



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE BRASILEIRO

FELIPE FERNANDES DA SILVA

**CAMPINA GRANDE
2015**

FELIPE FERNANDES DA SILVA

POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE BRASILEIRO

Monografia apresentada como exigência para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande.

Área de Concentração: Potencial Eólico do Nordeste

Orientador:
Professor Leimar de Oliveira, M. Sc

CAMPINA GRANDE
2015

FELIPE FERNANDES DA SILVA

POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE BRASILEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de engenharia elétrica do Centro de Engenharia Elétrica e Informática da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Msc. Leimar de Oliveira

Área de Concentração: Potencial Eólico do Nordeste

Aprovado em / /

Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

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

Dedico este trabalho à minha família, em especial, minha mãe, companheira de todas as horas, dedicada em minha educação, corajosa e exemplo de vida que sem ela eu não teria conseguido chegar até aqui

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter colocado pessoas especiais em minha vida, que foram fundamentais em minha educação, e sem elas não teria conseguido concluir esse curso.

Agradeço à minha mãe, Alian, por me amar incondicionalmente, por ter me mostrado os caminhos certos a serem seguidos, por ter me educado da melhor maneira possível, por ter me mostrado com exemplos reais que nunca devemos reclamar da vida e nem baixar a cabeça diante das dificuldades, por ter compartilhado comigo o sonho de ser Engenheiro Eletricista.

Agradeço a meu pai, Ivo, por ser exemplar em todos os aspectos, como pai, como amigo, como profissional e como homem. E não mediu esforços para eu conseguir chegar ao fim dessa etapa.

Agradeço a meus irmãos, Ferdinando e Igor por terem me apoiado nos momentos bons e difíceis, por ter me incentivado nos momentos tristes e por serem irmãos maravilhosos.

Agradeço a minha namorada, Mariana, por me compreender nos momentos de final de período e me ajudar a escrever os trabalhos e por ser uma excelente namorada.

Agradeço a Tia Socorro, Tia Maria, Tia Adriana, Tia Bastinha, Tia Vanda e a todos da minha família que de alguma forma contribuíram com essa vitória.

Agradeço ao Professor M. Sc. Leimar de Oliveira pela paciência em me orientar, por me ajudar a concluir esse trabalho e assim, tornar mais próximo o sonho de ser engenheiro eletricista, meu muito obrigado.

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

RESUMO

O constante crescimento demográfico mundial preocupa, pois exige constante aumento da exploração de recursos naturais e ampliação da produção de energia elétrica, tão imprescindível para a manutenção de vida adequada, manutenção de indústria, serviços e comércio. Para isso, faz-se necessário o desenvolvimento de novas fontes de energia elétrica, e a crescente preocupação mundial é por fontes energéticas renováveis e limpas. O presente trabalho apresenta um estudo sobre o potencial eólico do Nordeste brasileiro. Com isso, indaga-se, pois: o Nordeste brasileiro possui características eólicas favoráveis para a instalação de parques eólicos? O preço do MWh da energia eólica é competitivo em relação as outras fontes energéticas da matriz energética brasileira? Com isso, o presente estudo apresentará uma análise detalhada sobre os regimes dos ventos, em macro-escala, meso-escala e micro-escala, quais fatores determinam seu regime e propriedades, e quais características predominam nos ventos do Nordeste brasileiro. Será feito também uma análise detalhada sobre os componentes e subcomponentes das turbinas eólicas, como é feita a transformação da energia eólica em energia elétrica e quais sistemas de controle são utilizados nos aerogeradores para extrair a máxima potência dos ventos. Ademais, será feito um esboço sobre o avanço da energia eólica na matriz energética mundial e brasileira, análise dos investimentos em relação às outras fontes energéticas. Por fim, será feito um delineamento sobre o potencial eólico do Nordeste, dividindo a região em sub-regiões e analisando o potencial dessas sub-regiões levando em consideração as características em meso-escala e micro-escala, analisando os métodos utilizados para obter os dados em questão. Para realização desta pesquisa foi empregado o método dedutivo, por meio de pesquisa bibliográfica, histórica e qualitativa a fim de obter os dados preconizados na mesma. Do exposto, será possível observar que a região Nordeste possui um potencial eólico muito favorável para a instalação de parques eólicos em áreas que não possuem potencial para investimentos convencionais e será possível observar a necessidade de estações anemométricas avançadas para poder estimar com maior precisão o real potencial eólico tendo em vista que os dados utilizados são de 2002 e não foram utilizados softwares adequados para as características específicas do Nordeste.

Palavras-chave: Aerogerador, Energia eólica, Fonte Energética, Matriz Energética, Nordeste, Potencial Eólico do Nordeste, Turbina Eólica.

ABSTRACT

The constant world population growth concerns, as it requires ever-increasing exploitation of natural and expansion of electricity production resources, so essential for maintaining proper living, industrial maintenance, services and trade. For this, it is necessary to develop new sources of energy, and the increasing worldwide concern is for renewable and clean energy sources. This paper presents a study on the wind potential of the Brazilian Northeast. Thus, it asks-as: the Brazilian Northeast has favorable wind characteristics for the installation of windfarms? The price of wind energy MWh is competitive with other energy sources in the Brazilian energy matrix? Thus, this study will provide a detailed analysis of the schemes of the winds in macro-scale, meso-scale and micro-scale, what factors determine their regime and properties, and which characteristics predominate in the Brazilian Northeast winds. It will be also done a detailed analysis of the components and sub-components of wind turbines, such as the transformation of wind energy into electricity is done and what control systems are used in wind turbines to extract the maximum power of the winds. Moreover, it will be an outline of the progress of wind energy in the world and Brazilian energy matrix, analysis of investments in relation to other energy sources. Finally, an outline of the wind potential of the Brazilian Northeast will be done by dividing the northeast region into sub-regions and analyzing the potential of these sub-regions taking into account the characteristics of meso-scale and micro-scale, analyzing the methods used to get the data in question. For this research we used the deductive method, through literature, historical and qualitative research in order to get the data envisaged in it. From the above, it could be determined that the Brazilian Northeast has a very favorable wind potential for the installation of windfarms in areas that do not have potential for conventional investments and you can observe the need for advanced anemometric stations in order to estimate more accurately the real potential Wind considering that the data used are from 2002 and have not used appropriate software to the specific characteristics of the Northeast.

Keywords: Wind Turbine, Wind Power, Energy Fuente, Energy Matrix Northeast, Wind Potential in the Northeast, Turbine.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
GE	General Eletric
GW	Gigawatt (10^9)
GWh	Gigawatt (10^9)
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
Km	Quilômetro
m	Metro
MW	Megawatt (10^6) por hora
MWh	Megawatt (10^6) por hora
N	Norte
NE	Nordeste
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
R\$	Real brasileiro
R\$/MWh	Real brasileiro/megawatt por hora
S	Sul
SE	Sudeste
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
ton	Toneladas
TSM	Temperatura Superficial do Mar
USD	Dólar dos Estados Unidos
UTE	Usina Termelétrica
VF	Velocidade fixa
VV	Velocidade variável
VVL	Velocidade variável limitada
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Modelo de Circulação Global.	16
Figura 2	– Escalas de tempo e espaço.	17
Figura 3	– Ciclo anual da ZCIT nas longitudes 10° W e 45° W.	19
Figura 4	– Efeitos do El Niño no planeta.	20
Figura 5	– Esquema da circulação de brisa marítima.	21
Figura 6	– Esquemas das brisas de vales e montanhas.	22
Figura 7	– Esquema dos efeitos sobre os ventos de diferentes fatores locais.	24
Figura 8	– Instrumentos de medição do vento de uma turbina eólica.	27
Figura 9	– Eolienne à axe vertical de type Savonius.	28
Figura 10	– Eolienne à axe vertical de type Darrieus.	29
Figura 11	– Turbinas eólicas de eixo horizontal.	29
Figura 12	– Turbinas upwind e downwind.	30
Figura 13	– Movimentos de uma turbina eólica.	31
Figura 14	– Componentes básicos de TEEH em diferentes configurações.	32
Figura 15	– Esquema de um gerador do tipo SCIG	33
Figura 16	– Esquema de um gerador do tipo WRIG	34
Figura 17	– Esquema de um gerador do tipo DFIG.	35
Figura 18	– Esquema de um gerador tipo PMSG com conversor de larga escala	35
Figura 19	– Esquema de um gerador de acionamento do tipo EESG.	36
Figura 20	– Esquema de um gerador de acionamento direto do tipo PMSG	37
Figura 21	– Componentes forjados - torres de aço cônicas.	38
Figura 22	– Componentes internos da torre.	39
Figura 23	– Processo de fabricação e montagem das pás eólicas.	40
Figura 24	– Elementos de uma pá eólica.	41
Figura 25	– Cubo e subcomponentes do rotor.	42
Figura 26	– Nacele com e sem caixa multiplicadora.	43
Figura 27	– Analogia do tubo de Betz em um aerogerador.	46
Figura 28	– Forças atuantes em uma pá.	52
Figura 29	– Força resultante de um aerofólio.	52
Figura 30	– Parque eólico implantado junto com agropecuária.	56
Figura 31	– Capacidade total instalada 2011 - 2014 [MW].	59
Figura 32	– Capacidade eólica mundial instalada anualmente.	59
Figura 33	– Países Top 10 em capacidade acumulada até dezembro de 2014.	61
Figura 34	– Capacidade instalada por estado brasileiro em 2014.	62
Figura 35	– Emissões de CO2 evitadas (ton.)	63
Figura 36	– Previsão do mercado 2014 - 2019.	64
Figura 37	– Previsão do mercado anual por região entre 2014 e 2019.	65
Figura 38	– Litoral Norte-Nordeste.	67
Figura 39	– Litoral Nordeste-Sudeste.	69
Figura 40	– Nordeste Continental.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Itens e insumos usados em torres cônicas.....	39
Tabela 2 – Itens e insumos usados nas pás e cubo do rotor de um aerogerador...42	
Tabela 3 – Componentes e subcomponentes da nacelle.	44
Tabela 4 – Distúrbios causados por aerogeradores à rede elétrica.	55
Tabela 5 – Capacidade Mundial de Energia Eólica Instalada.	57
Tabela 7 – Características eólicas da sub-região 1 do Litoral N-NE.	68
Tabela 8 – Características eólicas da sub-região 2 do Litoral N-NE.	68
Tabela 9 – Características eólicas do Litoral NE-SE.	70
Tabela 10 – Características eólicas da sub-região 1 do Nordeste Continental.	71
Tabela 11 – Características eólicas das áreas montanhosas (sub-região 2) do Nordeste Continental.....	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 ANÁLISE – CARACTERÍSTICAS DE VENTOS DO NORDESTE	15
2.2 ESCALAS DE ESPAÇO	16
2.2.1 ESCALA PLANETÁRIA OU MACRO-ESCALA	17
2.2.2 ESCALA REGIONAL OU MESO-ESCALA	20
2.2.3 ESCALA LOCAL OU MICRO-ESCALA	23
2.4 ESCALAS DE TEMPO	24
2.4.1 VARIAÇÕES LENTAS	25
2.4.2 VARIAÇÕES RÁPIDAS	26
2.5 MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS	26
3 ELEMENTOS TÉCNICOS DAS TURBINAS EÓLICAS	28
3.1 TIPOS E CLASSIFICAÇÃO	28
3.1.1 MOVIMENTOS DA TURBINA (YAW, PITCH e ROLL)	30
3.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR	31
3.2.1 GERADORES ELÉTRICOS	32
3.2.2 TORRE	37
3.2.3 ROTOR	40
3.2.4 NACELE	42
3.3 ENERGIA EÓLICA	45
3.4 POTÊNCIA MÁXIMA DE EXTRAÇÃO (LIMITE DE BETZ)	47
3.5 A LEI DE BERNOULLI E OS AEROFÓLIOS	50
3.6 CONTROLE AERODINÂMICO DE POTÊNCIA	53
3.7 QUALIDADE DE ENERGIA	54
3.8 IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS	55
4 CENÁRIO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO	57
4.1 NO MUNDO	57
4.2 NO BRASIL	60
4.3 PREVISÃO PARA O MERCADO MUNDIAL 2015 – 2019	63
4.4 PREVISÃO PARA O MERCADO BRASILEIRO 2015 – 2019	65
5 POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE	66
5.1 LITORAL NORTE-NORDESTE	67
5.2 LITORAL NORDESTE-SUDESTE	69
5.3 NORDESTE CONTINENTAL	70
5.4 FONTE DE DADOS EÓLICOS	72

5.5 CARACTERÍSTICAS EÓLICAS DO NORDESTE E SEUS EFEITOS NAS TURBINAS EÓLICAS	73
6 CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A força dos ventos era utilizada pelo homem antigo de diversas formas e o aproveitamento desse meio energético deu-se devido a necessidade da época, cuja finalidade dava-se em mover moinhos para moer grãos diversos, assim como locomoção de barcos a vela.

Com o desenvolvimento da tecnologia, a preocupação com as questões ambientais e a necessidade de novas alternativas para a geração de energia a um nível sustentável, novas fontes de energia estão sendo desenvolvidas. Dentre as fontes renováveis de energia elétrica, a energia eólica vem recebendo grande volume de investimentos.

A necessidade do mapeamento do potencial eólico de uma determinada região, nesse caso, do Nordeste brasileiro é necessário para estimar com precisão e confiabilidade as características dos ventos incidentes nessa região, como velocidade média, constância, turbulência e direção, pois esses são fatores fundamentais para estimar a viabilidade econômica e capacidade de geração que a instalação de um parque eólico no local determinado trará.

Atualmente, com o aumento do consumo de energia elétrica e a busca por novas fontes energéticas, a eólica vem sendo usada e aprimorada para se tornar uma alternativa para sair da crise sem maximizar os prejuízos já causados ao meio ambiente, isso por meio da implantação de turbinas eólicas.

Diante destes fatos, este trabalho de conclusão de curso - TCC - apresentará como tema central uma análise acerca do real potencial eólico existente na região do Nordeste brasileiro, desenvolvendo tal pesquisa por meio do estudo dos ventos, estrutura das turbinas eólicas, cenário mundial da energia eólica e, por fim, o potencial eólico e a viabilidade da energia eólica no Nordeste e as perspectivas futuras para a mesma.

Observar-se-á que os ventos da citada região são suficientemente constantes e fortes para uma produção útil e eficaz de energia eólica, podendo tal meio de produção energético ser propagado e aplicado em toda a região, como solução prática aos problemas de escassez e altos custos de produção energéticas que se vive. Indaga-se, pois: a região Nordeste possui potencial eólico suficiente para se sustentar energeticamente com energia eólica? Dessa forma este estudo terá por

finalidade determinar se os ventos existentes no Nordeste são suficientes para uma produção viável de energia eólica que possa sustentar as necessidades do local da pesquisa, assim como, determinar os principais problemas tecnológicos, e obstáculos de implantação.

Tendo em vista a manifesta preocupação social com o meio ambiente, sua manutenção e subsistência, assim como a do ser humano, onde este possa viver de forma digna e evoluir em suas tecnologias e qualidade de vida, sendo a energia eólica como um meio de produção de energia capaz de garantir a manutenção da vida em condições viáveis, justifica-se esta pesquisa, bastante válida no campo acadêmico, pois vem para demonstrar o real potencial eólico do Nordeste brasileiro, tendo em vista que o ser humano é totalmente dependente de energia elétrica e a viabilidade de conversão de energia eólica em elétrica no citado campo de pesquisa.

A metodologia aplicada no desenvolvimento deste estudo será o dedutivo, como método de abordagem do tema, como procedimental, pesquisa bibliográfica, documental e estudo de caso, para uma maior compreensão do assunto, visto que há uma grande abrangência do tema dentro de um universo teórico.

Como objetivos específicos, tenciona-se: analisar, no primeiro capítulo, como se formam os ventos, suas características em escalas de espaço, mostrando as influências globais, sazonais e regionais sobre os ventos da região nordeste do Brasil. Fenômenos climatológicos incidentes sobre essa região, como o El Niño/La Nina, além de como são mensuradas essas características dos ventos. Analisar, no segundo capítulo, as turbinas eólicas, seus principais componentes e tecnologias, como a turbina eólica extrai energia do vento e transforma em energia elétrica e quais os principais fatores que determinam a capacidade de geração de energia elétrica em uma turbina eólica. Apresentar, no terceiro capítulo, o cenário mundial e brasileiro da energia eólica e sua perspectiva futura até 2019, expondo os países e regiões que irão instalar mais parques eólicos. Delimitar, no quarto capítulo, o potencial eólico do nordeste, mostrando as regiões do Nordeste que apresentam melhores regimes de ventos para geração elétrica que outras e porque isso acontece. Apresenta uma análise dos softwares e dados utilizados para a obtenção desse potencial e quais os efeitos dos ventos da região nordeste sobre as turbinas eólicas. Por fim, no capítulo de conclusão, apresentar as considerações finais sobre o potencial eólico do nordeste demonstrando que a citada região é apropriada para desenvolvimento e exploração desse tipo de energia, tendo em vista que suas

características em conjunto com uma estrutura física adequada, mão de obra qualificada e investimentos podem fazer com que o Nordeste se torne referência mundial em produção de energia elétrica por meio de energia eólica.

De todo o exposto, ao final, será possível avaliar o potencial eólico do Nordeste brasileiro, as áreas que já estão sendo aproveitadas para a produção de energia eólica, o custo final do R\$/MWh, a capacidade geradora de energia da região, além de mostrar os principais problemas enfrentados para a evolução e a viabilidade desse tipo de energia para sustentação energética da região.

2 ANÁLISE – CARACTERÍSTICAS DE VENTOS DO NORDESTE

2.1 CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA – FORMAÇÃO DOS VENTOS

A atmosfera terrestre é uma mistura de gases – de aproximadamente 5243×10^8 kg – confinado em uma fina camada com cerca de 15 km de espessura. O nitrogênio e oxigênio correspondem a 98% dessa mistura. Entretanto, o dióxido de carbono, com sua pequena parcela, junto com o vapor d'água, são os componentes que mais influenciam o comportamento da atmosfera, isso se dá pela forte capacidade de absorção da radiação infravermelha, fazendo com que a energia irradiada da superfície terrestre não se dissipe totalmente no espaço e retorne para a terra aquecendo a superfície.

O calor liberado na condensação do vapor d'água influencia fortemente as mudanças climáticas. Em geral, existe uma maior concentração de vapor d'água onde as temperaturas são mais elevadas, como nas regiões tropicais.

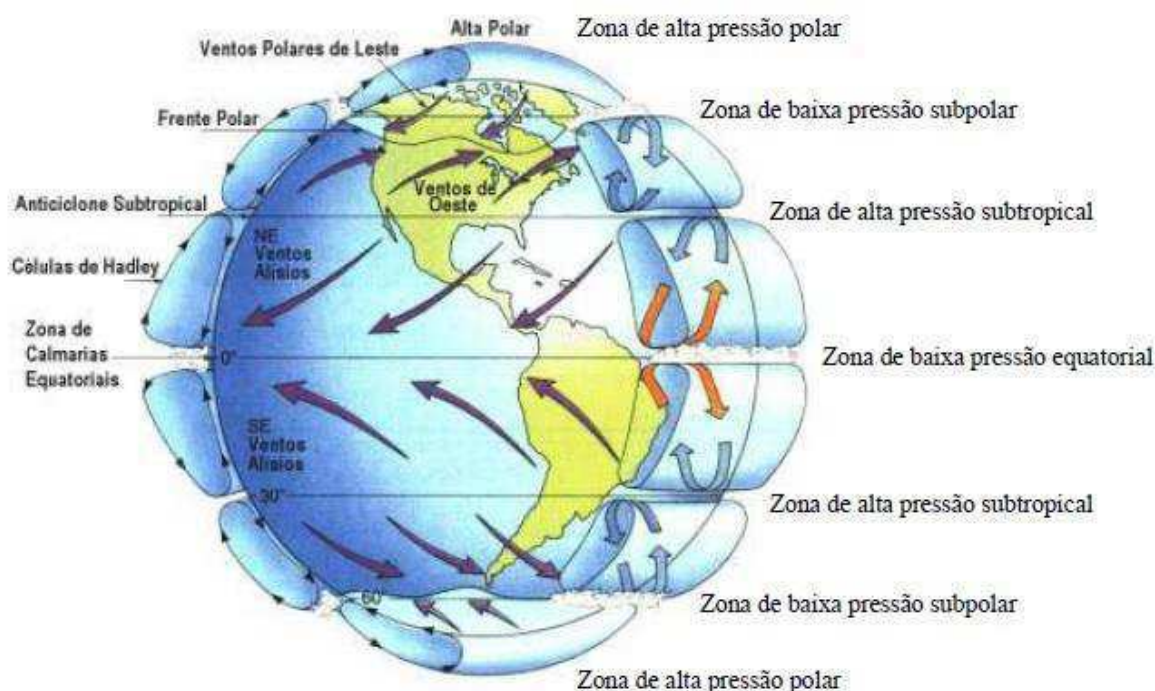
A expressão “Circulação Geral Atmosférica” é utilizada para denotar os movimentos atmosféricos¹ que mantêm o balanço energético da terra. A distribuição de calor, em função da latitude, e a rotação da terra são os agentes mais importantes para o controle da circulação geral, forçando a atmosfera a escolher diferentes formas para transportar a energia necessária no planeta.

A maior fonte de energia para os ventos é a radiação solar. A atmosfera absorve mais calor em baixas latitudes, região limitada pelos trópicos de capricórnio e câncer, enquanto que nas outras regiões é menor. O primeiro modelo sobre circulação global foi sugerido pelo físico britânico George Hadley em 1735, propondo que o ar mais aquecido da região equatorial se desloca para os pólos em altitudes elevadas. Chegando lá, esfria e desce a superfície e retorna para o equador em baixas altitudes.

A figura abaixo esquematiza a circulação global atmosférica do modelo tri celular.

¹ Movimentos atmosféricos, ou os ventos, são os resultados da conversão de energia potencial da atmosfera em energia cinética devido ao trabalho de forças relativas à pressão.

Figura 1 - Modelo de Circulação Global.



Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica.

Na zona compreendida entre as latitudes 30° N e 30° S, a circulação se dirige para o equador, ou melhor, para a zona de convergência intertropical (ZCIT), na superfície e para os polos nos níveis superiores. As células de convecção são as células de Hadley. Os ventos de superfície são chamados de ventos alísios, considerados os mais constantes do planeta.

Entre as latitudes 30° e 60° em ambos os hemisférios, a circulação é oposta às células de Hadley. A corrente de ar da superfície se dirige para os polos, e devido à força de Coriolis são deslocados para oeste. São chamados de ventos de Oeste e apresentam fortes variações na intensidade dos ventos (Portal São Francisco, 2015).

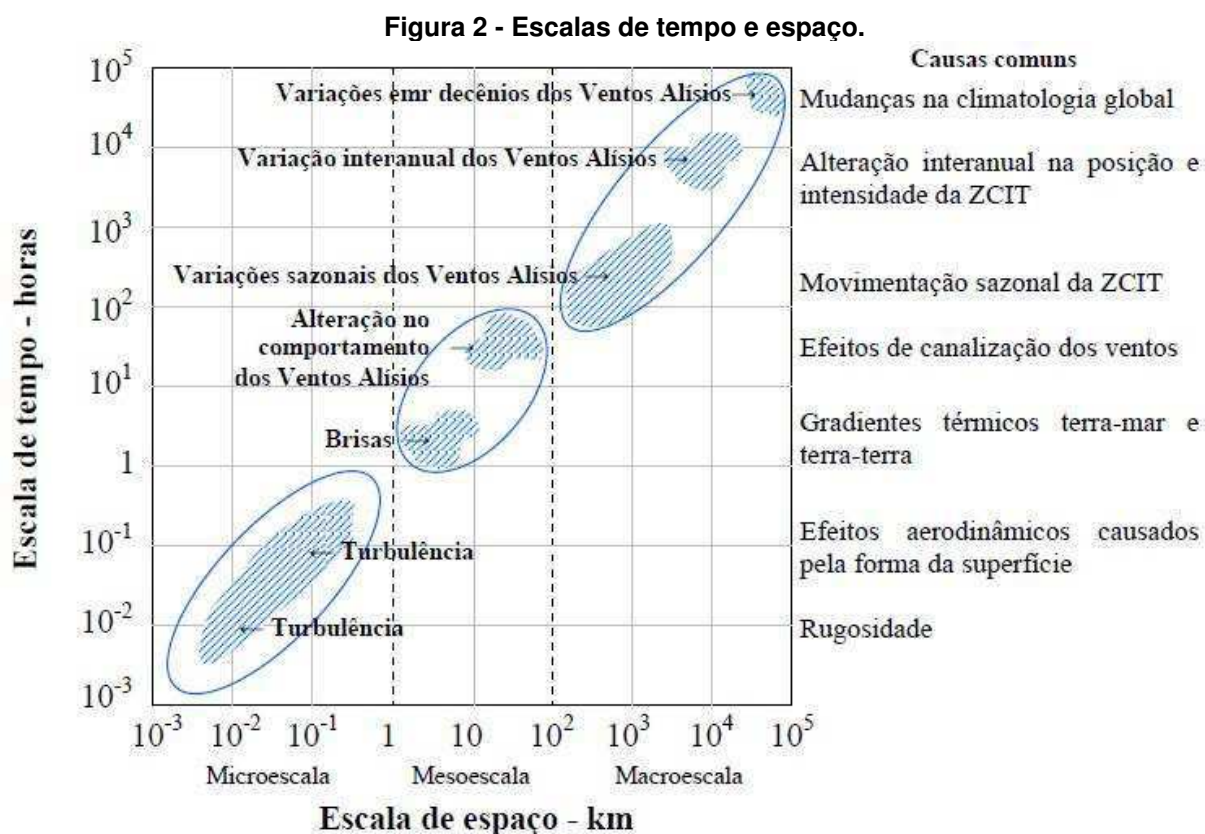
A circulação atmosférica nas altas latitudes é resultante da subsidência das massas de ar nas proximidades dos polos, produzindo um fluxo superficial para o equador, são chamados de ventos polares do Leste. Frente polar é o encontro dos ventos do oeste (mais quentes) com os ventos polares do Leste (mais frios), formando uma região de descontinuidade. Também apresentam variações de velocidade muito superiores às dos Ventos Alísios.

2.2 ESCALAS DE ESPAÇO

A superfície terrestre exerce um importante papel no comportamento dos

ventos. O perfil eólico de uma região é condicionado principalmente por fenômenos climáticos próximos a superfície. Estes fenômenos resultam em condições locais de vento que diferem das características gerais da Circulação geral atmosférica (Atlas do Potencial Eólico do Paraná, 2007, p. 10).

Assim, os movimentos atmosféricos são governados por sistemas climáticos associados a diferentes escalas de tempo e espaço, escalas estas que dependem das condições geográficas locais. A figura abaixo mostra alguns destes fenômenos atmosféricos, apresentando causas e diferenciando-os nas escalas de tempo e espaço.



Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

2.2.1 ESCALA PLANETÁRIA OU MACRO-ESCALA

As células de convecção entre o equador e as latitudes 30° N e 30° S, chamadas de células de Hadley, resultam em fluxo de ar ascendentes próximo ao equador térmico (ao norte do equador geográfico), descendentes sobre as latitudes subtropicais. Isso ocorre por que o ar ascendente se dirige do equador para os polos

(SILVA, 2003, p. 10).

A medida que ele se afasta da zona equatorial, perde calor latente para a condensação do vapor d'água contido na massa de ar, formando nuvens cúmulos, nuvens estas de natureza convectiva, ou seja, de curta duração e forte intensidade e abrangem pequenas áreas. Essa liberação de calor se dá pela pequena capacidade de reserva de energia potencial das regiões subtropicais, fazendo com que a densidade do ar aumente e ocorra a subsidência do fluxo de ar próximo aos trópicos (SILVA, 2003, p. 12).

Nas primeiras centenas de metros acima do nível do mar, os ventos do fluxo superficial das células de Hadley são estáveis, chamados de ventos Alísios. Estes ventos são massas de ar superficiais provenientes das latitudes subtropicais que se movem em direção à região de menor pressão da aquecida faixa equatorial.

Os ventos alísios se estendem verticalmente até aproximadamente 2 km da superfície e são as maiores fontes energéticas da região tropical, seus valores máximos estão entre as altitudes de 500 a 1000 m, onde aumentam em intensidade e diminuem em variabilidade. Possuem forte ciclo sazonal e grande assimetria próxima a linha do equador.

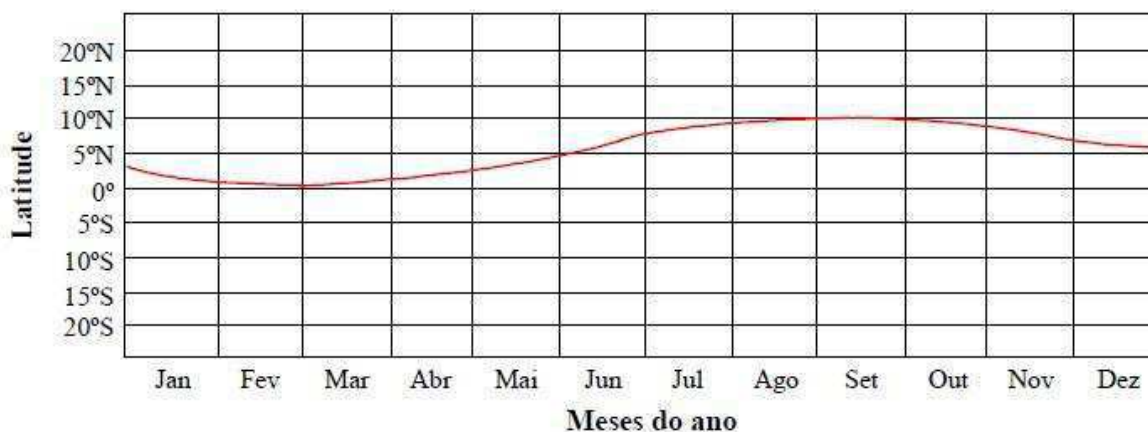
A assimetria próxima a linha do equador se dá na proporção de água e terra entre os hemisférios norte e sul. O HN é coberto por 61% de água e 39% de terra. O HS tem apenas 19% de sua área coberta por terra contra 81% de água. As massas continentais possuem capacidade térmica inferior aos oceanos, aquecendo facilmente, enquanto que os oceanos armazenam e liberam calor lentamente. Por isso que os verões são mais quentes e os invernos mais frios. Os ventos no HN provêm predominantemente do nordeste enquanto que no HS provêm do sudeste, ocorrendo o encontro numa região de baixa pressão chamada de Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

A ZCIT representa o principal transporte de calor e umidade que ascende da superfície. Formado pelos ventos alísios, possui um forte fluxo ascendente e um alto índice pluviométrico. Pode-se afirmar que a ZCIT é a força que dirige a circulação das células de Hadley, pois atua como uma grande bomba que suga calor e umidade da superfície para altas altitudes em direção aos polos.

O comportamento da ZCIT (posição e intensidade) é de grande interesse, pois está diretamente relacionado ao posicionamento e intensidade das células de pressão na região do equador. Ela tem uma forma levemente ondulada, sua posição

média é de 5° N, se movimentando para o norte durante a estação chuvosa e para o sul nos meses mais secos como pode ser visto na figura abaixo. Além do ciclo anual, podem ser observadas variações bruscas na posição da ZCIT em dias ou semanas.

Figura 3 - Ciclo anual da ZCIT nas longitudes 10° W e 45° W.



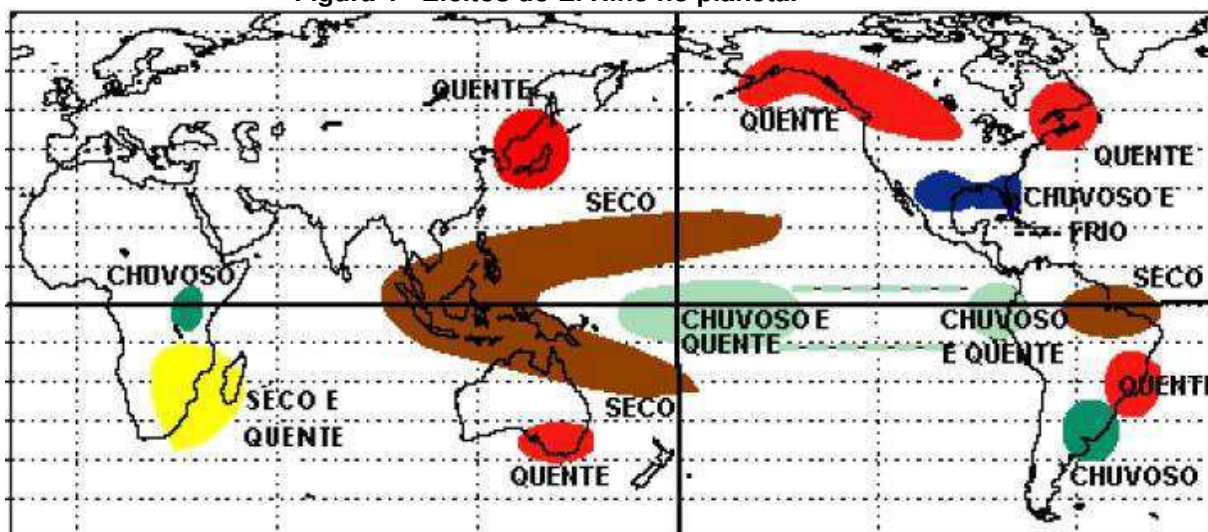
Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

Alterações no comportamento típico da ZCIT estão ligadas diretamente à temperatura superficial do mar (TSM) do Atlântico Sul e do Pacífico Equatorial. O clima da região nordeste é modificado diretamente por estas mudanças na TSM. Estas anomalias podem ser o dipolo de TSM no oceano Atlântico e o El Niño/La Nina no Pacífico. As anomalias no Atlântico são dominantes e condicionam fortemente a climatologia regional, enquanto que as anomalias no Pacífico Equatorial têm maiores efeitos na climatologia mundial.

O El Niño é o aquecimento anômalo das águas superficiais do Pacífico Equatorial, ocorrendo com ciclos irregulares entre 2 (dois) e 7 (sete) anos com evolução típica que inicia no começo do ano, atinge máxima intensidade no mês de dezembro e enfraquece por volta de junho do segundo ano. Tal fenômeno modifica o clima na região do Pacífico conjeturando em todo o restante do planeta. Nos anos que o fenômeno ocorre é possível observar uma diminuição na intensidade dos Ventos Alísios.

No nordeste brasileiro o El Niño provoca uma diminuição na precipitação ao norte da região do semi-árido (Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte) nos meses chuvosos de fevereiro a maio, este acontecimento é devido ao El Niño inibir a formação de nuvens nessa região como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 4 - Efeitos do El Niño no planeta.



Fonte: NCEP/NOAA - EUA.

O fenômeno conhecido por La Nina é o contrário do El Niño consiste no resfriamento anômalo da TSM do Pacífico Equatorial, modificando o comportamento climático do planeta. Ele inicia no início do ano, atinge sua intensidade máxima em novembro e dezembro, vindo a dissipar-se em meados do segundo ano. Ele provoca uma maior intensidade nos Ventos Alísios, com isso, há uma maior abundância nas precipitações do centro-sul do Maranhão e do Piauí entre novembro e janeiro, e o favorecimento de chuvas no semi-árido do nordeste brasileiro.

2.2.2 ESCALA REGIONAL OU MESO-ESCALA

Nas latitudes que cobrem o nordeste brasileiro, o regime do vento é fortemente condicionado pela circulação em macro-escala dos ventos alísios. Entretanto o comportamento destes ventos é influenciado pelas características climáticas e orográficas da região. A privilegiada localização geográfica do nordeste, devido a uma extensa cobertura oceânica (livre de obstáculos), garante alta intensidade, continuidade e constância nos ventos alísios.

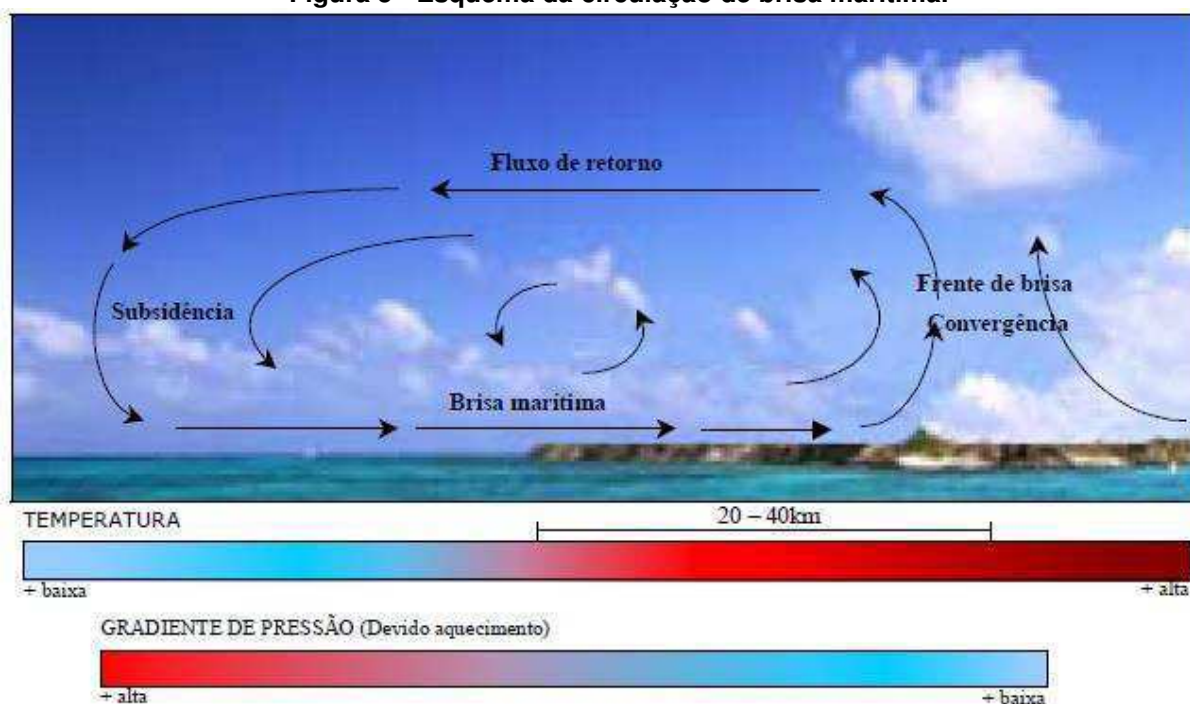
Os efeitos da meso-escala estão quase que totalmente ligados a interação dos ventos alísios nas camadas atmosféricas de baixos níveis produzindo as brisas marítimas e terrestres (SILVA, 2003, p. 16) .

As brisas marítimas originam-se da expansão das camadas de ar nas camadas superficiais da terra, uma vez que a radiação solar é absorvida e reemitida em menor tempo no continente que no mar. Esta expansão produz um suave fluxo

de ar aquecido nos níveis superiores (500 a 2000 m) da terra para o mar, chamado de fluxo de retorno. A manutenção deste fluxo sobre o mar indica um gradiente de pressão que cria um fluxo de ar nos níveis inferiores (entre 0 e 500 m) do mar para o continente, formando a brisa marítima. O limite continental onde ocorre a convergência da massa de ar é chamado de frente de brisa, marcado por aumento de umidade e intensificação de nuvens cúmulus, como pode ser visto na figura a frente.

As brisas terrestres se dão de forma análoga as brisas marinhas, diferindo apenas no sentido de circulação. À noite, a superfície da terra resfria em menos tempo que a do mar, com isso o ar resfriado do continente migra para o mar em níveis inferiores, aquece, ascende e retorna (fluxo de retorno) para o continente. A brisa terrestre tem intensidade menor que a marítima.

Figura 5 - Esquema da circulação de brisa marítima.



Fonte: Características de Ventos da Região Nordeste.

A brisa marítima se inicia próximo a linha da costa, penetra até 40 km no continente como pode ser visto na figura 5, em casos excepcionais, pode chegar até 100 km. Esta brisa contribui fortemente para intensificação e variação da direção dos ventos alísios. A sua maior incidência ocorre nos meses de verão e sua direção depende, fundamentalmente, da orientação da costa litorânea, sendo esta

perpendicular a linha da praia.

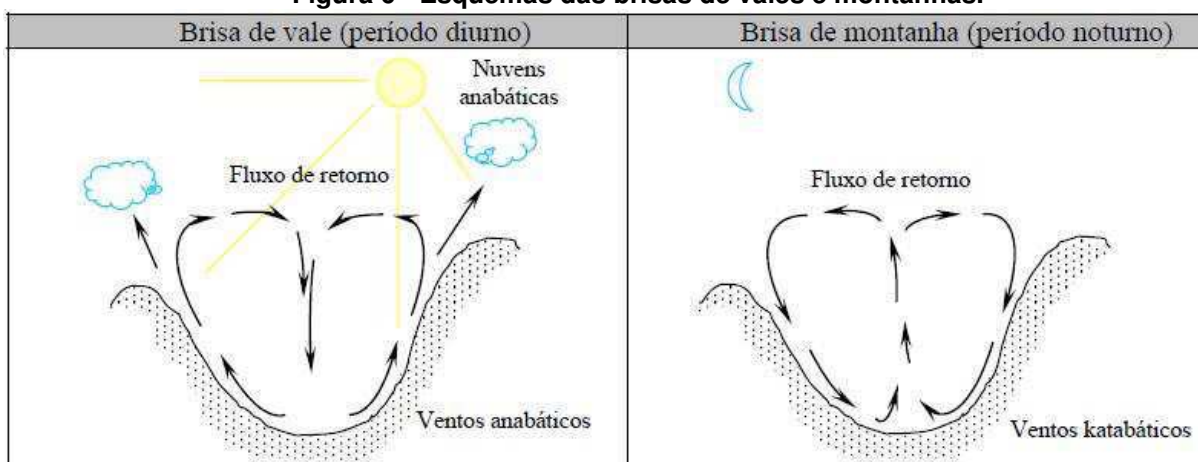
Outra enorme estrutura eólica do Nordeste são os ventos sobre regiões montanhosas e vales. Vários fenômenos físicos complexos ocorrem nestas regiões, que vão desde canalização do fluxo até grandes variações térmicas. O efeito de canalização ocorre no encontro de correntes de ar com montanhas e vales. Dependendo da direção do vento e da topografia, a massa de ar pode ser canalizada, acelerando a velocidade do fluxo de ar.

As variações térmicas induzidas pela forma e cobertura das superfícies montanhosa também podem modificar o fluxo do vento. As massas de ar estagnadas nas superfícies laterais das montanhas são aquecidas, com isso se tornam mais leve e avançam em direção ao topo, esses ventos são chamados de ventos anabáticos. Acima do topo das montanhas, estes ventos ascendentes passam pelo processo de inversão térmica e são forçados para um fluxo de retorno, chamado de vento antivale.

Durante a noite, a circulação reversa acontece devido a rápida liberação de calor do topo das montanhas, resfriando o ar adjacente nas laterais, obrigando um deslocamento descendente para o centro do vale. Estes ventos são chamados de ventos katabáticos e o fluxo de retorno desta circulação é chamado de vento antimontanha.

Estes mecanismos podem ser chamados de brisas de vales e brisas de montanhas como pode ser visto na figura abaixo (WMO, 1981, p. 175).

Figura 6 - Esquemas das brisas de vales e montanhas.



Fonte: Características de Ventos da Região Nordeste.

2.2.3 ESCALA LOCAL OU MICRO-ESCALA

As características eólicas do nordeste são influenciadas significativamente por eventos climáticos de micro-escala, resultando em condições localizadas que muito diferem das características gerais da circulação em macro-escala ou meso-escala. Muitos fatores inerentes a determinados locais podem afetar o regime dos ventos, e são chamados de fatores locais.

Os principais fenômenos de micro-escala observados na região nordeste são devido a contínua geração de vórtices devido à fricção do vento sobre a superfície (SILVA, 2003, p. 18). Estas forças de fricção diminuem a intensidade da velocidade do vento à medida que a massa de ar se aproxima do solo, induzindo um perfil vertical de velocidade, que provoca variações significativas na frequência e velocidade vento. Este fenômeno é chamado de turbulência atmosférica e se apresentam em escalas de tempo inferiores a hora, as vezes, segundos.

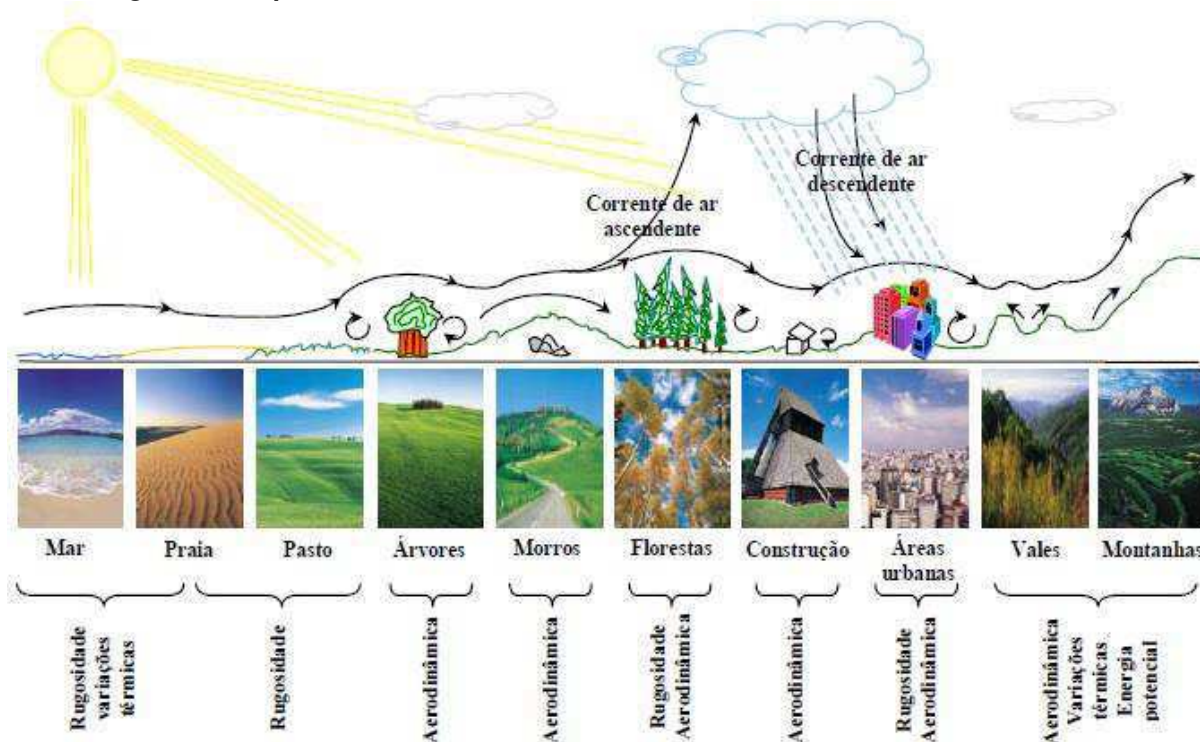
Quando uma massa de ar passa sobre várias superfícies, cada superfície irá influenciar o comportamento deste fluxo de maneira diferente. A intensidade destas influências depende diretamente das condições topográficas e de cobertura do solo.

Os principais mecanismos de micro-escala são divididos em três grandes conjuntos (SILVA, 2003, p. 29):

1. Fenômenos aerodinâmicos relacionados a topografia do local (elevações no terreno, serras e pequenas chapadas) e obstáculos naturais ou artificiais (árvores, construções);
2. Fenômenos associados a mudança na rugosidade entre duas ou mais superfícies, estes efeitos são de menor dimensão que o primeiro grupo.
3. Fenômenos relativos às variações do fluxo de calor no cruzamento do limite entre duas superfícies de características térmicas diferentes.

A figura abaixo mostra uma variedade de fatores locais que influenciam o regime dos ventos.

Figura 7 - Esquema dos efeitos sobre os ventos de diferentes fatores locais.



Fonte: Características de Ventos da Região Nordeste.

Estudos detalhados das características eólicas em micro-escala da região onde se deseja instalar um parque eólico são de fundamental importância, pois subsidiarão o entendimento correto da interação vento/solo.

2.4 ESCALAS DE TEMPO

Medições climatológicas em todo o mundo revelam que os ventos variam de forma temporal, tanto na sua intensidade (velocidade) quanto na sua orientação (direção). Essas variações estão associadas a variações nas escalas de espaço.

Os ventos podem ser mais intensos em determinadas épocas do ano que em outras, pode aumentar sua intensidade por alguns meses, como por alguns minutos, e pode também parar por longos períodos. Eles também variam verticalmente. As principais razões destas variações estão associadas ao comportamento eólico em macro-escala, meso-escala e micro-escala. E podem ser divididas em Variações Lentas e Variações Rápidas.

2.4.1 VARIAÇÕES LENTAS

Variações lentas de velocidade e direção ocorrem devido às mudanças nas condições climáticas em macro-escala, afetando o comportamento do vento em áreas de grandes extensões e por longos períodos. Podem ser classificadas em variações interanuais e sazonais.

2.4.1.1 VARIAÇÕES INTERANUAIS

A velocidade de vento média anual é um fator importante para os estudos de viabilidade técnica e econômica de projetos eólicos. O principal condicionante para as variações interanuais no Nordeste do Brasil está ligado a mudanças permanentes nos padrões climáticos do planeta (elevação da temperatura global) e pequenas irregularidades nos ciclos interanuais da ZCIT. Entretanto, variações nas regiões próximas ao equador são menores que as normalmente observadas nas médias e altas latitudes.

2.4.1.2 VARIAÇÕES SAZONAIS

As mudanças na circulação geral da atmosfera ao longo do ano provocam variações sazonais significativas na velocidade e direção do vento. Estas variações estão associadas a movimentação da ZCIT ao longo do ano e fortes efeitos de meso-escala. As variações sazonais no Nordeste possuem forte regularidade de ano para ano.

Nos meses de fevereiro e março, devido a proximidade da ZCIT – caracterizada por fortes convecções e chuvas contínuas – a intensidade dos ventos diminui. Nos outros meses do ano, com o retorno da ZCIT para próximo do equador contribui para uma intensificação dos ventos devido a um aumento no gradiente de pressão atmosférico (SILVA, 2003, p.21). Em agosto e setembro os ventos alísios atingem seu ápice e no verão há uma intensificação das brisas marítimas.

As variações sazonais são de grande importância em estudos para implementação de projetos eólicos devido a grande capacidade de complementar o sistema elétrico brasileiro, principalmente no nordeste onde ocorre uma forte relação de complementaridade sazonal entre os recursos eólicos e os recursos hídricos.

2.4.2 VARIAÇÕES RÁPIDAS

Estão ligadas diretamente as variações do vento em meso-escala e micro-escala. Estas variações afetam o comportamento do vento em áreas localizadas, por curtos períodos de tempo. Nesta classe estão as variações diurnas e de curta duração.

2.4.2.1 VARIAÇÕES DIURNAS

Variações diurnas são bruscas e fortes, com periodicidade diurna, as mudanças na velocidade e direção dos ventos estão ligadas a diferença de temperaturas entre superfícies. No litoral do Nordeste são ocasionadas principalmente por brisas marítimas e terrestres. Análises profundas dessas variações são necessárias para definir estratégias de operação de turbinas eólicas, conectadas direto a rede.

2.4.2.2 VARIAÇÕES DE CURTA DURAÇÃO

Estas variações são de grande importância, pois as características dos ventos estão em contínua mudança. Estas variações são associadas diretamente as condições de superfície do local, como a topografia, rugosidade e os obstáculos. Variam de segundos a minutos.

Varias medições anemométricas realizadas no litoral nordestino atestam a ocorrência de baixos níveis de turbulência. Isso se deve ao fato de que os ventos alísios prevalecem de uma extensa faixa oceânica e à medida que segue para o continente, tendendo a um aumento na turbulência devido as características locais do terreno (SILVA, 2003, p.22).

2.5 MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS

Para identificar quais características descritas acima incidem com maior ou menor intensidade em determinada região, é necessário à utilização de instrumentos de medição. O anemômetro mede a velocidade dos ventos podendo ser digital ou analógico. O anemógrafo mede a velocidade e direção do vento continuamente,

armazena as informações em memória, que são recuperadas e processadas por programas computacionais.

A velocidade do vento pode ser determinada através da rotação de uma ventoinha, da variação da pressão em diferentes partes de um mecanismo (tubo de Pitot), ou da taxa de decaimento da temperatura em corpos aquecidos. Na figura 8 é possível visualizar o instrumento de medição utilizado em uma turbina eólica.

Figura 8 - Instrumentos de medição do vento de uma turbina eólica.



Fonte: Próprio autor.

De um modo geral, quanto maior for a altura, maior será a velocidade do vento em determinada região. Os ventos de interesse para aproveitamento em equipamentos eólicos são os que ocorrem a baixas altitudes (cerca de 100m acima do nível do solo).

Diante do exposto, são estes fatores que determinam e influenciam nas características dos ventos, tendo em vista que estes são imprescindíveis para mensurar o potencial eólico de uma determinada região. Ademais, destaca-se que o potencial eólico de um local, se mede por todo o conjunto de fatores acima descritos, possuindo uma relação de dependência entre si.

3 ELEMENTOS TÉCNICOS DAS TURBINAS EÓLICAS

3.1 TIPOS E CLASSIFICAÇÃO

O aproveitamento da energia do vento remonta a séculos atrás. O aproveitamento dessa energia se dá através da conversão de energia cinética contida nos ventos em energia mecânica rotacional nas pás da turbina, para realização de trabalho mecânico ou conversão em energia elétrica. Com isso, as turbinas podem ser de arraste ou de sustentação. Elas podem ser turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) ou turbina eólica de eixo horizontal (TEEH). Por fim, elas também podem ser classificadas em turbinas eólicas upwind² ou downwind³.

Nas turbinas de arraste, o vento incide nas pás, empurrando-as, fazendo com que o rotor gire, como pode ser visto na figura abaixo. Neste tipo de turbina, a velocidade das pás não pode ser superior à velocidade do vento. Esse tipo de turbina não é utilizado em unidades geradoras de energia.

Figura 9 - Eolienne à axe vertical de type Savonius⁴.



Fonte: Renewable energy.

As turbinas de sustentação utilizam o conceito de aerofólio para projetar as pás, gerando um diferencial de pressão entre as superfícies responsável pela movimentação do rotor. Esse tipo de turbina é a tecnologia dominante na geração de energia elétrica a partir da eólica, como pode ser visto nas figuras 8 e 9. Todos os conceitos e considerações feitos nessa dissertação referem-se às turbinas de

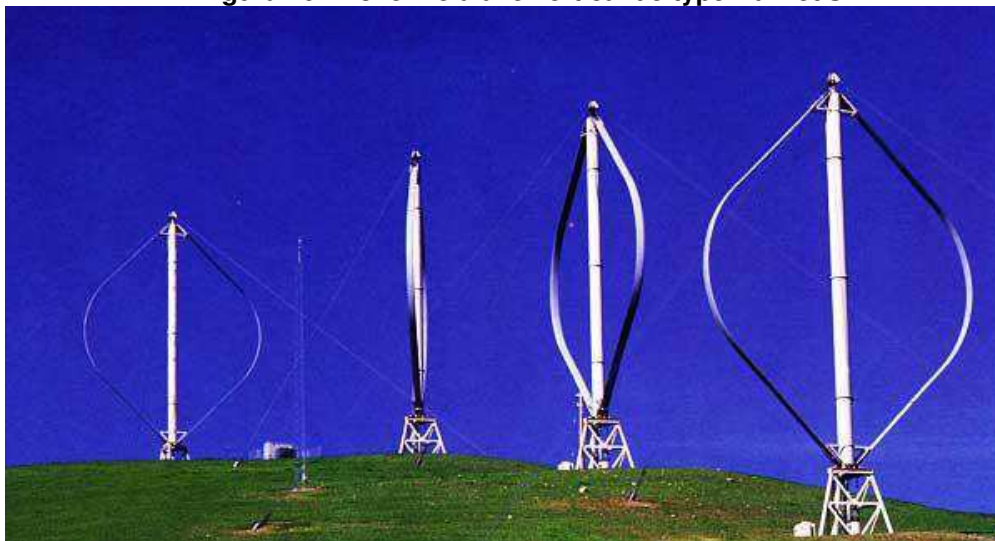
² Recebe o vento de frente. Tradução nossa.

³ Recebe o vento por trás. Tradução nossa.

⁴ Turbina Savonius de eixo vertical. Tradução nossa.

sustentação.

Figura 10 - Eolienne à axe vertical de type Darrieus⁵.



Fonte: Renewable energy.

Figura 11 - Turbinas eólicas de eixo horizontal.

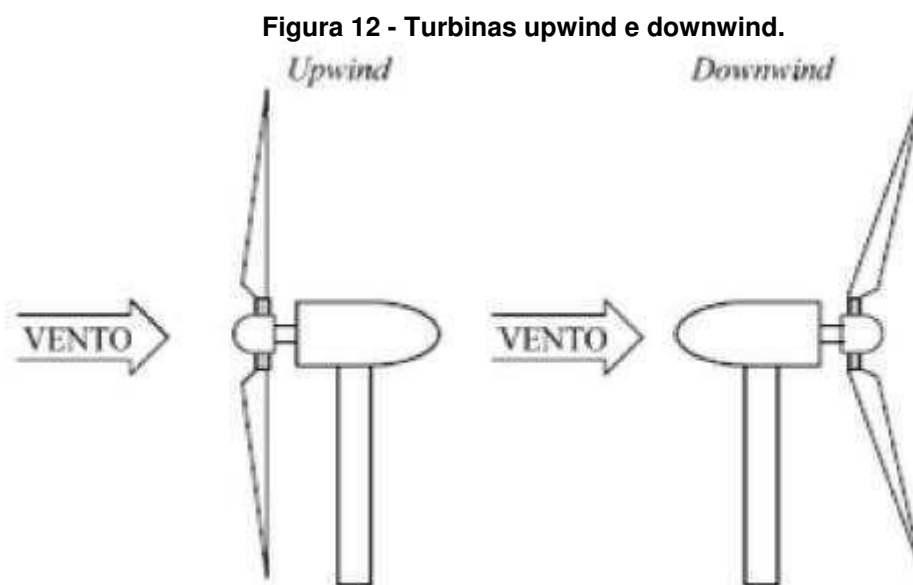


Fonte: Próprio autor.

A indústria eólica encontrou nas TEEH a tecnologia mais eficiente e, conseqüentemente, a mesma se espalhou pelo mundo dominando completamente o mercado. Isso se deve ao fato de elas apresentarem uma melhor distribuição do peso, apresentarem um menor ruído em função da menor velocidade rotacional se comparada a de 1 (uma) ou 2 (duas) pás para um mesmo nível de energia gerada.

⁵ Turbina Darrieus de eixo vertical. Tradução nossa.

Por fim, este tipo de turbina pode receber o vento de frente (upwind⁶) ou de trás (downwind⁷) conforme figura abaixo.



Fonte: Lopes, A. 2009.

As turbinas downwind⁸ de grande porte, para altas velocidades de vento, corre o risco de colisão das pás com a torre. A sua principal desvantagem é a turbulência causada ao vento pela torre, gerando ruídos.

As turbinas upwind⁹ não tem essa interação da torre em relação ao vento, reduzindo os ruídos. Entretanto, este tipo de turbina possui a desvantagem de a torre suportar uma maior carga devido a necessidade de mecanismos para o direcionamento da turbina em relação ao vento, pois existe pulsações de torque na turbina causadas pela passagem periódica das pás pela torre. Apesar dessa desvantagem, as turbinas upwind¹⁰ são a tecnologia dominante no mundo.

3.1.1 MOVIMENTOS DA TURBINA (YAW¹¹, PITCH¹² e ROLL¹³)

Um dos muitos esforços ao qual a torre é submetida está o movimento das

⁶ Recebe o vento de frente. Tradução nossa.

⁷ Recebe o vento por trás. Tradução nossa.

⁸

⁹ Recebe o vento de frente. Tradução nossa.

¹⁰

¹¹ Guinada ou cabeceio da turbina. Tradução nossa.

¹² Movimento das pás em relação ao seu próprio eixo. Tradução nossa.

¹³ Movimento em relação ao eixo da torre. Tradução nossa.

pás de uma turbina eólica, pois ela pode mover-se em relação aos eixos x, y e z, conforme pode ser observado na figura abaixo.

Figura 13 - Movimentos de uma turbina eólica.



Fonte: Araújo, A. (UFPE), 2011.

O movimento de Yaw¹⁴, também conhecido como guinada, é o movimento da nacelle buscando a melhor direção do vento, para conseguir a máxima extração de potência do mesmo. O Pitch¹⁵, também chamado de passo da pá, é o movimento das pás sobre seu próprio eixo, modificando assim o ângulo de ataque que será mencionado a frente. Roll¹⁶ é o movimento das pás em relação ao eixo da rotor.

3.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

O aerogerador é o principal componente do parque eólico, ele é responsável por cerca de 60% do investimento feito na criação de um sítio eólico. É uma máquina complexa, com capacidade de geração entre 1,5 e 3 MW (caso dos parques onshore). O aerogerador comercial no mundo todo é o de rotor com eixo horizontal do tipo hélice, com três pás.

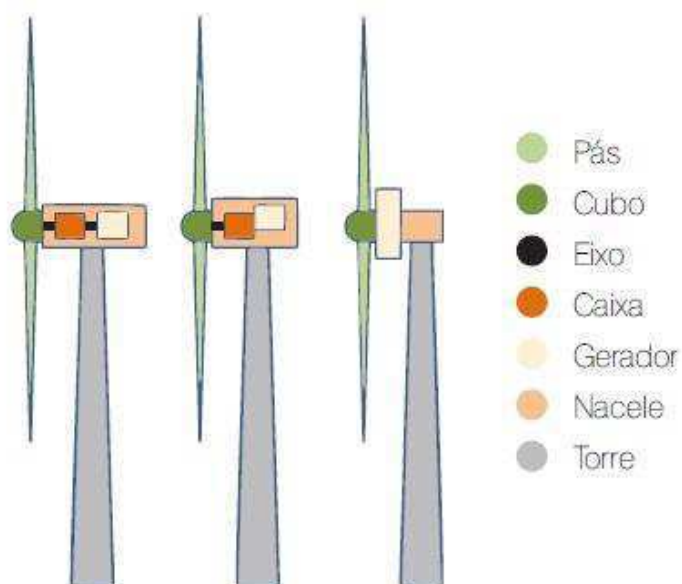
Como pode ser visto na figura abaixo, os principais componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal são: torre, pás, cubo do rotor, eixo, nacelle, gerador e dependendo da tecnologia usada pelo fabricante, caixa de engrenagem.

¹⁴ Guinada ou cabeceio da turbina. Tradução nossa.

¹⁵ Movimento das pás em relação ao seu próprio eixo. Tradução nossa

¹⁶ Movimento em relação ao eixo da torre. Tradução nossa.

Figura 14 - Componentes básicos de TEEH em diferentes configurações.



Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

3.2.1 GERADORES ELÉTRICOS

Diferentes tipos de aerogeradores têm sido desenvolvidos durante as últimas décadas, isso se deve ao fato de cada região do mundo ter ventos com características diferentes, diante disto, dependendo da tecnologia e do local onde eles serão instalados, pode haver componentes ou subcomponentes específicos, como também pode haver diferenças no aerogerador utilizado, como é possível ver pela figura 15.

As tecnologias utilizadas em aerogeradores podem ser classificadas segundo os conceitos abaixo (Project upwind, 2007):

1. Velocidade de rotação: velocidade fixa (VF); velocidade variável limitada (VVL); velocidade variável (VV);
2. Regulagem de força ou mecanismo de controle: controle estol (stall); controle de estol ativo; controle de passo (pitch);
3. Trem de acionamento (drive train); com caixa de engrenagem (multiplicadora); sem caixa de engrenagem (acionamento direto);
4. Tipo de gerador: gerador de indução (assíncrono) com rotor de gaiola (squirrel cage induction generator – SCIG); gerador de indução com rotor ventilado (wound rotor induction generator – WRIG); gerador de indução duplamente excitado (doubly fed induction generator – DFIG); gerador síncrono de excitatriz com ímãs permanentes (permanent magnet

synchronous generator – PMSG); gerador síncrono excitado eletricamente – com enrolamento de campo (electrically excited synchronous generator – EESG).

O gerador síncrono chama-se alternador, ele recebe esse nome devido a máquina operar com uma velocidade de rotação constante, sincronizada com a frequência da tensão elétrica alternada aplicada aos seus terminais, ou seja, devido ao movimento igual de rotação entre o campo girante e o rotor (sincronismo entre campo do estator e do rotor).

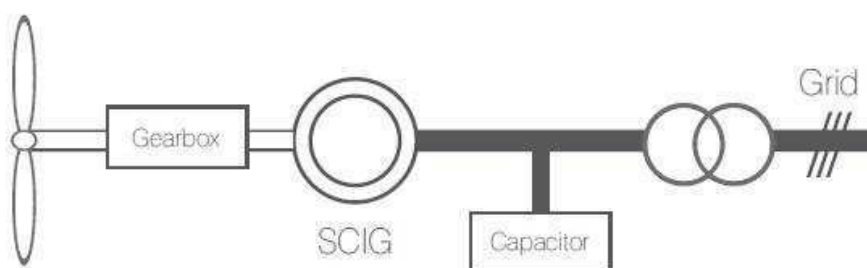
Os geradores assíncronos também chamados de indução operam com uma velocidade superior à velocidade de sincronismo, exigindo escorregamento do rotor em relação ao campo girante, esse tipo de gerador não precisa de excitatriz. Sua vantagem em relação ao gerador síncrono é sua construção simples e barata, sua desvantagem é a necessidade de alta corrente para a partida e demanda por potência reativa.

Diante do exposto acima, foram desenvolvidos diferentes tipos de aerogeradores que serão abordados abaixo.

3.2.1.1 GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR DE GAIOLA (SCIG)

A topologia de aerogeradores dominante nos anos 80 e 90, conhecida como “conceito dinamarquês”, suas características são velocidade fixa, controle estol (que será explicado mais a frente), caixa de engrenagem de múltiplo estágio e gerador de indução com rotor de gaiola conectado direto a rede através de um transformador. A figura abaixo descreve esta topologia de forma esquemática.

Figura 15 - Esquema de um gerador do tipo SCIG



Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

Este sistema evoluiu para duas velocidades utilizando um gerador SCIG com polo mutável. Com isso chegou a uma maior eficiência das pás e um menor ruído a baixas velocidades. Geralmente os aerogeradores comerciais utilizam dois ou três pares de polos, requerendo uma caixa de engrenagem de três estágios. Ele não possui conexão elétrica entre estator e rotor. Essa tecnologia tem sido utilizada pela Vestas, Nordex e Gamesa.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, foi introduzido o controle de estol ativo (será detalhado mais a frente) permitindo a virada da pá e com isso uma maior extração de potência do vento. Este sistema tem sido utilizado pela Siemens e Vestas.

3.2.1.2 GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR VENTILADO (WRIG)

Nos anos 90 a Vestas desenvolveu aerogeradores com velocidade limitada, chamados de OptiSlip. Este conceito consiste na utilização de um conversor eletrônico de potência que controla a resistência do rotor (slip) e um gerador de indução com rotor ventilado (WRIG), similar ao SCIG. Vestas e Suzlon utilizaram este conceito em seus aerogeradores, esquematizado na figura abaixo.



Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

A partir dos anos 90, os fabricantes que produzem aerogeradores com capacidade superior a 1,5 MW passaram a utilizar o conceito de velocidade variável proporcionando maior qualidade na energia gerada.

Os aerogeradores com velocidade variável utilizam mecanismo de controle de passo, caixa de engrenagem multi-estágio e conversor eletrônico de potência.

3.2.1.3 GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE EXCITADO (DFIG)

Este tipo de gerador é utilizado em aerogeradores de grande porte. O seu princípio de funcionamento é semelhante ao SCIG, porém a potência ativa do rotor pode ser controlada pela corrente do conversor paralela ao rotor, como pode ser visto na figura abaixo.

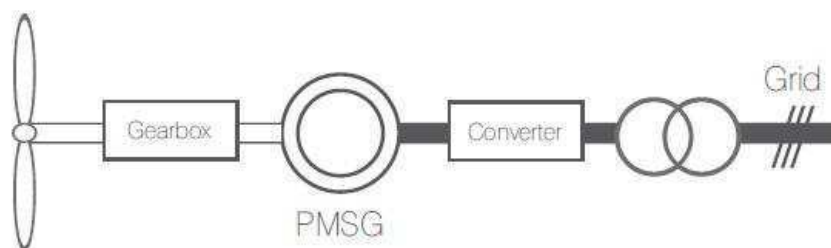


Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

3.2.1.4 GERADOR SÍNCRONO DE EXCITATRIZ COM ÍMAS PERMANENTES (PMSG)

Uma alternativa ao DFIG é o gerador síncrono de excitatriz com ímas permanentes (PMSG) e com conversor de larga escala, pois o custo de seus componentes é menor e ele não utiliza escovas. Os fabricantes Gamesa, GE e Clipper utilizam essa topologia que é representada esquematicamente na figura abaixo.

Figura 18 - Esquema de um gerador do tipo PMSG com conversor de larga escala



Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

A partir de 1991, começaram a desenvolver aerogeradores sem caixa de engrenagem, ou seja, com acionamento direto visando reduzir às falhas relacionadas com a caixa de engrenagens minimizando as manutenções. Aerogerador sem caixa de engrenagem gira com baixa velocidade por que o rotor

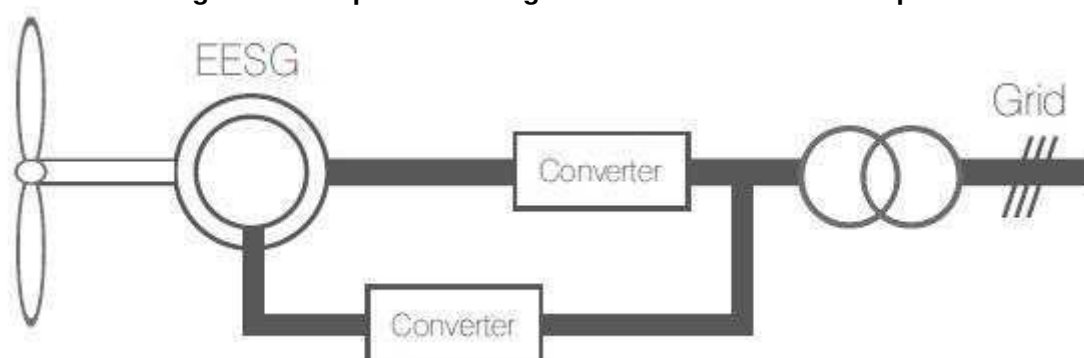
está conectado diretamente ao cubo das pás, necessitando de um torque elevado.

Há atualmente dois tipos de geradores sem caixa de engrenagem sendo comercializados, o tipo EESG e o tipo PMSG que é descrito abaixo.

3.2.1.5 GERADOR SÍNCRONO EXCITADO ELETRICAMENTE

O tipo EESG, gerador síncrono excitado eletricamente com enrolamento de campo, é o mais utilizado hoje pelos fabricantes com tecnologia sem caixa de engrenagem. A não utilização de ímãs permanentes diminui o seu custo, mas a necessidade de componentes eletrônicos seguros e confiáveis em seu conversor torna-o mais caro. Também necessita de refrigeração constante. O seu esquema é mostrado na figura abaixo. A Enercon/Wobben utiliza esta tecnologia em sua cadeia de produção comercial.

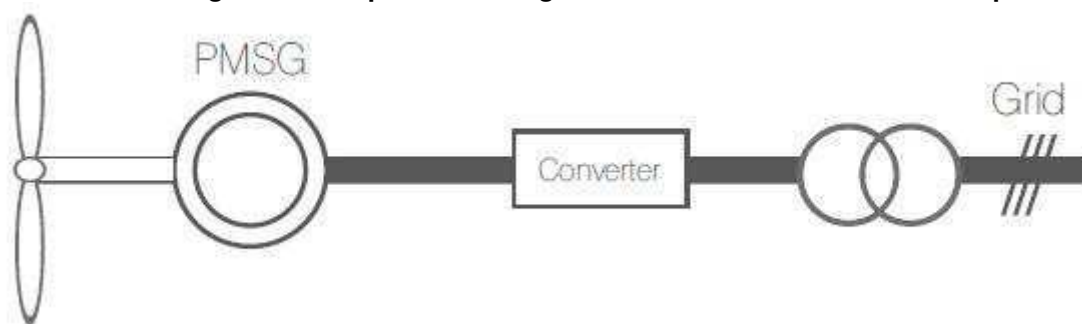
Figura 19 - Esquema de um gerador de acionamento do tipo EESG



Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

A tecnologia PMSG está se tornando competitiva em relação a EESG devido a sua melhoria no desempenho, redução no custo de seus componentes e retirada da caixa de engrenagens. Empresas com WEG (tecnologia Northern) e IMPSA (tecnologia Vensys) utilizam este conceito representado esquematicamente na figura abaixo.

Figura 20 - Esquema de um gerador de acionamento direto do tipo PMSG



Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

A MultiBrid introduziu no mercado um sistema com velocidade variável, gerador de ímãs permanentes e caixa de engrenagens planetária de estágio único que também é utilizado pela WinWind. Este esquema pode ser visualizado na figura 19.

Várias outras tecnologias estão sendo desenvolvidas pelo mundo todo mas que ainda não estão sendo comercializadas, como é o caso do gerador de indução linear, geradores de relutância comutada e geradores de indução sem escovas (brushless doubly fed induction generators – BDFIGs).

3.2.2 TORRE

As torres são responsáveis por sustentar e posicionar o conjunto rotor-nacele a uma altura conveniente ao seu funcionamento. Elas podem ser do tipo cônica ou treliçada e construídas a partir de diferentes materiais. As torres cônicas podem ser feitas de aço laminado ou concreto protendido. Já as torres treliçadas utilizam aço galvanizado. Há também as torres (cônicas) híbridas, nas quais a parte de baixo (cerca de 60 metros) é feita em concreto e a parte superior em aço, as duas partes são acopladas através de um anel de transição.

A definição do tipo de torre/material utilizado em um sítio eólico depende de fatores como custo, altura do aerogerador, facilidade de transporte, montagem e manutenção. Em geral, as torres cônicas de aço são utilizadas para alturas entre 80 e 100 metros, enquanto que as torres de concreto, híbridas ou treliçadas são construídas para altura superior a 100 metros.

Os parques eólicos instalados no Brasil contam com torres cônicas de aço e as híbridas. Recentemente, novos fabricantes estão desenvolvendo protótipos no

país de torres de concreto para utilizarem comercialmente. A figura abaixo mostra alguns componentes forjados da estrutura das torres de aço cônicas.

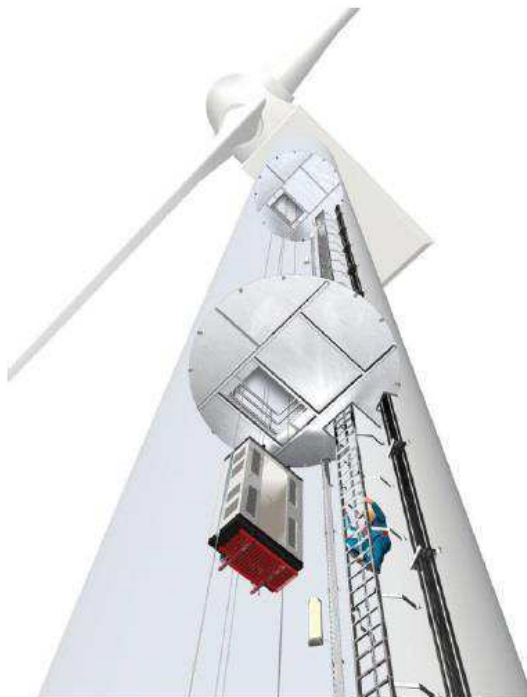
Figura 21 - Componentes forjados - torres de aço cônicas.



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

As torres representam cerca de 20 a 25% do custo total de um aerogerador. As torres de aço cônicas utilizam entre 100 e 200 toneladas de aço para a sua construção, aproximadamente 98% da torre é feita de aço, neste caso a torre representa 65% do peso do aerogerador. As torres de concreto são bem mais pesadas, com cerca de 850 ton. em sua parte estrutural. Além dos componentes estruturais que correspondem a cerca de 90% do custo total da torre, ainda existem componentes internos, tais como escadas, elevadores, plataformas. A figura abaixo mostra alguns destes componentes internos. A tabela abaixo mostra os itens e insumos utilizados em torres cônicas, que são mais utilizadas no Brasil.

Figura 22 - Componentes internos da torre



Fonte: <http://www.hailo-professional.de/>

Tabela 1 - Itens e insumos usados em torres cônicas.

Torre (20 a 25% do custo do aerogerador)		
Estrutura torre de aço	Chapas de aço laminado Flanges Fixadores (parafusos ou elementos de conexão) Portas Escotilhas Revestimentos (pintura)	
Estrutura torre de concreto	Concreto (pré-moldados) Moldes Insertos metálicos Cabos de aço de protensão Revestimentos (pintura) Produtos de montagem dos pré-moldados (adesivos)	Cimento, areia, brita, água, aditivos plastificantes
Elementos internos	Escadas Elevador Plataformas Suportes (brackets) e acessórios Sistemas de proteção contra quedas Guard-rails Passa-cabos (pipe-rack ou eletrodutos) Cabos Iluminação	Etiquetas de identificação Cabo, fixador, trava-queda, correia, corda Cerca, porta da cerca

Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

3.2.3 ROTOR

O rotor compreende basicamente as pás, em TEEH comerciais são utilizadas três pás, e o cubo onde são fixadas. As pás são os elementos que interagem diretamente com o vento absorvendo sua energia e transmitindo-a para o rotor. São perfis aerodinâmicos com comprimento entre 30 e 70 metros (instalações onshore¹⁷), fabricados em material compósito – resina epóxi ou poliéster reforçada com fibra de vidro e/ou carbono – representam cerca de 22% do custo total de um aerogerador e 7% de seu peso total (pesam cerca de 6 a 10 ton. cada). São revestidos com poliuretânicos para proteger o compósito das intempéries.

A estrutura da pá consiste em uma viga principal ou estrutura central (mastro), revestida por um casco externo, formado por duas conchas unidas feitas de material compósito. Os materiais compósitos podem ser do tipo laminado – várias camadas de materiais compósitos unidas – e sanduíche – camadas externas finas de laminado com um núcleo central de baixa densidade, geralmente formado por madeira, espuma PVC, PU ou PET. Sua fabricação é feita por processo de infusão e depois coladas com adesivos à base de epóxi. Nas figuras abaixo é possível visualizar em detalhe o processo de fabricação e montagem, e os componentes da pá.

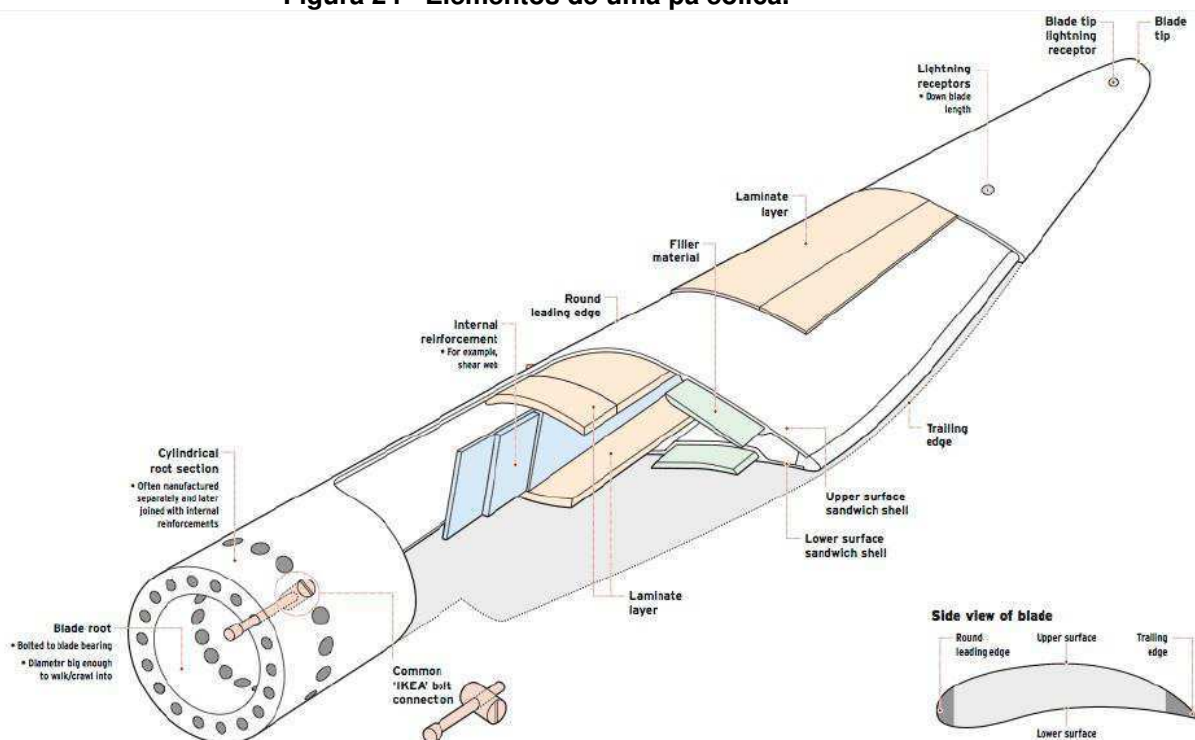
Figura 23 – Processo de fabricação e montagem das pás eólicas.



Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

¹⁷ Costa ou terra. Tradução nossa.

Figura 24 - Elementos de uma pá eólica.



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

Outro componente da pá é a raiz de inserção, responsável por conectar as pás ao rotor utilizando parafusos de metal ou fixados mecanicamente na raiz. Fabricado em separado e depois integrado a pá.

As pás são fixadas em uma estrutura metálica chamada de cubo que se localiza a frente do aerogerador. É uma peça de ferro fundido, de alta precisão de fundição e usinagem, construída em liga de alta resistência. Sua massa varia de 7 a 20 ton. e custa cerca de 1,4% do custo total de um aerogerador. O cubo acomoda os rolamentos para fixação das pás e os mecanismos para ajuste do ângulo de ataque das pás – o sistema de passo (pitch¹⁸). O sistema de pás e cubo correspondem a cerca de 10 a 14% do peso total do aerogerador e por 20 a 30% do custo total. Na figura abaixo visualizar um cubo e seus subcomponentes (CRESESB, 2015). A tabela abaixo mostra os itens e insumos utilizados para a fabricação das pás e do rotor.

¹⁸ Passo da pá. Tradução nossa.

Figura 25 - Cubo e subcomponentes do rotor.



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

Tabela 2 - Itens e insumos utilizados nas pás e cubo do rotor de um aerogerador.

Rotor (aprox. 20 a 30% do custo do aerogerador)		
Pás	Estrutura da pá (casco externo, mastro interno ou alma e raiz de inserção)	Resina epóxi ou poliéster Tecido de fibra de vidro Tecido de fibra de carbono Espuma de PVC Madeira Balsa Massas e revestimentos de proteção
	Fixadores (parafusos T-bolt) e porcas (Barrel Nut) Sistemas acessórios	Sistema antirraios Sistema antigelo
Cubo	Carcaça do cubo (fundido e usinado) Carenagem do cubo	Resina epóxi ou poliéster Tecido de fibra de vidro Anel Base Acionamento do passo / motorreductor Painel de controle do passo Bloco hidráulico para controle do passo Cilindros do passo
	Rolamento do passo (pitch) Sistema do passo (pitch) Extensores Sistema de lubrificação	

Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil.

3.2.4 NACELE

É a carcaça montada sobre a torre que contém vários componentes e subcomponentes essenciais para o ótimo funcionamento do aerogerador, como o eixo, o gerador, a caixa multiplicadora quando há, transformador, sistema de controle de direção, entre outros. O tamanho e o formato da nacele irão depender da tecnologia utilizada, as maiores variações são entre os que utilizam ou não caixa

multiplicadora.

A nacelle pode conter, dependendo da tecnologia/configuração escolhida, uma série de elementos estruturais de aço, como a estrutura principal, o quadro e o bastidor traseiro, que suportam todos os componentes nela inseridos. O eixo principal, construído em aço ou liga metálica de alta resistência, é responsável pelo acionamento do gerador, transferindo a energia mecânica da turbina. O gerador é responsável por transformar energia mecânica em elétrica, e pode ser de vários tipos como visto anteriormente. Muitos aerogeradores controlam a tensão de saída, e por isso, necessitam de conversores de frequência, um retificador e um inversor.

O transformador é o equipamento instalado na nacelle ou na base da torre, internamente ou externamente, e é responsável por elevar a tensão de saída ao valor da tensão da rede elétrica ao qual o aerogerador está conectado. O sistema de yaw¹⁹ consiste em um motor elétrico responsável por girar a nacelle sobre a torre com auxílio de um rolamento – rolamento do Yaw – e também engrenagens para ajustar a velocidade do giro (CUSTÓDIO, 2013). A caixa multiplicadora, quando existente, representa a maior massa da nacelle e cerca de 13% de seu custo. Localiza-se entre o rotor e o gerador, de forma a adaptar a baixa rotação do rotor a alta rotação do gerador. É um componente que passa por manutenções constantes, pois é bastante complexo, necessita de um sistema hidráulico com bombas, trocadores de calor e sistemas para refrigeração e lubrificação. No caso de um aerogerador sem caixa multiplicadora, utiliza-se gerador de polos salientes (multipolos) com o estator em forma de anel (CUSTÓDIO, 2013). A figura abaixo mostra a nacelle com e sem caixa multiplicadora.

Figura 26 - Nacelle com e sem caixa multiplicadora.



Fonte: Filho, A. 2009.

¹⁹ Guinada ou cabeceio da turbina. Tradução nossa.

A tabela abaixo mostra em detalhes os principais componentes e subcomponentes da nacele.

Tabela 3 - Componentes e subcomponentes da nacele.

Nacele (aprox. 35 a 50% do custo do aerogerador)		
	Elementos estruturais Talha Carenagem da nacele Acessórios Eixo principal Rolamento Yaw Sistema de Yaw Conversor/Inversor Transformador Sistema de freios Sistema de travamento do rotor Painel de proteção elétrica Cabos/barramento Unidade hidráulica Sistema de refrigeração da nacele Slip Ring	Quadro principal (main frame) Quadro traseiro (rear frame) Bastidor Parafusos estruturais 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 Sistema de acionamento do Yaw (motorreductor) Painel de controle do Yaw
Aerogerador com caixa	Gerador Caixa Multiplicadora	Habitáculo Engrenagens planetárias Rolamentos Mangueiras Sistema de torque Sistema de lubrificação Sistema de resfriamento
Aerogerador sem caixa	Gerador – Estator Gerador – Rotor	Elementos estruturais do estator Resina de impregnação Núcleo magnético Bobinas Elementos estruturais do rotor Tampa do rotor Imãs permanentes

Fonte: Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil

A construção de um parque eólico está muito além do aerogerador. Diversos são os bens e serviços que fazem parte da cadeia produtiva eólica. A construção de um parque eólico segue basicamente quatro grandes fases: desenvolvimento do projeto, negociação, execução e por último, operação e manutenção.

O desenvolvimento de projetos é a prospecção de áreas, estudos de viabilidade e o desenvolvimento do projeto. A negociação consiste em negociar com

fornecedores, compradores e captar investidores. A execução é a pré-construção e a construção e montagem e por fim a operação e manutenção para ótima operação do parque. Anterior a instalação dos aerogeradores vem as etapas citadas acima, e nessas etapas estão a preparação das bases dos aerogeradores que é feita em concreto armado, encaminhamento e lançamento dos cabos de média tensão e de telecomunicações para interligar os aerogeradores, estes a subestação e a subestação ao sistema interligado nacional (SIN), equipamentos elétricos que compõem a subestação, linhas de transmissão entre outros.

Além dos bens instalados no parque durante sua construção, há também os bens móveis, que são utilizados na fase de construção, como guindastes especiais que suportam até 750 ton. e veículos especiais para movimentação e transporte de componentes específicos.

3.3 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é a energia cinética contida no movimento de uma massa de ar (vento), como mostrado na equação abaixo:

$$(1) E_k = \frac{1}{2}mv^2 \text{ (energia cinética do vento)}$$

Onde:

E_k = Energia cinética (J)

m = massa de ar (kg)

v = velocidade desta massa de ar em movimento – vento (m/s)

Esta massa de ar em deslocamento contém uma potência, ou seja, um fluxo de energia que é definido como a derivada da Energia ao longo do tempo, conforme equação abaixo:

$$(2) P = \dot{E}_k = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \text{ (Potência contida no vento)}$$

Onde:

P = Potência do vento (W)

\dot{E}_k = Fluxo de energia (J/s)

E_k = Energia cinética (J)

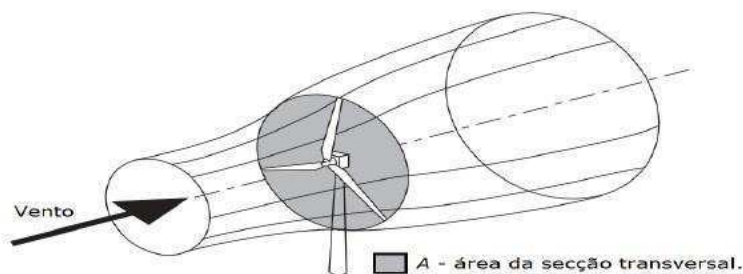
\dot{m} = Fluxo de massa de ar (kg)

v = velocidade desta massa de ar em movimento – vento (m/s)

t = tempo (s)

O fluxo de massa de ar que atravessa perpendicularmente uma seção transversal de área S (BETZ, 1966), conforme pode ser visto na figura abaixo, é descrito na equação 3.

Figura 27 - Analogia do tubo de Betz em um aerogerador.



Fonte: Adaptado de BURTON;SHARPE; NICK, 2001

$$(3) \dot{m} = \rho v S$$

Onde:

\dot{m} = fluxo de massa de ar (kg)

ρ = massa específica do ar (kg/m^3)

v = velocidade desta massa de ar em movimento – vento (m/s)

S = Área da seção transversal

Substituindo a equação 3 em 2, chega-se a conclusão que a potência contida no vento que atravessa a seção transversal de área S é:

$$(4) P = \frac{1}{2} \rho S v^3 \text{ (Potência contida no vento)}$$

Onde:

P = Potência do vento (W)

ρ = massa específica do ar (kg/m^3)

S = Área da seção transversal

v = velocidade desta massa de ar em movimento – vento (m/s)

Com isso, é possível perceber através da equação 4 que a potência contida no vento varia com o cubo da velocidade, com a massa específica do ar e com a área “S” varrida pelas pás do aerogerador e atravessada por este fluxo de massa de ar (vento), área esta que tem uma relação quadrática com o diâmetro do rotor, como pode ser visto na equação abaixo (FADIGAS, 2011), para o caso TEEH:

$$(5) S = \frac{\pi}{4} D^2$$

Onde:

S = área da seção transversal cortada pelo fluxo de ar (m^2)

π = constante adimensional (3,141592...)

D = Diâmetro do rotor

Através das equações acima, é possível observar que a energia gerada é altamente sensível (relação cúbica) à velocidade do vento que atravessará as pás do aerogerador, assim como existe uma alta sensibilidade (relação quadrática) em relação ao diâmetro do rotor. Este é o motivo pelo qual se deve ter atenção nos dados de medição dos ventos onde se quer instalar um sítio eólico, além de ser o motivo pelo qual ocorre investimento contínuo na área para se conseguir instalar torres cada vez mais altas, com pás maiores, varrendo uma área maior e com isso extraindo uma potência maior dos ventos.

3.4 POTÊNCIA MÁXIMA DE EXTRAÇÃO (LIMITE DE BETZ)

O limite de Betz é um limite teórico para extração de potência dos ventos, limite este que foi descrito pelo físico alemão Albert Betz em 1929.

A equação abaixo mostra a Lei de Conservação de Massa em um determinado volume de controle, que fundamenta o fato de o fluxo de ar que entra no rotor ser o mesmo que sai do rotor, por isso que a área ocupada pelo ar na saída do rotor é maior que a área ocupada na entrada do rotor, como pode ser visto na

figura 27.

$$(6) \dot{m} = \rho S_1 v_1 = \rho S v = \rho S_2 v_2$$

Onde:

\dot{m} = fluxo de massa de ar (kg)

ρ = massa específica do ar (kg/m^3)

v_1 = velocidade da massa de ar na entrada do rotor (m/s)

v_2 = velocidade da massa de ar na saída do rotor (m/s)

S_1 = área da seção transversal na entrada do rotor (m^2)

S_2 = área da seção transversal na saída do rotor (m^2)

S = área da seção transversal no rotor (m^2)

v = velocidade da massa de ar no rotor (m/s)

O fluxo de massa de ar na entrada do rotor tem velocidade superior ao da saída do rotor, e é essa diferença de velocidade que justifica a geração de energia elétrica através da transformação da energia cinética contida nos ventos em energia mecânica rotacional nas pás da turbina, que por sua vez induzem corrente elétrica nas espiras da bobina do gerador elétrico, este fenômeno é descrito pela Lei de Faraday.

É intuitivo pensar que, como a geração de energia elétrica no gerador está diretamente ligado a transformação da energia cinética contida nos ventos, então, a potência máxima extraível seria quando a velocidade do vento na saída do rotor fosse nula. Se isso ocorresse, haveria um acúmulo de ar na saída do rotor, interrompendo o fluxo de ar e com isso a geração. Entretanto, Albert Betz provou fisicamente que para obter a máxima potência teórica possível, é necessário que a velocidade 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 convertida em energia elétrica.

A potência mecânica extraída do fluxo de ar ($P_{extraída}$) que atravessa o rotor é a diferença entre a potência de entrada ($P_{entrada}$) e a potência de saída ($P_{saída}$) deste rotor, como pode ser visto na equação abaixo.

$$(7) P_{extraída} = P_{entrada} - P_{saída}$$

(Potência extraída do vento em uma turbina)

Substituindo (4) em (7), temos:

$$(8) P_{extraída} = \frac{1}{2} \rho S_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho S_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (S_1 v_1^3 - S_2 v_2^3)$$

(Potência extraída do vento em uma turbina)

Substituindo (6) em (8)

$$(9) P_{extraída} = \frac{1}{2} \rho S_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2)$$

(Potência extraída do vento em uma turbina)

Betz considera que a velocidade da massa de ar onde a potência mecânica é extraída (rotor) é a média aritmética entre a velocidade da massa de ar na entrada do rotor e a velocidade da massa de ar na saída do rotor. Como pode ser visto na equação abaixo.

$$(10) v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \text{ (velocidade da massa de ar no rotor)}$$

Substituindo (10) em (9), temos:

$$(11) P_{extraída} = \frac{1}{2} \left\{ \rho S \frac{(v_1 + v_2)}{2} \right\} (v_1^2 - v_2^2) =$$

$$\frac{1}{2} \rho S v_1^3 \left\{ \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]}{2} \right\}$$

(Potência extraída do vento em uma turbina)

Através da equação 11, determina-se o coeficiente de potência do rotor (C_p), descrito na equação abaixo, que é a potência que será extraída do vento em relação à potência contida neste vento.

$$(12) \quad C_p = \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]}{2} \quad (\text{Coeficiente de potência do rotor})$$

O coeficiente de potência do rotor é uma medida de eficiência da turbina eólica, uma vez que mede a energia que pode ser produzida na turbina, desprezando-se as perdas, em relação a energia total contida no vento que a atravessa. Ao se maximizar a equação 12 e considerar que a relação entre as velocidades na entrada e na saída do rotor são um terço (1/3), conclui-se que o valor máximo de C_p é:

$$(13) \quad C_p = \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]}{2} = \frac{16}{27} = 59,3\%$$

(Valor máximo de C_p , Limite de Betz)

Logo, conclui-se que o limite teórico para extração do vento é 59,3% da energia contida naquele fluxo de massa de ar. Entretanto, vale lembrar que existem restrições tecnológicas que fazem com que a potência máxima extraível do vento seja inferior ao limite de Betz.

3.5 A LEI DE BERNOULLI E OS AEROFÓLIOS

A Lei de Bernoulli define que a soma das pressões dinâmica e estática se conservam num escoamento contínuo e sem deslocamento, de acordo com a equação abaixo.

$$(14) \quad \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{constante} \quad (\text{Equação de Bernoulli})$$

Onde:

ρ – massa específica do fluido (kg/m^3)

v – velocidade do fluido (m/s)

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

h – altura (m)

p – pressão (pa)

A equação fundamental da Lei de Bernoulli mostra que a soma das pressões dinâmica e estática num fluido não viscoso se conservam. Portanto, se ocorrer um aumento da velocidade e, conseqüentemente um aumento da pressão dinâmica, a pressão estática irá diminuir. Caso a velocidade diminua, logo, a pressão dinâmica diminua, essa diminuição será acompanhada por um aumento da pressão estática.

Considerando as pás do aerogerador como um aerofólio, para que o escoamento do fluido seja contínuo, é necessário que as partículas de ar que passam pelo lado mais longo da pá, tenham velocidade maior que as partículas de ar que passam pelo lado menos longo, de forma que alcancem a borda de fuga ao mesmo tempo, caracterizando um escoamento contínuo.

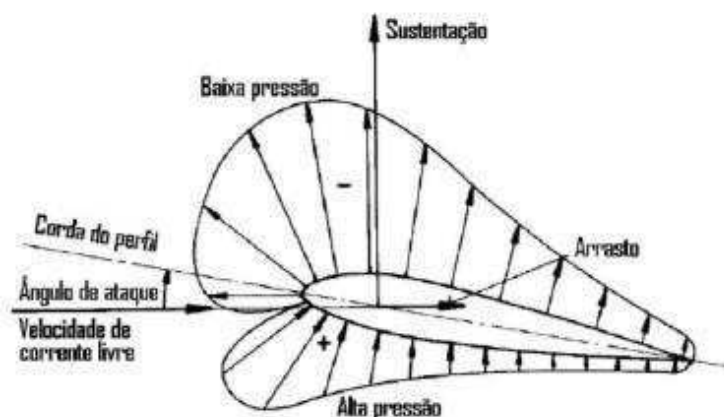
O fato de as partículas de ar, terem mais velocidade em um lado do aerofólio que em outro, gera um diferencial de pressão, o lado com maior velocidade se torna uma região de baixa pressão e o lado com menor velocidade uma região de alta pressão. Esse diferencial de pressão produz a força de sustentação (Lift)²⁰, cuja direção é perpendicular à direção da velocidade do escoamento e o sentido é do lado de maior pressão para o de menor pressão. Para que exista essa diferença de pressão é necessário que uma inclinação do perfil em relação à direção do escoamento. Esse ângulo de inclinação da seção em relação ao escoamento é chamado de ângulo de ataque (Angle of Attack – AOA)²¹. Existe a força de resistência, denominada de força de arrasto (Drag)²² que atua em conjunto com a de sustentação (MELO, 2011). As forças descritas podem ser visualizadas na figura abaixo.

²⁰ Força de sustentação. Tradução nossa.

²¹ Ângulo de ataque. Tradução nossa.

²² Força de arrasto. Tradução nossa.

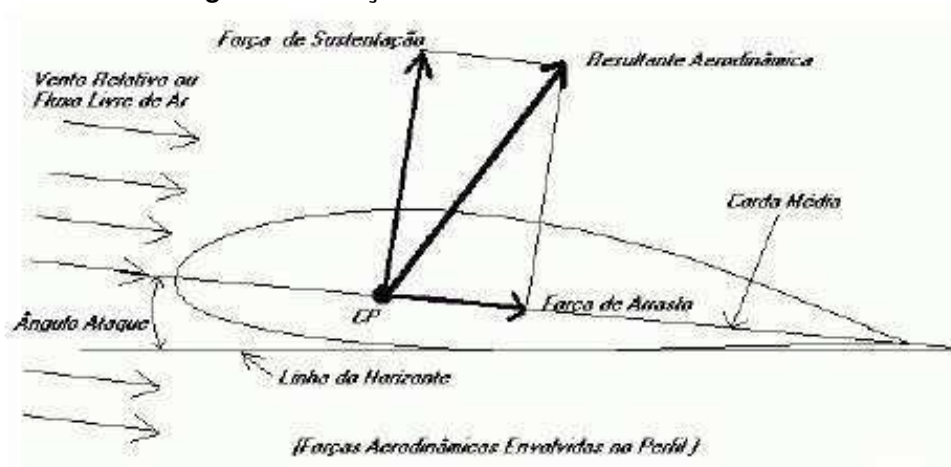
Figura 28 - Forças atuantes em uma pá.



Fonte: DEMM - FENG - PUCRS.

A força resultante que atua em um perfil sendo atravessado por um escoamento é a soma vetorial da força de sustentação e da força de arrasto, como pode ser visualizado na figura abaixo.

Figura 29 - Força resultante de um aerofólio.



Fonte: Lopes, A.(2009).

Ângulos de ataque excessivos podem trazer efeitos indesejáveis como o deslocamento do fluxo de ar diminuindo a geração de Lift²³, efeito conhecido como estol, que será explicado logo abaixo. Por esse motivo que as pás do aerogerador são projetadas com uma torção ao longo de seu eixo longitudinal, evitando grandes diferenças de ângulo de ataque ao longo do comprimento da pá.

²³ Movimento em relação ao eixo da torre. Tradução nossa.

3.6 CONTROLE AERODINÂMICO DE POTÊNCIA

Em algumas épocas do ano, a velocidade do vento ultrapassa seus valores nominais na sua determinada localidade. Com isso, é necessário regular a extração da potência do vento para valores nominais, esta regulação pode ser feita por meio passivo, desenhando o perfil das pás de modo que entrem em perda aerodinâmica – Estol – a partir de determinada velocidade do vento, ou por meio ativo, variando o passo das pás – Pitch²⁴ – do rotor.

Ventos com baixa velocidade média não possuem energia suficiente para acionar as máquinas eólicas, é necessário velocidades médias entre 2,5 m/s e 4,0 m/s para a partida. Turbinas eólicas com controle por passo da pá variam seu ângulo de ataque conseguindo partir com velocidades menores que turbinas com controle estol. As turbinas eólicas comerciais apresentam potência nominal com velocidades que variam entre 9,5 m/s e 15,0 m/s, para velocidades superiores a estas, entram em ação os sistemas de controle descritos abaixo.

O controle estol é um controle passivo, as pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em seu eixo longitudinal, o ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades superiores a velocidade nominal do vento naquele local, o escoamento do vento em torno do perfil da pá descole, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arraste, diminuindo a potência do rotor. As pás são projetadas com uma pequena torção longitudinal para desenvolverem este efeito. As vantagens desse sistema são: inexistência do controle de passo, estrutura do cubo do rotor simples, menor manutenção devido a um número menor de peças e componentes.

O controle de passo é um controle ativo, sempre que a potência nominal do gerador é extrapolada devido a um aumento na velocidade do vento, as pás mudam seu ângulo de passo reduzindo o ângulo de ataque e com isso mantendo a geração de potência nominal do aerogerador, isso também ocorre no caso da potencia estar inferior a potência nominal. As vantagens desse sistema são: maior produção de energia, partida simples só com a mudança do passo da pá, não utiliza fortes freios para parada de emergência do rotor, decréscimo da massa da carga das pás do rotor com ventos superiores a potencia nominal.

Nos últimos anos, foi desenvolvida uma nova tecnologia de controle, chamada

²⁴ Passo da pá. Tradução nossa.

de estol ativo. No caso, “o passo da pá do rotor é girado na direção do estol e não na direção de embandeiramento (menor sustentação) como é feito em sistema de passo normal” (DUTRA, 2008, p. 41). As vantagens deste sistema são: pequenas mudanças no ângulo de passo, possibilidade de controlar a potência para ventos inferiores a potência nominal e possibilidade da posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas no caso de ventos extremos.

3.7 QUALIDADE DE ENERGIA

A qualidade de energia elétrica gerada no contexto da geração eólica apresenta uma performance elétrica do sistema de geração das turbinas eólicas onde quaisquer perturbações sobre a rede elétrica, devem estar dentro de limites técnicos estabelecidos pela agência nacional de energia elétrica – ANEEL.

Os sítios eólicos devem ser instalados em locais onde a rede elétrica seja forte. O conceito de rede “fraca” ou “forte” está intimamente ligado à potência de curto circuito da rede. Uma rede elétrica é chamada “fraca” quando, no momento de interligação, a relação entre a potência de curto circuito da rede e a potência elétrica, proveniente dos aerogeradores, injetada na rede é pequena. Se esta relação for grande, a rede é dita “forte” sendo capaz de absorver distúrbios elétricos. Neste caso, é possível considerar que a rede é capaz de absorver toda a potência gerada por estas unidades, com tensão e frequência constantes.

O nível de potência entregue por cada aerogerador de um sítio eólico pode variar devido à localização das máquinas no parque e o efeito de “sombra” causado pelos aerogeradores a montante aqueles que estão em fileiras mais afastadas em relação a direção predominante do vento. Por isso, é importante avaliar os impactos causados à rede elétrica ainda na fase de planejamento.

A tabela abaixo descreve os principais distúrbios, causados por aerogeradores na rede elétrica e as principais causas, que geralmente são condições meteorológicas, do terreno e características elétricas, aerodinâmica e de controle do aerogerador.

Tabela 4 - Distúrbios causados por aerogeradores à rede elétrica.

Distúrbios	Causa
Elevação / Queda de tensão	Valor médio da potência entregue
Flutuações de tensão e cintilação	Operações de chaveamento Efeito de sombreamento da torre Erro de passo da pá Intensidade de turbulências Flutuações na velocidade do vento
Harmônicos	Conversores de frequência Controladores tiristorizados Capacitores
Consumo de potência reativa	Componentes indutivos ou sistemas de geração

Fonte: CARVALHO, 2003.

O tipo de gerador utilizado (síncrono ou assíncrono) produz diferentes níveis de flutuação nas variáveis elétricas de saída. Devido às baixas estimativas de escorregamento, geradores assíncronos conectados inteiramente à rede elétrica, operando com celeridade quase constante, provocam mais flutuações que geradores síncronos, com velocidade variável, conectados diretamente à rede via retificadores/inversores. Um grande causador de harmônicos são os conversores de frequência, que influenciam diretamente na qualidade de energia. Logo, os geradores eólicos síncronos ou assíncronos conectados diretamente a rede não necessitam de atenção nesse aspecto. (CARVALHO, 2003)

3.8 IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

A queima de combustíveis fósseis produz dióxido de carbono, um dos grandes causadores do aquecimento global. Pode-se afirmar que a energia eólica é limpa, não advém da queima de combustíveis fósseis e não emite poluente. Logo, é uma alternativa limpa e complementar às outras fontes energéticas.

Entre os principais impactos socioambientais negativos dos sítios eólicos destacam-se os sonoros e visuais. Os impactos sonoros são devido ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos aerogeradores. Esses ruídos podem causar algum incômodo nos seres humanos que moram próximo a região como aos animais, podendo alterar o comportamento e hábito desses animais, ocasionando até alterações em seu ciclo de vida.

Outro impacto negativo é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, podendo causa perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados (rádio, televisão).

Os parques eólicos apresentam vários aspectos positivos, entre eles, pode destacar o fato de não necessitar desapropriar grandes áreas, com deslocamentos populacionais, além de preservar a área para agricultura e pecuária como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 30 - Parque eólico implantado junto com agropecuária.



Fonte: Portal do Professor, 2013.

O relatório elaborado pelo Greenpeace e o Global Wind Energy Council (GWEC) (2005) mostra que a energia eólica é uma ótima alternativa para as ameaças de mudanças climáticas. Este relatório mostra que não existem barreiras para o suprimento de 12% das necessidades globais de energia, a partir da geração eólica, até o ano de 2020. Logo, a utilização da energia eólica para gerar energia elétrica é uma alternativa viável para diminuir o uso de combustíveis fósseis, podendo diminuir a emissão de gás CO₂, em cerca de 12%.

4 CENÁRIO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO

4.1 NO MUNDO

O alto custo da produção de energia elétrica, junto com a necessidade de novas fontes de energia renovável e amplamente disponível, torna a energia eólica uma ótima alternativa de investimento a curto e longo prazo, por isso vários países tem posto incentivos para instigar a geração de energia elétrica a partir da eólica.

É possível observar um avanço considerável da energia eólica na participação da matriz energética mundial como pode ser visto na tabela abaixo, detalhando a capacidade instalada por países.

Tabela 5 - Capacidade Mundial de Energia Eólica Instalada.

GLOBAL INSTALLED WIND POWER CAPACITY (MW) – REGIONAL DISTRIBUTION				
		End 2013	New 2014	Total (End 2014)
AFRICA & MIDDLE EAST	Morocco	487	300	787
	South Africa	10	560	570
	Egypt	550	60	610
	Tunisia	245	-	245
	Ethiopia	171	-	171
	Cape Verde	24	-	24
	Other ¹	115	14	129
	Total	1,602	934	2,535
ASIA	PR China	91,413	23,196	114,609
	India	20,150	2,315	22,465
	Japan	2,669	130	2,789
	Taiwan	614	18	633
	South Korea	561	47	609
	Thailand	223	-	223
	Pakistan	106	150	256
	Philippines	66	150	216
	Other ²	167	-	167
	Total	115,968	26,007	141,964
EUROPE	Germany	34,250	5,279	39,165
	Spain	22,959	28	22,987
	UK	10,711	1,736	12,440
	France	8,243	1,042	9,285
	Italy	8,558	108	8,663
	Sweden	4,382	1,050	5,425
	Portugal*	4,730	184	4,914
	Denmark	4,807	105	4,883
	Poland	3,390	444	3,834
	Turkey	2,958	804	3,763
	Romania	2,600	354	2,954
	Netherlands	2,671	141	2,805
	Ireland	2,049	222	2,272
	Austria	1,684	411	2,095
	Greece	1,866	114	1,980
Rest of Europe ³	5,715	835	6,543	

	Total Europe	121,573	12,858	134,007
	of which EU-28 ¹	117,384	11,829	128,790
LATIN AMERICA & CARIBBEAN				
	Brazil**	3,466	2,472	5,939
	Chile	331	506	836
	Uruguay	59	405	464
	Argentina	218	53	271
	Costa Rica	148	50	198
	Nicaragua	146	40	186
	Honduras	102	50	152
	Peru	2	146	148
	Caribbean ⁵	250	-	250
	Others ⁶	55	28	83
	Total	4,777	3,749	8,526
NORTH AMERICA				
	USA	61,110	4,854	65,879
	Canada	7,823	1,871	9,694
	Mexico	1,917	634	2,551
	Total	70,850	7,359	78,124
PACIFIC REGION				
	Australia	3,239	567	3,806
	New Zealand	623	-	623
	Pacific Islands	12	-	12
	Total	3,874	567	4,441
	World total	318,644	51,473	369,597

Source: GWEC

1 Algeria, Iran, Israel, Jordan, Kenya, Libya, Nigeria
2 Bangladesh, Mongolia, Sri Lanka, Vietnam
3 Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Estonia, Finland, Faroe Islands, FYROM, Hungary, Iceland, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Luxembourg, Malta, Norway, Romania, Russia, Switzerland, Slovakia, Slovenia, Ukraine
4 Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Croatia, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, UK
5 Caribbean: Aruba, Bonaire, Curacao, Cuba, Dominica, Guadalupe, Jamaica, Martinica, Granada, St. Kitts and Nevis
6 Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela

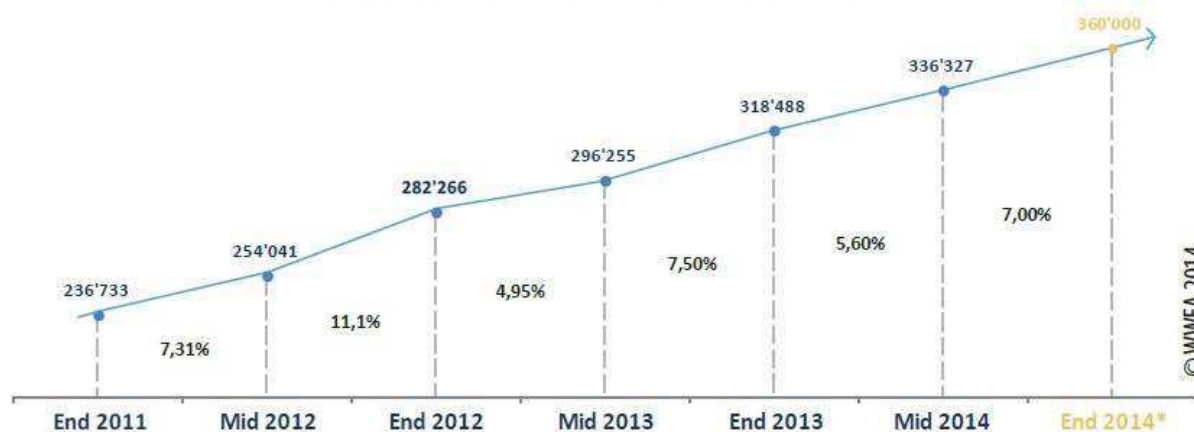
Note:
Project decommissioning of approximately 523 MW and rounding affect the final sums
* Provisional figure
** Projects fully commissioned, grid connection pending in some cases

Fonte: Global Wind Energy Council - GWEC, 2014

O mercado global de energia eólica teve um desenvolvimento acima do acreditado no ano de 2014 como mostra a tabela 3 segundo dados do Global Wind Energy Council – GWEC, que mostra uma capacidade total instalada de 369,597 GW no final de 2014, ficando acima do esperado segundo a previsão do relatório parcial divulgado para o meio do ano de 2014 (2014 half-year report) pelo World Wind Energy Association – WWEA, que estimou em 360GW a capacidade total instalada no mundo no final do ano de 2014.

A figura abaixo mostra o crescimento da energia eólica no mundo entre os anos de 2011 e 2014 segundo dados do WWEA – 2014. É possível observar um crescimento total de 52% na capacidade total instalada entre o final do ano de 2011 e o final do ano de 2014. Isso mostra a energia eólica está conquistando mercado no mundo devido a sua crescente competitividade em relação a outras fontes de energia elétrica como também a necessidade de desenvolver novas fontes de energia livre de emissões de gases nocivos ao meio ambiente a fim de mitigar as mudanças climáticas e a poluição do ar.

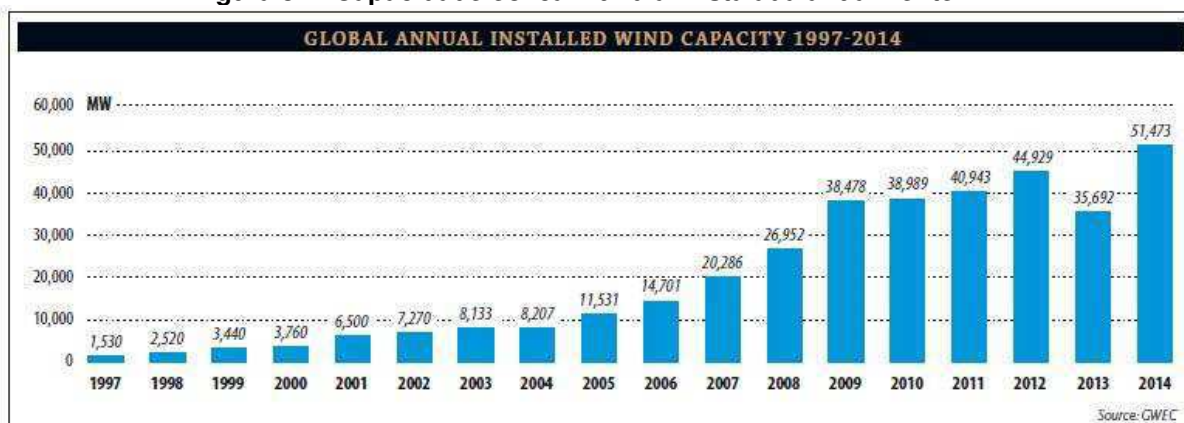
Figura 31 - Capacidade total instalada 2011 - 2014 [MW].
Total Installed Capacity 2011-2014 [MW]



Fonte: WWEA, 2014.

O ano de 2014 foi o ano recorde para a indústria eólica mundial, pois mais de 51 GW foi interposto em linhas de transmissão, um aumento considerável em relação a 2013, quando as instalações de parques eólicos chegaram aproximadamente a 35,6 GW e superou o recorde existente até então, que foi o de 2012 com aproximadamente 45 GW de capacidade instalados. Na figura abaixo é possível visualizar o crescimento da capacidade instalada desde 1997.

Figura 32 - Capacidade eólica mundial instalada anualmente.



Fonte: GWEC, 2014

Em 2014 houve um total de USD 310 bilhões no setor de energia limpa ou renovável. O campo eólico viu os investimentos subirem de 11% para um recorde de 32,1% totalizando USD 99,5 bilhões em 2014, segundo dados do GWEC (2014). Apesar do aumento significativo nos investimentos para o setor eólico, o crescimento cumulativo foi inferior a taxa de crescimento médio ao longo dos últimos 10 anos

(2005-2014) de quase 23%, isso ocorreu devido as incertezas políticas nos Estados Unidos e a crise econômica na Europa no final de 2013.

4.2 NO BRASIL

A matriz energética brasileira é totalmente dependente da energia hídrica. Em 2014 houve uma baixa precipitação resultando em escassez de água em algumas regiões do país, afetando diretamente a produção de energia elétrica através das hidroelétricas. Esse problema não foi tão grave graças às termelétricas (que poluem o meio ambiente) e a crescente contribuição da energia eólica e outras fontes renováveis na matriz energética brasileira.

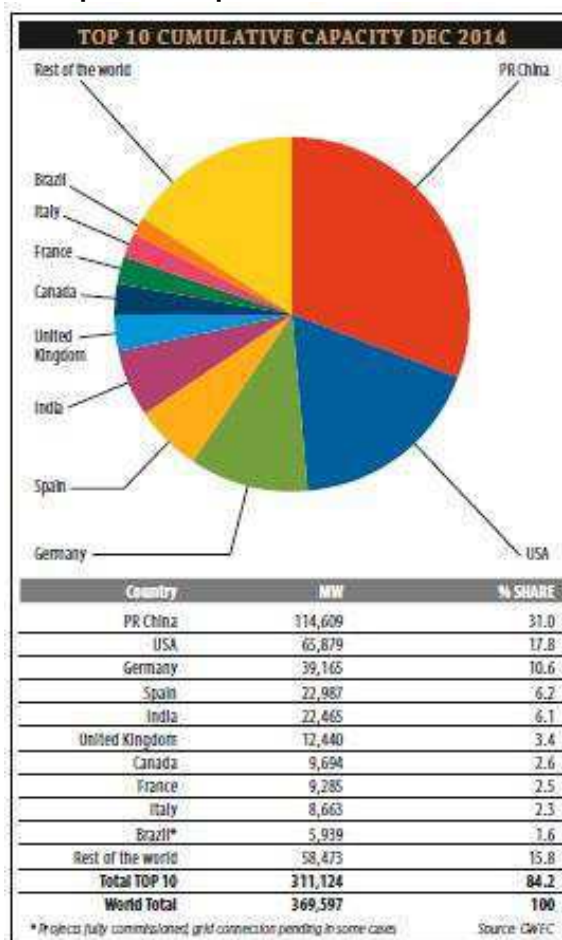
Outro avanço para a indústria eólica no Brasil foi à construção de novas linhas de transmissão permitindo que os novos parques eólicos estejam prontos para operar na região do nordeste do país. Entretanto, 334 MW ainda estão esperando serem ligados a rede. Além disso, o governo aprovou uma medida provisória para isenção de impostos em algumas peças e componentes dos aerogeradores, aumentando a atratividade para investimentos neste setor.

Olhando para o potencial eólico do Brasil, um novo Atlas do Potencial Eólico do Rio Grande do Sul foi produzido e mostra que ele possui um potencial muito maior do que o inicialmente avaliado. Segundo o Atlas, o estado do Rio Grande do Sul possui um potencial de 240 GW de áreas com ventos de velocidade média superior a 7 m/s a uma altura de 150 m.

O Brasil tem intenção de manter um crescimento de pelo menos 2 GW ao ano e manter os preços dos leilões em um nível competitivo, com planos de a energia eólica compor 12% da matriz energética até o ano de 2023, segundo dados do Plano Decenal Energético 2023 (Brasil, *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*, 2015).

O ano de 2014 marca o ingresso do Brasil na lista dos 10 países que mais produzem energia elétrica a partir da energia eólica, somando uma capacidade total de aproximadamente 5,939 MW, como pode ser visto na figura 33. Isso ocorreu, pois neste ano o Brasil construiu 95 novos parques eólicos, totalizando 2,5 GW, dos quais 69 (1,8 GW) foram conectados a rede elétrica e outros 23 (600 MW) foram conectados a rede em fase de operação de teste (test operation phase) e três parques eólicos (90 MW) ainda estavam esperando a conexão à rede.

Figura 33 - Países Top 10 em capacidade acumulada até dezembro de 2014.



Fonte: GWEC, 2014.

Os resultados de leilões que ocorreram no ano de 2014 foram muito positivos para o setor eólico, 2,25 GW foram vendidos em projetos, correspondendo a um investimento inicial de aproximadamente USD 4 bilhões.

Algumas medidas políticas entraram em vigor no ano de 2014 com a intenção de atrair mais investimento para a área. A resolução nº 462/2014: O Conselho Nacional do Meio Ambiente publicou diretrizes para o processo de licenciamento para a instalação de novos parques eólicos no Brasil, proporcionando maior flexibilidade no processo e uma segurança jurídica maior para os investidores. Novas regras relacionadas à ligação dos parques a rede elétrica, garantindo que projetos só possam avançar para a fase de implementação se eles tiverem a ligação a rede garantida. O governo também publicou uma medida provisória 656/2014 convertida na Lei nº 13.097 que concede isenção fiscal em algumas partes e componentes dos aerogeradores classificados pelo código brasileiro NCM 85.03.0090.

Com os ricos recursos onshore existentes no Brasil, o governo não faz planos para desenvolver a energia eólica offshore no momento. No entanto, o governo mostrou interesse em realizar pesquisa sobre o potencial eólico offshore no país. O novo Atlas do Rio Grande do Sul inclui medições offshore e demonstra um potencial interessante de ser explorado. A figura abaixo mostra a capacidade instalada existente nos estados brasileiros e o que serão instalados até o final do ano de 2014.

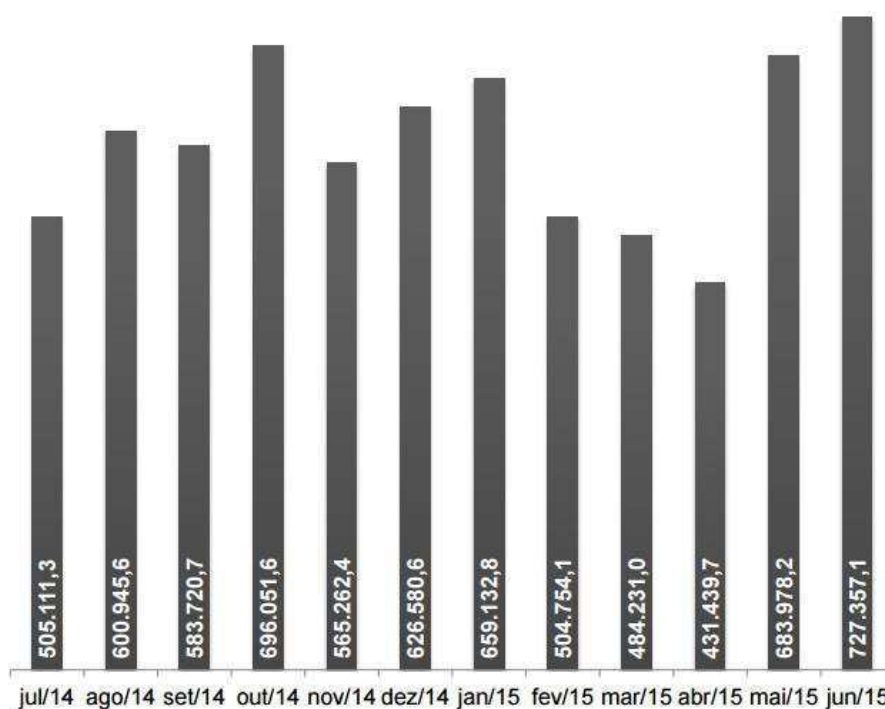
Figura 34 - Capacidade instalada por estado brasileiro em 2014.

Installed capacity by State in 2014 (MW)		
State	Installed capacity in 2014	Cumulative capacity at the end of 2014
Bahia	342.8	931.4
Ceará	572.2	1,233.2
Paraíba	–	69.0
Pernambuco	79.9	104.7
Piauí	70.0	88.0
Paraná	–	2.5
Rio de Janeiro	--	28.1
Rio Grande do Norte	751.6	2,092.0
Rio Grande do Sul	654.9	1,118.8
Santa Catarina	–	236.4
Sergipe	–	34.5
Total	2,472.4	5,938.5

Fonte: GWEC, 2014

As principais barreiras da energia eólica no país continuam sendo a longa distância para o transporte de pás e outros componentes necessários para a instalação de aerogeradores além das condições precárias das rodovias brasileiras, a falta de veículos adequados e mão de obra qualificada. Isso pode se tornar um grande problema no futuro, quando o número de leilões energéticos no país aumentarem e o Brasil não tiver uma cadeia de produção e fornecimento saudável.

Devido a esse aumento da energia eólica na matriz energética brasileira, o Brasil hoje tem uma redução de em média 588,000.00 ton./mês entre julho de 2014 e junho de 2015 como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 35 - Emissões de CO2 evitadas (ton.)Emissões de CO₂ Evitadas (Toneladas)

*Correlação: A emissão de CO₂ evitada nos 12 meses corresponde à emissão anual equivalente de cerca de 4 milhões de automóveis.

Fonte: Boletim de dados ABBEólica 09/2015.

4.3 PREVISÃO PARA O MERCADO MUNDIAL 2015 – 2019

O ano de 2014 foi muito positivo para a energia eólica, recuperando da queda em 2013. O mais surpreendente em 2014 foi a instalação de 23 GW na China, sendo 45% do total instalado no mesmo ano em todo o mundo.

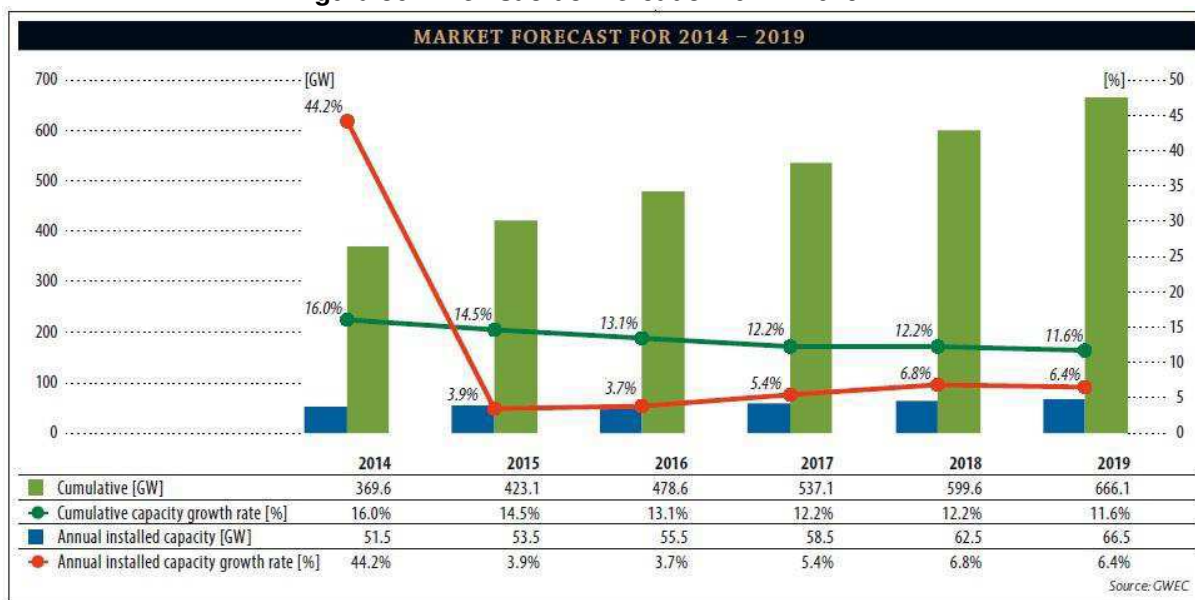
Os anos de 2015 até 2019 especulam que a América Latina, África e Ásia continuaram a crescer e se sobressair entre os grandes da energia eólica. Devido a precisão de uma fonte energética sustentável e limpa, preço competitivo frente a outras fontes geradoras de energia e segurança e estabilidade na geração, a energia eólica está em crescimento contínuo para atender a demanda do mercado e substituir outras fontes de energia na matriz energética mundial.

As previsões de crescimento segundo o Global Wind Report Annual Market Update 2014 (GWEC, 2014) são que a China continuará crescendo em ritmo acelerado colocando distância em seus vizinhos asiáticos e nos países europeus. Os Estados Unidos voltando a se recuperar da redução de novas instalações nos anos anteriores. A perspectiva para a América Latina e a África são boas, estipula-se que

estes dois mercados serão os que mais irão crescer até o final desta década ou até o início da próxima. Prevê que o Brasil ocupará a 4ª posição em termos de mercado mundial. A Rússia e a Arábia Saudita continuam adormecidas, pelo menos para o momento.

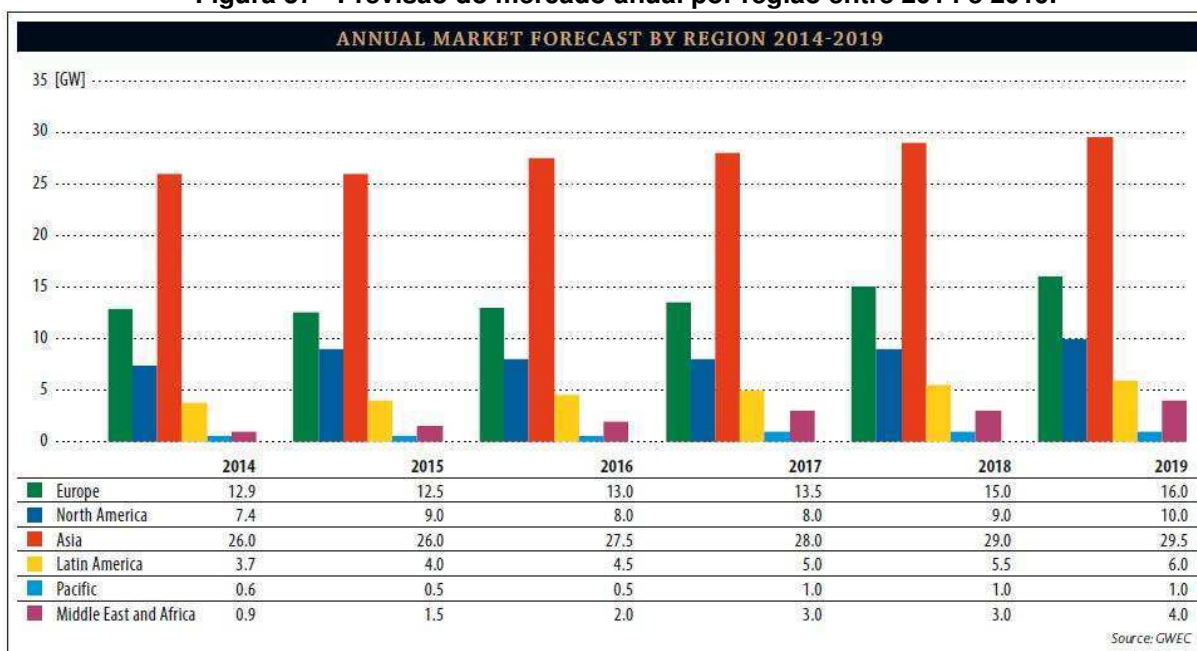
As figuras abaixo mostram os crescimentos esperados da energia eólica no mundo até 2019 e o crescimento até esse mesmo ano por continentes. É possível identificar pelos gráficos que a Ásia continuará a dominar o mercado superando a Europa em termos de capacidade instalada no ano de 2014, liderando o mercado com 40 a 45 % do total global anual até 2020. A Europa continuará sua marcha constante até 2020. A América do Norte mostra um crescimento baixo, sendo um dos mercados mais difíceis de prever segundo o GEWC devido as incertezas do congresso americano e falta de clareza política em termos de energias renováveis. A América Latina cada vez mais fazendo a diferença em termos mundiais de energia renovável com o Brasil liderando o ataque sendo seguido pelo Chile, Uruguai e Peru e América Central. A África do Sul e o Egito dominaram o crescimento no continente africano e a Austrália dominará o crescimento no Pacífico.

Figura 36 - Previsão do mercado 2014 - 2019.



Fonte: GWEC, 2014.

Figura 37 - Previsão do mercado anual por região entre 2014 e 2019.



Fonte: GWEC, 2014.

4.4 PREVISÃO PARA O MERCADO BRASILEIRO 2015 – 2019

A geração eólica é a fonte que mais cresceu no Brasil desde 2009 (Brasil, *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*, 2015). O setor energético deverá instalar 12 a 13 GW nos próximos cinco anos. A expectativa é que a energia eólica supere o gás natural em termos de capacidade instalada no final de 2017, assumindo assim a segunda posição na matriz energética brasileira. Segundo o GWEC 2014, o mercado eólico no Brasil não será afetado pela crise econômica e política atual, pois eles o consideram sólido.

A expectativa é que o preço médio do mega watt/hora (R\$/MWh) da energia eólica se torne cada vez mais competitivo em relação as outras fontes de energia elétrica da matriz energética brasileira. Segundo o Boletim de dados da ABBEólica publicado em setembro de 2015, a energia eólica apresentava o menor preço médio em relação as fontes energéticas com PCH's e UTE's, custando R\$/MWh 181,14 enquanto que as outras fontes custavam R\$/MWh 205,01 e R\$/MWh 212,75, respectivamente.

5 POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE

O potencial eólico de uma determinada região, assim como do Nordeste, pode ser do tipo onshore²⁵ (em terra) e offshore²⁶ (no mar), nesse estudo será quantificado o potencial eólico onshore²⁷ do Nordeste.

Com base nos mecanismos de ventos em escala e suas características, e das características técnicas dos aerogeradores expostos nas seções anteriores, é possível identificar e classificar as características eólicas de diferentes regiões do nordeste, e com isso estimar o potencial eólico do Nordeste.

Os critérios utilizados para identificar o potencial das regiões eólicas do Nordeste levaram em consideração as características dos ventos em macroescala e meso-escala. Em geral, o potencial eólico de determinada região está diretamente relacionado às características dos ventos naquela região. As condições dos ventos em cada sub-região expostas foram avaliadas segundo as características abaixo (SILVA, 2003, p. 32):

1. Intensidade do Vento: Parâmetro relacionado às ocorrências de velocidade média do vento. Ventos mais intensos possuem altos valores de VM;
2. Dispersão das Ocorrências: Parâmetro relacionado ao comportamento das ocorrências de velocidade do vento. Ventos com baixa dispersão apresentam maior número de ocorrências próximos ao valor médio;
3. Constância Direcional: Parâmetro relacionado a mudança na direção do vento. Quanto mais alto a constância menor será o numero de setores de direção que apresentam fluxo de ventos;
4. Valores Extremos: Parâmetro relacionado aos maiores valores instantâneos de velocidade do vento para o período de 1 a 50 anos;
5. Níveis de Turbulência: Parâmetro relacionado à variância dos valores instantâneos da velocidade do vento. Ventos com alto nível de turbulência influenciam negativamente as turbinas eólicas;
6. Gradiente Vertical: Parâmetro relacionado ao perfil vertical da velocidade do vento. Ventos com alto gradiente apresentam maiores

²⁵ Em terra. Tradução nossa.

²⁶ No mar. Tradução nossa.

²⁷ Em terra. Tradução nossa.

diferenças de velocidade em alturas;

7. Variação Sazonal: Parâmetro relacionado ao comportamento da velocidade média ao longo do ano. Quanto menor a variação, menor a diferença da velocidade média do vento ao longo do ano;

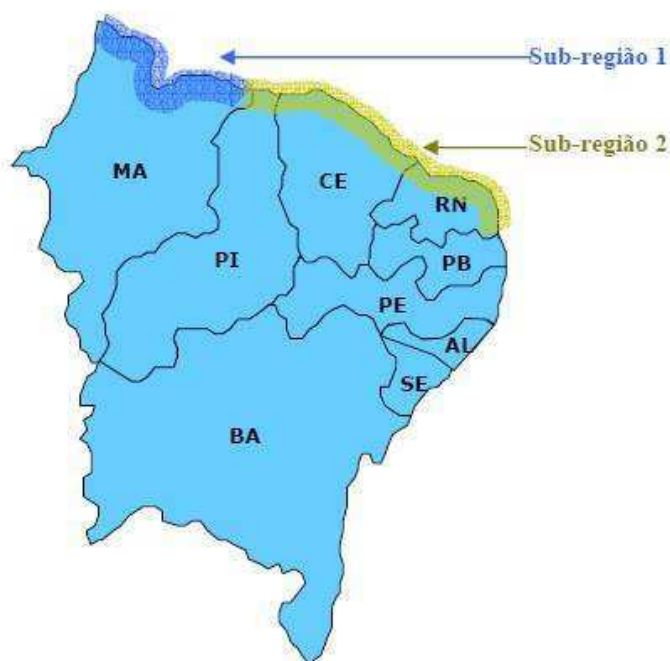
8. Regularidade Interanual: Parâmetro relacionado ao comportamento da velocidade média anual. Alta regularidade representa uma menor variação da média anual ao longo dos anos.

O potencial eólico do Nordeste foi definido em três grandes regiões, com características de ventos singulares, são elas: Litoral Norte-Nordeste, Litoral Nordeste-Sudeste e Nordeste Continental.

5.1 LITORAL NORTE-NORDESTE

O litoral Norte-Nordeste compreende toda a faixa litorânea do extremo norte Maranhão até o extremo sul do Rio Grande do Norte, como pode ser visto na figura abaixo. As condições de vento em toda a região são conduzidas, principalmente, pelo ciclo anual de posição e intensidade da ZCIT e pelas fortes ocorrências de brisas marítimas. Essa região foi dividida em duas sub-regiões.

Figura 38 - Litoral Norte-Nordeste.



Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

A sub-região 1 que engloba todo o litoral do estado do Maranhão, possui regime de ventos mais amenos, com velocidade entre 5–7 m/s (à 50 m de altura), com decremento gradual à medida que se aproxima da ZCIT. Nos meses de verão, implicações negativas são observados devido a aproximação da Massa Equatorial Continental, originada na Amazônia Central com características de altas temperaturas e umidades. A tabela abaixo apresenta os principais mecanismos e características eólicas desta sub-região.

Tabela 6 - Características eólicas da sub-região 1 do Litoral N-NE.

Principais Mecanismos de Vento			
1. Ventos Alísios (Negativamente influenciados pela grande aproximação da ZCIT)			
2. Brisas marítimas (Negativamente influenciadas pela grande aproximação da ZCIT)			
3. Efeitos negativos da Massa Equatorial Continental nos meses de verão			
Características dos Recursos Eólicos			
Intensidade do vento	Moderada – baixa	Níveis de turbulência	Baixos
Dispersão das ocorrências	Baixa	Gradiente vertical	Baixo
Constância direcional	Alta	Variação sazonal	Alta
Valores extremos	Muito baixos	Regularidade interanual	Alta

Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

A segunda sub-região se estende do litoral do Piauí ao Rio Grande do Norte, tem regime eólico bastante intenso, com velocidades médias anuais entre 7–9,5 m/s (à 50 m de altura). O principal motivo dos ótimos parâmetros de vento nesta sub-região é atuação contígua dos Ventos Alísios e das fortes brisas marítimas, ambas positivamente influenciadas pela aproximação da ZCIT. A tabela abaixo apresenta os principais mecanismos e características eólicas desta sub-região.

Tabela 7 - Características eólicas da sub-região 2 do Litoral N-NE.

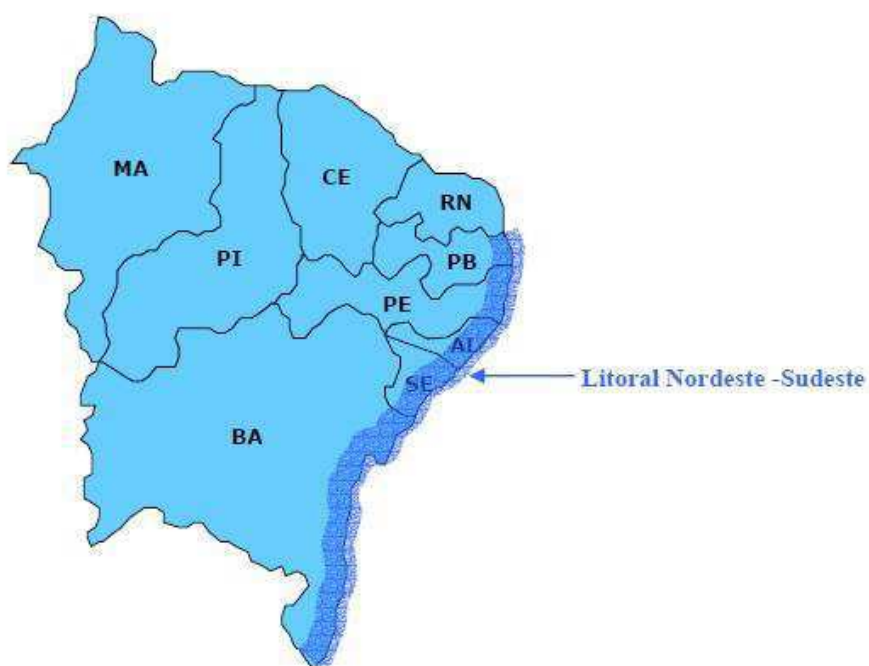
Principais Mecanismos de Vento			
1. Ventos Alísios (Positivamente influenciados pela aproximação da ZCIT)			
2. Fortes brisas marítimas			
Características dos Recursos Eólicos			
Intensidade do vento	Alta	Níveis de turbulência	Baixos
Dispersão das ocorrências	Baixa	Gradiente vertical	Baixo
Constância direcional	Alta	Variação sazonal	Alta
Valores extremos	Baixos	Regularidade interanual	Alta

Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

5.2 LITORAL NORDESTE-SUDESTE

A região denominada Litoral Nordeste-Sudeste se estende do extremo norte da Paraíba ao extremo sul da Bahia, como pode ser visto na figura abaixo. As características dos ventos nesta região apresentam uma diminuição gradual em intensidade, com velocidade média entre 5 e 8 m/s (à 50 m de altura).

Figura 39 - Litoral Nordeste-Sudeste.



Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

Isso ocorre devido a uma redução dos ventos Alísios causado por uma liberação gradual do calor latente contido nas grandes massas superiores de ar que se movimentam para os pólos. O segundo fator é a redução na intensidade das brisas marítimas devido à redução na magnitude dos gradientes térmicos oceano-terra, e por último, a ação de frentes frias remanescentes que se propagam na costa sul da região. A tabela abaixo apresenta os principais mecanismos e características eólicas do Litoral Nordeste-Sudeste.

Tabela 8 - Características eólicas do Litoral NE-SE.

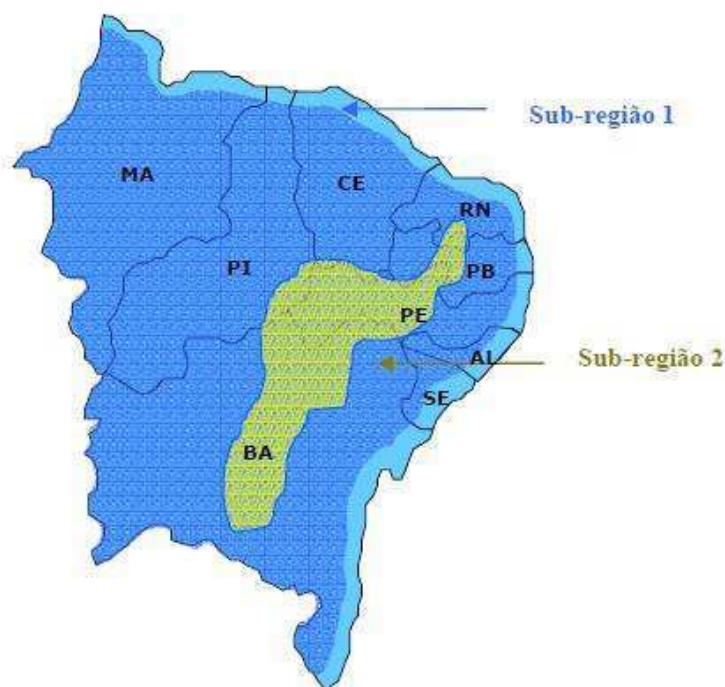
Principais Mecanismos de Vento			
1. Ventos Alísios (Negativamente influenciados pelo afastamento do Equador)			
2. Moderadas brisas marítimas (Negativamente influenciadas pelo afastamento do Equador)			
3. Frentes frias remanescentes			
Características dos Recursos Eólicos			
Intensidade do vento	Moderada	Níveis de turbulência	Baixos
Dispersão das ocorrências	Baixa	Gradiente vertical	Baixo
Constância direcional	Alta	Variação sazonal	Moderada
Valores extremos	Baixos	Regularidade interanual	Alta

Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

5.3 NORDESTE CONTINENTAL

A região do nordeste continental compreende todo o interior do nordeste brasileiro, esta região foi dividida em duas sub-regiões, como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 40- Nordeste Continental.



Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

A primeira sub-região, que engloba praticamente todo o interior do nordeste, a intensidade do vento diminui a medida que se afasta do litoral, devido aos efeitos da rugosidade superficial, de barreiras naturais e diminuição das contribuições das

brisas marítimas.

A tabela abaixo mostra os principais mecanismos e características de vento na sub-região 1 do Nordeste Continental.

Tabela 9 - Características eólicas da sub-região 1 do Nordeste Continental.

Principais Mecanismos de Vento			
1. Ventos Alísios (Negativamente influenciados pela topografia e a cobertura da superfície)			
2. Diminuição gradual dos efeitos das brisas marítimas			
3. Interação de massas de ar provenientes de outras regiões do Brasil			
Características dos Recursos Eólicos			
Intensidade do vento	Baixa	Níveis de turbulência	Altos
Dispersão das ocorrências	Moderada	Gradiente vertical	Alto
Constância direcional	Moderada	Variação sazonal	Alta
Valores extremos	Baixos	Regularidade interanual	Alta

Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

A diferença desta região com o Litoral nordestino é a interação com outras massas de ar provenientes das regiões centro-oeste e sudeste do Brasil. Efeitos negativos são observados na penetração de frentes frias provenientes do Sul do Brasil afetando a climatologia eólica da Bahia entre os meses de novembro a fevereiro. As massas de ar equatorial continental nos estados do Maranhão, Piauí e Bahia também influenciam negativamente as características eólicas destes estados nos meses de verão.

A sub-região 2 é influenciada positivamente pela presença de áreas elevadas de montanhas, serras e chapadas que vão do Rio Grande do Norte a Bahia. As ocorrências de alta velocidade neste sub-região se dá próximo a áreas que apresentam forte brisas de montanha/vales ou onde a canalização do vento é mais acentuada. As velocidades médias nestas condições variam entre 6-10 m/s (à 50 m de altura). A tabela abaixo mostra os principais mecanismos e características eólicas das áreas de montanhas da região eólica do Nordeste Continental.

Tabela 10 - Características eólicas das áreas montanhosas (sub-região 2) do Nordeste Continental.

Principais Mecanismos de Vento			
1.	Ventos Alísios (Positivamente influenciados pela orografia)		
2.	Brisas de montanhas e vales		
Características dos Recursos Eólicos			
Intensidade do vento	Alta	Níveis de turbulência	Altos
Dispersão das ocorrências	Moderada	Gradiente vertical	Alto
Constância direcional	Moderada	Variação sazonal	Alta
Valores extremos	Altos	Regularidade interanual	Alta

Fonte: Características de ventos da região Nordeste.

5.4 FONTE DE DADOS EÓLICOS

Para estimar a velocidade dos ventos em determinada região é necessário a utilização de ferramentas computacionais avançadas, estas ferramentas foram desenvolvidas para os principais mercados eólicos do mundo, que são os Estados Unidos e a Europa.

Os dados dos ventos utilizados foram extraídos das seguintes publicações (SILVA, 2003, p.38):

1. **Wind Atlas for Northeast of Brazil (WANEB)** – Publicado pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica em outubro de 1998. As conclusões obtidos pelo WANEB são resultados de simulações computacionais utilizando o modelo atmosférico de meso-escala ETA/CPTEC e validados a partir de dados de vento de superfície coletados em estações anemométricas espalhadas pela região ;
2. **Panorama do Potencial Eólico no Brasil** – Publicado em dezembro de 2002, pelo centro Brasileiro de Energia Eólica. É baseado em estudos climatológicos, simulações atmosféricas com modelos de meso-escala (MM5) e de micro-escala (WAsP) e compilação de dados de superfícies coletados em diversas estações anemométricas.

Conforme Bowen e Mortensen (2004) o modelo WAsP está fundamentado em condições atmosféricas que são predominantemente neutras, e correções para condições não neutras são feitas manipulando os parâmetros de fluxo de calor superficial. O modelo WAsP recomenda que ele seja utilizado, preferencialmente, em terrenos com topografia de declives baixos ou suavizados.

O modelo MM5 de meso-escala tem melhor desempenho para regiões com ventos de baixa e alta pressão, mostrando dificuldade em caracterizar outros tipos de regime de ventos.

Estes modelos computacionais foram desenvolvidos pelos principais mercados eólicos no mundo, para caracterizar o regime dos ventos nestes mercados. O Brasil está crescendo em energia eólica devido ao seu alto potencial eólico, mas ainda faltam investimentos em pesquisa para desenvolvimentos de softwares e equipamentos para as características de ventos do Brasil, pois os softwares desenvolvidos para manipular esses dados não consideram todas as características em meso-escala, macroescala e micro-escala do Nordeste, com isso é possível dizer que o potencial eólico do Nordeste pode ser maior ou menor ao estimulado acima.

5.5 CARACTERÍSTICAS EÓLICAS DO NORDESTE E SEUS EFEITOS NAS TURBINAS EÓLICAS

Os aerogeradores são desenvolvidos para extraírem o máximo de potência disponível nos ventos da Europa e dos Estados Unidos, já que os principais mercados e fabricantes se localizam nessas regiões.

Tendo em vista as altas velocidades médias dos ventos em regiões delimitadas do Nordeste, ademais uma abundância de áreas fechadas de serras, chapadas e montanhas no Nordeste Continental, pode-se considerar que, devido as características das turbinas eólicas comercializadas, quanto menor a velocidade do vento nominal da máquina, melhor será a performance da turbina eólica.

A massa específica do ar é um fator importante para determinar o potencial eólico de uma determinada região, já que quanto mais denso, maior quantidade de energia cinética o vento carrega. Os ventos da Europa e Estados Unidos são mais densos devido a sua localização no globo, já que a massa específica é afetada por variações na temperatura e pressão atmosférica. Para uma mesma velocidade do vento, turbinas instaladas no Nordeste brasileiro geram menos energia que turbinas instaladas na Europa e Estados Unidos.

Como mencionado, os ventos do Nordeste caracterizam-se por altas intensidades, forte regularidade, constância direcional, baixos níveis de turbulência e pequeno gradiente de velocidade vertical. Essas características singulares atentam

para um possível sobredimensionamento das turbinas eólicas, já que elas são divididas em classes para atender as especificações dos ventos da Europa e Estados Unidos em relação carregamentos extremos e fadiga.

O nordeste possui baixa variação na direção dos ventos. Quando uma turbina eólica opera em giro (yaw²⁸), alguns componentes do fluxo do vento induzem carregamentos aerodinâmicos, excitando a dinâmica estrutural da máquina e aumentando os carregamentos e fadiga. Com isso pode-se supor em projetos para redução de custos na aquisição de máquinas eólicas, um projeto simplificado no sistema de giro, adequado para as características do Nordeste.

Com isso, estudos para as condições específicas de vento no Nordeste são necessários para aumentar a confiabilidade dos resultados de medição, e determinação das características dos ventos, e com isso desenvolver turbinas eólicas específicas para atender a essas características do Nordeste. Visando a redução de gastos para implantação de um parque eólico, a redução do valor do MW/h. Além de grandes benefícios sociais para o país gerando mão de obra especializada, aumento de indústrias do setor para atender a demanda do mercado e nacionalização dos componentes e tecnologia.

²⁸ Guinada ou cabeceio da turbina. Tradução nossa.

6 CONCLUSÃO

Diante do exposto nesse TCC, é possível observar que o Brasil está em uma posição privilegiada no globo terrestre. Os ventos incidentes sobre a região Nordeste possuem boas características e intensidades para a geração de energia elétrica. Além de complementar a matriz energética brasileira, que é em maior parte hidrelétrica, pois nos meses com maior intensidade de chuvas é onde se tem a menor intensidade de ventos e os meses com menor intensidade de chuvas é onde se tem a maior intensidade de ventos. Assim, eles se complementariam em períodos diferentes.

Os dados proporcionados mostram que o Nordeste brasileiro possui um ótimo potencial eólico a ser explorado. Para o seu melhor uso, deve-se lembrar da necessidade de uma rede de estações anemométricas adequadas para a medição dos recursos eólicos desta região, permitindo melhores análises das características dos ventos e séries mais precisas e confiáveis. E com isso a elaboração de um novo atlas eólico brasileiro, já que as apresentadas neste trabalho são de 2002. Desenvolvimento de tecnologias específicas para as condições de ventos do Nordeste, já que as turbinas eólicas utilizadas aqui foram desenvolvidas para as condições da Europa e dos Estados Unidos, e com isso, elas geralmente são sobredimensionadas. Evolução da cadeia produtiva do Brasil, com maiores incentivos para o surgimento de novas indústrias do setor, tornando menor o preço dos componentes da turbina, devido a concorrência, além de melhorias nas condições de transporte dos componentes, pois os fabricantes dos componentes se localizam no Sul e Sudeste do Brasil e o maior potencial se localiza no Nordeste, gerando dificuldades e atrasos para as entregas dos componentes devido a distância aliado as alternativas de transporte.

É necessário o desenvolvimento de estudos sobre o potencial eólico offshore²⁹ do Brasil, já que o mesmo apresenta um litoral com mais de 7 mil quilômetros de costa, além do domínio da tecnologia avançada para a construção de plataformas e exploração offshore³⁰ de petróleo e gás natural, que podem ser aproveitados na implantação de turbinas eólicas ao longo da costa marítima

²⁹ No mar. Tradução nossa.

³⁰

brasileira. Pois como foi mostrado nesse trabalho, as características dos ventos no mar são superiores as do continente devido a sua característica térmica e baixa rugosidade na superfície.

De todo exposto, é possível concluir que a energia eólica hoje, não só no Brasil, mas no mundo encontra-se em ótima posição dentre as outras fontes de energia elétrica para investimentos e crescimento, devido a sua modularidade, consolidação da tecnologia e indústria, o vento ser inesgotável, a rapidez na instalação de um parque eólico em relação a hidrelétricas e termelétricas, descentralização da geração e custos de instalação e manutenção cada vez mais competitivos além de ser uma energia limpa. E no Brasil, o potencial eólico do nordeste significa uma contribuição importante para o desenvolvimento dessa região com muitas áreas absolutamente incapazes de receber qualquer tipo de empreendimento convencional, trazendo esperança e prosperidade além da diversificação da matriz energética representando uma economia nas águas cada vez em níveis menores do rio São Francisco.

Com isso, vale reforçar a necessidade de investimentos em pesquisa e desenvolvimento para tornar a energia eólica cada vez mais competitiva em relação as outras fontes energéticas, tendo em vista o seu grande potencial no Nordeste. Esses investimentos acarretariam um crescimento em todos os setores da energia eólica, desde a indústria de base até a indústria específica dos componentes tecnológicos das turbinas eólicas, fazendo com que o Brasil passe de importador para exportador de tecnologia de ponta, além de garantir componentes e subcomponentes específicos para as características específicas dos ventos do Nordeste brasileiro, fazendo com que haja um ótimo aproveitamento da potência contida nos ventos dessa região. Tudo isso acarretaria uma aceleração na economia brasileira, gerando mão de obra qualificada, novos empregos diretos e indiretos, e crescimento de regiões onde não é viável a instalação de indústrias convencionais devido as características locais, como distância de grandes centros, falta de água e outros motivos, gerando novas fontes de renda para regiões com poucas alternativas.

REFERÊNCIAS

ABBEOLICA, *Boletim anual de geração eólica 2014*. São Paulo. 3ª ed., 2014.

ABDI – Agência brasileira de desenvolvimento industrial, *Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil*, 2014.

AMARANTE, O. A. C.; SÁ, A. L.; ZACK, M. B. E. J. *Atlas do potencial eólico brasileiro*. 2001. 44f. Monografia (Tecnologia em Energia Eólica) - CEPEL, MME.

Atlas do potencial eólico do Paraná / Engenharia Eólica - Camargo e Schubert, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC. Curitiba, 2007.

ARAÚJO, A., *Fundamentos da geração eólica – Processos de Conversão e Tecnologia*. UFPE, 2011.

Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023* / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2014.

A. BETZ, *Introduction to the theory of flow machines*. XVI + 281 S. m. 168 Fig. Oxford/London/Edinburgh/New York/Toronto/Paris/Braunschweig 1966.

CARVALHO, P. *Geração eólica*. Edição única. Fortaleza: Editora UFC, 2003.

CASTRO, Rui. *Energias renováveis e produção descentralizada, Introdução à Energia Eólica*. Universidade técnica de Lisboa Instituto superior técnico. DEEC, Sessão de energia, 2003.

CRESESB, *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Disponível em: <www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 16 de agosto de 2015.

CUSTÓDIO R. *Energia eólica*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

DUTRA, Ricardo. *Energia eólica – Princípios e Tecnologia*. Disponível em:<http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf> Acesso em: 10 de agosto de 2015.

ECOSOURCE. *Savonius vertical axis wind turbine*. Disponível em: <http://www.ecosources.info/en/topics/Savonius_vertical_axis_wind_turbine>. Acesso em: 09 de nov. 2015.

_____. *Eolienne à axe vertical de type Darrieus*. Disponível em: <http://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Darrieus>. Acesso em: 09 de nov. 2015.

ELETRÔNICA. *Energia eólica*. 2013. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/17/29/>> Acesso em: 25 de agosto de 2015.

ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>> Acesso em: 10 ago. 2015.

ENERGIAS RENOVÁVEIS. *Funcionamento de um aerogerador*. Disponível em: <http://aero-mini.blogspot.com.br/2009/11/funcionamento-de-um-aerogerador_27.html>. Acesso em: 01 de outubro de 2015.

FILHO, A., *Aspectos tecnológicos das fontes alternativas de energia (Energia Eólica)*, 2009.

GWEC. *Global Wind Report - Annual market update*. Bélgica. 9ª ed., 2014.

LOPES, A., *Produção eólica e enquadramento técnico económico em Portugal*. FEUP (Faculdade de Engenharia do Porto), 2009.

MELO, Marcelo Silva de Matos. *Energia eólica: aspectos técnicos e económicos*. Rio de Janeiro – RJ. 1ª ed., 2012.

NATIONAL WEATHER SERVICE. *Climate prediction center*. Disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/enso_cycle.shtml> Acesso em: 15 set. 2015.

Polinder, Henk, Deok-Je Bang, H. Li, and Z. Chen. *Concept report on generator topologies, mechanical and electromagnetic optimization*. Project UpWind (2007).

PORTAL DO PROFESSOR. *Energia eólica e a presença da física – UCA*. 2013.

Disponível em:

<<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=33006>>

Acesso em: 09 ago. 2015.

PORTAL SÃO FRANCISCO. *Ventos*. Disponível em:
<<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/ventos/ventos.php>>. Acesso em: 01 de out, de 2015.

SILVA, Gustavo Rodrigues. *Características de Ventos da Região Nordeste*. Recife-PE, 1ª ed., 2003.

The World Wind Energy Association. *2014 Half-Year Report*. 3ª ed., 2014.

WALCZYK, D.An. *Overview of composite wind turbine blade manufacturing*.workshop on Next Generation Wind Power. Rensselaer Polytechnic Institute, Maio, 2010.

WIND POWER MONTHLY. *How to service and maintain a wind turbine blade*. Disponível em:<<http://www.windpowermonthly.com/article/1137943/service-maintain-wind-turbine-blade>> Acesso em: 19 set. 2015

WMO. *Meteorological aspects of the utilization of wind as energy source*. Geneva - Switzerland, 1981, p. 175.