



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ANDRÉ SILVA FIUZA

ENERGIA EÓLICA E ESTUDO DO CASO DO COMPLEXO  
EÓLICO SERRA DAS VACAS

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2015

ANDRÉ SILVA FIUZA

ENERGIA EÓLICA E ESTUDO DO CASO DO COMPLEXO  
EÓLICO SERRA DAS VACAS

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

Área de Concentração: Geração de Energia Elétrica

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2015

ANDRÉ SILVA FIUZA

# ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DO CASO DO COMPLEXO EÓLICO SERRA DAS VACAS

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em     /     /

**Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

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

Dedico este trabalho à minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado o dom da vida, por ter me dado uma família maravilhosa, por me proteger e ser meu porto seguro nos momentos mais difíceis em que passei durante esta árdua missão. Sem Ele seria impossível chegar até aqui.

Agradeço ilimitadamente aos meus pais, Paulo Fiuza e Joselita Fiuza, por terem me dado todo suporte, moral, emocional e financeiro, abrindo mão de incontáveis realizações pessoais a fim de investir no meu futuro. Por estarem sempre ao meu lado, sempre me recebendo com terno abraço nos finais de semestre, ou derramando sofridas lágrimas nas despedidas no final das férias. Tudo que fizeram por mim, jamais, em hipótese alguma, será esquecido. Vocês são meus heróis e meu inexpugnável exemplo de vida. Eu amo vocês.

Agradeço também aos meus irmãos, Kátia Fiuza e Marcos Fiuza, pelas longas conversas motivadoras pelo telefone, pelas transferências bancárias nos finais de semana quando acabava o dinheiro do cuscuz e por terem sido meus fiéis companheiros independente do momento.

Agradeço à minha noiva Thaise Pereira, a melhor pessoa que encontrei na universidade, por ser minha fiel companheira, pelo enorme carinho, genuína integridade, pelo dedicado cuidado quando era acometido por uma gripe, pelas palavras certas nos momentos que precisei, por me ajudar na revisão deste trabalho, e por último, mas não menos importante, sou muitíssimo grato por permitir o uso frequente da máquina de lavar roupas.

Agradeço ao meu orientador, Leimar de Oliveira, pela sua notável paciência, pelas palavras encorajadoras, pelos notáveis conselhos pessoais e profissionais, pelo seu constante e contagioso bom humor, por ser além de professor, um verdadeiro educador, onde estes, sem dúvida alguma, serão lembrados para sempre como parte de nossa história.

Encerro, agradecendo à todos parentes e amigos que direta e indiretamente, contribuíram para o êxito desta jornada pela Universidade Federal de Campina Grande.

*“Sei bem o que é passar necessidade e sei o que é andar com fartura. Aprendi o mistério de viver feliz em todo lugar e em qualquer situação, esteja bem alimentado, ou mesmo com fome, possuindo fartura, ou passando privações. Tudo posso naquele que me fortalece.”*

Filipenses 4.12,13.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a energia eólica, que ao longo dos anos, exibe uma maior demanda nacional e mundial como fonte de energia limpa e renovável, complementando à matriz atual de geração de energia elétrica. São apresentados resultados de estudos de mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil, estudo sobre os ventos, além dos princípios básicos do funcionamento dos aerogeradores, assim como as tecnologias associadas ao seu funcionamento. Além disso, é feita uma análise da expectativa do cenário da energia eólica para os próximos anos, bem como exemplos bem sucedidos de parques eólicos ambientalmente sustentáveis. Por fim, é feito um estudo de caso do Complexo Eólico Serra das Vacas, situado na cidade de Garanhuns, em Pernambuco, mostrando a estrutura de cada parque eólico que o compõe, como tipos de aerogeradores e dados alusivos à geração de energia elétrica.

**Palavras-chave:**Complexo Eólico Serra das Vacas, Energia Eólica, Energia renovável.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do Século XI ao Século XIX.....	17
Figura 2.Velocidade dos ventos em um dia.....	20
Figura 3.Velocidade dos ventos em uma semana.....	20
Figura 4.Velocidade dos ventos em um mês.....	21
Figura 5.Deslocamento de massa de ar.....	21
Figura 6.Brisa marítima e terrestre.....	23
Figura 7.Velocidade do vento em relação à altura.....	24
Figura 8.Fatores que influenciam no vento.....	25
Figura 9.Esquema de um gerador tipo SCIG.....	26
Figura 10.Esquema de um gerador do tipo WRIG.....	27
Figura 11.Esquema de um gerador do tipo DFIG.....	28
Figura 12. Esquema de um gerador do tipo SCIG com conversor de larga escala.....	29
Figura 13.Esquema de um gerador do tipo PMSG com conversor de larga escala.....	29
Figura 14.Esquema de um gerador do tipo de acionamento direto síncrono.....	30
Figura 15.Esquema de um gerador de acionamento direto do tipo EESG.....	31
Figura 16.Esquema de um gerador tipo PMSG com caixa de engrenagem de estágio único.....	32
Figura 17. Turbina de eixo vertical.....	33
Figura 18. Turbinas de eixo vertical.....	33
Figura 19. Turbinas de eixo vertical.....	34
Figura 20. Turbina eólica de vertical.....	35
Figura 21. Turbina eólica de eixo horizontal.....	36
Figura 22. Componentes forjados da estrutura das torres de aço.....	37
Figura 23. Componentes internos das torres.....	39
Figura 24. Elementos de uma pá eólica.....	39
Figura 25. Raiz de inserção e fixadores.....	40
Figura 26. Cubo do rotor e subcomponentes.....	43
Figura 27. Capacidade eólica global de 1997 à 2014.....	44
Figura 28. 10 principais países com novas capacidades instaladas em 2014.....	45
Figura 29. 10 principais países com capacidade eólica acumulada em 2014.....	46
Figura 30. Capacidade anual instalada por região de 2006 à 2014.....	46
Figura 31. Capacidade acumulada global de energia eólica offshore.....	49
Figura 32. Distribuição de usinas instaladas e usinas em construção no nordeste.....	50
Figura 33. Curva de potência do aerogerador Vestas V112-3.0.....	51
Figura 34. Potencial eólico do Brasil.....	52
Figura 35. Velocidade média do vento em m/s 50 metros acima do nível da superfície.....	53
Figura 36. Potência gerada X velocidade do vento.....	56



Figura 37. Fases de um projeto eólico.....	65
Figura 38. Mapa de localização do complexo eólico serra das vacas. ....	65
Figura 39. Layout geral do complexo eólico. ....	66
Figura 40. Diagrama de dados do aerogerador. ....	67
Figura 41. Diagrama de subestação unitária. ....	67
Figura 42. Distribuição dos aerogeradores no na CGE 1.....	68
Figura 43. Circuitos referentes à CGE 1.....	68
Figura 44. Distribuição dos aerogeradores no na CGE 2.....	69
Figura 45. Circuitos referentes à CGE 2.....	69
Figura 46. Distribuição dos aerogeradores no na CGE 3.....	70
Figura 47. Circuitos referentes à CGE 3.....	70
Figura 48. Distribuição dos aerogeradores no na CGE 4.....	70
Figura 49. Circuitos referentes à CGE 4.....	71
Figura 50. Preparação da fundação para fixação da torre. ....	71

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados técnicos da turbina FDC-5KW-HV .....	34
Tabela 2. Itens e insumos usados em torres cônicas .....	39
Tabela 3. Itens e insumos usados em torres cônicas .....	44
Tabela 4. Estados que mais receberam usinas eólicas até 2014.....	50
Tabela 5. Componentes e subcomponentes da nacelle .....	54
Tabela 6. Serviços de desenvolvimento de projetos .....	58
Tabela 7. Serviços de apoio à negociação .....	58
Tabela 8. Serviços de execução .....	59
Tabela 9. Serviços de operação e manutenção.....	60
Tabela 10. Montadores de aerogeneradores sem caixa de engrenagem.....	61
Tabela 11. Montadoras de aerogeneradores com caixa de engrenagem .....	61
Tabela 12. Fabricantes nacionais de torres de aço .....	62
Tabela 13. Fabricantes nacionais de torres de concreto .....	62
Tabela 14. Fabricantes nacionais de pás eólicas .....	63
Tabela 15. Fabricantes nacionais de subcomponentes e insumos para torres de aço .....	64
Tabela 16. Fabricantes nacionais de elementos insumos para pás .....	65
Tabela 17. Fabricantes nacionais de subcomponentes de nacelle .....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TEEV	turbina eólica de eixo vertical
TEEH	turbina eólica de eixo horizontal
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
A	Ampère
V	Volt
kV	Quilovolt (10 <sup>3</sup> V)
MVA	Megavoltampère( 10 <sup>6</sup> V)
W	Watt
kW	Quilowatt (10 <sup>3</sup> W)
MW	Megawatt (10 <sup>6</sup> W)
GW	Gigawatt (10 <sup>9</sup> W)
RPM	Rotações por minuto
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
W/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado
m/s	Metros porsegundo
MWh	Megawatt (10 <sup>6</sup> W) porhora
GWh	Gigawatt (10 <sup>9</sup> W)porhora
mm	Milímetro
°C	Grau Celsius
US\$/MWh	Dólar Americano/megawatt por hora
R\$	Real Brasileiro
R\$ /MWh	Real Brasileiro/megawatt por hora
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
V <sub>v</sub>	Velocidade do vento
	Massa específica do ar (aproximadamente 1,2 Kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>p</sub>	Coefficiente de potência
β	Ângulo de passo
λ	Velocidade específica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia
CHESF	Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
ELETRORAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
PIE	Produção Independente de Energia
NE	Nordeste
UF	Unidade Federativa
GE	General Electric
CRESESB	Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
1.1	Objetivos .....	18
1.1.1	Objetivo Geral .....	18
1.1.2	Objetivo Específico .....	18
1.2	Estrutura do trabalho.....	19
2	Embasamento Teórico.....	20
2.1	O recurso Eólico .....	20
2.2	Mecanismos de Geração dos Ventos.....	21
2.3	Fatores de influência nos ventos .....	23
2.4	Topologias dos Aerogeradores.....	25
2.4.1	Gerador de Indução com Gaiola .....	26
2.4.2	Gerador de Indução com Motor Ventilado .....	27
2.4.3	Gerador de Indução Duplamente Excitado .....	27
2.4.5	Gerador Síncrono de Excitatriz com ímãs permanentes .....	28
2.4.5	Gerador Síncrono Excitado Eletricamente .....	29
2.5	Modelos de Turbinas.....	30
2.5.1	Turbina Eólica de Eixo Vertical .....	30
2.5.2	Turbina Eólica de Eixo Horizontal .....	33
2.5.2.2	Torres.....	34
2.5.2.2	Rotor.....	36
1.1.1.1	Nacele.....	39
3	Potencial Eólico Mundial .....	41
3.1	Novo recorde Mundial .....	41
4	Potencial Eólico Brasileiro .....	45
4.1	Aumento de 60%da Capacidade em 2015 .....	45
5	Potência Instalada x Potência Gerada.....	48
5.1	Curva de Potência .....	48
5.2	Turbinas Projetadas para o Brasil?.....	49
6	Mapeamento da Cadeia de Produtiva da Indústria Eólica no Brasil.....	52
6.1	Relatório dos Serviços .....	52
6.1.2	Serviços de desenvolvimento de Projetos.....	52
6.1.2	Serviços de Apoio à negociação .....	53
6.1.3	Serviços de Execução .....	54
6.1.4	Serviços de Operação e Manutenção .....	54
6.2	Cadeia Produtiva de Bens e Serviços.....	55
6.2.1	Fabricantes Nacionais de parte e Componentes.....	55

6.2.2	Fornecedores de Aerogeradores.....	55
6.2.2.1	Fabricantes de Torres .....	56
6.2.2.2	Fabricantes de Pás .....	57
6.2.2.3	Fabricantes de Subcomponentes e Insumos para Torres .....	58
6.2.2.4	Fabricantes de Subcomponentes e Insumos - Pás e Cubos.....	58
6.2.2.5	Fabricantes de Subcomponentes da Nacele.....	59
7	Estudo de Caso .....	61
7.1	Caso Serra das Vacas.....	61
6	Conclusão .....	69
	Bibliografia.....	70

# 1 INTRODUÇÃO

A origem do cata-vento não está claramente sinalizada na história, acredita-se que foi inventado em meados de 2000 A.C pelos chineses. Com o passar do tempo, a agricultura foi avançando e tarefas como moagem de grãos e bombeamento de água exigiam mais força do homem, que passou a utilizar animais para executarem tarefas que demandavam maior esforço braçal. Historicamente, o primeiro registro do uso de moinhos tanto para bombear água como moer grãos é em 200 A.C na Pérsia. Este tipo de tecnologia veio se espalhando pelo mundo islâmico sendo utilizado por vários séculos.

Com a revolução industrial e o surgimento da máquina a vapor, iniciou-se um processo de desuso da energia eólica e dos moinhos, onde, no início do século XX, existiam apenas 2500 moinhos de vento em operação e em 1960 esse número caiu para menos de 1000. Preocupados com a extinção dos moinhos de vento em virtude da revolução industrial, foi criada em 1923, uma sociedade holandesa para conservação, melhoria do desempenho e utilização mais efetiva dos moinhos holandeses.

O ressurgimento da utilização da energia eólica, assim como exploração de outras fontes de energia se dá a partir da década de 70 com a crise do petróleo, onde por um lado, existiu a necessidade de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia e, por outro lado, a obrigação de proteger o ambiente, cuja degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis, motivaram o renovado interesse pelas renováveis. Na **Figura 1** pode-se ver os principais marcos da energia eólica ao longo dos tempos.

**Figura 1.** Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica do Século XI ao Século XIX.



Fonte: [1].

A energia eólica é hoje em dia vista como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis, onde a China é responsável por grande parte da potência instalada e gerada, liderando o ranking mundial. A grande novidade, é que o Brasil foi o 4º país que mais investiu em energia eólica no mundo, ocupando o 10º lugar mundial em se tratando de capacidade eólica instalada.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar aspectos e modelos de sustentabilidade, tendências para o futuro da energia eólica, características econômicas, modelos e características de aerogeradores, potenciais eólicos em diferentes regiões do Brasil e conceitos básicos sobre relacionados à geração de energia através dos ventos.

### 1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Fazer um estudo de caso do complexo eólico Serra das Vacas, localizado na cidade de Garanhuns – PE, levando-se em consideração assuntos pertinentes como: potência instalada, custo das implementações estruturais, modelos dos aerogeradores, regime de ventos, espaçamento das torres, bem com a previsão de geração de energia elétrica.

Dentro desse panorama, espera-se realizar uma revisão sobre os conceitos que envolvem a conversão de energia de fonte eólica em energia elétrica. Tipos de vento, partes componentes dos aerogeradores, modelos de turbinas, mapas e potenciais eólicos, instalações eólicas, dados do nordeste e outras regiões do Brasil, aspectos econômicos e custo, relação com o meio ambiente.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica sobre energia eólica abordando assuntos como a formação dos ventos, composição de um sistema de conversão de energia eólica em energia elétrica, componentes de um aerogerador, modelos de turbinas e tipos de aplicações eólicas.

No capítulo 3, será feita uma análise do potencial eólico mundial com dados do final do ano 2014, mostrando que o ano de 2015 iniciou com um recorde mundial em se tratando de geração através de energia eólica.

No capítulo 4, o potencial eólico brasileiro é apresentado e analisado, exibindo dados atuais, onde houve um aumento de 60% da capacidade de geração de energia eólica.

O capítulo 5 apresenta uma análise da curva de potência dos aerogeradores modernos, além de fazer uma análise o perfil de aerogeradores que são instalados no Brasil.

No capítulo 6 será apresentado o mapeamento da Cadeia produtiva da Industria Eólica no Brasil, mostrando as principais empresas atuantes no país, assim como os tipos de serviços e produtos associados a geração de energia eólica.

Por fim, no capítulo 7, tem-se um estudo de caso em relação ao Complexo Eólico Serra das Vacas, apresentando dados de geração, área, tipo de turbina utilizada, empresas associadas à construção dos parques eólicos.

Por fim é feita uma conclusão, com uma breve análise e propostas futuras.



## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

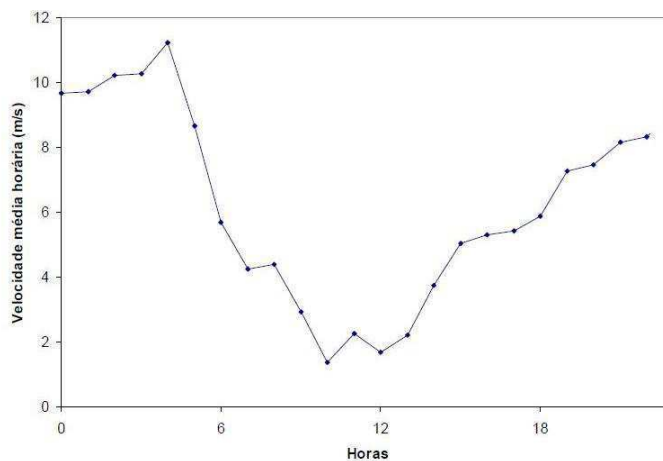
### 2.1 O RECURSO EÓLICO

Os ventos oriundos de diferença de pressão ao longo da superfície terrestre em razão da diferença de radiação solar recebida pela terra, onde é maior nas zonas equatorianas do que nas polares, logo, a radiação solar é responsável pela energia eólica.

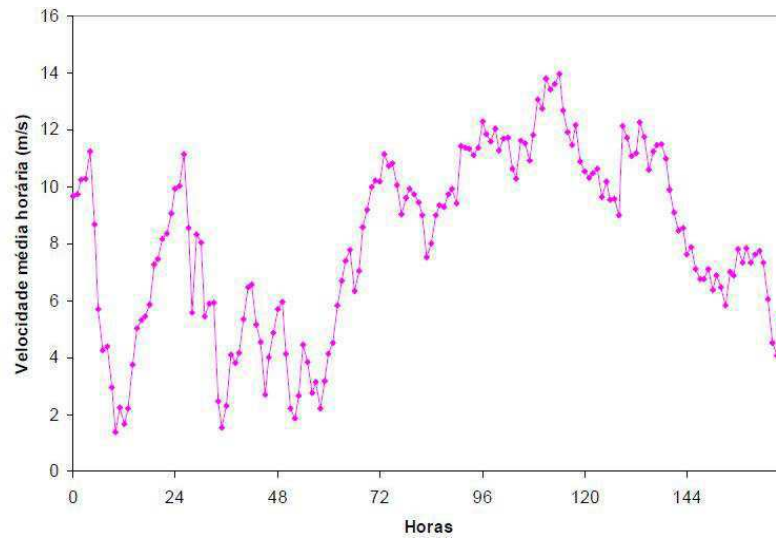
Visto que o aquecimento não uniforme da terra é responsável pela geração dos ventos. Se for analisado o total de energia dos ventos disponível ao em todo o planeta terra, apenas 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Mesmo sendo um percentual pequeno, quando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

Os melhores ventos – com maior velocidade, força, e consistência – são encontrados em torno de 10km da superfície da terra. Como não é possível se instalar aerogeradores nessa elevada altitude, o espaço de interesse e aplicação é limitado em algumas dezenas de metros da atmosfera, nessa altitude o vento é diretamente influenciado pela rugosidade, altura, relevo e obstáculos. Estão ilustrados respectivamente na Figura 1, Figura 2 e Figura 3 o registro da velocidade dos ventos em um dia, a velocidade dos ventos em uma semana, e a velocidade dos ventos em um mês de uma determinada região.

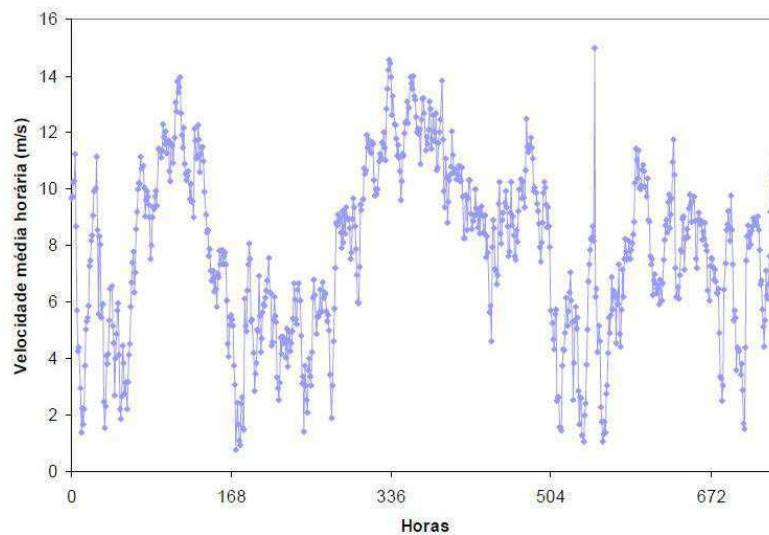
**Figura 2.** Velocidade dos ventos em um dia.



Fonte: [2].

**Figura 3.** Velocidade dos ventos em uma semana

Fonte: [2].

**Figura 4.** Velocidade dos ventos em um mês

Fonte: [2]

## 2.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DOS VENTOS

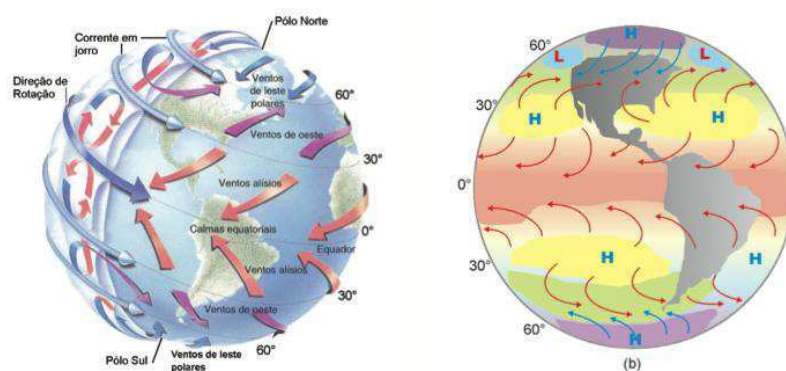
Por receber a incidência de raios solares quase que perpendicularmente, as regiões tropicais são mais aquecidas que as regiões polares, logo, o ar quente situado nas baixas altitudes, tende a subir, onde é logo substituído por uma massa de ar frio que vem se deslocando das regiões polares. A dinâmica do deslocamento de ar quente e ar frio resulta na formação dos ventos. Na **Figura 5** é ilustrado o deslocamento da massa de ar no planeta.

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

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

A intensidade e duração dos ventos, é resultado das variações sazonais na distribuição de radiação na terra, que por sua vez, são consequentes de da inclinação de  $23,5^\circ$  em torno da sua órbita em relação ao sol. A partir disso, tem-se os ventos continentais ou periódicos que compreendem as monções e brisas.

**Figura 5.** Deslocamento de massa de ar.



Fonte: <http://enadepucrs.uni5.net>

Os ventos que mudam de direção à cada 6 meses aproximadamente, são chamados monções. Geralmente, sopram em sentidos inversos em diferentes estações do ano.

Já as brisas, caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa, e são provenientes em função das diferentes capacidades de absorver, refletir e emitir o calor recebido do sol inerentes à cada tipo de superfície, como continentes e mares. No período diurno, a terra tem uma capacidade maior de

refletir raios solares, logo, a temperatura do ar aumenta, e como consequência, é formada uma corrente de ar que sopra do mar para a terra, chamada brisa marítima. Ao passo que, durante a noite, a temperatura da terra diminui mais rápido que a temperatura da água, ocasionando na brisa terrestre, que sopra da terra para o mar. A brisa marítima apresenta uma intensidade maior do que brisa terrestre devido à maior diferença de temperatura que ocorre durante o período diurno. Na **Figura 6** é ilustrada a brisa marítima e a brisa terrestre.

**Figura 6.** Brisa marítima e terrestre.



Fonte: <https://routgeo.wordpress.com/2012/04/19/ventos-catabaticos-de-escala-local-brisa-maritima-e-brisa-terrestre/>

Em contraste com os mecanismos de geração citados anteriormente, existem os ventos locais, que são originados por mecanismos mais específicos. Estes, são muito individualizados, pois são resultantes das condições locais de cada região em específico. A manifestação mais conhecida pode ser observada nos vales e montanhas, onde, durante o dia o ar quente é elevado nas encostas das montanhas, e o ar frio desce para substituir o ar que desceu. Durante a noite esse processo é invertido.

### 2.3 FATORES DE INFLUÊNCIA NOS VENTOS

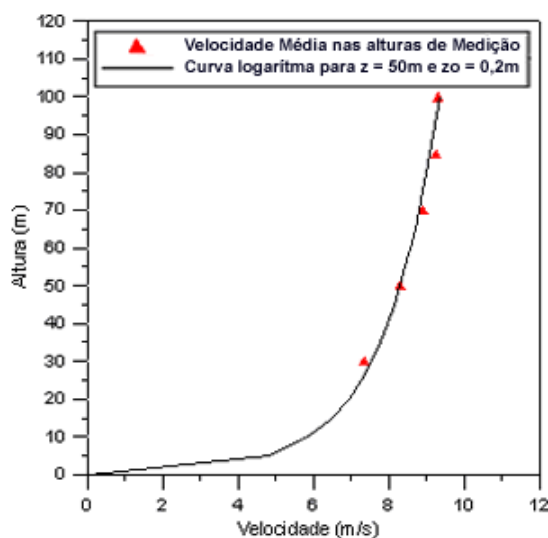
A variação de velocidade do vento ao longo do tempo é influenciada diretamente pelo comportamento estatístico do vento ao longo do dia. Além disso, as diversas características topográficas de uma região também influenciam o comportamento dos ventos, onde, a aceleração ou redução do vento é causada por diferenças de velocidade em uma determinada região. Além das variações topográficas e de rugosidade do solo, a

velocidade também varia seu comportamento com a altura. A **Figura 7** e a **Figura 8** ilustram respectivamente a velocidade do vento em relação à altura e a presença de obstáculos que influenciam o vento.

A velocidade do vento pode variar muito mesmo em algumas centenas de metros, logo, quando se deseja instalar uma turbina eólica deve-se analisar parâmetros regionais cruciais que influenciam nas condições locais do vento. Dentre eles, os principais são:

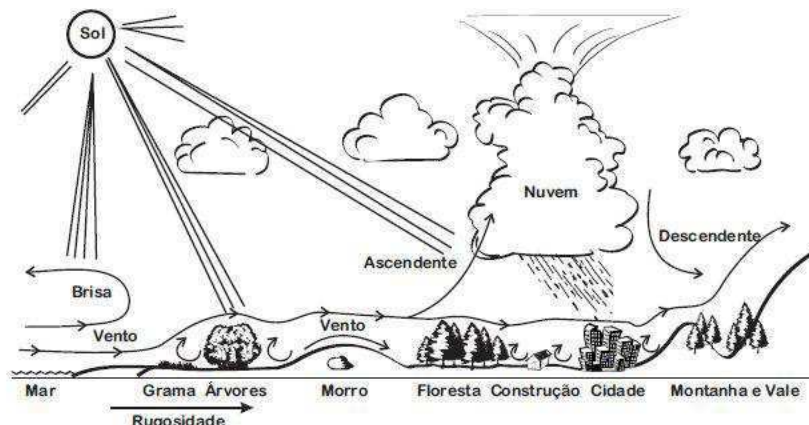
- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno;
- Presença de obstáculos;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

**Figura 7.** Velocidade do vento em relação à altura.



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

**Figura 8.** Presença de obstáculos para o vento



.Fonte: Rui Castro, Introdução à Energia Eólica

## 2.4 TOPOLOGIAS DOS AEROGERADORES

Nas últimas décadas foram desenvolvidos diferentes tipos de tecnologias de aerogeradores, de acordo com a tecnologia podem existir componentes ou subcomponentes específicos, como também, variações de acordo com a disposição do aerogerador. As distintas tecnologias podem ser classificadas como (UPWIND, 2007):

- Velocidade de rotação: velocidade fixa (VF); velocidade variável limitada (VVL); velocidade variável (VV);
- Regulagem de força ou mecanismo de controle: controle estol (stall); controle de estol ativo; controle de passo (pitch);
- Trem de acionamento (drive train); com caixa de engrenagem (multiplicadora); sem caixa de engrenagem (acionamento direto);
- Tipo de gerador: gerador de indução (assíncrono) com rotor de gaiola (squirrelcageinductiongenerator – SCIG); gerador de indução com rotor ventilado (wound rotor inductiongenerator – WRIG); gerador de indução duplamente excitado (doublyfedinductiongenerator – DFIG); gerador síncrono de excitatriz com ímãs permanentes (permanente magnetsynchronousgenerator – PMSG); gerador síncrono excitado eletricamente – com enrolamento de campo (electricallyexcitedsynchronousgenerator – EESG).

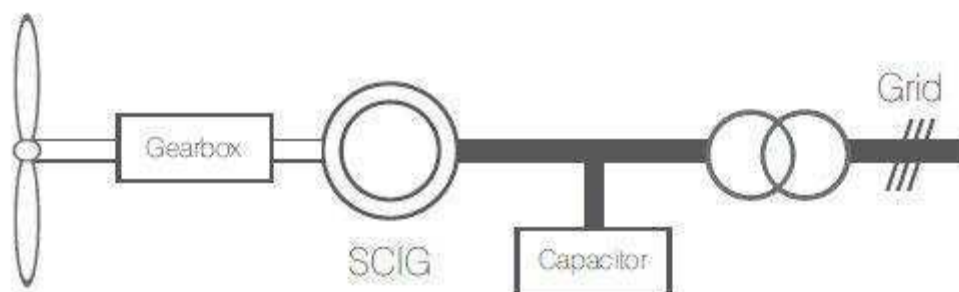
Chama-se de alternador o gerador síncrono e o gerador assíncrono se designa indução. A denominação síncrono é porque a máquina opera com velocidade de rotação

constante e sincronizada com a frequência da tensão elétrica que é aplicada aos seus terminais, ou seja, o movimento de rotação entre o campo girante e o rotor (sincronismo entre campo do estator e rotor) são iguais. Já os geradores assíncronos rodam com uma velocidade superior à velocidade de sincronismo, existindo escorregamento do rotor em relação ao campo girante. A máquina assíncrona não necessita de excitatriz. Conforme o conceito de velocidade de rotação, diferentes combinações de mecanismos de controle, acionamento e tipo de gerador foram desenvolvidas. A seguir esses diferentes conceitos são abordados de maneira detalhada

#### 2.4.1 GERADOR DE INDUÇÃO COM GAIOLA

Nos anos 80 e 90 foi a tecnologia dominante e conhecida como “conceito dinamarquês”: velocidade fixa, controle estol, caixa de engrenagem de múltiplo estágio, e gerador de indução com rotor de gaiola (SCIG) conectado diretamente à rede através de um transformador. A **Figura 9** ilustra o esquema de um gerador tipo SCIG.

**Figura 9.** Esquema de um gerador tipo SCIG



Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

Posteriormente, esse sistema evoluiu para duas velocidades com um gerador SCID com polo mutável. Dessa maneira foi possível obter uma significativa redução do ruído em baixas velocidades, além de uma maior eficiência das pás. Este conceito tem sido usado pela GAMESA, NORDEX E VESTAS. Usualmente o número de polos dos aerogeradores comerciais deste tipo é de dois ou três pares, requerendo uma caixa de engrenagem de três estágios. Entre o estator e o rotor não existe conexão elétrica.

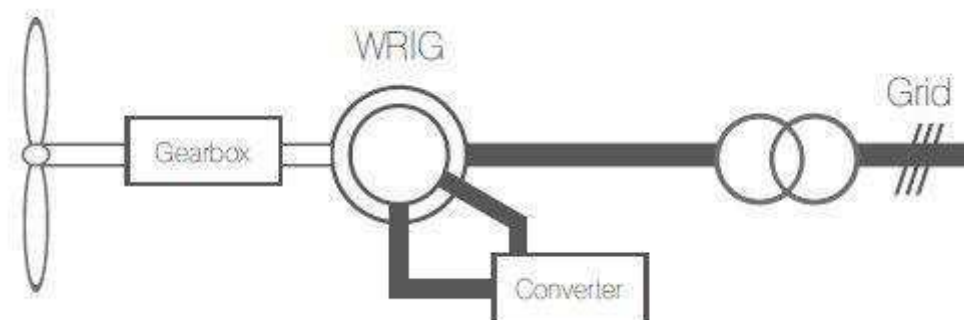
A virada da pá foi permitida através do controle de estol ativo, melhorando assim, a potência da máquina onde o passo da pá do rotor é girado na direção do estol, e não na direção da posição de embandeiramento – menor sustentação – como é feito de

passos normais. As empresas SIEMENS e VESTAS fazem uso desse sistema. As pás são viradas pelo controle de passo no sentido contrário do mecanismo de estol ativo e necessita de acionamento mais potente. No caso de geradores de grande porte, apresenta certa desvantagem.

#### 2.4.2 GERADOR DE INDUÇÃO COM MOTOR VENTILADO

Em meados dos anos 90, a VESTAS passou a usar o conceito de velocidade limitada conhecido como *OptiSlip*, que utiliza um conversor eletrônico de potência para controlar o sistema do rotor ventilado WRIG(**Figura 10**), similar ao SCIG. Fabricantes como VESTAS e SUZLON utilizam este conceito esquematizado na Figura abaixo.

**Figura 10.** Esquema de um gerador do tipo WRIG



Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

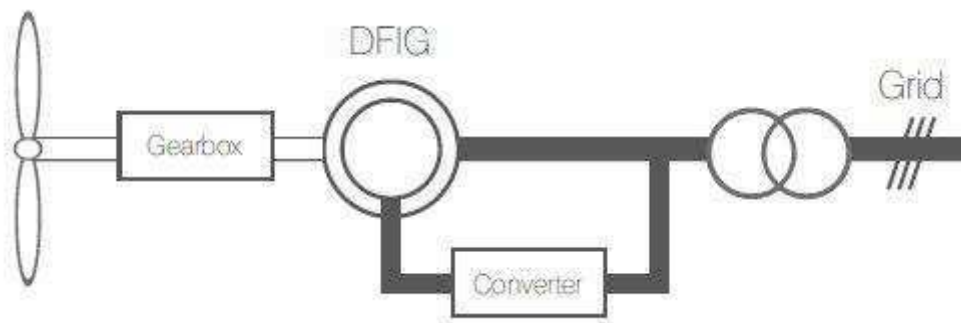
Os aerogeradores com capacidade maior que 1.5MW a partir dos anos 90 passaram a utilizar o conceito de velocidade variável proporcionando maior qualidade de geração de energia elétrica, dentre outros benefícios. Aerogeradores com sistema de velocidade variável geralmente utilizam mecanismos de controle de passo, caixa de engrenagem multiestágio, e conversor eletrônico de potência. São possíveis em diferentes tipos de gerador. DFIG, SCIG, e PMSG.

#### 2.4.3 GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE EXCITADO

Em aerogeradores de grande porte, geralmente são utilizados geradores de indução duplamente excitados chamado DFIG (**Figura 11**). É similar ao SCIG em seu princípio básico de operação, no entanto, a corrente do conversor paralelo ao rotor pode controlar a potência ativa do rotor.



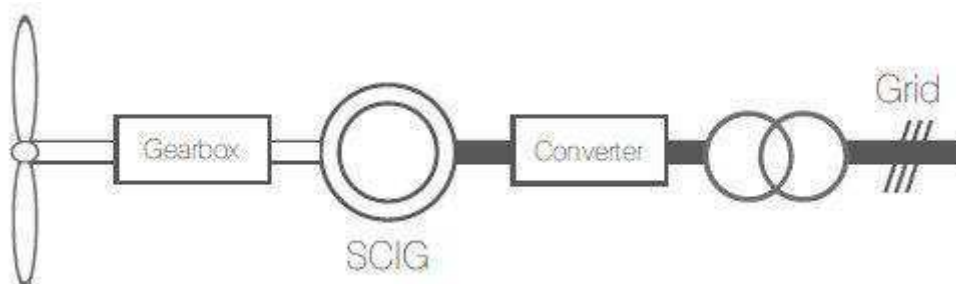
**Figura 11.** Esquema de um gerador do tipo DFIG



Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

O sistema com gerador SCIG precisou ser modificado (**Figura 12**), onde foi inserida um conversor de potência para permitir a operação com velocidade variável. Quando comparado ao sistema dinamarquês, este sistema tem a desvantagem de ser mais caro, associado ao elevado custo do conversor de larga escala. A SIEMENS, em alguns dos seus modelos comerciais, utiliza essa tecnologia que é ilustra na Figura abaixo.

**Figura 12.** Esquema de um gerador do tipo SCIG com conversor de larga escala

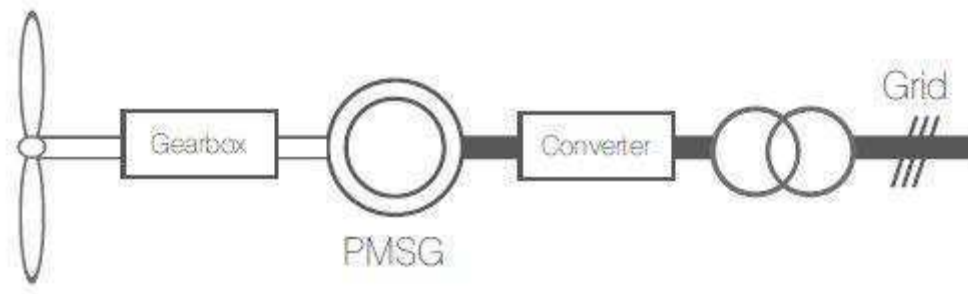


Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

#### 2.4.5 GERADOR SÍNCRONO DE EXCITATRIZ COM ÍMÃS PERMANENTES

O gerador síncrono de excitatriz com ímãs permanentes é uma alternativa ao tipo DFIG. Não necessita de escovas, e o custo dos componentes eletrônicos é menor. As empresas que utilizam esse sistema são GAMESA, GE e CLIPPER. O esquema é representado na **Figura 13**.

**Figura 13.** Esquema de um gerador do tipo PMSG com conversor de larga



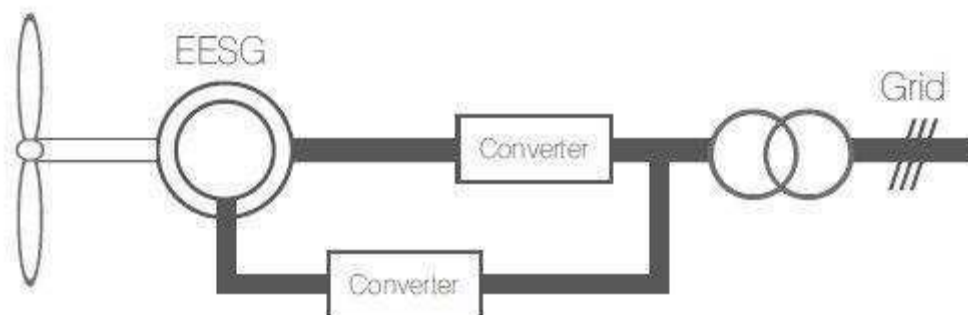
Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

Como forma de reduzir as falhas associadas à caixa de engrenagem e minimizar os problemas de manutenção, a partir de 1991 começaram a surgir aerogeradores com acionamento direto, ou seja, sem caixa de engrenagens. A grande diferença entre a existência ou não da caixa de engrenagem é a velocidade de rotação do gerador. Como o rotor do gerador está diretamente conectado ao cubo do rotor das pás, o gerador de acionamento direto gira a baixa velocidade, sendo então necessária a produção de uma taxa elevada de torque. Por isso, para diminuição do peso e maior eficiência, o gerador de acionamento direto são projetados com diâmetro maior e menor passo de polo como pode ser observado na Figura abaixo.

#### 2.4.5 GERADOR SÍNCRONO EXCITADO ELETRICAMENTE

Há dois conceitos principais de gerador no mercado sem a utilização de caixa de engrenagem: o tipo EESG e o tipo PMSG. O tipo EESG, apresentado na **Figura 15**, gerador síncrono excitado eletricamente com enrolamento de campo, é o mais comumente utilizado pelos fabricantes com tecnologia sem caixa de engrenagem. É construído com um sistema com enrolamento de campo e não requer o uso de ímãs permanentes, os quais agregariam um custo adicional significativo ao gerador. Por outro lado, o custo do conversor necessário é considerável, pois requer componentes eletrônicos mais caros e necessita de refrigeração intensiva. Este conceito, esquematizado a seguir, é utilizado pela ENERCON/WOBLEN, que o denomina de gerador anelar.

**Figura 15.** Esquema de um gerador de acionamento direto do tipo EESG

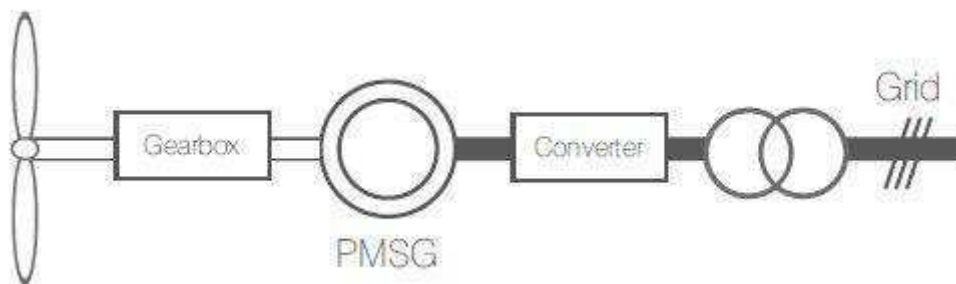


Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

Há ainda sistemas com utilização do conceito de velocidade variável, com gerador de ímãs permanentes e caixa de engrenagem planetária de estágio único. Este conceito, apresentado na Figura abaixo, foi introduzido pela MULTIBRID e é também utilizado pela WINWIND. O esquema é dado na **Figura 16**.

Outra variação é o conceito apresentado pela DeWIND, com utilização de caixa de engrenagem de dois estágios, hidrodinâmica. Vários outros conceitos estão sendo desenvolvidos, tais como: gerador de indução linear, geradores de relutância comutada e geradores de indução sem escovas, mas que ainda não são comercializados de forma ampla no mercado.

**Figura 16.** Esquema de um gerador tipo PMSG com caixa de engrenagem de estágio único.



Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

## 2.5 MODELOS DE TURBINAS

Atualmente no mercado, em se tratando de turbinas eólicas modernas, existem dois principais modelos; as turbinas de eixo vertical (TEEV), e as turbinas de eixo horizontal (TEEH).

### 2.5.1 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

Em geral, são mais raras que as turbinas de eixo horizontal. Em uma TEEV o eixo é montado de maneira vertical perpendicularmente ao solo. Nenhum ajuste é necessário em relação à direção do vento, visto que estão permanentemente alinhadas com o vento. Ao invés de torres para sustentação, são usados cabos de amarração, visto que assim a elevação do rotor é menor, o que significa menor velocidade do vento devido à interferência do solo. As TEEV's em geral são menos eficientes que as TEEH's, além de possuir uma acentuada vibração em sua estrutura devido ao movimento de rotação de suas pás. No entanto, como todos os equipamentos estão próximo ao solo, existe uma facilidade maior de instalação e manutenção, porém este fato acarreta a necessidade de uma base maior para as turbinas. As TEEV's podem ser usadas também para turbinas de pequena escala e para bombeamento de água em regiões rurais. Darreus e Savonius foram os pioneiros nesse tipo de turbina. A **Figura17, Figura 18 e Figura 19** ilustram uma turbina de eixo vertical.

**Figura 17.** Turbina de Eixo Vertical



Fonte: <http://cnwindenergy0431.en.ec21.com/>

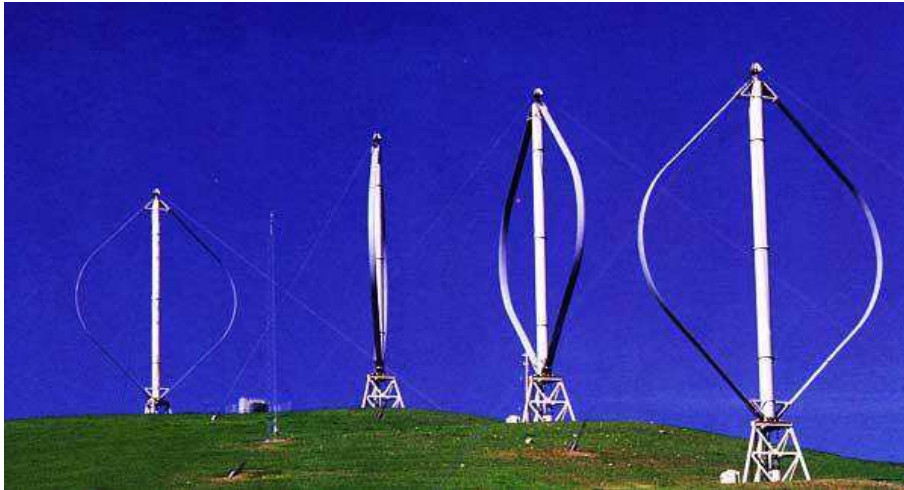
Tabela 1. Dados técnicos da turbina FDC-5KW-HV. Fonte:

Origem	China
Modelo	FDC-5KW-HV
Marca	CARBONFREEENERGY
Potência nominal	3Kw
Velocidade do vento	12 m/s
Velocidade de Cut in	4 m/s

Velocidade de retomada	60 m/s
Diâmetro do rotor	4,6 m
Material da pá	Fibra de Vidro
Quantidade de pás	3

Fonte: <http://cnwindenergy0431.en.ec21.com/>

**Figura 18.** Turbinas de Eixo Vertical



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

**Figura 19.** Turbinas de Eixo Vertical:



Fonte: <http://www.epfl.ae/>

**Figura 20.** Turbina de Eixo Vertical



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

### 2.5.2 TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

Turbina cujo eixo é montado paralelo ao solo, a turbina eólica de eixo horizontal é a mais comum no mercado e nos parques eólicos. Essas turbinas precisam se alinhar constantemente com a direção do vento, usando um mecanismo automático de ajuste. O sistema de ajuste consiste de motores elétricos e caixas de engrenagens que giram o aerogerador para a direita ou esquerda. O controlador eletrônico da turbina lê a posição de um dispositivo mecânico ou eletrônico e ajusta a posição do rotor para capturar o máximo de energia disponível pelo vento. A TEEH é elevada com o auxílio de uma torre que a coloca a uma altura ideal para a velocidade do vento. A **Figura 21** ilustra uma TEEH.

**Figura 21.** Turbina Eólica de Eixo Horizontal





Fonte:<http://veja2.abril.com.br/>

O aerogerador é constituído pelos seguintes componentes básicos: torre, pás, cubo do rotor, eixo, nacele, gerador e, dependendo da tecnologia, caixa de engrenagem. A abertura dos componentes e subcomponentes para uma visão única de árvore de produto é dificultada pelas diferentes tecnologias utilizadas pelos fabricantes e também pelas diferentes sistemáticas de compras e nomenclaturas utilizadas.

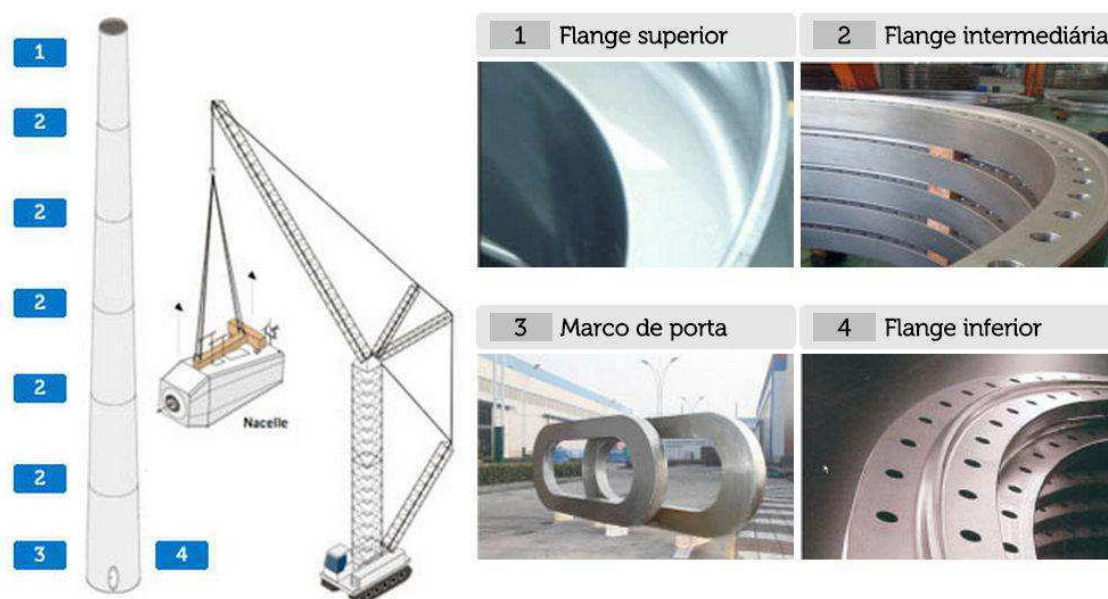
#### 2.5.2.2 TORRES

As torres são as estruturas responsáveis pela sustentação e posicionamento do conjunto rotor–nacele a uma altura conveniente ao seu funcionamento. As torres podem ser do tipo cônica ou treliçada e construídas a partir de diferentes materiais. As torres cônicas podem ser de aço laminado ou concreto protendido, e as torres treliçadas utilizam aço galvanizado. Há também as chamadas torres (cônicas) híbridas, nas quais a parte de baixo da torre (cerca de 60 metros) é construída em concreto e a parte superior é feita em aço. As duas partes são acopladas através de um anel de transição. A definição do tipo de torre/material depende de fatores como custo, altura do aerogerador, facilidade de transporte, montagem e manutenção.

De maneira geral, pode-se dizer que as torres de aço cônicas são mais utilizadas em alturas menores, na faixa de 80 a 100 metros, enquanto as torres de concreto, híbridas ou as treliçadas são mais empregadas em alturas maiores, acima de 100 metros.

As torres treliçadas são mais comumente empregadas em situações que requerem uma logística simplificada, como instalações em locais de difícil acesso. Para o caso de torres “ultra-altas” (na faixa dos 200 metros), há ainda tecnologias que empregam madeira na construção ou então utilizam um esqueleto interno de aço envolto em tecido arquitetônico de alta resistência. Na **Figura 22** pode-se ver exemplos de peças forjadas da estrutura das torres de aço.

**Figura 22.** Componentes forjados da estrutura das torres de aço



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

As torres representam de 20 a 25% do custo do aerogerador. No caso das torres cônicas de aço, são utilizadas de 100 a 200 toneladas deste material, dependendo da altura – aproximadamente 98% da torre é feita de aço. Neste caso a torre correspondendo a cerca de 65% do peso do aerogerador. As torres de concreto são bem mais pesadas, atingido 850 toneladas apenas em sua parte estrutural. Além dos componentes estruturais, que correspondem a cerca de 90% do custo de material, fazem parte das torres uma série de componentes internos, tais como: escadas, elevadores, plataformas, suportes, guard-rails, etc. A **Figura 12** apresenta alguns dos componentes internos das torres. A **tabela 2** ilustra os itens e insumos usados em torres cônicas.

**Figura 23.** Componentes internos das torres.





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

**Tabela 2.** 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 da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

### 2.5.2.2 ROTOR

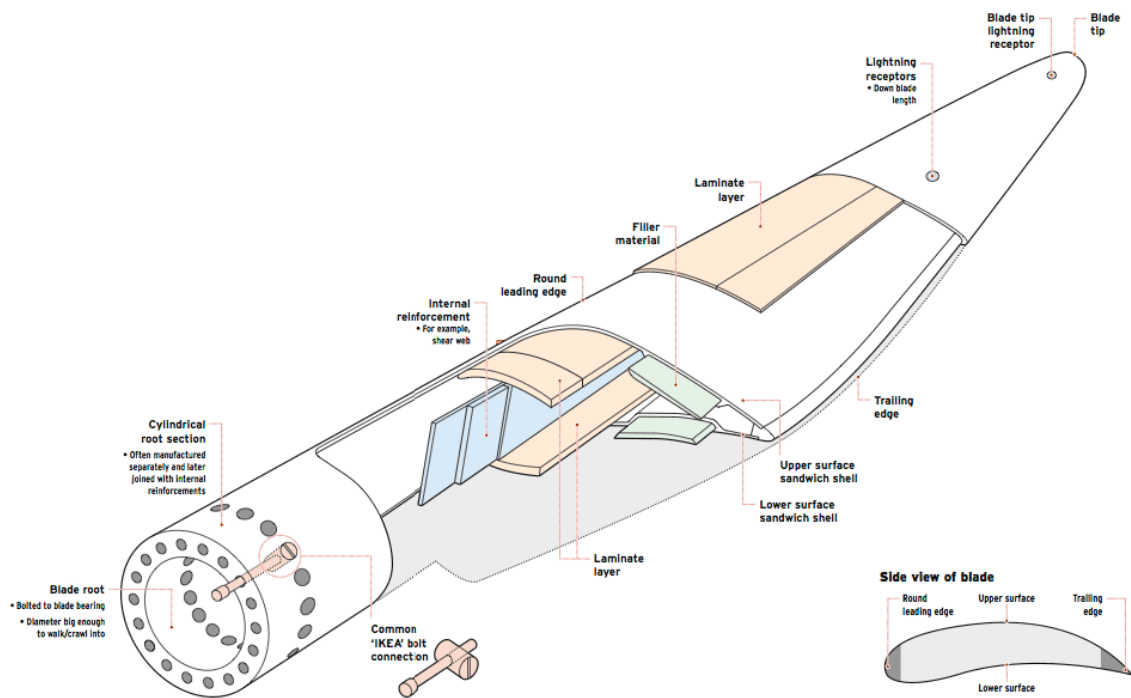
O rotor compreende basicamente as pás – três por aerogerador (tipo comercial de grande porte mais comum) – e o cubo onde são fixadas. As pás são os elementos que interagem diretamente com o vento. São perfis aerodinâmicos de 30 a 70 metros de comprimento (instalações Onshore) fabricados em material compósito – resina epóxi ou poliéster reforçada com fibra de vidro e/ ou carbono – e representam cerca de 22% do custo do aerogerador e 7% de sua massa (6 a 10 toneladas cada uma). As pás normalmente recebem um acabamento superficial para proteção do compósito às intempéries, à base de gel-coat e/ou revestimentos poliuretânicos.

O “bordo de ataque”, superfície que está em atrito direto com vento, chuva e particulados em altas velocidades, é a região mais crítica, passível de desgaste por erosão. Em termos estruturais a pá consiste em um casco externo, formado por duas conchas unidas de material compósito, suportado por uma viga principal ou estrutura central (mastro ou alma). Os materiais compósitos podem ser de dois tipos: laminados – várias camadas de materiais compósitos unidas – e sanduíche – camadas externas finas de laminado com um núcleo central de baixa densidade constituído por materiais como madeira balsa, espuma de PVC, PU ou PET. A fabricação do casco e viga central é feita geralmente por processos de infusão, utilizando-se moldes especiais, mas também pode ser por pré-impregnação – processo “Prepreg”. Essas estruturas são posteriormente coladas com adesivos à base de epóxi. A **Figura 24** apresenta em detalhe os elementos que compõe uma pá, e as fotos da **Figura 25** ilustram o processo de fabricação e montagem das pás.

Outro componente da pá é a raiz de inserção. Trata-se de um item crítico, fabricado separadamente, mas que depois é integrado à pá. Este item é ligado ao cubo do rotor de turbina utilizando-se fixadores de metal (T-bolt) colados ou fixados mecanicamente na raiz, conforme a **Figura 25**.

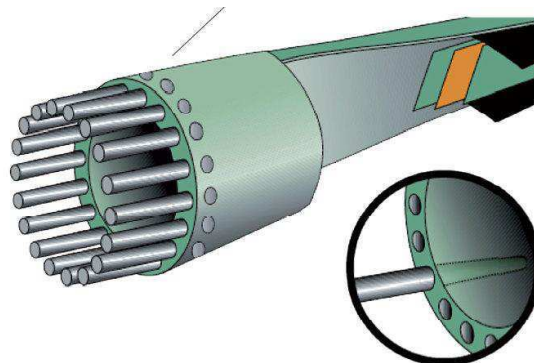
As pás são fixadas em uma estrutura metálica à frente do aerogerador (à frente da nacelle) denominada cubo. O cubo (**Figura 26**) é uma peça única de ferro fundido, de alta precisão de fundição e usinagem, construída com liga de alta resistência. Sua massa varia de 7 a 20 toneladas e seu custo é de aproximadamente 1,4% do custo do aerogerador. O cubo acomoda os rolamentos para fixação das pás e os mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de ataque das pás. O sistema pás e cubo responde então por 10 a 14% do peso do aerogerador e por 20 a 30% do custo da máquina.

**Figura 24.** Elementos de uma pá eólica



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

**Figura 25.** Raiz de inserção e fixadores



Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

**Figura 26.** Cubo do rotor e subcomponentes.



Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

## NACELE

A nacele é a carcaça montada sobre a torre que contém uma série de componentes e subcomponentes tais como: eixo, gerador, caixa multiplicadora (quando usada), transformador, sistema de Yaw, etc. O tamanho e o formato da nacele são variáveis de acordo com os componentes e sua disposição em seu interior (CUSTÓDIO, 2013). As maiores variações são entre aerogeradores que utilizam caixa de engrenagem e os que não utilizam – com acoplamento direto. A nacele pode conter, dependendo da tecnologia/configuração do aerogerador, uma série de elementos estruturais de aço, como a estrutura principal (main frame ou bedplate ou maincarrier), o quadro e o bastidor traseiro, que suportam os diversos componentes nela inseridos.

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

O transformador pode ser instalado no interior da nacele, no interior da torre ou mesmo externamente, acoplado à torre ou no chão. O Sistema de Yaw tem a função de alinhar a turbina com o vento. Este sistema compreende um motor elétrico que gira a nacele sobre a torre com auxílio de um rolamento – rolamento do Yaw – e também engrenagens para o ajuste da velocidade de giro (CUSTÓDIO, 2013). A caixa multiplicadora, quando existente, representa a maior massa da nacele e também uma grande fração de seu custo (cerca de 13%) . Localiza-se entre o rotor e o gerador, de forma a adaptar a baixa rotação do rotor à velocidade de rotação mais elevada do gerador (CRESESB, 2008). É um item que necessita de manutenção intensiva e que representa, portanto, uma fonte de possíveis falhas. Exige o uso de um sistema hidráulico com bombas, trocadores de calor e sistemas de comando para lubrificação e refrigeração. No caso de aerogeradores sem caixa de engrenagem, o gerador utilizado é o de polos salientes (ou multipolos) com o estator em forma de anel. A **tabela 3** apresenta o detalhamento dos 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	Quadro principal (main frame) Quadro traseiro (rear frame) Bastidor Parafusos estruturais
	Acessórios	
	Eixo principal	Resina epóxi ou poliéster Tecido de fibra de vidro Luzes de sinalização
	Rolamento Yaw Sistema de Yaw	Anemômetro (medidor de velocidade do vento) Sensor de direção do vento Outros sensores Para-raios Rolamentos do eixo principal Sistema de lubrificação
	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	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 Ímãs permanentes

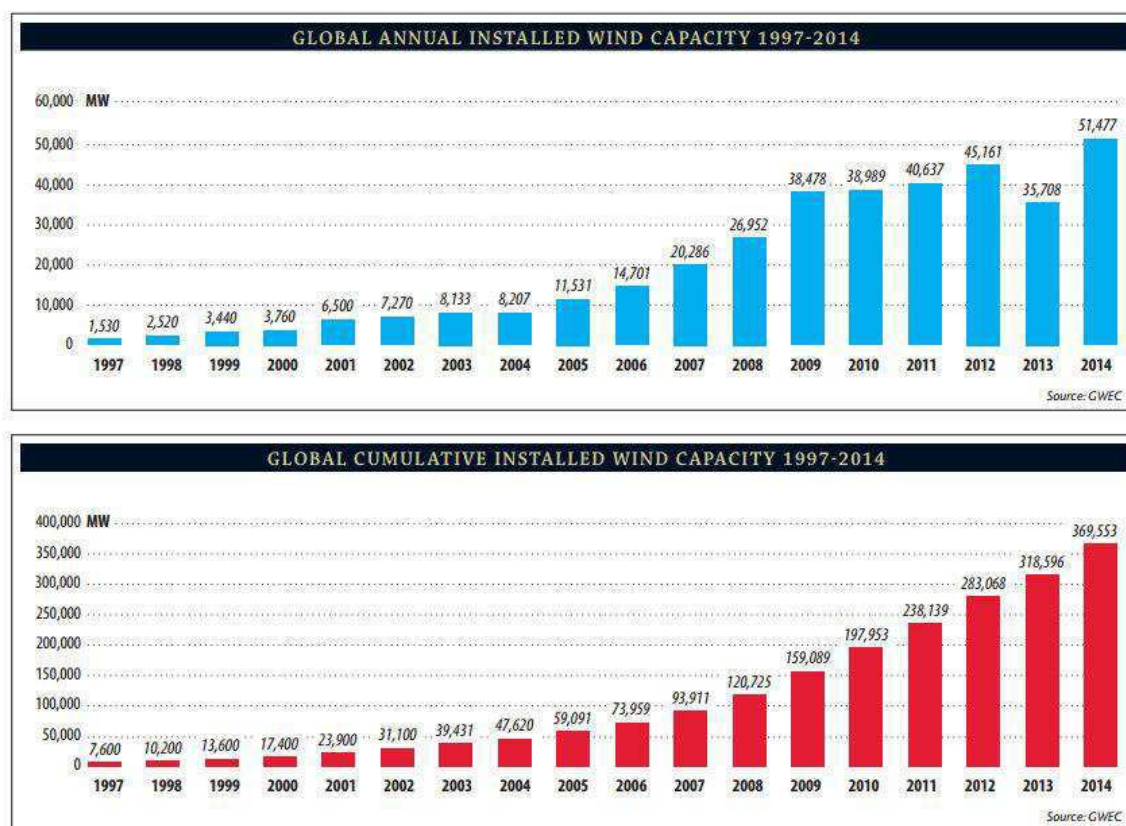
Fonte: Mapeamento da Cadeia da Indústria Produtiva Eólica no Brasil

## 3 POTENCIAL EÓLICO MUNDIAL

### 3.1 NOVO RECORDE MUNDIAL

De acordo com os dados preliminares recolhidos pela WWEA, o ano de 2014 trouxe um novo recorde em instalações de energia eólica: mais de 50 GW de capacidade foram adicionados durante o ano de 2014, elevando a capacidade total de energia eólica perto de 370 GW. O volume de mercado para a nova capacidade eólica foi de 40% maior do que em 2013, e significativamente maior que o recorde do ano anterior, onde foram instalados 44,6 GW. Na **Figura 27** pode-se analisar a capacidade eólica mundial instalada e acumulada.

**Figura 27.** Capacidade Eólica Global de 1997 à 2014: Instalada e Acumulada



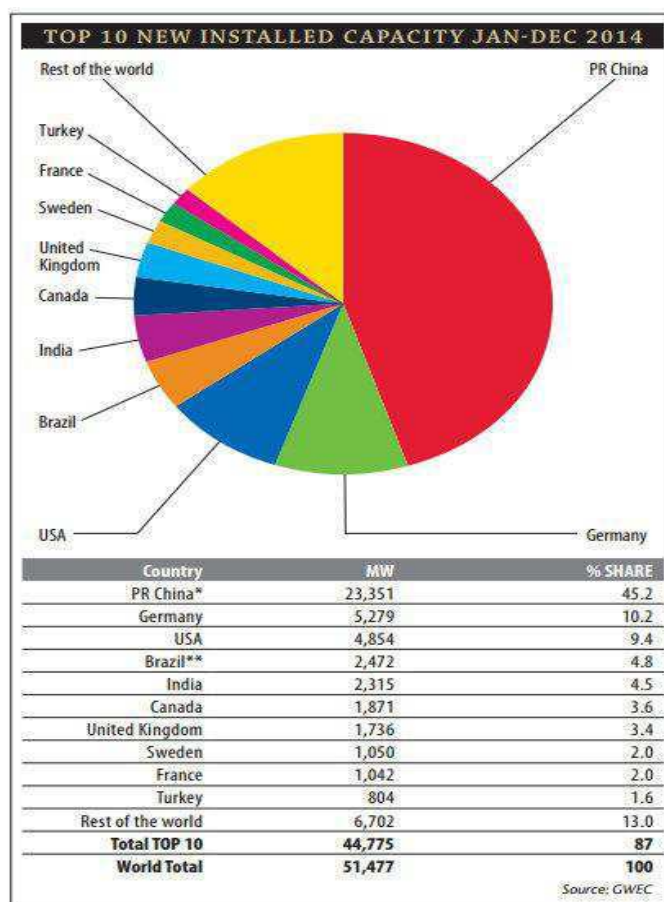
Fonte: <http://www.gwec.net/>



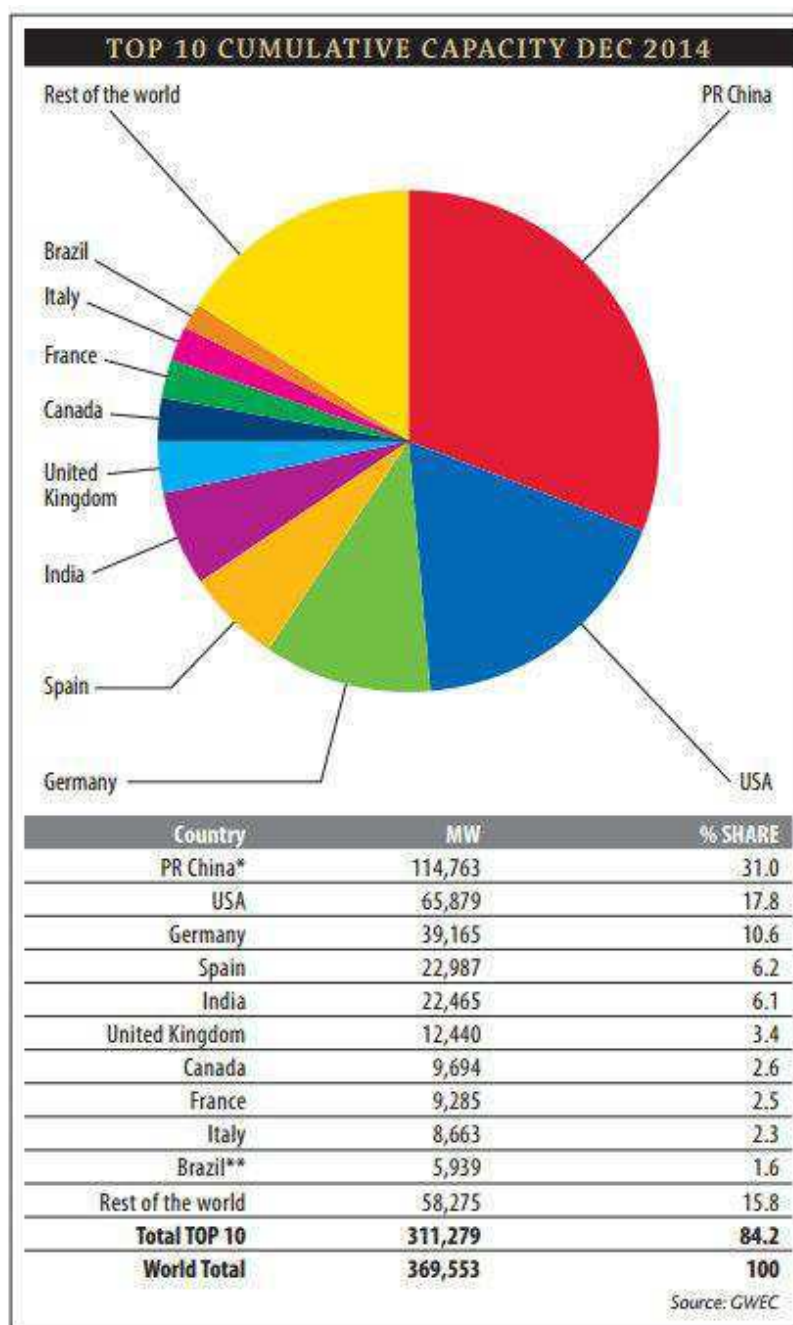
O grupo dos 12 principais países da lista instalaram sozinhos 44,8 GW de novas usinas de energia eólica, a metade deles estabelecendo novos recordes nacionais como a China, que adicionou 23,3 GW, o maior número de um país já adicionou dentro de um ano, atingindo uma capacidade total de 115 GW. A Alemanha tornou-se o segundo maior mercado para novas turbinas, acrescentando onshore e offshore de 5,8 GW. O mercado norte-americano recuperou de sua queda anterior e chegou a 4,9 GW.

A novidade do ano ficou por conta do Brasil como recém-chegado do ano de 2014, com capacidade adicional de 2,8 GW, a primeira vez que um país latino-americano chegou a tal Figura. Novos registros nacionais de instalação também foram alcançados no Canadá (1,9 GW) e Suécia (1 GW). Dinamarca estabeleceu um novo recorde mundial ao atingir uma quota de energia eólica de 39% no fornecimento de energia doméstica. Entre os 12 maiores países, Espanha, Dinamarca e Itália permaneceram com os mesmos números apresentando estagnação em relação à novas instalações. A **Figura 26 e Figura 29** listam os 10 principais países em relação a maior capacidade instalada e capacidade acumulada entre Janeiro à Dezembro de 2014.

**Figura 28.** 10 Principais Países com Novas Capacidades Instaladas em 2014



Fonte: <http://www.gwec.net/>

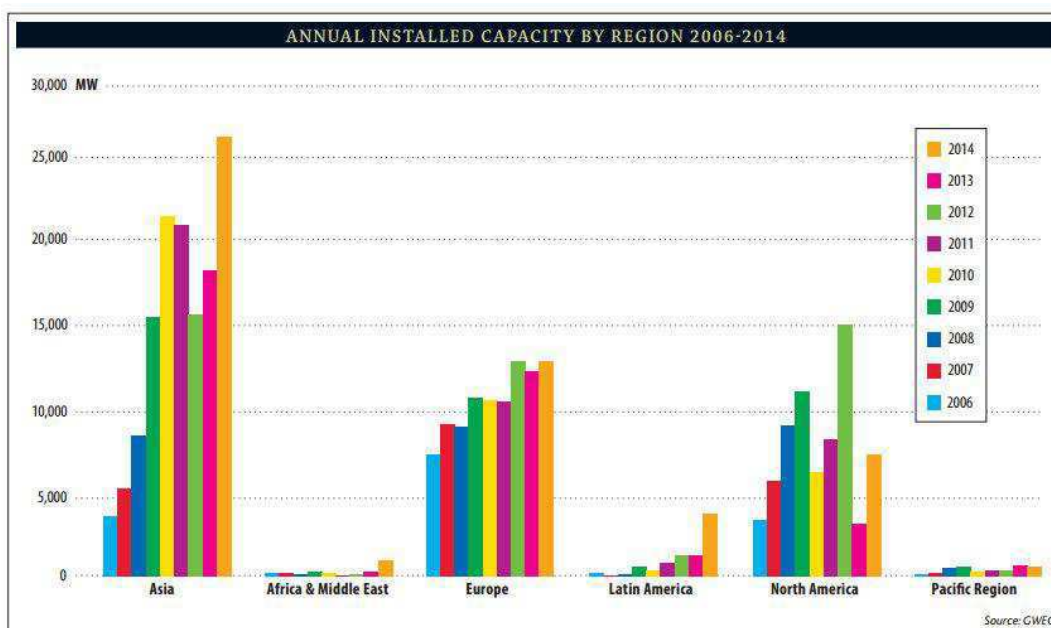
**Figura 29.** 10 Principais Países com Capacidade Acumulada em 2014

Fonte: Fonte: <http://www.gwec.net/>

A energia eólica é hoje um pilar indiscutível do fornecimento de electricidade em muitas partes do mundo. 370 Gigawatt de energia eólica instalada em todo o mundo podem agora contribuir perto de 5% da demanda mundial de electricidade. Vários países, incluindo a Dinamarca, Espanha, Portugal, Irlanda, Reino Unido e Alemanha, já atingiram 10% ou mais do seu poder que vem do vento. Na **Figura 30**, é possível observar a distribuição de capacidade anual instalada por região desde o ano 2006 até o final de 2014. A **Figura 31** ilustra dados relativos a geração de energia eólica offshore.

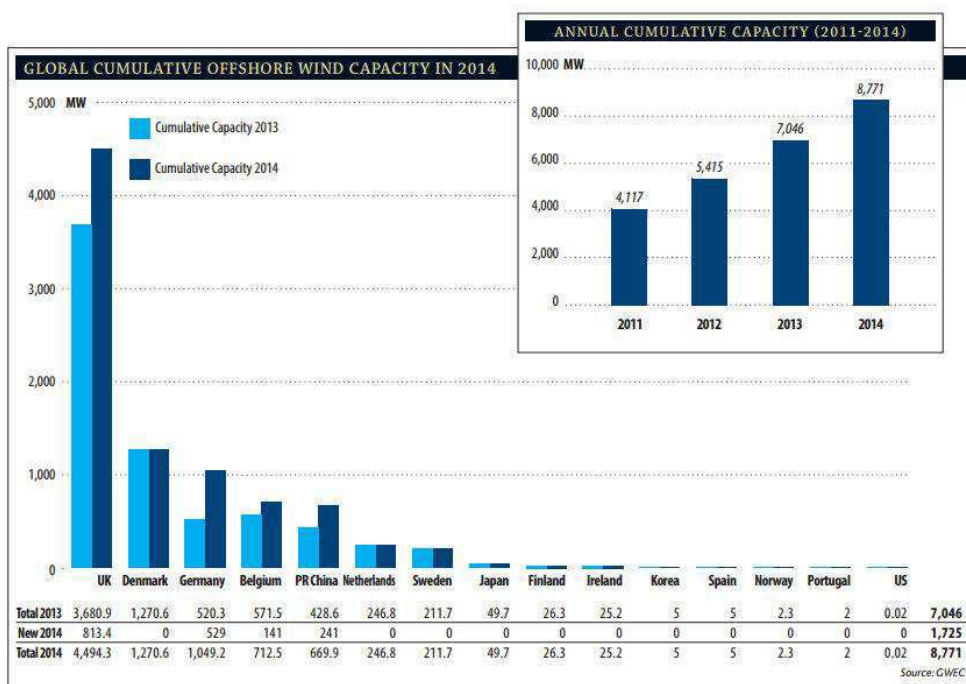


Figura 30. Capacidade Anual Instalada por Região de 2006 à 2014



Fonte: Fonte: Fonte: <http://www.gwec.net/>

Figura 31. Capacidade Acumulada Global de Energia Eólica Offshore.



Fonte: <http://www.gwec.net/>

## 4 POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

### 4.1 AUMENTO DE 60% DA CAPACIDADE EM 2015

Atualmente, é a fonte que mais cresce no Brasil. Na primeira semana do mês de janeiro, a energia eólica atingiu a marca de 6 gigawatts (GW) de potência instalada e uma participação de 4,5% na matriz elétrica brasileira.

Com a entrada em funcionamento de quatro novos parques na Bahia, essa fonte renovável começa o ano com 241 parques eólicos distribuídos por onze estados. No final de 2012, o Brasil dispunha de uma capacidade instalada de 2,5 GW. Em apenas dois anos, a potência instalada do país mais que duplicou com a instalação de 3,5 GW.

O ano de 2014 terminou com 195 usinas eólicas em operação comercial, 105 a mais do que no ano anterior. Já o fator de capacidade média das usinas brasileiras foi de 39% em dezembro, com destaque para a produtividade de parques no Piauí (73%) e Ceará (52%). Os fatores de capacidade apresentados no período adquirem especial relevância quando comparados com os valores médios verificados em 2013, nos países com maior capacidade eólica instalada, como China (23,7%), Estados Unidos (32,1%), Alemanha (18,5%) e Espanha (26,9%).

A maior geração por estado foi a do Rio Grande do Norte, com 60 usinas que registraram 633 MW médios. Em seguida aparecem o Ceará (621 MW médios, 41 usinas) e Bahia (328 MW médios, 33 usinas). Em capacidade instalada, o ranking também é liderado por Rio Grande do Norte (1.723 MW), com Ceará (1.201 MW), Bahia (842 MW), Rio Grande do Sul (715 MW) e Santa Catarina (222 MW) em destaque. Na **tabela 4** são observados os 6 estados que mais receberam usinas eólicas até 2014.

ESTADO	RN	BA	RS	CE	PI	SE
UNIDADES	25	22	17	15	3	1
MW	718,2	527,2	382	398,4	75,6	34,5
R\$	2,9 Bi	2,1 Bi	1,9 Bi	1,6 Bi	225 Mi	103 Mi

#### Tabela 4.

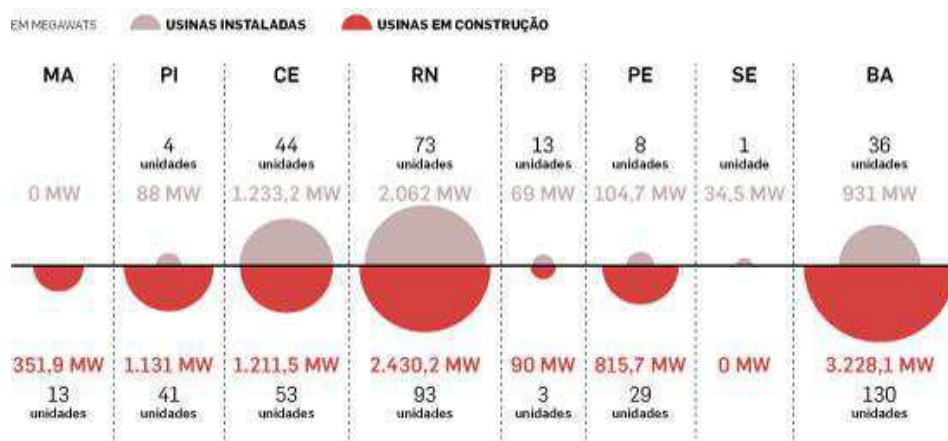
Devido à burocracia para a instalação dos parques eólicos e a falta de atualização do mapa eólico, o Ceará tem 36 parques atrasados, segundo os relatórios da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Desse total, 22 já deveriam estar funcionando desde janeiro, enquanto os outros 14 seriam entregues ao longo de 2015, mas tiveram a conclusão adiada.

O aumento da capacidade instalada em 2014 foi concentrado principalmente no Nordeste, com um crescimento de 174%, partindo de 1.451 MW e alcançando os 3.969 MW, provenientes de 156 usinas. O montante representa 80% da capacidade total de usinas eólicas do País.

Os números colocam o Brasil na 11ª posição entre os países com maior capacidade instalada no mundo, de acordo com dados do Conselho Global de Energia Eólica (GWEC, na sigla em inglês), pouco à frente de Portugal e Dinamarca. Quando observada a expansão anual, o País registrou a 4ª colocação entre os que mais colocaram megawatts eólicos em operação, com 2.764, atrás apenas de China, Alemanha e Estados Unidos. A geração eólica brasileira em dezembro de 2014 alcançou 1.908 MW médios.

Até 2018, a expectativa é que a participação da energia eólica na matriz energética brasileira salte para 8%, com a contratação e instalação de pelo menos 2 GW de potência a cada ano. Pelas perspectivas do Governo, a eólica deve atingir 22,4 GW de potência instalada em 2023, e as previsões do setor indicam um crescimento ainda maior, que alcança 25,6 GW. Esses 6 GW representam para o país mais de 90 mil empregos gerados, 10 milhões de residências abastecidas mensalmente e 5 milhões de toneladas de emissões de CO2 evitadas. Abaixo, a **Figura 32** ilustra a distribuição de usinas eólicas tanto instaladas como em construção no nordeste brasileiro em 2015.

**Figura 32.** Distribuição de Usinas Instaladas e em Construção no Nordeste.



Fonte: <http://economia.estadao.com.br/>

## 5 POTÊNCIA INSTALADA X POTÊNCIA GERADA

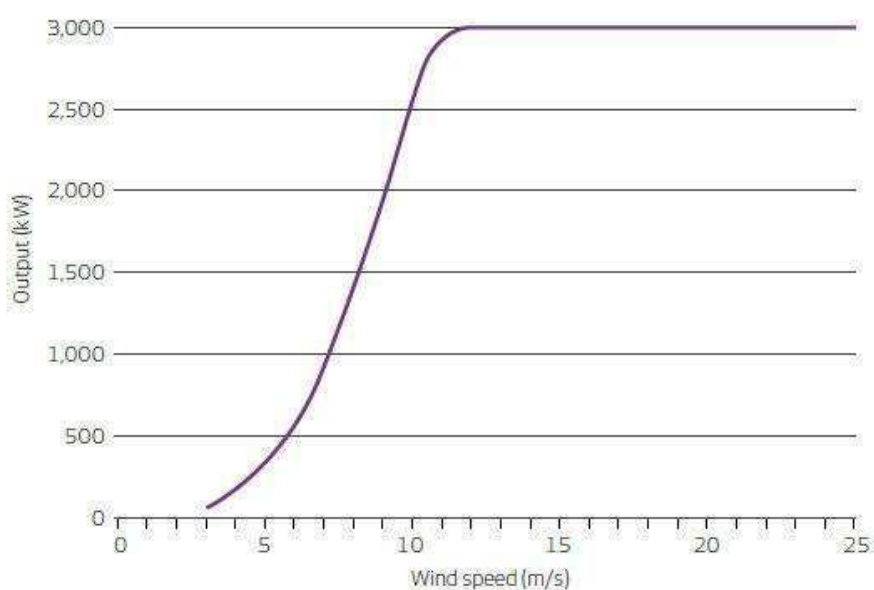
### 5.1 CURVA DE POTÊNCIA

A potência disponível no vento varia com o cubo da velocidade do vento. Assim, um aumento de 10% na velocidade do vento, resulta um incremento de 30% na energia disponível. A potência de uma massa de ar que flui com velocidade  $v$  através de uma área  $A$  pode ser calculada como (CUSTÓDIO, 2009):

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

A curva de potência de uma turbina eólica segue essa relação entre a velocidade de partida (*cut-in*) - velocidade na qual a turbina eólica começa a operar - e a velocidade nominal. Na **Figura 33**, apresenta-se a curva de potência típica de uma turbina eólica modelo VESTAS V112-3.0 MW com potência nominal de 3000 kW, cut in de 3m/s e cut-out de 25m/s. Tipicamente, as velocidades de *cut-in* estão na faixa entre 3 a 6 m/s, e cut-out 25m/s

**Figura 33.** Curva de Potência do Aerogerador VESTAS modelo V112-3.0

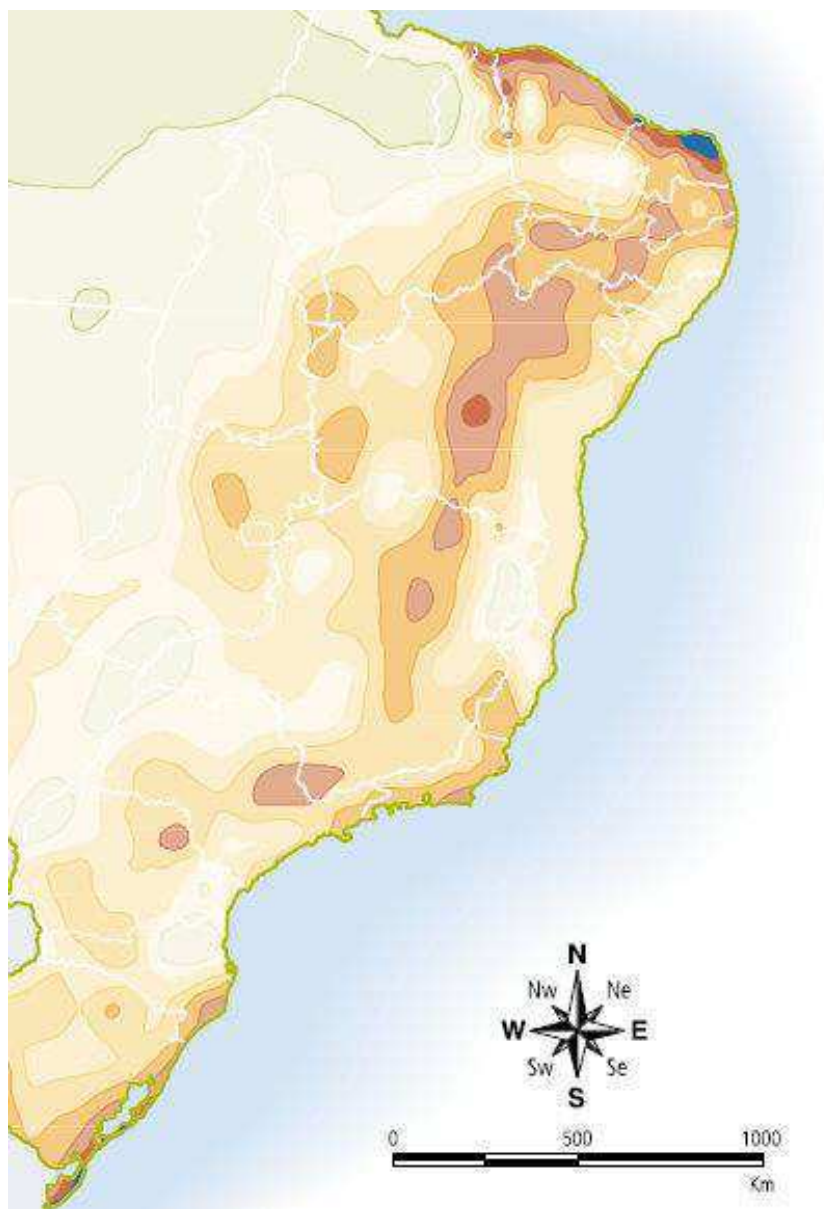


Fonte: [www.vestas.com](http://www.vestas.com)

## 5.2 TURBINAS PROJETADAS PARA O BRASIL?

Quando afirma-se que atualmente o Brasil possui em média 6 GW de capacidade de geração de energia eólica, é preciso analisar a veracidade desses números em relação à verdadeira quantidade de energia que será gerada através dos parques eólicos instalados. De acordo com o atlas de energia eólica de 2003 da ANEEL, a maior velocidade média de ventos registrada em território brasileiro é no litoral do Rio grande do Norte, e no sul do país com ventos em torno de 8m/s, como é percebido na análise da **Figura 34 e Figura 35**.

**Figura 34.** Potencial Eólico do Brasil



Fonte: <http://www.aneel.gov.br/>

**Figura 35.** Velocidade média do vento (m/s) 50 m acima do nível da superfície.

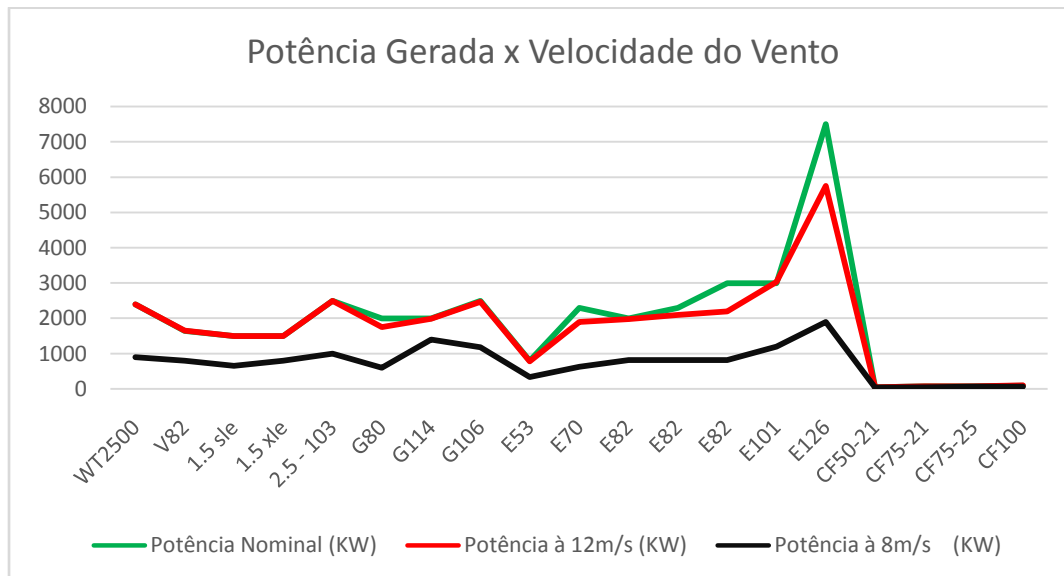
	Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morro	Montanha
4	> 6,0	> 7,0	> 8,0	> 9,0	> 11,0
3	4,5 - 6,0	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0	7,5 - 9,0	8,5 - 11,0
2	3,0 - 4,5	4,5 - 6,0	4,5 - 6,0	6,0 - 7,5	7,0 - 8,5
1	< 3,0	< 4,5	< 4,5	< 6,0	< 7,0

Fonte: <http://www.aneel.gov.br/>

No entanto nos catálogos dos produtos, a velocidade ideal para aproveitamento máximo da turbina é em torno de 12m/s. Os cálculos de potência instalada em um parque eólico são baseados em ventos com essa velocidade, porém, analisando a especificação dos produtos, foi possível perceber que para ventos de 8m/s a potência gerada cai quase que pela metade, como é possível ser observado nos gráficos de curva de potência fornecidos pelos fabricantes onde foram resumidas as informações à seguir na **tabela 5**, e na **Figura 36**.

**Tabela 5.** Potências geradas de acordo com a velocidade do vento

Fabricante	Modelo	Potência Nominal (KW)	Potência à 12m/s (KW)	Potência à 8m/s(KW)
PROVEN	WT2500	2400	2400	900
VESTAS	V82	1650	1650	800
G&E	1.5 sle	1500	1500	650
G&E	1.5 xle	1500	1500	800
G&E	2.5 - 103	2500	2500	1000
GAMESA	G80	2000	1750	600
GAMESA	G114	2000	1990	1400
GAMESA	G106	2500	2470	1180
ENERCON	E53	800	780	336
ENERCON	E70	2300	1900	626
ENERCON	E82	2000	1980	815
ENERCON	E82	2300	2100	815
ENERCON	E82	3000	2200	815
ENERCON	E101	3000	3034	1200
ENERCON	E126	7500	5750	1900
C&F GREEN ENERGY	CF50-21	51	50	35
C&F GREEN ENERGY	CF75-21	75	75	40
C&F GREEN ENERGY	CF75-25	75	75	60
C&F GREEN ENERGY	CF100	100	100	60

**Figura 36.** Potência Gerada em relação ao modelo de aerogerador

Foram feitas diversas pesquisas e questionamentos a fim de obter resposta satisfatória para esse questionamento, porém não foi encontrado. O que se tem observado é que as turbinas usadas no Brasil são as mesmas turbinas usadas na Europa, Estados Unidos e Países da Ásia. Essas turbinas são especificadas e produzidas para condições e regimes de vento um tanto quanto diferente das condições brasileiras, no entanto, é mais barato para os fabricantes usarem o mesmo projeto do que mudar toda a cadeia produtiva a fim de adaptar seus produtos para uma nova geografia. Acredita-se que deveriam ser fabricadas e comercializadas turbinas com potência nominal para ventos em torno de 8m/s, que são os ventos predominantes no Brasil. Dessa forma os ventos seriam melhor aproveitados, contribuindo para uma geração de energia eólica mais eficiente para a matriz energética brasileira.

Outro fator observado, é que caso esse tipo de turbina fosse comercializado, haveria toda uma reestruturação ao processo de produção dos equipamentos e acessórios relacionados. A priori seriam aerogeradores com menor custo de produção. Como a nacelle seria mais leve, poderiam ser manufaturadas torres de porte menor, reduzindo assim também o custo de produção das torres, agregado à isso, se gastaria menos no materiais no processo de fundação, pois seria dimensionado para torres menores. O ponto chave desse questionamento, é que haveria uma redução significativa do custo de implantação de novos parques eólicos, assim como uma abertura de oportunidade para exportação desse tipo de turbina para outros países onde apresentam características de ventos parecidas com a do Brasil.



# 6 MAPEAMENTO DA CADEIA DE PRODUTIVA DA INDUSTRIA EÓLICA NO BRASIL

## 6.1 RELATÓRIO DOS SERVIÇOS

A cadeia produtiva eólica é composta por serviços diversos, podendo ser classificados conforme a fase de desenvolvimento de projetos eólicos aos quais relacionam. Basicamente, os projetos de parques eólicos de maior tamanho apresentam quanto principais fases:

- Desenvolvimento do projeto;
- Negociação;
- Execução ou Implantação;
- Operação e Manutenção (O&M).

Essas quatro etapas podem ser subdivididas em:

- Serviços de desenvolvimento de projetos de parques;
- Serviços de apoio à negociação com fornecedores e compradores/leilão;
- Serviços de apoio à pré-construção;
- Serviços de implantação de parques;
- Logística e execução de obras;
- Serviços de operação e manutenção;
- Serviços associados a certificação de aerogeradores e treinamento técnico.

### 6.1.2 SERVIÇOS DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS

Em boa parte dos casos, as equipes das empresas geradoras de energia/proprietários de parque, são responsáveis pelo desenvolvimento de projetos de parques eólicos, mas podem ser também contratados por empresas especializadas nesse

tipo de prestação de serviço. Na **tabela 6**, ilustra as atividades e subatividades que são envolvidas em um projeto.

**Tabela 6.** Serviços de desenvolvimento de projetos

Prospecção de áreas	Identificação e seleção de áreas Serviços topográficos e de sondagem Suporte para análise fundiária Contratos para arrendamento de terrenos e permissões Estudos de conexão à rede de transmissão
Estudos de Viabilidade	Revisão de restrições Projeto conceitual do parque eólico Mapeamento/medição do vento Medição de potência Análise energética – estimativa de produção Análise financeira Revisão da conexão à rede Avaliação de incertezas
Desenvolvimento do Projeto	Elaboração de estudos ambientais Monitoramento do vento Elaboração de projeto básico/leiaute Avaliação das condições do site e rendimento energético Suporte para conexão à rede Suporte para seleção do aerogerador Elaboração de projeto construtivo Processos técnicos e legais junto a ANEEL Licenciamento e registro do projeto

Fonte: [21].

#### 6.1.2 SERVIÇOS DE APOIO À NEGOCIAÇÃO

Para atuação em leilões de comercialização de contratos, assim como apoio à negociação com investidores, há empresas que oferecem serviço de apoio à negociação. Esses serviços são ilustrados na **tabela 7**.

**Tabela 7.** Serviços de apoio à negociação

Negociação com fornecedores	Elaboração de termo de referência de fornecimento Suporte para avaliação de propostas de fornecedores
Negociação com compradores	Apoio ao leilão Comercialização de contratos de energia – trading
Relação com investidores	Elaboração de relatórios para investidores DueDiligence

Fonte: [21]

### 6.1.3 SERVIÇOS DE EXECUÇÃO

Turnkey é um modelo onde uma só empresa se responsabiliza por todo o processo de construção e montagem, porém, é comum serem contratadas diversas empresas para esses processos. Em geral, a montagem do aerogerador fica por responsabilidade do fornecedor, que pode ou não assumir as outras obras do processo se enquadrando no modelo turnkey. Os serviços de execução incluem uma fase preliminar, uma fase de pré-construção, e a fase de construção e montagem. Os serviços prestados são definidos na **Tabela 8**.

**Tabela 8.** Serviços de execução

Pré-construção	Realização de leilões de contratação e aquisição Elaboração/revisão do projeto elétrico e civil Gestão da conexão com a rede Avaliação do rendimento energético formal Due diligence técnica
Construção e montagem	Gestão do projeto/execução Coordenação e supervisão do trabalho Transporte dos módulos do aerogerador Engenharia e gestão do trânsito de grandes cargas Movimentação de cargas Construção e montagem local Monitoramento da construção Inspeções e auditorias Engenharia do proprietário EPC elétrico EPC civil Elevação e montagem eletromecânica Comissionamento e start-up Vigilância ambiental da obra

Fonte: [21].

### 6.1.4 SERVIÇOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Os serviços de operação e manutenção (O&M) geralmente são terceirizados pelos produtores de energia, onde é comum que essas atividades sejam contratadas principalmente pelos fornecedores dos aerogeradores como forma de serviço de pós-venda de longo prazo. Outros serviços que necessitam de manutenção no parque são os sistemas elétricos do parque, que compreendem desde as subestações unitárias, até as conexões com as redes de transmissão e distribuição de energia. Esses diversos serviços são apresentados na **Tabela 9**.

**Tabela 9.** Serviços de operação e manutenção.

O&M	Operação do parque Serviços de controle integrado e monitoramento remoto Comunicação com o ONS (Operador Nacional do Sistema) Análise e desempenho da produção Análise da disponibilidade Medições e controle de grandezas elétricas Medições acústicas Medições de curva de potência Inspeção preventiva Manutenção preventiva e corretiva Diagnóstico de falhas Auditoria de qualidade e segurança Limpeza e tratamento de superfície das turbinas/alpinismo Grandes reparações de aerogeradores Retrofitting de aerogeradores Manutenção e reparação de pás
Exploração	Comprovação de garantias Ensaios de rendimento Vigilância ambiental na exploração

Fonte: [21].

## 6.2 CADEIA PRODUTIVA DE BENS E SERVIÇOS

### 6.2.1 FABRICANTES NACIONAIS DE PARTE E COMPONENTES

A identificação dos fabricantes nacionais de partes da cadeia eólica pode ser distribuída e organizada por segmentos que compõem um aerogerador. Dessa maneira, serão apresentados em forma de tabela os itens e seus fabricantes.

### 6.2.2 FORNECEDORES DE AEROGERADORES

São em maioria montadoras, pois, podem fazer a integração com componentes fabricados por outras empresas. É no parque eólico que a integração total do aerogerador acontece, constituindo o acoplamento da torre, cubo, pás e nacele. A **tabela 10** lista as principais montadoras de aerogeradores sem caixa de engrenagem. A **tabela 11** lista as principais montadoras de aerogeradores cp, caixa de engrenagem

**Tabela 10.** Montadoras de aerogerador sem caixa de engrenagem.

EMPRESA	SITE
IMPESA	www.impesa.com
WEG	www.weg.net
WOOBEN	www.wobben.com.br

Fonte: [21].

**Tabela 11.** Montadoras de aerogerador com caixa de engrenagem.

EMPRESA	SITE
GE	www.gepower.com www.
ALSTOM	www.alstom.com
GAMESA	www.gamesacorp.com
ACCIONA	www.accionaenergia.com
VESTAS	www.vestas.com
SIEMENS	www.energy.siemens.com
SUZLON	www.suzlon.com

Fonte: [21].

### 6.2.2.1 FABRICANTES DE TORRES

As torres, por suas grandes dimensões (e massa), além do alto impacto no custo do aerogerador, eram preferencialmente adquiridas de fabricantes locais ou fabricadas localmente em unidades próprias das montadoras. A nova regra do BNDES passou a exigir, inicialmente, a fabricação das torres no País, com pelo menos 70% em peso das chapas de aço fabricadas no Brasil ou concreto armado de procedência nacional. Gradativamente esta exigência é acrescida de outras como o uso de elementos internos e percentual de forjados (flanges) de procedência nacional. A **tabela 12** lista os fabricantes nacionais de torres de aço.

**Tabela 12.** Fabricantes nacionais de torres de aço.

EMPRESA	LOCAL	SITE
Gestamp	Cabo de Santo Agostinho - PE	www.gestampren.com
Engebasa	Cubatão - SP	www.engebasa.com.br
Torrebras	Guafba - RS	www.windar-renovables.es
Intecnia	Camaçari - BA	www.intecnia.com.br
Brasilsat	Curitiba - PR	www.brasilsat.com.br
ICEC-SCS	Mirassol - SP	www.scsdobrasil.com.br
Alstom	Jacobina - BA	www.alstom.com
Tecnomaq	Aquiraz - CE	www.tecnomaq-ce.com.br
Maq. Piratininga	Jaboatão dos Guararapes - PE	www.mpn.com.br

Brametal	Linhares - ES	www.brametal.com.br
----------	---------------	---------------------

Fonte: [21].

A fabricação das torres de aço cônicas envolve basicamente operações de caldeiraria – cortadas chapas, dobramento e solda. As torres são produzidas em três ou quatro segmentos, conforme projeto da montadora, denominados seções ou tramos. Uma vez fabricados os tramos, estes são submetidos a processos de preparação superficial e acabamento tais como: jateamento abrasivo, metalização e pintura (externa e interna). Os fabricantes nacionais de torres de concreto são listados na **tabela 13**.

**Tabela 13.** Fabricantes nacionais de torres de concreto.

EMPRESA	LOCAL	SITE
Ernesto B Woebcke	Gravataí-RS	www.woebcke.com.br
Wobben	Parazinho-CE	www.wobben.com.br
CTZ EolicTower	Fortaleza-CE	Em construção
Inneo	Casa Nova-BA	www.inneotorres.com.br
Eolicabrás/Serveng	São Paulo-SP	www.gruposerveng.com.br
Cassol	São José-SC	www2.cassol.ind.br

Fonte: [21]

#### 6.2.2.2 FABRICANTES DE PÁS

As pás, como as torres, são componentes de grandes dimensões e de significativa representatividade no custo de um aerogerador (cerca de 20%) e, desta forma, também eram preferencialmente adquiridas de fabricantes locais. Como a nova metodologia do BNDES passou a exigir a fabricação de pás no Brasil, em unidade própria ou de terceiros, para fins de financiamento, esta preferência foi ainda mais reforçada. Os fabricantes de pás eólicas estão listados na **tabela 14**.

**Tabela 14.** Fabricantes nacionais de pás eólicas

EMPRESA	LOCAL	SITE
Tecsis	Camaçari-BA	<a href="http://www.tecsis.com.br">www.tecsis.com.br</a>
Wobben	Sorocaba-SP	<a href="http://www.wobben.com.br">www.wobben.com.br</a>
Aeris	Pecém-CE	<a href="http://www.aerisenergy.com.br">www.aerisenergy.com.br</a>
LM Wind Power	Supe-PE	<a href="http://www.lmwindpower.com">www.lmwindpower.com</a>

Fonte: [21].

### 6.2.2.3 FABRICANTES DE SUBCOMPONENTES E INSUMOS PARA TORRES

As torres, por suas especificidades técnicas demandadas pelas montadoras e pelo considerável investimento envolvido, são fabricadas somente sob encomenda. O fabricante de torres pode se responsabilizar pela compra dos materiais, subcomponentes e outros insumos para a fabricação das torres ou pode apenas executar o serviço de manufatura, assumindo a compra apenas dos consumíveis. Essa definição depende do modelo de contratação das montadoras.

Há atualmente no Brasil montadoras que fornecem todo o material e subcomponentes e outras que não participam das compras, adquirindo o item pronto. Neste último caso, o fabricante de torres necessita de significativo capital de giro para sua operação, tendo então algumas vezes um banco como parceiro. A **tabela 15** lista os fabricantes nacionais de subcomponentes de insumos para torres de aço.

**Tabela 15.** Fabricantes nacionais de subcomponentes e insumos para torres de aço.

ITEM	EMPRESA	LOCAL	SITE
Chapas de aço laminado	Usiminas	IPATINGA-MG	<a href="http://www.usiminasmecanica.com.br">www.usiminasmecanica.com.br</a>
Flanges	Brasil Iraeta	DIADEMA-SP	<a href="http://www.grupoiraeta.com">www.grupoiraeta.com</a>
Fixadores	Ciser	SUAPE-PE	<a href="http://www.ciser.com.br">www.ciser.com.br</a>
Portas	Alus	SOROCABA-SP	<a href="http://www.alusaluminium.com.br">www.alusaluminium.com.br</a>
Escotilhas	Atlanta	SOROCABA-SP	<a href="http://www.atlantaser.com.br">www.atlantaser.com.br</a>
Tintas	Renner Coatings	CURITIBA-PR	<a href="http://www.renner.com.br">www.renner.com.br</a>

Fonte [21].

### 6.2.2.4 FABRICANTES DE SUBCOMPONENTES E INSUMOS - PÁS E CUBOS

A pá é constituída basicamente de uma estrutura em material compósito, com núcleos centrais de espuma de PVC e madeira balsa. As pás produzidas no Brasil pela TECSIS, WOBEN e AERIS utilizam resina do tipo epóxi na constituição do compósito. A LM Wind Power, que está iniciando sua produção, utiliza resina poliéster. A fibra empregada no compósito geralmente é a fibra de vidro, mas alguns modelos utilizam também fibra de carbono. A fibra de vidro é utilizada na forma de tecido e há tipos que conferem diferentes propriedades mecânicas e de resistência ao compósito. A **tabela 16** lista os fabricantes nacionais de subcomponentes de insumos para pás;

**Tabela 16.** Fabricantes nacionais de elementos insumos para pás

Estrutura da pá	Fabricante	Localização	Site
Resina Epóxi	DOW	Guarujá-SP	<a href="http://www.dow.com">www.dow.com</a>
	Momentive	Itatiba-SP	<a href="http://www.momentive.com">www.momentive.com</a>
	Owens Corning	Rio Claro-SP	www.owenscorning.com
Tecido de fibra de vidro	CPIC Brasil	Capivari-SP	<a href="http://www.cpicfiber.com">www.cpicfiber.com</a>
	Saertex	Indaiatuba-SP	<a href="http://www.saertex.com">www.saertex.com</a>
Fixadores Porcas	Tecnofix	Sorocaba-SP	www.tecnofixparafusos.com.br
	Friedberg	Alemanha, Coreia, Brasil - Monte Mor-SP	www.august-friedberg.Com
	Metaltork	Diadema-SP	<a href="http://www.metaltork.com.br">www.metaltork.com.br</a>
Fixadores Adesivos	Sika	Osasco-SP	bra.sika.com
	Henkel	Diadema-SP	<a href="http://www.henkel.com.br">www.henkel.com.br</a>

Fonte: [21]

#### 6.2.2.5 FABRICANTES DE SUBCOMPONENTES DA NACELE

A montagem da nacele no Brasil também é uma exigência do BNDES para o financiamento de aerogeradores. Inicialmente as montadoras precisam apresentar um plano de negócios detalhado da unidade industrial e na sequência as obras e instalações devem estar em andamento, as contratações de pessoal devem ser efetivadas, bem como os programas de treinamento dos funcionários da produção. Os próximos marcos exigem, além da efetiva operação de montagem, a nacionalização dos elementos estruturais (fundidos e/ou caldeirados) e de um número mínimo de subcomponentes da nacele a partir de uma tabela indicada pelo BNDES. Este número é ampliado no último marco da metodologia.

Como consequência desse processo, empresas estrangeiras (geralmente fornecedores globais das montadoras) estão sendo atraídas para o País e fornecedores locais estão sendo desenvolvidos. A **tabela 17** apresenta listagem dos principais subcomponentes da nacele e pelo menos um fabricante nacional (atuais e potenciais), subdividida em elementos estruturais, carenagem da nacele, acessórios, eixo principal, sistema de Yaw e outros.



**Tabela 17.** Fabricantes nacionais de subcomponentes de nacele

Item	Fabricante	Localização	Site
Quadro principal	BR Metals	Matozinho-MG	-
Parafusos estruturais	Ciser	Joinville-SC	<a href="http://www.ciser.com.br">www.ciser.com.br</a>
Carenagem da Nacele	Ancel	Rio Claro-SP	<a href="http://www.ancel.com.br">www.ancel.com.br</a>
Acessórios	Fabricante	Localização	Site
Luzes de sinalização	Frata	São Paulo-SP	<a href="http://www.frata.com">www.frata.com</a>
Eixo Principal	BR Metals	Matozinhos-MG	-
Sistemas de Lubrificação	Eximport	São Paulo-SP	<a href="http://www.eximport.com.br">www.eximport.com.br</a>
Lubrificantes	Mobil	Rio de Janeiro-RJ	<a href="http://www.mobilindustrial.com">www.mobilindustrial.com</a>
Sistemas de acionamento YAW	Bonfiglioli	São Bernardo-SP	<a href="http://www.bonfiglioli.com">www.bonfiglioli.com</a>
Engrenagens e redutores planetários	TGM	Sertãozinho-SP	<a href="http://www.grupotgm.com.br">www.grupotgm.com.br</a>
Motorreduzores	WEG	Jaraguá do Sul-SP	<a href="http://www.weg.net">www.weg.net</a>
Painel de Controle YAW	ICSA	Belo Horizonte-MG	<a href="http://www.icsaautomation.com">www.icsaautomation.com</a>

Fonte: [21]

## 7 ESTUDO DE CASO

Essa parte do trabalho trata do objetivo específico, aponta as perspectivas para o Nordeste.

### 7.1 CASO SERRA DAS VACAS

Um dos propósitos desse trabalho é apresentar a estrutura dos parques eólicos do Complexo Eólico Serra das Vacas, que está localizado no município de Paratama, na região centro/sul do estado de Pernambuco, aproximadamente 254 km da capital Recife.

O trajeto até a área do complexo, a partir da cidade de Recife, se dá por via rodoviária. Através da rodovia federal BR-232, onde percorre-se 151 km até o município de São Caetano. A partir desse ponto convergindo a esquerda seguindo pela BR-423, percorre-se mais 98 km até a entrada do município de Paratama. Mantendo-se na mesma estrada, deve-se percorrer em linha reta mais 5 km, chegando a uma estrada existente de revestimento primário à direita, que leva ao acesso externo da entrada principal do complexo. Percorrendo mais 2.9 km nesta mesma estrada chega-se à CGE Serras das Vacas 2.

A área destinada à implantação do Complexo Eólico Serra das Vacas encontra-se referenciada pelas coordenadas UTM (*zona 24L e Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000*) E: 749.303,095 e N: 9.014.773,799. A **Figura 38** ilustra o mapa de localização do complexo. O layout geral do Complexo Eólico Serra das Vacas é ilustrado na **Figura 39**.

A Eólica Serra das Vacas (ESV) é um projeto de geração de energia eólica de iniciativa das empresas PEC Energia S.A. e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf). Seu objetivo é gerar energia elétrica através da força dos ventos pelo prazo mínimo de 20 anos.

A Eólica Serra das Vacas comercializou energia no leilão A-3 realizado pelo Governo Federal em novembro de 2013. Com 53 aerogeradores da marca GE, a empresa irá instalar 94,87 MW no município de Paratama, estado de Pernambuco.

O Complexo Eólico Serra das Vacas será composto por quatro Centrais Geradoras Eólicas (CGEs), denominadas da seguinte forma: CGE Serra das Vacas 1,

CGE Serra das Vacas 2, CGE Serra das Vacas 3 e CGE Serra das Vacas 4. As cidades centrais eólicas serão equipadas com 53 aerogeradores com potência individual de 1.79 MW com altura até o *hub* de 80 m e diâmetro do rotor de 100 m.

**Figura 38.** Mapa de localização do Complexo Eólico Serra das Vacas



Fonte: <http://www.eolicaserradasvacas.com.br/>

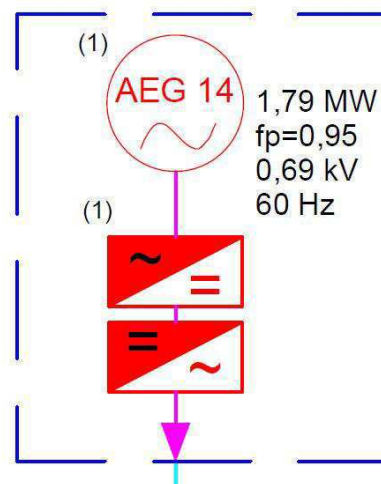
**Figura 39.** Layout geral do Complexo Eólico



Fonte: <http://www.eolicaserradasvacas.com.br/>

A **Figura 40** ilustra o diagrama do aerogerador 14 do parque eólico serra das vacas I. Todos os outros aerogeradores do complexo eólico, seguem o mesmo padrão.

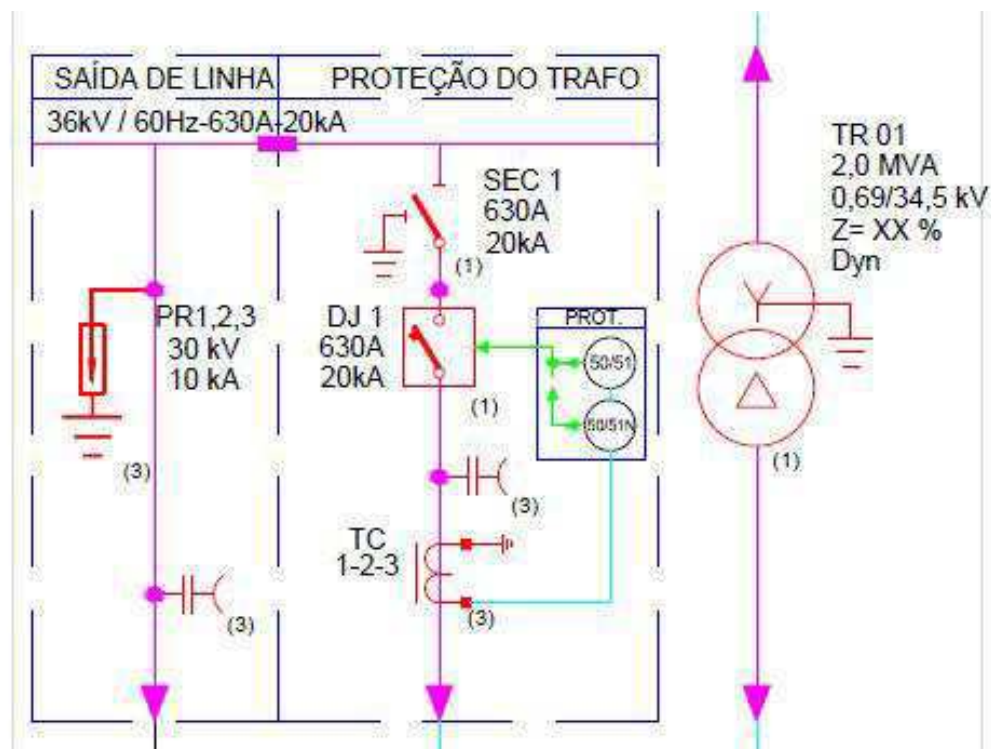
**Figura 40.**Diagrama contendo informações do aerogerador.



Fonte: Energy Eletricidade

Já na **Figura 41**, pode-se observar o diagrama de uma subestação unitária. Cada aerogerador do complexo eólico, possui uma subestação unitária próxima à torre.

**Figura 41.** Subestação unitária

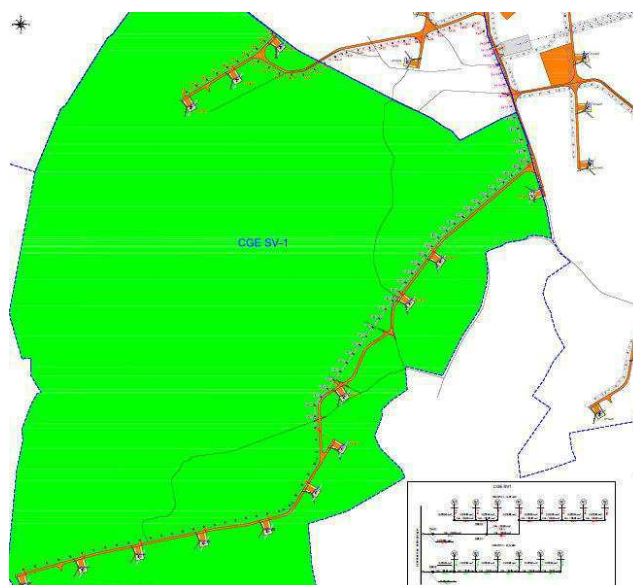


Fonte: Energy Eletricidade

A **Figura 42** ilustra a disposição dos aerogeradores no parque eólico Serra das Vacas 1.

O parque eólico Serra das Vacas I é composto por 14 aerogeradores divididos em dois circuitos, o circuito 1 com 14,32MW e o circuito 2 com 10,74MW. Os dois circuitos são unidos por um barramento de 34,5 kV.

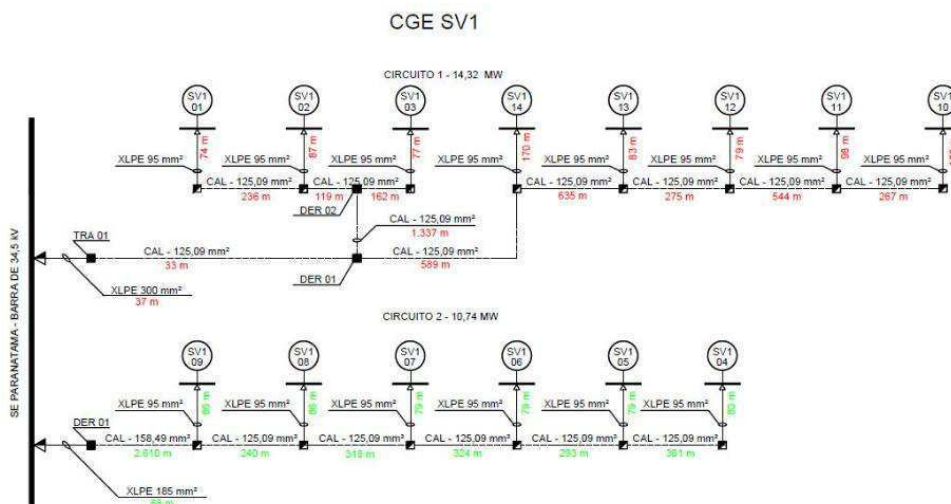
**Figura 42.** Disposição dos aerogeradores



Fonte: Energy Eletricidade

Na **Figura 43** é ilustrado o esquema dos dois circuitos, além de detalhes sobre o distanciamento entre os aerogeradores.

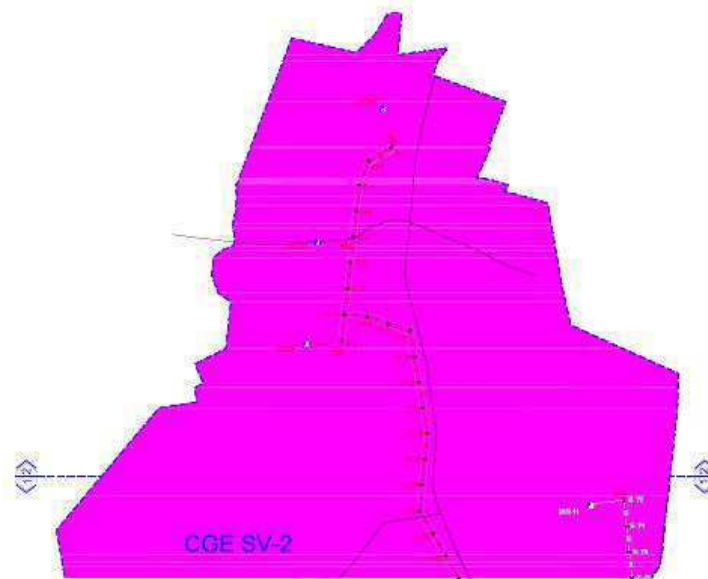
**Figura 43.** Diagrama dos circuitos



Fonte: Energy Eletricidade

A **Figura 44** ilustra a disposição dos aerogeradores no parque eólico Serra das Vacas 1.

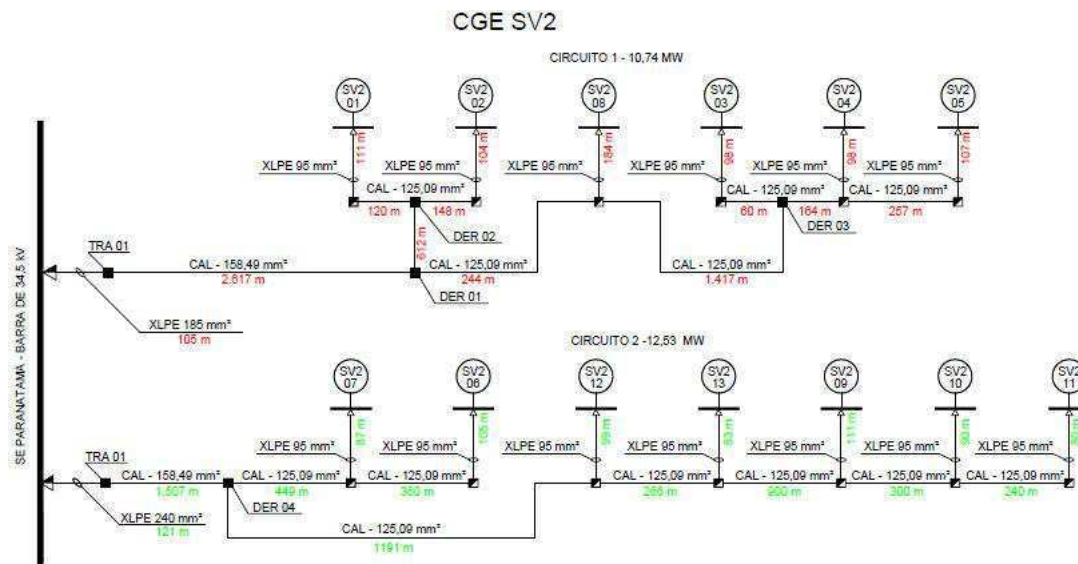
**Figura 44.** Disposição dos aerogeradores



Fonte: Energy Eletricidade.

O parque eólico Serra das Vacas 2 é composto por 13 aerogeradores divididos em dois circuitos, o circuito 1 com 10,74MW e o circuito 2 com 12,53MW. Os dois circuitos são unidos por um barramento de 34,5 kV. A **Figura 45** ilustra o esquema dos dois circuitos, além de detalhes sobre o distanciamento entre os aerogeradores.

**Figura 45.** Diagrama dos circuitos

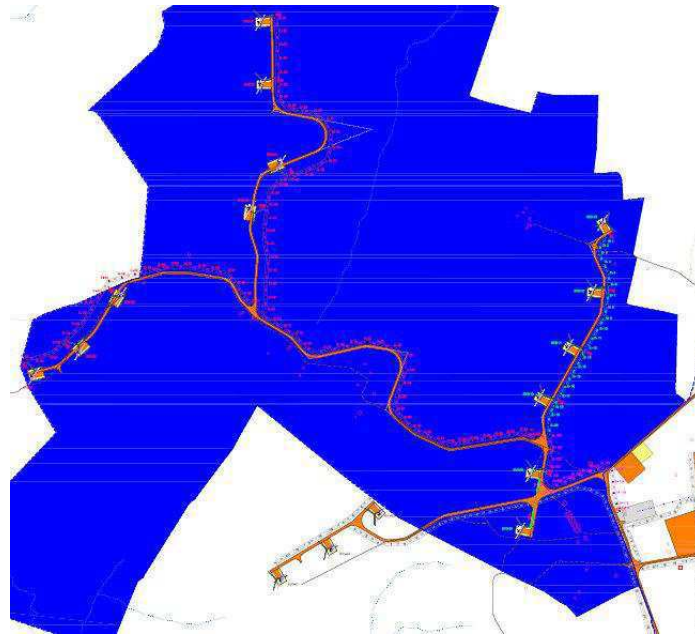


Fonte: Energy Eletricidade

A **Figura 46** ilustra a disposição dos aerogeradores no parque eólico Serra das Vacas 3.



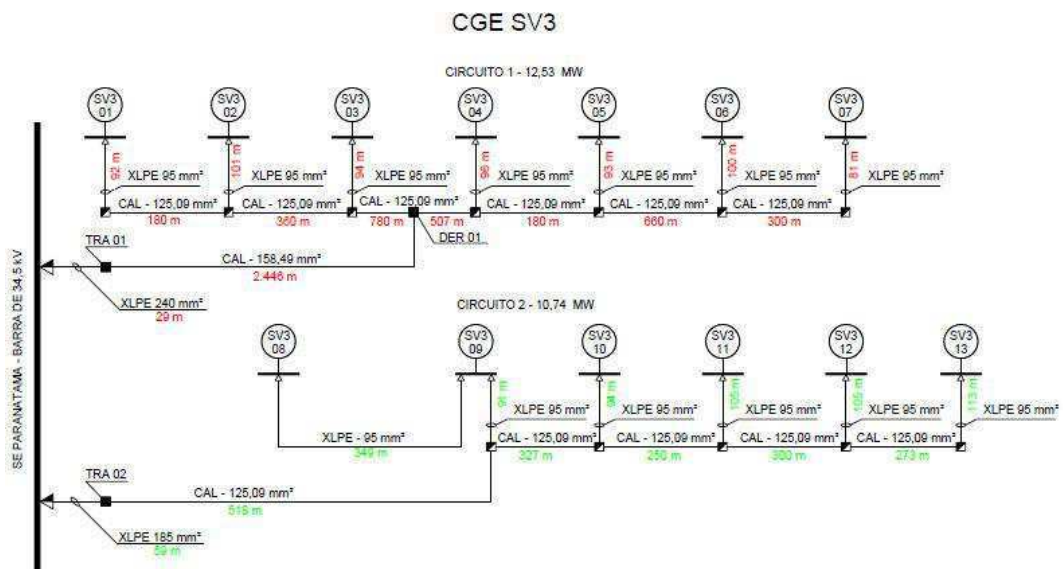
**Figura 46.** Disposição dos aerogeradores



Fonte: Energy Eletricidade

O parque eólico Serra das Vacas 3 é composto por 13 aerogeradores divididos em dois circuitos, o circuito 1 com 12,53MW e o circuito 2 com 10,74MW. Os dois circuitos são unidos por um barramento de 34.5 kV. A Figura 47 ilustra o esquema dos dois circuitos, além de detalhes sobre o distanciamento entre os aerogeradores.

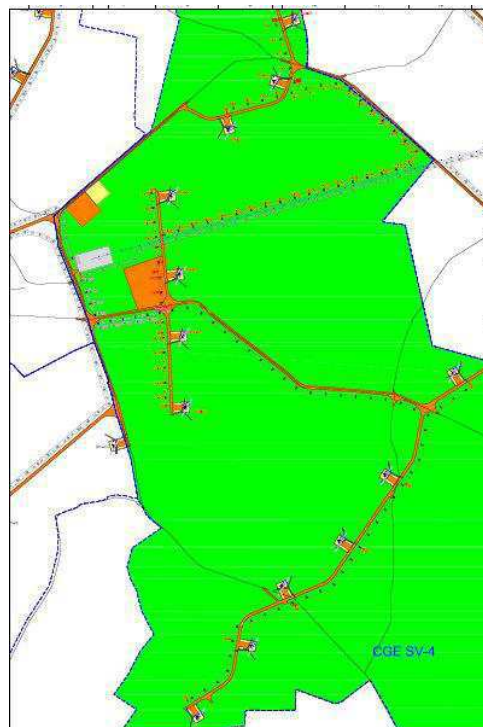
**Figura 47.** Diagrama dos circuitos



Fonte: Energy Eletricidade.

A Figura 48 ilustra a disposição dos aerogeradores no parque eólico Serra das Vacas 1.

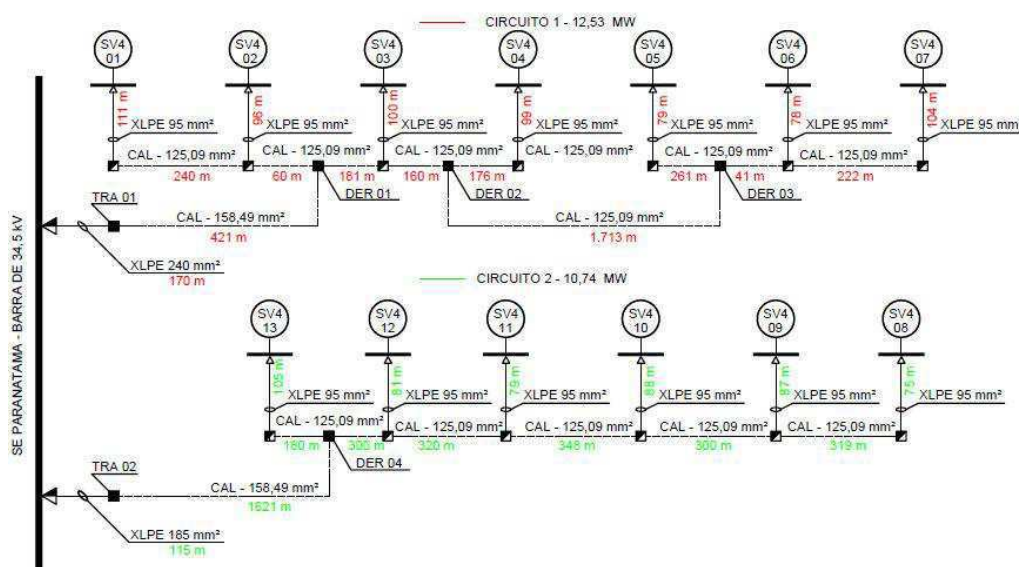
**Figura 48.** Disposição dos aerogeradores



Fonte: Energy Eletricidade

O parque eólico Serra das Vacas 4 é composto por 13 aerogeradores divididos em dois circuitos, o circuito 1 com 12,53MW e o circuito 2 com 10,74MW. Os dois circuitos são unidos por um barramento de 34,5 kV. A **Figura 49** ilustra o esquema dos dois circuitos, além de detalhes sobre o distanciamento entre os aerogeradores.

**Figura 49.** Diagrama dos circuitos  
CGE SV4



Fonte: Energy Eletricidade



Além dos dois circuitos pode-se perceber que o espaçamento das turbinas nem sempre está de acordo com a recomendação da literatura encontrada: a distância proposta entre duas turbinas é de cinco a nove diâmetros do rotor na direção predominante do vento e de três a cinco diâmetros do rotor na direção perpendicular à velocidade predominante do vento.

No dia 25 de fevereiro de 2015 foi colocada a primeira estrutura de fundação para fixação da torre, conforme ilustrado na **Figura 50**.

**Figura 50.** Preparação de fundação pra fixação da torre.



Fonte: <[www.facebook.com/trabalhadoresdeparqueseolicos](http://www.facebook.com/trabalhadoresdeparqueseolicos)>.

Pode-se ver as ferragens da base prontas para receber o concreto e com fica evidente toda a estrutura é fixada à rocha.

## 6 CONCLUSÃO

Foi verificado que todos os aerogeradores utilizados no Brasil são importados, e possuem especificação para velocidades de vento superiores em relação à geografia brasileira. Percebeu-se ainda que na equação da energia cinética dos ventos e da potência disponível qualquer variação mesmo sendo mínima, influencia bastante no resultado final da geração de energia eólica. Logo, o que pôde ser observado é que as turbinas geram em torno de um terço da sua potência nominal. O que se sugere é que existam pesquisas e incentivos para a criação e comércio de um tipo de turbina que funcione com potência nominal em ventos de 8 m/s que é a velocidade média de ventos no Brasil. Dessa maneira, haverá uma redução significativa na cadeia de produção de energia eólica.

Foi observado que o complexo eólico Serra das Vacas é um empreendimento que será muito importante para o estado de Pernambuco. A execução do projeto ainda está nos momentos iniciais, e como a previsão de conclusão no projeto é para o final de 2015, há uma grande possibilidade que o projeto não seja executado no tempo previsto, sendo necessários aditivos de tempo e custo.

Fica evidenciado que no seu projeto, foram observadas distâncias laterais entre aerogeradores que estão abaixo da mínima estipulada pela literatura, que é entre 3 a 5 vezes a distância do diâmetro do rotor. Não foi encontrada explicação para este tipo de distanciamento, no entanto, acredita-se que seja justificada pelo tipo de terreno, onde exista locais específicos que não permitam a implantação de uma torre eólica com segurança.

## BIBLIOGRAFIA

- [1]DUTRA, Ricardo. Energia Eólica – Princípios e Tecnologia. Disponível em:<[http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf)> Acesso em: 10 de novembro de 2014.
- [2]CASTRO, Rui. Energias Renováveis e Produção Descentralizada, Introdução à Energia Eólica. Universidade técnica de Lisboa Instituto superior técnico. DEEC, Sessão de energia, 2003.
- [3]ABNT. (2003). NBR 6028 - Informação e documentação - Resumo - Apresentação. (p. 2). Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [4]ABNT. (30 de 12 de 2005). NBR 14724 - Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação. *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 9). ABNT.
- [5]ROSA, Adriano/FILHO, Geraldo. Série Energias Renováveis - Eólica,2007
- [6]UCZAI, Pedro. Energias Renováveis Riqueza Sustentável ao Alcance da Sociedade,2012
- [7]Atlas eolico: Bahia/elaborado por Camargo-Schubert Engenheiros Associados; Salvador : SECTI : SEINFRA : CIMATEC/ SENAI, 2013.
- [8]ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, <http://www.aneel.gov.br>, visualizado em 25/01/2015.
- [9]ONS- Operador Nacional do Sistema. [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br) visualizado em 22/11/2014.
- [10]CRESESB - [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br) acessado em 12/01/2015
- [11]ABBEOLICA - [www.abeeolica.org.br](http://www.abeeolica.org.br) acessado em 3/02/2015
- [12]WOOBEN - [www.wobben.com.br](http://www.wobben.com.br) acessado em 22/01/2015
- [13]IMPISA - [www.impisa.com.br](http://www.impisa.com.br) acessado em 18/03/2015
- [14]PARQUE EOLICO SERRA DAS VACAS - <http://www.eolicaserradasvacas.com.br/>, ACESSO EM 15/02/2015
- [15]Burton, T., D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, “**Wind energy handbook**”, Ed. John Wiley&Sons - Ltd, New York, 2001.
- [16]Rosas, P., Estanqueiro, A., “**Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas**”, Volume 1, Recife –PE, 2003.
- [17]GAMESA - [www.gamesacorp.com](http://www.gamesacorp.com) acessado em 19/02/2015
- [18]ENERCON - [www.enercon.de](http://www.enercon.de) acessado em 18/02/2015

[19] C&F GREEN ENERGY - [www.cfgreenenergy.com](http://www.cfgreenenergy.com) acessado em 18/02/2015

[20]Diário dos Ventos - <http://diariosdosventos.com.br/> acessado em 15/02/2015

[21] ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil, 2014