

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

RUI FRANCISCO URTIGA JÚNIOR

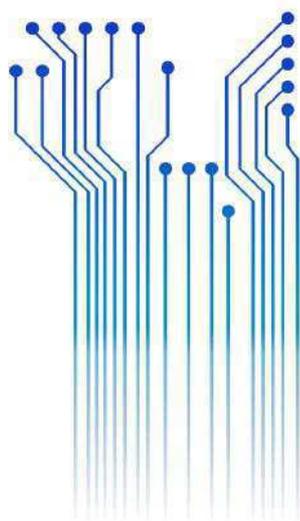


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DO COMPLEXO EÓLICO DE SANTA LUZIA



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

RUI FRANCISCO URTIGA JÚNIOR

ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DO COMPLEXO EÓLICO DE SANTA LUZIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso 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: Geração de Energia Eólica

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande
2018

RUI FRANCISCO URTIGA JÚNIOR

ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DO COMPLEXO EÓLICO DE SANTA LUZIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso 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: Geração de Energia Eólica

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais pelo eterno suporte, apoio e compreensão durante toda minha vida, em especial na minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço imensamente à Deus, que com sua infinita bondade e misericórdia me guiou durante todo o meu trabalho, minha vida e minhas escolhas. À Ele toda honra, toda glória e todo louvor.

Agradeço à minha mãe Ana Maria, que com o mais profundo e sincero amor e zelo sempre me apoiou e deu forças em minhas escolhas, a meu pai Rui Urtiga, por ser o maior exemplo de dedicação, força e perseverança e por me ensinar o poder que a educação tem para transformar a vida de uma pessoa, e às minhas irmãs Tatiana, Poliana e Luciana pela preocupação e por estarem sempre dispostas a me ajudar. Sem estes seria impossível continuar na caminhada.

Aos meus amigos de jornada acadêmica: Rodrigo Torres, Rogério Souto, Rodolfo Soares, Jonas Ribeiro, Marcus Marinho, Luís Alberto e Elioenai Lincon, por dividirem comigo alguns momentos de tristeza, de angústia e de incertezas, mas principalmente inúmeros outros momentos de muita alegria, felicidade e superação, que com absoluta certeza tornaram meus dias na universidade mais leves.

Agradeço também à minha namorada, Rafaelle Amado, pelo companheirismo, pelos conselhos e pelo carinho em ajudar nos momentos mais difíceis.

Ao professor Leimar de Oliveira, agradeço pela orientação e contribuição do seu saber para a realização desse trabalho, pela paciência, por estar sempre disposto a ajudar e pelos ensinamentos valiosíssimos que vão além da esfera acadêmica e que os carregarei para vida.

Por fim, agradeço com carinho a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

*“Life is just a test with many failures
and some success, but I will place my best
and I will leave here with no regrets.”*

Mike Love.

RESUMO

O trabalho apresenta um estudo de caso da geração eólica tomando como base o Complexo Eólico de Santa Luzia, situado no estado da Paraíba, Brasil. Para tal, analisou-se as condições de vento e características geográficas do local, o layout do complexo, os equipamentos que compõem o complexo, sua capacidade instalada e o investimento em si. O trabalho realiza uma abordagem histórica e contextualiza a energia eólica num panorama abrangendo o mundo e em especial o Brasil. Uma revisão bibliográfica é feita acerca dos princípios básicos de geração eólica, funcionamento de um aerogerador bem como as partes que o compõe e suas tecnologias.

Palavras-chave: Energia Eólica, Complexo Eólico, Parque Eólico, Aerogeradores, Turbina Eólica.

ABSTRACT

This paper presents a case study of wind generation based on the Santa Luzia Wind Complex, located in state Paraíba, Brazil. For this, the wind conditions and geographic characteristics of the site, the layout of the complex, the equipment that composes the complex, its installed capacity and the investment itself were analyzed. The work takes a historical approach and contextualizes wind energy in a panorama covering the world and especially Brazil. A bibliographical review is made about the basic principles of wind generation, the operation of a wind turbine as well as the parts that compose it and its technologies.

Keywords: Wind Energy, Wind Complex, Wind Farm, Wind Turbines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidade eólica instalada global 2001 - 2017.....	17
Figura 2 – Capacidade instalada adicionada em 2017	19
Figura 3 – Capacidade instalada acumulada em 2017	19
Figura 4 – Velocidade média anual do vento a 50 metros de altura	20
Figura 5 – Preço de eólica nos leilões.....	21
Figura 6 – Capacidade instalada eólica – 1992 a 2016	22
Figura 7 – Distribuição geral dos ventos.....	25
Figura 8 – Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.....	27
Figura 9 – Variação da potência com a velocidade do vento.....	28
Figura 10 – Característica $C_p(\lambda,\beta)$ traçadas em função de aproximações numéricas.....	29
Figura 11 – Relação coeficiente de potência/número de pás	30
Figura 12 – Característica elétrica de um gerador eólico de 660 kW	31
Figura 13 – Turbina de eixo vertical.....	32
Figura 14 – Rotores de eixo horizontal.....	34
Figura 15 – Vista do interior da nacela de uma turbina eólica utilizando um gerador convencional.....	35
Figura 16 – Pás de um aerogerador Siemens	36
Figura 17 – Cubo para conexão de pás	36
Figura 18 – Caixa de engrenagens conectado ao gerador.....	37
Figura 19 – Gerador convencional.....	38
Figura 20 – Torre de um aerogerador	39
Figura 21 – Curva de potência para diferentes configurações de controle	40
Figura 22 – Localização do Complexo Eólico de Santa Luzia	43
Figura 23 – Mapeamento eólico anual da Paraíba a 100 metros de altura.....	44
Figura 24 – Mapeamento eólico da microrregião do Seridó Ocidental	45
Figura 25 – Relevo da microrregião do Seridó Ocidental.....	46
Figura 26 – Rugosidade da microrregião do Seridó Ocidental.....	47
Figura 27 – Área do Complexo Eólico de Santa Luzia.....	48
Figura 28 – Distribuição dos aerogeradores no Complexo Eólico de Santa Luzia.....	48
Figura 29 – Espaçamento entre turbinas	50
Figura 30 – Localização da SE Lagoa.....	50
Figura 31 – SE Lagoa.....	51
Figura 32 – Preparação da base do aerogerador G114.....	52
Figura 33 – Montagem da torre do aerogerador G114.....	52
Figura 34 – Nacela do aerogerador G114	53
Figura 35 – Esquema de um gerador do tipo DFIG	53
Figura 36 – Curva de potência do aerogerador G114	54
Figura 37 – Pás do aerogerador G114.....	54
Figura 38 – Montagem completa do aerogerador G114	55
Figura 39 – Expansão prevista do Complexo Eólico de Santa Luzia	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração e potência por estado - 2016	23
Tabela 2 – Capacidade máxima instalável na microrregião do Seridó Ocidental.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E

TERMOS EM INGLÊS

GWEC	Global Wind Energy Council
INCT-Clima	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
Chesf	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
Atecel	Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
SIGEL	Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico
u	Velocidade do vento
P_m	Potência mecânica
P_{disp}	Potência mecânica disponível
C_p	Coefficiente de potência
P_e	Potência elétrica
a	Área de varredura das pás
E	Energia cinética
ρ	Massa específica do ar
λ	Razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente
β	ângulo de passo das pás do aerogerador
DFIG	<i>doubly fed induction generator</i> – gerador de indução duplamente alimentado

SE	Subestação
VA	Volt-ampère
kVA	Quilovolt-ampère (10^3 VA)
MVA	Megavolt-ampère (10^6 VA)
TSR	<i>tip-speed ratio</i>
W	Watt
kW	Quilowatt (10^3 W)
MW	Megawatt (10^6 W)
GW	Gigawatt (10^9 W)
TW	Terawatt (10^{12} W)
m/s	Metros por segundo
TWh/ano	Terawatt hora por ano
US\$/MWh	Dólar por megawatt hora
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
km	Quilometro (10^3 M)
km ²	Quilometro quadrado
rpm	Revoluções por minuto
z_0	Comprimento de rugosidade aerodinâmico
V	Volt
kV	Quilovolt (10^3 V)
A	Ampère
kA	Quiloampère (10^3 A)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CNP	Conselho Nacional de Petróleo
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
INB	Indústrias Nucleares Brasileiras

SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
1.1	Objetivos	14
1.2	Estrutura do Trabalho.....	15
2	Panorama da Energia Eólica	16
2.1	História	16
2.2	Energia Eólica no Mundo.....	17
2.3	Energia Eólica no Brasil.....	20
3	Embasamento Teórico.....	25
3.1	O Recurso Eólico	25
3.2	Energia e Potência Extraída do Vento.....	26
3.3	Turbina Eólica	31
3.4	Rotor de Eixo Vertical.....	32
3.5	Rotor de Eixo Horizontal	33
3.5.1	Nacele.....	34
3.5.2	Pás, Cubo e Eixo	35
3.5.3	Transmissão e Caixa Multiplicadora.....	37
3.5.4	Gerador.....	37
3.5.5	Torre.....	39
3.6	Mecanismo de Controle	39
4	Estudo de Caso	41
4.1	O Investimento	42
4.2	Empresas Envolvidas	42
4.3	Local de Instalação	43
4.4	<i>Layout</i> do Complexo Eólico.....	47
4.5	Aerogerador.....	51
4.6	Futuro do Complexo.....	55
5	Conclusões	57
	Referências Bibliográficas	58

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma das formas de energia mais importantes para a humanidade e desde o seu descobrimento tornou-se componente fundamental para o avanço e desenvolvimento das economias. O crescimento industrial, melhoria da qualidade de vida e o desenvolvimento tecnológico de uma sociedade demandam energia e resultam em aumento dos recursos energéticos. Deste modo, é possível observar profunda relação entre desenvolvimento econômico, social e tecnológico com o aproveitamento de seus recursos energéticos.

Inicialmente, vários foram os métodos e as fontes utilizadas para gerar energia elétrica em grande escala para suprir a demanda de um mundo em contínuo crescimento populacional, sendo a maioria das fontes não-renováveis ou renováveis que geravam grande impacto ambiental. Visando atender a curto prazo a crescente demanda por energia elétrica e aliada a um interesse por uma energia mais limpa e com menos impactos ambientais, a busca por fontes renováveis com menos impactos vem ganhando cada vez mais destaque no mercado de geração de energia.

Dentre as fontes de energia renováveis, a energia eólica é considerada uma das mais promissoras por ter uma característica “limpa”, sustentável e mais viável se comparada a outras novas fontes renováveis.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo fazer um estudo sobre a geração eólica, analisando a história do seu desenvolvimento, o princípio de funcionamento, sua utilização como fonte de energia no Brasil e no mundo, as partes que compõem um parque eólico, bem como um aerogerador.

Em seguida é feito um estudo do complexo eólico Canoas, Lagoa 1 e Lagoa 2, situados nos arredores do município de Santa Luzia, interior do estado da Paraíba, levando em consideração assuntos pertinentes como a história do empreendimento e empresas envolvidas, leiaute dos parques, características geográficas, aspectos técnicos

como potência instalada, custo de implementação, modelo dos aerogeradores, previsão de geração de energia elétrica.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, onde o primeiro apresenta uma visão geral do tema abordado e se constitui na própria introdução.

No segundo Capítulo será abordada uma breve história da energia eólica e o panorama da energia eólica no mundo e no Brasil, mostrando os aumentos na capacidade instalada que ocorreram nos últimos anos.

No terceiro Capítulo será feita uma revisão bibliográfica abordando os principais conceitos para o entendimento da geração de energia eólica, desde a origem dos ventos, a potência disponível nele, composição do sistema de geração e modelos de turbinas.

No quarto Capítulo será apresentado o estudo de caso referente ao Complexo Eólico de Santa Luzia, abordando informações técnicas do projeto, características geográficas e eólicas do local de instalação, *layout* do complexo, equipamentos utilizados, além de informações sobre o empreendimento.

No quinto e último Capítulo, serão feitas as considerações finais sobre o estudo, levando em consideração as informações apresentadas no Capítulo anterior.

2 PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA

A Energia Eólica vem ganhando destaque tendo uma verdadeira evolução, sendo observada com uma das mais promissoras fontes de energia renováveis, isso porque os avanços tecnológicos fazem com que os equipamentos utilizados para a geração de energia elétrica tenham custo cada vez menor devido ao aumento na demanda, além de possuírem bom desempenho e grande confiabilidade.

2.1 HISTÓRIA

Há indícios que no ano 400 a.C indianos e chineses já usavam o vento para elevação de água e moagem de grãos. Com o passar dos séculos o homem foi adaptando o vento as suas necessidades de acordo com a tecnologia de suas épocas. Na década de 1930, países como França e Estados Unidos tentaram a usar o vento como fonte geradora de eletricidade. Apesar do conhecimento sobre a geração de eletricidade ser antigo, só a partir da década de 70 do século passado, quando o mundo estava passando por uma grande crise no abastecimento de petróleo, houve um intenso esforço na pesquisa da energia eólica como fonte de energia elétrica a fim de que houvesse a diversificação na matriz energética e conseqüentemente mais segurança no abastecimento elétrico.

Durante a década de 80 e 90, países como Dinamarca, Alemanha e Estados Unidos receberam forte estímulo do mercado energético para geração eólica. Esse estímulo permitiu que o aproveitamento eolielétrico atingisse escala de contribuição mais significativa em termos de geração e economia. O desenvolvimento tecnológico passou a ser conduzido pelas novas indústrias do setor em regime de competição, alimentado por mecanismos institucionais de incentivo, especialmente via remuneração por energia produzida. Assim, o mercado de energia eólica passou a crescer cada vez mais nas décadas seguintes.

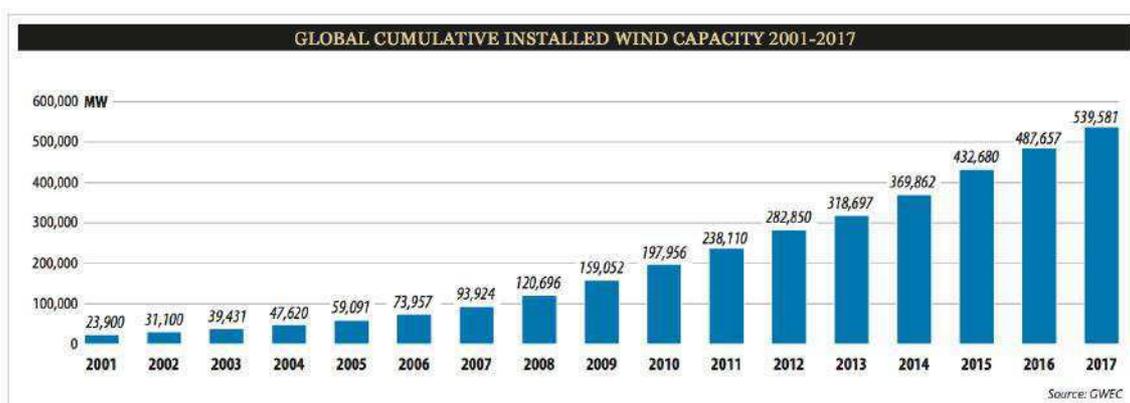
A seguir, será apresentado como a geração de energia eólica vem se desenvolvendo ao redor do mundo e do Brasil.

2.2 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

As vantagens da energia eólica como fonte de energia renovável amplamente disponível juntamente com o alto custo da produção de energia de fontes não renováveis vem fazendo com que vários países estabeleçam incentivos e direcionem investimentos que regulamentam e estimulam a geração de energia eólica.

Segundo o relatório “Global Wind Statistics 2017” feito e divulgado pelo Conselho Global de Energia Eólica (The Global Wind Energy Council – GWEC) em fevereiro de 2018, mostra que a capacidade global acumulada de produção de energia eólica, apesar de variações, continua aumentando, tendo passado de 23 GW em 2001, para 539 GW em 2017, conforme é observado na Figura 1.

Figura 1 – Capacidade eólica instalada global 2001 - 2017



Fonte: GWEC, 2018.

A capacidade eólica instalada até o final de 2017 é o suficiente para suprir cerca de 5% da demanda global de eletricidade. Para muitos países, a energia eólica se tornou o pilar na estratégia de substituir energias fósseis e nucleares, como foi o caso da Dinamarca que em 2017 estabeleceu um novo recorde, alcançando um percentual de 43% do seu consumo de energia sendo provindos da geração eólica.

A energia eólica também vem se destacando em outros países. A China, Estados Unidos, Alemanha, Índia e Espanha são os que possuem maior representação na capacidade instalada global. Juntos, esses países contribuem com 72% da capacidade eólica mundial.

A China instalou uma capacidade adicional de 19,5 GW em 2017, representando 37% de todo o incremento mundial no ano, continuando como o país líder em geração de energia eólica, tendo uma capacidade acumulada de 188,2 GW. Com os crescentes números, a China está caminhando para que a fonte principal de geração de energia do país seja a energia eólica em conjunto com as demais fontes renováveis.

No mesmo ano, os Estados Unidos adicionou 7 GW de energia eólica, o que representou um aumento de 13% chegando a 89 GW acumulado em sua potência instalada. O país vem demonstrado crescimento considerável após a crise de 2013 e já representa 17% da potência instalada no mundo e tende a continuar no mesmo ritmo de crescimento nos próximos anos.

Ainda em 2017, a Alemanha teve um crescimento de 13% em energia eólica com a adição de 6,6 GW, chegando ao acumulado de 56,1 GW, representando 10% do total de potência mundial instalada. Tal crescimento se deve às mudanças na legislação da energia renovável, o que pode levar a um abrandamento do mercado alemão nos próximos anos.

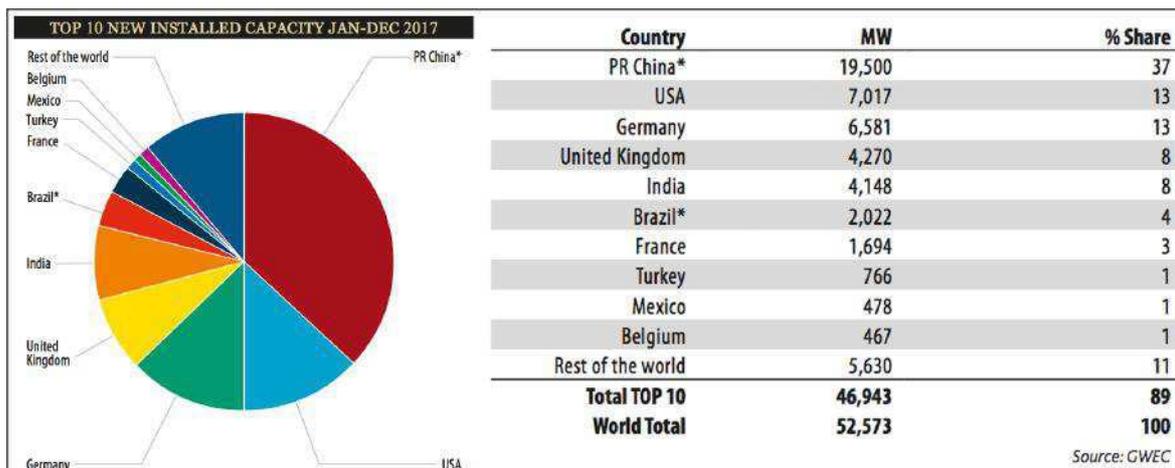
A Índia aumentou em 8% sua capacidade instalada de geração eólica com os 4,1 GW adicionados em 2017, se mantendo como segunda maior em capacidade instalada no continente asiático, atrás apenas da China. Esse resultado é bastante significativo, pois o país possui um renda per capita baixa e não possui o mesmo nível de desenvolvimento dos países primeiros colocados no ranking.

O Reino Unido ganhou destaque em 2017 devido ao crescimento de 4,3 GW em sua capacidade eólica instalada. Apesar de seu crescimento ser semelhante ao crescimento da Índia, os países do Reino Unido ainda não estão entre os cinco primeiros colocados do ranking mundial, mas apresenta potencial para melhor colocação nos próximos anos.

Já a Espanha, assim como outros países da Europa, não apresentou considerável crescimento no ano de 2017. A estagnação se deve às novas políticas em tarifas adotadas pela União Europeia que criam dificuldades, sobretudo para pequenos e médios investidores. Apesar disto, o país ainda se mantém entre os cinco primeiros países com maior potência eólica instalada.

As informações apresentadas estão compiladas de forma gráfica na Figura 2 a seguir.

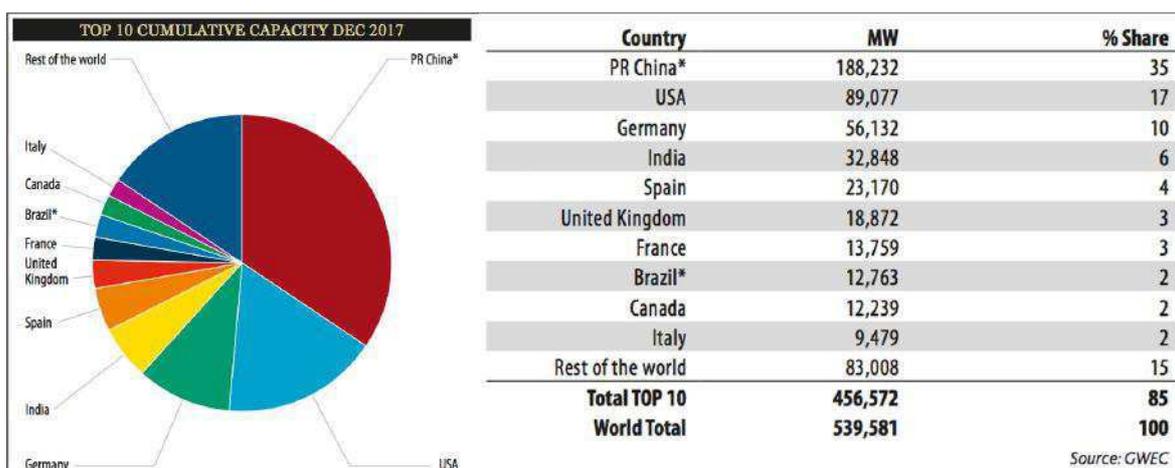
Figura 2 – Capacidade instalada adicionada em 2017



Fonte: GWEC, 2018.

A capacidade instalada acumulada após as novas adições em 2017 pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Capacidade instalada acumulada em 2017



Fonte: GWEC, 2018.

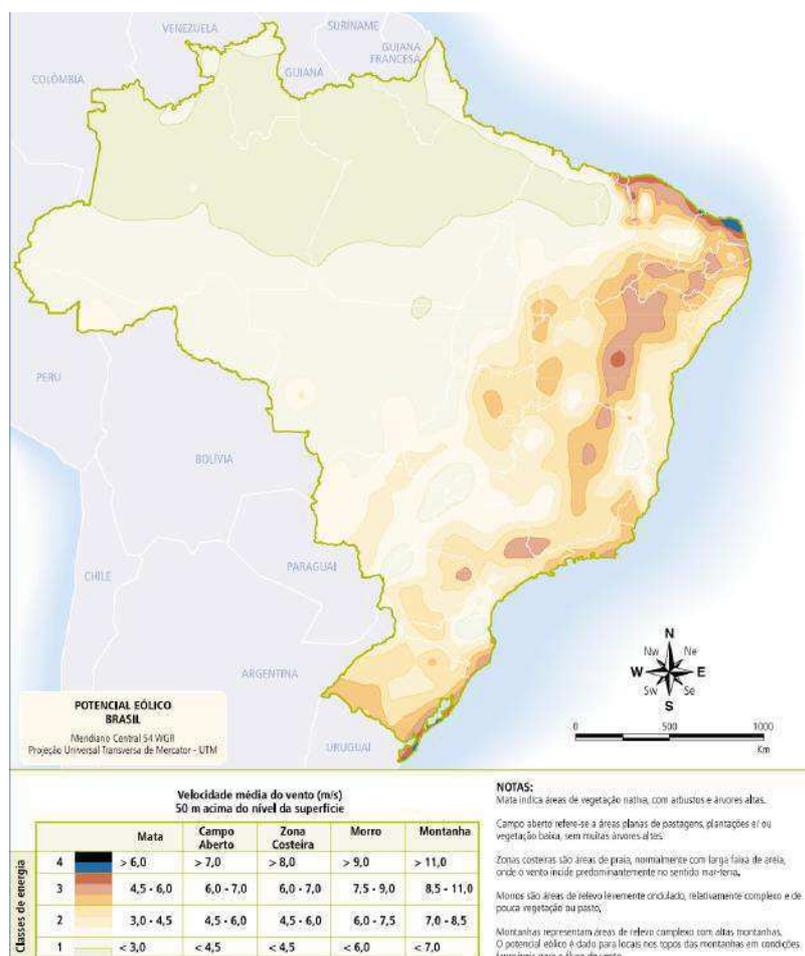
A crescente utilização da energia eólica, aliada ao avanço tecnológico na área, aumenta a competitividade em relação a outras fontes de geração de energia. Esta situação é refletida no preço da energia gerada, que torna-se também mais competitivo e faz com que o mesmo fique mais barato que a energia de outras fontes, como por exemplo, a fósil, que varia com o preço do petróleo. Apesar dos preços estarem caindo, a eliminação de subsídios em diversos países prejudicou os investimentos para a geração de energia eólica.

A seguir, apresenta-se o panorama brasileiro da energia eólica.

2.3 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O Brasil possui vantagens geográficas que favorecem a exploração do recurso eólico, como uma extensão territorial imensa e uma costa litorânea com mais de 8.000 km de extensão, além de ventos com velocidades médias superiores ao de países expoentes na geração de energia eólica.

Figura 4 – Velocidade média anual do vento a 50 metros de altura



Fonte: FEITOSA, E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília: Dupligráfica, 2003.

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, o potencial de energia eólica se aproveitado em sua totalidade foi estimado em mais de 272 TWh/ano mas, segundo pesquisas do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-Clima), estima-se que o potencial atual seja cerca de seis vezes maior que o estipulado em anteriormente devido aos avanços tecnológicos, que permitiram o

desenvolvimento de aerogeradores com altura cada vez mais elevada, permitindo exploração do recurso do vento a alturas até então não realizáveis.

O início do uso do recurso eólico como fonte geradora de energia elétrica no Brasil se deu em 1992, ano em que foi instalada a primeira turbina eólica do país, na ilha de Fernando de Noronha, como forma de atender à demanda elétrica na região. No entanto, o ponto de partida do setor eólico brasileiro foi dado pela Lei 10.438 de abril de 2002, que instituiu a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa). O programa contava com o apoio do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e tinha como objetivo principal financiar projetos de geração de energia elétricas através de fontes renováveis. Na época, o Proinfa contratou cerca de 1,4 GW de potência, porém na época a energia eólica era mais cara do que as pequenas centrais hidroelétricas e térmicas a biomassa, que eram as outras fontes incentivadas pelo programa.

A partir do ano de 2006, o governo passou a lançar, através da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Plano Decenal de Expansão de Energia. O plano é um documento informativo voltado para toda a sociedade contendo indicações e informações das perspectivas de expansão futura do setor de energia sob a ótica do Governo num horizonte de dez anos. Assim, com a crescente demanda por energia, o plano aponta para o crescimento da geração de energia elétrica. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) promove leilões para garantir a expansão do mercado de energia, seja de geração, de transmissão ou de distribuição.

Em 2009 ocorreu o primeiro leilão exclusivo de energia eólica no Brasil, que deu início a uma fase competitiva, na qual o parque mais eficiente e mais barato era o ganhador. Os preços recuaram imediatamente, atingindo o menor valor em 2012. Em 2013 e 2014 houve uma pequena recuperação. Em 2015 os preços passaram a subir em razão da desvalorização do Real face ao Dólar, porém mantiveram uma trajetória quase constante nos valores em US\$/MWh. Os primeiros geradores contratados no leilão de 2009 entraram em operação em 2011.

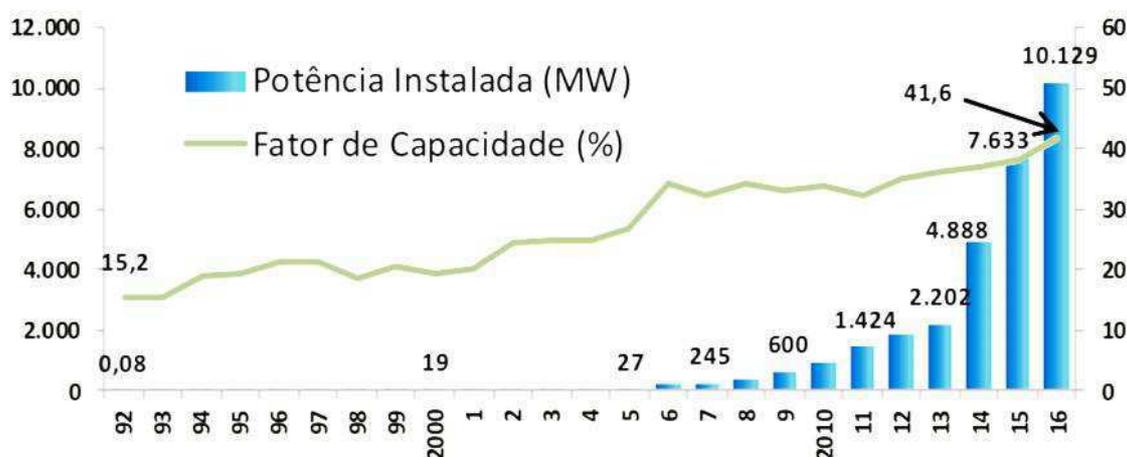
Figura 5 – Preço de energia eólica nos leilões



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2017.

No Brasil, o fator de capacidade (relação entre potência efetivamente gerada e potência instalada ao longo de um tempo) aumentou nos últimos anos, assim como ocorreu em outros países, devido ao crescimento do porte das instalações, do desenvolvimento tecnológico, além da escolha de melhores sítios. Em 2016 o Brasil foi o 7º país entre os maiores geradores de eólica, apresentando considerável crescimento no ranking (10º em 2014 e 15º em 2013), o 5º na expansão de potência (2,5 GW) e o 1º em fator de capacidade (41,6%), este último superando o mundial em 68%.

Figura 6 – Capacidade instalada eólica – 1992 a 2016



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2017.

Segundo o Ministério de Minas e Energia, até o mês de Agosto de 2017, 17,7 GW de potência de eólica estavam contratados, dos quais 11,5 GW estavam em operação, 3,4 GW em construção e 2,8 GW aptos para iniciar a construção.

Em 2018, o Brasil atingiu a marca de 13 GW de capacidade instalada de energia eólica, com 518 parques e mais de 6.600 geradores. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o montante gerado pelas eólicas equivale ao consumo médio de 24 milhões de residências por mês.

A maior parte da geração eólica no Brasil se concentra na região do Nordeste devido as condições favoráveis de vento. O estado do Rio Grande do Norte, que em anos anteriores importava energia para suprir a demanda, é hoje o estado com maior geração de energia eólica com 3,7 GW de potência instalada e 137 parques eólicos em operação. Outros estados que se destacam são Bahia, Ceará, Piauí, Pernambuco e Paraíba.

Tabela 1 – Geração e potência por estado - 2016

Estado	Geração (GWh)	Estrutura da Geração (%)	Potência Instalada (MW)	Fator de Capacidade (%)	Expansão no Ano (MW)
RN	11.616	34,7	3.312	44,8	923
BA	6.295	18,8	1.750	46,5	532
RS	4.671	13,9	1.619	33,6	86
CE	4.956	14,8	1.539	39,8	304
PI	3.133	9,4	885	48,4	382
PE	2.238	6,7	648	46,8	269
SC	283	0,8	243	13,3	0
PB	163	0,5	69	27,0	-
SE	63	0,2	35	20,9	-
RJ	68	0,2	28	27,9	-
PR	3	0,0	3	15,4	-
Brasil	33.489	100	10.129	41,6	2.496

Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2017.

Na Paraíba, a geração de energia eólica tem crescido nos últimos anos. Até o ano de 2016 o estado tinha apenas dois parques eólicos em funcionamento, e o parque eólico do município de Alhandra e o parque eólico Vale dos Ventos, localizado no município de Mataraca, sendo este o maior e mais expressivo até então. Em operação desde 2009, o parque é composto por 60 turbinas com 800 kW cada e capacidade instalada de 48 MW.

Em novembro de 2014 foi realizado o leilão A-5, promovido pela Aneel na qual a Força Eólica do Brasil (empreendimento conjunto das empresas Neoenergia e

Iberdrola) foi vencedora. O projeto resultou na instalação de três parques eólicos: Canoas, Lagoa I e Lagoa II, localizados entre os municípios de Santa Luzia, São José do Sabugi e Junco do Seridó, que conjuntamente somam 94,5 MW de potência instalada encontram-se em operação desde 2017.

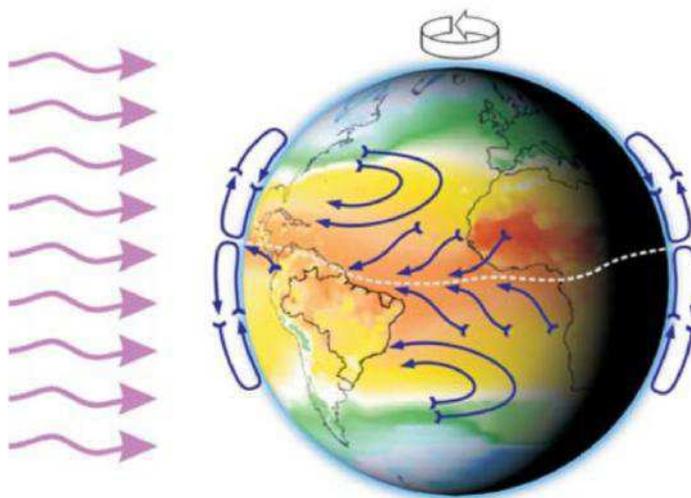
Um dos empecilhos que dificultou o investimento no setor eólico no Estado da Paraíba nos últimos anos foi a inexistência de um atlas eólico da região. No entanto, em 2017 o Governo do Estado apresentou o Atlas Eólico da Paraíba, desenvolvido em convênio com Ministério de Minas e Energia, a Eletrobrás, a Chesf, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), a Universidade Federal de Campina Grande, a Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior (Atecel). Espera-se que com a recente publicação do atlas e com o crescimento do mercado energético, o setor eólico receba cada vez mais investimentos no estado.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 O RECURSO EÓLICO

Os ventos são causados pela diferença de pressão ao longo da superfície terrestre, que por sua vez são causadas pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, onde as regiões tropicais recebem os raios solares quase que perpendiculares e por isso são mais aquecidas do que as regiões polares. Como consequência, o ar quente das regiões tropicais mais baixas tende a subir, sendo substituídas pelo ar frio proveniente das regiões polares. São os deslocamentos dessas massas de ar que determina a formação do vento. Assim, o vento é originário da radiação solar e dos próprios movimentos da Terra.

Figura 7 – Distribuição geral dos ventos



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

Devido ao aquecimento na região do equador e esfriamento nas regiões polares serem constantes, acarreta na formação de ventos que são constantes, estes, são chamados de planetários ou constantes, que são classificados em:

- Alísios – ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes;

- Contra-Alísios – Ventos que sopram do equador para os polos em altas altitudes;
- Ventos do Oeste – Ventos que sopram dos trópicos para os polos;
- Polares – Ventos que sopram dos polos para as zonas temperadas.

Há também os ventos chamados de monções, que tem como característica a mudança na sua direção de acordo com a época do ano. No geral, a cada 6 meses o vento desse passa a soprar no sentido inverso.

As brisas são o tipo de vento que caracterizam-se por serem periódicos e que sopram do mar para o continente e vice-versa, e são provenientes em função das diferentes capacidades de absorver, refletir e emitir o calor recebido do sol inerentes à cada tipo de superfície, como continentes e mares. No período diurno, a terra tem uma capacidade maior de refletir raios solares, logo, a temperatura do ar aumenta, e como consequência, é formada uma corrente de ar que sopra do mar para a terra, chamada brisa marítima. Ao passo que, durante a noite, a temperatura da terra diminui mais rápido que a temperatura da água, ocasionando na brisa terrestre, que sopra da terra para o mar. A brisa marítima apresenta uma intensidade maior do que brisa terrestre devido à maior diferença de temperatura que ocorre durante o período diurno.

Os ventos que se manifestam tanto em escala global quanto em escala local são influenciados por diferentes aspectos tais como altura, rugosidade, relevo e obstáculos. Os ventos mais intensos ocorrem a cerca de 10 quilômetros acima da superfície terrestre, sendo inviável sua exploração, restando apenas algumas dezenas de metros acima da superfície terrestre em que é possível explorar tal recurso. No entanto, a baixas alturas, o vento é mais afetado pela proximidade com a superfície terrestre e seus obstáculos como construções, prédios e árvores, resultando na diminuição de sua velocidade.

Estima-se que aproximadamente 2% da energia solar absorvida pela Terra seja convertida em energia cinética dos ventos. Embora esse percentual pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

3.2 ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO

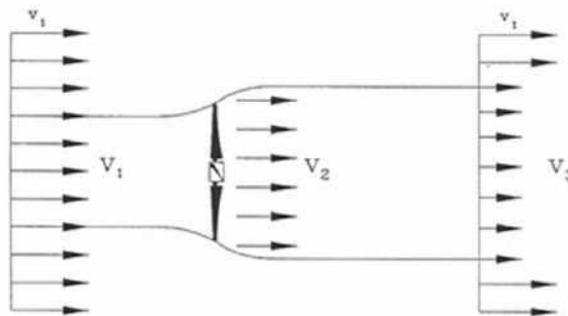
Para gerar energia elétrica através da geração eólica é necessário o entendimento da energia cinética do vento, a qual é responsável pelo movimento das pás de um aerogerador. A energia cinética de uma massa de ar pode ser calculada pela Equação 1.

$$E = \frac{1}{2} * \rho * u^2 \quad (1)$$

onde E é energia cinética, ρ é a massa de ar e u é a velocidade do vento (m/s)

A potência disponível no vento é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade constante. Esta coluna de ar, por sua vez, atravessa a secção transversal de área a (m²) do rotor da turbina, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina



Fonte: DUTRA, 2011.

A potência disponível no vento é portanto:

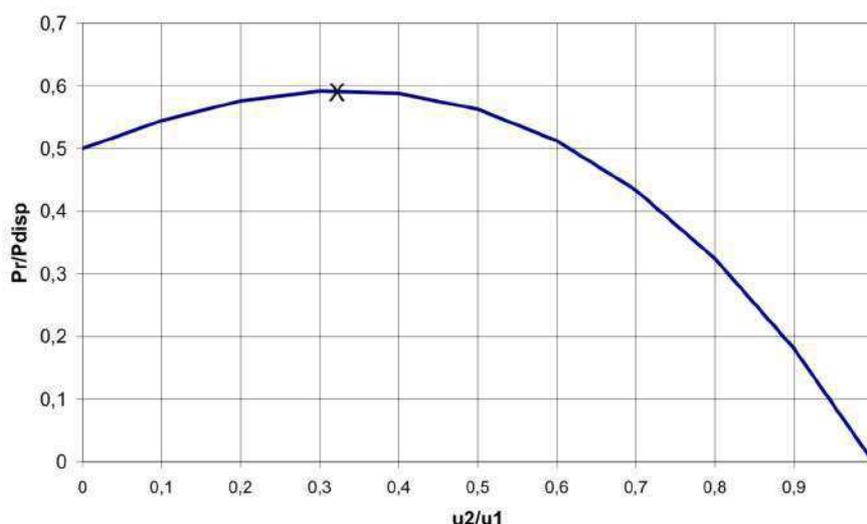
$$P_{disp} = \frac{1}{2} * \rho * a * u^3 \quad (2)$$

onde ρ é a massa de ar, a é a área da secção transversal (m²) e u é a velocidade do vento (m/s).

Percebe-se através da Equação 2 que a potência contida no vento é bastante sensível à velocidade do vento que atravessará as pás do aerogerador. Caso a velocidade duplique, a potência aumenta oito vezes e caso a velocidade seja reduzida pela metade, a potência é reduzida a 12,5%. Isto enfatiza a importância de um estudo prévio do local onde a turbina será instalada para sucesso econômico do projeto eólico.

A potência disponível no vento não é integralmente convertida em potência mecânica no eixo do rotor, uma vez que existe velocidade do vento após passar pelas pás do aerogerador, indicando que há um rendimento no sistema. Em outras palavras, apenas uma parcela da potência disponível no vento é convertida em potência mecânica. Com a aplicação de conceitos de mecânica dos fluidos é possível demonstrar o limite de um máximo teórico para conversão eólico-mecânica conhecido como o Limite de Betz. Este limite é de aproximadamente 59,3%. Ou seja, de toda a energia eólica disponível no vento, no máximo 59,3% será convertida em energia mecânica. No entanto, cabe ressaltar que existem restrições tecnológicas que fazem com que a potência máxima extraível seja inferior a esse limite. Na Figura 9 é possível observar com mais clareza o Limite de Betz.

Figura 9 – Variação da potência com a velocidade do vento



Fonte: CASTRO, 2009.

O rendimento efetivo da conversão numa turbina eólica, o qual relaciona a potência mecânica e potência disponível no vento, é também conhecido como o coeficiente de potência, ou C_p e depende da velocidade do vento:

$$C_p(u) = \frac{P_m}{P_{disp}} \quad (3)$$

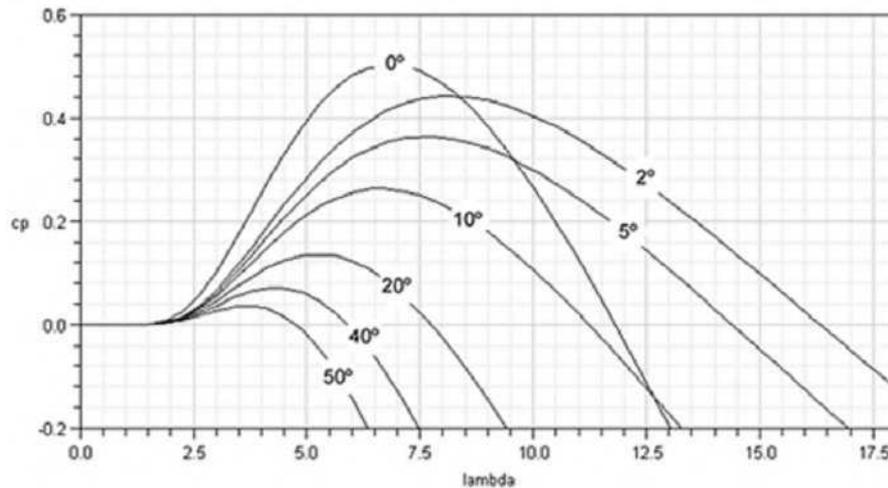
Onde P_m é a potência mecânica disponível no eixo da turbina.

Em geral, os fabricantes de aerogeradores incluem o valor do rendimento elétrico no valor de C_p . Assim, a expressão usada na prática é:

$$C_p(u) = \frac{P_e}{P_{disp}} \quad (4)$$

O coeficiente de potência pode ser alterado de acordo com as características aerodinâmicas das pás.

Figura 10 – Característica $C_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações numéricas

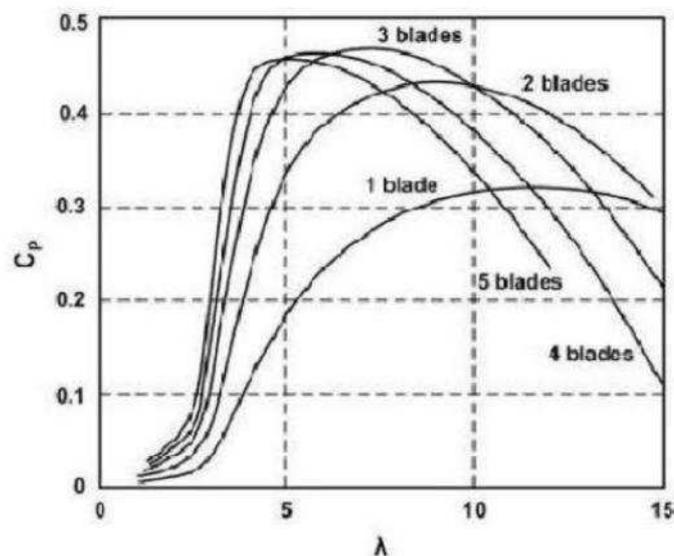


Fonte: MONTEZANO, 2008.

Na Figura 10, λ (λ) é a razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente, também conhecido como *tip-speed ratio*, ou TSR. As curvas traçadas são para diferentes valores do ângulo de passo β das pás do aerogerador.

A quantidade de pás no aerogerador também influencia o coeficiente de potência. Turbinas de eixo horizontal com duas e três pás permitem maior aproveitamento da energia eólica para velocidades entre 7 m/s e 15 m/s, conforme pode-se observar na Figura 11. As mais comumente utilizadas são as de eixo horizontal com três pás, por apresentarem um rendimento mais uniforme e sobretudo menos peso no aerogerador.

Figura 11 – Relação coeficiente de potência/número de pás

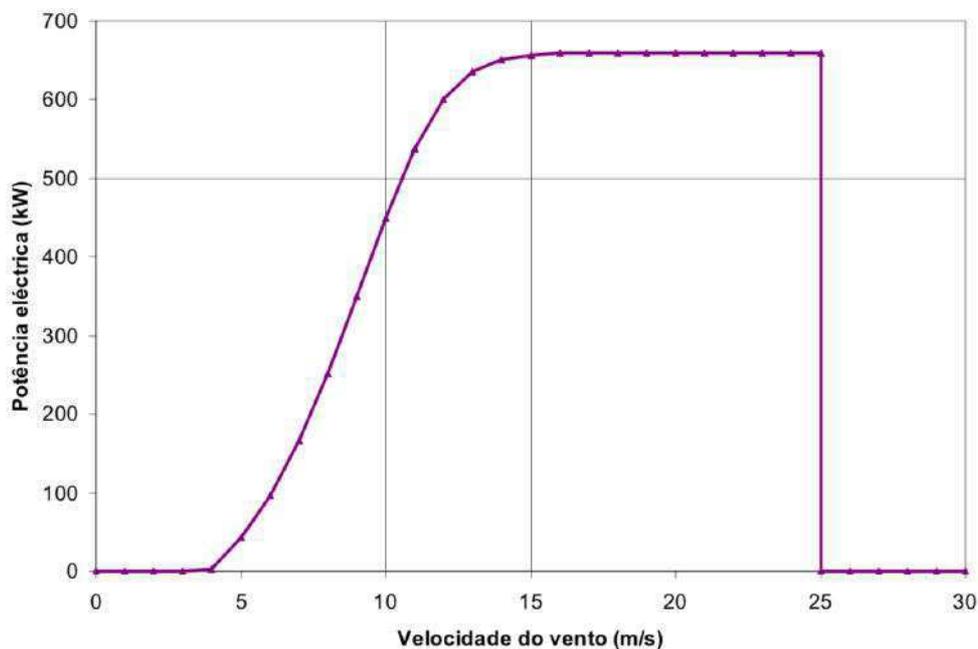


Fonte: MELO, 2012

As turbinas eólicas são projetadas de modo a gerarem máxima potência a uma determinada velocidade do vento. Esta potência é denominada potência nominal e a velocidade onde esta é atingida é denominada velocidade nominal do vento, que é ajustada de acordo com o regime de vento do local, geralmente configurada para valores entre 12 e 15 m/s.

Devido a variação cúbica da potência com relação à velocidade do vento (2), para baixas velocidades de vento (normalmente cerca de abaixo de 4 m/s) não é viável extrair energia. Pela mesma razão, não é economicamente interessante extrair energia para velocidades do vento acima da nominal, pois isto requereria robustez na construção da turbina, o que elevaria consideravelmente os custos de implementação, de onde se tiraria proveito durante poucas horas no ano. Além disto, a velocidade de vento muito elevada pode ser perigosa e comprometer a segurança e o funcionamento da turbina. Por este motivo, as turbinas são desativadas quando as condições do vento encontram-se nesses limites, conforme pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Característica elétrica de um gerador eólico de 660 kW



Fonte: CASTRO, 2009.

A seguir serão abordados aspectos construtivos e técnicos para o entendimento do funcionamento de uma unidade geradora eólica, os dispositivos que a compõe bem como seu funcionamento.

3.3 TURBINA EÓLICA

Uma turbina eólica é formalmente definida como um dispositivo que transforma energia cinética do vento em energia elétrica e seu funcionamento consiste em um conjunto de pás conectadas a um cubo que se movimentam em um eixo. À esse conjunto, dá-se o nome de rotor.

O rotor desvia o fluxo de ar incidente criando uma força nas pás, que como reação produz um torque no eixo do rotor. Neste eixo é ligado a caixa de velocidade e o gerador elétrico, que ficam abrigados na nacele, que é a carcaça localizada no topo da torre e é responsável por abrigar os componentes do aerogerador. Os dispositivos citados acima serão abordados com mais detalhes nos tópicos posteriores.

Os rotores são divididos em duas classes de acordo com a sua posição em relação ao terreno instalado. São eles o rotores de eixo vertical e os rotores de eixo horizontal.

3.4 ROTOR DE EIXO VERTICAL

Dada a sua característica de eixo vertical, os aerogeradores com este tipo de rotor não necessitam de mecanismos de controle para corrigir seu posicionamento em relação ao vento incidente no momento em que estiver gerando energia.

Existem dois tipos de rotores de eixo vertical: Savonius e Darrieus. O primeiro tem seu princípio de funcionamento semelhante as rodas d'água e utiliza a força de arrasto para movimentar o eixo. O segundo utiliza lâminas curvas de perfil aerodinâmico, conectadas pelas duas pontas ao eixo vertical do rotor.

Figura 13 – Turbina de eixo vertical

(a) Tipo Savonius

(b) Tipo Darrieus



(a)



(b)

Fonte: (a) AMG Power Solutions (b) DanishAssoc

As principais vantagens das turbinas de eixo vertical estão relacionadas a simplicidade na concepção, diminuição da complexidade devido a ausência de

mecanismos de controle para direcioná-lo ao fluxo do vento e possibilidade de instalação de todos os equipamentos junto ao solo, permitindo o uso de equipamentos mais pesados e robustos.

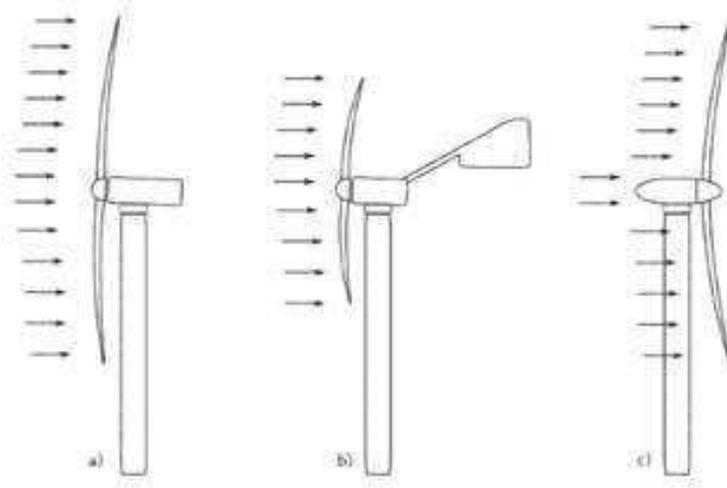
As desvantagens são identificadas pela baixa velocidade do vento próximo ao solo onde é instalada, necessidade de meios exteriores de auxílio para arranque inicial, necessidade de utilização de cabos para suporte devido aos esforços dinâmicos.

3.5 ROTOR DE EIXO HORIZONTAL

Os rotores de eixo horizontal são os mais utilizados nas aplicações eólicas em todo o mundo. Os rotores deste tipo tem o seu eixo movido por forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (força de sustentação ou *lift*, em inglês) e forças que atuam na direção do escoamento (força de arrasto ou *drag*, em inglês). Os rotores no qual o movimento do eixo se dá predominantemente por forças de sustentação, como é o caso dos rotores de eixo horizontal, permitem liberar maior potência do que os que giram como reação às forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento.

Porém os rotores deste tipo necessitam que a área de varredura de suas pás estejam sempre alinhada com a direção do fluxo de vento para que tenha máxima eficiência. Para rotores onde a área de varredura das pás encontra-se a montante do vento (*upwind* em inglês), são usados equipamentos para detecção da direção do vento e mecanismo para deslocar o eixo de modo que a área de varredura das pás esteja perpendicular ao fluxo de vento. Já rotores onde as pás encontram-se a jusante do vento (*downwind* em inglês) a orientação é realizada automaticamente sem necessidade de equipamentos específicos para isso. Este último tem sido menos utilizado ao longo do tempo devido à perturbação no escoamento pela torre antes de incidir no rotor.

Figura 14 – Rotores de eixo horizontal
 (a) tipo *upwind*
 (b) tipo *upwind* com controle passivo
 (c) tipo *downwind*



Fonte: “Effect of Tail Shapes on Yawing Performance of Micro Wind Turbine”
 Nikhil C. Raikar, Sandip A. Kale, 2015.

Os rotores de eixo horizontal apresentam uma série de vantagens tais como maior captação de energia eólica do vento de acordo com a quantidade e o tamanho das pás, maior eficiência pela capacidade de orientar o eixo de modo a receber mais potência para rotação, além da facilidade de instalação e manutenção se comparada aos rotores de eixo vertical.

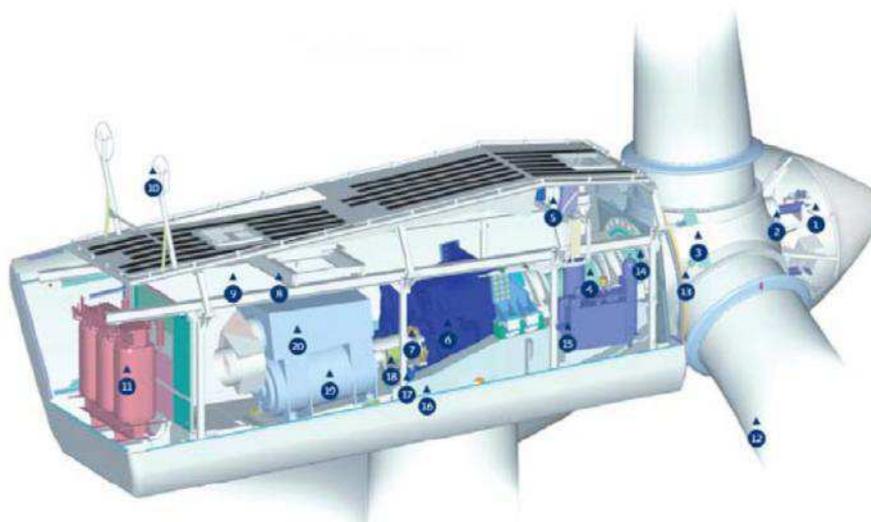
Os aerogeradores de eixo horizontal são diferenciados pela quantidade de pás, pelo formato e tamanho da nacela, pela presença ou não de caixa multiplicadora e pelo tipo de gerador utilizado. Nos tópicos a seguir são apresentados os principais componentes de um aerogerador.

3.5.1 NACELE

A nacela é a carcaça que abriga a maioria dos componentes do aerogerador e fica situada sobre a torre. É lá onde se localiza os principais componentes do aerogerador como caixa de engrenagens, sistemas de controle, medição do vento, dentre outros. Na Figura 15 é possível observar os principais componentes instalados na nacela.

Figura 15 – Vista do interior da nacele de uma turbina eólica utilizando um gerador convencional

- | | |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1. Controlador do Cubo | 11. Transformador de alta tensão |
| 2. Controle pitch | 12. Pás |
| 3. Fixação das pás no cubo | 13. Rolamento das pás |
| 4. Eixo principal | 14. Sistema de trava do rotor |
| 5. Aquecedor de óleo | 15. Sistema hidráulico |
| 6. Caixa multiplicadora | 16. Plataforma da nacele |
| 7. Sistema de freios | 17. Motores de posicionamento da nacele |
| 8. Plataforma de serviços | 18. Luva de acoplamento |
| 9. Controladores e Inversores | 19. Gerador |
| 10. Sensores de direção e velocidade do vento | 20. Aquecimento de ar |



Fonte: Vestas, 2006.

3.5.2 PÁS, CUBO E EIXO

As pás são extremamente importantes na interação do aerogerador com o vento. Seu formato é aerodinamicamente semelhante às asas de uma aeronave e são responsáveis por transformar a energia cinética do vento em trabalho mecânico. Alguns aerogeradores utilizam um sistema de rolamento na base das pás para controle do ângulo em que o fluxo de vento incide, regulando a velocidade de rotação. As pás mais modernas são fabricadas com uma mistura de madeira, fibra de vidro e reforçada com epóxi e possuem comprimento variando entre 40 a 90 metros dependendo do modelo.

Figura 16 – Pás de um aerogerador Siemens



Fonte: Jornal The Guardian, 01/12/2016.

O cubo é uma estrutura de alta resistência mecânica construída geralmente em aço ou liga resistente onde são conectadas as pás. Por se tratar de uma estrutura que recebe muito esforço mecânico, o cubo é fabricado de modo que apresenta-se como uma peça única e robusta. O cubo é responsável pela conexão e transmissão do movimento das pás para o eixo.

O eixo é a parte responsável pela transferência da energia mecânica diretamente para o motor ou para a caixa multiplicadora. É geralmente construído em aço ou liga de alta resistência.

Figura 17 – Cubo para conexão de pás



Fonte: TAYLOR, 2008.

3.5.3 TRANSMISSÃO E CAIXA MULTIPLICADORA

A energia mecânica é transmitida do eixo do rotor e entregue ao gerador através do sistema de transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos.

Usualmente, a caixa multiplicadora fica localizada entre o rotor e o gerador e tem como finalidade elevar a baixa velocidade angular do rotor de cerca de 20 a 150 rpm a uma velocidade mais elevada, que para os geradores síncronos convencionais varia entre 1200 a 1800 rpm.

Figura 18 – Caixa de engrenagens conectada ao gerador



Fonte: Cepel, 2008

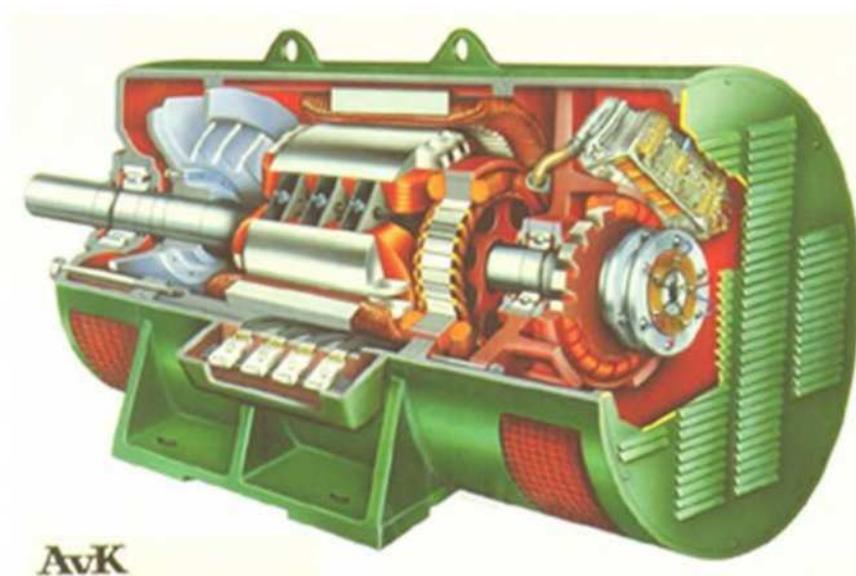
Com a evolução da tecnologia em projetos de aerogeradores, alguns fabricantes passaram a utilizar geradores multipolos que não necessitam de elevada rotação, abandonando a utilização de caixa multiplicadora.

3.5.4 GERADOR

O gerador é o equipamento responsável pela transformação da energia mecânica de rotação do eixo em energia elétrica. No entanto, a aplicação de geradores em sistema de conversão eólica constitui alguns problemas que envolvem variações na velocidade do vento, variações no torque de entrada, exigência de tensão e frequência constante na

energia final produzida além da dificuldade de instalação e manutenção, necessitando ter alta confiabilidade.

Figura 19 – Gerador convencional

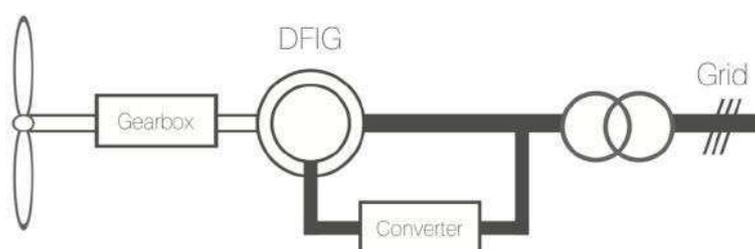


Fonte: AVK

Atualmente em turbinas eólicas de potência mais baixa são utilizados os geradores de indução com gaiola e para aplicações de alta potência são utilizados os geradores de indução de dupla alimentação (ou duplamente excitados).

Os geradores de indução duplamente excitados (ou DFIG), são os mais utilizados atualmente, devido a sua característica de operar com velocidade variável de vento. Em seu princípio básico de operação, a corrente do conversor paralelo ao rotor pode controlar a potência ativa do rotor.

Figura 20 – Esquema de um gerador do tipo DFIG



Fonte: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI

3.5.5 TORRE

A torre é a estrutura responsável por posicionar e sustentar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento, sendo um item de elevada contribuição no custo do sistema.

Inicialmente as torres eram fabricadas em metal treliçado, mas com o uso de geradores, pás, entre outros componentes cada vez maiores e mais robustos, as naceles passaram a sustentar um peso cada vez maior, e conseqüentemente as torres foram adaptadas para sustentar o peso. Atualmente as torres são fabricadas em metal tubular, concreto ou uma mistura dos dois e podem ser sustentadas por cabos e tensores, o que garante maior segurança na sustentação e podem chegar a 140 metros de altura.

Na Figura 21 é possível observar uma torre de 120 metros de altura, dos quais 80 metros são construídos em concreto e 40 metros em aço, com capacidade de suportar até 250 toneladas no topo, construída pela empresa espanhola HWS.

Figura 21 – Torre de um aerogerador



Fonte: HWS Towers

3.6 MECANISMO DE CONTROLE

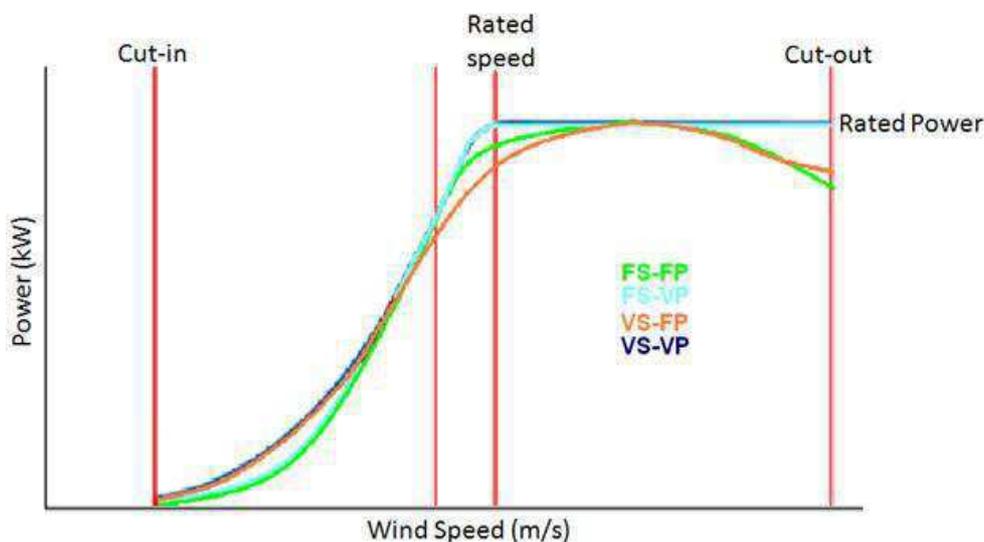
Os mecanismos de controle são essenciais para melhor desempenho, estabilidade estrutural e segurança na operação de turbinas eólicas. Atualmente existe uma enorme

variedade de mecanismos que podem ser mecânicos, aerodinâmicos ou eletrônicos, capazes de regular o controle de velocidade, passo, freio, posicionamento do rotor e controle de carga. O controle de passo e de velocidade do gerador são os métodos mais eficazes para ajustar a potência de saída.

O controle de velocidade variável permite que a velocidade do gerador/rotor varie proporcionalmente à velocidade do vento entre a velocidade de corte e a velocidade nominal, mantendo assim uma TSR (*tip-speed ratio* - relação entre a velocidade do vento incidente e a velocidade das pás) constante e desempenho aerodinâmico ideal. Para uma velocidade acima da nominal, a velocidade do gerador/rotor é então mantida constante. O torque deve ser controlado ativamente.

O controle de passo é um sistema ativo de controle que realiza alterações nos ângulos de passo das pás de modo a reduzir o ângulo de ataque. Esta redução diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada devido a um aumento excessivo da velocidade do vento, o mecanismo de controle atua girando as pás do rotor em torno do seu eixo longitudinal.

Figura 22 – Curva de potência para diferentes configurações de controle



Fonte: National Instruments

Na Figura 22 é possível observar o comportamento da curva de potência para diferentes configurações de controle envolvendo velocidade e passo.

A configuração de controle de velocidade fixa e passo fixo (FS-FP) é a única em que é impossível melhorar o desempenho com controle ativo. Neste tipo de controle, o gerador da turbina é acoplado diretamente à rede elétrica, fazendo com que a velocidade

do gerador seja igual à frequência da linha de energia e fixe a velocidade de rotação. Essas turbinas são reguladas usando métodos de parada passiva em altas velocidades de vento. A seleção da relação da caixa de engrenagens torna-se importante para este controle passivo, pois garante que a potência nominal não seja excedida.

Para o controle de velocidade fixa e passo variável (FS-VP), a configuração opera em um ângulo de inclinação fixo abaixo da velocidade nominal do vento e ajusta continuamente o ângulo acima da velocidade nominal do vento. Ou seja, a operação de velocidade fixa implica uma potência de saída máxima a uma velocidade do vento. Abaixo da velocidade nominal do vento, esse tipo de controle tem uma eficiência quase ótima. Ultrapassando a velocidade nominal do vento, os ângulos de inclinação são continuamente alterados, fornecendo pouca ou nenhuma perda de potência.

Já o controle de velocidade variável e passo fixo (VS-FP) ajusta continuamente a velocidade do rotor em relação à velocidade do vento, controlando a velocidade síncrona do gerador. Este tipo de controle assume que o gerador é da rede, de modo que o rotor e o eixo de acionamento do gerador estejam livres para girar independentemente da frequência da rede.

Por fim, o controle de velocidade variável e passo variável (VS-VP) é uma derivação do VS-FP e do FS-VP. Operando abaixo da velocidade nominal do vento, a velocidade variável e o passo fixo são usados para maximizar a captura de energia. Operando acima da velocidade nominal do vento, a velocidade fixa e o passo variável permitem uma regulação de potência eficiente na potência nominal. O VS-VP é a única estratégia de controle que teoricamente alcança a curva de potência ideal mostrada na Figura 23.

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo irá abordar um estudo de caso referente ao Complexo Eólico de Santa Luzia e seus parques eólicos Canoas, Lagoa 1 e Lagoa 2, tratando de informações relativas ao investimento, analisando as características geográficas da região, destacando a velocidade média dos ventos onde o complexo é instalado, e informações técnicas sobre o mesmo como *layout* e tipo de aerogerador.

4.1 O INVESTIMENTO

No dia 28 de novembro de 2014 foi realizado o 20º Leilão De Energia Proveniente De Novos Empreendimentos De Geração, ou Leilão A-5, operacionalizado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e coordenado pela Aneel.

O leilão tinha como objetivo a contratação de energia proveniente de novos empreendimentos de geração, a partir das fontes hidrelétrica, eólica, solar e termelétrica, com previsão de início de operação em 1º de janeiro de 2019.

A Força Eólica do Brasil, *join venture* (empreendimento conjunto) formada pelas empresas Neoenergia e Elektro Renováveis, ambas empresas brasileiras, sagrou-se vencedora do leilão com o compromisso de construir 6 novos parques eólicos, sendo três no estado do Rio Grande do Norte e três no estado da Paraíba. Os três parques anunciados para o estado da Paraíba foram Canoas, Lagoa 1 e Lagoa 2, cada um com potência instalada de 31,5 MW resultando numa potência total de 94,5 MW e compromisso de 48,8 MW médios a um preço de venda de R\$193,76/MWh, em um investimento de aproximadamente R\$ 600 milhões que gerou cerca de 510 empregos diretos e indiretos. O complexo entrou em operação em outubro de 2017 com concessão até 2050.

4.2 EMPRESAS ENVOLVIDAS

Na época em que foi vencedora do Leilão A-5, a Força Eólica do Brasil era formada pelas empresas Neoenergia e Elektro Renováveis, que era uma empresa pertencente à espanhola Iberdrola, que por sua vez também era acionista da Neoenergia. Em 2017, a Neoenergia firmou acordo com acionistas e permitiu incorporação da Elektro, com isso a Iberdrola se tornou majoritária no negócio com 52,45% da empresa.

A Iberdrola é uma empresa de origem espanhola e é uma das cinco maiores companhias elétricas do mundo e líder mundial em energia eólica. Possui investimentos de cerca de US\$ 100 bilhões em energias renováveis em países como Espanha, Reino Unido, Estados Unidos e Brasil.

A Neoenergia é uma empresa brasileira nascida da privatização das concessionárias dos Estados da Bahia e do Rio Grande do Norte. Atua em 16 estados brasileiros fornecendo energia pra quase 20% da população, com forte presença na região Nordeste nos setores de distribuição, geração (convencional e renovável) e comercialização de energia.

4.3 LOCAL DE INSTALAÇÃO

O local escolhido para execução do projeto foi a microrregião do Seridó Ocidental Paraibano, que tem como centro a cidade de Santa Luzia, localizada a 267 km de distância da capital João Pessoa.

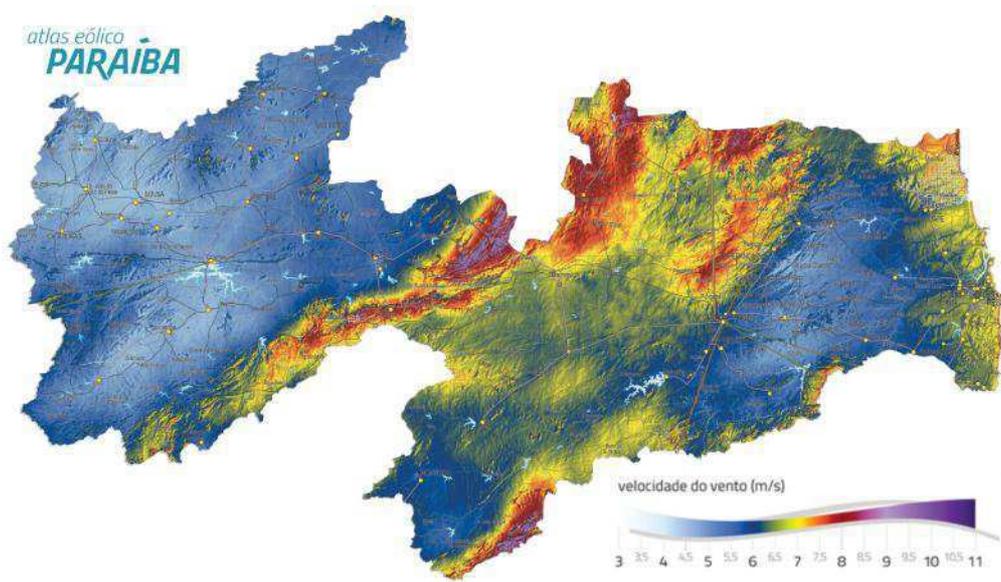
Figura 23 – Localização do Complexo Eólico de Santa Luzia



Fonte: Próprio autor.

A região que é conhecida pelas altas temperaturas e forte irradiação solar também possui excelente potencial eólico, conforme pode ser observado na Figura 24.

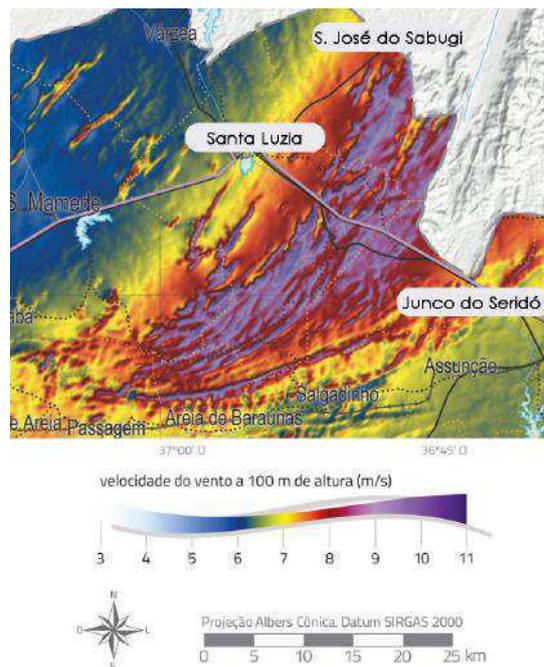
Figura 24 – Mapeamento eólico anual da Paraíba a 100 metros de altura



Fonte: Atlas Eólico da Paraíba, 2017.

Através do mapa mais detalhado apresentado na Figura 25 é possível observar locais na microrregião do Seridó Ocidental onde a média de vento é mais intensa, representadas pela coloração violeta. Não coincidentemente esses foram os locais escolhidos para instalação dos aerogeradores do complexo.

Figura 25 – Mapeamento eólico da microrregião do Seridó Ocidental



Fonte: Atlas Eólico da Paraíba, 2017.

Segundo dados do Atlas Eólico da Paraíba, a média anual de velocidade de vento na região onde o complexo se encontra é de cerca de 9 m/s a uma altura de 100 metros, uma média considerada boa para geração de energia eólica. A capacidade instalável estimada para a região, considerando alturas de alguns aerogeradores comumente utilizados e diferentes médias anuais de vento são apresentados na Tabela 2.

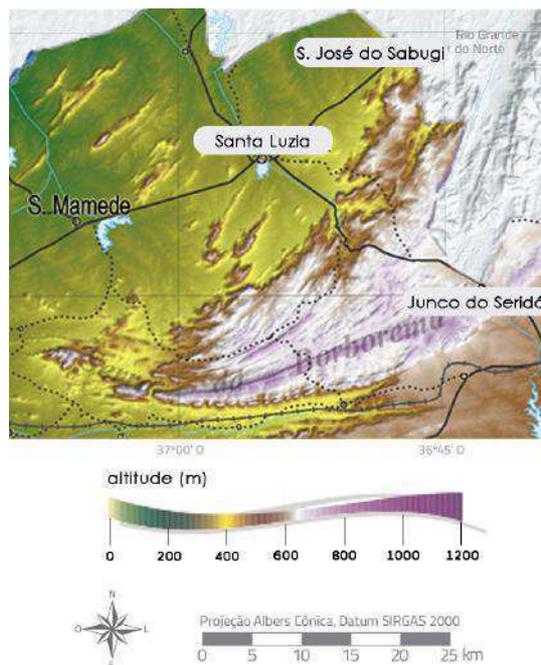
Tabela 2 – Capacidade máxima instalável na microrregião do Seridó Ocidental

		Capacidade Máxima Instalável [MW]			
		Velocidade Média Anual do Vento [m/s]			
		≥ 6.5	≥ 7.0	≥ 7.5	≥ 8.0
Altura de Nacele [m]	150	3591	2830	2002	1353
	120	3014	2180	1452	941
	100	2586	1701	1103	634
	70	1465	903	516	270

Fonte: Atlas Eólico da Paraíba, 2017.

O relevo da microrregião do Seridó Ocidental é caracterizado pelas terras altas do Planalto da Borborema e os terrenos mais baixos da Depressão Sertaneja, com altitudes que variam entre 300 e 600 metros, conforme é possível observar na Figura 26.

Figura 26 – Relevo da microrregião do Seridó Ocidental

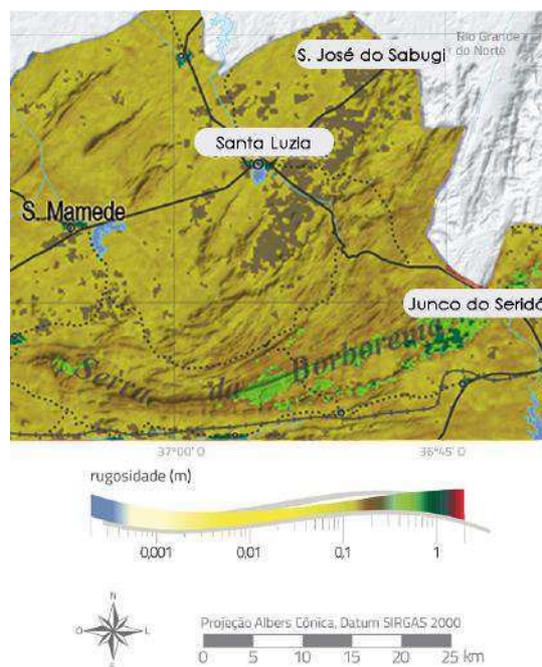


Fonte: Atlas Eólico da Paraíba, 2017.

Na processo de geração de energia eólica, o relevo pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar, influenciando diretamente na eficiência da turbina.

Outro fator que causa influência na velocidade do vento próximo a superfície é a rugosidade, que é caracterizada pela interferência no escoamento do ar provocado pela altura da vegetação, utilização da terra ou construções. À parametrização dessas características dá-se o nome de rugosidade aerodinâmica, ou comprimento de rugosidade aerodinâmico z_0 , que representa a distância vertical sobre a superfície a partir da qual se pode se considerar um perfil de velocidade vertical. Nesse sentido, quanto maior a rugosidade, mais energia está sendo retirada do vento próximo à superfície.

Figura 27 – Rugosidade da microrregião do Seridó Ocidental



Fonte: Atlas Eólico da Paraíba, 2017.

A região onde o complexo é instalado não chega a ser consideravelmente afetada pelos efeitos de rugosidade, dado que o local é distante de construções e possui vegetação baixa, característica da Caatinga.

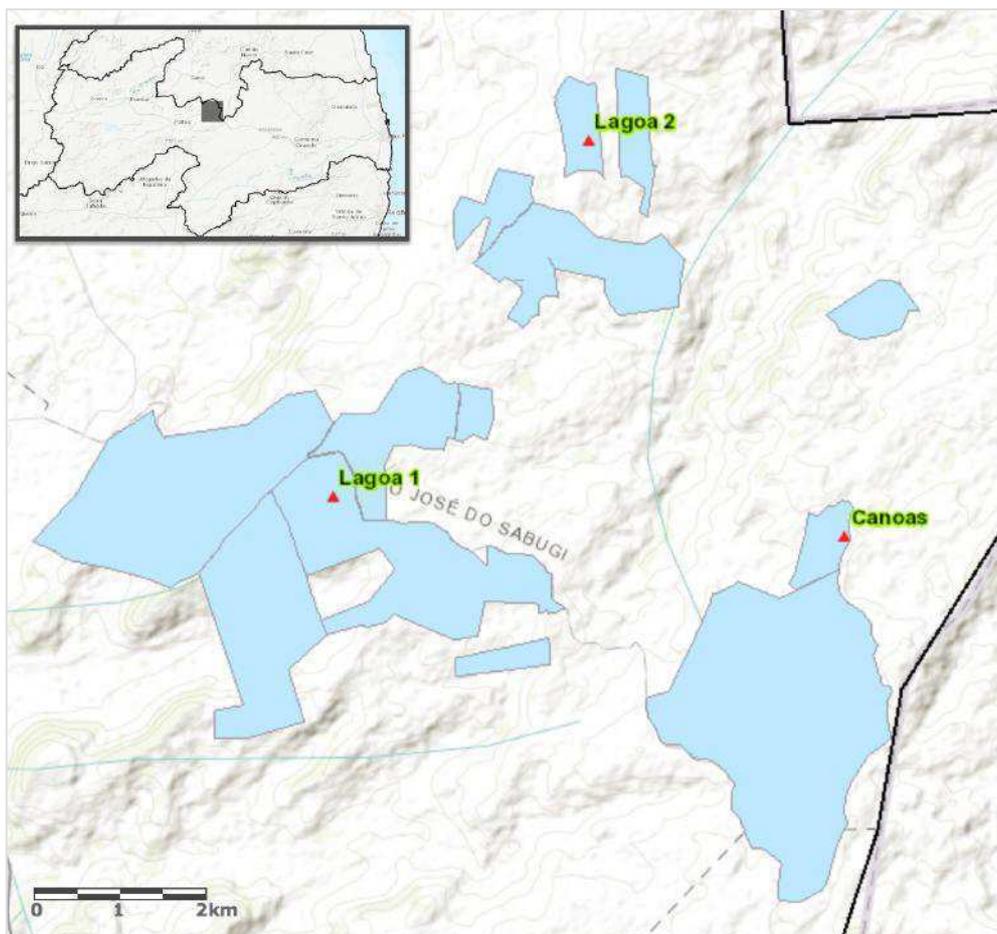
4.4 LAYOUT DO COMPLEXO EÓLICO

O complexo é localizado numa área entre os municípios de Santa Luzia, São José do Sabugi e Junco do Seridó e é composto por três parques: Canoas, Lagoa 1 e Lagoa 2, resultando perímetro de 30 km e área total de 5.421 hectares. Durante a sua construção, foram utilizados 2.000 toneladas de aço e 23.000 m³ de concreto invertido, o equivalente a 2.625 caminhões betoneiras, segundo informações cedidas pela Neoenergia.

Uma perspectiva da área dos parques pode ser vista na Figura 28, obtida através de dados do SIGEL (Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico) da Aneel.

Vale salientar que os parques não possuem limites bem definidos entre si e em alguns locais as áreas são comuns a dois parques.

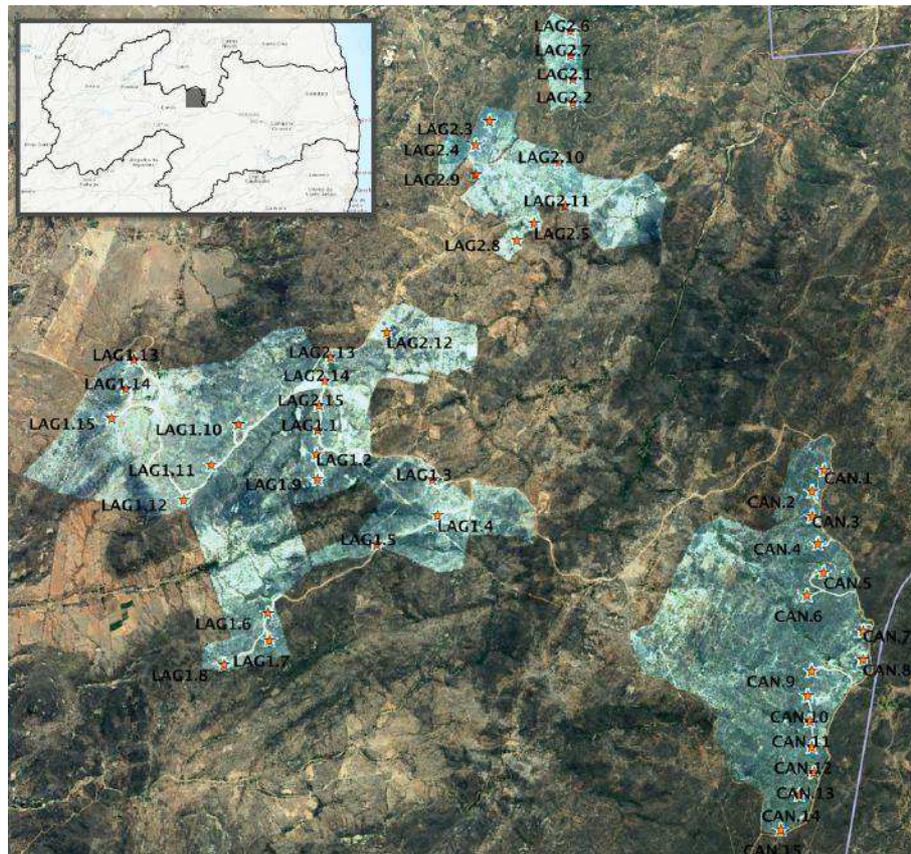
Figura 28 – Área do Complexo Eólico de Santa Luzia



Fonte: <http://sigel.aneel.gov.br> . Acesso em 08/07/2018

Cada parque é composto por 15 aerogeradores distribuídos ao longo da área do complexo, conforme se observa na Figura 29, elaborada com dados do SIGEL sobrepostos às imagens de satélite do software Google Earth. Os aerogeradores dos parques Canoas, Lagoa 1 e Lagoa 2 são identificados pelo prefixo CAN, LAG1 e LAG 2, respectivamente, seguidos do número da turbina, de 1 à 15.

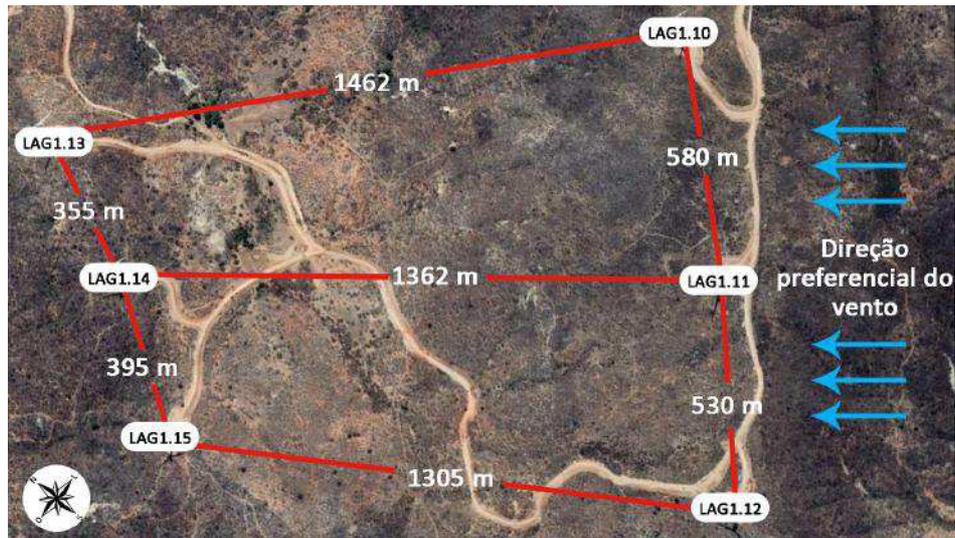
Figura 29 – Distribuição dos aerogeradores no Complexo Eólico de Santa Luzia



Fonte: Próprio autor.

Através de imagens de satélite, é possível verificar o espaçamento entre as turbinas. Segundo Castro (2009), o espaçamento entre as turbinas deve ter entre cinco a nove vezes o diâmetro do rotor na direção preferencial do vento e entre três e cinco vezes na direção perpendicular. Estas distâncias devem ser consideradas para minimizar o chamado efeito esteira, que é o efeito causado pela diminuição da velocidade do fluxo de vento ao passar pelas pás de uma turbina. Na Figura 30, é possível observar que o espaçamento entre as torres respeita esses limites, considerando que o rotor das turbinas do complexo possuem diâmetro de 114 metros.

Figura 30 – Espaçamento entre turbinas



Fonte: Próprio autor.

Para ligação das turbinas do complexo com a subestação de uso restrito, foram utilizados 270.000 metros de cabos de média tensão 34,5 kV, que são aterrados diretamente no solo e seguem o caminho de acesso às torres, garantindo facilidade de manutenção e minimizando os impactos ambientais.

A subestação de uso restrito SE Lagoa é ligada à subestação de Santa Luzia através de uma linha de transmissão de 69 kV com 17 km de extensão e à subestação de Juazeirinho através de outra linha de 69 kV e 40 km de extensão. Ambas subestações pertencem à concessionária Energisa Paraíba.

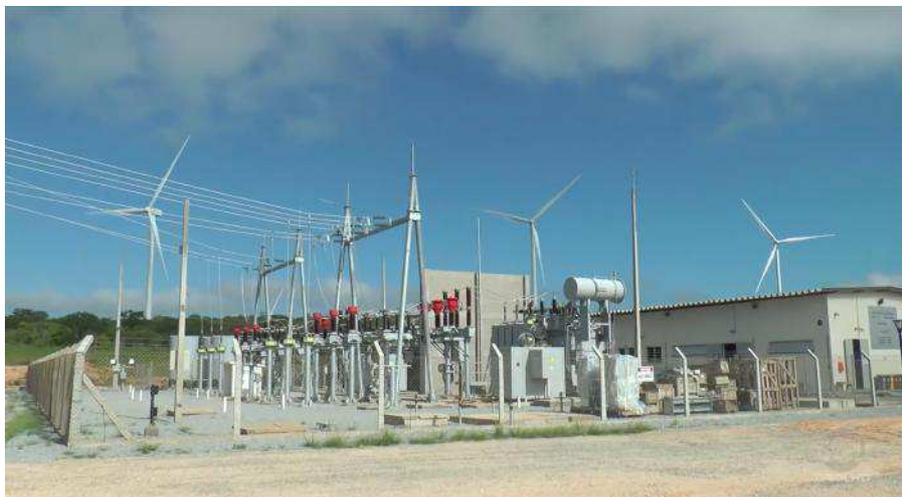
Figura 31 – Localização da SE Lagoa



Fonte: Próprio autor.

A subestação tem característica elevadora, de 34,5/69 kV e possui dois transformadores, sendo um de 55/70 MVA e um de 28/33 MVA.

Figura 32 – SE Lagoa



Fonte: TV Sol.

4.5 AEROGERADOR

No Complexo Eólico de Santa Luzia, a conversão eólico-elétrica é feita pelos aerogeradores do modelo G114 da fabricante Gamesa. Os aerogeradores deste modelo possuem 2,1 MW de potência.

Este modelo é uma referência, graças à sua baixa densidade de potência, permitindo máxima rentabilidade em locais com ventos médios e baixos, motivos que tornaram esta uma das turbinas mais utilizadas no mercado de geração eólica. As turbinas G114 possuem características que se adaptam às condições específicas de vento e ambientais em mercados como Índia, China e Brasil e por isso foram escolhidas para serem instaladas no complexo.

A primeira etapa para a instalação do aerogerador consiste na preparação do terreno para montagem da base, que nada mais é do que um bloco de concreto armado maciço responsável pela fixação da torre no solo. No caso dos aerogeradores do complexo, a base é montada em uma cratera com 5 metros de profundidade e 12 metros de raio e que leva cerca de 24 horas para ser escavada. Em cada base são utilizadas 54 estacas para junção com a torre, 500 toneladas de aço e 520 m³ de concreto armado, o que equivale a 60 caminhões betoneira. Na Figura 33 é possível observar a construção da base de um dos aerogeradores do complexo.

Figura 33 – Preparação da base do aerogerador G114



Fonte: <http://portalcorreio.com.br/especial/parques-eolicos-paraiba/>. Acesso em 07/07/2018

A torre utilizada é do tipo modular feita em aço e possui 80 m de altura. Para facilitar no transporte, a torre é dividida em três partes (ou tramos) os quais são levados por caminhões até o local de instalação da torre. Com o auxílio de guias, a parte inferior da torre é fixada por 156 parafusos à base e, em seguida, as duas partes restantes são acopladas, em um trabalho com tempo de montagem médio de 20 horas.

Figura 34 – Montagem da torre do aerogerador G114



Fonte: Neoenergia

A nacelle possui 2 m de altura, pesa cerca de 100 toneladas e leva em torno de duas horas para ser instalada. É nela onde estão abrigados os principais equipamentos para o funcionamento do aerogerador, como o gerador.

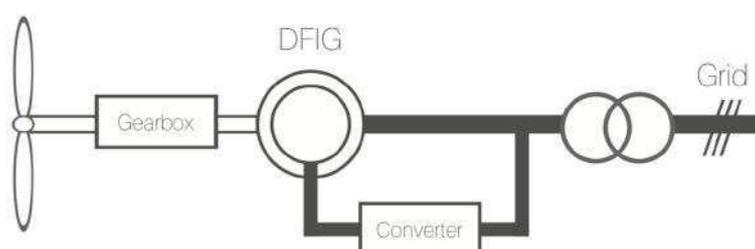
Figura 35 – Nacelle do aerogerador G114



Fonte: Neoenergia

O gerador da turbina G114 é caracterizado como uma máquina de indução duplamente alimentada (*doubly fed induction generator – DFIG*). Nesse tipo de máquina elétrica, a potência ativa do rotor pode ser controlada pela corrente do conversor paralelo ao rotor, conforme esquematizado na Figura 36, o que permite a este tipo de gerador a operação com velocidade variável. O gerador possui potência de 2,1 MW e 690 V de tensão alternada trifásica em sua saída.

Figura 36 – Esquema de um gerador do tipo DFIG



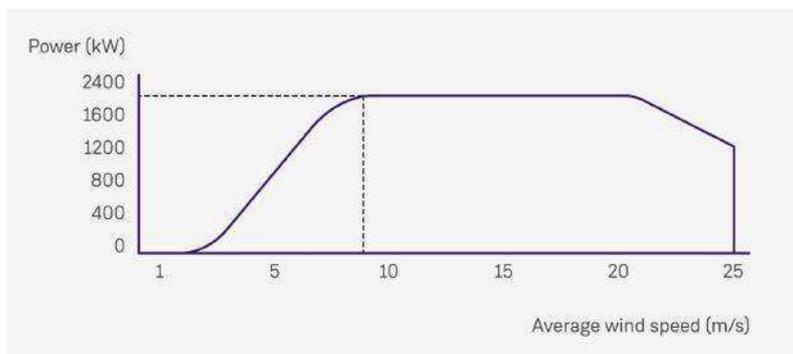
Fonte: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI

A tensão de saída do gerador é elevada a 34,5 kV por um transformador a seco situado dentro da torre e, daí, a energia elétrica é transferida pela rede de média tensão até a subestação do complexo.

A caixa multiplicadora de voltas tem uma taxa de conversão de 1:102,5, ou seja, uma volta do rotor é transformada em 102,5 revoluções na saída da caixa de engrenagens, que por sua vez é ligado ao gerador.

A velocidade mínima de operação da turbina (*cut-in*) é de 2,5 m/s e sua velocidade de operação máxima (*cut-out*) é de 25 m/s, segundo o fabricante. Através do gráfico da Figura 37, é possível observar que a velocidade média anual do vento que é de 9 m/s na região onde o complexo está instalado situa-se no intervalo onde há melhor aproveitamento da turbina.

Figura 37 – Curva de potência do aerogerador G114



Fonte: <https://www.siemensgamesa.com>. Acesso em 08/07/2018.

As pás utilizadas no modelo G114 possuem 56 m de comprimento e são construídas em fibra de vidro reforçadas com epóxi ou resina poliéster. As pás são fixadas no hub, formando o rotor com 114 m de diâmetro, totalizando uma área de varredura de 10.207 m².

Figura 38 – Pás do aerogerador G114



Fonte: <http://portalcorreio.com.br/especial/parques-eolicos-paraiba/>. Acesso em 07/07/2018

Por fim, é possível observar na Figura 39 um dos aerogeradores do complexo após o processo de montagem finalizado

Figura 39 – Montagem completa do aerogerador G114



Fonte: <http://portalcorreio.com.br/especial/parques-eolicos-paraiba/>. Acesso em 07/07/2018

4.6 FUTURO DO COMPLEXO

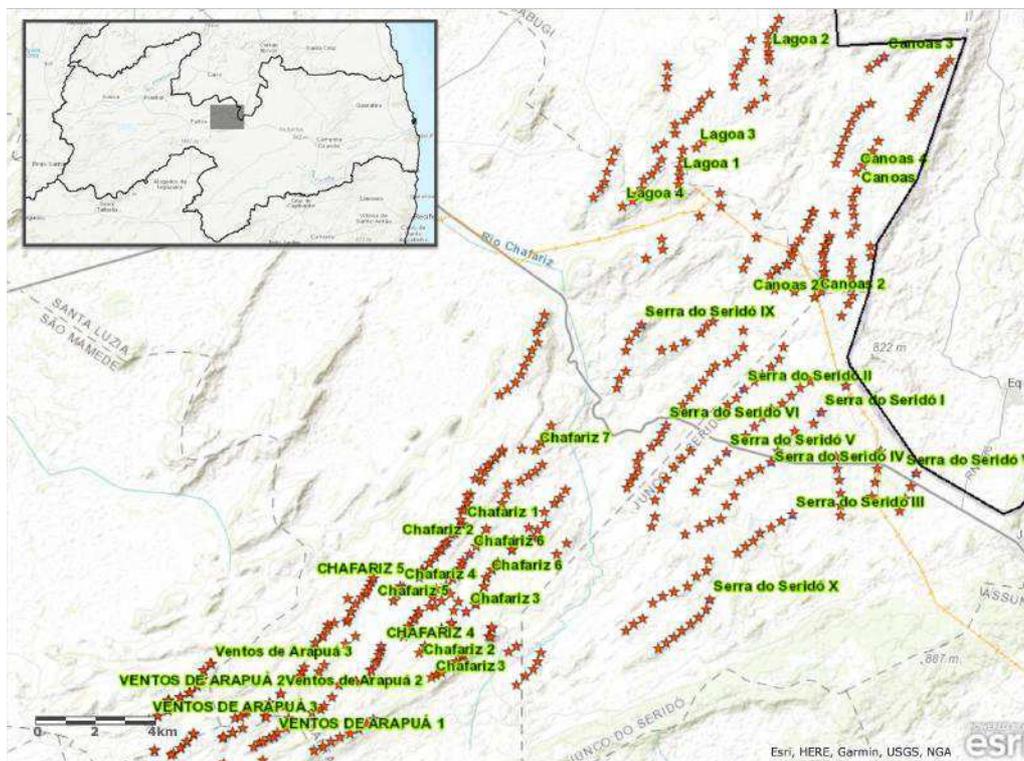
A Neoenergia anunciou em junho de 2018 a construção de mais 15 parques eólicos. Assim, o complexo passará de 3 para 18 parques no total.

A Iberdrola selecionou a empresa Siemens Gamesa para fornecer as turbinas eólicas dos 471 MW em desenvolvimento. Serão instaladas 136 aerogeradores modelo SG132 do fabricante Siemens Gamesa, com 3,4 MW de potência unitária. O modelo é um dos mais novos e eficientes do mercado, com pás de 65 metros de comprimento. De acordo com a empresa, a previsão é de concluir as obras e fornecer energia eólica dos novos parques até 2023.

As obras dos novos parques se encontram em diferentes níveis de projeto, de planejamento a outorga. Na Figura 40, obtidas através de dados do SIGEL, é possível

observar a expansão da dimensão que o complexo terá quando as obras dos novos parques forem concluídas.

Figura 40 – Expansão prevista do Complexo Eólico de Santa Luzia



Fonte: <http://sigel.aneel.gov.br> . Acesso em 08/07/2018

Quando concluído, este será o maior complexo eólico da América Latina a ser operado pela Iberdrola. Com a conclusão das obras, a potência instalada será acrescida em 471 MW, passando dos atuais 94,5 MW para 565,5 MW.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo abordar os princípios básicos para geração eólica, o funcionamento de uma unidade geradora bem como o conjunto que forma um parque eólico, considerando o processo de conversão em energia elétrica, tecnologia empregadas nos aerogeradores e distribuição para a rede elétrica.

Foi verificado que o notável crescimento ocorrido nos últimos anos no setor eólico é consequência de investimentos em pesquisa sobre o recurso eólico e programas de incentivo do governo. Até 2017 o estado da Paraíba não possuía um mapa eólico, o que justificava sua pequena participação entre os estados produtores de energia “limpa”. No entanto esse panorama está gradativamente mudando e, com o recém lançado Atlas Eólico da Paraíba, espera-se que cada vez mais investimentos sejam atraídos ao estado.

Constata-se que o projeto do Complexo Eólico de Santa Luzia foi muito bem elaborado, com destaque para os estudos feitos pelas empresas envolvidas que resultaram na escolha de um local de excelente potencial eólico. Vale destacar também a escolha dos aerogeradores compatíveis com a média de vento anual da região, o que garante um melhor aproveitamento do recurso eólico.

É importante salientar que o conceito de potência instalada, apesar de bastante propagado pelas empresas do setor eólico, não é o mais adequado para mensurar a participação da energia eólica na matriz energética, uma vez que vários fatores contribuem para que a energia efetivamente gerada seja menor.

No decorrer da elaboração deste trabalho houve dificuldade em obter mais informações técnicas precisas sobre o complexo, sendo todas as informações coletadas através de pesquisas em sites especializados, jornais e publicações.

Por fim, conclui-se que o país possui um bom potencial eólico que ainda não é amplamente aproveitado, no entanto este cenário está sendo modificado gradativamente ao longo dos anos. Os investimentos no setor eólico estão aumentando e o Brasil é hoje um dos países que mais investem em energias renováveis, ressaltando a importância em manter o desenvolvimento mas sem abrir mão da utilização de energia “limpa”.

BIBLIOGRAFIA

DUTRA, Ricardo. **Energia Eólica - Princípios e Tecnologia**. CRESESB/CEPEL, 2012.

CASTRO, Rui. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada, Introdução à Energia Eólica**. Universidade Técnica de Lisboa. Março de 2009 ed 4

MELO, Marcelo Silva de Matos. **Energia Eólica: Aspectos Tecnológicos e Econômicos**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). UFRJ/COPPE, 2012.

Governo da Paraíba. **Atlas Eólico do Estado da Paraíba**, 2017.

Estatísticas 2017, **World Wind Energy Association**. Disponível em <<http://www.wwindea.org/2017-statistics/>>

EIETROBRAS/CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro – Simulações 2013**. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2017.

Ministério de Minas e Energia. **Energia Eólica no Brasil e no Mundo – Ano de referência 2015**. 2015.

M. M. M. Saad, N. Asmuin. **Comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines**. IOSR Journal of Engineering, 2014.

ABEEOLICA, **Boletim Anual de Geração Eólica**. 2017.

Nikhil C. Raikar, Sandip A. Kale. **Effect of Tail Shapes on Yawing Performance of Micro Wind Turbine**. International Journal of Energy and Power Engineering, 2015.

Museu da Energia. Disponível em <<http://www.museudaenergia.org.br/media/63129/03.pdf>>

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, **Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil**, 2014.

Burton, T., D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi. **Wind energy handbook**. , Ed. John Wiley&Sons - Ltd, New York, 2001.

Sanjiba kumar Bisoyi, R.K.Jarial, R.A.Gupta. **A review of the state of the art of generators and power electronics converter topologies for wind energy conversion system**. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, pages 283-291. Feb 2013.

Gamesa. Catálogo de turbinas 2.0-2.5 MW. 2015.