



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

PABLO RIBEIRO SILVESTRE



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PARQUES EÓLICOS SEMELHANTES
CONSIDERANDO A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DE UMA DÉCADA.



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
Março de 2017

PABLO RIBEIRO SILVESTRE

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PARQUES EÓLICOS SEMELHANTES CONSIDERANDO A
EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DE UMA DÉCADA.

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Energias Renováveis

Orientador:

Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.

Campina Grande, 2017

PABLO RIBEIRO SILVESTRE

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PARQUES EÓLICOS SEMELHANTES CONSIDERANDO A
EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DE UMA DÉCADA.

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Energias Renováveis

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre foi e será minha maior inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado força, vitalidade e coragem para suportar todas as dificuldades, foram vários anos de luta e graças a ele, fui capaz de superar.

Agradeço a meus pais, Ivanildo e Lili, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando quando estava certo, recriminando quando estava errado e aconselhando quando necessário.

Agradeço também a meu irmão Moisés, que com bastante dedicação e trabalho me permitiu ter condições de estudar e concluir meu curso superior.

Agradeço a meus amigos (*in memoriam*), Fábio Diêgo e Paula Vanessa, que sempre me apoiaram em todas as circunstâncias e que sei que onde estiverem, estão sempre torcendo por mim.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Agradeço aos amigos que fiz durante todo o curso, que me ajudaram e me deram apoio em todos os momentos que precisei, em especial: Fiuza, Dayvson, Carlos Ângelo, Nicodemos, Wesley, Daniell, Yukio, Julio César, Diêgo, Leiva, Bruno, Pedro, Elliott, Ravi, Luciano, Walber, Ramsés, Victor Loudal, Yasmin, Kairo e Fernando Junior.

Agradeço aos meus amigos, que sempre me apóiam e lutam ao meu lado em todas as batalhas, em especial: Érico, Lucas, Diêgo Teixeira.

Agradeço a minha namorada, Amanda Macêdo, uma das grandes responsáveis por eu estar aqui concluindo o curso, sempre me dando força, carinho e atenção, me incentivando e apoiando em todos os momentos.

Agradeço ao grupo Energy, pela oportunidade, fundamental para meu crescimento profissional, especialmente ao amigo e Eng. Dayvson Faber por me ajudar na compreensão de muitas etapas da construção.

Agradeço ao professor orientador, Ubirajara, por ter aceitado colaborar com a atividade e auxiliar na construção do relatório.

Agradeço aos queridos, Adail e Tchai, meu total agradecimento por tudo.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“Um golpe não funciona duas vezes contra um cavaleiro”
Ikki.

RESUMO

No cenário atual, com o crescimento da demanda por energia e a constante preocupação com o meio ambiente, surgiu a necessidade de se desenvolver tecnologias de geração alternativa, comumente chamados de energias renováveis. Neste ambiente, a geração de energia eólica aparece como uma boa opção, devido ao fato de possuir uma grande disponibilidade de fonte para a geração, que são as correntes de ar, e de ser vista com um baixo potencial poluidor. Apesar disso, torna-se necessário um estudo prévio para analisar a viabilidade de uma construção de grande porte, baseada nessa tecnologia. Assim como estudos constantes durante o funcionamento do mesmo para se ter uma ideia dos índices e metas que vão sendo atingidos ao longo do tempo de funcionamento, além da análise dos principais problemas, média de tempo inativo das torres, dificuldades encontradas e tudo que diz respeito a geração de energia num empreendimento desse tipo. Este trabalho apresenta uma visão direta sobre o Parques Eólicos de Icaraízinho e Pedra Cheirosa, enfatizando todos os seus aspectos de funcionamento.

Palavras-chave: Energias Renováveis, Energia Eólica, Parque Eólico, Aerogerador.

ABSTRACT

In the present, with the growing demand for energy and constant concern for the environment, the need arose to develop alternative generation technologies, also called renewable energies. In this environment, the generation of wind energy appears as a good option, due the fact that it has a great availability of source for the generation, which are the air currents, and to be seen with a low polluting potential. In spite of this, a previous study is necessary to analyze the viability of a large construction based on this technology. Other studies are carried out constantly in the wind farms, in order to obtain production indexes and targets to be reached along the time of operation, analysis of the main problems, average time of inactive wind turbines, among other difficulties encountered. This work presents a direct view on the wind farms of Icaraízinho and Pedra Cheirosa, emphasizing all aspects of its operation.

Keywords: Renewable Energy, Wind Energy, Wind Farm, Wind Turbine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da evolução da geração eólica	14
Figura 2 - Distribuição dos ventos na terra.....	17
Figura 3. Brisas Marítima e Terrestre.....	18
Figura 4. Brisa de Vale e Brisa de montanha.	19
Figura 5. Escoamento na zona envolvente de um obstáculo.	20
Figura 6. Velocidade do vento em relação a altura.....	21
Figura 7. Efeito Esteira	22
Figura 8. Fluxo de vento através de uma turbina eólica.	25
Figura 9: Visão Geral de um Aerogerador.	26
Figura 10 - Turbina Savonius de eixo vertical.....	27
Figura 11 - Turbina Darrieus de eixo vertical	28
Figura 12 – Turbina de Eixo vertical Darrieus	28
Figura 13 - Turbina eólica de eixo horizontal com 3 pás	29
Figura 14- Turbinas upwind e downwind.....	30
Figura 15 Tipos de torre utilizadas nos aerogeradores	31
Figura 16 – Pá de um aerogerador.....	32
Figura 17- cubo das pás do aerogerador da Impsa.....	32
Figura 18 – Corte longitudinal da nacele.....	33
Figura 19: Mapa da Localização do CGE ICZ	37
Figura 20: Aerogerador Suzlon S-88.....	38
Figura 21: Curva de Geração da turbina Suzlon S-88	38
Figura 22: Disposição dos Aerogeradores.....	39
Figura 23. Vista aérea de satélite no parque eólico ICZ.	40
Figura 24: Esquema de Transmissão Subterrânea em um Parque Eólico.....	41
Figura 25: Mapa da Localização do CGE PCH.....	42
Figura 26: Aerogerador Gamesa G114-2.0	43
Figura 27: Curva de Geração da Turbina Gamesa G 114 – 2.1 MW.....	44
Figura 28: Nacele Próxima ao Local de Instalação – CGE PCH.....	44
Figura 29. Vista de satélite da localização do CGE PCH.....	45
Figura 30. Evolução do tamanho e da potência das turbinas eólicas.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TEEV	Turbina eólica de eixo vertical
TEEH	Turbina eólica de eixo horizontal
CO ₂	Dióxido de carbono
A	Ampère
V	Volt
kV	Quilovolt (10 ³ V)
MVA	Megavoltampère(10 ⁶ V)
W	Watt
kW	Quilowatt (10 ³ W)
MW	Megawatt (10 ⁶ W)
GW	Gigawatt (10 ⁹ W)
RPM	Rotações por minuto
m ²	Metro quadrado
W/m ²	Watt por metro quadrado
m/s	Metros por segundo
MWh	Megawatt (10 ⁶ W) porhora
GWh	Gigawatt (10 ⁹ W)porhora
mm	Milímetro
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
V _v	Velocidade do vento
ρ	Massa específica do ar (aproximadamente 1,2 Kg/m ³)
C _p	Coefficiente de potência
λ	Velocidade específica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia
CHESF	Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
PIE	Produção Independente de Energia
NE	Nordeste
UF	Unidade Federativa
GE	General Electric
CRESESB	Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de
Salvo	
EPE	Empresa de Pesquisa Energética

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Estrutura do Trabalho.....	15
2	Recurso Eólico.....	16
2.1	Estrutura do Vento.....	16
2.2	Características Locais.....	19
3	Calculo Energético.....	22
3.1	Coefficiente de potência (C_p).....	23
3.2	Máxima extração de potência – Limite de Betz.....	25
4	Aerogeradores.....	26
4.1	Tipos de Turbinas.....	27
4.2	Componentes do Aerogerador.....	30
4.2.1	Torre.....	30
4.2.2	Rotor.....	31
4.2.3	Nacele.....	33
5	Parques Eólicos.....	36
5.1	Parque eólico Icaraizinho.....	36
5.1.1	Aerogerador Suzlon S-88.....	37
5.1.2	O Leiaute do Parque Eólico.....	39
5.1.3	A Rede de Média Tensão.....	40
5.2	parque eólico pedra cheirosa.....	42
5.2.1	Aerogerador Gamesa G114-2.0.....	42
5.2.2	O Leiaute do Parque Eólico (CGE PCH).....	45
5.2.3	A Rede de Média Tensão.....	45
6	Análises comparativa entre os parques.....	46
6.1	Comparativo Entre Aerogeradores.....	46
7	Conclusão.....	51
	<i>Bibliografia</i>	52

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é derivada da circulação das massas de ar, com origem em dois fenômenos fundamentais, a rotação do planeta e seu aquecimento não uniforme pela radiação solar. Por sua forma de fluxo, o vento é considerado uma fonte renovável de energia. A humanidade vem se beneficiando a centenas de anos desta energia, com usos como os de barcos à vela e moinhos, onde o vento é utilizado para a moagem de grãos. Com a evolução da tecnologia, o vento passou a ser utilizado para bombeamento de água, e nos tempos atuais, principalmente para a geração de energia elétrica.

Atualmente a energia eólica é apontada como uma das fontes de energia renováveis mais promissoras, caracterizada por uma tecnologia bem desenvolvida e dominada com aplicações nos parques eólicos espalhados por todo o mundo. Este tipo de geração atualmente é bastante difundida e apresenta evolução constante.

No cenário mundial a maior parte dos parques eólicos está instalada em terra (onshore), porém vários parques têm sido implantados no mar (offshore), devido à diminuição de locais apropriados em terra para novos empreendimentos (notadamente na Europa) e pelo bom potencial, apesar de apresentarem maiores custos.

A despeito do expressivo crescimento da capacidade instalada, a fonte eólica é responsável somente por uma pequena parte da energia elétrica produzida no mundo, cerca de 3% do total gerado em 2014. Contudo, esses números podem variar de acordo com o país em questão. A Dinamarca, por exemplo, foi capaz de suprir 39% da sua demanda de eletricidade em 2014 com energia proveniente do vento.

Sendo um total da capacidade instalada em 2014, 84% localizada em 10 países, sendo os três maiores a China com (31%), os Estados Unidos (18%) e Alemanha (10%) (EPE, 2016).

Esse grupo de países forma o maior mercado tanto de produção de aerogeradores e serviços vinculados, quanto de aquisição e instalação de novos parques eólicos. O Brasil ocupa o décimo lugar da lista, com 1,6% do total da capacidade eólica instalada no mundo.

No Brasil, a região Nordeste vêm se tornando a área com o melhor potencial para aplicações da energia eólica, apresentando várias vantagens importantes na escolha

de investimento nessa geração, como um dos maiores potenciais para este tipo de geração. Várias instituições vêm pesquisando o mapeamento eólico de ambas as regiões, especialmente na costa, onde observam ventos fortes e quase constantes ao longo de todo o ano.

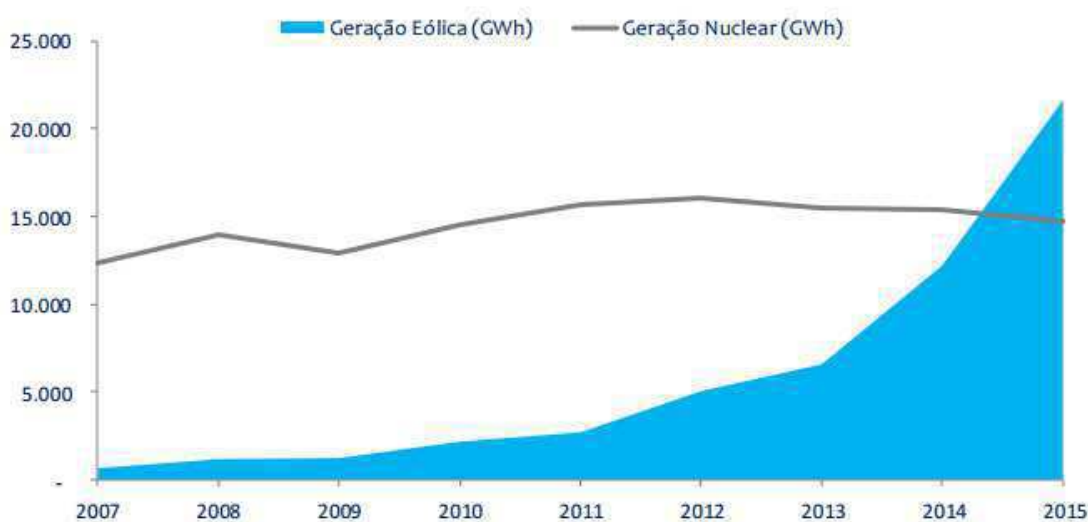
Estudos realizados pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e pela Companhia Elétrica do Ceará (COELCE) mostram que a costa nordestina, entre o Rio Grande do Norte e Ceará, tem um recurso eólico estimado de cerca de 12.000 MW, devendo ser ressaltado que a região Nordeste foi um dos pioneiros na instalação de energia eólica para utilização na geração de energia elétrica.

No Brasil o relatório final do balanço energético da EPE de 2015, constata que a produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 12.210 GWh em 2014, equivalente a um aumento de 85,6% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 6.578 GWh.

Em 2014, a potência instalada para geração eólica no país expandiu 122,0%. Segundo o Banco de Informações da Geração (BIG), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o parque eólico nacional cresceu 2.686 MW, alcançando 4.888 MW ao final de 2014. (EPE, 2015)

Em 2015 a geração eólica atingiu 21,6 GWh, crescimento de 77,1% - ultrapassando assim a geração nuclear em 2015. A potência eólica atingiu 7.633 MW, expansão de 56,2%. (EPE, 2016), como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Gráfico da evolução da geração eólica



Fonte: EPE, relatório do balanço energético nacional.

1.1 OBJETIVOS

Mostrar através de um estudo comparativo, os principais fatores que influenciaram na evolução das tecnologias de geração eólica, evidenciando os avanços ocorridos durante o período de uma década.

Localização dos parques, tipos de aerogeradores, diferença nos diâmetros do rotor e ganhos na geração ao longo do tempo, serão alguns dos temas abordados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Trabalho de Conclusão de Curso foi dividido em sete Capítulos, onde o Capítulo 1 mostra a parte introdutória, além dos objetivos e sua estrutura. No Capítulo 2, são mostradas as características do vento. Nele é apresentado o processo de geração e os fatores que influenciam no seu comportamento. O Capítulo 3, aborda os cálculos energéticos e as características deste tipo de geração. No Capítulo 4 são vistos os aerogeradores, citando seus tipos e principais componentes. O capítulo 5 detalha os Parques Eólicos, suas principais características e diferenças de construção. No Capítulo 6 são feitas análises comparativas entre os parques, citando as diferenças e evoluções. O Capítulo 7 é conclusivo e tem como objetivo mostrar as constatações verificadas ao longo do trabalho realizado.

2 RECURSO EÓLICO

Os ventos são naturais de uma diferença de pressão ao longo da superfície da Terra, em razão da exposição não uniforme do planeta à radiação solar. Onde a mesma é maior nas zonas equatorianas do que nas polares, logo, a radiação solar é responsável pela energia eólica.

Visto que o aquecimento não uniforme da terra é responsável pela geração dos ventos. Se for analisado o total de energia dos ventos disponível em todo o planeta terra, apenas 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Mesmo sendo um percentual pequeno, quando comparado ao total do potencial, este número pode representar centenas de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas mundiais.

Os melhores ventos – com maior velocidade, força, e consistência – são encontrados em torno de 10km da superfície da terra. Como não é possível se instalar aerogeradores nessa elevada altitude, o espaço de interesse e aplicação é limitado em algumas dezenas de metros da atmosfera, nessa altitude o vento é diretamente influenciado pela rugosidade, altura, relevo e obstáculos.

2.1 ESTRUTURA DO VENTO

Estudar e compreender as características dos ventos é de fundamental importância para diversos fatores na exploração da energia eólica, desde a identificação de locais adequados para geração de energia elétrica até o projeto de turbinas eólicas. Os ventos são causados pelas diferenças de pressão ao longo da superfície da Terra, devido em primeiro lugar, a radiação solar na terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas regiões polares e, segundo, a rotação da Terra e as variações sazonais de distribuição da energia solar incidente. A fonte do vento é, por conseguinte, a radiação solar.

Pelo fato de receber a incidência de raios solares quase que perpendicularmente, as regiões tropicais são mais aquecidas que as polares, sendo assim, o ar quente situado nas baixas altitudes, tende a subir e acaba sendo substituído pelo ar frio oriundo das

regiões polares. Essa dinâmica de deslocamento do ar quente e do ar frio, resultam na formação dos ventos. Na Figura 2 é ilustrado o deslocamento das massas de ar no planeta.

Figura 2 - Distribuição dos ventos na terra



Fonte: <http://ventos.pbworks.com>

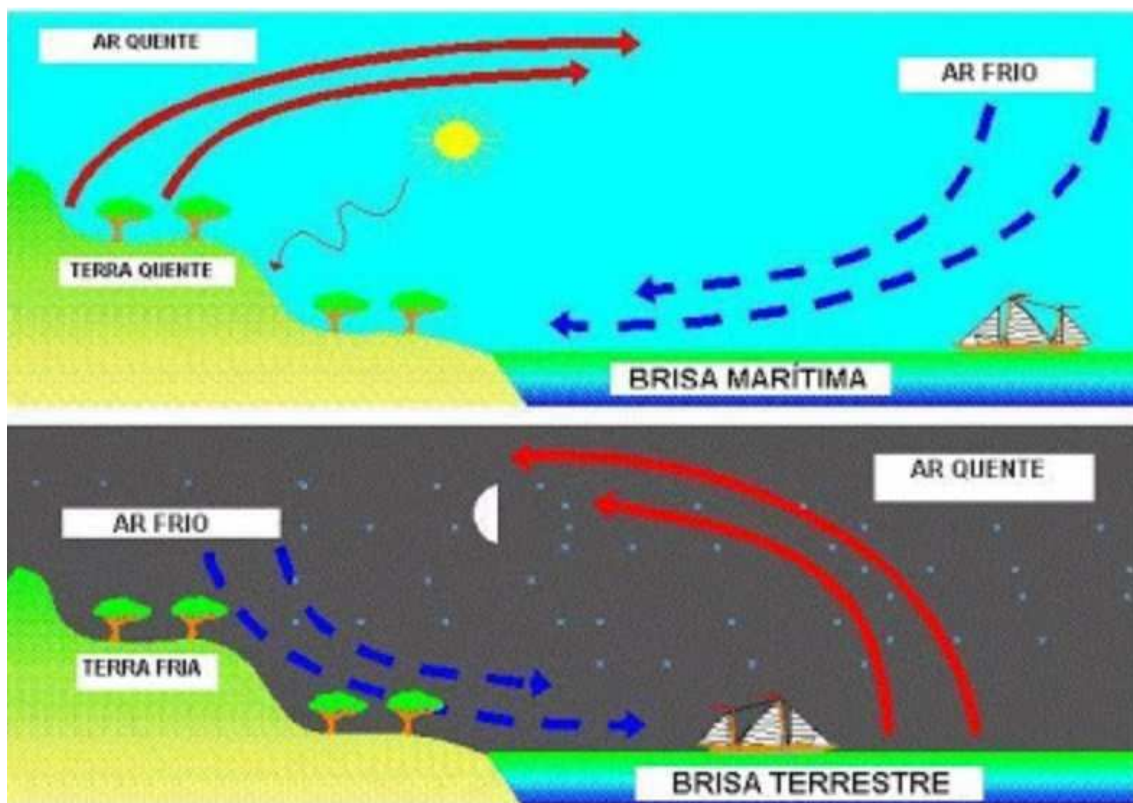
Sabendo que o maior aquecimento das região do equador e o resfriamento das regiões polares são fatos constantes, temos a formação de ventos constantes e estes podem ser chamados de ventos planetários, e classificados em:

- Alísios – Ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes;
- Contra-Alísios – Ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste – Ventos que sopram dos trópicos para os pólos;
- Polares – Ventos que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

A intensidade e duração dos ventos, são resultados das variações sazonais na distribuição de radiação na terra, que por sua vez, são consequência da inclinação de $23,5^\circ$ da Terra em sua própria órbita em relação ao Sol . Isto leva ao surgimento dos ventos continentais ou peródicos que compreendem monções e brisas.

Monções são ventos que mudam de direção a cada 6 meses, e sopram geralmente no sentido inverso em diferentes estações do ano. Já as brisas, caracterizam-se como ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa, e são susceptíveis ao calor recebido do Sol e inerentes à cada tipo de superfície, como continentes e mares. Durante o dia, a Terra tem uma capacidade maior de refletir raios solares, isso leva a um aumento da temperatura do ar, e como consequência, são formadas correntes de ar que sopram do mar para a terra, chamadas brisas marítimas. Por outro lado, durante a noite, a temperatura da terra diminui mais rápido que a da água, ocasionando a brisa terrestre, que sopra da terra para o mar.

Figura 3. Brisas Marítima e Terrestre



Fonte. 3bp.blogspot.com (modificado).

A topologia da superfície também da origem a circulação de brisas, com a inversão do sentido de circulação entre a situação diurna e a noturna. Semelhante ao processo de formação da brisa marítima/terrestre, a superfície do solo funciona como fonte de aquecimento durante o dia e de resfriamento durante a noite. A atmosfera sobre uma região de vale é pouco afetada pelo ciclo diurno, pois encontra-se distante do solo. Na região montanhosa, no entanto, a atmosfera está em contato direto com a superfície, trocando calor. Desta forma, a montanha comporta-se como uma fonte de calor durante o dia, dando origem a uma circulação mais fria de ar, vinda do vale, essa circulação é conhecida como brisa do vale. Durante a noite a montanha é fonte de arrefecimento, tendo lugar uma corrente de ar frio da montanha para o vale, conhecida como brisa de montanha.

Figura 4. Brisa de Vale e Brisa de montanha.



Fonte. Moran, 1997.

2.2 CARACTERÍSTICAS LOCAIS.

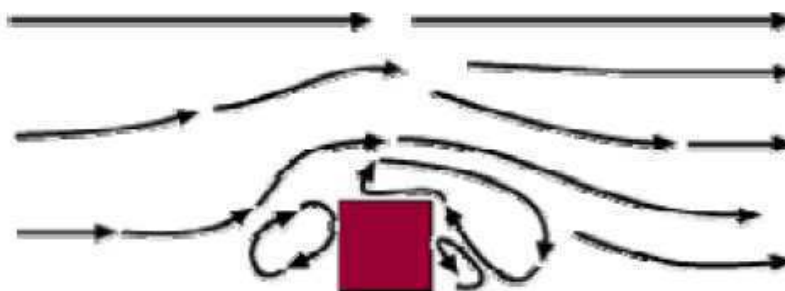
Os ventos sofrem influência significativa de fatores locais. Os principais fatores que afetam o escoamento local do ar são: fenômenos aerodinâmicos associados a topologia local (elevações, depressões) e a obstáculos naturais ou artificiais (vegetação, edifícios) e fenômenos associados as diferenças de rugosidade entre as várias superfícies adjacentes ao fluxo atmosférico.

Edifícios, árvores, formações rochosas, entre outros, tem grande influência na diminuição da velocidade do vento, e são fontes de turbulência em sua vizinhança, sendo dessa maneira responsáveis pela queda do potencial eólico.

Grande parte da turbulência é gerada na região por detrás do obstáculo, e pode propagar-se até três vezes a dimensão do objeto, dessa forma deve-se evitar grandes obstáculos próximo das turbinas eólicas, principalmente na direção do vento

predominante, na Figura 5 é mostrado como o escoamento é afetado na área envolvente do obstáculo.

Figura 5. Escoamento na zona envolvente de um obstáculo.



Fonte. Danishassoc.

A rugosidade do solo é outro fator de grande importância no escoamento do vento, esta característica pode ser definida como o efeito conjugado na superfície do solo e os seus elementos irregulares, que conduzem a uma diminuição do vento perto da superfície. De modo que pode-se dizer que uma superfície lisa apresenta baixa rugosidade, enquanto que uma superfície mais irregular apresenta alta irregularidade.

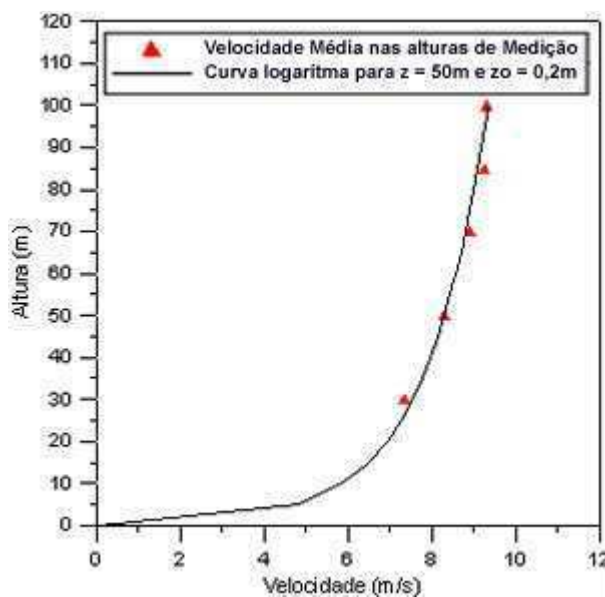
Já a turbulência, é definida como sendo uma flutuação na velocidade do vento em uma escala de tempo relativamente rápida, tipicamente menos que 10 min. A turbulência afeta o aproveitamento da energia do vento, pois causa mudanças na direção e na velocidade do mesmo.

As duas principais causas de turbulência são o atrito com a superfície da Terra e os efeitos termais, sendo que o primeiro causa perturbações extensas ao ponto de ser comparado com a influência de colinas e montanhas, já o segundo, é responsável por causar movimento vertical das massas de ar.

Por ser um processo bastante complexo, a turbulência não pode ser simplesmente representado por equações determinísticas, sendo necessária a utilização de técnicas estatísticas. Além disso, este efeito é inerente ao escoamento e não pode ser eliminado, devendo ser considerado um fator determinante no projeto de turbinas eólicas.

Outro fator de grande importância é considerar a altura para o projeto de aerogeradores, pois existe uma considerável variação de velocidade com a elevação da área de exposição aos ventos. Este fator se torna óbvio quando é levada em consideração o afastamento da superfície, o que reduz a exposição à rugosidade do solo e aos obstáculos presentes na superfície.

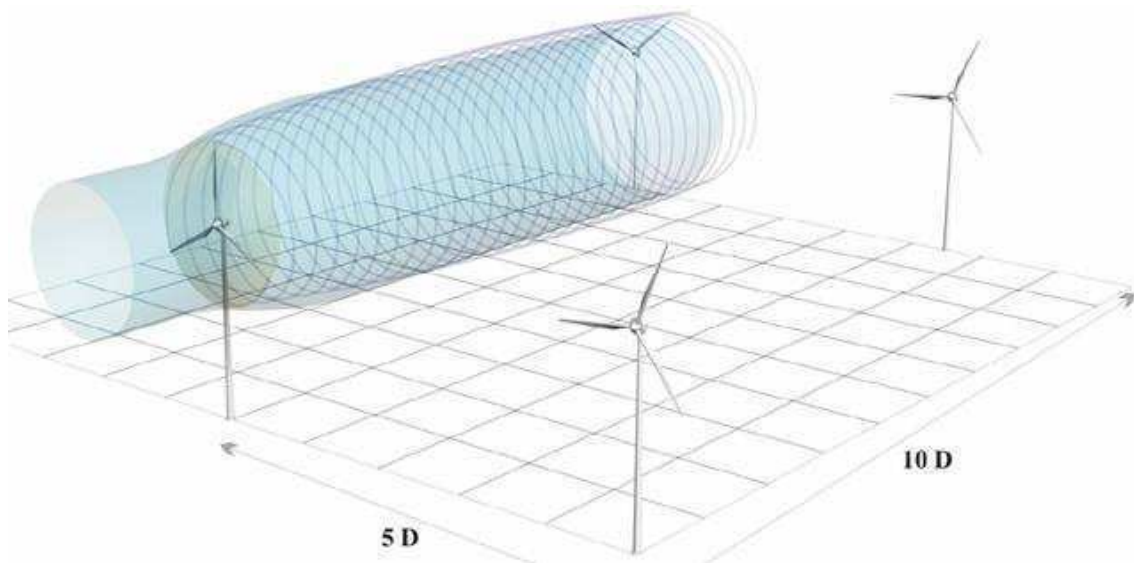
Figura 6. Velocidade do vento em relação a altura



Fonte. <http://www.cresesb.cepel.br/>

O efeito esteira é formado atrás da turbina do aerogerador, pois o vento tem um conteúdo energético menor, criando uma espécie de cauda de vento muito turbulenta e abrandada, em comparação com o vento que chega a turbina. Nos parques eólicos, normalmente para evitar a turbulência ao redor das turbinas, a distância mínima equivalente entre cada turbina é entre três e cinco vezes o raio do rotor. Nas direções do vento dominante, esta separação deve ser de dez vezes o raio do rotor. Este efeito pode ser verificado na Figura 7.

Figura 7. Efeito Esteira.



Fonte. evolucaoenergiaeolica.wordpress.com

3 CALCULO ENERGÉTICO

A potência de uma turbina eólica é obtida através da conversão de energia eólica em torque, o que é rodar as pás do rotor da turbina. A quantidade de energia transferida para o rotor dependerá da densidade do ar (ρ), da área das lâminas do rotor (A) e de velocidade do vento (v_0).

Deste modo, a existência de uma massa de ar (m), que se move de uma maneira constante e uniforme a uma velocidade v_0 , tem associado a si uma energia cinética será a energia disponível para uma turbina eólica.

Uma vez que a energia disponível no vento associada com o movimento desta massa de ar, que se aproxima à velocidade v_0 as lâmina do rotor de uma turbina eólica é dada por:

$$p_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} \cdot v_0^2 \quad (1)$$

À medida que o fluxo de massa de ar que atravessa as pás do rotor é dado por:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho A v_0 \quad (2)$$

No caso de uma turbina eólica, as pás do rotor de raio rotor a girar, a área varrida pelas pás corresponde a uma área circular:

$$A = \pi r_{rot}^2 \quad (3)$$

Substituindo (3) em (2) e, em seguida, (1) e rearranjando, obtemos a seguinte equação da potência disponível no vento para a área correspondente à área varrida pelas pás da turbina:

$$p_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} \cdot v_0^2 = \frac{1}{2} (\rho A v_0) v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot r_{rot}^2 \cdot v^3 \quad (4)$$

Como pode ser visto a energia eólica disponível irá variar com o cubo da velocidade, ou seja, se a velocidade dobrar, a potência aumenta oito vezes, enquanto que o aumento da área varrida pelas pás para o dobro fará com que a potência aumente duas vezes. Portanto, chega-se à conclusão que, embora esses dois fatores sejam importantes, ao escolher o local para a construção de um parque eólico, o valor a velocidade do vento no local é o mais relevante.

3.1 COEFICIENTE DE POTÊNCIA (C_p)

O coeficiente de uma turbina eólica expressa a eficiência da conversão de energia eólica em energia elétrica, porque apenas uma fração da energia cinética total do ar que atravessa as pás da turbina pode ser convertida em energia mecânica no rotor.

Supondo que a velocidade do vento não perturbado que incide nas pás da turbina é v_0 e a velocidade do vento do lado oposto das pás, ou seja, que “sai” da turbina (vento turbulento e com velocidade reduzida em relação a v_0 é v_{w0} , então a potência mecânica teórica máxima disponível no veio da turbina é dada por:

$$P_{mec_teo} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} (v_0^2 - v_{w0}^2) \quad (5)$$

De acordo com 1,2 e 3 segue-se que, se em (5), $v_{w0} = v_0$, a potência extraída do vento seria zero, pois seria como se as pás do rotor da turbina não existissem, e não há nenhuma conversão de energia. Se $v_{w0} = 0$, a potência mecânica no eixo seria zero, porque as pás da turbina não iriam deixar passar nenhum vento (atuando como uma parede), o que implica um fluxo de massa de ar zero, em seguida, também de potência nula.

Supondo que a velocidade média do vento que atravessa as pás do rotor é :

$$v_{med} = \frac{v_0 - v_{w0}}{2} \quad (6)$$

E que o fluxo de massa de ar que atravessa as pás do rotor pode agora ser dado por:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho \cdot A \cdot v_{med} \quad (7)$$

Obtém-se a seguinte equação para a potência mecânica máxima teórica substituindo (6) em (7) e depois em (5):

$$P_{mec_teo} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A (v_0^2 - v_{w0}^2) (v_0 - v_{w0}) \quad (8)$$

O razão entre a potência mecânica teórica e a potência total disponível no vento é conhecido como o coeficiente de potência teórico:

$$Cp_{teo} = \frac{P_{mec_teo}}{P_0} \quad (9)$$

A aplicação das equações (8) e (4) na equação (9) chega-se a:

$$Cp_{teo} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{w0}}{v_0}\right) \left(1 - \frac{v_{w0}^2}{v_0^2}\right) \quad (10)$$

Note-se que Cp_{teo} representa um valor teórico do coeficiente de potência, e que a potência mecânica atual da turbina é menor do que a dada por (8), devido às perdas mecânicas. Assim o coeficiente de potência real da turbina que corresponde ao verdadeiro valor da potência mecânica extraída do vento é dado através de:

$$Cp = Cp_{teo} \cdot \eta \quad (11)$$

Onde η representa o rendimento das perdas mecânicas acima referidas e que varia entre 0 e 1, e depois facilmente chegar-se à conclusão de que:

$$Cp_{teo} = \frac{P_{mec_teo}}{P_0} \Leftrightarrow Cp = \frac{P_{mec_teo}}{P_0} \cdot \eta \Leftrightarrow Cp = \frac{P_{mec}}{P_0} \quad (12)$$

Apesar da equação (12) ser considerada à fórmula correspondente ao C_p , os fabricantes de turbinas eólicas normalmente já incluem as perdas elétricas na curva de C_p das turbinas, e é mais comum usar:

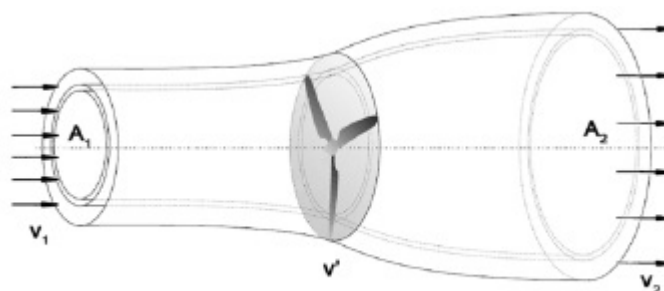
$$C_p = \frac{P_e}{P_0} \quad (13)$$

Onde P_e é potência elétrica.

3.2 MÁXIMA EXTRAÇÃO DE POTÊNCIA – LIMITE DE BETZ

Ao passar pelo rotor da turbina, o fluxo de ar acaba perdendo parte da sua energia cinética, sendo sua velocidade na saída da turbina menor que na entrada. Em 1919, o físico alemão Albert Betz, mostrou uma maneira de se extrair a máxima potência desse fluxo, para isso, torna-se necessário que a velocidade da massa de ar na saída do rotor seja exatamente igual a um terço ($1/3$) da velocidade na entrada do rotor, ou seja, dois terços ($2/3$) da energia cinética contida na massa de ar que atravessa o rotor seria captada e convertida em energia elétrica. Betz calculou a fração máxima da energia contida no vento que pode ser extraída por uma turbina, ou seja, o coeficiente de potência máximo, encontrando o valor de 0,593, provando que apenas 59,3% da potência disponível no vento pode ser convertido em potência mecânica por uma turbina eólica, esse limite máximo de extração de energia do vento é conhecido como limite de Betz. Vale ressaltar que esse limite é um valor teórico, na prática as turbinas operam abaixo do limite de Betz. O fluxo de vento através de uma turbina eólica de eixo horizontal é ilustrado na Figura 8.

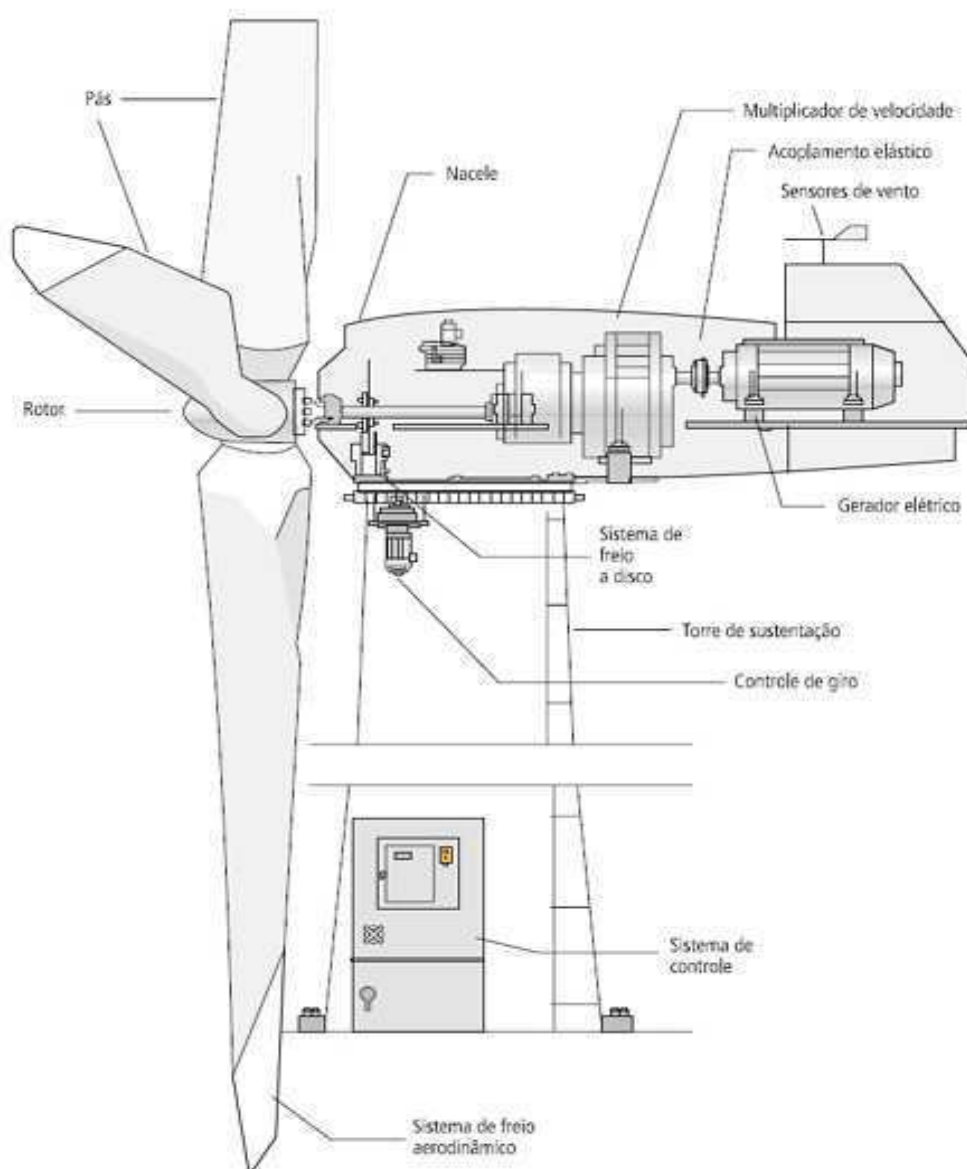
Figura 8. Fluxo de vento através de uma turbina eólica.



4 AEROGERADORES

Um gerador elétrico integrado ao eixo de um cata-vento e que converte energia eólica em energia elétrica, esta é a definição mais básica de um aerogerador, que é o foco de estudo deste Capítulo 4 e está demonstrado na Figura 9.

Figura 9: Visão Geral de um Aerogerador.



Fonte: <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/>

Os aerogeradores são diferenciados de acordo com o formato e o tamanho da nacele, pelo tipo de gerador (multipolos ou convencional) e se há ou não uma caixa

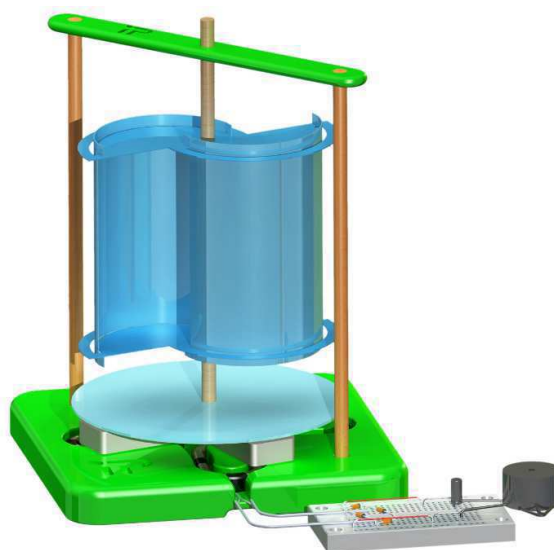
multiplicadora, a seguir, os próximos tópicos serão apresentados com mais detalhes as características básicas dos aerogeradores, tais como os tipos e as classificações destes equipamentos, bem como seus principais componentes.

4.1 TIPOS DE TURBINAS.

Inicialmente devemos dividir as turbinas eólicas em dois grandes grupos, turbina de arraste e turbina de sustentação, devendo ter em mente que existem as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) e as turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH).

Turbinas de arraste são aquelas onde o vento incide nas pás, empurrando-as, o que faz com que o rotor gire, conhecida como Turbina Savonius de eixo vertical como pode ser vista na.

Figura 10 - Turbina Savonius de eixo vertical

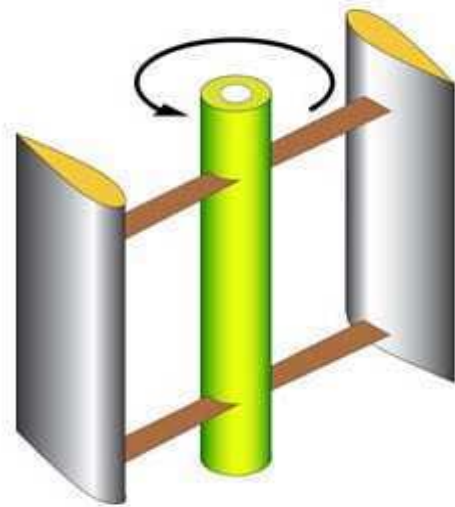


Fonte: <http://www.blueeconomy.eu>

Assim, geralmente utilizam-se diversas pás de forma a maximizar a área de superfície a ser “arrastada” pelo vento. Como exemplo podemos citar as turbinas utilizadas para o bombeamento de água.

Turbinas de sustentação utilizam, para projetar as pás da turbina, o conceito dos aerofólios, onde é gerado um diferencial de pressão entre as superfícies superior e inferior desta pá de forma que este diferencial de pressão gera uma Força de Sustentação (Lift), responsável pela movimentação do rotor. Conhecida como turbina de sustentação de eixo vertical (Turbina de Darrieus) pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 - Turbina Darrieus de eixo vertical



Fonte: <http://wikipedia.qwika.com>

Na Figura 12 pode ser observada de forma mais prática, outra turbina vertical do tipo Darrieus.

Figura 12 – Turbina de Eixo vertical Darrieus



Fonte: <http://www.pasaulineskeliones.lt>

A seguir, tem-se uma turbina de sustentação de eixo horizontal, tipo de turbina que atualmente é a tecnologia dominante na geração de energia elétrica a partir da fonte eólica, representada pela Figura 13.

Figura 13 - Turbina eólica de eixo horizontal com 3 pás



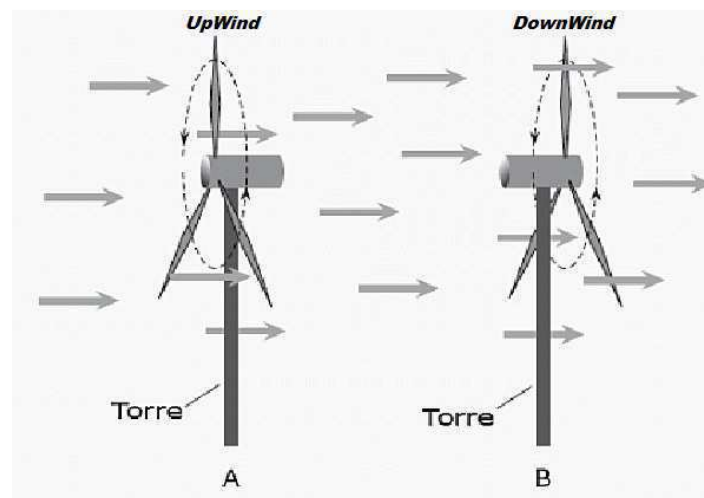
Fonte: <http://www.trianglemep.com/>

As turbinas eólicas modernas com rotores de três pás são as mais utilizadas em todo o mundo. Devido à configuração dos esforços mais vantajosa, não necessita de componentes caros adicionais como juntas e amortecedores de movimento no eixo. O nível de ruído é relativamente baixo e o rotor desenvolve um movimento de rotação suave.

Assim a indústria de energia eólica encontrou nas turbinas de eixo horizontal com três pás a tecnologia mais eficiente, pois estas utilizam com mais eficiência a geração de energia elétrica. Os rotores tripás são mais utilizados na geração elétrica, pois possuem uma melhor distribuição de peso, sendo, portanto, dinamicamente mais estáveis, por outro lado, os rotores com uma ou duas pás, são mais instáveis e propensos a turbulência, trazendo riscos a estrutura, além de apresentar maior ruído em função da maior velocidade rotacional.

Cabe também, mencionar que as turbinas eólicas de eixo horizontal podem ser classificadas de acordo com a posição do rotor em relação à torre. Assim, a turbina pode receber o vento de frente (upwind) ou de trás (downwind), conforme pode ser observado na Figura 14.

Figura 14- Turbinas upwind e downwind



Fonte: Própria

As turbinas downwind tem a vantagem de não precisar de um mecanismo para redirecionamento em relação à direção do vento, entretanto possui a desvantagem da torre causar uma turbulência maior no vento, o que por sua vez causa muito ruído.

Por outro lado, as turbinas upwind evitam a interação da torre em relação ao vento, evitando os ruídos, no entanto estas turbinas possuem a desvantagem de possuir maior carga, devido ao mecanismo de redirecionamento da turbina com relação ao vento.

4.2 COMPONENTES DO AEROGERADOR

4.2.1 TORRE

As torres possuem um papel essencial para a geração eólica. Ela que ampara todo o conjunto gerador de energia elétrica, além de elevar esse conjunto a alturas onde a geração elétrica é maior. Isso se baseia na teoria que a velocidade do vento cresce linearmente com a distância do solo até atingir a tropopausa, onde a partir daí seu valor volta a decrescer. Elas podem ser de dois tipos: tubulares cônicas (aço ou concreto) e treliçadas (aço), conforme pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 Tipos de torre utilizadas nos aerogeradores



Fonte: Própria adaptada

4.2.2 ROTOR

O projeto das pás do rotor, no qual a forma da pá e o ângulo de ataque em relação à direção do vento têm uma influência determinante, beneficiou do conhecimento da tecnologia das asas dos aviões, que apresentam um funcionamento semelhante. (Castro, 2003)

Dentro do conjunto rotor do aerogerador temos:

Pás: São as peças com perfis aerodinâmicos responsáveis por receber a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica no eixo. Nos aerogeradores que possuem controle de passo, a pá possui rolamentos em sua fixação no cubo, conforme a Figura 16.

Figura 16 – Pá de um aerogerador

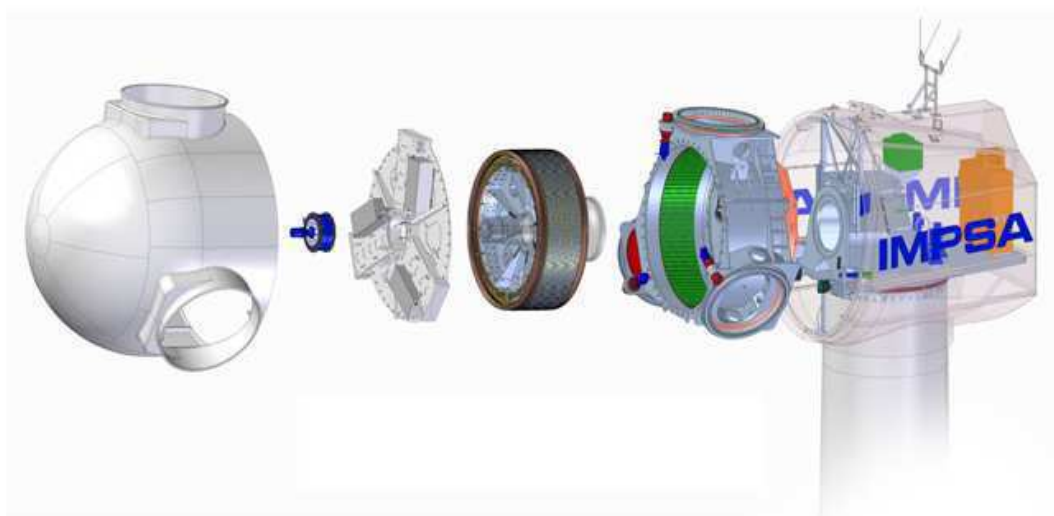


Fonte: <http://www.portal-energia.com>

As pás são fabricadas em fibra de vidro, reforçadas com epóxi e/ou madeira. A fixação no cubo é feita pela inserção de raiz em aço inoxidável.

Cubo: É a estrutura na qual são fixadas as pás do aerogerador, situadas na ponta do eixo da turbina, geralmente os cubos são fabricados em aço ou liga metálica de alta resistência. O maquinário no seu interior é dividido em partes cerradas, cada uma com um tamanho tal que, mesmo para aerogerador grande, permite o seu transporte para a montagem no local, visto na Figura 17.

Figura 17- cubo das pás do aerogerador da Impsa



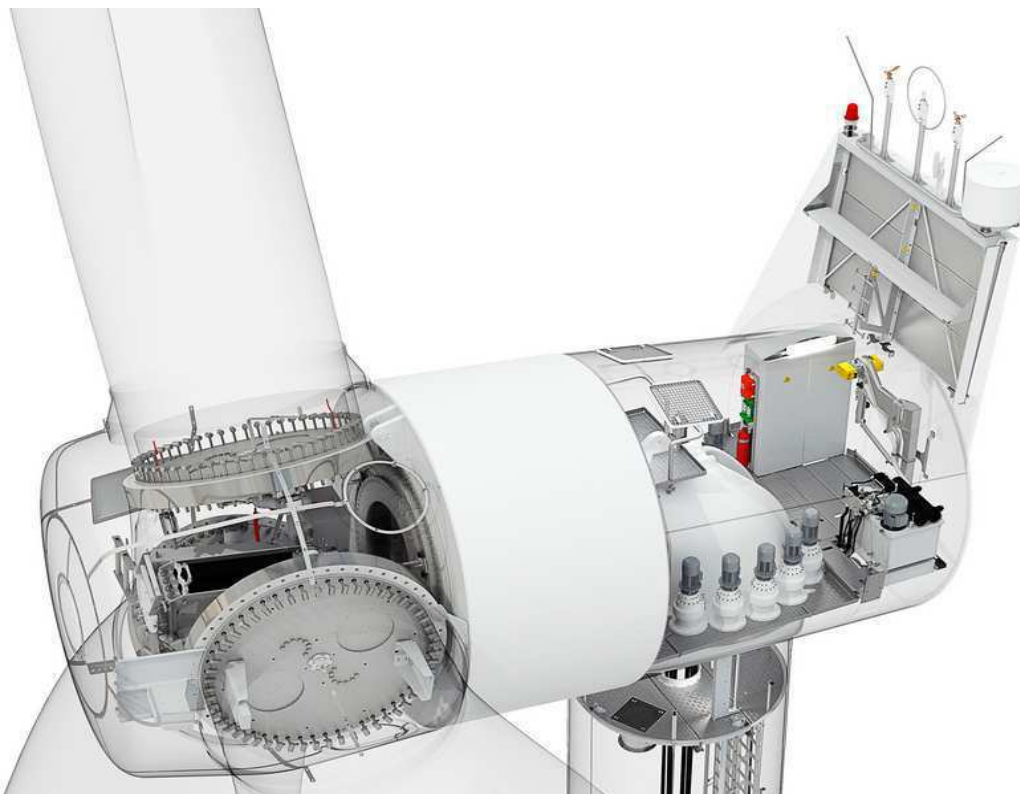
Fonte: <http://www.impsa.com>

Caixa de engrenagens: A caixa de engrenagem tem por finalidade sincronizar as diferentes rotações entre a turbina e o gerador. Normalmente a velocidade da turbina é bem baixa, enquanto a velocidade do gerador é elevada. Com a ajuda de uma caixa de transmissão, mancais e acoplamentos, pode-se ter uma caixa redutora ou multiplicadora. É notória que no caso dos aerogeradores essa caixa de engrenagens é uma caixa multiplicadora, onde aumenta a rotação recebida pela turbina.

4.2.3 NACELE

É a carcaça do aerogerador montada sobre a torre, abriga uma série de componentes do sistema de geração de energia como o gerador e a caixa multiplicadora, além do eixo e freios do sistema e etc. O tamanho e o formato da nacele variam de acordo com os componentes e sua disposição em seu interior. As maiores variações são entre os que comportam caixa de engrenagem e os que não utilizam. Dependendo da configuração do aerogerador, a nacele pode conter uma série de elementos estruturais de aço, como a estrutura principal, o quadro e o bastidor traseiro, que suportam os diversos componentes nela inseridos.

Figura 18 – Corte longitudinal da nacele



Fonte: <http://www.evwind.com>

O eixo principal, construído em aço ou liga metálica de alta resistência, é o responsável pelo acionamento do gerador, transferindo a energia mecânica da turbina. O gerador transforma a energia mecânica de rotação em energia elétrica e pode ser de diferentes tipos, conforme visto anteriormente. Muitas tecnologias de gerador necessitam do uso de conversores de frequência, para controle da onda de saída, constituindo-se de um retificador e um inversor. O transformador é o equipamento que eleva a tensão de geração ao valor da rede elétrica à qual o aerogerador está conectado.

O transformador pode ser instalado no interior da nacela, no interior da torre ou mesmo externamente, acoplado à torre ou no chão. O Sistema de Yaw tem a função de alinhara turbina com o vento. Este sistema compreende um motor elétrico que gira a nacela sobre a torre com auxílio de um rolamento – rolamento do Yaw – e também engrenagens para o ajuste da velocidade de giro. A caixa multiplicadora, quando existente, representa a maior massa da nacela e também uma grande fração de seu custo (cerca de 13%) . Localiza-se entre o rotor e o gerador, de forma a adaptar a baixa rotação do rotor à velocidade de rotação mais elevada do gerador. É um item que necessita de manutenção intensiva e que representa, portanto, uma fonte de possíveis falhas. Exige o uso de um sistema hidráulico com bombas, trocadores de calor e sistemas de comando para lubrificação e refrigeração. No caso de aerogeradores sem caixa de engrenagem, o gerador utilizado é o de polos salientes (ou multipolos) com o estator em forma de anel. A Figura 19 mostra uma tabela com os principais componentes e subcomponentes presentes na Nacela.

Figura 19. Componentes e subcomponentes da Nacele.

	<p>Elementos estruturais</p> <p>Talha Carenagem da nacele</p> <p>Acessórios</p> <p>Eixo principal</p> <p>Rolamento Yaw Sistema de Yaw</p> <p>Conversor/Inversor Transformador Sistema de freios Sistema de travamento do rotor Panel de proteção elétrica Cabos/arrumamento Unidade hidráulica Sistema de refrigeração da nacele Slip Ring</p>	<p>Quadro principal (main frame) Quadro traseiro (rear frame) Bastidor Parafusos estruturais</p> <p>Resina epóxi ou poliéster Tecido de fibra de vidro Luzes de sinalização Anemômetro (medidor de velocidade do vento) Sensor de direção do vento Outros sensores Para-raios Rolamentos do eixo principal Sistema de lubrificação</p> <p>Sistema de acionamento do Yaw (motorreductor) Panel de controle do Yaw</p>
Aerogerador com caixa	<p>Gerador Caixa Multiplicadora</p>	<p>Habitáculo Engrenagens planetárias Rolamentos Mangueras Sistema de torque Sistema de lubrificação Sistema de restrição</p>
Aerogerador sem caixa	<p>Gerador – Estator</p> <p>Gerador – Rotor</p>	<p>Elementos estruturais do estator Resina de impregnação Núcleo magnético Bobinas Elementos estruturais do rotor Tampa do rotor Ímãs permanentes</p>

Fonte. Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

5 PARQUES EÓLICOS

Um parque eólico ou usina eólica é um espaço, terrestre ou marítimo, onde estão concentrados vários aerogeradores destinados a transformar energia eólica em energia elétrica. O primeiro e grande desafio é encontrar locais ideais para a instalação das turbinas eólicas.

A distribuição e as direções da velocidade do vento são calculadas para toda a área do parque. Esse cálculo é baseado em medições de vento feitas por um longo período, de preferência a partir de uma altura do mastro no local do projeto, que são corrigidas para desvios de médias anuais.

Este capítulo aborda os estudos específicos do Parque Eólico Icaraizinho, que já está em funcionamento desde 2009 e do Parque Eólico Pedra Cheirosa, atualmente em fase de construção. Ambos empreendimentos pertencem à mesma empresa, além disso, estão na mesma região de exposição às correntes de vento.

Os parques citados, são investimento da empresa brasileira de energias renováveis CPFL Renováveis, fundada em 2006, com 91 ativos, somando 2,1 GW de capacidade instalada, distribuídos por 57 municípios em 8 estados brasileiros, com operações concentradas em energia eólica, biomassa, energia solar e termoeleétrica.

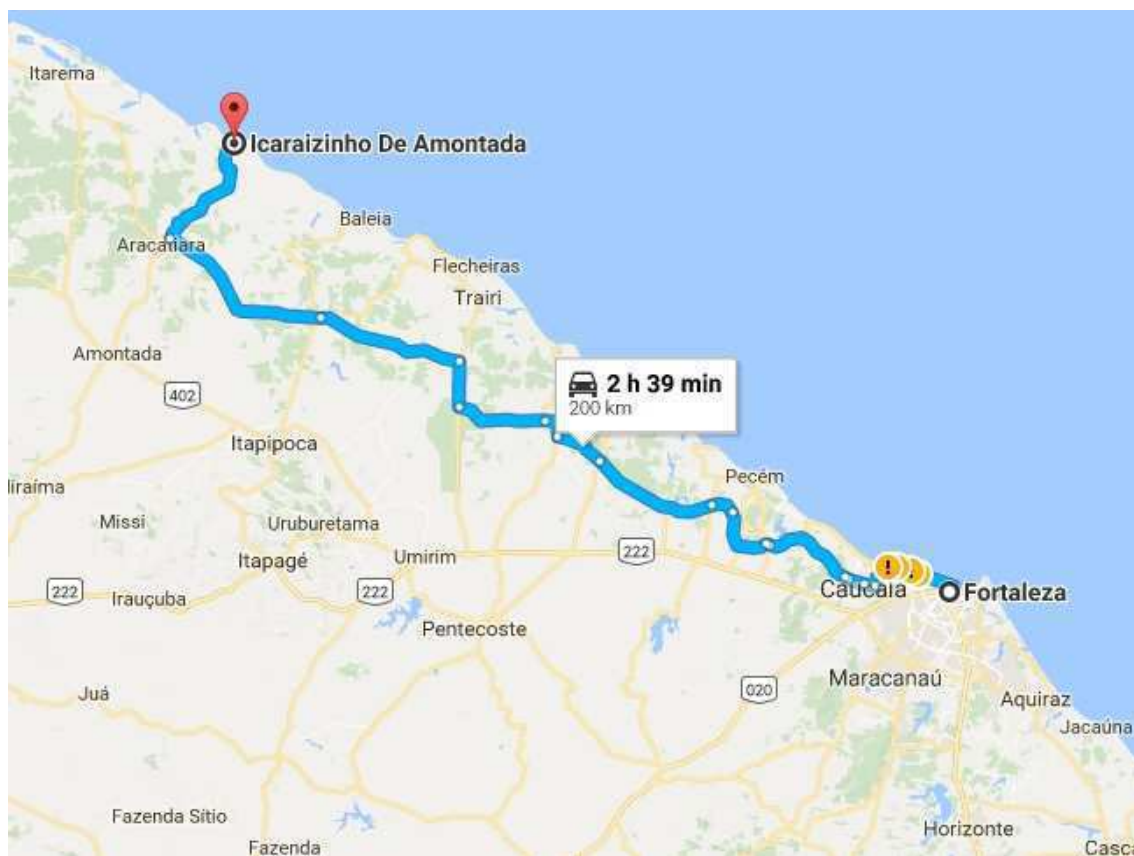
5.1 PARQUE EÓLICO ICARAIZINHO

O CGE ICZ, que está localizado no distrito de Icaraizinho, na cidade de Amontada – CE, aproximadamente 200 km de Fortaleza. Numa região reconhecida pelo potencial para geração através de energia eólica, onde existem aproximadamente 10 Centros de Geração Eólica em funcionamento na atualidade.

O empreendimento contribuiu bastante para o desenvolvimento da cidade de Amontada, com benefícios para a prefeitura que passou a receber impostos decorrentes da instalação de um parque eólico, entre eles a arrecadação do Imposto Sobre Serviços Aplicados (ISS) sobre os serviços de instalação das torres, item estrutural de grande porte e de contribuição principal no custo inicial do sistema. Além disso, durante a

construção, foram empregados vários trabalhadores da região, aquecendo a economia local. A localização do parque está detalhada na Figura 20, a seguir:

Figura 19: Mapa da Localização do CGE ICZ



Fonte: Google Maps

O Parque Eólico instalado em Icaraizinho é composto por 26 aerogeradores, totalizando uma capacidade de geração de 54,6 MW. O empreendimento foi inaugurado no ano de 2009.

5.1.1 AEROGERADOR SUZLON S-88

No parque eólico estudado, o sistema de conversão eólico-elétrico é feito por aerogeradores do modelo Suzlon S-88. Basicamente, constituem-se de turbina eólica, gerador elétrico e sistemas de controle para processamento de energia. Cada um deles conta com 2.1 MW de potência.

A Suzlon é uma companhia indiana de produção de aerogeradores, sendo considerada a terceira maior fabricante mundial de aerogeradores. Atualmente, a

empresa está presente em 25 países. A companhia foi criada em 1995 e está no Brasil desde 2007, com sede em Fortaleza.

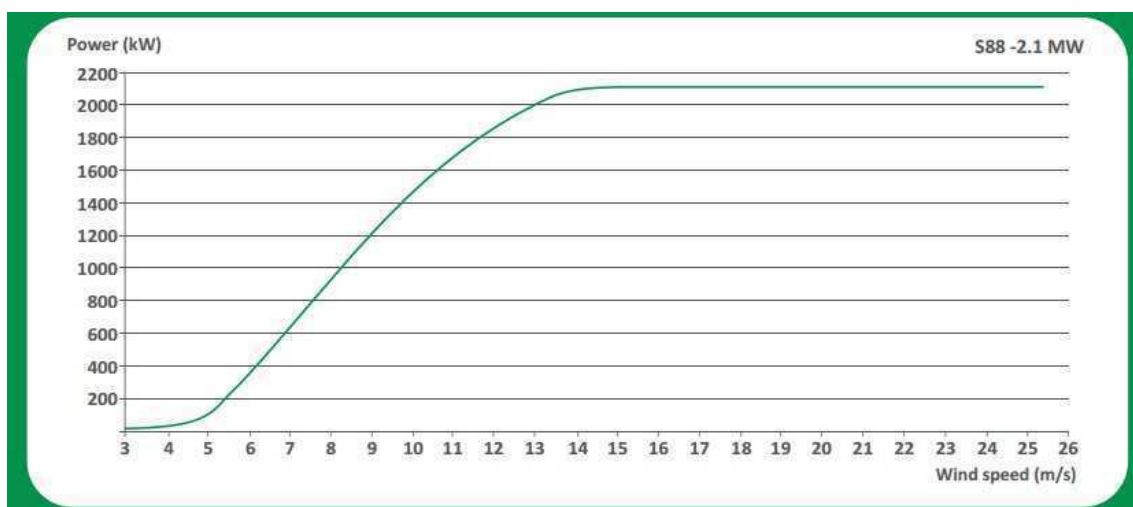
Figura 20: Aerogerador Suzlon S-88



Fonte: portal-energia.com

A altura das torres é de 80 m, com rotor de 82 m de diâmetro onde são instaladas três pás. A caixa multiplicadora de voltas converte uma única revolução do rotor em 14,4 revoluções na saída de uma caixa de engrenagens. Por sua vez, ela aciona um gerador de indução produzindo, assim, energia elétrica na tensão de 600V. A velocidade mínima de operação é de 4 m/s e a velocidade máxima de operação é de 25 m/s.

Figura 21: Curva de Geração da turbina Suzlon S-88



Fonte: Catálogo Suzlon (General Specifications S-88).

A Suzlon adotou o conceito de velocidade limitada conhecido como OptiSlip. Este utiliza um conversor eletrônico do lado da máquina responsável por controlar a frequência das tensões no rotor e conseqüentemente, sua velocidade. A utilização dos conversores de potência possibilita às turbinas operar com velocidade variável, maximizando a energia extraída do gerador. Além de corrigir o fator de potência e garantir proteção eletrônica para a turbina evitando danos em condições extremas de vento.

Os aerogeradores S-88, utilizam transformadores elevadores localizados na base da estrutura. Os mesmos elevam a tensão de 600 V para 34,5 kV. Esses trafos ficam expostos ao ambiente aberto e aos desgastes da maresia, atualmente já existem opções para sanar as falhas desse posicionamento.

5.1.2 O LEIAUTE DO PARQUE EÓLICO

O parque possui uma geografia privilegiada, está localizado na Zona Costeira do Ceará e é caracterizado por praias planas.

Figura 22: Disposição dos Aerogeradores



Fonte: www.mercurius.com.br/obraseolicas/12-parque-eolico-icaraizinho.aspx

Localizado numa área de 31.080,00 m², a construção do Parque Eólico foi precedida de um estudo sobre potencial energético que constatou um regime de ventos com velocidade 31,4 km/h, o que equivale a 8,7 m/s (média anual) a uma altura de 75 m, e encontra-se na direção predominantemente leste.

Figura 23. Vista aérea de satélite no parque eólico ICZ.



Fonte. Google Maps (modificado).

Com a utilização da ferramenta para cálculo da distância, disponível no Google Maps, para efetuar o cálculo da distância de cada aerogerador aos demais, foi encontrada uma distância mínima entre eles de 200,67 m, na direção perpendicular ao sentido do vento. Como o aerogerador utilizado possui um raio de 44 m, e a distância mínima deve ser de 3 vezes esse valor, ou seja, 132 m. Conclui-se assim que a distância está dentro do aceitável.

A menor distância no sentido do vento encontrada foi de 2 km, considerando-se que a ideal seria de 10 vezes o raio do rotor (440 m), o valor muito acima do mínimo aceitável.

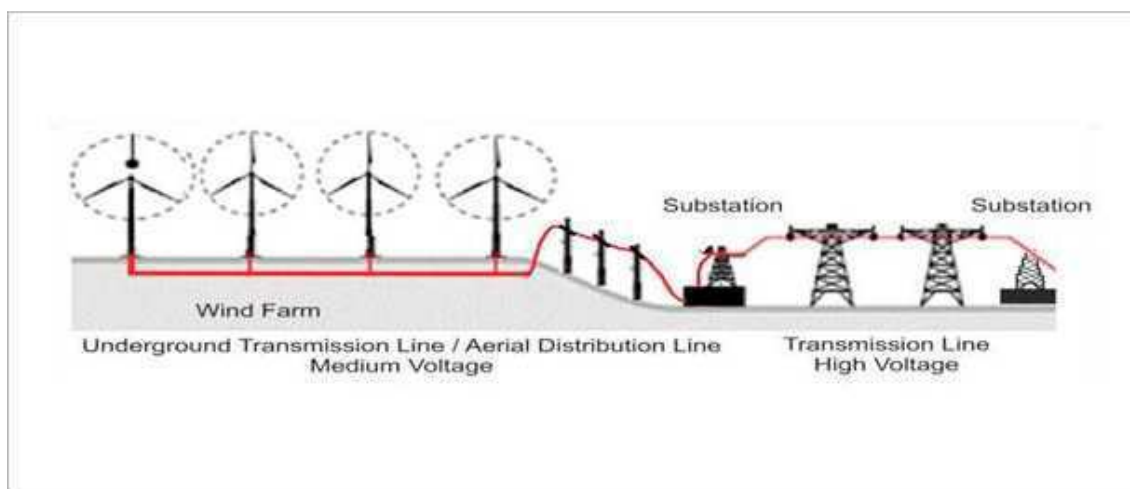
5.1.3 A REDE DE MÉDIA TENSÃO

A rede de média tensão é trifásica, em 34,5 kV e subterrânea. Na medida do possível, ela segue o caminho de acesso às torres garantindo facilidade de manutenção e minimizando os impactos ambientais.

Por sua vez, o painel elétrico de média tensão está conectado à rede de média tensão que leva a energia gerada até a subestação.

Os alimentadores radiais são interligados através de uma chave de seccionamento normalmente aberta (NA), em caso de necessidade de executar manobras no circuito para reparos ou execução de serviços com a rede não energizada permite a separação de pequenos trechos da rede. O Parque Eólico ICZ é dividido em 2 circuitos que se unem em um barramento de 34,5 kV.

Figura 24: Esquema de Transmissão Subterrânea em um Parque Eólico



Fonte: qgenergia.com

Depois de quase nove anos em funcionamento, por diversos motivos, como o desgaste e a exposição a maresia, os defeitos acumulados durante os anos e as falhas periódicas, acabam reduzindo o rendimento da geração no parque. No caso estudado, não são realizadas manutenções preventivas, apenas corretivas. Na maiorias das vezes, esse fator influencia diretamente no tempo de paralização dos aerogeradores que apresentam algum problema.

A geração encontra-se num patamar aceitável, mesmo considerando-se o tempo de funcionamento do complexo e as condições de sua manutenção. Atualmente existem 4 aerogeradores com defeitos críticos e sem funcionar desde janeiro de 2016, pois os problemas demandam grande custo para serem resolvidos.

No parque em análise, toda a geração é escoada para uma subestação (SE) elevadora de tensão 34,5/ 230 kV a céu aberto, contruída junto ao complexo eólico. A operação e manutenção é feita pela própria equipe da CPFL através da equipe de O&M.

5.2 PARQUE EÓLICO PEDRA CHEIROSA

Diferente do Parque estudado anteriormente, o CGE Pedra Cheirosa encontra-se atualmente no início das suas obras. Na localidade de Patos, cidade de Itarema – CE, aproximadamente 220 km de Fortaleza. O investimento previsto para o parque é de 103.370.000,00.

Figura 25: Mapa da Localização do CGE PCH



Fonte: Google Maps

O CGE PCH é formado por dois parques, Pedra Cheirosa I e Pedra Cheirosa II, somados eles têm 23 aerogeradores, totalizando uma capacidade de geração de 48,3 MW. Sendo 11 torres no Pedra Cheirosa I enquanto o Pedra Cheirosa II fica com 12.

5.2.1 AEROGERADOR GAMESA G114-2.0

No parque estudado nesse capítulo, o sistema de conversão eólico-elétrico é feito por aerogeradores do modelo Gamesa G114, cada um deles com potência de 2.0 MW. Mas por utilizarem uma tecnologia chamada Max Power, esta permite um aumento na potência nominal das máquinas para 2.1 MW.

A Gamesa é uma empresa espanhola, líder no mercado e na produção mundial de aerogeradores, dentre outras tecnologias. A companhia está no Brasil desde 2008, e construiu sua fábrica no Pólo Petroquímico de Camaçari, região metropolitana de Salvador – BA.

Figura 26: Aerogerador Gamesa G114-2.0



Fonte: wind-turbine-models.com

A altura das torres é de 120 m, com rotor de 114 m de diâmetro onde são instaladas três pás. A geração elétrica é feita numa tensão de 690 V, com velocidade mínima de operação de aproximadamente 2.2 m/s e máxima de 25 m/s de acordo com o catálogo da fabricante, através da gráfico mostrado na Figura 30.

Figura 27: Curva de Geração da Turbina Gamesa G 114 – 2.1 MW



Fonte: Catálogo Gamesa (General Specifications G114)

Uma das inovações encontradas nos modelos da fabricante Gamesa é uma tendência na atualidade em todo o setor, diz respeito ao posicionamento do transformador elevador de tensão. Anteriormente era utilizado na base da torre, nos modelos utilizados no CGE PCH, os mesmos vêm pré instalados e no interior na nacelle.

Figura 28: Nacelle Próxima ao Local de Instalação – CGE PCH



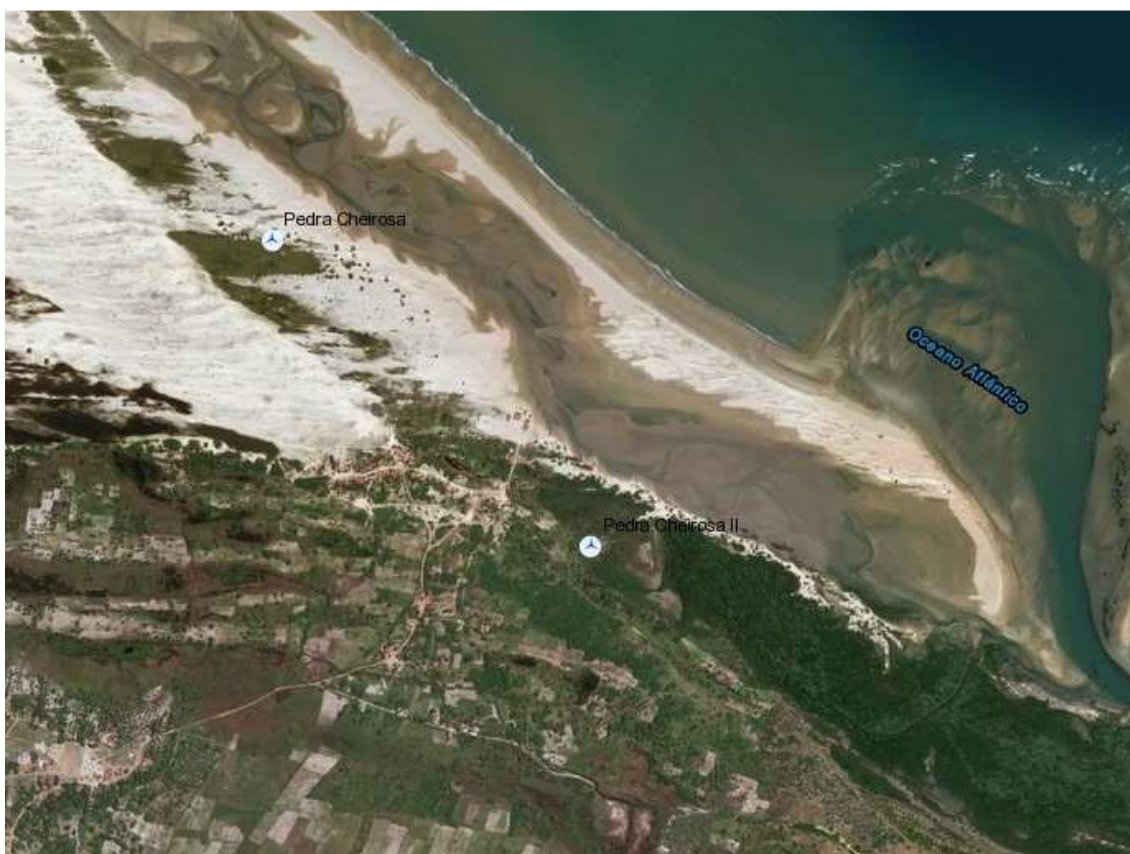
Fonte: O Próprio Autor

5.2.2 O LEIAUTE DO PARQUE EÓLICO (CGE PCH)

A localização desse parque é tão privilegiada quanto a do complexo citado no tópico 5.1, considerando que ficam muito próximos, aproximadamente 8 km de distância. Com uma área total de 754 ha, sendo que 284,5 ha ficam destinados ao Parque Pedra Cheirosa I e 469,5 ha ao Parque Pedra Cheirosa II.

O posicionamento dos aerogeradores é semelhante ao CGE ICZ, formando duas linhas aproveitando o vento predominante do leste. Os dois circuitos são interligados através de um barramento de 34,5 kV.

Figura 29. Vista de satélite da localização do CGE PCH.



Fonte. Google Maps

5.2.3 A REDE DE MÉDIA TENSÃO

Assim como o CGE ICZ, a rede média nesse parque é trifásica, em 34,5 kV, porém é aérea. Os circuitos se interligam seguindo o caminho dos aerogeradores. O dois parques se unem em um barramento antes de seguir para uma subestação elevadora 34,5/230 kV que encontra-se em processo de construção.

6 ANÁLISES COMPARATIVA ENTRE OS PARQUES

Nesse capítulo, serão discutidos as principais diferenças entre os parques estudados anteriormente. Desde suas construções, investimentos e expectativas quando se diz respeito a geração de energia elétrica. Partindo do fato de que ambos empreendimentos têm aerogeradores de mesma potência, porém com diferentes tecnologias e uma esperada melhoria no seu rendimento de geração.

Avaliando os empreendimentos, tem-se um parque já em atividade, com 26 aerogeradores de 2,1 MW, totalizando 54,6 MW instalados. Enquanto que o parque em construção, após finalizado, terá 23 aerogeradores de 2,1 MW, totalizando 48,3 MW instalados. Porém, mesmo com uma quantidade menor de potência instalada, o Parque mais novo deverá ter um melhor aproveitamento na utilização da energia cinética dos ventos. Baseado nas melhorias implementadas em seu projeto.

6.1 COMPARATIVO ENTRE AEROGERADORES

Um dos fatores de maior influência na diferença de rendimento entre os parques analisados são os aerogeradores utilizados, suas principais características construtivas e avanços alcançados ao longo de oito anos passados. Temos que ambas as máquinas possuem 2,1 MW de potência nominal, porém esse valor seria exato se considerássemos um vento constante e em uma velocidade ideal específica para o aerogerador. Como o vento é um fenômeno mutante, a geração não é constante e depende de como a máquina se adapta à variação de velocidade a todo instante.

Tabela 14: Tabela Comparativa entre Aero geradores (S-88 X G-114)

	Suzlon S-88	Gamesa G-114
GERADOR		
Potência Nominal	2.1 MW	2.1 MW
Tensão	600 V	690 V
TORRE		
Altura	80 m	125 m
PÁS		
Quantidade	3	3
Tamanho	43	56
ROTOR		
Diâmetro	88 m	114 m
Área Varrida	6.082 m ²	10,207 m ²
TRANSFORMADOR		
Localização	Base da torre	Nacele

Fonte: Catálogos dos Fabricantes Suzlon e Gamesa

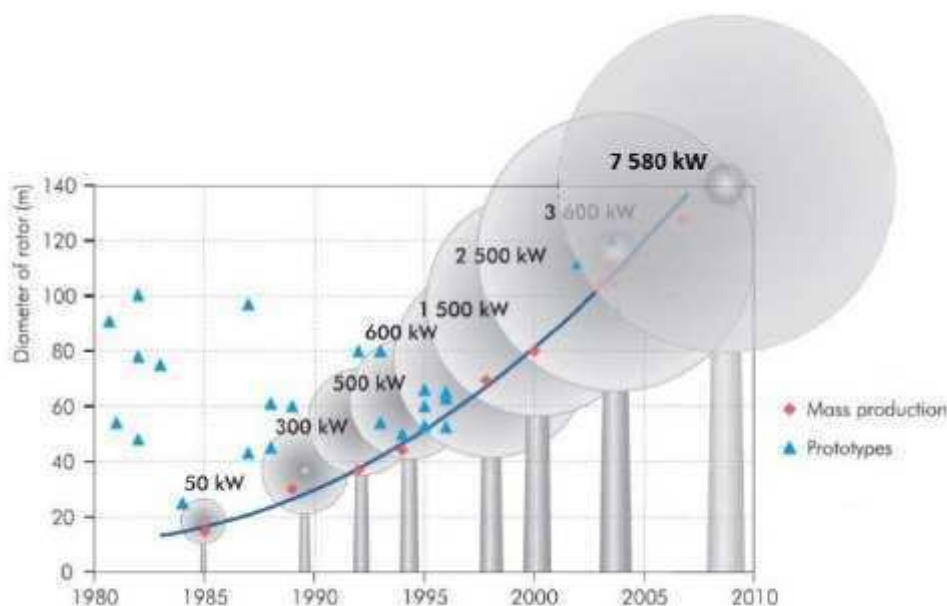
Se falando em geração, ambas as máquinas possuem uma potência nominal de 2.1 MW, sendo que a geração do S-88 é feita a uma tensão de 600 V, enquanto o G-114 gera à uma tensão de 690 V. Mais a frente ambas elevam essa tensão para 34.5 kV e seguem até uma subestação que novamente eleve a tensão para valores de transmissão, para a partir daí interligar com a Rede Nacional de Transmissão.

Em relação a altura, tem-se uma diferença de 45 m comparando as torres dos dois parques estudados. Sendo que o parque em funcionamento tem instalado torres com 80 m de altura, enquanto o mais moderno será instalado a uma altura de 125 m.

A vantagem de estar mais elevado está ligada ao fato de que existe um ganho com o aumento da altura para a geração eólica, pois como foi visto, a energia contida no vento é proporcional a sua velocidade ao cubo, v^3 , aonde v^2 , vem da energia cinética da massa de ar e v , a partir do fluxo de massa de ar. Deste modo, uma pequena variação na velocidade do vento pode ter grande impacto na saída de energia elétrica produzida. Como foi mostrado na Figura 1Figura 6.

Considerando-se a dimensão das turbinas, sabe-se que entre os aerogeradores estudados, enquanto o S-88 apresenta 88 m de diâmetro, o G-114 tem 114 m. Essa diferença de área acarreta em melhorias como será analisado a seguir.

Figura 30. Evolução do tamanho e da potência das turbinas eólicas



Fonte: International Energy Agency (IEA)

Numa análise da Figura 30, pode-se pensar que quanto maior a turbina instalada maior a energia produzida e, portanto, maior retorno sobre o investimento. Porém, essa análise nem sempre é verdadeira, uma vez que existem fatores que determinam o tamanho ideal para as turbinas.

Considerações sobre o local onde será instalada a turbina devem ser avaliadas, como as condições de vento. Quanto maior a potência do gerador, maior será a energia necessária para rodar a turbina. Se quiser instalar uma turbina eólica em um local com baixo potencial eólico, devemos escolher uma turbina com um gerador de baixa potência e um grande rotor. Esta escolha será para maximizar a potência produzida anualmente, aproveitando o modo como a turbina irá operar por mais tempo ao longo do ano.

A explicação é aparentemente simples. Ao aumentar a altura das torres, as máquinas captam ventos com velocidades médias mais altas e constantes, com pouca ou nenhuma turbulência, e são capazes de gerar mais energia. Além disso, o ganho de altura faz com que áreas que antes não ofereciam as condições mínimas para a geração de energia eólica, passem a ser consideradas interessantes para a atividade.

Tendo a máquina da Gamesa, uma área de abrangência do rotor cerca de 40% maior que a da Suzlon, o que garante um maior aproveitamento das correntes de ar e

uma elevação da geração principalmente em situações com pouco vento, onde essa vantagem se mostra muito proveitosa, pois reduz perdas em dias de pouco vento e aumenta a área no gráfico de geração efetiva do aerogerador.

O aumento na altura da torre e nas dimensões do rotor, são fatores muito interessantes se forem considerados os investimentos. O custo com fundações, estradas, ligação a rede elétrica, além de boa parte dos componentes do aerogerador são praticamente independentes de seu tamanho, além do custo de manutenção que também independe das suas dimensões..

Em regiões limitadas e onde fica difícil a instalação de vários aerogeradores, torna-se bastante atrativo a utilização de grandes máquinas. Porém, custos com infraestrutura, utilização de veículos especializados e estradas suficientemente firmes para permitir o transporte de todos os componentes da turbina pode fazer com que pequenas turbinas se tornem mais competitivas.

Nos parques estudados, espera-se um aumento na produção baseado em uma maior altura e no crescimento no diâmetro do rotor. Pois esses fatores influenciam na geração em épocas de vento mais fraco. No caso estudado, este ganho deve ser levado em consideração.

Outro fator bastante importante nessa análise, é a mudança no posicionamento do transformador elevador com a evolução das tecnologias. Uma grande tendência é tornar as energia renováveis cada vez mais acessíveis, criando facilidades para instalação e transporte.

O posicionamento dos transformador elevador dentro da nacelle, trás inúmeras vantagens para a Geração Eólica. Torna a montagem mais fácil, não se faz necessário a construção de uma base para o transformador no solo, nem preocupações com sua instalação. Outra vantagem que vale a pena citar, é a redução do diâmetro dos cabos de descida, já que transmitir em uma tensão elevada (normalmente 34,5 kV), gera bem menos perda por efeito joule que uma transmissão em baixa tensão (600~700 V), pois a elevação da tensão acarreta na redução da corrente. Além disso, no solo o transformador está exposto às condições climáticas e também a possíveis vandalismos.

Um possível inconveniente nessa mudança, seria a temperatura de operação do transformador dentro da nacelle e a dificuldade em um caso de necessidade de manutenção. Por serem equipamentos bastante confiáveis e com vida útil elevada, esse transtorno pode não representar algo preocupante.

Uma diferença que deve ser citada entre os parques analisados, é o tipo de rede de média tensão utilizado em cada um deles. Mesmo ambos sendo de 34,5 kV. Enquanto o CGE ICZ utiliza uma rede subterrânea, o CGE PCH de acordo com o projeto de construção, deve utilizar uma rede aérea. Considerando-se a localização em região litorânea e a forte exposição à maresia, nota-se que a melhor escolha seria a utilização de uma rede subterrânea, com cabos blindados e resguardados de condições extremas. Porém, existe o peso do custo, já que uma rede subterrânea pode chegar a custar o dobro do valor de uma rede aérea. Além disso, considera-se o tempo gasto na construção. Uma rede aérea é bem mais simples e demanda menos tempo, por não envolver escavações durante todo o percurso da linha.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou as noções básicas de funcionamento de uma turbina eólica e de todo um parque eólico. Levou-se em conta a conversão da energia eólica em energia elétrica, as tecnologias empregadas nos modelos de turbinas eólicas e a interligação à rede elétrica.

Fica evidente que se devem fazer investimentos na criação dos mapas eólicos de forma que se possam oferecer estudos mais consistentes de levantamento de velocidades e condições de vento para alocar as turbinas nos parques eólicos. Assim, pode-se evitar o sobredimensionamento das turbinas e, conseqüentemente, reduzir custos desnecessários.

Observou-se, no caso dos parques estudados, vários fatores importantes para a geração. Confrontando tecnologias de épocas distintas e avaliando o peso de cada uma delas para um todo. Avaliando eventuais melhorias associadas ao aumento da altura e do diâmetro do rotor, e os prováveis ganhos que serão conseguidos no novo parque.

Foi observado que as construções de complexos eólicos são muito importantes para o desenvolvimento do estado do Ceará e para a região Nordeste do Brasil. Gerando desenvolvimento e trazendo oportunidades de emprego direto e indireto. São esperados cada vez mais investimentos nesta área.

Um dos parques estudados já encontra-se em funcionamento a quase nove anos, mesmo com os desgastes causados pela exposição a maresia e alguns aerogeradores com defeitos permanentes, ainda gera energia de modo aceitável, enquanto o outro complexo está no início de sua construção e tem previsão para início de funcionamento em 2018.

Por fim, o regime dos ventos demonstra que a fonte eólica é essencial para o Sistema Interligado Nacional – SIN, não somente pela geração efetiva, mas principalmente pela sua maior geração ser justamente em épocas de seca. Os avanços em eficiência conseguidos em dez anos são animadores, pois cada vez mais as energias renováveis, ocupam uma posição de suma importância.

BIBLIOGRAFIA

- Castro, R. M. (2003). *INTRODUÇÃO À ENERGIA EÓLICA, Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Lisboa : UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO DEEC / Secção de Energia.
- ANEEL. (2005). *Atlas de Energia Elétrica* . Brasilia : ANEEL.
- ANEEL. (2008). *Atlas de Energia Elétrica (3ª ed., Vol. 1)*. Brasília: Aneel.
- CRESESB/ CEPEL. (2008). *ENERGIA EÓLICA, PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS*. São Paulo: CRESESB.
- EPE. (2015). *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL*.
- EPE. (2016). *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL* . Rio de Janeiro.
- Millais, C. (2005). *Wind Force 12: segurança global a partir do vento*. Rio de Janeiro: Revista Eco 21.
- ANEEL. *Matriz Energética do Brasil*. ANEEL, 2013. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=7&ger=Outros&principal=E%C3%B3lica>> .
- AMARANTE, O.A.C.; ZACK, J.; BROWER, M.; SÁ, A.L. *Atlas do Potencial Eólico brasileiro do Brasil*. Brasília, 2001. BOCCARD, N. *Capacity factor of Wind Power realized values vs. estimates* –
- DUTRA, R.M. *Propostas de políticas Específicas para Energia Eólica no Brasil após a Primeira Fase do PROINFA*. Rio de Janeiro, 2007.
- ECOENERGIA, *Tecnologias: Turbinas Eólicas*, Revista Ecoenergia. Disponível em:
<<http://www.revistaecoenergia.com.br/artigo.php?id=5>>.
- ENERGIALATERAL, *Energia Eólica, Energia Lateral*. Disponível em:
<<http://energialateral.pt/energia-eolica.html>>.
- EWEA, 2002, *European Best Practice Guidelines for implementation of wind energy projects*. [S.l.]: European Wind Energy Association. Disponível em:
<http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/wind_energy/2002_best_practice.pdf>.
- FOCUS, *Wind Power, Renewable Energy Focus* . Disponível em:
<<http://www.renewableenergyfocus.com/category/61/wind-power/>>.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. *Roadmap towards a Competitive European Energy Market*. Copyright @ 2012 World Energy Council, 2010. 78
- GWEC. *Global statistics*. GWEC, 2013. Disponível em:
<<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>>.
- IEA, *Evolução Turbinas Eólicas*, International Energy Agency. Disponível em:
<<http://fqnosecundario.ning.com/photo/evolucao-turbinas-eolicas>>.
- RENOVÁVEIS, *Energia Eólica, Energias Renováveis*. Disponível em:
<<http://aero-mini.blogspot.com.br>>.

SUZLON, Parque eólico no Ceará, SUZLON. Disponível em:

< <http://luizabrito67.blogspot.com.br/2012/03/indiana-suzlon-vende-100-de-seu-parque.html>>.

THE WIND POWER. Turbines list. The Wind Power, 2013. Disponível em:

<http://www.thewindpower.net/manuturb_turbines_en.php>..

UFCG - Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso – André Silva Fiuza - 2015

UFCG - Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso – Kennedy Luna - 2013

UFCG - Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso – Antônio Araújo Neto - 2013