores são instalados no interior da camada limite, ou seja, até 150 m, conforme apresentado em Jervell et al. (2012), o que torna importante o conhecimento da distribuição da velocidade do vento com a altura, pois essa determina a produtividade de uma turbina instalada em uma determinada torre.

Segundo Fadigas (2011), em pesquisas de exploração dos recursos eólicos, dois modelos matemáticos são geralmente utilizados para descrever o perfil vertical dos ventos: Lei de Potência e Lei Logarítmica.

A Lei de Potência é resultado de estudos da camada limite e é mais simples de ser aplicada, porém não apresenta grande precisão. A Lei de Potência pode ser expressa por:

$$V = V_r(H/H_r)^n \quad (2.1)$$

Em que:

V = velocidade do vento na altura desejada;

V_r = velocidade do vento na altura de referência (medida);

H = altura desejada;

H_r = altura de referência;

n = expoente da Lei de Potência.

O expoente n corresponde à interferência causada no perfil vertical da velocidade do vento pela natureza do terreno. Esse parâmetro pode sofrer alterações conforme a temperatura, ao longo do dia ou das estações do ano (FADIGAS, 2011).

A Tabela 1 apresenta alguns valores de n para diferentes terrenos planos.

Tabela 1 – Fator n para diferentes tipos de superfícies.

Descrição do Terreno	Fator n
Superfície lisa, lago ou oceano	0,10
Gramma baixa	0,14
Vegetação rasteira (até 0,3 m), árvores	0,16
Arbustos, árvores	0,20
Árvores, construções	0,22 - 0,24
Áreas residenciais	0,28 - 0,40

Fonte: (FADIGAS, 2011).

A Lei Logarítmica é um modelo mais complexo e realístico, uma vez que considera que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento. Para velocidades elevadas, usando a Lei Logarítmica, o perfil do vento é dado por:

$$V(z) = \frac{V_0}{K_c} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.2)$$

onde $V(z)$ é a velocidade do vento na altura z , z_0 é a altura da rugosidade, K_c é a constante de Von Kármán ($K_c = 0,4$) e V_0 é a velocidade de atrito relacionada a tensão de cisalhamento na superfície e massa específica do ar.

Da Equação 2.3 podemos estimar a velocidade do vento a uma altura z em relação à uma altura de referência z_0 através de:

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (2.3)$$

Tanto na Lei da Potência, o parâmetro n , quanto na Lei Logarítmica, o parâmetro z_0 , estão associados à rugosidade do terreno, que por se tratar de uma grandeza não uniforme, se modifica significativamente de uma localização para outra.

2.2.3 Análise Estatística: Densidade de Probabilidade de Weibull

Para melhor caracterizar o vento de uma dada localidade, o potencial eólico pode ser calculado com base em uma representação analítica de probabilidade de velocidade

do vento. Têm sido sugeridas várias distribuições probabilísticas para descrever o regime dos ventos, mas segundo Gabriel et al. (2011), a distribuição de Weibull normalmente é considerada a mais adequada. A função densidade de probabilidade de Weibull é dada por:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], v \geq 0 \quad (2.4)$$

em que v é a velocidade média do vento em m/s, c é o fator de escala, com dimensões de velocidade, e k é o parâmetro de forma, sem dimensões.

Os parâmetros c e k podem ser determinados a partir da transformação da Equação 2.4 na forma linear (LEITE; FILHO, 2007).

$$\ln(-\ln(1 - f(v))) = -k(\ln(c) - \ln(v)) \quad (2.5)$$

que pode ser representada pela equação da reta:

$$Y = a + bX \quad (2.6)$$

onde:

$$\begin{aligned} Y &= \ln(-\ln(1 - f(v))) \\ X &= \ln(v) \\ a &= -k\ln(c) \\ b &= k \end{aligned} \quad (2.7)$$

Assim, a determinação dos parâmetros c e k fica condicionada aos cálculos dos coeficientes a e b da reta de regressão.

2.3 Potência Eólica Extraída

A produção de energia de um aerogerador está diretamente relacionada à interação das pás do rotor com os ventos. Segundo Association et al. (2012), a potência gerada por uma turbina eólica é determinada pela força aerodinâmica gerada pela velocidade média. O modo de operação de uma turbina e seus efeitos dinâmicos como a velocidade média e flutuação dos ventos são fatores que contribuem para o pico de carga.

A potência contida nos ventos ou potência eólica é definida de acordo com a Equação 2.8.

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 C_p \quad (2.8)$$

em que:

$$\rho = \text{massa específica do ar em } kg/m^3;$$

A = área da parte frontal da turbina;

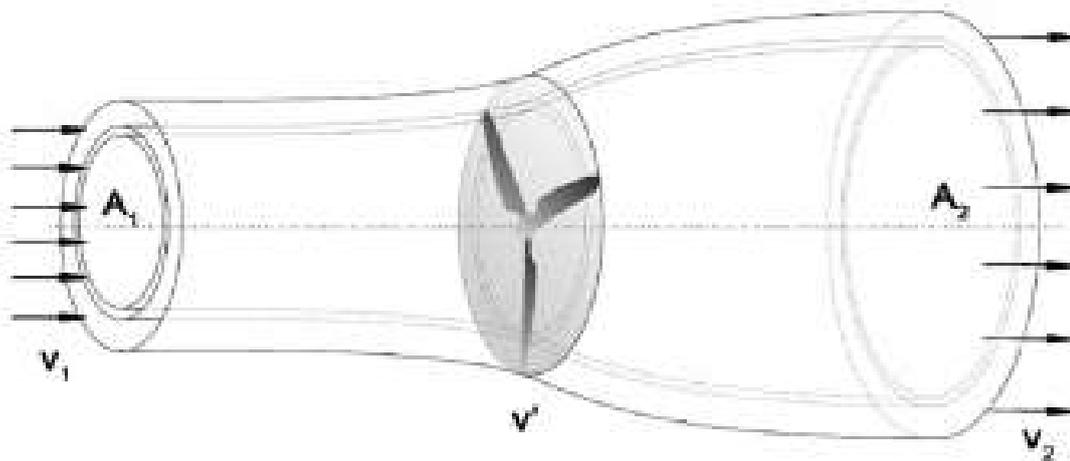
V = velocidade do vento;

C_p = coeficiente de potência.

A velocidade do vento corresponde àquela que se aproxima das pás do rotor antes de atingí-las, uma vez que após passar por um obstáculo, o perfil do vento é alterado. Durante essa passagem, parte da potência do vento é convertida em potência mecânica criando um torque no eixo da turbina e conseqüentemente sua rotação (BURTON et al., 2014).

Segundo a Lei de Continuidade de Fluxo em Association et al. (2012), o fluxo da massa de ar incidente em um conversor eólico se conserva ao fluir por ele, porém como a velocidade do vento diminui, a área ocupada pelo fluxo aumenta, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Potência extraída do vento.



Fonte: (BURTON et al., 2014).

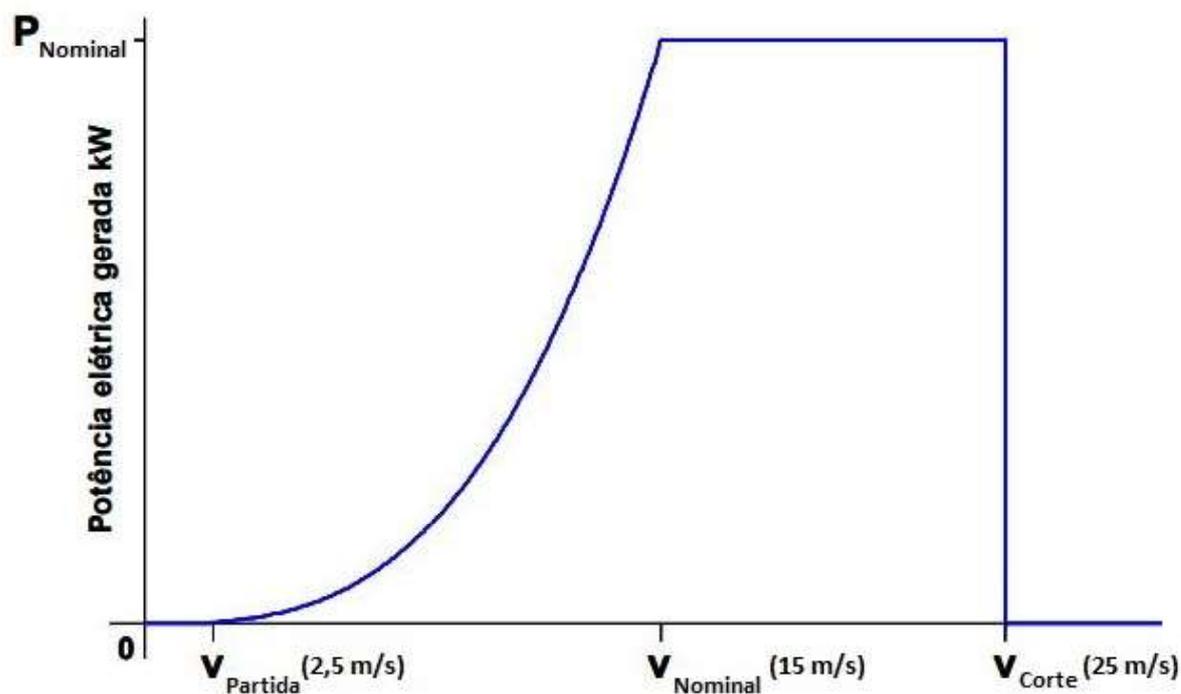
Jervell et al. (2012) diz que o coeficiente de potência, também chamado de eficiência do rotor, traduz a relação entre a potência mecânica do conversor e a potência contida no vento não perturbado. Considerando V_1 e V_2 como sendo as velocidades do vento antes e após a passagem pelo aerogerador, respectivamente, tem-se que C_p é dado pela Equação 2.9.

$$C_p = \frac{(1 + V_2/V_1) [1 - (V_2/V_1)^2]}{2} \quad (2.9)$$

Porém nem toda potência extraída do vento é convertida em energia elétrica. A geração de eletricidade é obtida para ventos com velocidade dentro de um determinado intervalo conforme Figura 6. Segundo Pessanha et al. (2009), a velocidade de partida é

geralmente entre 2,5 e 3,5 m/s, enquanto que a nominal é de aproximadamente 15 m/s. A partir da velocidade nominal, até a velocidade de corte, em geral de 25 m/s, é ativado o sistema de limitação da potência e o controle de velocidade da turbina reduz a velocidade das pás mantendo a potência gerada constante. Para valores superiores a velocidade de corte, o sistema gerador é desligado da rede elétrica, retirando a turbina de operação para preservá-la de esforços mecânicos excessivos.

Figura 6 – Características operacionais de um aerogerador.



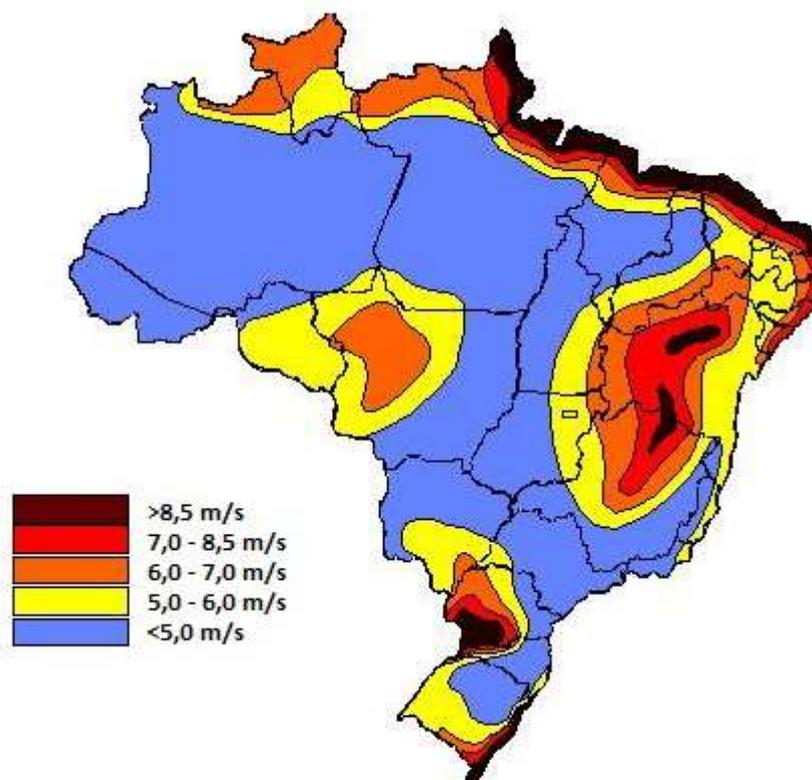
Fonte: Adaptado de (PESSANHA et al., 2009).

A proporção entre as potências efetiva e instalada em determinado instante é chamada Fator de Capacidade. Esse fator varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais alto ele for, maior será o aproveitamento da energia.

Portanto, a potência mecânica que o conversor extrai do fluxo de ar corresponde à diferença entre a potência do fluxo de ar antes e após sua passagem pelo conversor. Logo, a disposição ótima das turbinas eólicas em um parque maximizará a eficiência total de extração de energia deste parque (PINTO, 2014).

A figura 7 apresenta o mapa eólico brasileiro. De maneira geral, grande parte do extensão territorial apresenta velocidades de vento propícias ao seu aproveitamento em larga escala. As regiões litorâneas, que são mais planas, apresentam velocidade maior que outras regiões mais interioranas. Esse fato se deve a interferência causada nas correntes de ar em áreas montanhosas.

Figura 7 – Mapa eólico do Brasil.



Fonte: (EÓLICA, 2007).

2.4 Classificação dos Sistemas Eólicos

Quando se pretende projetar um sistema eólico, são pesquisados todos os parâmetros de dimensionamento a fim de obter rendimento ótimo em relação à curva de potência. A partir desses parâmetros são definidos o tamanho (altura e diâmetro das pás) e a posição dos aerogeradores.

2.4.1 Classificação quanto ao tamanho e potência

Em geral, os aerogeradores são classificados em três níveis quanto ao seu tamanho e potência instalada. São eles, os pequenos, médios e grandes. A tabela 2 apresenta suas respectivas classificações.

A classificação quanto ao porte do aerogerador coincide com as aplicações para produção de eletricidade descrita no item a seguir. Nesse caso, o sistema de pequeno porte, na maioria dos casos corresponde aos sistemas isolados, apresentando em algumas exceções conexão à rede elétrica. Os aerogeradores de médio porte geralmente são utilizados em sistemas híbridos e os de grande porte em parques eólicos, com elevado número de turbinas.

Tabela 2 – Relação de tamanho e potência instalada

Tamanho	Potência Instalada (KW)	Diâmetro (m)	Área do rotor(m^2)
Pequeno	Até 80	Até 16	Até 200
Médio	De 81 a 500	De 16 a 45	De 200 a 1600
Grande	Maior que 500	Maior que 45	Maior que 1600

Fonte: Adaptado de (REIS, 2015).

2.4.2 Classificação quanto às aplicações para produção de eletricidade

Um sistema eólico também pode ser classificado quanto às aplicações para a produção de energia elétrica. Segundo Reis (2015), são classificados como:

- Sistemas independentes ou isolados: são sistemas normalmente de pequeno porte que, devido a não estarem conectados à rede, necessitam de algum tipo de armazenamento, o que torna seu custo mais elevado;
- Sistemas Híbridos: são aqueles que apresentam mais de uma fonte de energia como, turbinas eólicas, geradores diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. Em geral, esses sistemas são empregados em sistemas de médio porte destinados a atender um número maior de usuários;
- Sistemas interligados à rede: são sistemas que não necessitam de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Estes sistemas representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão interligados.

2.4.3 Classificação quanto ao local de instalação

Outra forma de classificar os sistemas eólicos é quanto ao local de instalação. As concentrações de aerogeradores podem ser alocadas de duas formas, conforme Grangeiro (2012):

- Sistema Onshore: corresponde aos parques eólicos instalados em terra;
- Sistema Offshore: corresponde aos parques eólicos instalados em meio marítimo.

Os sistemas offshore permitem a produção energética em localizações mais extensas e possuem rendimentos superiores aos sistemas onshore devido às condições atmosféricas dos ventos nos oceanos. Os ventos possuem maior velocidade e são mais constantes, o que permite maior aproveitamento do recurso, além de oferecer menor nível de turbulência, reduzindo o desgaste dos equipamentos. Segundo Costa (2013), a produção offshore é, em média, de 10 à 20% maior que a onshore, porém a geração dos sistemas offshore

implementados necessitam ser bem compensativas, uma vez que seu custo é de pelo menos 40% a mais que os sistemas onshore.

Vários países europeus estão investindo nos sistemas offshore, principalmente devido às suas pequenas extensões territoriais. Dentre eles pode-se destacar a Holanda que, segundo Treacy (2017), inaugurou recentemente um parque offshore à 85 km de seu litoral norte e é considerado um dos maiores do mundo. O parque eólico de Gemini possui capacidade de 4 GW em suas 150 turbinas instaladas, o que representa 13% da demanda energética holandesa. No Brasil ainda pouco se houve falar sobre o aproveitamento desse sistema, uma vez que a grande expansão da geração eólica é feita através de sistemas onshore.

2.5 Cenário Eólico Brasileiro

A fonte hidrelétrica é responsável por mais de 60% da capacidade de geração de energia instalada no Brasil e os reservatórios das usinas possuem grande importância para a segurança do atendimento à demanda do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nesse contexto, a fonte eólica exerce função importante no SIN, principalmente por fornecer energia elétrica com maior intensidade no segundo semestre do ano, ocasionando melhores índices de armazenamento dos reservatórios (ABEEÓLICA, 2018a).

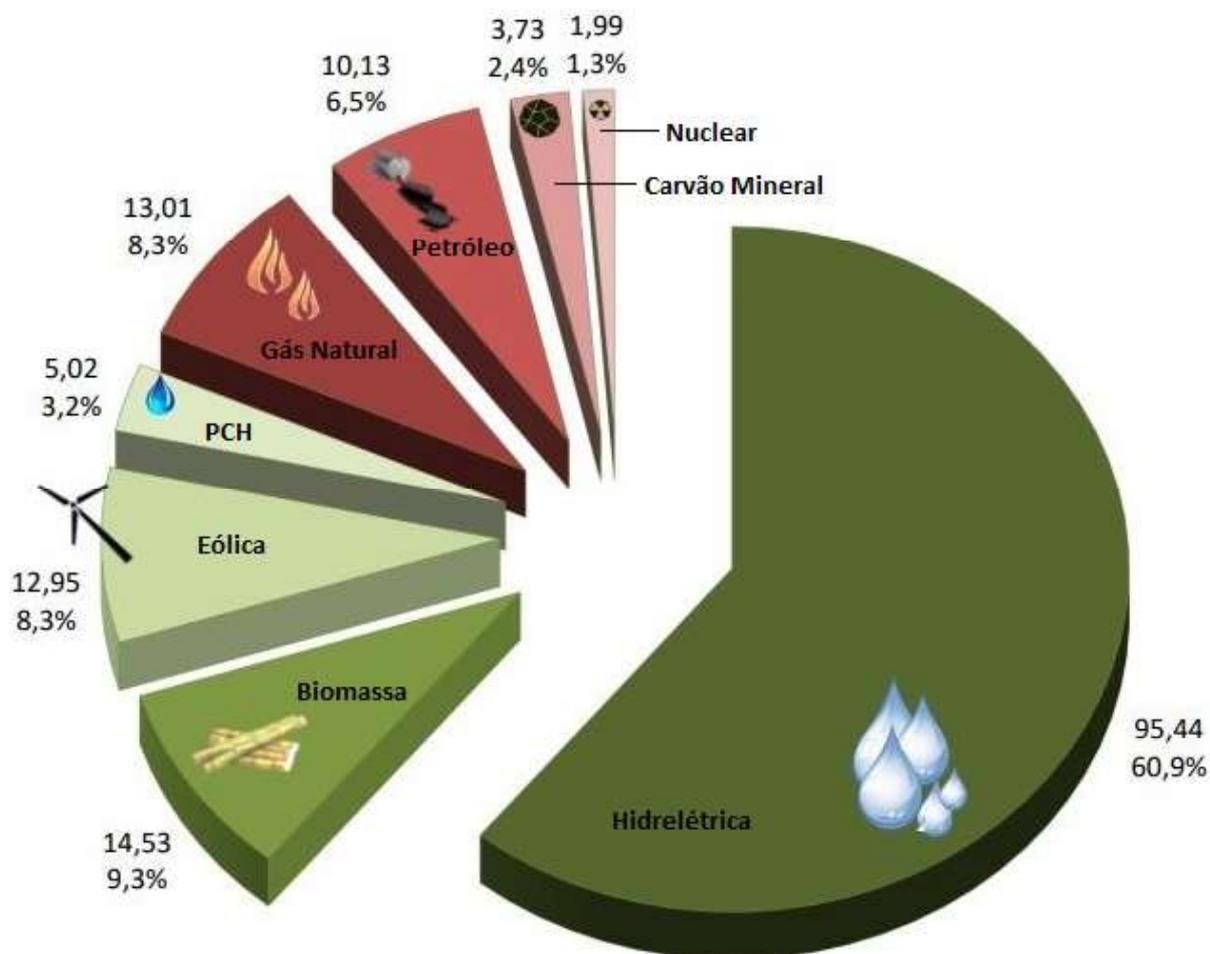
Com isso, o recurso eólico vem ganhando participação importante na matriz elétrica nacional e a previsão é que essa tendência continue. Esta previsão é baseada nos Planos Decenais de Expansão de Energia (PDE) em Cassaro et al. (2015), cujos dados de planejamento de expansão são comparados à potência efetivamente instalada.

Nos últimos anos, o Brasil vem avançando exponencialmente no ranking mundial dos países produtores de energia eólica. Em 2011, conforme Abeeólica (2013), o país ocupava a vigésima posição em produção, com capacidade instalada de 1,5 GW, que representava menos de 2% de sua matriz energética. Em 2018, com capacidade instalada de 12,95 GW, e cerca de 8,3% da matriz, o Brasil ocupa a oitava posição em produção. A Figura 8 apresenta a atual composição da matriz energética nacional de acordo com Abeeólica (2017a).

Segundo Abeeólica (2016), os grandes investimentos em energia eólica no Brasil vêm ocorrendo, mais fortemente, desde 2010, resultado do primeiro leilão competitivo, ocorrido em dezembro de 2009, e de sucessivos leilões posteriores.

Outro resultado extremamente positivo é o fator de capacidade dos parques eólicos brasileiros. Conforme a Figura 9, os valores médios obtidos nos anos de 2016 e 2017 foram de 40,7 e 43% respectivamente. Esse valor corresponde a um aproveitamento muito bom se comparado com a média mundial que, conforme Abeeólica (2018a), é de aproximadamente 25%. Em picos instantâneos, o fator de capacidade atingiu valores superiores a 70% em 2017, sendo registrados 78% na região sul no dia 09 de abril e 76% na região nordeste no dia 14 de setembro (ABEEÓLICA, 2018b).

Figura 8 – Matriz energética brasileira (GW) em fevereiro de 2018.



Fonte: Adaptado de (ABEEÓLICA, 2018a).

No gráfico da Figura 9 pode-se observar outra vantagem da energia eólica como fonte de complementariedade da geração de eletricidade, pois os meses de maior fator de capacidade é justamente os meses de estiagem, onde as usinas hidrelétricas apresentam menor capacidade de geração.

A Figura 10 apresenta a evolução da capacidade de geração instalada ao longo dos últimos anos. A composição dos dados é feita a partir das capacidades contratadas nos ambientes de contratação livre e regulado. A previsão é que ao final de 2018, a capacidade de produção seja de aproximadamente 14,6 GW e, em 2023, atinja 17,88 GW.

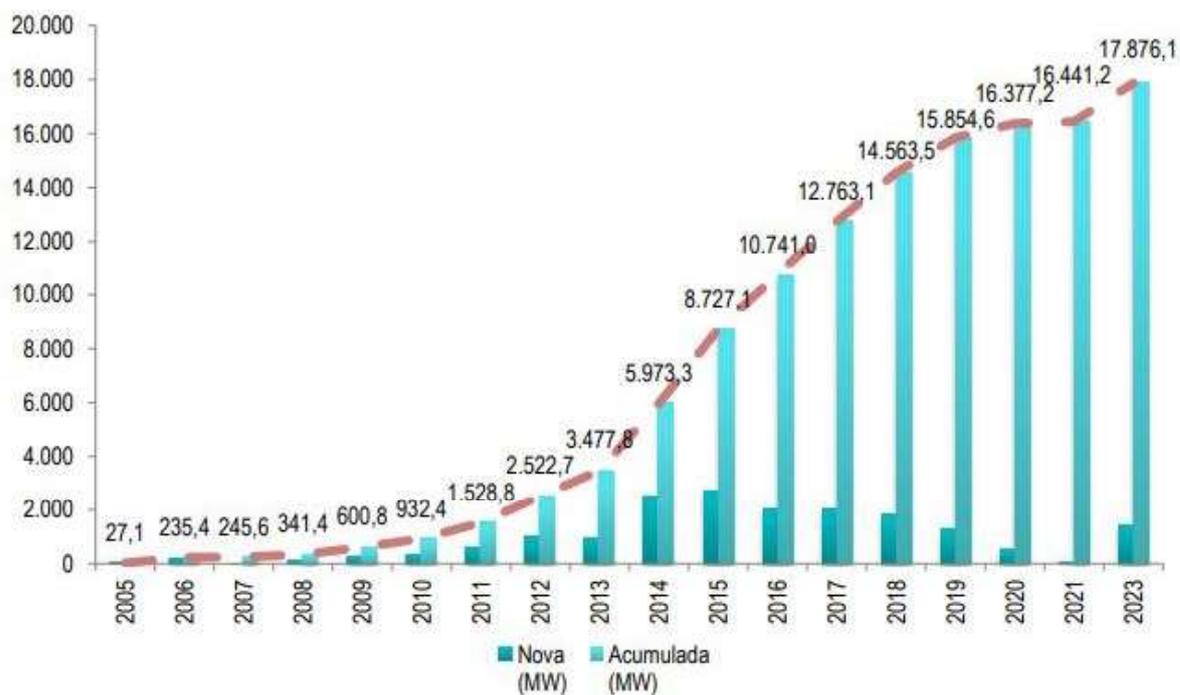
Em termos de representatividade, o sistema Nordeste possui geração muito próxima da geração total do sistema, representando 84,7% contra 15,1% do sistema Sul. O sistema Sudeste possui apenas 0,2% dessa representatividade.

Figura 9 – Comparativo do fator de capacidade entre os anos de 2016 e 2017.



Fonte: (ABEEÓLICA, 2018a).

Figura 10 – Evolução da capacidade instalada (GW).



Fonte: (ABEEÓLICA, 2018a).

3 Metodologia

A análise será baseada em dados obtidos de artigos técnicos e acadêmicos, trabalhos científicos, pesquisas e reportagens publicadas por agentes do setor elétrico. Para a avaliação crítica será feito um levantamento dos pontos positivos e negativos, sua relevância, e posteriormente feita uma análise comparativa.

A análise técnica consistirá de um comparativo entre aerogeradores de eixo vertical e horizontal, enfatizando os prós e contras de sua instalação bem como qual o melhor modelo a ser utilizado em cada ambiente. Para isso, serão apresentados seus aspectos construtivos e detalhados os componentes utilizados em sua montagem, com seus respectivos funcionamentos, levando em consideração fatores que influenciam o desempenho dos aerogeradores como topografia, barreiras naturais e superfície.

A análise política e social constituirá de uma pesquisa bibliográfica sobre a aceitação da sociedade quanto à instalação de parques eólicos e os posicionamentos do setor elétrico e do governo. Na aceitação da sociedade será apresentada uma visão geral da população local acerca da implantação do sistema, da alteração dos espaços físicos onde são instalados e seus impactos sociais. O posicionamento do setor elétrico será referente às medidas adotadas para o planejamento e desenvolvimento da geração eólica e seu crescimento na matriz energética brasileira.

O governo federal, como agente orientador e regulador, possui papel relevante no setor energético. Seu posicionamento será referente à implantação de novos parques eólicos, legislações vigentes que podem facilitar ou dificultar a implantação de novos parques, e projeções futuras.

4 Análise comparativa entre turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal

As turbinas eólicas, ou aerogeradores, são constituídos de uma série de componentes responsáveis pela produção da energia em três etapas: a captação da energia cinética do vento, sua conversão em energia mecânica e a transformação da energia mecânica em elétrica (LEITE, 2005).

Uma grande variedade de aerogeradores vem sendo utilizada para a geração de energia elétrica tanto para aplicações em sistemas isolados quanto conectados à rede elétrica.

Os aerogeradores podem ser classificados de acordo com a orientação de seu eixo em relação ao solo como vertical e horizontal.

4.1 Turbinas de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical são caracterizadas, como o próprio nome indica, pelo seu eixo de rotação se encontrar disposto na vertical, com as pás em torno desse eixo. Devido a seu aspecto construtivo, essas turbinas podem aproveitar ventos vindos de qualquer direção sem a necessidade de alteração da posição do rotor, o que representa uma vantagem em relação ao modelo de eixo horizontal, e o escoamento do vento é paralelo ao seu eixo de rotação. Outra vantagem é a possibilidade de instalação dos componentes principais junto ao solo, facilitando a manutenção da turbina.

Segundo Ferreira (2005), as principais desvantagens dessas turbinas são a incapacidade de autoarranque, necessitando de um motor de arranque como auxílio, e à necessidade de utilização de estrutura de suporte devido aos esforços dinâmicos.

Os modelos mais conhecidos de turbinas de eixo vertical são os rotores de Darrieus e Savonius, que serão detalhados à seguir.

4.1.1 Turbinas Darrieus

Reis (2015) apresenta o modelo Darrieus, que consiste de duas ou mais pás com perfil aerodinâmico simétrico, onde uma ponta está fixada na extremidade superior do eixo e a outra ponta na extremidade inferior do mesmo eixo, conforme ilustrado na Figura 11.

Conforme já citado, as turbinas Darrieus apresentam insuficiência de auto arranque, pelo fato de existirem pás que se movimentam contra a direção da corrente de ar. Batista (2013) cita alguns estudos onde o ângulo de inclinação das pás foram alterados melhorando as forças de sustentação e arrasto exercidas em todas as pás ao mesmo tempo, induzindo

Figura 11 – Aerogerador de eixo vertical do tipo Darrieus.



Fonte: (CEPEL, 2008).

auto arranque no aerogerador. Esse sistema requer a utilização de mais componentes no auto arranque, sendo que devido à elevada velocidade de rotação das turbinas Darrieus, esses componentes estarão sujeitos à fadiga mecânica.

Segundo Batista (2013), uma solução apresentada para a incapacidade de auto arranque das turbinas Darrieus é a alteração do ângulo axial da pá a medida em que varia a velocidade de rotação do rotor.

4.1.2 Turbinas Savonius

A turbina Savonius trata-se de um rotor de eixo vertical, desenvolvida pelo engenheiro finlandês Sigurd J. Savonius, que possui como principais características sua simplicidade e baixo custo, o alto torque de partida e velocidade angular de operação baixa (FRAGA, 2013).

Geralmente são constituídos de duas pás de forma côncava. Este tipo de turbina é eficiente no arranque para velocidades de ventos mais baixas, o que não ocorre nas velocidades mais altas. De acordo com Fraga (2013), a adição de pás influi de forma

negativa em seu desempenho, pois as pás acabam defletindo o escoamento do ar que incidiria na pá posterior, resultando em menor disponibilidade de potência a ser extraída do rotor.

Figura 12 – Aerogerador de eixo vertical do tipo Savonius.



Fonte: (CEPEL, 2008).

4.2 Turbinas de eixo horizontal

Segundo Reis, Fadigas e Carvalho (2005), em geral, as turbinas de eixo horizontal apresentam duas ou três pás. Normalmente, turbinas com maior número de pás possuem aplicação mais usual em conversão de energia eólica para mecânica, como em bombeamento de água.

Na geração de eletricidade, tanto em pequena quanto em elevada potência nominal, é mais comum a utilização de aerogeradores de três pás, conforme a Figura 13, por apresentarem maiores vantagens técnicas e econômicas, uma vez que seu rendimento

aerodinâmico é superior aos de eixo vertical e estão menos expostos a esforços mecânicos. Esses rotores devem possuir mecanismos capazes de permitir que a seção reta varrida pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento.

Figura 13 – Aerogerador de eixo horizontal.



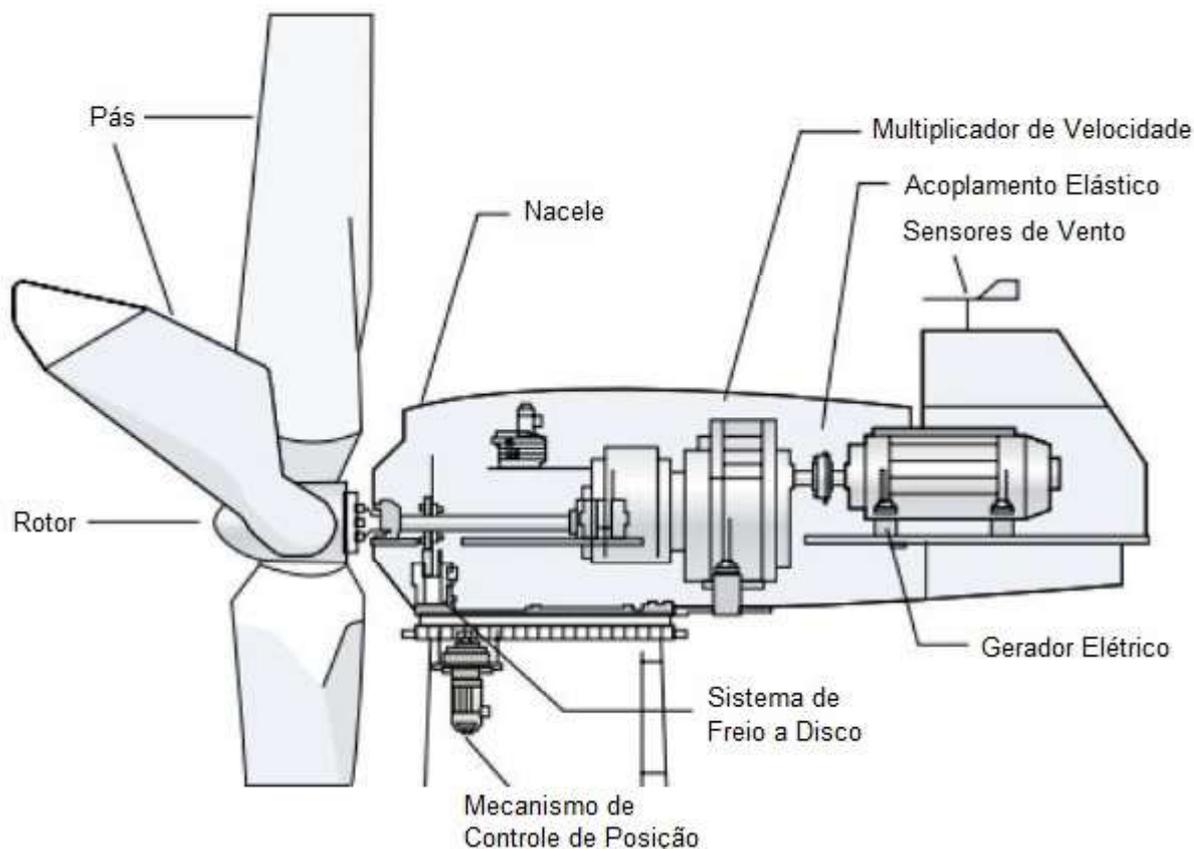
Fonte: (ABEEÓLICA, 2016).

4.3 Componentes de uma turbina

Os aerogeradores possuem três componentes básicos: a torre, o rotor com as pás e a nacele, que comporta os principais componentes tais como gerador elétrico, caixa multiplicadora de velocidades, eixos, mancais, sistemas de freios, sistemas de controle e mecanismos de giro da turbina (WENZEL, 2008). A figura 14 apresenta a nacele de um aerogerador de eixo horizontal com alguns dos componentes básicos citados. A seguir, são descritos os principais componentes de um aerogerador.

É bom salientar que tanto os modelos de eixo vertical quanto horizontal apresentam composição semelhante da nacele, tendo suas distinções na estrutura da torre, pás e controle de posição, que inexistem nos aerogeradores de eixo vertical.

Figura 14 – Componentes de um aerogerador de eixo horizontal.



Fonte: (WENZEL, 2008).

4.3.1 Torre

A função da torre é unicamente estrutural e, segundo Leite (2005), sua construção representa uma grande porcentagem do custo de implantação de aerogeradores de eixo horizontal. Para sua construção, o material utilizado pode ser aço ou concreto, em formato cônico, de treliça ou estaiado. A maioria das torres são de formato cônico com diâmetros crescentes na direção da base, com o intuito de aumentar a sustentação.

Já nos aerogeradores de eixo vertical, como o maquinário pesado contido na nacela é instalado na base do aerogerador, suas estruturas são mais simples e leves, tornando esse componente barato.

4.3.2 Transmissão e Caixa Multiplicadora

Segundo Brito (2010), a transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador e, é composta por eixos, mancais, acoplamentos e engrenagens de transmissão.

Conforme descrito em Wenzel (2008), na maioria das máquinas, o eixo que transmite

o torque das pás apresenta uma velocidade de rotação baixa, geralmente entre 20 e 150 rpm, sendo necessário aumentar a rotação utilizando o multiplicador de velocidades, que consiste de um conjunto de engrenagens que à partir de sua relação de transformação, altera a velocidade para um valor adequado de rotação do gerador. Após o multiplicador, é conectado o gerador elétrico, responsável por fazer a conversão da energia mecânica em elétrica.

Recentemente, alguns fabricantes desenvolveram aerogeradores que não necessitam de sistemas de transmissão. Ao invés desse sistema, são utilizados geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões. Mesmo com esses equipamentos mais modernos, que diminuem o número de componentes de um aerogerador, ainda hoje o modelo com transmissão é mais utilizado principalmente devido ao fator econômico, uma vez que a tecnologia utilizada em geradores multipolos é mais cara.

4.3.3 Sistema de frenagem

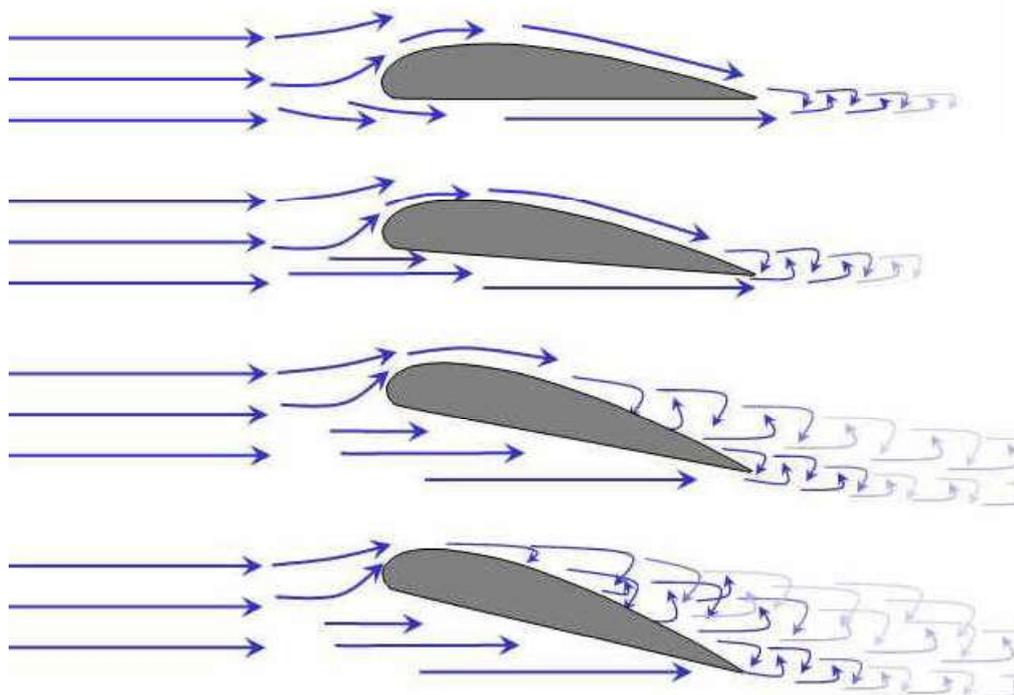
O aerogerador possui também sistemas de frenagem para realizar operações de segurança evitando que o mesmo opere com velocidades muito altas. A atuação das forças aerodinâmicas nas pás do rotor faz com que as pás necessitem de perfis especialmente projetados, semelhante aos utilizados em asas de aviões. Segundo Brito (2010), dois diferentes tipos de controle de frenagem são geralmente utilizados nas turbinas eólicas. São eles os controles por *Stall* ou *Pitch*.

No controle por Stall, para altas velocidades, conforme a figura 15, há um desprendimento do fluxo de vento no perfil aerodinâmico gerando vórtices, movimentos espirais ao redor de um centro de rotação, e assim aumentando o arrasto e diminuindo a velocidade do rotor. Nesse tipo de sistema, as pás do rotor são unidas ao cubo em um ângulo fixo, porém no momento em que a velocidade do vento está alta, é criada uma turbulência e a perda de sustentação ameniza a força exercida no rotor.

Já no controle por Pitch, um sistema, geralmente hidráulico, gira as pás e as posiciona de forma perpendicular ao vento, diminuindo a aerodinâmica e conseqüentemente a rotação, conforme figura 16. Para isso, o controlador da turbina monitora a potência gerada e, a partir dos valores especificados, envia um sinal a um mecanismo que realiza a mudança do ângulo de passo ajustando imediatamente a nova posição angular das pás do rotor.

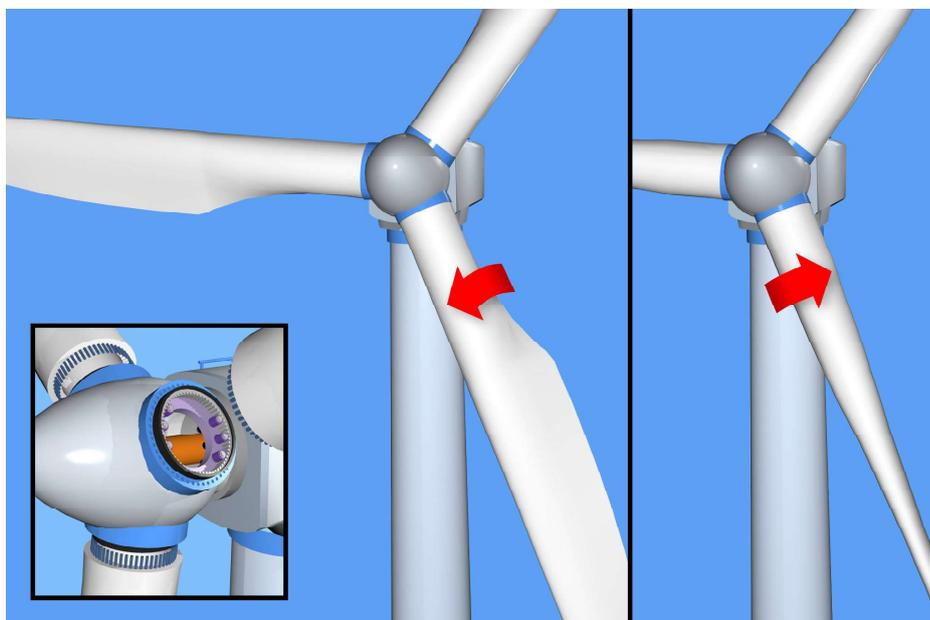
Conforme Corrêa (2017), diferentemente dos aerogeradores de eixo horizontal, os modelos de eixo vertical utilizam apenas o sistema de controle por Stall, com o exceção do modelo Giromill, um subtipo de aerogerador Darrieus, que possui controle por Pitch.

Figura 15 – Controle de velocidade Stall de um aerogerador.



Fonte: (BRITO, 2010).

Figura 16 – Controle de velocidade Pitch de um aerogerador.



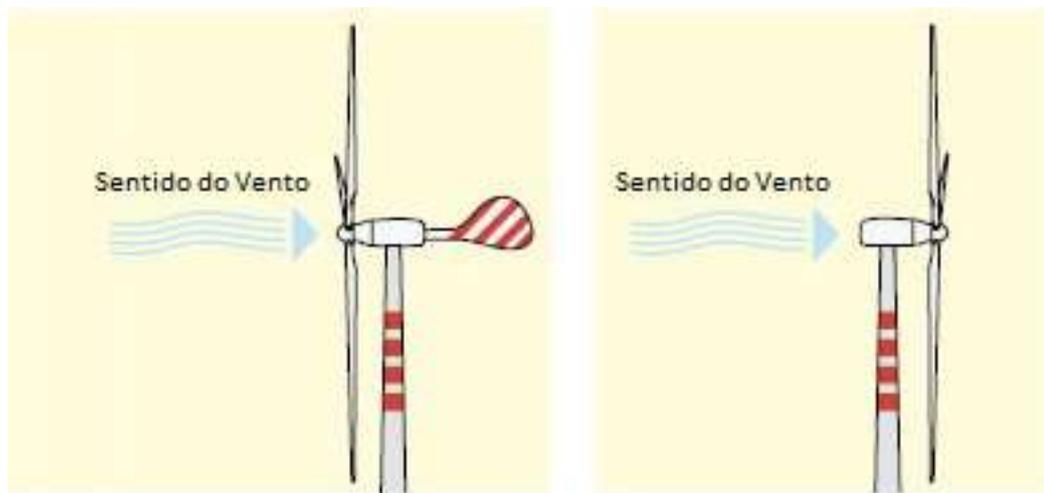
Fonte: (BRITO, 2010).

4.3.4 Controle de posição

Os mecanismos de controle são utilizados especificamente em aerogeradores de eixo horizontal, na orientação do rotor, a fim de posicioná-lo de maneira a obter melhor aproveitamento do fluxo de vento.

Segundo Jervell et al. (2012), existem duas categorias de aerogeradores de eixo horizontal, os modelos com rotores localizados à montante e à jusante das torres, conforme apresentado na figura 17.

Figura 17 – Aerogerador de eixo horizontal com rotor à montante e à jusante, respectivamente.



Fonte: (MARQUES, 2004).

- Rotor à montante: o rotor está posicionado à frente da torre e o vento sopra pela parte frontal. As pás são rígidas e o rotor é orientado segundo a direção do vento através de um dispositivo motor.
- Rotor à jusante: o rotor está posicionado atrás da torre e o vento sopra pela retaguarda das pás. O rotor é flexível e auto-orientado.

4.3.5 Sensores de vento

Os sensores de vento consistem basicamente de dois componentes: o anemômetro e a veleta. O anemômetro é o responsável por medir a velocidade do vento e a veleta monitora sua direção.

Ambos os sensores são utilizados em turbinas de eixo horizontal, porém nos modelos de eixo vertical são utilizados apenas o anemômetro, visto que devido ao sistema operar independente da direção do vento, é dispensada a utilização da veleta.

Os sinais do anemômetro são utilizados para verificar os limites mínimo e máximo da velocidade do vento para o funcionamento adequado do aerogerador. Normalmente, é

dada a partida em um aerogerador quando a velocidade do vento está em torno de 2,5 à 3,5 m/s.

Quando essa velocidade atinge 25 m/s, o sistema de controle dispara o processo de parada do aerogerador de maneira a preservá-lo mecanicamente.

Já o sinal da veleta é utilizado no controle de posicionamento do rotor. Através desse sinal, o sistema de controle de posicionamento do rotor ajusta o eixo de forma perpendicular à incidência de vento com o intuito de obter um melhor aproveitamento.

4.3.6 Geradores

O gerador é o componente responsável por transformar a energia mecânica do rotor em energia elétrica. Conforme descrito em Leite (2005), apesar dos modelos disponíveis no mercado serem de alta confiabilidade, devido às suas características de funcionamento, sua utilização em sistemas de geração eólica requer a observação de fatores importantes, tais como a constante variação da velocidade do vento, que provoca a operação do aerogerador com uma vasta faixa de rotações.

Os seguintes geradores elétricos são utilizados em turbinas eólicas:

- gerador de corrente contínua (CC);
- gerador de ímã permanente;
- gerador síncrono;
- gerador de indução.

4.3.6.1 Geradores de corrente contínua

O gerador de corrente contínua, devido à sua facilidade de controle de velocidade, foi extensivamente utilizado até a década de 1980. Atualmente é utilizado em menor escala limitada à turbinas de baixa potência. (FADIGAS, 2011). Geralmente são utilizadas em sistemas onde a energia elétrica é consumida na forma CC.

O gerador CC convencional é autoexcitado através de enrolamentos shunt ou série que fornecem tensão CC para produzir campo magnético. Neste tipo de gerador, a armadura é no rotor e o campo localiza-se no estator. Conforme Fitzgerald et al. (2006), embora o propósito final seja a tensão contínua, a tensão induzida na armadura é alternada, sendo necessária a sua retificação. A potência CA gerada é convertida em CC no comutador do rotor através de escovas de carbono apoiadas à sua superfície e a corrente de campo, e conseqüentemente o campo magnético aumentam com a velocidade de rotação do gerador.

4.3.6.2 Geradores de ímã permanente

Conforme descrito em Fadigas (2011), os geradores de ímã permanente são utilizados em turbinas eólicas tanto de pequeno quanto grande porte. Devido ao campo magnético já fornecido pelos ímãs, esse gerador não necessita de enrolamentos de campo, os quais necessitam de alimentação externa. Os ímãs são integrados diretamente em um rotor cilíndrico de alumínio fundido e sua potência gerada é retirada da armadura estacionária sem a necessidade de comutadores, anéis deslizantes ou escovas.

Esses geradores não são ligados diretamente à rede pois a potência produzida possui frequência e tensão variáveis. Dessa maneira, a tensão é imediatamente retificada para CC e pode ser usada para carregar baterias ou ser transformada novamente em CA, porém na frequência constante por meio do uso de inversores de frequência.

4.3.6.3 Geradores síncronos

O gerador síncrono é um dispositivo que produz energia elétrica CA com tensão e frequência específicas. Segundo Chapman (2013), o termo síncrono refere-se ao fato de que a frequência elétrica desta máquina está sincronizada com a velocidade mecânica de rotação. É bastante utilizado em turbinas de maior potência embora em projetos mais recentes tenha sido utilizado preferencialmente os geradores de indução (FADIGAS, 2011).

Este tipo de gerador opera com velocidade constante, não sendo adequado para trabalhar em sistemas com velocidade variável. Segundo Fitzgerald et al. (2006), com raras exceções, o enrolamento de armadura da máquina encontra-se no estator e o enrolamento de campo no rotor. Para a excitação de campo, o gerador requer corrente CC que é conduzida até o enrolamento de campo através de escovas de carbono e anéis deslizantes.

A velocidade de um gerador síncrono é constante desde a carga à vazio até sua carga máxima, e é dada pela equação 4.1.

$$n_s = \frac{120f_{se}}{P} \quad (4.1)$$

onde f_{se} é a frequência elétrica do estator e P o número de pólos da máquina.

O modo como o gerador síncrono opera em um sistema de potência real depende das restrições que lhe são impostas. Quando um gerador trabalha isolado, a corrente de campo e o regulador de velocidade controlam a frequência e a tensão em seus terminais. Quando o gerador é ligado à rede, também conhecida como barramento infinito, a tensão e frequência de operação são fixadas pela rede.

4.3.6.4 Geradores de indução

Conforme descrito em Chapman (2013), o gerador de indução é uma máquina com apenas um conjunto contínuo de enrolamentos em que a tensão do rotor é induzida no próprio enrolamento do rotor em vez de ser fornecida por meio de uma conexão física de

fios. A característica que diferencia um gerador de indução dos demais é que não há a necessidade de uma corrente de campo CC para fazê-lo funcionar. Esse tipo de gerador é utilizado tanto em sistemas de grande porte, quanto de pequeno porte.

Existem dois tipos diferentes de rotores de geradores de indução. Um deles é denominado rotor gaiola de esquilo, e o outro, rotor bobinado.

Nos geradores com rotor gaiola de esquilo, uma série de barras condutoras são encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em ambas as extremidades por grandes anéis.

Já o rotor bobinado possui um conjunto completo de enrolamentos trifásicos similares aos do estator. Seus enrolamentos são colocados em curto-circuito por meio de escovas que se apoiam aos anéis deslizantes. Esse tipo de rotor possui maior custo que o modelo gaiola de esquilo que, devido ao maior desgaste entre escovas e anéis deslizantes, exige mais manutenção. Entretanto, as máquinas de rotor bobinado permitem controlar a resistência do rotor de forma a alterar a velocidade de funcionamento do gerador. Isso permite que o gerador produza potência útil em uma faixa mais ampla de velocidades do vento. Para a utilização de uma máquina gaiola de esquilo, o vento deve estar girando seu eixo com uma velocidade entre o valor síncrono e o valor máximo como gerador, limitando as condições de vento dentro das quais o gerador eólico pode ser usado.

4.4 Conexão das turbinas eólicas na rede elétrica

O item anterior apresentou os tipos de geradores utilizados em turbinas eólicas. O tipo de gerador utilizado pode variar o modo de operação do aerogerador (velocidade fixa ou variável), o que define sua configuração em relação à forma como é conectado à rede elétrica. Para as duas configurações citadas existem diversos sistemas geradores, os quais são apresentados a seguir. Vale ressaltar que as conexões dos aerogeradores de eixo vertical e horizontal com a rede são feitas exatamente da mesma maneira.

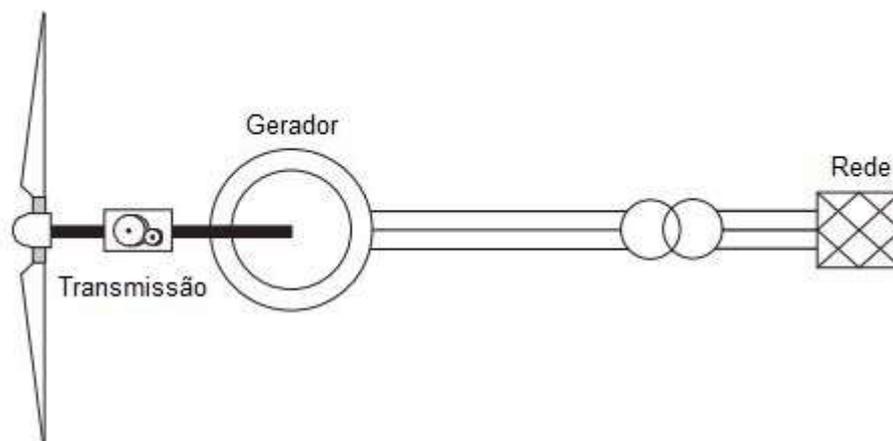
4.4.1 Sistema gerador com velocidade fixa

Os sistemas geradores com velocidade fixa utilizam sistema de transmissão (caixa de engrenagens) para fazer o acoplamento entre os eixos do rotor eólico e do gerador. Esses sistemas podem utilizar geradores síncronos, de indução com rotor gaiola de esquilo ou rotor bobinado (FADIGAS, 2011). A figura 18 apresenta um diagrama para a configuração em questão.

4.4.1.1 Gerador Síncrono acoplado diretamente à rede elétrica

Conforme Rosas, Estanqueiro e Pereira (2003), neste tipo de conexão o sistema é dito extremamente rígido, pois está diretamente ligado à rede e quase não existe flexibilidade

Figura 18 – Gerador síncrono acoplado diretamente na rede elétrica.



Fonte: (BERNARDES, 2009).

no sistema mecânico devido às características de operação do gerador. A velocidade da turbina é fixada pela frequência da rede elétrica, relação de transmissão e número de polos.

As grandes vantagens dessa configuração são a simplicidade do sistema e o controle da potência reativa, que pode ser feito facilmente pela alteração de sua corrente de campo CC. Em contrapartida, esses sistemas apresentam algumas desvantagens como: permitir pequena compensação de cargas dinâmicas, grandes surtos de carga, podendo até perder o sincronismo devido à rajadas de ventos. Por não permitir regulação de velocidade, essa configuração desperdiça boa parte do fluxo de vento, sendo mais apropriada para locais onde ventos apresentam perfil mais constante.

Segundo Fadigas (2011), em relação aos avanços obtidos nos sistemas de velocidade variável, o gerador síncrono diretamente acoplado à rede elétrica vem diminuindo a cada ano sua participação no mercado.

4.4.1.2 Gerador de indução com rotor gaiola de esquilo acoplado diretamente à rede elétrica

Conforme apresentado em Bernardes (2009), os geradores de indução acoplados diretamente à rede elétrica têm sido utilizados satisfatoriamente por décadas. Essa configuração tem sua compensação de reativos feita através de um banco de capacitores acoplados a saída do estator.

Em sistemas de grande porte, na ordem de MW, os projetos desenvolvidos geralmente possuem pequeno escorregamento nominal (razão entre a diferença das velocidades dos campos magnéticos e mecânica do rotor e a velocidade dos campos magnéticos), favorecendo à alta eficiência.

Conforme Fadigas (2011), as flutuações de potência causadas pelas flutuações do vento são transmitidas à rede de forma levemente amortecida. Uma forma de melhoria seria através do aumento do escorregamento nominal, porém um alto escorregamento

acarreta em alto custo do gerador e, além disso, esse aumento impacta em alta dissipação de calor, fazendo com que o sistema necessite de um sistema de resfriamento mais robusto na nacele.

4.4.1.3 Gerador de indução com rotor bobinado acoplado diretamente à rede elétrica

Fadigas (2011) afirma que a variação da velocidade da turbina pode ser feita por meio da alteração do escorregamento. Para se obter tal variação, são conectados resistores externos ao circuito do rotor a fim de produzir um escorregamento desejável quando a carga na turbina é elevada. A utilização desses resistores externos no lugar de rotor com alto escorregamento simplifica o sistema de refrigeração.

4.4.2 Sistema gerador com velocidade variável

Segundo Bernardes (2009), somente é possível a operação de um sistema gerador com velocidade variável controlada com a utilização de um conversor entre a turbina e a rede elétrica. Como a corrente gerada por esse sistema possui frequência variável, é imprescindível a utilização de um inversor para ajustar essa frequência a um valor constante.

Essa configuração permite melhor aproveitamento do vento em relação ao sistema de velocidade constante e tem sido utilizada cada vez mais em sistemas de grande porte principalmente em função dos avanços obtidos na tecnologia dos inversores. Uma turbina eólica de velocidade variável pode ser implementada utilizando geradores síncronos ou de indução.

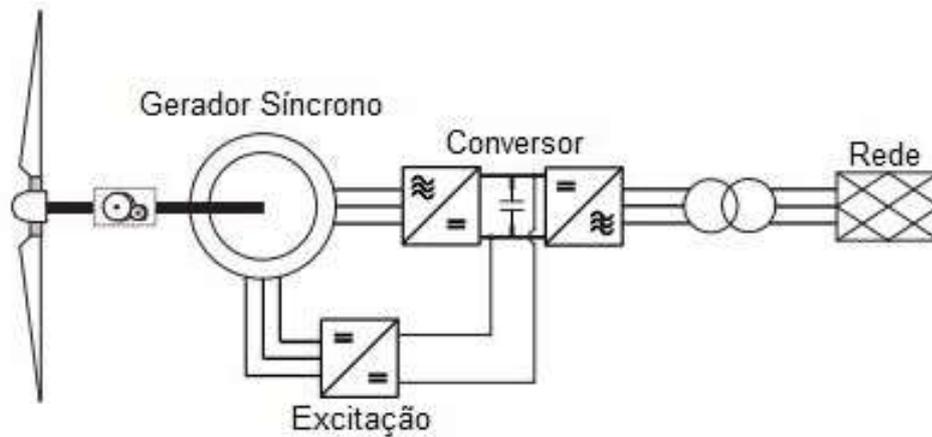
4.4.2.1 Gerador síncrono com inversor

Conforme Fadigas (2011), para a operação de um gerador síncrono em velocidade variável, através de um inversor, toda a potência CA gerada com frequência variável é convertida em CC e novamente convertida em CA com frequência constante. A figura 19 apresenta o sistema descrito.

Essa configuração permite uma ampla faixa de velocidade de operação e, consequentemente, melhor aproveitamento da energia contida nas diferentes velocidades dos ventos.

Todavia, a potência reativa requerida desse sistema é considerável. A potência necessária para que os inversores executem o controle e comutação é alta e, além disso, frequências harmônicas podem ser inseridas na rede devido à sua utilização. A compensação de reativos e filtragem de harmônicas torna o sistema mais caro devido à sua maior complexidade.

Figura 19 – Gerador síncrono de rotor bobinado.



Fonte: (BERNARDES, 2009).

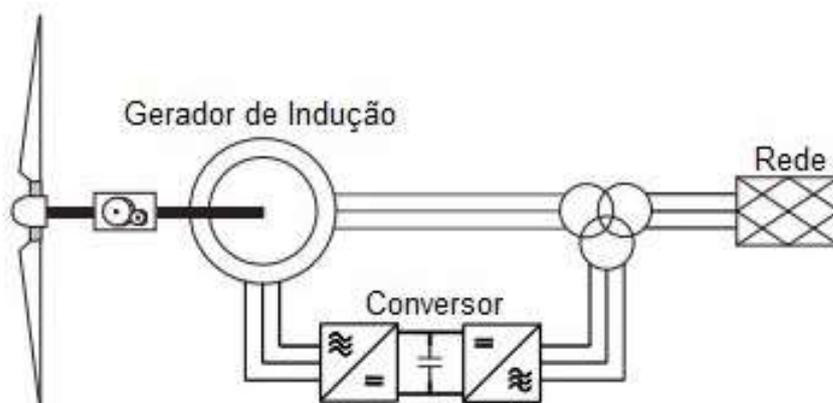
4.4.2.2 Gerador de indução com rotor de gaiola com inversor

Em relação à configuração anterior, o uso do gerador gaiola de esquilo tem como vantagem a utilização de um gerador mais robusto e barato, e que não necessita de excitação de campo. Seu controle de reativos é feito pelo conversor eletrônico de potência que acopla o estator do gerador à rede elétrica (FADIGAS, 2011).

4.4.2.3 Gerador de indução com rotor bobinado duplamente alimentado

Consiste de um sistema que utiliza um gerador de indução com rotor bobinado conectado à rede elétrica através de um conversor eletrônico de potência. A figura 20 mostra essa configuração.

Figura 20 – Gerador de indução duplamente alimentado.



Fonte: (BERNARDES, 2009).

Conforme descrito em Bernardes (2009), o conversor do rotor é projetado de maneira a limitar a faixa de velocidades de operação do gerador. A relação de transformação da caixa

multiplicadora é ajustada de forma que a velocidade síncrona do gerador não ultrapasse seus limites de operação, não excedendo sua potência nominal.

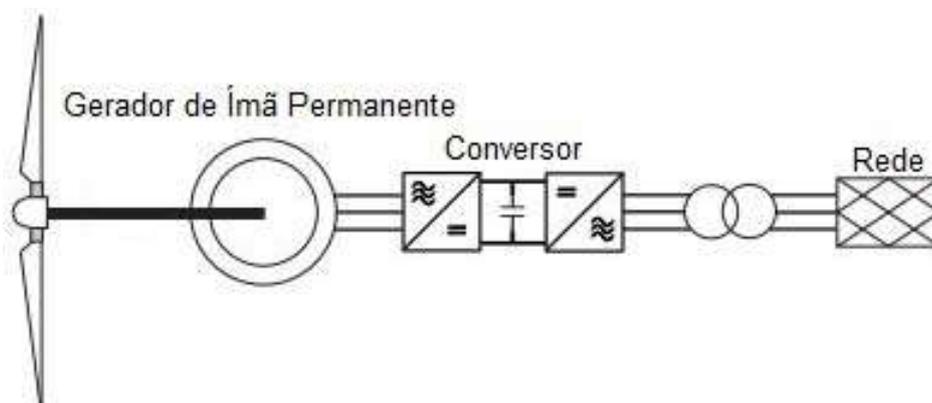
Quando o sistema atinge velocidade acima da nominal, o controle do ângulo de passo das pás se ajustam limitando a potência produzida. A frequência do inversor sobrepõe a do rotor, fazendo com que essa permaneça constante independente da velocidade do rotor.

O gerador duplamente alimentado combina algumas vantagens dos geradores síncronos e de indução pois, além da operação com velocidade variável, o sistema é capaz de controlar sua potência ativa e reativa. Outra grande vantagem é que como apenas um terço da potência nominal do gerador flui através do inversor pelo circuito do rotor, o inversor tende a ser menor e de menor custo, se comparado a sistema com rotor gaiola de esquilo.

4.4.2.4 Turbina com rotor acoplado diretamente no gerador elétrico

Segundo Fadigas (2011), para acionar um gerador elétrico diretamente do rotor eólico sem a utilização de sistema de transmissão, devido à sua baixa velocidade de rotação, o gerador requer um elevado número de polos para atingir a frequência da rede, resultando em dimensão e peso exorbitantes. A figura 21 apresenta um sistema com rotor acoplado diretamente no gerador elétrico para um gerador de ímã permanente.

Figura 21 – Gerador síncrono de ímã permanente.



Fonte: (BERNARDES, 2009).

Em geradores de pequeno porte, os ímãs permanentes são constantemente utilizados. Já em projetos de grande porte, o custo dos materiais magnéticos é mais caro em relação aos projetos convencionais.

Apesar da sua vantagem de não necessitar de fonte externa para excitação de campo, o gerador de ímã permanente não consegue controlar sua tensão de saída via frequência de excitação.

4.5 Análise comparativa

Conforme descrito ao longo deste capítulo, os aerogeradores de eixo horizontal e vertical possuem benefícios e inconveniências quanto à sua instalação e operação. É importante a realização de um estudo prévio do sistema mais propício a ser instalado em cada situação. A tabela 3 apresenta um comparativo entre os aerogeradores de eixo vertical e horizontal.

Tabela 3 – Comparativo entre aerogeradores de eixo vertical e horizontal

Parâmetro	Eixo Vertical	Eixo Horizontal
Perfil do vento	Bom funcionamento com ventos fracos e turbulentos	Necessita de ventos com velocidades mais constantes
Controle de posição	Não necessita	Necessita
Controle de potência	Utilizam Stall, com exceção do modelo Giromill (subtipo Darrieus), que utiliza modelo Pitch	Utiliza sistemas Stall e Pitch
Estrutura das torres	Demandam de cargas estruturais leves	Demandam de grandes estruturas
Motor de arranque	Necessita na grande maioria dos casos	Não necessita
Sensores de ventos	Utiliza somente anemômetro	Utiliza anemômetro e veleta
Ruído	Proporcional ao porte do aerogerador	Proporcional ao porte do aerogerador

Fonte: Do autor.

O relevo e os obstáculos contidos na região de instalação interferem diretamente na incidência dos ventos em uma turbina eólica. A grande perturbação causada nas correntes de ar em alturas próximas a superfície, principalmente devido à presença de edificações, faz com que o vento perca velocidade e mude repentinamente sua direção. Como em sistemas de eixo vertical as correntes de ar incidem na lateral das pás, esses modelos funcionam de maneira satisfatória com pouco vento. Já os sistemas de eixo horizontal, devido à necessidade de ventos constantes, são amplamente favoráveis a serem utilizados em áreas de pequena interferência de obstáculos.

Com exceção da orientação do eixo, a maior diferença entre os aerogeradores é a utilização de mecanismos de direcionamento do rotor. No caso dos rotores de eixo horizontal, além do custo de implantação do mecanismo, a fadiga originada pela rotação do mesmo provoca custos de operação e manutenção. Já nos sistemas de eixo vertical, esse sistema é dispensado, uma vez que a captação das correntes de ar é feita independente de sua direção.

Quanto ao controle de potência, nos aerogeradores de eixo horizontal são utilizados sistemas de frenagem por *Stall* e *Pitch*, onde o controle da velocidade do rotor é feito através da atenuação da força exercida nas pás causada por turbulências do vento e alteração do ângulo das pás, respectivamente. Apesar das turbinas de eixo vertical possuírem maior simplicidade quanto ao aproveitamento dos ventos, em sua grande maioria, dependem de motores de arranque para a partida do rotor. Alguns modelos, como o aerogerador Giromill, um subtipo de turbina Darrieus que possui lâminas retas em vez de curvas, apresenta passo variável para controlar sua rotação, semelhante ao sistema *Pitch*, conforme Corrêa (2017).

No que diz respeito às estruturas das torres, devido ao posicionamento da nacelle na base dos aerogeradores de eixo vertical, suas torres demandam menores cargas estruturais, tornando-as mais leves e baratas. Com isso, os geradores utilizados podem ser projetados com foco apenas em sua eficiência. Já nos sistemas de eixo horizontal, o tamanho e o peso do gerador são fatores determinantes para o dimensionamento da estrutura das torres e são rigorosamente analisados devido à necessidade de uma fundação mais extensiva para a sustentação na altura do cubo gerador.

Quanto ao nível de ruído gerado pelos aerogeradores, conforme Gomes et al. (2017) geralmente esse é originado mecânica e aerodinamicamente. O ruído mecânico é gerado pelo atrito de rolamentos e engrenagens, embora alguns modelos mais modernos apresentem dispositivos que realizam o amortecimento de vibrações para atenuar esse ruído, enquanto que o ruído aerodinâmico é causado pela interação entre a superfície de sustentação das pás com a turbulência criada pela ação do vento. Nesse caso, quanto maior a área do cubo gerador, mais evidente é o ruído.

Com relação ao acoplamento entre rotores e geradores, os sistemas podem ser de velocidade fixa ou variável. A tabela 4 apresenta uma comparação entre os tipos de acoplamentos entre os geradores e a rede.

Tabela 4 – Comparativo entre acopladores dos aerogeradores

Parâmetro	Velocidade Fixa	Velocidade Variável
Acoplamento	Estator conectado diretamente à rede elétrica	Utiliza conversores na conexão entre gerador e rede
Aproveitamento do vento	Desperdiçam boa parte do vento	Aproveita uma faixa maior de velocidade do vento
Rendimento	Bom desempenho apenas para velocidades próximas a velocidade síncrona	Bom desempenho para ampla faixa de velocidades
Tecnologia	Simple	Complexa

Fonte: Do autor.

Nos sistemas de velocidade fixa, a velocidade da turbina é fixada pela frequência

da rede elétrica, relação de transmissão e número de polos do gerador. Isso faz com que o sistema não apresente bom rendimento para ventos variáveis, desperdiçando boa parte do vento. Já os sistemas de velocidade variável utilizam inversores de frequência ou rotor duplamente alimentado. Nesses sistemas a tensão gerada tem sua frequência adequada à rede antes de sua transmissão, permitindo aproveitamento de uma faixa maior de velocidades do vento.

Em relação ao rendimento, os aerogeradores de eixo horizontal apresentam valores muito mais satisfatórios que os de eixo vertical. Isso se deve ao fato da incidência do vento no cubo gerador dos modelos de eixo horizontal ser feita de forma perpendicular. No caso das turbinas de eixo vertical, devido ao movimento de rotação provocar alterações constantes nos ângulos de ataque e deslocamento, forças alternadas resultantes são geradas, limitando seu rendimento.

De modo geral, os aerogeradores de eixo vertical apresentam maiores vantagens na utilização em edificações nas áreas urbanas, devido à sua facilidade de instalação, proximidade ao solo, pouco espaço ocupado e melhor comportamento em condições de ventos turbulentos, enquanto que a utilização de aerogeradores de eixo horizontal é mais propícia em sistemas mais robustos, principalmente devido a alcançarem rendimentos maiores que os modelos de eixo vertical e apresentarem menores esforços mecânicos.

5 Análise política e social da geração eólica

A inserção de novos parques eólicos, além do aspecto ambiental, possui importantes impactos a serem investigados, como o político e social. É essencial que sejam avaliados os impactos gerados por esse rápido crescimento do setor eólico sobre a economia brasileira, principalmente em relação à potencial geração de empregos e desenvolvimento das sociedades vizinhas aos parques, de modo a oferecer uma base para amparar a formulação e gestão de políticas energéticas e industriais para o setor eólico e examinar sua possível contribuição para o desenvolvimento sustentável.

Esse capítulo irá apresentar alguns aspectos políticos e sociais do desenvolvimento da geração eólica e, posteriormente, realizar uma análise crítica sobre os impactos observados.

5.1 Aspectos políticos

Diferentes políticas têm sido colocadas em prática em vários países para encorajar o desenvolvimento comercial da energia eólica, bem como outras fontes renováveis de energia. Em geral, o desenvolvimento da energia eólica pode ser estimulado através de uma variedade de incentivos.

As políticas de incentivos direcionadas ao setor eólico devem incluir a indústria eólica, uma vez que o desenvolvimento desta possui influência direta na redução dos custos de investimentos em projetos eólicos, além de produzir emprego e renda para o país que os incentiva.

No caso da China, maior produtor de energia eólica do mundo, o país deu início ao seu agressivo plano de expansão em 2006, principalmente devido à grande emissão de gases estufa, quando estipulou metas de participação de energias renováveis na matriz energética total visando atingir uma taxa de 20% até 2020, conforme Araia (2010). Além de incentivos fiscais, empresas nacionais foram implantadas para suprir a necessidade de equipamentos a serem instalados, porém como o fator de capacidade das turbinas chinesas foi inferior às turbinas estrangeiras, o governo incentivou a instalação de empresas internacionais a fim de obter uma transferência de tecnologia para a fabricação nacional. Com isso, a China desenvolveu sua indústria nacional e atualmente destaca-se em possuir algumas das maiores fabricantes de aerogeradores do mundo (SAKAMOTO, 2017).

Já nos Estados Unidos, segundo maior produtor, conforme Lage e Processi (2013), os investimentos têm sido feitos no setor em função de incentivos fiscais (Crédito Fiscal de Produção - PTC), e subvenções econômicas (Crédito Fiscal de Investimento - ITC) de curto prazo, permitindo que proprietários de projetos de energia eólica reduzissem suas bases de cálculo do montante investido, sendo periodicamente prorrogados, sem uma política de longo prazo para incentivo de energias renováveis.

No contexto brasileiro, sabe-se que a crise energética em 2001 foi um ponto crucial para o crescimento da energia eólica no país. Conforme Loureiro, Gorayeb e Brannstrom (2017), o incremento do consumo energético entre os anos de 1990 e 2000 foi de 49%, e com o constante aumento dessa demanda, criou-se uma urgência política para desenvolver outras fontes energéticas além da hidroeletricidade.

5.1.1 Políticas públicas

Conforme descrito em Silva (2003), alguns projetos de lei deram um importante incentivo para a implantação da energia eólica no Brasil, que até 2001 contava com capacidade de geração de apenas 22 MW. Dentre os principais projetos de lei podem-se destacar:

- PRODEENE (2001) - Programa Prioritário de Desenvolvimento da Energia Eólica do Nordeste: visa permitir o aproveitamento dos potenciais eólicos da região nordeste para ampliar a produção de energia elétrica no país. As premissas do programa eram:
 - as despesas geradas pelos projetos de prospecção e identificação das áreas de potencial eólico era isenta de impostos;
 - as concessionárias e empresas comercializadoras de energia tinham obrigatoriedade de compra da energia gerada por centrais eólicas;
 - criação de uma linha de crédito através do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) destinada ao financiamento de até 90% do valor de implantação da central eólica, pelo prazo de doze anos.
- PROEÓLICA (2001) - Programa Emergencial de Energia Eólica:
 - viabilizar a implantação de 1,05 GW em geração eólica até dezembro de 2003;
 - contratos entre a ELETROBRAS e produtores independentes por um período de 15 anos;
 - promover a complementaridade sazonal com a geração hidrelétrica;
 - isenção de tarifas de transmissão da energia.
- PROINFA (2002) - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas: o programa foi criado com o objetivo de aumentar a participação das fontes renováveis na produção da energia elétrica, estabelecendo a meta de 10% da matriz energética total até 2022, privilegiando empreendimentos de produtores independentes autônomos (ANEEL, 2017).

Com a implantação do PROINFA, foram definidos preços diferenciados e mais atrativos para a contratação de energia eólica e outras fontes renováveis. A partir de

2007 foram realizados leilões de energia específicos destinando uma parcela do mercado para a contratação da fonte eólica, o Leilão de Fontes Alternativas (LFA), instituído com o objetivo de atender o crescimento do mercado e aumentar a participação de fontes renováveis, e o Leilão de Energia de Reserva (LER), criado para elevar a segurança no fornecimento de energia elétrica ao Sistema Interligado Nacional (SIN), com usinas contratadas especialmente para essa finalidade (CCEE, 2017).

O LER é uma ferramenta importante para se obter tarifas mais baratas. Apesar de sua contratação levar à elevação do encargo de energia de reserva, ela pode funcionar como um seguro, na medida em que é reduzida a probabilidade de acionamento de usinas termelétricas, que possuem preços mais elevados. Dessa maneira, em períodos de nível desfavorável de reservatórios hídricos, o encargo de energia de reserva pode se tornar uma opção muito mais interessante economicamente que as bandeiras amarela ou vermelha decorrente do acionamento das termelétricas.

5.1.2 Políticas industriais

Segundo Neto e Vieira (2009), nas grandes usinas eólicas, os aerogeradores representam aproximadamente 60% do valor total investido, sendo que o restante dos custos são referentes ao terreno, interconexões, instalação, fundação e construção. Esse é um indício do quanto é importante a instalação de fábricas nacionais de aerogeradores, também chamadas de montadoras, uma vez que em alguns casos recebem componentes fabricados por outras empresas e realizam apenas sua integração. A formação de uma indústria sustentável de energia eólica requer uma estrutura política, legal e econômica favorável. Para promover esse ambiente, deve haver uma cooperação entre os setores público e privado para garantir que as necessidades de todos os participantes sejam satisfeitas.

No Brasil, em um passado recente, praticamente todas as nacelles e cubos geradores eram importados. Conforme ABDI (2014), os critérios do BNDES para fornecer financiamento de máquinas e equipamentos exigia um mínimo de 60% de conteúdo local. Em dezembro de 2012, o BNDES aprovou uma metodologia específica para credenciar e verificar o conteúdo local de aerogeradores, determinando metas físicas, a serem cumpridas pelas montadoras em etapas estabelecidas previamente por um cronograma. Essa metodologia visa aumentar de forma gradativa o conteúdo local dos aerogeradores, por meio de fabricação nacional dos componentes.

Quanto às torres, anteriormente eram adquiridas preferencialmente por fabricantes locais ou em unidades próprias das montadoras. Segundo novo regulamento, o BNDES passou a exigir mínimo de 70% do peso das chapas de aço ou concreto armado de origem nacional.

Já para a produção das pás, a nova regra exige um índice de nacionalização da produção crescente. A partir de janeiro de 2014 era exigido mínimo de 40% do peso, alcançando 60% em janeiro de 2015.

5.2 Aspectos sociais

Qualquer desenvolvimento de negócios em uma região possui efeitos diretos e indiretos na sociedade local e regional. Um novo projeto eólico afeta diretamente a região em seu entorno, através da comercialização de mercadorias e serviços, geração de renda sobre o uso da terra, empregos e receita para governos locais oriundos de impostos. Dentre os efeitos indiretos se incluem o aumento do poder de compra, utilização de recursos nativos e diversificação econômica (NETO; VIEIRA, 2009).

A instalação de um sistema eólico fornece renda extra a seus proprietários proveniente de arrendamento e contratos de royalty. Segundo Neto e Vieira (2009), geralmente as turbinas eólicas ocupam aproximadamente 4% das áreas requeridas para seu projeto, permitindo que seu uso anterior (criação ou plantação) continue juntamente com as instalações de energia eólica.

O pagamento de impostos também tem impactos significantes sobre a comunidade, pois essa receita é usada para variados propósitos de apoio social, como hospitais, escolas, estradas, lazer e segurança.

Conforme Traldi (2017), em nível local, a geração de empregos é dada em duas etapas distintas. Na primeira, ao longo da construção dos parques, os empregos são numerosos, porém temporários. Já a segunda etapa, com os parques em operação, o número de empregos são menos numerosos, porém permanentes.

As oportunidades de emprego associadas a uma usina eólica estão na fabricação, construção, operação e manutenção.

- Emprego na fabricação: corresponde a mão-de-obra utilizada na produção dos componentes das turbinas. O número de empregos industriais criados dependerá diretamente da capacidade industrial do país, dos incentivos fornecidos e do tamanho do mercado. No caso brasileiro, essas vagas estão tanto nas indústrias montadoras de aerogeradores, quanto na fabricação de torres e pás.
- Emprego na construção: esse tipo de emprego normalmente implica em médio e longo prazo, na construção e instalação dos aerogeradores. Essa etapa compreende a abertura de vias de acesso, construção das bases dos aerogeradores, subestações e linhas de transmissão. Segundo Traldi (2017), esse período dura entre um e dois anos, variando de acordo com a dificuldade e tamanho do parque, e envolve terraplanagem, fundação e preparação do terreno, ofertando grande número de empregos temporários.
- Emprego na operação e manutenção: o número de pessoas empregadas durante a operação depende principalmente da dimensão do parque eólico e de sua estrutura administrativa. Segundo Neto e Vieira (2009), pequenos parques com menos de 10 aerogeradores normalmente tem sua operação remota e a equipe de manutenção é levada somente quando necessário. Já os projetos maiores possuem equipe de

funcionários mantida em tempo integral, porém devido à estrutura relativamente simples dos parques, as equipes de operação e manutenção são bem reduzidas.

Além das vagas ofertadas diretamente relacionadas à geração de energia elétrica, há também a criação de novas atividades de forma indireta. A construção e operação de usinas eólicas resultam no crescimento do comércio local com suprimentos essenciais como comida e vestuário. Com isso, surgem outras necessidades em uma reação em cadeia, como serviço contábil, bancos, lazer, dentre outros.

Outros impactos sociais gerados por esse desenvolvimento são na cultura e costumes locais, pois a adição de mão-de-obra qualificada de fora do local pode trazer atitudes e práticas sociais diferentes.

5.3 Análise comparativa

O desenvolvimento da energia eólica no Brasil iniciou-se por meio dos programas citados anteriormente, com destaque para o PROINFA, que visava estimular a geração de eletricidade em curto e longo prazo. Porém um novo modelo foi adotado, passando a comercialização da energia eólica por meio de negociações em ambientes de contratação livre e regulada. Esse modelo de leilões trouxe grandes benefícios e também algumas dificuldades ao setor eólico.

Conforme ABDI (2014), os leilões regulares realizados entre 2009 e 2011 foram fundamentais para o desenvolvimento da geração eólica, pois com uma demanda de geração previsível associada à oferta de crédito com taxas atrativas e a imposição de conteúdo local para sua liberação, ocorreu um processo de estruturação relevante no setor eólico nacional. Porém, em 2012 houve uma redução da demanda, e conseqüentemente do custo de contratação, causando inviabilidade econômica dos parques contratados, trazendo insegurança ao mercado. Essa oscilação de demanda prejudicou o desenvolvimento da cadeia produtiva. A falta de regularidade das contratações acarretaram no recuo de investimentos na implantação de novas fábricas.

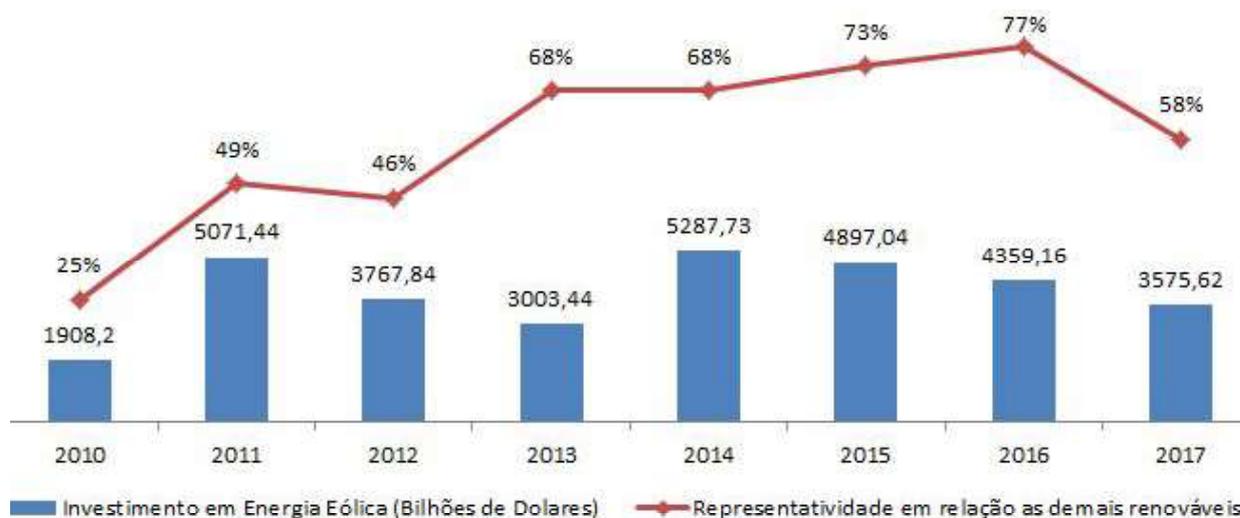
Em 2013, segundo dados de Abeeólica (2013), a fonte eólica conseguiu sua maior contratação em leilões regulados, ao negociar 4,7 GW para serem instalados até 2018. A partir de 2013, foram realizados sucessivos leilões de reserva que possibilitaram uma expressiva expansão no setor, com exceção de 2016, pois a recessão causada por crises políticas inibiu investimentos, resultando na queda da demanda por energia justamente no momento em que questões relacionadas ao baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas entravam novamente em pauta.

Este cenário certamente seria ainda mais crítico se o Brasil não tivesse diversificado sua matriz energética, com grande destaque para a ampliação da oferta de energia eólica. Um ponto importante em relação a essa ampliação é a segurança dada ao subsistema

nordeste que atualmente consegue se auto sustentar e ainda exportar para outras regiões em alguns momentos.

Conforme os dados apresentados na figura 22, o Brasil investiu majoritariamente em energia eólica quando comparado às demais gerações de energias renováveis. Considerando o período entre 2010 e 2017, esse valor corresponde a aproximadamente 32 bilhões de dólares.

Figura 22 – Investimento em energia eólica em relação às demais renováveis.



Fonte: Adaptado de (ABEEÓLICA, 2017c).

A análise do gráfico apresentado na figura 22 mostra que ao longo dos últimos anos o Brasil deu grande foco ao desenvolvimento de seu sistema de geração de eletricidade por meio de fonte eólica se comparado às demais energias renováveis. Como pode-se observar, esse investimento partiu de um quarto de todo o investimento nacional em energias renováveis em 2010, elevando para quase metade do valor total nos dois anos seguintes e, a partir de 2013, predominando na distribuição dos investimentos. O motivo da queda percentual do investimento de 2017 em relação aos 4 anos anteriores se deve à baixa contratação nos leilões de 2015 e contratação zerada em 2016.

A retomada dos leilões em 2017 foi de extrema importância para o Brasil, uma vez que a cadeia produtiva é 80% nacionalizada, conforme Abeeólica (2017c), garantindo a sobrevivência da indústria e, conseqüentemente, gerando emprego e renda.

A contribuição da fonte eólica para o Brasil não restringe apenas à esfera energética, os ganhos sociais para a população são significativos, desde a contribuição para a permanência do homem no campo, como o aumento da oferta de empregos e renda por meio de arrendamentos de terras. Porém, todo esse crescimento gera também distúrbios nas regiões de implantação.

Os parques eólicos geralmente são instalados em áreas rurais e trazem diversos benefícios para a comunidade que, na maioria das vezes, possui característica socioeconômica

carente. O desenvolvimento econômico adiciona aspectos qualitativos como a diversificação da economia regional, capacitação da mão-de-obra, aumento do PIB municipal e estadual, arrecadação de impostos, melhoria da infraestrutura, educação e, conseqüentemente, da qualidade de vida. Em contrapartida, o rápido acréscimo do número de habitantes nas regiões de implantação dos parques, principalmente de trabalhadores temporários em fase de construção e instalação, trás consigo algumas desvantagens como problemas na segurança e conflitos de costumes e cultura locais.

Segundo as pesquisas apresentadas em Dantas et al. (2016) e Rintzel (2017) onde foram entrevistados moradores do Rio Grande do Norte e Ceará, foram citados os seguintes pontos positivos e negativos conforme descrito na tabela 5.

Tabela 5 – Pontos positivos e negativos da implantação dos parques eólicos no Nordeste brasileiro.

Parâmetro	Pontos Positivos	Pontos Negativos
Emprego	Criação de vagas diretas e indiretas	Descontrole da vinda de trabalhadores de outras regiões
Arrecadação	Ampliação da arrecadação de impostos e aumento do PIB municipal e estadual	Muitas famílias encerraram suas atividades agrícolas devido a renda dos arrendamentos
Renda local	Locação de terras, ampliação do comércio local e serviços	Não abrangiu a todos e causou a elevação do preço de gêneros de primeira necessidade
Infra-estrutura	Melhorias em estradas, criação de cursos de qualificação, entre outros	Sobrecarga de sistemas públicos, principalmente saúde e segurança

Fonte: Adaptado de Dantas et al. (2016) e Rintzel (2017).

Diversas vagas de emprego foram geradas diretamente para atender as demandas de instalação e operação das usinas e, além disso, houve crescimento relevante do comércio local, com a chegada de novos produtos, e aumento da oferta de serviços até então escassos na região, estimulando principalmente pequenas e médias empresas.

Com relação à infraestrutura, foram realizadas melhorias nas estradas para receber os aerogeradores e criados cursos de qualificação para o desenvolvimento profissional da população, buscando aperfeiçoamento técnico para atender à nova demanda de serviços, concentrada principalmente na operação e manutenção das usinas.

A elevada alteração demográfica da região em curto espaço de tempo, que ocorre majoritariamente durante a construção e instalação do parque eólico, gerou uma sobrecarga nos serviços públicos, como o aumento da demanda nos hospitais, e principalmente problemas referentes à segurança, elevando expressivamente a incidência de drogas, roubos e prostituição.

Quanto à agricultura, houve um desequilíbrio na região, enquanto alguns proprietários de terras arrendadas vêm utilizando seus aluguéis para investir na produção agrícola e em suas propriedades, devido à seca e presença de pragas, muitas famílias da região encerraram suas atividades, prejudicando a produção.

De modo geral, a implantação dos parques influencia a sociedade local em diversos aspectos. A energia eólica configura-se como gerador de oportunidades para regiões geralmente precárias econômica e socialmente, apresentando muito mais benefícios que malefícios. Porém, se faz necessário maior participação do poder público controlando e buscando minimizar os aspectos negativos trazidos pela chegada das usinas proporcionando desenvolvimento sólido e bem estar da população.

6 Conclusão e considerações finais

O presente trabalho buscou, a partir de um estudo técnico avaliativo de aerogeradores, apresentar os tipos de equipamentos disponíveis e os impactos político-sociais causados por sua implantação.

Conforme descrito ao longo do trabalho, diversos fatores são analisados antes de um projetista escolher qual o melhor modelo a ser utilizado em seu projeto eólico. A localização, altura, perfil do vento, variabilidade das correntes de ar, obstáculos nas proximidades de instalação, entre outros, são fatores determinantes e devem ser minuciosamente analisados. É bom salientar que ambos os modelos podem ser utilizados nos mais variados cenários, porém uma escolha adequada de configuração de eixo, gerador e demais componentes utilizados definirá o rendimento do sistema diante do recurso eólico disponível.

O perfil do vento se altera verticalmente devido às perturbações geradas por obstáculos presentes na superfície. A presença de estruturas em zonas urbanas faz com que o potencial eólico seja oscilatório. Essa perturbação age de forma a desacelerar as correntes de ar e causar efeitos de separação do escoamento e turbulências elevadas no entorno e acima dos edifícios. Nesse caso, conclui-se que a turbina eólica de eixo vertical é a melhor opção para esse cenário, pois este sistema, além de apresentar melhor aproveitamento de ventos turbulentos, é capaz de captar ventos de todas as direções e possui estrutura de fácil instalação e manutenção, o que torna viável para áreas urbanas.

Em áreas com menor influência de barreiras, como zonas rurais e litorâneas, em que o ar escoar de forma mais uniforme e com maior velocidade, tanto os modelos de eixo vertical quanto horizontal podem ser utilizados, sendo a turbina de eixo horizontal mais propícia, principalmente pelo fato de possuir maior rendimento.

Em relação ao aspecto político-social, a crise energética vivenciada no início dos anos 2000 foi o estopim para que o Brasil traçasse novos planos de expansão de suas fontes alternativas de energia. O país apresenta um cenário muito favorável ao aproveitamento das mais variadas fontes renováveis, com exceção da tão explorada fonte hídrica que já não possui mais capacidade de instalação de novos grandes projetos. Com isso, diversas políticas de incentivo foram criadas para fomentar o desenvolvimento de usinas oriundas de fontes alternativas de energia, dentre elas, a eólica.

Alguns programas foram criados pelo governo para estimular a geração da eletricidade à partir de fontes renováveis em curto e longo prazo, tendo o PROINFA como maior destaque. Indústrias estrangeiras foram trazidas para realizar a montagem dos aerogeradores. Posteriormente, o BNDES passou a exigir um conteúdo mínimo de componentes de origem brasileira, a fim de estimular a produção nacional, aumentando essa participação gradativamente. Isso fez com que empresas fossem criadas e outras expandidas para o suprimento dessa demanda. Alguns anos mais tarde, o PROINFA foi substituído pelo

modelo de leilões de concessão de produção acordados em ambiente regulado, utilizado atualmente, aumentando a segurança do fornecimento de energia.

O desenvolvimento da energia eólica no Brasil gerou impactos econômicos, políticos e sociais consideráveis nas sociedades que vivem próximas aos parques implantados e, devido aos projetos tenderem a ser localizados em áreas rurais, os impactos são mais evidentes que em áreas urbanas. A região Nordeste foi a mais impactada positiva e negativamente. A geração de empregos diretos e indiretos representa o principal benefício observado. Muitas oportunidades foram geradas associadas à construção, operação e manutenção dos parques, e além disso, diversas novas demandas foram criadas para suprir as novas necessidades bem como infra-estrutura, saúde, educação, comércio e serviços. Porém, a falta de mão-de-obra qualificada regional fez com que muitos trabalhadores de outras regiões migrassem para essas proximidades alterando seu perfil sócio-cultural, trazendo atitudes, normas e práticas sociais diferentes, e principalmente, inflando os serviços públicos que em sua grande maioria não foram preparados para atender a ampliação do número de usuários. Com isso, além de piorar ainda mais sistemas já precários, como saúde e educação, grandes problemas relacionados à segurança pública foram identificados.

Uma sugestão para atenuar os problemas vivenciados pelas sociedades próximas aos parques é um acompanhamento mais próximo dos governos acerca das alterações ocorridas nessas localidades, com relação às sobrecargas sofridas, e incluir nos planos de expansão da energia eólica medidas de adequação das áreas de implantação de novos parques para que o desenvolvimento dessas regiões se dê de maneira organizada.

Em relação a nacionalização da fabricação de aerogeradores, por mais que o Brasil tenha elevado essa taxa ao longo dos anos, são necessários maiores investimentos e incentivos fiscais para a ampliação da indústria eólica, seguindo o exemplo da China, que importou tecnologia durante anos sempre focada na transferência de conhecimento para a fabricação nacional, e hoje possui três das maiores montadoras de aerogeradores do mundo. Esse amadurecimento da indústria, além de reduzir o custo de implantação dos sistemas brasileiros, surge como mais uma possibilidade de exportação para o país e reduz também a dependência da tecnologia em relação ao câmbio.

No que diz respeito ao cenário brasileiro, devido principalmente à sua grande extensão litorânea, a expansão dos parques eólicos onshore nessas regiões representam a melhor alternativa para ampliação dessa fonte na matriz energética nacional.

Outro sistema que pode ser muito promissor no país é a instalação de sistemas de eixo vertical em ambientes urbanos na complementariedade da energia demandada nas residências e prédios comerciais, assim como os painéis fotovoltaicos, que vem ganhando mercado cada vez mais expressivo.

Referências

- ABDI. *Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil*. [S.l.], 2014. 39, 41
- ABEEÓLICA. *Relatório Anual da ABEEL 2013*. [S.l.], 2013. 15, 41
- ABEEÓLICA. *Boletim Anual de Geração Eólica 2016*. [S.l.], 2016. 15, 22
- ABEEÓLICA. *Dados Mensais - Agosto de 2017*. 2017. Associação Brasileira de Energia Eólica. 15
- ABEEÓLICA. *Dados Mensais - Dezembro de 2017*. 2017. Associação Brasileira de Energia Eólica. 4
- ABEEÓLICA. *Relatório Anual da ABEEL 2017*. [S.l.], 2017. 42
- ABEEÓLICA. *Dados Mensais - Fevereiro de 2018*. 2018. Associação Brasileira de Energia Eólica. 1, 15, 16, 17
- ABEEÓLICA. *InfoVento*. 2018. Associação Brasileira de Energia Eólica. 15
- ANEEL. *Programa de Incentivo às Fontes de Energia*. 2017. Agência Nacional de Energia Elétrica. 38
- ARAIA, E. Planeta. China, o poluidor-mor se torna líder das energias renováveis. 2010. 37
- ARQUITETURA, P. . (Ed.). *Lentes eólicas poderão triplicar a eficiência dos parques offshore*. [S.l.: s.n.], 2014. 52
- ASSOCIATION, E. W. E. et al. *Wind energy-the facts: a guide to the technology, economics and future of wind power*. [S.l.]: Routledge, 2012. 10, 11
- BATISTA, N. A. M. d. C. Novo aerogerador de eixo vertical integrado numa rede inteligente em contexto urbano. Universidade de Évora, 2013. 19, 20
- BERNARDES, T. A. Análise e controle de gerador síncrono a ímã permanente aplicado a sistema de conversão de energia eólica. *Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Dissertação de Mestrado*, 2009. 30, 31, 32, 33
- BRITO, S. de S. Energia eólica: princípios e aplicações. *Rio de Janeiro*, 2010. 23, 24, 25
- BURTON, T. et al. *Wind energy handbook*. 2001. ISBN: 0-471-48997-2, 2014. 11
- CASER, E. S.; PAIVA, G. da M. *Projeto Aerodinâmico de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical para Ambientes Urbanos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2016. 52
- CASSARO, P. M. et al. Evolução da capacidade instalada proveniente de recursos eólicos: Previsto versus realizado. *X AGRENER*, 2015. 15
- CCEE. *Tipos de Leilões*. 2017. Camara de Comercialização de Energia Elétrica. 39
- CEPEL, E. Tipos de aerogeradores para geração de energia elétrica. Rotores de Eixo Vertical. 2008. 20, 21

- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. 28
- CORRÊA, F. D. S. Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal para região litorânea do estado do rio de janeiro. 2017. 24, 35
- COSTA, H. M. da. Reposição de serviços em sistemas com produção eólica onshore e offshore com ligação dc. 2013. 14
- CUNHA, T. P. e. *Portugal eo mar: à redescoberta da geografia*. [S.l.]: Fundação Francisco Manuel dos Santos, 2016. 50
- DANTAS, A. L. F. et al. O impacto da energia eólica na geração de emprego e renda: Um estudo de caso no parque eólico da microrregião da serra de santana/rn. In: *ADM2016*. [S.l.: s.n.], 2016. 43
- EÓLICA, C. B. de E. Disponibilidade da energia eólica no brasil. 2007. 13
- FADIGAS, E. A. F. A. *Energia Eólica*. [S.l.]: Editora Manole, 2011. 1, 3, 4, 5, 8, 9, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33
- FERREIRA, J. C. de C. *Aplicação do Controle Vetorial e Teoria pq no controle de Aerogeradores Conectados a rede elétrica*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2005. 19
- FITZGERALD, A. et al. Tradução anatólio laschuk—. *Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência*. 6ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 27, 28
- FRAGA, G. C. Análise numérica do efeito de bloqueio no escoamento sobre uma turbina savonius em túnel aerodinâmico. 2013. 20
- GABRIEL, L. R. A. et al. Caracterização analítica e geométrica da metodologia geral de determinação de distribuições de weibull para o regime eólico e suas aplicações. *Engenharia Agrícola*, Associação Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), p. 56–66, 2011. 10
- GOMES, L. R. T. C. et al. Avaliação de ruídos em aerogeradores situados no complexo eólico serra azul-ba. Universidade Católica do Salvador, 2017. 35
- GRANGEIRO, P. A. H. G. *O Potencial de geração de energia elétrica de fonte eólica onshore e offshore no Estado do Ceará: uma análise financeira, social e ambiental*. Tese (Doutorado), 2012. 14
- HORTA, R. P. O. A. *Energias renováveis*. Tese (Doutorado), 2017. 51
- JERVELL, J. T. et al. Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores. 2012. 7, 8, 11, 26
- LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. Panorama do setor de energia eólica. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, n. 39, p. 183–205, 2013. 37
- LEITE, A. P. Modelagem de fazendas eólicas para estudos de confiabilidade. *Rio de Janeiro*, 2005. 19, 23, 27

- LEITE, M. de L.; FILHO, J. S. das V. Avaliação da distribuição beta como modelo probabilístico para análise de dados de velocidade do vento para ponta grossa-pr. *Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias*, v. 13, n. 01, 2007. 10
- LOUREIRO, C. V.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Análise comparativa de políticas de implantação e resultados sociais da energia eólica no Brasil e nos Estados Unidos. *Raega-O Espaço Geográfico em Análise*, v. 40, p. 231–247, 2017. 38
- MARQUES, J. Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação. *Santa Maria: UFSM*, 2004. 26
- MARTINS, F.; GUARNIERI, R.; PEREIRA, E. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física, SciELO Brasil*, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008. 1
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. [S.l.]: Oficina de textos, 2017. 6
- NETO, J. A. R. G.; VIEIRA, R. *Energia Eólica - Atração de investimentos no estado do Ceará*. [S.l.], 2009. 39, 40
- PESSANHA, J. F. M. et al. *Centro*, v. 3, p. 1, 2009. 11, 12
- PINTO, M. de O. O estado da arte da disposição de turbinas eólicas. 2014. 12
- REIS, L. B. d.; FADIGAS, E. A. F. A.; CARVALHO, C. E. Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável. In: *Série Ambiental*. [S.l.]: Manole, 2005. 21
- REIS, L. B. dos. *Geração de energia elétrica*. [S.l.]: Editora Manole, 2015. 14, 19
- RINTZEL, L. T. Análise dos impactos econômicos decorrentes da instalação dos parques eólicos nos municípios brasileiros. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2017. 43
- ROSA, M. Ciclo vivo. Escócia terá a primeira usina eólica flutuante do mundo. 2017. 51
- ROSAS, P. A. C.; ESTANQUEIRO, A. I.; PEREIRA, A. de L. Guia de projeto elétrico de centrais eólicas. *EAF d. L. Pereira;(Ed.)*, v. 1, 2003. 29
- SAKAMOTO, C. China link. Energias Renováveis e o investimento chinês. 2017. 37
- SILVA, G. R. Características de vento da região nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas. Universidade Federal de Pernambuco, 2003. 6, 7, 38
- TRALDI, M. Implantação de parques eólicos no semiárido brasileiro e a promessa da geração de empregos. *Bahia Análise & Dados*, v. 27, n. 1, p. 174–202, 2017. 40
- TREACY, M. (Ed.). *The Netherlands opens massive offshore wind farm*. [S.l.: s.n.], 2017. 15
- WAGNER, S.; BAREISS, R.; GUIDATI, G. *Wind turbine noise*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. 8
- WENZEL, G. M. Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal. *Revista da Graduação*, v. 1, n. 1, 2008. 22, 23

Anexos

Tecnologias em desenvolvimento

Parques offshore flutuantes

A energia eólica offshore vem crescendo rapidamente nas últimas décadas, porém sua aplicação era limitada às regiões onde a profundidade do mar é relativamente superficial, havendo facilidade da construção de fundações para suas turbinas.

Segundo Cunha (2016), atualmente existem grandes companhias de eletricidade e empresas tecnológicas desenvolvendo turbinas offshore flutuantes. Estas turbinas possibilitam expandir os grandes parques eólicos offshore para zonas de maior profundidade. Além disso, devido a ausência de fixação permanente no fundo do mar, essas turbinas vão se firmar como a tecnologia que menos impactos ambientais provocam no meio marinho. A figura 23 apresenta alguns modelos de implantação de sistemas offshore flutuantes.

Figura 23 – Sistema offshore flutuante.



Fonte: (CUNHA, 2016).

Esses sistemas vêm sendo amplamente desenvolvidos na Europa. O vasto conheci-

mento técnico adquirido e consolidado no desenvolvimento de projetos eólicos onshore, fizeram da Europa um continente com maturidade e sabedoria suficientes para investir na propagação de projetos eólicos offshore. A crescente demanda europeia e elevado potencial eólico offshore aliados à limitação de espaços disponíveis em terra, motivou a Europa a apostar nesse sistema.

Conforme Rosa (2017), os parques eólicos flutuantes são ancorados de maneira que eles flutuem com estabilidade em vez de serem fixados no fundo do mar, e a transmissão da energia gerada é feita através de linhas de transmissão subaquáticas. Assim, esses parques poderão ser utilizados em águas mais profundas onde as condições dos ventos são mais favoráveis sem interferir na paisagem do litoral e em rotas de migrações de aves. Apesar da produção das fundações serem mais caras, são muito mais fáceis de serem instaladas, e como elas serão desenvolvidas em larga escala, poderão ter seus custos reduzidos, o que representa outro ponto favorável às suas instalações.

O primeiro parque eólico offshore flutuante a entrar em atividade no mundo foi o "Hywind Scotland", em operação desde o fim de 2017, situado à 25 km da costa de Peterhead, na Escócia, e ocupa uma área de 4 km², com profundidade entre 95 e 120 metros (ROSA, 2017).

Outros países almejam o desenvolvimento desse sistema, principalmente devido às suas pequenas extensões territoriais. Conforme Horta (2017), Portugal tem demonstrado a existência de um enorme potencial eólico e condições favoráveis para o desenvolvimento de parques eólicos offshore flutuantes, o que motivou o país à criação do projeto WindFloat. Esse projeto consiste de plataformas que asseguram sua estabilidade por meio de elementos de flutuação semi-submersos triangulares que ficam ancorados ao fundo do mar e tem como principal objetivo a exploração do recurso eólico em águas profundas.

Segundo Horta (2017), toda a construção da fundação e instalação do projeto WindFloat foi realizada em Portugal, e o país atualmente lidera a tecnologia offshore flutuante no mundo. O primeiro parque eólico baseado nessa tecnologia está em fase de finalização e entrará em operação ainda em 2018, com capacidade de 25MW em uma região com mais de 50 metros de profundidade.

Lente eólica

O desenvolvimento de tecnologias acerca da aerodinâmica de uma turbina eólica é fundamental para um melhor aproveitamento do recurso eólico. Pesquisadores da Universidade de Kyushu, no Japão, desenvolveram uma turbina eólica capaz de gerar quantidade de energia elétrica três vezes maior que as turbinas atualmente em operação, conforme Caser e Paiva (2016). Essa nova tecnologia foi batizada de Lente Eólica e é mostrada na Figura 24.

Figura 24 – Modelo de lente eólica desenvolvida na Universidade de Kyushu.



Fonte: (ARQUITETURA, 2014).

O sistema possui um aro ao redor do cubo gerador, onde é criado um escoamento giratório em espiral das correntes de ar no seu interior, e conseqüentemente uma zona de pressão mais baixa, forçando a passagem de uma maior quantidade de vento através dela. Com isso, as pás giram mais rapidamente, resultando em maior produção de energia (CASER; PAIVA, 2016).