



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RODRIGO NICODEMOS COELHO

ESTUDO DOS PRINCIPAIS MODELOS DE AEROGERADORES

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2014

RODRIGO NICODEMOS COELHO

ESTUDO DOS PRINCIPAIS MODELOS DE AEROGERADORES

*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

Orientador:
Professor Leimar de Oliveira

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2014

RODRIGO NICODEMOS COELHO

ESTUDO DOS PRINCIPAIS MODELOS DE AEROGERADORES

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

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Teresa Cristina, pelo apoio incondicional, pelo esforço feito para me manter em Campina Grande, pelas boas maneiras, boa educação, pelas palavras de conforto e carinho sempre que precisei. Por ser a uma das pessoas que sempre acreditou em mim e me deu forças e motivos para continuar quando eu quis desistir.

A minha avó Marly por também nunca ter duvidado de mim, pelas lições que aprendi com a sua imensa sabedoria, pelos conselhos e por ser um exemplo de pessoa com caráter e força ímpares.

Ao meu avô Nertan Nicodemos, que, por ser o maior e melhor engenheiro que já conheci, me motivou a querer ser engenheiro também. Pelas sábias palavras e conhecimentos vastos que são passados para mim em todos os nossos encontros.

Aos familiares em geral e a Gorete, pois graças ao apoio e carinho de cada um, consegui chegar aqui.

Aos amigos do curso, pois sem os grupos de estudo, amizade de cada um e momentos de descontração não teria tido êxito em engenharia elétrica.

Agradeço ao orientador, Leimar de Oliveira, que foi mais que um orientador, um amigo. Pela paciência, tempo dedicado, conselhos, bom humor, conhecimento transmitido e por tornar este trabalho traumático numa atividade prazerosa.

Agradeço à Tereza, pelo apoio importante no fim do curso, por acreditar no meu potencial e pela ajuda neste trabalho.

Agradeço também aos membros coordenação ímpar de Elétrica, que sempre estão dispostos a nos ajudar em qualquer hipótese.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que eu obtivesse êxito ao longo da minha vida e do curso.

"Nunca se esqueça de quem você é, porque é certo que o mundo não se lembrará. Faça disso sua força. Assim, não poderá ser nunca a sua fraqueza. Arme-se com esta lembrança, e ela nunca poderá ser usada para lhe magoar."

Tyrion Lannister

RESUMO

O presente trabalho analisa a energia eólica e aponta na perspectiva de um melhor aproveitamento eólico como fonte renovável para geração de energia elétrica em complemento à geração energética atual e a substituição da utilização de combustíveis fósseis, que muito contribuem ao agravamento do aquecimento global. No início foi feita uma breve revisão bibliográfica onde se aborda os diversos aspectos dos ventos, aborda-se ainda aspectos tecnológicos de modelos de turbinas, potência gerada, controle de velocidade e algumas aplicações. Em seguida foi feita uma análise dos componentes fundamentais de um aerogerador com caixa multiplicadora de velocidades. Finalmente são mostradas as configurações típicas dos sistemas de conversão de energia eólica.

Palavras-chave: Energia Eólica, Aerogerador, Componentes, Sistema de Conversão.

ABSTRACT

The following research analyzes the wind energy and points on perspective of a better harnessing wind as renewable source for electric power generation in addition to current energy generation and the replacing use of the fossil fuels, which greatly contribute in the worsening of global warming. At first was a brief literature review that approaches the various aspects of winds, approaches technological aspects of turbine models, power generated, speed control and some applications. Then was made an analysis of a wind turbine with multiplier gearbox's essential components. Lastly are shown the typical configurations of wind energy conversion systems

Keywords: Wind Energy, Turbine, Components, Conversion System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.	20
Figura 2 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno (Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998).....	22
Figura 3 - Turbina eólica de eixo vertical tipo darrieus	23
Figura 4 - turbina eólica de eixo vertical tipo savonius.....	24
Figura 5 - Turbina eólica de eixo horizontal	25
Figura 6 - Fluxo aderente ao perfil	26
Figura 7 - Forma típica de uma curva de potência de um aerogerador com controle de passo	27
Figura 8 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil	27
Figura 9 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle tipo estol.....	29
Figura 10 - CONSIDERAÇÃO SOBRE O TAMANHO DOS AEROGERADORES E SUAS APLICAÇÕES	30
Figura 11 - Configuração sistema isolado	30
Figura 12 - configuração de um sistema híbrido	31
Figura 13 - Fazenda eólica com o sistema interligado à rede.....	32
Figura 14 - Sistema off-shore	33
Figura 15 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante (DEWI)	34
Figura 16 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável que usa uma conversora de frequência para o controle da frequência da geração elétrica	35
Figura 17 - Fluxo de ar através de uma área transversal	37
Figura 18 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.....	38
Figura 19 - Distribuição de c_p em função de v_3/v_1	39
Figura 20 – Capacidade eólica instalada acumulada e a instalada anualmente entre 1996 e 2013	41
Figura 21 - Capacidade eólica acumulada mundial (em porcentagem).....	42
Figura 22 - Cabine com controle de velocidades	47
Figura 23 - Vista do interior da nacelle de um aerogerador utilizando um gerador multipolos (Fonte: Enercon).....	50
Figura 24 - Processo de fabricação de uma pá	51
Figura 25 - Processo de transporte de pas	52
Figura 26 - Construção de uma pá com revestimento completo de madeira/epóxi.....	53
Figura 27 - – construção de uma pá com meio revestimento de madeira/epóxi	54
Figura 28 - – CONSTRUÇÃO DE UMA PÁ QUE USA FIBRA DE VIDRO COMO REVESTIMENTO E UM SUPORTE INTERNO	54
Figura 29 - Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador (Fonte: Montezano)	56
Figura 30 - Característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações numericas	57
Figura 31 – (a) conector tipo cenoura; (b) Parafuso em T; (C) Pino-orifício rosqueado; (D) flange trompette	59
Figura 32 – arranjo típico de rolamento de passo.....	60

Figura 33 – (A) rolamentos de linha única com rolos alternados; (B) rolamentos de esferas em linha única; (C) rolamentos de esfera em duas linhas; (D) rolamentos de rolo em três linhas.	61
Figura 34 – Rotor de um aerogerador.....	62
Figura 35 - – (a) cubo tri-cilindrico; (b) cubo esférico.....	63
Figura 36 - cUBO DE UM ROTOR.....	64
Figura 37 - Gerador conectado a uma caixa multiplicadora de velocidades.....	66
Figura 38 - Curva de duração de carga para máquinas de 500 kw com regulação de passo e de duas pás e 500 kw velocidade constante com regulação por stall.....	67
Figura 39 - – Torque no eixo de baixa velocidade durante uma frenagem normal.....	69
Figura 40 - – circuito equivalente de uma máquina de indução com capacitores para correção do fator de potência.	74
Figura 41 – variação da potência ativa com deslizamento de uma máquina de indução de 1 MW.....	75
Figura 42 - VARIAÇÃO DA POTENCIA REATIVA COM DESLIZAMENTO PARA MÁQUINA DE INDUÇÃO DE 1 MW.....	75
Figura 43 - diagrama circular de uma máquina de indução de 1 Mw.....	76
Figura 44 - Geração com ampla gama de velocidade variável.....	77
Figura 45 - geração com pequena gama de velocidade variável.....	78
Figura 46 - disco de freio e pinça para o eixo de alta velocidade.....	79
Figura 47 - Arranjo típico do mecanismo de orientação direcional.....	83
Figura 48 – MECANISMO DE ORIENTAÇÃO DIRECIONAL.....	84
Figura 49 - Torre tubular de um aerogerador.....	87
Figura 50 - Torre entrelaçada de um aerogerador.....	88
Figura 51 - PROJETO DA BASE DE UMA TORRE.....	89
Figura 52 - – (A) LAJE PLANA; (B) LAJE SOB PEDESTAL; (C) TORRE EMBUTIDA EM LAJE CÔNICA; (D) LAJE SEGURA POR ANCORAS DE PEDRA.	91
Figura 53 – (A) Grupo de estacas e tampa; (B) mono estaca sólido; (C) mono estaca oco.	92
Figura 54– fundação de estacas para torres de metal entrelaçadas.....	93
Figura 55 – configuração do sistema de velocidade constante.....	94
Figura 56 – Configuração do sistema de velocidade variável limitada.....	96
Figura 57 – Configuração do sistema de velocidade variável com conversor parcial ...	97
Figura 58 - Configuração do sistema de velocidade variável com conversor parcial	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dez maiores fabricantes de aerogeradores (2009 – 2011).....	43
Tabela 2 - principais características da distribuição da energia eólica por regiões	44
Tabela 3 - regime de funcionamento da pá de acordo com o ângulo de incidência.....	58
Tabela 4 – CONFIGURAÇÕES TÍPICAS DOS SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA	94

LISTA DE ABREVIATURAS

- TEEV - turbina eólica de eixo vertical
- TEEH - turbina eólica de eixo horizontal
- CO₂ - dióxido de carbono
- A – Ampère
- V – Volt
- kV – quilovolt (10³ V)
- MVA – Megavoltampère (MVA)
- W – Watt
- kW – quilowatt (W)
- MW – Megawatt (W)
- GW – Gigawatt (W)
- TW – Terawatt (W)
- RPM – Rotações por minuto
- m² – metro quadrado
- W/m² – Watt por metro quadrado
- m – metro
- m/s – metro por segundo
- MWh - Megawatt (W) por hora
- TWh - Terawatt (W) por hora
- TWh/ano – Terawatt (W) por hora por ano
- GWh – Gigawatt (W) por hora
- mm – milímetro
- °C– Grau Celsius
- m³ – metro cúbico por segundo
- ONSHORE – Tradução: Em terra firme, na costa
- OFFSHORE – Tradução: Fora da terra firme, da costa (no mar, por exemplo)
- WWEA – World Wind Energy Association (Tradução: Associação Mundial de Energia Eólica)
- CC - Corrente contínua
- CA - Corrente alternada

V_v - Velocidade do vento

ρ - Massa específica do ar (aproximadamente 1,2 Kg/)

C_p - Coeficiente de potência

β - Ângulo de passo (*Pitch angle*)

λ - Velocidade específica (*Tip speed ratio*)

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CHESF - Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

PIE - Produção Independente de Energia

NE - Nordeste

Pitch - Controle de passo

Stall - Controle estol

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas.....	xii
Sumário.....	xiv
1 Introdução	17
1.1 Objetivos.....	18
1.2 Estrutura do Trabalho	18
2 Revisão Bibliográfica	19
2.1 O Recurso Eólico	19
2.2 Mecanismo de Geração dos Ventos.....	19
2.3 Fatores que Influenciam o Regime dos Ventos	21
2.4 Modelos das Turbinas	22
2.4.1 Turbina Eólica de Eixo Vertical.....	23
2.4.2 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal	24
2.5 Controles de Velocidades	25
2.5.1 Controle de Passo	25
2.5.2 Controle Estol.....	27
2.6 Aplicações.....	29
2.7 Sistema de Velocidades	33
2.7.1 Sistema de Velocidade Fixa	33
2.7.2 Sistema de Velocidade Variável	34
2.8 Energia e Potência Extraída do Vento	36
2.9 Energia Eólica no Mundo	40
2.10 Energia Eólica no Brasil	43
2.11 Impactos Ambientais	45
3 Estudo Detalhado dos Componentes de um Aerogerador com Caixa multiplicadora de Velocidades.....	47
3.1 Cabine	47
3.2 Pás.....	51
3.2.1 Introdução.....	51

3.2.2	Projeto Aerodinâmico	52
3.2.3	Forma da estrutura da pá	53
3.2.4	Propriedades e Materiais das pás	54
3.2.5	Forças Atuantes nas Pás	55
3.2.6	Fixação das Raízes das Pás	58
3.3	Rolamento de Passo	60
3.4	Cubo do Rotor.....	61
3.5	Caixa multiplicadora de Velocidades	65
3.5.1	Introdução.....	65
3.5.2	Cargas Variáveis Durante a Operação	66
3.5.3	Sistema de Transmissão Dinâmico	67
3.5.4	Cargas de Frenagem	68
3.5.5	Arranjo das engrenagens	69
3.5.6	Ruídos da Caixa de Velocidades	70
3.5.7	Caixa de Velocidades Integradas	71
3.5.8	Lubrificação e refrigeração	72
3.5.9	Eficiência.....	73
3.6	Gerador	73
3.6.1	Gerador de indução	73
3.6.2	Geradores de Velocidade Variável.....	76
3.7	Freios Mecânicos	78
3.7.1	Função do Freio.....	78
3.7.2	Fatores que Governam o Projeto dos Freios	79
3.7.3	Projeto do Freio para o Eixo de Alta Velocidade.....	80
3.7.4	Projeto do Freio para o Eixo de Baixa Velocidade	81
3.8	Base de Assentamento da Cabine	81
3.9	Mecanismo de Orientação Direcional.....	82
3.10	Torre.....	86
3.10.1	Introdução.....	86
3.10.2	Torre Tubular em Aço	86
3.10.3	Torres Entrelaçadas de Aço	88
3.11	Base da Torre	89
3.11.1	Introdução.....	89
3.11.2	Laje da Base.....	89
3.11.3	Fundação de Múltiplas Estacas	91
3.11.4	Fundação Mono Estaca de Concreto	91
3.11.5	Fundação para Torres Metálicas Entrelaçadas	92

4	Configurações Típicas dos Sistemas de Conversão de Energia Eólica	93
4.1	Sistema de Velocidade Constante – Tipo A	94
4.2	Sistema de Velocidade Variável Limitada – Tipo B	96
4.3	Sistema de Velocidade Variável com Conversor Parcial – Tipo C	97
4.4	Sistema de Velocidade Variável com Conversor Integral – Tipo D.....	98
5	Conclusão.....	100
6	Bibliografia.....	102

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é proveniente do deslocamento das massas de ar, comumente chamada de ventos. Sabe-se, pela forma como é gerada, que as massas de ar podem ser consideradas uma fonte renovável de energia. Energia esta que já é utilizada há séculos para diversas atividades como moagem de cereais, embarcações à vela, bombeamento de água para irrigação e drenagem dos terrenos. Como pode se observar, o vento era transformado em energia mecânica para substituir a força humana. Algum tempo depois, no final do século XIX, começaram a converter a energia dos ventos em energia elétrica.

Tudo começou na instalação da primeira turbina eólica, nos Estados Unidos em 1887-1888, a qual possuía um rotor de 17m de diâmetro com 144 pás de madeira. Apesar de a primeira turbina ter sido instalada nos Estados Unidos, o primeiro grande passo para as turbinas de grande dimensões foi dado na Rússia, em 1931, com a ligação à rede elétrica do gerador de 100 kW. Com a chegada da Segunda Guerra Mundial e a consequente crise economia dos combustíveis fósseis, foi investido bastante capital no estudo da energia eólica, assim, por volta de 1950, a tecnologia moderna das turbinas eólicas foi lançada na Alemanha.

Já no Brasil, a primeira turbina eólica foi instalada em meados de 1992, em Fernando de Noronha, Pernambuco. Turbina esta que possuía 75 kW de potência, gerador assíncrono, torre com 23 metros de altura e rotor com 17 metros de diâmetro.

Atualmente a energia eólica é tida como uma das fontes mais promissoras, na geração de energia elétrica, e que mais vêm recebendo estudos e investimentos na área, visto que o vento é uma fonte de energia inesgotável e que produz uma energia limpa, já que os danos causados ao meio ambiente são pequenos em relação aos outros métodos de geração de energia elétrica. Tanto que, em 2013, foi registrada uma potencia eólica instalada mundialmente de 318.317 MW. O que significou um crescimento de 12.5% em relação a 2012. Mesmo com o crescimento em relação ao ano de 2012, 2013 foi o ano que apresentou o menor crescimento desde 2009.

1.1 OBJETIVOS

Aerogeradores representam o elemento responsável pela conversão de energia eólica em energia elétrica. Seu princípio de funcionamento é a conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica, no giro do rotor, e esta é convertida em energia elétrica através do gerador elétrico, localizado na cabina.

Neste trabalho serão abordados os principais modelos de aerogeradores, fazendo uma análise detalhada de seu funcionamento, principais características, vantagens e desvantagens em relação a outros modelos e, também, fabricantes.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica sobre a energia eólica abordando assuntos como recursos eólicos, mecanismos geradores dos ventos, fatores que influenciam os regimes dos vetos, modelos de aerogeradores, controle de passo, aplicações, sistemas de velocidade, energia e potência extraída dos ventos e impactos ambientais.

No capítulo 3 será feita uma análise de cada componente de uma turbina eólica de eixo vertical com caixa multiplicadora de velocidades, baseado no Wind Energy Handbook, considerado, na atualidade a principal referência no estudo de energia eólica em geral. Serão abordados componentes como cabine, pás, torre, base, rotor e rolamentos de passo.

No capítulo 4 será feita uma análise comparativa entre turbinas eólicas com velocidade constante e de velocidade variável, abordando os principais tópicos referentes a cada um. Mostrando assim as vantagens e desvantagens de um em relação a outro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No decorrer deste capítulo, tem-se uma revisão simplificada sobre alguns tópicos relativos à energia eólica.

2.1 O RECURSO EÓLICO

A energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra são convertidos em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes à potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos, entre os quais destacam-se a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo.

2.2 MECANISMO DE GERAÇÃO DOS VENTOS

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O

deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. A figura 5 apresenta esse mecanismo.

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes, e podem ser 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 frios que sopram dos polos para as zonas temperadas.

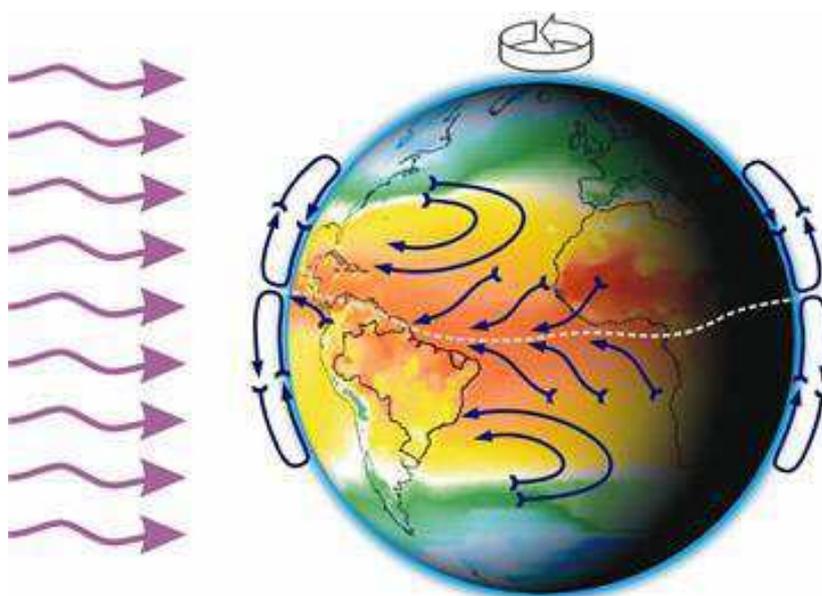


FIGURA 1 - FORMAÇÃO DOS VENTOS DEVIDO AO DESLOCAMENTO DAS MASSAS DE AR.

(FONTE: ATLAS EÓLICO DO BRASIL, 1998)

Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas.

As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol, inerentes à cada tipo de superfície (tais como mares e continentes), surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. No período diurno, devido à maior capacidade da terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar. Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

Sobreposto ao sistema de geração dos ventos descrito acima, encontram-se os ventos locais, que são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados. A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. No período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida, e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O REGIME DOS VENTOS

O comportamento estatístico do vento ao longo do dia é um fator que é influenciado pela variação de velocidade do vento ao longo do tempo. As características topográficas de uma região também influenciam o comportamento dos ventos uma vez que, em uma determinada área, podem ocorrer diferenças de velocidade, ocasionando a redução ou aceleração na velocidade do vento. Além das variações topográficas e de rugosidade do solo, a velocidade também varia seu comportamento com a altura.

Tendo em vista que a velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias (algumas centenas de metros), os procedimentos para avaliar o local, no qual se deseja instalar aerogeradores, devem levar em consideração todos os

parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento. Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos destacam-se:

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

As informações necessárias para o levantamento das condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos e de uma visita ao local de interesse para avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos. O uso de imagens aéreas e dados de satélite também contribuem para uma análise mais acurada.

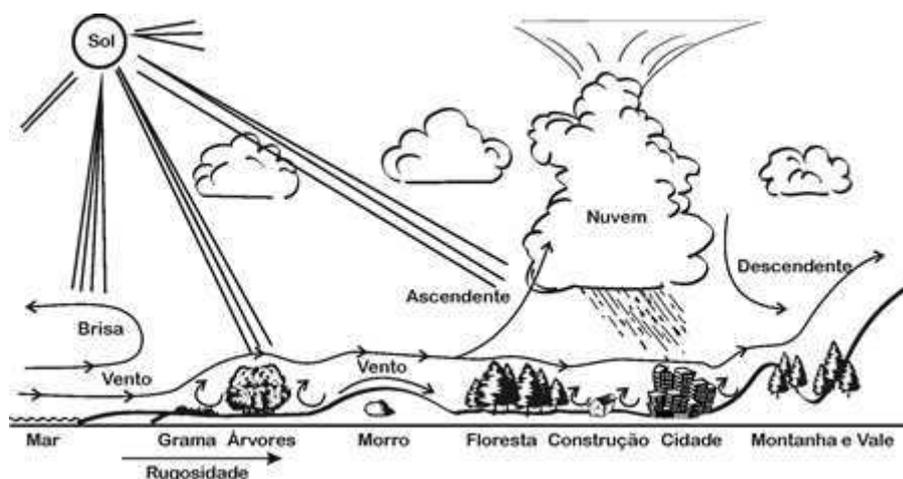


FIGURA 2 - COMPORTAMENTO DO VENTO SOB A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO TERRENO

(FONTE: ATLAS EÓLICO DO BRASIL, 1998)

2.4 MODELOS DAS TURBINAS

Existem dois principais modelos de turbinas eólicas, são eles: turbina eólica de eixo vertical (TEEV) e turbina eólica de eixo horizontal (TEEH).

2.4.1 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

Como seu nome já sugere, turbinas eólicas de eixo vertical possuem seu eixo montado na vertical, ou seja, perpendicular a terra. São menos usadas que as de eixo horizontal. Ela possui as vantagens de ser simples na sua concepção, possui insensibilidade à direção do vento, dispensando assim, o mecanismo de orientação direcional e a possibilidade da instalação e manutenção de todo equipamento de conversão de energia ser junto ao solo. Em contrapartida, possui as desvantagens de precisar de espigas de suporte (visto que seu eixo é vertical), velocidades dos ventos muito baixas junto à base, necessidade de meios exteriores para o arranque e esforços dinâmicos acrescido, devido ao comportamento inerente periódico.

As TEEVs podem ser utilizadas em áreas rurais para o bombeamento de água em pequenas demandas. Seus dois principais modelos são os Darrieus e Savonius, como mostram as figuras 3 e 4.



FIGURA 3 - TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL TIPO DARRIEUS

(FONTE: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Darrieus-windmill.jpg>)



FIGURA 4 - TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL TIPO SAVONIUS

(FONTE: <http://tecnoblogsanmartin.files.wordpress.com/2012/03/rotor-savonius.jpg>)

2.4.2 TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

Turbina mais comum no mercado e nos parques eólicos, possui o eixo paralelo á terra. Diferentemente da TEEV, esta turbina precisa estar alinhada com o vento a todo o momento para captar mais energia possível disponível pelo vento. Para isso, ela usa sistemas sensores para qual melhor alinhamento com o vento e para o alinhamento, usa motor e caixa de engrenagens que faz com que o aerogerador gire para a direita ou esquerda. A TEEH necessita da torre, que já foi apresentada anteriormente, para a elevação da turbina a uma altura onde a velocidade do vento é maior. A figura abaixo ilustra uma TEEH.



FIGURA 5 - TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

(FONTE: <http://www.dforcesolar.com/wp-content/uploads/2011/01/turbina-de-viento-eje-horizontal.jpg>)

2.5 CONTROLES DE VELOCIDADES

2.5.1 CONTROLE DE PASSO

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal; em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que o aerogerador produza apenas a potência nominal.

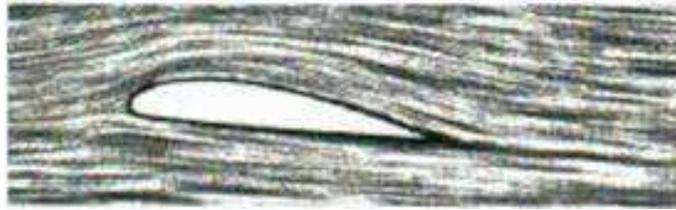


FIGURA 6 - FLUXO ADERENTE AO PERFIL

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície (Figura 6), produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto. Aerogeradores com controle de passo são mais sofisticadas do que as de passo fixo, controladas por estol, porque necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, elas possuem certas vantagens:

- Permitem controle de potência ativo sob todas as condições de vento, também sob potências parciais;
- Alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas);
- Maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá);
- Partida simples do rotor pela mudança do passo;
- Fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor;
- Cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal;
- Posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em ventos extremos;
- Massas das pás do rotor menores levam a massas menores dos aerogeradores.

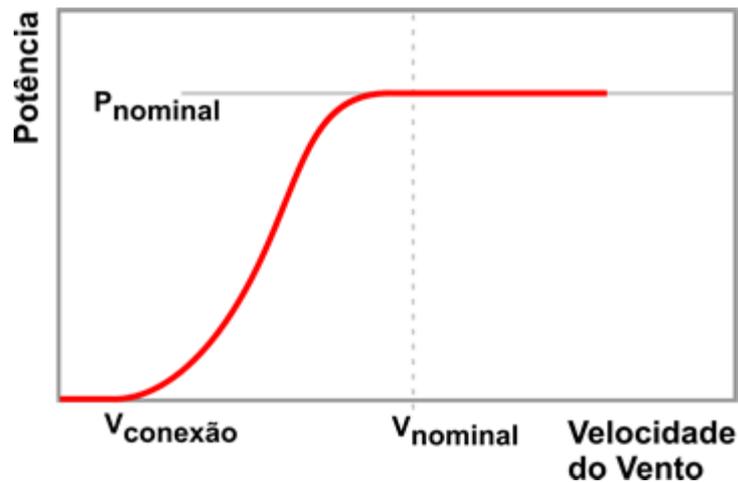


FIGURA 7 - FORMA TÍPICA DE UMA CURVA DE POTÊNCIA DE UM AEROGERADOR COM CONTROLE DE PASSO

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

2.5.2 CONTROLE ESTOL

O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá (estol) (Figura 8), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito.



FIGURA 8 - FLUXO SEPARADO (ESTOL) EM VOLTA DO PERFIL

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

Sob todas as condições de ventos superiores à velocidade nominal o fluxo em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos, parcialmente descolado da superfície (Figura 8), produzindo, portanto sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas. Aerogeradores com controle estol são mais simples do que as de controle de passo porque elas não necessitam de um sistema de mudança de passo. Em comparação com os aerogeradores com controle de passo, eles possuem, em princípio, as seguintes vantagens:

- Inexistência de sistema de controle de passo;
- Estrutura de cubo do rotor simples;
- Menor manutenção devido a um número menor de peças móveis;
- Auto-confiabilidade do controle de potência.

Em termos mundiais, o conceito de controle através de estol domina. A maioria dos fabricantes utiliza esta possibilidade simples de controle de potência, que sempre necessita uma velocidade constante do rotor, geralmente dada pelo gerador de indução diretamente acoplado à rede.

Apenas nos dois últimos anos uma mistura de controle por estol e de passo apareceu, o conhecido “estol ativo”. Neste caso, 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 em sistema de passo normais. As vantagens deste sistema são:

- São necessárias pequeníssimas mudanças no ângulo do passo;
- Possibilidade de controle da potência sob condições de potência parcial (ventos baixos);
- A posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em situação de ventos extremos.

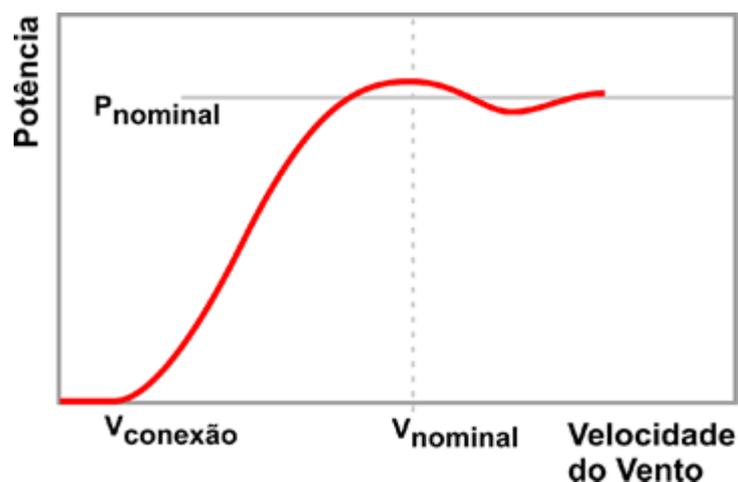


FIGURA 9 - CURVA DE POTÊNCIA TÍPICA DE UM AEROGERADOR COM CONTROLE TIPO ESTOL.

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

2.6 APLICAÇÕES

O sistema de energia eólica pode ser utilizado de quatro formas distintas: sistema isolado, sistema híbrido, sistema interligados a rede e *off-shore*. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, e às vezes necessitam de uma unidade para armazenar energia e precisam de uma unidade de controle de potência. A geração de energia elétrica pode ser de pequeno, médio e grande porte, como pode ser observado na figura abaixo.



FIGURA 10 - CONSIDERAÇÃO SOBRE O TAMANHO DOS AEROGERADORES E SUAS APLICAÇÕES

Sistema isolado: Os sistemas isolados normalmente utilizam o armazenamento de energia, isso se dá através de baterias. Usa-se o armazenamento para utilizar a energia produzida em aparelhos elétricos futuramente. Porém, pode-se usar este sistema para o uso imediato como, por exemplo, uso na irrigação. Em geral, usa-se o sistema isolado em sistemas de pequeno porte.

Para o uso de uma bateria, é necessário um controlador de carga e descarga. Este equipamento evita danos à bateria por descarga profunda ou sobrecarga. Também necessita o uso de um inversor para poder utilizar esta energia para alimentar circuitos com corrente alternada. A figura abaixo ilustra um sistema isolado.

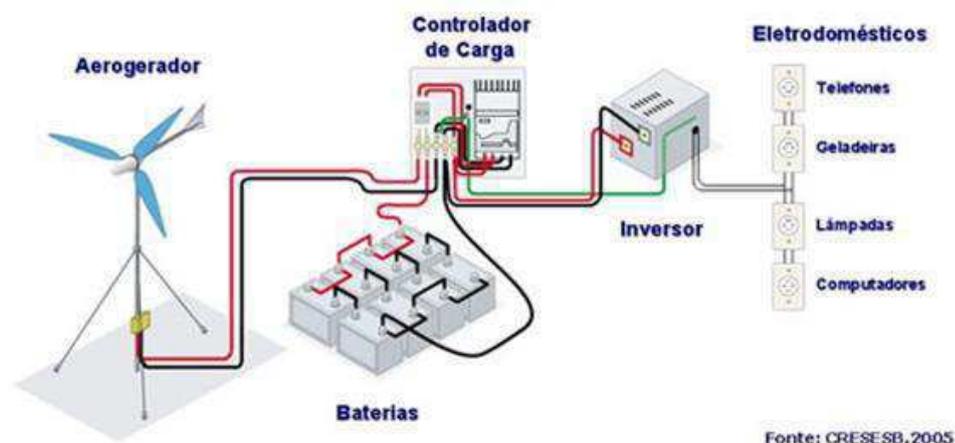


FIGURA 11 - CONFIGURAÇÃO SISTEMA ISOLADO

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

Sistema híbrido: Sistemas híbridos são aqueles que usam mais de um tipo de fonte, em conjunto, para a geração de energia elétrica. Por usar mais de uma forma de geração de energia, o sistema se torna mais complexo e necessita de um controle para aperfeiçoar a entrega da energia para o usuário. Em geral, usa-se o sistema híbrido em sistemas de pequeno e médio porte. Por seus consumidores necessitarem de corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Pode-se observar um esquema de um sistema híbrido na figura abaixo:



FIGURA 12 - CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

Sistemas interligados à rede: Sistemas que possuem um grande número de aerogeradores. Por serem interligados à rede, fornecendo assim toda energia produzida à rede elétrica, não necessitam armazenar energia e com isso, não necessitam de baterias. Este modelo de sistema é usado para abastecer sistemas de grande porte. A figura abaixo ilustra uma fazenda eólica com o sistema conectado à rede.



FIGURA 13 - FAZENDA EÓLICA COM O SISTEMA INTERLIGADO À REDE

(FONTE: <http://meioambiente.culturamix.com/blog/wp-content/uploads/2013/02/Energia-E%C3%B3lica.jpg>)

Sistema *off-shore*: É o sistema instalado nos mares. Por este motivo, são sistemas que apresentam maior custo para o transporte, instalação e manutenção. Mesmo com o elevado custo, este sistema vem crescendo a cada ano, principalmente, por causa do esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra.

A indústria eólica vem investindo no estudo das adaptações de turbinas eólicas para o mar. E, mesmo com o investimento em estudo, esse sistema necessita de estratégias quanto ao tipo de transporte das máquinas, sua instalação e operação. A figura abaixo ilustra este modelo de sistema:



FIGURA 14 - SISTEMA OFF-SHORE

(FONTE: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Middelgrunden_wind_farm_2009-07-01_edit_filtered.jpg)

2.7 SISTEMA DE VELOCIDADES

As turbinas eólicas funcionam em dois tipos de sistemas de velocidades, a velocidade fixa e a velocidade variável. Ambos serão descritos abaixo.

2.7.1 SISTEMA DE VELOCIDADE FIXA

Nos aerogeradores com velocidade fixa, o gerador é diretamente conectado à rede elétrica. A frequência da rede determina a rotação do gerador e, portanto, a do aerogerador. A baixa rotação do aerogerador n_t é transmitida ao gerador, de rotação n_g por um multiplicador com relação de transmissão r . A velocidade do gerador depende do número de polos p e da frequência do sistema elétrico f dados por:

$$n_t = \frac{n_g}{r}, n_g = \frac{f}{p}, n_t = \frac{f}{r.p} \quad (1)$$

A figura 15 mostra um esquema elétrico de um aerogerador com velocidade constante. Estas máquinas usam geradores elétricos assíncronos, ou de indução, cuja maior vantagem é sua construção simples e barata, além de dispensarem dispositivos de sincronismo. As desvantagens destes geradores são as altas correntes de partida e sua demanda por potência reativa. As altas correntes de partida podem ser suavizadas por um tiristor de corrente, ou de partida.

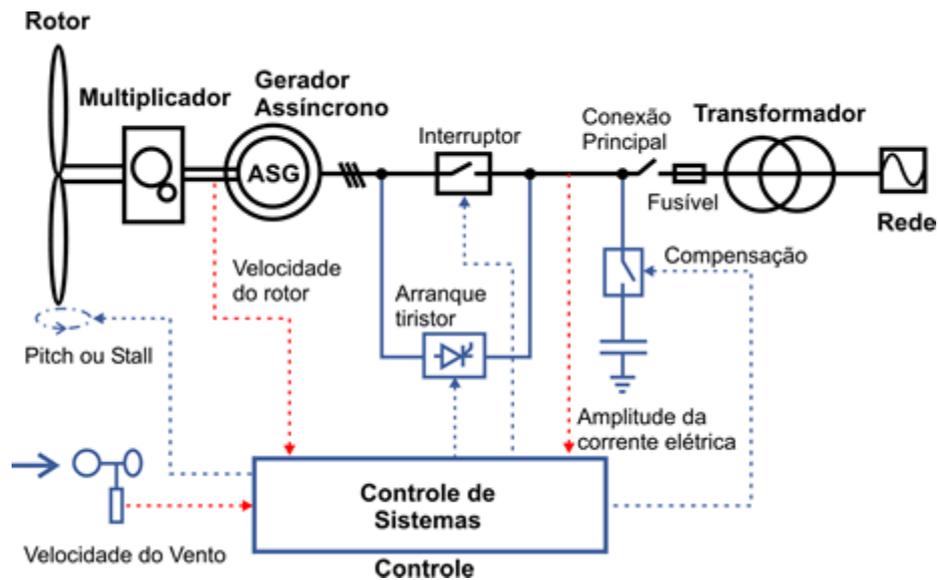


FIGURA 15 - ESQUEMA ELÉTRICO DE UM GERADOR COM VELOCIDADE CONSTANTE (DEWI)

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

2.7.2 SISTEMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Os aerogeradores com velocidade variável podem usar geradores síncronos ou assíncronos como mostra a figura 16.

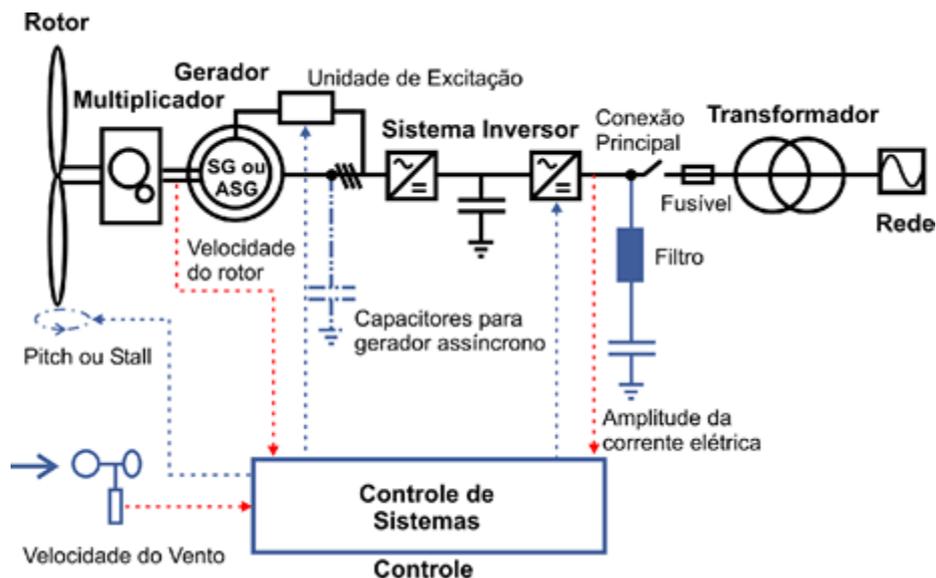


FIGURA 16 - ESQUEMA ELÉTRICO DE UM GERADOR COM VELOCIDADE VARIÁVEL QUE USA UMA CONVERSORA DE FREQUÊNCIA PARA O CONTROLE DA FREQUÊNCIA DA GERAÇÃO ELÉTRICA

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

A conexão ao sistema elétrico é feita por meio de um conversor de frequência eletrônico, formado por um conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é invertida, com o controle da frequência de saída sendo feito eletronicamente através dos tiristores. Como a frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação, esta será variável em função da variação da rotação da turbina eólica. Entretanto, por meio do conversor, a frequência da energia elétrica fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico.

Quando são usados geradores assíncronos, ou de indução, é necessário prover energia reativa para a excitação do gerador, que pode ser feita por auto-excitação, usando-se capacitores adequadamente dimensionados, de forma similar ao caso do aerogerador com velocidade constante. Neste caso, deve-se instalar os capacitores antes do retificador, uma vez que o conversor de frequência faz isolamento galvânico no sistema, não permitindo a absorção de energia reativa externa, seja do sistema elétrico ou de capacitores. (CUSTODIO, 2002)

Outra alternativa é o uso de geradores assíncronos duplamente alimentado, isto é, com dois enrolamentos que apresentam velocidades síncronas diferentes. O uso de enrolamento rotórico associado a uma resistência variável, em série, permite o controle da velocidade do gerador pela variação do escorregamento, mantendo a frequência

elétrica do gerador no valor definido pelo sistema elétrico ao qual o aerogerador está conectado.

A ideia básica do aerogerador com velocidade variável é o desacoplamento da velocidade de rotação e, conseqüentemente, do rotor do aerogerador, da frequência elétrica da rede. O rotor pode funcionar com velocidade variável ajustada à situação real da velocidade do vento, garantindo um desempenho aerodinâmico maximizado. Uma vantagem é a redução das flutuações de carga mecânica. As desvantagens são os altos esforços de construção e a geração de harmônicos, associados à conversão de frequência, que podem ser reduzidos significativamente com o uso de filtros que, por sua vez, aumentam os custos. (CUSTODIO, 2002)

2.8 ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO

A energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma velocidade v é dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Considerando a mesma massa de ar m em movimento a uma velocidade v , perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário (figura 17), pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela seção A , transversal ao fluxo de ar, é dada por:

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

Onde:

P = Potência do vento [W];

ρ = Massa específica do ar [kg/m^3];

A = Área da seção transversal [m^2];

v = Velocidade do vento [m/s].

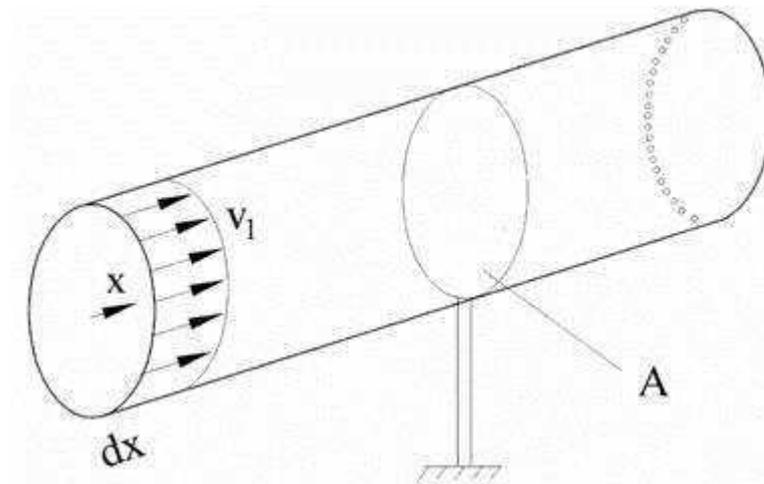


FIGURA 17 - FLUXO DE AR ATRAVÉS DE UMA ÁREA TRANSVERSAL

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

A expressão 3 também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência **DP**, ou fluxo de potência:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (4)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência c_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor.

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento (c_p máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde v_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na figura 18.

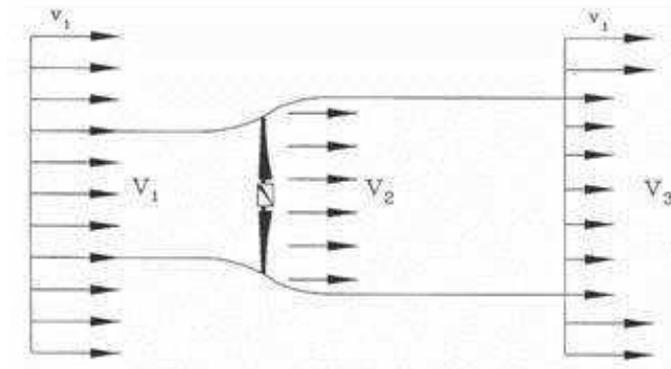


FIGURA 18 - PERDAS DE VELOCIDADE DO VENTO NA PASSAGEM POR UM CONJUNTO DE PÁS.

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

Como na figura 18, Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade v_1 que é retardada pelo conjunto de pás, assumindo uma velocidade v_3 a jusante das pás. Pela lei da continuidade, temos que:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3 \quad (5)$$

Como a redução da pressão do ar é mínima, a densidade do ar pode ser considerada constante. A energia cinética extraída pelo aerogerador é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás:

$$E_{ex} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (6)$$

A potência extraída do vento por sua vez é dada pela equação acima.

Neste ponto é necessário fazer duas considerações extremas sobre a relação entre as velocidades v_1 e v_3 :

A velocidade do vento não é alterada ($v_1 = v_3$) – Neste caso nenhuma potência é extraída;

A velocidade do vento é reduzida a valor zero ($v_3 = 0$) – Neste caso o fluxo de massa de ar é zero, o que significa também que nenhuma potência seja retirada.

A partir dessas duas considerações extremas, a velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre v_1 e v_3 . Este valor pode ser calculado se a velocidade no rotor v_2 é conhecida. A massa de ar é dada por:

$$m = \rho A v_2 \quad (7)$$

Pelo teorema de Rankine-Froude, pode-se assumir que a relação entre as velocidades v_1 , v_2 e v_3 é dada por:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (8)$$

Se a massa de ar apresentada na equação 3.7 e a velocidade v_2 apresentada na equação 3.8 forem inseridas na mesma equação 3.6, tem-se:

$$E_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

Onde:

$$\text{Potência do Vento} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (10)$$

$$\text{Coeficiente de Potência} = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

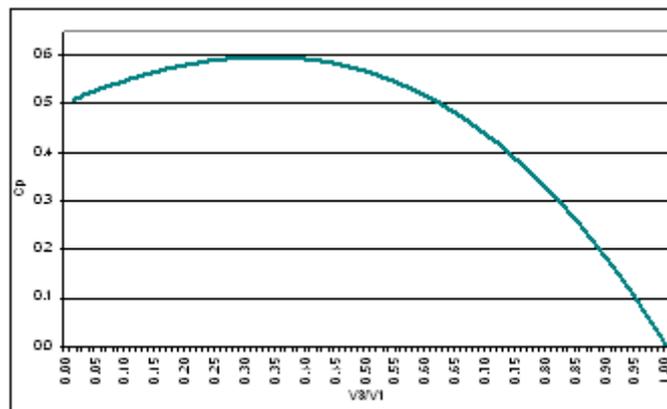


FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DE C_p EM FUNÇÃO DE v_3/v_1

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

Ao considerar o coeficiente de potência c_p em função de v_3/v_1 temos que:

$$Cp_{Betz} = \frac{16}{27} = 0,59, \text{ onde } \frac{v_3}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (12)$$

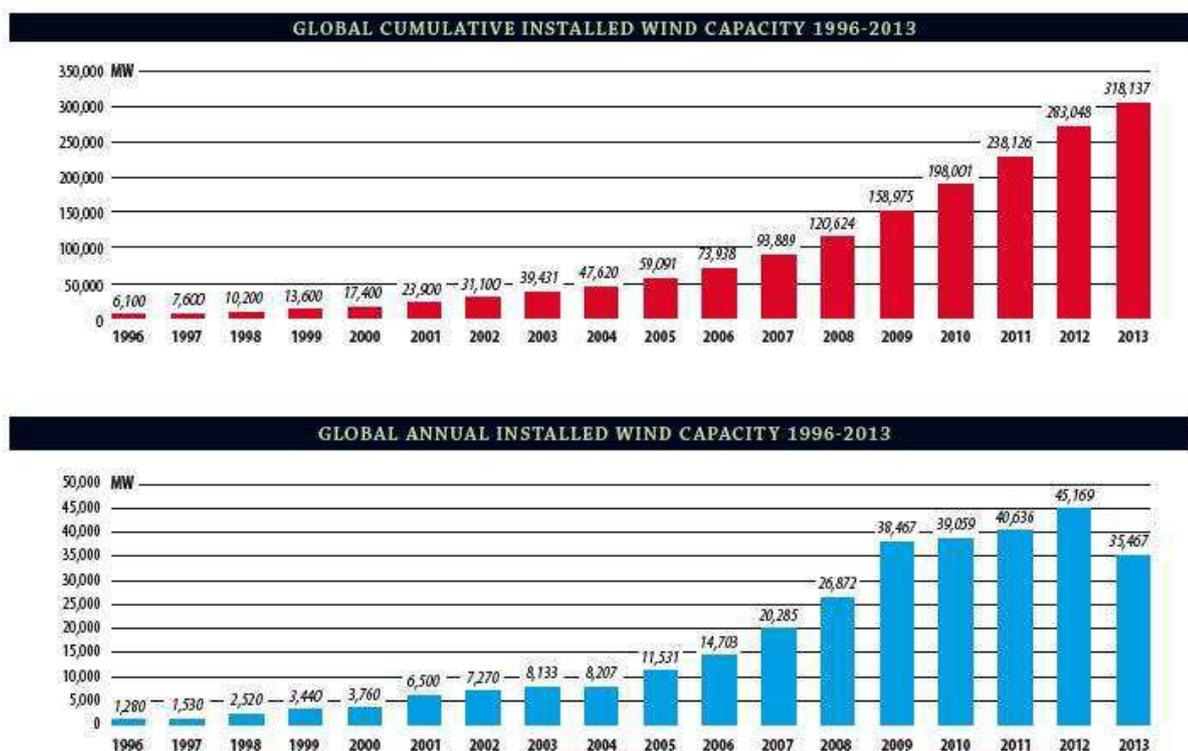
2.9 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

O alto custo de produção de energia, juntamente com as vantagens da energia eólica como fonte de energia renovável, amplamente disponível, tem levado vários países a estabelecer incentivos reguladores e direcionar investimentos para estimular a geração de energia eólica.

O conselho global de energia eólica (GWEC) divulgou, no início de 2014, que a capacidade eólica instalada no mundo em 2013 foi de 318.137 MW. Este montante significa um aumento de 12,5% sobre o parque instalado em 2012. Em 2013 foi instalado um montante de 35.467 MW, o que significou o menor montante desde 2009. O GWEC espera que 2014 repita, pelo menos, o recorde de instalação do ano de 2012, 45 GW, podendo ultrapassá-lo.

Os Estados Unidos, que afetaram negativamente as estatísticas de 2013, com uma instalação de apenas 1 GW, tem em construção, atualmente, 12 GW, o que é um recorde, e deve mudar o cenário para este ano. O país tem o segundo maior parque gerador eólico instalado no mundo, 61 GW, atrás apenas da China, com 91,4 GW. O país asiático instalou novos 16,1 GW no ano passado, liderando o total de novos empreendimentos.

O Brasil tem instalado 948 MW novos, totalizando um parque de 3.456 MW. O país ficou em sétimo lugar entre os que mais instalaram capacidade eólica no mundo. Além de China, em 1º lugar, e EUA, em 6º, ficaram a frente do Brasil: Alemanha (2º-3,2 GW), Reino Unido (3º-1,88 GW), Índia (4º-1,7 GW) e Canadá (5º-1.599 MW).



Capacidade eólica instalada acumulada e a instalada anualmente entre 1996 e 2013 / GWEC

FIGURA 20 – CAPACIDADE EÓLICA INSTALADA ACUMULADA E A INSTALADA ANUALMENTE ENTRE 1996 E 2013

(FONTE: GWEC)

Esse aumento da participação da energia eólica no mundo está relacionado a vários fatores. Entre eles está a necessidade dos países poderem contar com uma fonte de energia segura. Além disso, o custo da instalação é decrescente e é isenta de emissões de CO₂ e de outros gases poluentes, além dos menores efeitos secundários sobre o meio ambiente.

Abaixo segue um gráfico da capacidade eólica acumulada dos principais produtores de energia eólica mundiais.

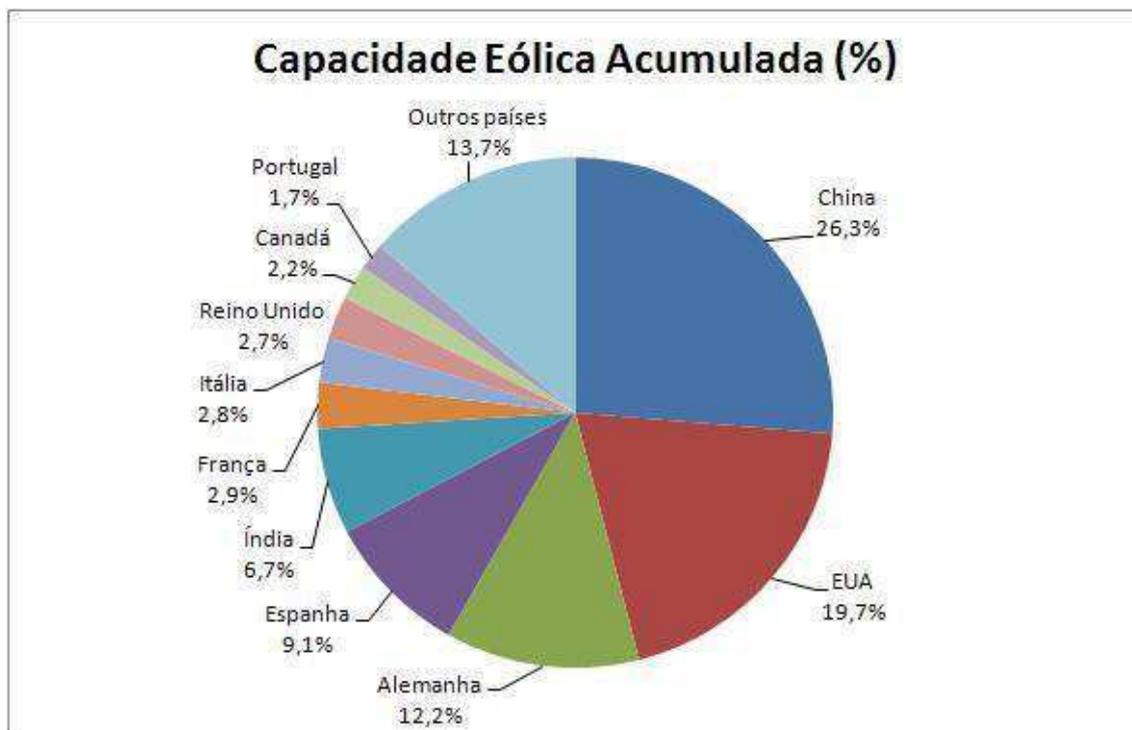


FIGURA 21 - CAPACIDADE EÓLICA ACUMULADA MUNDIAL (EM PORCENTAGEM)

(FONTE: [HTTP://JOSIANEGUSS.BLOGSPOT.COM](http://josianeguss.blogspot.com))

O pioneirismo europeu no desenvolvimento de aerogeradores, acarretou o desenvolvimento de grandes fornecedores de turbinas eólicas para a região, como Vestas, Gamesa, Enercon e Siemens. Estas empresas foram responsáveis pela maior parte do desenvolvimento tecnológico do setor.

Ressalta-se que o crescimento de empresa chinesa nos últimos anos tem impactado o mercado de fabricantes de aerogeradores de forma significativa. Algumas empresas estão passando por graves dificuldades financeiras, ocasionando, em casos extremos o pedido de falência, como no caso da alemã Fuhrlander.

Abaixo segue a tabela dos principais fabricantes mundiais de aerogeradores.

TABELA 1 – DEZ MAIORES FABRICANTES DE AEROGERADORES (2009 – 2011)

Fabricante	País	Market share (%)		
		2009	2010	2011
Vestas	Dinamarca	13,5	13,4	12,7
Sinovel	China	9,3	11,1	9,0
Goldwind	China	7,3	9,8	8,7
Gamesa	Espanha	6,4	6,8	8,0
Enercon	Alemanha	8,5	7,1	7,8
GE Energy	Estados Unidos	12,5	9,8	7,7
Suzlon	Índia	6,1	6,5	7,6
Guodian	China	1,1	4,1	7,4
Siemens	Alemanha	6,3	5,5	6,3
Mingyang	China	*	*	3,6
Dongfang	China	6,0	6,9	*

2.10 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Entre 2006 e 2013, a energia que vem dos ventos aumentou 829%. E, até 2018, sua participação na matriz energética brasileira deve saltar para 8%, com capacidade para fornecer eletricidade para cerca de 24 milhões de residências. Em seis anos, a capacidade instalada dessa fonte de energia no país deve aumentar quase 300%, saltando de, aproximadamente, 3.500 MW (megawatts) para 13.487,3 MW. O Brasil já conta com 167 parques eólicos. E o Rio Grande do Norte lidera a corrida por esse tipo de energia. O estado, em apenas três anos, deixou de importar energia e, hoje, é autossuficiente devido à força do vento. A previsão é que, até o fim de 2014, o estado supere em energia eólica países como Noruega, Finlândia, Coreia do Sul, Bulgária, Chile e Argentina. Ainda há problemas a serem resolvidos para que o Brasil utilize todo seu potencial eólico. Como é o caso dos 167 parques instalados no país: 36 ainda estão desconectados da rede por falta de linha de transmissão. Essa energia desperdiçada daria para abastecer uma cidade do tamanho de Fortaleza, que tem população de 3,597 milhões de habitantes (2012).

Segue abaixo a tabela das principais características da distribuição da energia eólica por regiões.

TABELA 2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA EOLICA POR REGIOES

REGIÃO	INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADES					INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]	VENTO [m/s]	ÁREA (CUMULATIVA) [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
 NORTE	6 - 6,5	11460	22,92	0,13	25,58	>6	24206	48,41	70,49
	6,5 - 7	6326	12,65	0,17	18,46	>6,5	12746	25,49	44,91
	7 - 7,5	3300	6,60	0,20	11,33	> 7 m/s	6420	12,84	26,45
	7,5 - 8	1666	3,33	0,25	7,15	>7,5	3120	6,24	15,11
	8 - 8,5	903	1,81	0,30	4,65	>8	1454	2,91	7,96
	>8,5	551	1,10	0,35	3,31	>8,5	551	1,10	3,31
 NORDESTE	6 - 6,5	146589	293,18	0,13	327,19	>6	245105	490,21	649,50
	6,5 - 7	60990	121,98	0,17	178,02	>6,5	98516	197,03	322,31
	7 - 7,5	24383	48,77	0,20	83,73	> 7 m/s	37526	75,05	144,29
	7,5 - 8	9185	18,37	0,25	39,43	>7,5	13143	26,29	60,56
	8 - 8,5	3088	6,18	0,30	15,91	>8	3958	7,92	21,13
	>8,5	870	1,74	0,35	5,23	>8,5	870	1,74	5,23
 CENTRO-OESTE	6 - 6,5	41110	82,22	0,13	91,76	>6	50752	101,50	120,83
	6,5 - 7	8101	16,20	0,17	23,65	>6,5	9642	19,28	29,07
	7 - 7,5	1395	2,79	0,20	4,79	> 7 m/s	1541	3,08	5,42
	7,5 - 8	140	0,28	0,25	0,60	>7,5	146	0,29	0,63
	8 - 8,5	6	0,01	0,30	0,03	>8	6	0,01	0,03
	>8,5	0	0,00	0,35	0,00	>8,5	0	0,00	0,00
 SUDESTE	6 - 6,5	114688	229,38	0,13	255,99	>6	175859	351,72	446,07
	6,5 - 7	46302	92,60	0,17	135,15	>6,5	61171	122,34	190,08
	7 - 7,5	11545	23,09	0,20	39,64	> 7 m/s	14869	29,74	54,93
	7,5 - 8	2433	4,87	0,25	10,44	>7,5	3324	6,65	15,29
	8 - 8,5	594	1,19	0,30	3,06	>8	891	1,78	4,84
	>8,5	297	0,59	0,35	1,78	>8,5	297	0,59	1,78
 SUL	6 - 6,5	121798	243,60	0,13	271,86	>6	171469	342,94	424,74
	6,5 - 7	38292	76,58	0,17	111,77	>6,5	49671	99,34	152,88
	7 - 7,5	9436	18,87	0,20	32,40	> 7 m/s	11379	22,76	41,11
	7,5 - 8	1573	3,15	0,25	6,75	>7,5	1943	3,89	8,71
	8 - 8,5	313	0,63	0,30	1,61	>8	370	0,74	1,95
	>8,5	57	0,11	0,35	0,34	>8,5	57	0,11	0,34
 TOTAL BRASIL ESTIMADO	>6	667391	1334,78		1711,62	>6	667391	1334,78	1711,62
	>6,5	231746	463,49		739,24	>6,5	231746	463,49	739,24
	> 7 m/s	71735	143,47		272,20	> 7 m/s	71735	143,47	272,20
	>7,5	21676	43,35		100,30	>7,5	21676	43,35	100,30
	>8	6679	13,36		35,93	>8	6679	13,36	35,93
	>8,5	1775	3,55		10,67	>8,5	1775	3,55	10,67

(FONTE: WWW.CRESEB.CEPEL.BR)

Os principais parques eólicos no Brasil são:

- **Complexo Eólico Alto Sertão I** - localizado no semiárido baiano, é o maior parque gerador de energia eólica do Brasil e também da América Latina. As 184 torres geram 294 megawatts de energia (cerca de 30% de toda energia eólica gerada no Brasil). Inaugurado em junho de 2012, o

complexo pertence à empresa Renova Energia e teve investimento de 1,2 bilhão de reais;

- **Parque Eólico de Osório:** instalado no município gaúcho de Osório, é o segundo maior centro de geração de energia eólica no Brasil (em 2011). Possui a capacidade instalada de 150 megawatts;
- **Usina de Energia Eólica de Praia Formosa:** instalada na cidade de Camocim (Ceará). Possui a capacidade instalada de 104 megawatts;
- **Parque Eólico Alegria:** instalado na cidade de Guamaré (Rio Grande do Norte). Possui a capacidade instalada de 51 megawatts;
- **Parque Eólico do Rio de Fogo:** instalado na cidade de Rio do Fogo (Rio Grande do Norte). Possui capacidade instalada de 41 megawatts;
- **Parque Eólico Eco Energy:** instalado na cidade de Beberibe (Ceará). Possui capacidade instalada de 25 megawatts.

2.11 IMPACTOS AMBIENTAIS

Equipamentos de pequeno porte tem um impacto ambiental quase que desprezível. Os impactos aparecem com os equipamentos de grande e médio porte. Alguns impactos de parques eólicos estão descritos abaixo:

Ruído: Apesar de as novas turbinas terem diminuído consideravelmente seus ruídos, estes ainda são significativamente audíveis. Por isso, já existe regulamentação em relação a sua instalação nas vizinhanças de áreas residenciais. Este ruído é proveniente do fluxo de ar nas pás, do gerador, eixo e rotor. Grande parte do ruído foi suavizado através do aumento das aerogeradores, melhorias nos lubrificantes e pela ausência de caixa de velocidades.

Uso da terra: nos parques ou fazendas eólicas as turbinas devem estar suficientemente distantes umas das outras para evitar perturbações entre elas. Geralmente, o espaçamento entre elas é de mais ou menos três vezes o diâmetro do rotor. Porém, a área do parque eólico pode ser usada para a agricultura, lazer e etc.

Aves: Nos parques eólicos são encontradas diversas aves mortas decorrente do contato direto com as pás das turbinas. Alguns especialistas afirmam que as aves não conseguem ver as pás em movimento. Por isso, não é recomendada a instalação de um

parque eólico em uma zona de migração de aves, áreas de reprodução e proteção ambiental.

Impacto visual: O impacto visual refere-se ao tamanho das turbinas, seu design, número de pás, cor e número de turbinas em uma fazenda. Podem existir restrições à instalação das turbinas de grande porte em algumas áreas devido à beleza do ambiente ou para preservar as características do meio ambiente.

Interferência eletromagnética: Este efeito ocorre quando as turbinas são instaladas em entre receptores e transmissores de ondas de rádio, televisão e micro-ondas. As pás das turbinas são capazes de refletir parte da radiação eletromagnética.

3 ESTUDO DETALHADO DOS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR COM CAIXA MULTIPLICADORA DE VELOCIDADES

No decorrer deste capítulo será estudado, detalhadamente, os componentes de um aerogerador com caixa multiplicadora de velocidades.

3.1 CABINE

É a carcaça montada sobre a torre, onde se situam o gerador, a caixa de engrenagens (quando utilizada), todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para o melhor posicionamento em relação ao vento. As figuras 22 e 23 mostram os principais componentes instalados em dois tipos de cabines, uma delas utilizando um gerador convencional e outra utilizando um gerador multipolos.

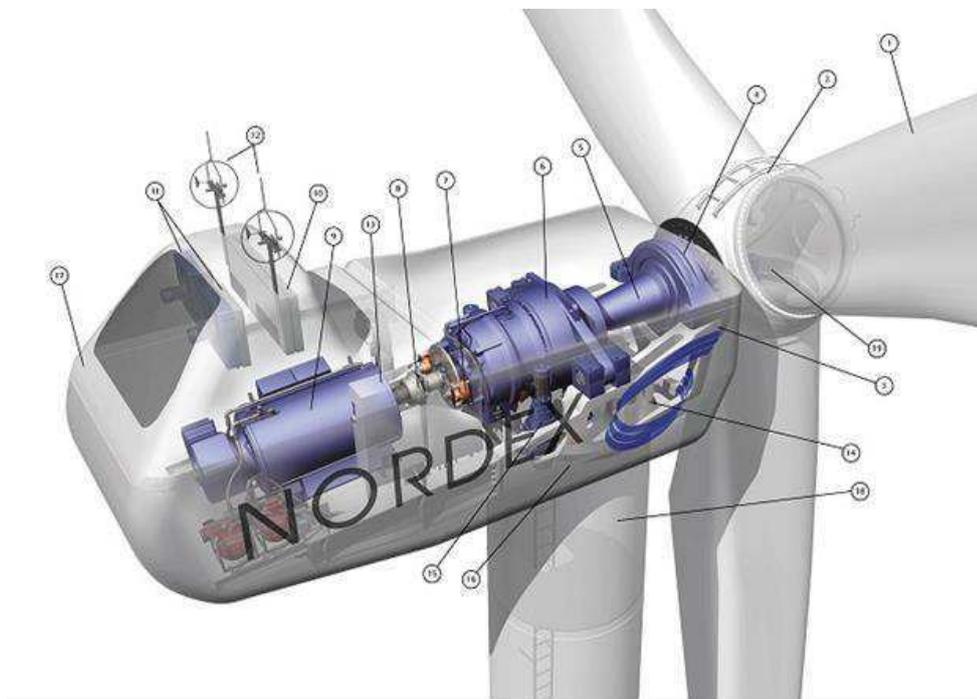


FIGURA 22 - CABINE COM CONTROLE DE VELOCIDADES

(FONTE: [HTTP://PORTAL-ENERGIA.COM](http://portal-energia.com))

SegueM abaixo os componentes enumerados da figura acima.

1. Pás da Turbina: De maneira geral, as três pás deem captar energia cinética do vento e a converter em conjugado mecânico;

2. Cubo do aerogerador: Peça robusta, feita de ferro fundido, que une as três pás em torno do eixo da turbina;

3. Carcaça da cabine: É a estrutura da cabine que deve ser rígida e dúctil, para suportar, respectivamente, todos os esforços mecânicos e absorver as vibrações típicas; para isso é constituída de ferro fundido de qualidade superior;

4. Rolamento do eixo da turbina: Rolamento com duas carreiras de esferas (ou roletes), instalados em um manacal de mesmo material da carcaça da cabine;

5. Eixo da turbina: Transmite o conjugado motor da turbina eólica para a transmissão e, por trabalhar sob baixa rotação e conjugado elevado, possui diâmetro relativamente grande;

6. Caixa de transmissão: É uma caixa de engrenagens, geralmente com dois estágios do tipo planetário, que amplia a baixa velocidade de rotação do eixo da turbina para valores compatíveis com eixo do gerador.

7. Freio do eixo do gerador: Freio mecânico a disco, instalado no eixo de saída da transmissão, que é acionado em situações de emergência e manutenção quando, muitas vezes, é auxiliado por um pino de segurança para travar o eixo da turbina.

8. Acoplamento entre Transmissor e Gerador:

9. Controladores e Inversores: Para não ocorrerem tensões mecânicas desnecessárias nos manacais de rolamento do gerador e da transmissão, seus eixos são conectados por meio de um acoplamento flexível;

10. Radiador de Calor da Transmissão: Corresponde ao sistema de refrigeração da caixa de transmissão;

11. Radiador e Calor do Gerador: Componente do sistema de refrigeração do gerador;

12. Sensores de Direção e Velocidade dos ventos: Para o correto funcionamento, os valores destas variáveis de interesses devem ser fornecidos aos respectivos sistemas de controle;

13. Sistemas de Controle: Proporciona uma operação totalmente automática, faz a monitoração de diversas variáveis de interesse de todo aerogerador e, por telemetria,

permite sua monitoração remota, tanto de seus parâmetros quanto da rede elétrica a qual está conectado;

14. Sistema Hidráulico: É o sistema que mantém e controla a pressão do óleo utilizado nos freios do eixo do gerador e da posição da cabine;

15. Sistema de Posicionamento da Cabine: Este sistema deve manter a turbina de frente com o vento, ou seja, manter plano que contém suas pás numa posição normal a direção do deslocamento do fluxo de ar;

16. Rolamento da Cabine: Instalado entre a cabine e a torre, permite sua rotação em torno do eixo longitudinal da torre;

17. Carenagem da Turbina: Moldada em materiais compostos, é fixada sobre a estrutura da cabine para proteger os equipamentos das intempéries e para proporcionar um acabamento aerodinâmico;

18. Torre: De formato tubular, levemente cônica e construída em aço ou concreto, deve sustentar a cabine a turbina em uma altura adequada, sob qualquer condição de vento;

19. Sistema de Controle do Ângulo de Passo da Turbina: As turbinas mais modernas permitem a rotação das pás em torno do eixo longitudinal e, juntamente com um sistema de controle adequado, o controle do ângulo de passo da turbina.

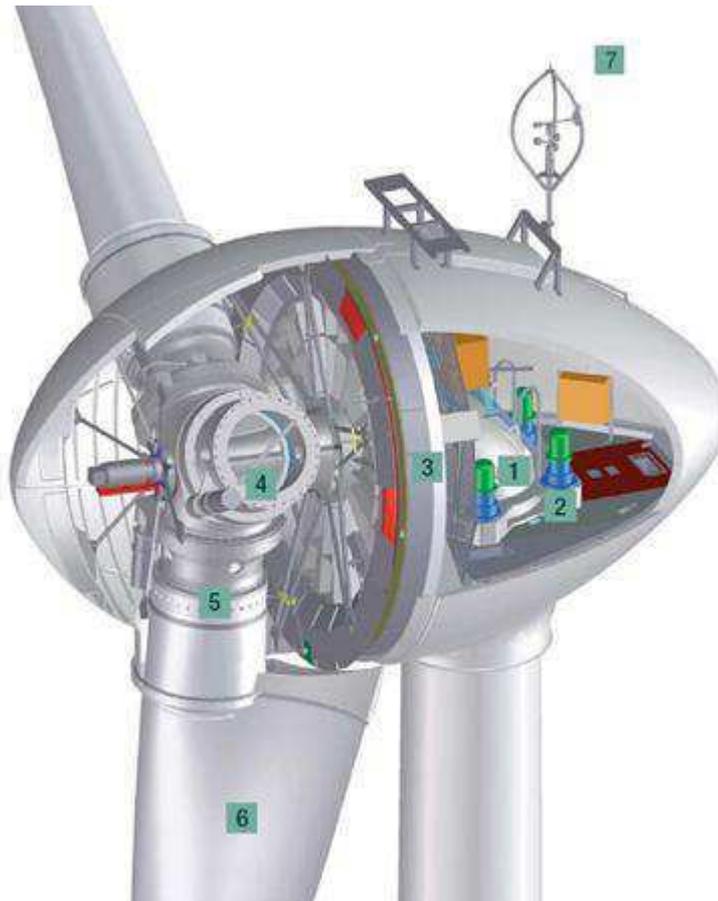


FIGURA 23 - VISTA DO INTERIOR DA NACELE DE UM AEROGERADOR UTILIZANDO UM GERADOR MULTIPOLOS
(FONTE: Enercon)

1. Apoio principal da nacele
2. Motores de orientação da nacele
3. Gerador em anel (multipolos)
4. Fixador das pás ao eixo
5. Cubo do rotor
6. Pás
7. Sensores de direção e velocidade do vento

3.2 PÁS

3.2.1 INTRODUÇÃO

No projeto das pás de um rotor, alguns itens devem ser satisfeitos, tais como:

- (1) – Maximizar o rendimento anual de energia para a velocidade do vento especificada;
- (2) – Limitar a potência máxima de saída (no caso de máquina com controle por stall);
- (3) – Resistir cargas extremas e à fadiga;
- (4) – Restringir desvio da ponta para evitar a colisão com a torre;
- (5) – Evitar ressonância;
- (6) – Minimizar peso e custo.

O processo do projeto das pás de um aerogerador consiste no projeto aerodinâmico e no projeto estrutural.

O projeto aerodinâmico busca uma geometria ótima para a superfície externa da pá ou, comumente falando, geometria da pá. Esta geometria é definida pela família do aerofólio, da torção e distribuição de espessura (BURTON et al,2001). Portanto, o projeto aerodinâmico satisfaz os pontos (1) e (2) destacados acima. O projeto estrutural busca o melhor material para pá e a determinação da seção transversal estrutural da mesma.



FIGURA 24 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UMA PÁ

(FONTE: [HTTP://ENEOP.PT](http://ENEOP.PT))



FIGURA 25 - PROCESSO DE TRANSPORTE DE PAS

(FONTE: [HTTP://PORTOSDEPORTUGAL.PT](http://portosdeportugal.pt))

3.2.2 PROJETO AERODINÂMICO

O projeto aerodinâmico inclui a seleção da família do aerofólio, otimização do fio da pá e distribuição de torção. A variação da espessura ao longo do fio também deve ser considerada. A espessura tem um valor mínimo fixado permitido, a fim de minimizar sua perda por arrasto.

Para máquinas com regulação de passo, a captura anual de energia, atribuída a área circular varrida por cada elemento da pá, é determinada pela distribuição do vento escolhida, e a variação da energia capturada com o fio da pá e a torção para cada “posição da pá” é calculada. Desta forma, são analisados os valores para o fio e torção da pá para cada “posição da pá” de forma a capturar a maior quantidade de energia possível (BURTON et al,2001).

Com máquinas com regulação por stall o método é semelhante, porém a captura total de energia anual tem que ser maximizada dentro dos limites da potencia máxima da tabela da máquina (BURTON et al,2001).

4.1.3 Modificações Práticas Para o Projeto Ótimo

O resultado da otimização descrita acima, tipicamente, é que as variações do fio e da torção da pá variam inversamente com o raio. Contudo, devido à pequena contribuição dada pela parte interna da pá para a potencia total, a seção do aerofólio

geralmente não é contínua em cerca de 15% do raio, na prática, e o fio para este raio é reduzido para, aproximadamente, a metade do valor ótimo. É, frequentemente, vantajoso afunilar o fio de maneira uniforme ao longo do comprimento ativo da lâmina (BURTON et al,2001).

A área para a raiz da pá geralmente é circular em seção transversal a fim de encaixar com os rolamentos de passo para o caso de máquinas com regulação de passo, ou para permitir o ajuste do ângulo de passo no anel parafusado, no caso de regulação por stall. A transição da seção da raiz para a seção externa do aerofólio de 15% do raio deve ser suave por uma razão estrutural.

3.2.3 FORMA DA ESTRUTURA DA PÁ

A forma oca da pá estabelece uma estrutura simples e eficiente para resistir a cargas de flexão e torção e alguns fabricantes de pás adotam esta forma para a construção, como mostra a figura abaixo. No entanto, para máquinas de pequeno e médio porte, onde as cargas fora do plano dominam, há uma maior vantagem em concentrar o material da camada externa da pá na frente da mesma, onde a espessura da pá é máxima, de modo que atua, mais eficientemente, resistindo a momentos de flexões fora do plano, como é visto nas figuras abaixo. Assim as áreas enfraquecidas da casca no sentido da borda de fuga são tipicamente fortalecidas por meio de “construção em sanduiche” utilizando um enchimento em espuma de PVC (BURTON et al,2001).

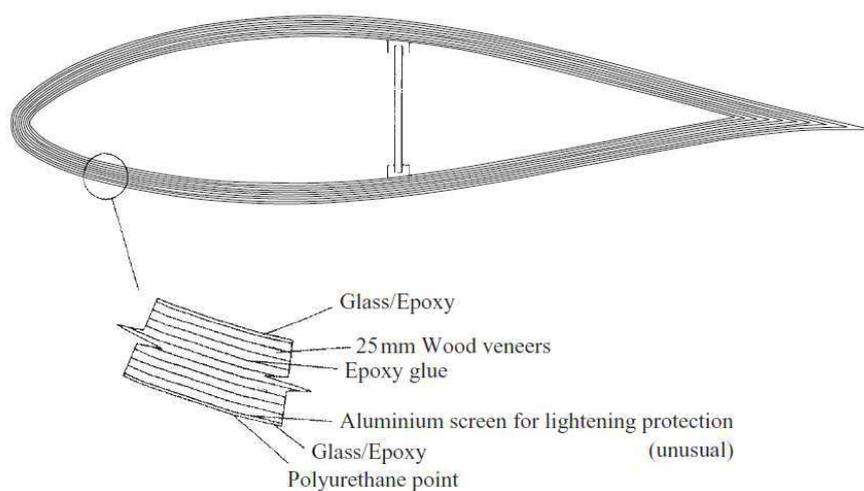


FIGURA 26 - CONSTRUÇÃO DE UMA PÁ COM REVESTIMENTO COMPLETO DE MADEIRA/EPÓXI

(FONTE: BURTON et al,2001)

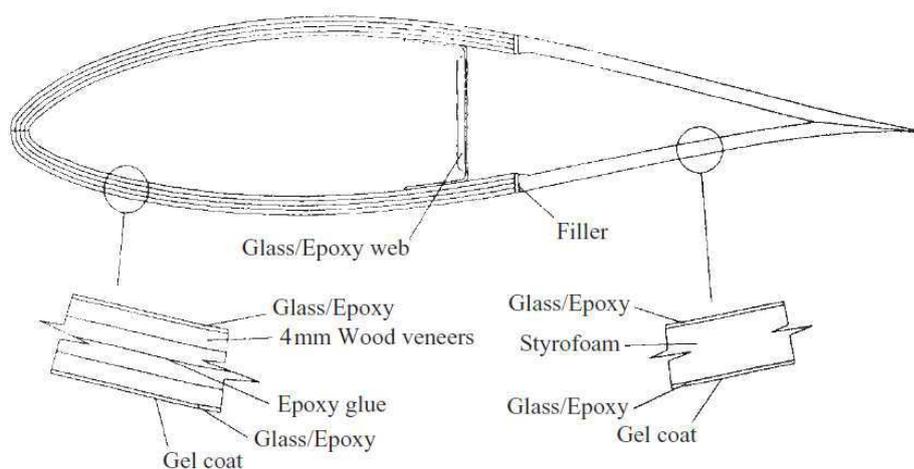


FIGURA 27 -- CONSTRUÇÃO DE UMA PÁ COM MEIO REVESTIMENTO DE MADEIRA/EPÓXI

(FONTE: BURTON et al,2001)

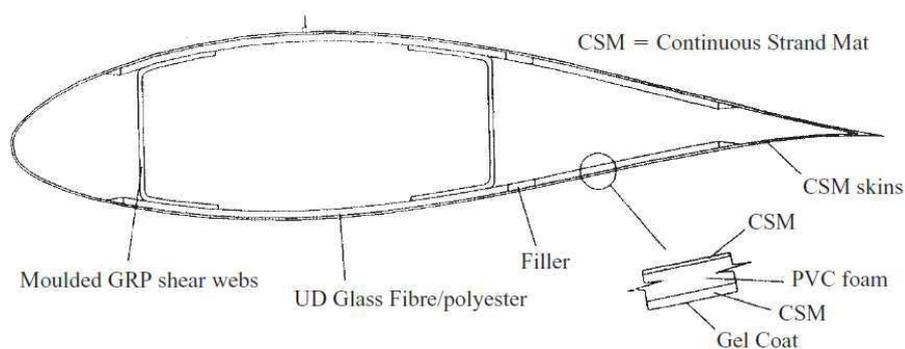


FIGURA 28 -- CONSTRUÇÃO DE UMA PÁ QUE USA FIBRA DE VIDRO COMO REVESTIMENTO E UM SUPORTE INTERNO

(FONTE: BURTON et al,2001)

3.2.4 PROPRIEDADES E MATERIAIS DAS PÁS

O material ideal para a construção das pás combina as propriedades estruturais necessárias – alta resistência em relação ao peso, resistência à fadiga e rigidez – com o baixo custo e a capacidade de se moldar na forma necessária.

Na escolha do melhor material, alguns parâmetros são levados em conta, como os descritos abaixo.

- Compressão da relação peso–resistência;
- Parâmetro de estabilidade;
- Relação rigidez-peso;
- Resistência à fadiga como uma porcentagem da resistência a compressão.

É evidente que os compostos de fibra de vidro e de carbono possuem maiores resistências a compressão, porém este não é o único parâmetro levado em consideração e não é tão decisivo por duas razões. Em primeiro lugar, as fibras de uma das camadas que compõe a cobertura laminada da pá têm de ser alinhada para fora do eixo para resistir às cargas de cisalhamento ou tangenciais, dando forças reduzidas na direção axial. Em segundo lugar, o baixo módulo de Young relativo desses compostos significa que a resistência à deformação das finas camadas da superfície governa o projeto ao invés do simples rendimento compressivo. A probabilidade que a curvatura governará é inversamente relacionada com o parâmetro de estabilidade, então os materiais com altos valores, como composto de madeira, serão menos sensíveis a curvatura. Então, a pá fabricada com composto de madeira é mais leve que a de fibra de vidro (BURTON et al,2001).

Assim, a baixa resistência do laminado de madeira em comparação com outros materiais, torna-o inadequado para o uso na fabricação de pás com fios finos que operam com uma alta velocidade de ponta.

3.2.5 FORÇAS ATUANTES NAS PÁS

A figura 29 mostra as principais forças atuantes em uma pá do aerogerador, assim como os ângulos de ataque (α) e de passo (β). A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pela pá (V_{res}), resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente (V_w) com a velocidade tangencial da pá do aerogerador (V_{tan}), conforme a equação abaixo.

$$\vec{V}_{res} = \vec{V}_w - \vec{V}_{tan} \quad (13)$$

A força de arrasto é produzida na mesma direção de V_{res} . A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção V_{tan} , produz o torque do aerogerador.

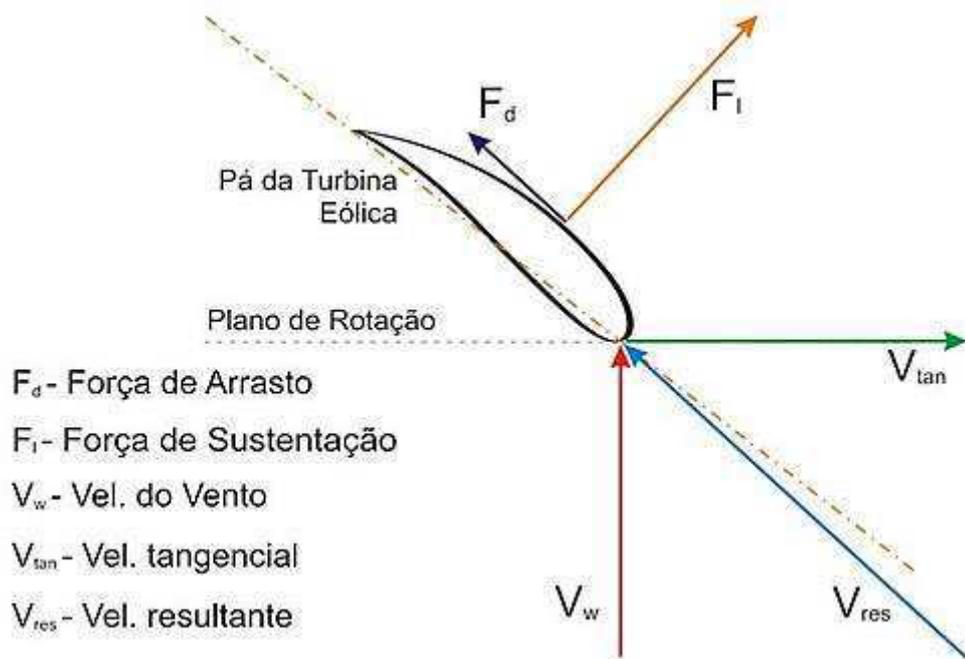


FIGURA 29 - PRINCIPAIS FORÇAS ATUANTES EM UMA PÁ DE AEROGERADOR (FONTE: MONTEZANO)

A potência mecânica extraída do vento pelo aerogerador depende de vários fatores. Mas tratando-se de estudos elétricos, o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações 13 e 14. (PAVINATTO, 2005)

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (13)$$

Com:

$$\lambda = \left(\frac{R \omega_{wt}}{V_w} \right) \quad (14)$$

Onde:

c_p – Coeficiente de potência do aerogerador;

λ – Razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*);

ω_{wt} – Velocidade angular da aerogerador [rad/s];

R – Raio da aerogerador [m];

ρ – Densidade do ar [Kg/m³]

A – Área varrida pelo rotor da aerogerador [m^2];

v_w – Velocidade do vento incidente na aerogerador [m/s].

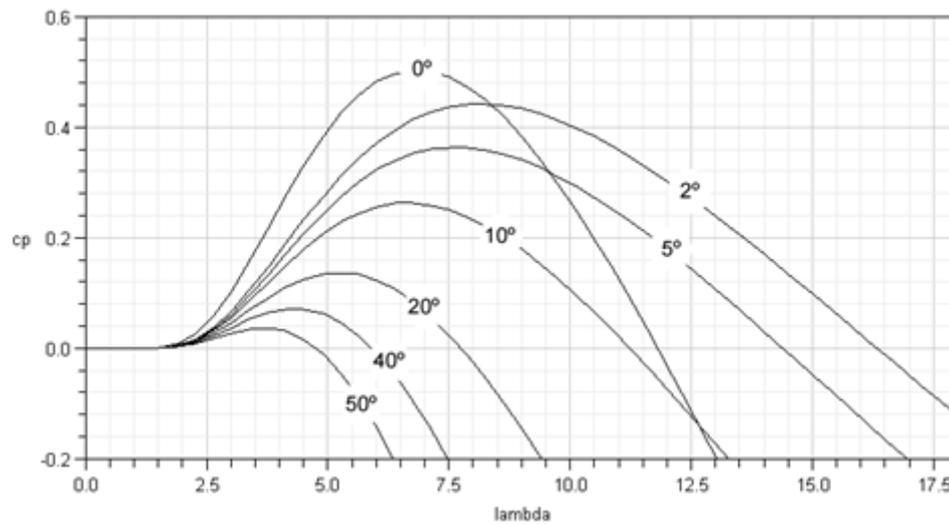


FIGURA 30 - CARACTERÍSTICA $C_p(\lambda, \beta)$ TRAÇADAS EM FUNÇÃO DE APROXIMAÇÕES NUMERICAS

(FONTE: MONTEZANO)

Na equação 13, o coeficiente de potência $c_p(\lambda, \beta)$ depende das características do aerogerador, sendo função da razão de velocidades λ e do ângulo de passo β das pás (pitch) do aerogerador. O $c_p(\lambda, \beta)$ é expresso como uma característica bidimensional.

Aproximações numéricas normalmente são desenvolvidas para o cálculo de c_p para valores dados de λ e β (RAIAMBAL e CHELLAMUTH, 2002 *apud* PAVINATTO, 2005). A figura 30 mostra a característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçada para vários valores de β .

O comportamento dos perfis dA pá é em função do ângulo de ataque α e são divididos em três zonas de funcionamento, são elas:

TABELA 3 - REGIME DE FUNCIONAMENTO DA PÁ DE ACORDO COM O ÂNGULO DE INCIDENCIA

Ângulo de ataque	Regime
$-15^\circ < \alpha < 15^\circ$	Linear
$15^\circ < \alpha < 30^\circ$	Desenvolvimento de perda
$30^\circ < \alpha < 90^\circ$	Travão

(FONTE: BURTON et al,2001)

Para os perfis, normalmente, usados em turbinas eólicas, percebe-se que o coeficiente de sustentação atinge seu máximo para um ângulo de ataque de 10 a 15°, a partir do qual decresce.

O coeficiente de arrastamento permanece quase constante até o ângulo de ataque para o qual o coeficiente de sustentação atinge seu máximo, e para ângulos de ataque maior, o coeficiente de arrastamento cresce acentuadamente.

Para extrair a maior potencia possível do vento, a pá deve ser dimensionada para trabalhar com um ângulo de ataque onde que a relação arrastamento e sustentação seja máxima.

3.2.6 FIXAÇÃO DAS RAÍZES DAS PÁS

Uma das mais críticas áreas do projeto da pá é a fixação das raízes das pás, visto que existe o contato de diferentes materiais com diferentes rigidezes, um em aço e outro, geralmente, em fibra de vidro ou madeira, que lutam contra a transferência suave de cargas. A ligação entre os materiais, geralmente, é feita por meio de parafusos de aço, que podem ser fixados na direção axial ou radial, porém, em qualquer dos casos a concentração de tensão é inevitável (BURTON et al,2001).

A figura abaixo mostra quatro tipos diferentes de fixação de lâminas ao cubo do rotor, onde a estrutura da pá geralmente é cilíndrica na raiz, neste caso os parafusos ou pregos são arranjados em círculo. A figura 31(A) abaixo é um conector do tipo cenoura, que é o padrão para fixação das pás de madeira laminada. O conector é constituído por

uma porção de carbono-epóxi afunilada para um buraco perfurado em degraus com um parafuso rosqueado. Os conectores são fabricados em aço de alta resistência ou ferro fundido.

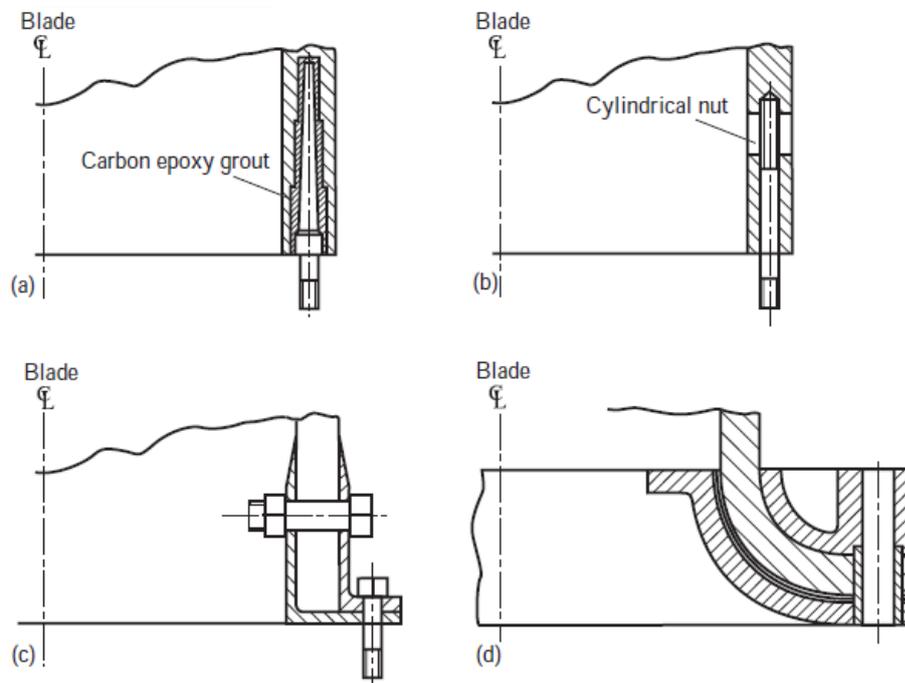


FIGURA 31 – (A) CONECTOR TIPO CENOURA; (B) PARAFUSO EM T; (C) PINO-ORIFÍCIO ROSQUEADO; (D) FLANGE TROMPETE

(FONTE: BURTON et al,2001)

As figuras 31(A),(B) e (C) são usadas para pás de fibra de vidro. O conector da figura (B) é do tipo parafuso em T, constituído por um cravo em aço inserido num orifício longitudinal na crosta da lâmina. O cravo é pré-carregado para reduzir a fadiga da carga.

O arranjo pino-buraco rosqueado, da figura 31(C) usa o mesmo método de transferência de carga entre fibra de vidro e aço, ou seja, possuindo uma haste transversal, mas a interface não se presta para o pré-carregamento.

Na figura 31(D), temos o modelo flange de trompette, onde a raiz da pá é espalmada para fora na forma de uma boca de trompette e apertados entre roscas interiores e exteriores do aro por parafusos que prendem a pá ao cubo. Este arranjo raramente é usado para grandes pás.

As distribuições de tensões calculadas para a fixação das pás no cubo estão sujeitas a níveis de incerteza, por isso usam-se testes estáticos e de fadiga para verificar se o projeto é adequado. Falhas de arranque no modelo cenoura ocorrem como um

resultado de corte da madeira em torno do reboco. Mas as falhas de fadiga podem ocorrer diretamente no conector ou na argamassa (BURTON et al,2001).

3.3 ROLAMENTO DE PASSO

Em turbinas eólicas com controle de passo, são colocados rolamentos entre as pás e o cubo do rotor a fim de que as pás possam girar em torno de si. Segue abaixo uma figura em que os anéis interiores e exteriores do rolamento são parafusados às pás e ao cubo (BURTON et al,2001).

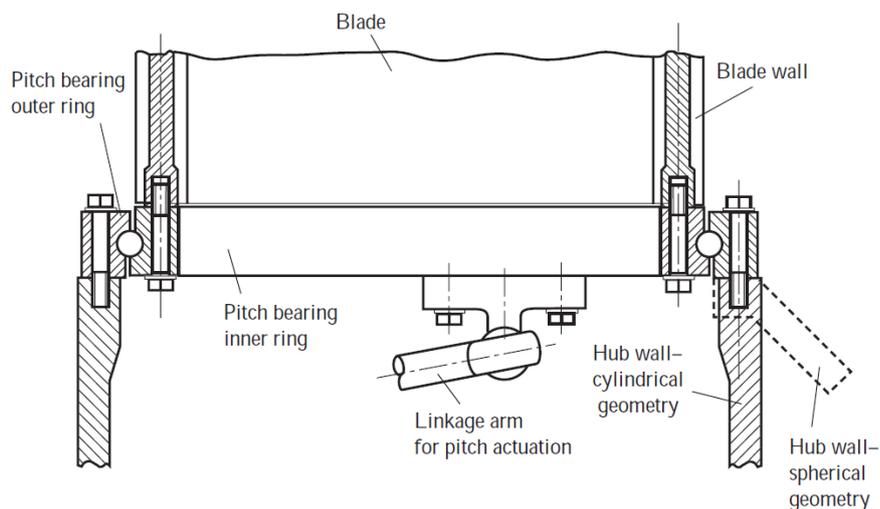


FIGURA 32 – ARRANJO TÍPICO DE ROLAMENTO DE PASSO

(FONTE: BURTON et al,2001)

Os diferentes tipos de rolamentos são classificados de acordo com seu arranjo e os elementos usados no rolamento com finalidade de aumentar a capacidade de momento.

- (a) Rolamentos de linha única, com rolos alternados inclinados de $+45^\circ$ e -45° para o plano do rolamento;
- (b) Rolamentos de esfera em uma única linha;
- (c) Rolamentos de esfera em duas linhas;
- (d) Rolamentos de rolos em três linhas.

Estes modelos estão mostrados em cortes transversais na figura 33, abaixo. Rolamentos de esfera em uma única linha de anéis giratórios são, normalmente, projetados para transmitir cargas axiais em ambas as direções e, portanto, também são conhecidos como rolamentos de quatro pontos de contatos. Baixas tensões de contato são atingidas quando são feitos raios em cada lado das ranhuras apenas ligeiramente maiores que o das esferas (BURTON et al,2001).

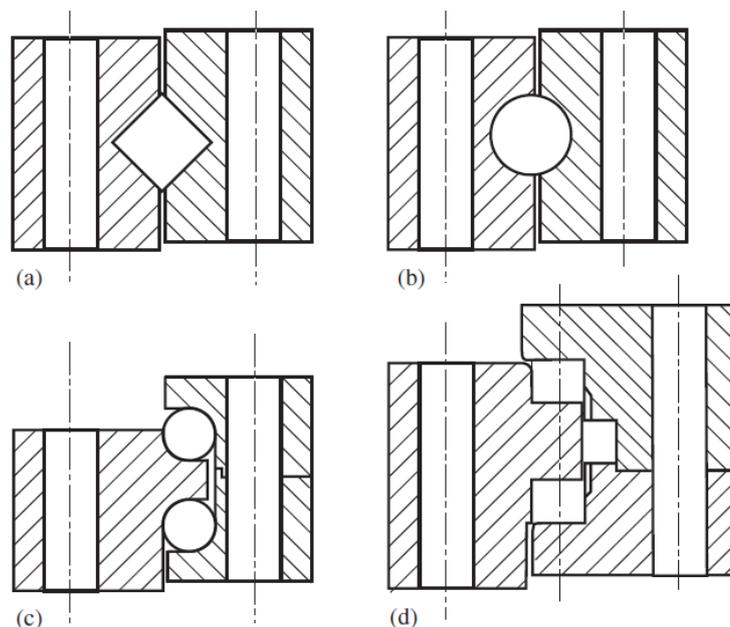


FIGURA 33 – (A) ROLAMENTOS DE LINHA ÚNICA COM ROLOS ALTERNADOS; (B) ROLAMENTOS DE ESFERAS EM LINHA ÚNICA; (C) ROLAMENTOS DE ESFERA EM DUAS LINHAS; (D) ROLAMENTOS DE ROLO EM TRÊS LINHAS.

(FONTE: BURTON et al,2001)

3.4 CUBO DO ROTOR

Sua geometria tridimensional muito complexa favorece ao uso de moldagem em sua produção, com ferro fundido de grafite esferoidal sendo o material mais escolhido.



FIGURA 34 – ROTOR DE UM AEROGERADOR

(FONTE: http://wohnen.pege.org/2006-hannover/enercon-e82_print.jpg)

Dois modelos de cubos para máquinas de três pás são: tri cilíndrico ou esférico. O primeiro se trata de três cascas cilíndricas concêntricas com os eixos das pás, que se alargam onde eles se encontram. Enquanto o esférico consiste numa casca esférica com furos onde serão instaladas as pás. Abaixo seguem a figura dos diagramas referentes aos dois modelos de cubos (BURTON et al,2001).

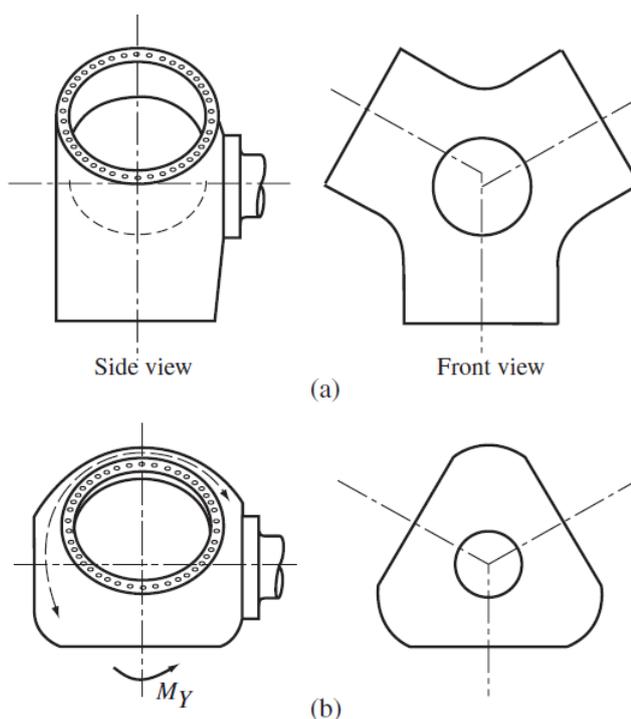


FIGURA 35 -- (A) CUBO TRI-CILINDRICO; (B) CUBO ESFÉRICO

(FONTE: BURTON et al,2001)

A ação estrutural do cubo em resistir a três cargas está descrita abaixo.

1 - Carga impulsiva no rotor simétrico: O momento de flexão da raiz das pás devido à carga impulsiva no rotor põe a frente do cubo em tensão biaxial próximo ao eixo do rotor e a parte traseira em compressão biaxial, enquanto que o próprio impulso gera tensões de flexão fora do plano no invólucro do cubo adjacente à conexão do eixo de baixa velocidade. Os caminhos de carga são fáceis de visualizar neste caso.

2 - Carga impulsiva numa única pá: Isso gera uma tensão de flexão fora do plano na parte traseira do invólucro do cubo e, tensões de tração no plano em torno de uma trajetória curva da carga entre o lado contra o vento do rolamento da pá e o eixo de baixa velocidade de conexão remota da pá (olhar linha tracejada na figura 35(B)). A carga resultante lateral resultará em uma flexão fora do plano.

3 - Momento de gravidade da pá: No cubo tri-cilíndrico, momentos de gravidade iguais e opostos da pá são comunicados através dos invólucros cilíndricos para áreas próximas ao eixo do rotor, em frente e atrás, onde elas se cancelam. É mais difícil visualizar os caminhos das cargas no cubo esférico, como a flexão fora do plano é mais susceptível ser mobilizada.



FIGURA 36 - CUBO DE UM ROTOR

(FONTE: BURTON et al,2001)

A complexidade dos estados de tensão resultantes a partir dos dois últimos tipos de cargas torna a análise de elementos finitos do cubo do rotor mais ou menos obrigatória. No máximo, seis tipos de cargas precisam ser analisadas, o que corresponde à aplicação separada de momentos sobre os três eixos e forças através dos três eixos de uma única interface cubo/pás. Então a distribuição de tensão do cubo devido a combinações de cargas em diferentes pás pode ser obtida por superposição (BURTON et al,2001).

As tensões críticas para o projeto do cubo são as tensões internas ou externas das superfícies do plano do cubo, onde atingem o máximo devido à flexão no invólucro. Para qualquer local no cubo, são definidos por três quantidades em cada superfície: as tensões no plano direto em duas direções em ângulos retos e a tensão de cisalhamento no plano. Geralmente estas tensões não irão variar em fases uns com os outros, então a principal direção da tensão irá mudar, complicando a avaliação da fadiga (BURTON et al,2001).

Ainda não se conhece um procedimento para o cálculo da acumulação de danos devido à flutuação de tensões multiaxiais, embora os seguintes métodos venham sendo utilizados mesmo conhecendo suas imperfeições. Todos servem para uma ou mais

séries de ciclos de tensões repetidas ao invés de flutuações de tensões aleatórias devido a uma carga turbulenta.

Método de cisalhamento máximo: neste método a avaliação da fadiga é baseada na máxima variação de tensões de cisalhamento, calculada a partir de qualquer dos temporais: $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$, $\sigma_1/2$ ou $\sigma_2/2$. O efeito da tensão média é dado pela relação de Goodman:

$$\frac{\tau_a}{S_{SN}} + \frac{\tau_m}{S_{Su}} = \frac{1}{\gamma} \quad (15)$$

Onde τ_a é a tensão alternativa de cisalhamento, τ_m é a tensão de cisalhamento média, S_{SN} é a tensão alternativa de cisalhamento para N ciclos de carregamento da curva do material S-N, S_{Su} é a força de cisalhamento final e γ é o fator de segurança.

Utilizando a equação acima para determinar S_{SN} o número de ciclos permitidos para este intervalo de carregamento pode ser derivado da curva S-N, possibilitando o calculo dos correspondentes danos de fadiga (BURTON et al,2001).

ASME cilindro e método dos vasos de pressão: Similar ao método de cisalhamento máximo, mas a gama de tensão de cisalhamento são baseadas em tensões principais teóricas calculadas a partir das alterações nos valores de σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} através de valores que ocorrem em um dos extremos dos ciclos de tensão. Ou seja, o efeito da tensão não está incluso (BURTON et al,2001).

Método da distorção de energia: Neste método, a avaliação da fadiga é baseada nas oscilações da tensão de Von Mises (BURTON et al,2001). No caso do invólucro do cubo, a tensão perpendicular à superfície do cubo (terceira tensão principal) é igual à zero, de modo que a tensão eficaz é dada por:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2}} \quad (16)$$

3.5 CAIXA MULTIPLICADORA DE VELOCIDADES

3.5.1 INTRODUÇÃO

A função da caixa multiplicadora de velocidades é aumentar a velocidade de rotação do rotor para uma velocidade adequada para máquinas de indução padrão, que no caso operam com uma velocidade fixa ou com máquinas de duas velocidades que operam com uma velocidade muito alta, normalmente 1500 R.P.M (BURTON et al,2001).



FIGURA 37 - GERADOR CONECTADO A UMA CAIXA MULTIPLICADORA DE VELOCIDADES

(FONTE: [HTTP://CRESESB.CEPEL.BR](http://CRESESB.CEPEL.BR))

3.5.2 CARGAS VARIÁVEIS DURANTE A OPERAÇÃO

O torque numa caixa de velocidades irá variar de zero ao valor nominal de acordo com o nível do vento. Caso o freio não seja montado no eixo de baixa velocidade, haverá torques muito grandes e de curta duração. A figura abaixo mostra um gráfico de carga–duração (excluindo o efeito de dinamização e frenagem) para duas máquinas de velocidade fixa, uma com regulada por stall e outra por passo. A curva para a máquina com regulação por stall é calculada pela simples combinação da curva de potencia com a distribuição da velocidade instantânea do vento, que é obtida pela sobreposição da variação de turbulência sobre cada velocidade média do vento na distribuição de Weibull em médias horárias. Valores acima da potencia nominal não estão inclusos (BURTON et al,2001).

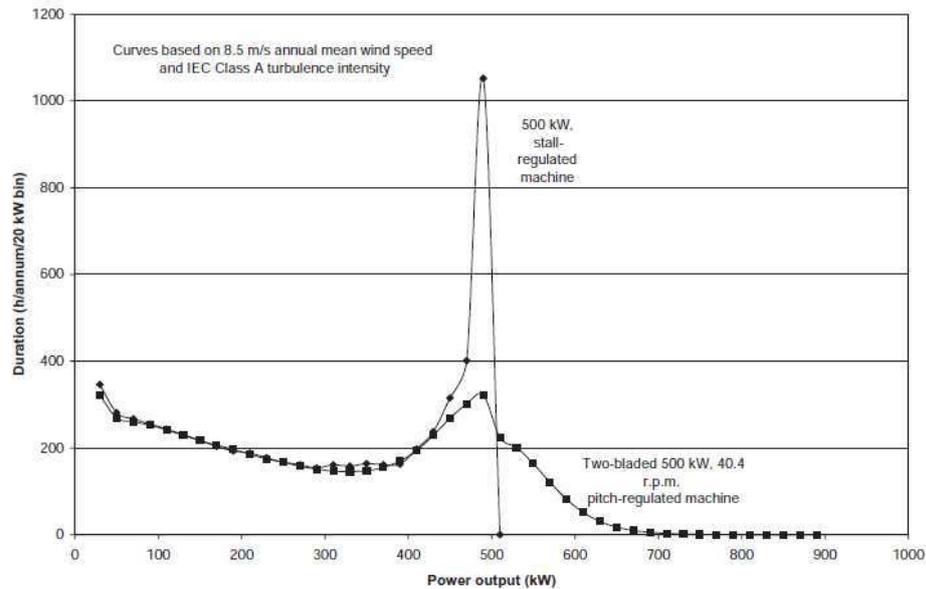


FIGURA 38 - CURVA DE DURAÇÃO DE CARGA PARA MAQUINAS DE 500 KW COM REGULÇÃO DE PASSO E DE DUAS PÁS E 500 KW VELOCIDADE CONSTANTE COM REGULÇÃO POR STALL

(FONTE: BURTON et al,2001)

No caso de uma máquina com regulção de passo, o sistema de controle de passo não é concebido para responder às variações de velocidades do vento a uma frequência de passagem da pá ou superior, pois iriam impor cargas excessivas ao sistema de controle. Assim, à frequência da pá, não haverá atenuação das oscilações significativas que ocorrem devido à turbulência.

Assim, a curva de duração da carga de uma máquina com regulção de passo e de velocidade fixa pode ser derivada a partir da distribuição de velocidades de ventos instantâneos abaixo da velocidade média definida (BURTON et al,2001).

3.5.3 SISTEMA DE TRANSMISSÃO DINÂMICO

Todas as turbinas eólicas sofrem variações de torques aerodinâmicos na frequência de passagem da pá e seus múltiplos, e essas oscilações interagem com a dinâmica do sistema de transmissão, modificando os torques transmitidos (BURTON et al,2001). As oscilações do torque podem ser avaliadas por uma análise de modelo de transmissão, compostos pelos seguintes elementos ligados em série:

- Um corpo com a inércia rotacional e amortecimento (rotor da turbina);
- Uma mola de torção (caixa de velocidades);
- Corpo com inércia de rotação (rotor do gerador);

- Amortecedor de torção (modelagem da resistência produzida pelo deslizamento em um gerador de indução);

- Um corpo com inércia rotacional infinita girando a uma velocidade constante (equivalente à rede elétrica).

A inércia, rigidez e amortecimento das molas devem ser encaminhados para o mesmo eixo.

3.5.4 CARGAS DE FRENAGEM

A maior parte das turbinas possui o freio mecânico no eixo de alta velocidade, devido às cargas de frenagem ser transmitidas através da caixa de velocidades. Como o freio mecânico é um dos dois sistemas independentes de frenagem exigidos, então ele deve ser capaz de desacelerar o rotor de uma alta velocidade até a paragem, como no exemplo de uma perda de rede. Isso requer um torque cerca de três vezes maior que o torque nominal.

O freio mecânico só atua sozinho, raramente, nos casos de emergências. Durante as paragens normais, o rotor é desacelerado a uma velocidade muito mais baixa por travagem aerodinâmica, de modo que a frenagem mecânica tem duração bem menor (BURTON et al,2001).

A figura abaixo ilustra o registro do torque do eixo de baixa velocidade durante o desligamento do rotor. O freio mecânico é ativado no momento que o rotor é desligado. O mesmo atinge o seu primeiro pico 2 s após o desligamento (o torque de frenagem não é constante), depois disso ele cai um pouco e em seguida atinge seu máximo antes de parar o eixo de alta velocidade. Após isso, há uma significativa oscilação de torque devido à liberação da excitação na transmissão. Resultados de inversões de torque e impactos de dentes, assim levam algum tempo para se decompor.

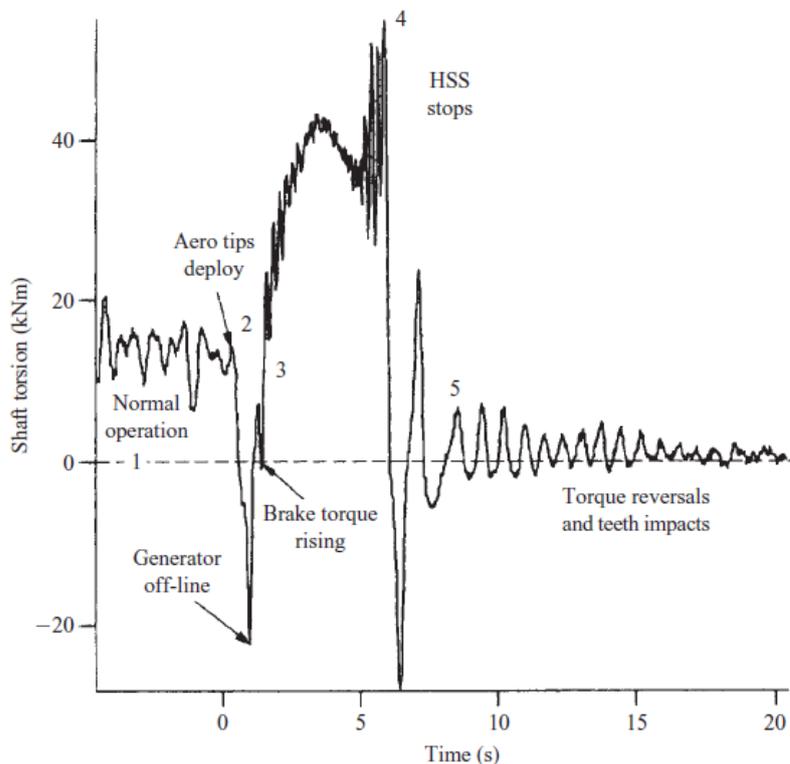


FIGURA 39 -- TORQUE NO EIXO DE BAIXA VELOCIDADE DURANTE UMA FRENAGEM NORMAL

(FONTE: BURTON et al,2001)

Embora as cargas de frenagem sejam de curta duração e pouco frequentes, a sua magnitude mostra que elas podem ter um efeito significativo sobre danos por fadiga.

3.5.5 ARRANJO DAS ENGRENAGENS

Engrenagens podem ser dispostas em um de dois modos em cada estágio da engrenagem. A primeira disposição é a mais simples, onde duas engrenagens de eixo paralelo engrenam uma com a outra dentro de uma fase. Outro modelo, conhecido como epicicloidal, consiste em um arranjo de engrenagens planetárias montadas num suporte planetário em que engrenam a engrenagem solar no interior com a do exterior da coroa circular. A relação de transmissão é maior se a coroa circular for mantida fixa.

O modelo epicicloidal permite que a carga seja dividida entre os planetas, reduzindo a carga nas engrenagens. Assim, tanto as engrenagens quanto a caixa de velocidades podem ser menores e mais leves. A economia de material é maior nas fases de entrada das engrenagens, por isso é comum o uso do arranjo epicicloidal nos dois

primeiros estágios e o de eixo paralelo na saída. Outra vantagem do arranjo epicicloidal é a redução do deslizamento que há entre o anel e os planetas (BURTON et al,2001).

Para que haja, realmente, uma economia de materiais com o uso da caixa epicicloidal, as cargas tem que ser repartidas igualmente entre os planetas. Embora isso seja teoricamente possível através da precisão da fabricação, é desejável introduzir alguma flexibilidade na montagem dos planetas para assumir erros de posição de planetas.

3.5.6 RUÍDOS DA CAIXA DE VELOCIDADES

A principal fonte de ruído da caixa de velocidade são as engrenagens de dentes individuais. Dentes carregados desviam ligeiramente, de modo que se nenhuma correção for feita, os dentes descarregados irão se desalinhar quando entrarem em contato com os carregados, resultando num grande impacto na frequência de alinhamento. Devido a este problema, é uma prática comum ajustar o perfil do dente (geralmente retirando o material das pontas de ambas as rodas dentadas, referida como “alívio da ponta”) para trazer os dentes descarregados o alinhamento. Porém, o nível de carga em uma engrenagem numa turbina eólica é variável, por isso é necessário selecionar o nível de carga em que o alívio da ponta fornece a compensação correta. Se o nível de carga para o alívio da ponta é muito alto, haverá uma excessiva perda dos contatos do dente próximo à ponta de baixa potencia. Enquanto que se o nível de ruído está muito baixo a potencia nominal será muito alta. Contudo, se o ruído da caixa de velocidades é esperado ser mais intrusivo para baixas velocidades dos ventos, quando ele será menos mascarado pelo ruído aerodinâmico, então o baixo nível de compensação de carga será selecionado.

Engrenagens helicoidais são, geralmente, mais silenciosas que as dentadas. Porque a largura do dente entra na engrenagem num intervalo finito de tempo, ao invés de uma vez só. Além disso, o desvio de pico dos dentes na engrenagem helicoidal é menor, porque sempre há, pelo menos, dois dentes em contato. Já as engrenagens epicicloidais são mais silenciosas do que as de eixo paralelo devido ao tamanho reduzido das engrenagens resultarem em baixas velocidades de passo. No entanto, esta vantagem é perdida no caso de uso de uma engrenagem dentada ao invés de uma helicoidal, a fim de evitar problemas com o alinhamento do planeta. Uma maneira de

manter o alinhamento de engrenagens planetárias helicoidais é fornecer coleiras axiais sobre o sol e o anel (BURTON et al,2001).

As seguintes vias são usadas para proliferar o ruído, para o meio ambiente, devido aos dentes das engrenagens:

- Através do eixo diretamente para as pás, que podem irradiar o ruído;

- Através da montagem resiliente da caixa de velocidades para a estrutura de suporte, e assim para a torre que pode irradiar eficientemente, sob algumas circunstâncias;

- Através da montagem resiliente da caixa de velocidades para a estrutura de suporte, e então para a estrutura da cabine, que também pode irradiar;

Se o ruído é um problema, então uma solução é tentar diminuir o nível da fonte de som. Uma solução, descrita acima, é o alívio da ponta e outra é modificar o curso principal do ruído para diminuir a transmissão. Encontrar o curso principal não é tarefa fácil, mas uma maneira é usar a análise estatística de energia (SEA), que é uma combinação de medidas extensivas de campo com modelos teóricos. O caminho pode não ser simples, como em sistemas não lineares, onde um caminho é adotado para baixas velocidades dos ventos e outro caminho crítico para altas velocidades.

O tratamento de um caminho de radiação pode envolver a adição de areia e concreto nas paredes da torre. Alguns tratamentos, como por exemplo, quando a fonte principal de ruído é a pá, pode-se adicionar um material amortecedor dentro dela, porém o mesmo pode ter mais de um efeito, como fortalecer o material, bem como amortecer o mecanismo. Também é frequente o uso de absorventes para amortecer uma determinada frequência (BURTON et al,2001).

3.5.7 CAIXA DE VELOCIDADES INTEGRADAS

As caixas de velocidades integradas devem ser muito fortes, a fim de transmitir as cargas do rotor para a cabine sem se deformar, causando assim, o mau funcionamento das engrenagens. Tendo em vista a forma complexa do invólucro, a distribuição de tensão devido a cada carga é normalmente determinada pelo método da análise de elementos finitos, estes podem ser superpostos em linhas com diferentes combinações de cargas extremas. A análise da fadiga irá exigir a superposição do histórico de tensões resultante de um histórico simultâneo dos impulsos do rotor, momento do mecanismo

de giro e o momento de inclinação devido a simulações para diferentes velocidades do vento (BURTON et al,2001).

3.5.8 LUBRIFICAÇÃO E REFRIGERAÇÃO

A função da lubrificação é manter uma camada de óleo entre os dentes das engrenagens e os elementos giratórios dos rolamentos, a fim de minimizar a corrosão e o desgaste. Diferentes níveis de lubrificação elasto-hidrodinâmica fornecida pela camada de óleo podem ser identificados, dependendo da espessura da camada de óleo. Estas variam de lubrificação hidrodinâmica completa, quando as superfícies metálicas são separadas com uma camada de óleo espessa, lubrificação de fronteira, quando as superfícies ásperas do metal podem ser separadas por uma camada muito fina de óleo. Raspagem, que é uma forma de desgaste adesivo severo devido a transferência de partículas de uma engrenagem para outra, podem ocorrer sob condições limites de lubrificação, são impulsionadas por altas cargas e baixa velocidades linear de passo e viscosidade do óleo (BURTON et al,2001).

Dois maneiras de lubrificação são: respingo de óleo e alimentação pressurizada. No primeiro caso, a engrenagem é mergulhada num banho de óleo e o óleo arremessado no interior do invólucro é canalizado para os enrolamentos. No segundo caso, o óleo circula por uma bomba de veio acionado, filtrado e entregue sob pressão às engrenagens e rolamentos. A simplicidade do respingo de óleo é muito maior do que a alimentação pressurizada, porém a segunda é a preferida pelos fabricantes. Alguns motivos serão citados abaixo:

- O óleo pode ser direcionado para áreas que necessitam de lubrificação;
- Partículas resultantes do desgaste podem ser filtradas;
- A agitação causada pelo banho de óleo pode diminuir a eficiência do mesmo;
- O sistema de circulação do óleo permite a refrigeração do óleo através da canalização por fora da cabine;
- Permite uma lubrificação intermitente.

No sistema de alimentação pressurizada, é uma prática comum o ajuste de temperatura e pressão através de um interruptor localizado a jusante do filtro para evitar altas temperaturas e baixas pressões.

A orientação sobre a seleção do lubrificante, que leva em conta a temperatura do ambiente em que vai ser instalado, é dada no documento AGMA / AWEA (1996). Uma prática comum é o uso de aquecedores quando a turbina inicia-se em baixas temperaturas (BURTON et al,2001).

3.5.9 EFICIÊNCIA

A eficiência da caixa de velocidade pode variar entre 95 e 98%, dependendo do número de eixos paralelos e epicicloidais e como tipo de lubrificação (BURTON et al,2001).

3.6 GERADOR

3.6.1 GERADOR DE INDUÇÃO

Geradores de indução são, geralmente, usados em turbinas eólicas de velocidade fixa, são bastante parecidos com os geradores de indução convencionais das indústrias. Em geral, as únicas diferenças entre uma máquina de indução operando como um gerador e como um motor é o fluxo de potência nos condutores, se o torque é aplicado ou retirado do eixo e se a velocidade do rotor é acima ou abaixo da síncrona. O mercado de motores de indução é muito amplo e, em muitos casos, o projeto do gerador de indução é baseado no mesmo dos estatores e rotores laminados a fim de tirar vantagem da ampla produção. Porém, algumas mudanças são feitas pelos fabricantes, como por exemplo, a mudança da barra do rotor, visto que o gerador da turbina eólica opera em diferentes regimes de ventos, em especial a necessidade de operar com alto rendimento em cargas parciais. Porém, os princípios de funcionamento são os mesmos dos motores de indução convencionais.

A velocidade síncrona é determinada pelo número de polos magnéticos, que variará entre 1800 RPM (4 polos), 1200 RPM (6 polos) ou 900 RPM (8 polos) para a conexão à rede de 60 Hz. Em algumas turbinas eólicas muito grandes, as altas correntes levaram os fabricantes a tomar a decisão de alocar um transformador na cabine. O gerador possui uma proteção física que é para evitar a entrada de umidade, ou seja, é totalmente fechado. Em algumas turbinas eólicas, refrigeração líquida é usada para diminuir a

propagação do ruído no ar. Um alto deslizamento na potência de saída é, frequentemente, solicitado pelo projeto da turbina eólica, aumentando assim o amortecimento no acionamento da turbina eólica, porém causa muitas perdas no rotor (BURTON et al,2001).

A figura abaixo mostra um circuito equivalente de uma máquina de indução que pode ser usado para análise do comportamento estacionário.

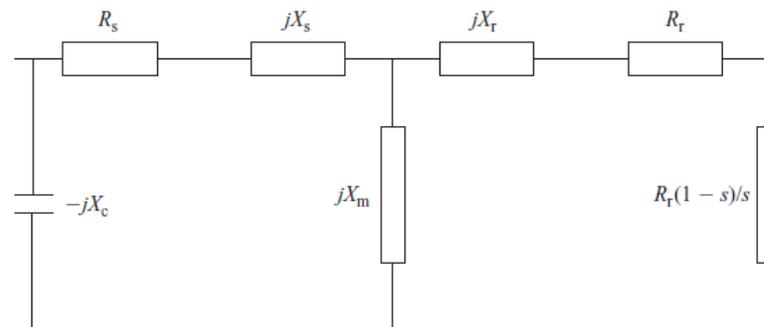


FIGURA 40 - - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO COM CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

(FONTE: BURTON et al,2001)

Sabe-se também que o deslizamento é a diferença da velocidade angular do estator e rotor.

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (17)$$

Assim, se a diferença é positiva, a máquina funciona como motor e se for negativa, como gerador.

Um exemplo da variação da potencia ativa com o deslizamento é mostrado na figura abaixo.

A convenção utilizada é de a corrente fluir para dentro do circuito e a região de operação como gerador é entre os pontos O e A. Para a geração de 1MW, ponto A, o deslizamento é aproximadamente -0,8 por cento, com o rotor girando mais rápido que o campo estator. Pode-se notar que a potencia máxima gerada é, aproximadamente 1,3 MW. Isso porque na representação do gerador, ele foi conectado a rede de distribuição com um baixo nível de curto-circuito (assim, uma alta impedância) e a impedância interna do transformador da turbina é incluso no cálculo. Esta fonte de impedância atua

baixando a máxima potencia que pode ser fornecida antes que o pico da curva seja atingido, acontecendo assim à instabilidade (BURTON et al,2001).

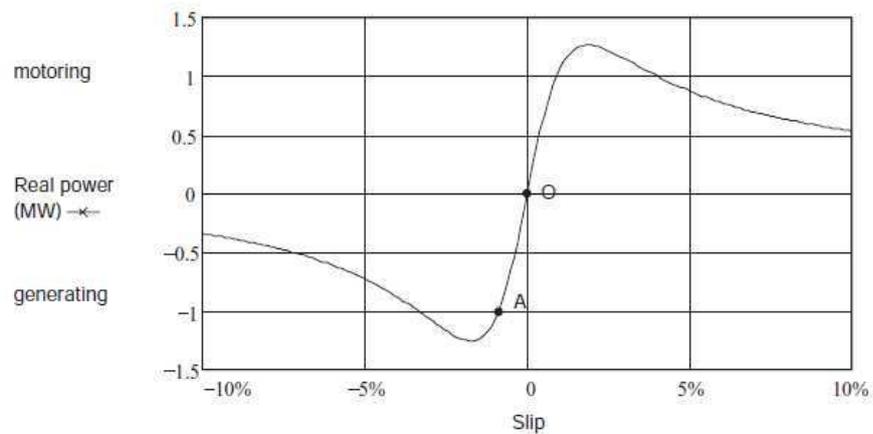


FIGURA 41 – VARIAÇÃO DA POTENCIA ATIVA COM DESLIZAMENTO DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO DE 1 MW

(FONTE: BURTON et al,2001)

A figura abaixo mostra como a potencia reativa consumida pelo gerador varia com o deslizamento. A região operacional de geração é a mesma, O-A. No ponto A o gerador puxa cerca de 600 kVar. Também se observa no gráfico que se a potencia de saída aumenta acima do seu valor nominal, a exigência de potencia reativa aumenta rapidamente.

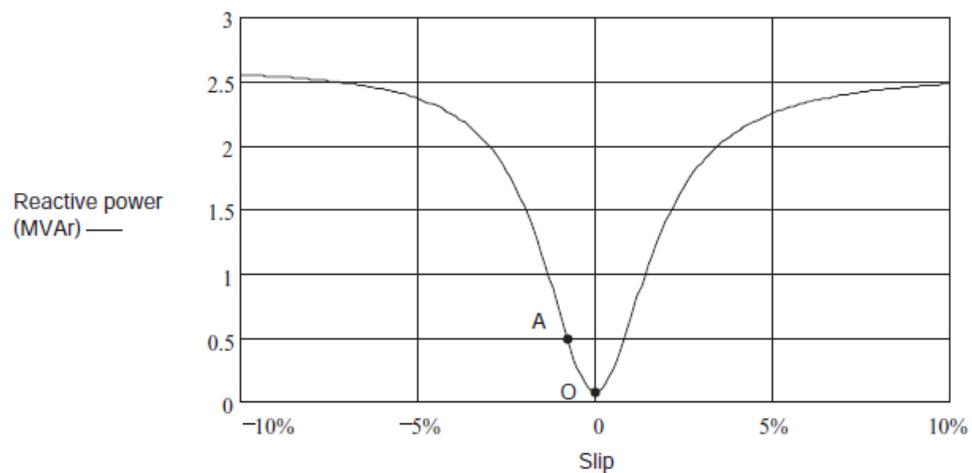


FIGURA 42 - VARIAÇÃO DA POTENCIA REATIVA COM DESLIZAMENTO PARA MÁQUINA DE INDUÇÃO DE 1 MW

(FONTE: BURTON et al,2001)

Combinando os dois gráficos acima, é formado um novo. Este é conhecido como “diagrama circular” de uma máquina de indução e é mostrado na figura abaixo. Mais uma vez a região de geração é entre os pontos O e A. Usam-se capacitores de correção de fator de potencia fixo para reduzir a necessidade de energia reativa e, assim, traduzir o diagrama de círculo do eixo-y à origem.

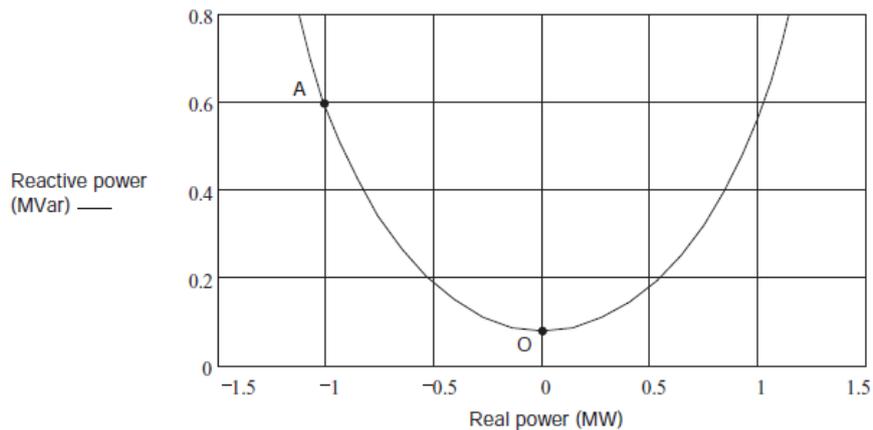


FIGURA 43 - DIAGRAMA CIRCULAR DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO DE 1 MW

(FONTE: BURTON et al,2001)

3.6.2 GERADORES DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Existem duas abordagens fundamentais para sistemas de velocidades variáveis. Ou toda potencia de saída da turbina eólica podem passar pelo conversor de frequência para dar uma ampla gama de variações de velocidades de operação ou uma faixa de velocidades restrita pode ser conseguida pela conversão de apenas uma fração da potencia de saída.

A figura abaixo ilustra como um sistema de geração com uma ampla gama de velocidade variável pode ser configurado. Sistema com uma ampla gama de velocidades variáveis usa uma ponte retificadora de diodos no conversor do gerador e uma comutação natural, tiristor, conversor no lado da rede e fonte de corrente. Assim, conversores de tiristores comutados naturalmente geram correntes harmônicas e consomem potencia reativa. Num fraco sistema de distribuição é difícil proporcionar uma filtragem adequada e correção de fator de potencia para este equipamento. Uma pratica alternativa é usar conversores com duas fontes de tensão com um gerador síncrono ou de indução. O conversor do gerador retifica toda potencia para CC, que

então é invertida pelo conversor de rede. O conversor do lado da rede pode operar em qualquer fator de potência dentro da classificação do equipamento com distorções harmônicas muito baixas (BURTON et al,2001) .

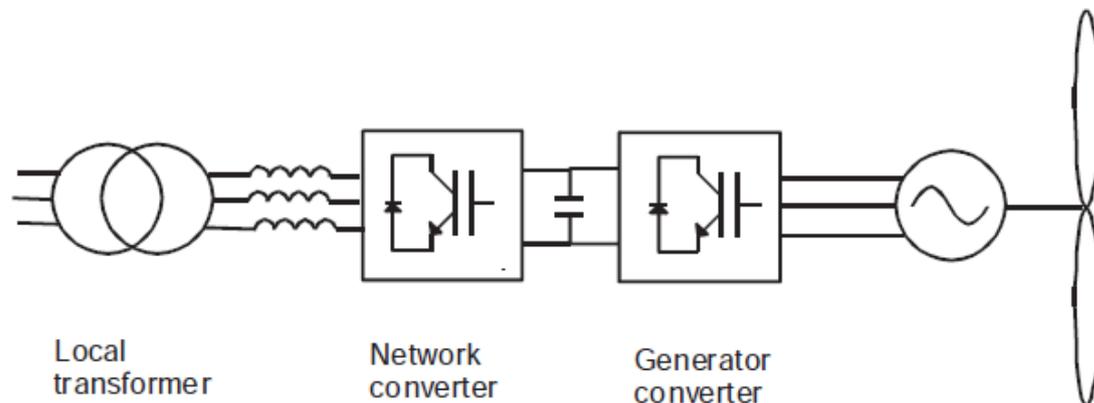


FIGURA 44 - GERAÇÃO COM AMPLA GAMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL

(FONTE: BURTON et al,2001)

A figura abaixo mostra como um sistema de velocidade variável numa banda estreita pode ser implementado. Um gerador de indução com rotor bobinado é usado e o controle é possível para todos os quadrantes de velocidade e torque. O estator do gerador é conectado diretamente na rede com o conversor de frequência no circuito do rotor. Este conceito é conhecido como alimentação dupla e foi usado bastante nos primeiros protótipos das grandes turbinas eólicas no início da década de 80. Naquele tempo eram usados ciclo-conversores para alterar a frequência do circuito do rotor, porém a prática atual, como foi falada acima, é usar dois conversores de fonte de tensão para aumentar a gama de variação da velocidade e diminuir a potência. Uma técnica para o controle é conhecida como técnica de controle vetorial no lado do conversor da máquina para ajustar o torque e a excitação do gerador independentemente. Com a ponte no lado da rede, manterá a tensão CC e fornecerá potência reativa para manter o fator de potência do aerogerador.

Geradores de indução duplamente alimentados vêm ganhando espaço entre as turbinas eólicas de grande porte onde requer os benefícios de uma operação com uma variação de velocidade limitada, porém, com isso, só será possível controlar uma fração de sua potência de saída (BURTON et al,2001).

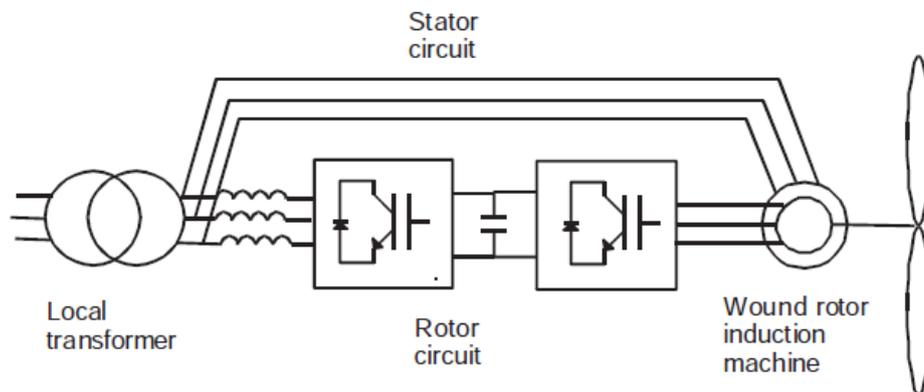


FIGURA 45 - GERAÇÃO COM PEQUENA GAMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL

(FONTE: BURTON et al,2001)

3.7 FREIOS MECÂNICOS

3.7.1 FUNÇÃO DO FREIO

O freio pode ter diversas funções de acordo com a proposta da máquina em questão. A função básica de todo freio é fornecer uma travagem mecânica para o caso de uma necessidade de manutenção, segura, na turbina eólica. O freio também é usado para uma paragem para o caso de uma velocidade acima e abaixo da permitida. O freio aerodinâmico é usado para retardar o rotor inicialmente, então, com o torque bem menor, o freio mecânico é então ativado para uma paragem completa devido a um estado ocioso perigoso da velocidade do vento.

Caso o freio aerodinâmico falhe e o freio mecânico seja solicitado, existem duas maneiras de desenvolvimento para tal. Ou o freio irá atuar devido a uma grande velocidade do vento e uma consequente falha do freio aerodinâmico, ou atuar simultaneamente com o freio aerodinâmico como parte de um processo de desligamento de emergência padrão. A vantagem do primeiro desenvolvimento é que o freio mecânico, raramente, será desenvolvido para esta finalidade. Assim os danos às pastilhas e discos de freio podem ser tolerados quando esta condição ocorre. Adicionando a este fato que a carga de fadiga da caixa multiplicadora será menor caso o freio mecânico seja instalado no eixo de alta velocidade.

O caso mais grave de frenagem de emergência irá surgir com a perda da rede devido a altas velocidades do vento. Para o caso de máquina com regulação de passo o excesso de velocidade máxima irá ocorrer após a perda de rede para a velocidade do vento avaliada devido à taxa de variação do torque aerodinâmico com a velocidade rotacional diminuindo e se tornando negativa para altas velocidades do vento. Por outro lado, se o mecanismo de controle de passo falhar, a função do freio se torna mais severa para altas velocidades dos ventos, iguais ou superiores, à velocidade de corte, devido aos torques aerodinâmicos muito altos, incrementa-se o ângulo de ataque desacelerando o rotor. Para máquinas reguladas por estol, a velocidade do vento crítica é, geralmente, um valor entre o calculado e o de corte (BURTON et al,2001).

3.7.2 FATORES QUE GOVERNAM O PROJETO DOS FREIOS

O torque de frenagem devido a pinças de aperto em um disco de freio, como mostrado na figura abaixo, é o resultado do produto de duas vezes a força da pinça, o coeficiente de atrito (normalmente 0,4), número de pinças e o raio efetivo da pastilha. Pinças com força de travagem de até 500 kN estão disponíveis no mercado. Entretanto, o projeto do freio é limitado por:

- Forças centrífugas no disco;
- Velocidade de atrito da pastilha;
- Potencia dissipada por unidade de área da pastilha;
- Aumento da temperatura do disco.



FIGURA 46 - DISCO DE FREIO E PINÇA PARA O EIXO DE ALTA VELOCIDADE

(FONTE: BURTON et al,2001)

A tensão crítica gerada pela força centrífuga está na direção tangencial para o interior do raio do disco de freio, e é regulada, principalmente, pela velocidade da borda do disco. A velocidade máxima, segura, da borda do disco é, aproximadamente, 90 m/s, para discos fabricados com ferro fundido.

Pastilhas de freio geralmente são fabricadas com metal sintetizado ou um material mais barato a base de resina. As pastilhas de metal sintetizado aceitam uma velocidade de atrito de até 100 m/s. Já para as pastilhas de metal a base de resina só é permitida uma velocidade máxima de 30 m/s. Porém, se a taxa de dissipação de energia por unidade de área é mantida baixa, pode-se ter pastilhas de metal a base de resina com velocidade de atrito de até 105 m/s.

Durante a frenagem, a energia cinética do rotor e do trem de acionamento, juntas com energia de alimentação do torque aerodinâmico são dissipadas em forma de calor pelas pastilhas e freios de disco, resultando numa aumento rápido da temperatura da superfície do disco de freio. A taxa de dissipação de energia é igual ao produto do torque de frenagem com a velocidade rotacional do disco. Assim, nos últimos estágios da frenagem, a taxa de dissipação de energia não sustenta a alta temperatura da superfície e ela começa a decair novamente (BURTON et al,2001).

O coeficiente de atrito para pastilhas a base de resina é constante em torno de 0,4 à temperatura até 250° C, mas começa a cair com a elevação da temperatura, chegando a atingir 0,25 a 400° C. Embora o freio, na teoria possa atingir 400° C, na prática, devido ao torque variável, a temperatura limite é 300° C.

Já o coeficiente para pastilhas a base de metal sintético é, aproximadamente, 0,4 para temperaturas até 400° C, mas os fabricantes especificam que as pastilhas podem atuar, satisfatoriamente, até 600° C numa base de rotina ou 850° C intermitentemente.

Claramente o uso da pastilha de material sintético absorve bem mais energia, porém é um condutor de calor bem melhor do que as pastilhas a base de resina. Assim é frequente o uso de isolamento de calor no projeto das pinças para prevenir sobreaquecimento do óleo no cilindro hidráulico para o caso de pastilhas de material sintético (BURTON et al,2001).

3.7.3 PROJETO DO FREIO PARA O EIXO DE ALTA VELOCIDADE

Um parâmetro chave para a escolha do projeto do freio é o projeto do torque de frenagem. O coeficiente de atrito pode variar acima ou abaixo do valor do projeto devido a fatores como contaminação e estratificação dentro da pastilha. Assim, o projeto do torque de frenagem no valor do atrito nominal deve ser aumentado de um fator do material apropriado. Germanischer Lloyd especifica um fator material de 1,2 para o coeficiente de atrito, e adiciona em outro fator de 1,1 devido a possíveis perdas de força da mola. Caso estes projetos sejam adotados, o projeto do momento mínimo do freio é de 1,78 vezes o máximo torque aerodinâmico, depois de incluir um fator de carga aerodinâmica de 1,35. Uma pequena margem adicional de 5% para garantir que o rotor seja colocado em descanso sem um grande aumento da temperatura no caso do fator de segurança de 1,78 ser completamente erodido (BURTON et al,2001).

3.7.4 PROJETO DO FREIO PARA O EIXO DE BAIXA VELOCIDADE

O projeto de um freio para o eixo de baixa velocidade é bem mais simples que o projeto para o eixo de alta velocidade, devido ao limite da velocidade da borda do disco, velocidade de atrito das pás, potencia dissipada por unidade de área não influenciar o projeto, o qual é somente um torque induzido. O alto torque de frenagem exigido significa que o freio colocado no eixo de baixa velocidade será muito mais robusto do que um com o mesmo dever colocado no eixo de alta velocidade (BURTON et al,2001).

Um estudo realizado por Corbet, Brown e Jamieson, em 1993, que estudaram uma ampla gama de diâmetros de máquinas, concluiu que o custo do freio duplicaria ou triplicaria caso o freio seja colocado no eixo de baixa velocidade. No entanto, quando os custos adicionais associados às caixas de engrenagens, associados com um freio no eixo de alta velocidade foram levados em conta, a vantagem no custo do freio alocado no eixo de alta velocidade desapareceu.

3.8 BASE DE ASSENTAMENTO DA CABINE

A função da base de assentamento da cabine é transferir as cargas do rotor para o rolamento do mecanismo de orientação e proporcionar apoio para a caixa de velocidades e gerador. Normalmente é uma entidade separada, embora em máquinas com uma caixa de velocidades integrada, a carcaça da caixa de velocidades e a base de

assentamento da cabine podem, a princípio, ser uma única unidade. A base pode ser tanto uma superfície soldada consistindo de vigas longitudinais e transversais, ou esculpida para alocar os caminhos de cargas desejados. Um arranjo bastante comum é a fundição em forma de tronco invertido que suporta o eixo de baixa velocidade no eixo frontal e a caixa de multiplicação na parte traseira, com o gerador montado numa plataforma projetada na traseira e fixada na fundição principal através de parafusos.

Embora os métodos convencionais de análise possam ser usados para projetar a base para cargas extremas, sua forma complicada torna essencial uma análise de elementos finitos para o cálculo de concentrações de tensões necessário para o projeto da fadiga. A análise de fadiga é complicada pela necessidade de se levar em conta até seis componentes de carga do rotor. Assim, dada a distribuição de tensões para cada componente de carga obtida por análise separada, o histórico de tensões no tempo pode ser obtido através da combinação dos registros de componentes temporais de carga apropriadamente dimensionados previamente, obtidos a partir de uma simulação de caso de carga (BURTON et al,2001).

3.9 MECANISMO DE ORIENTAÇÃO DIRECIONAL

O mecanismo de orientação direcional é o mecanismo usado para girar a base em relação à torre através de um rolamento de giro, a fim de manter a turbina alinhada com o vento e para destorcer cabos quando eles estiverem muito torcidos. Normalmente consiste de um motor elétrico ou hidráulico montado na cabine, que aciona um pinhão montado no eixo vertical, por meio de uma caixa multiplicadora reduzida. O pinhão engrena com os dentes de engrenagem no anel de rotação fixo, aparafusado, a torre, como mostrado na figura abaixo. Então esses dentes da engrenagem podem estar dentro ou fora da torre, de acordo com o arranjo dos rolamentos. Mas eles estão, geralmente, alocados fora, numa pequena máquina, de modo que a engrenagem não oferece risco à segurança no espaço restrito disponível para o acesso pessoal (BURTON et al,2001).

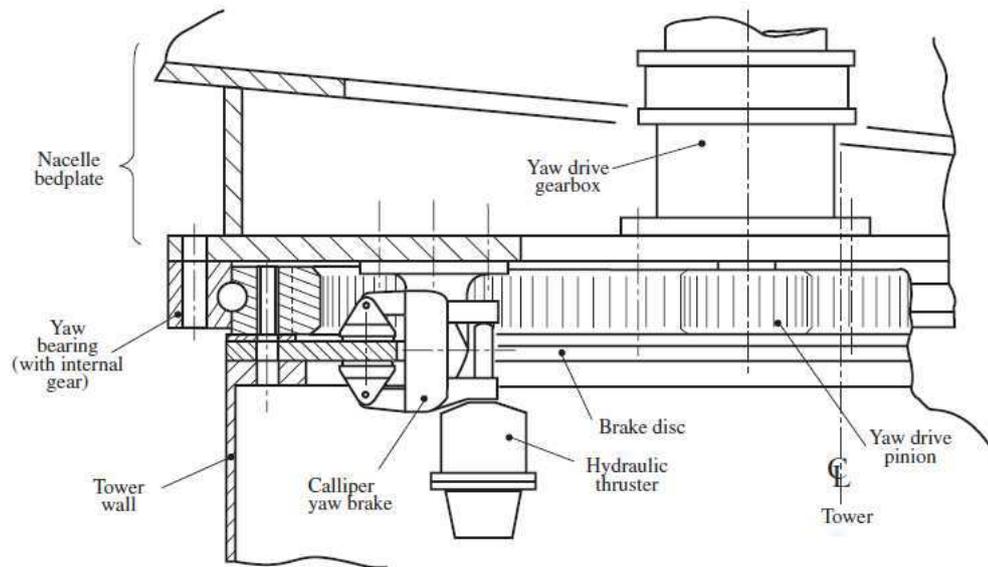


FIGURA 47 - ARRANJO TÍPICO DO MECANISMO DE ORIENTAÇÃO DIRECIONAL

(FONTE: BURTON et al,2001)



FIGURA 48 – MECANISMO DE ORIENTAÇÃO DIRECIONAL

(FONTE: [HTTP://IMPSA.COM](http://IMPSA.COM))

Várias estratégias foram desenvolvidas para tratar do grande momento da orientação direcional que surgem nas máquinas de cubo rígido devido às turbulências. Como se segue:

- O controle direcional fixo: o freio do controle direcional é baseado em uma ou mais pinças que atuam sobre o disco do freio para evitar movimentos indesejados em todas circunstâncias. Durante o controle direcional, os motores que controlam o mesmo se dirigem contra as pinças do freio, que são praticamente dispensadas, de modo que o movimento seja suave;

- Controle direcional com amortecimento por atrito: o movimento do controle direcional é amortecido, por atrito, de três métodos diferentes. O primeiro método é quando se apoia a cabine em cima de pastilhas de freio em repouso em superfícies anelares dispostas horizontalmente no topo da torre. O dispositivo de controle direcional trabalha contra as pastilhas de atrito, que também permite o deslizamento sob cargas extremas. No segundo caso, a cabine é montada sob um rolamento deslizando com um elemento girante convencional e o atrito é aplicado devido a um freio permanentemente aplicado, usando a mesma configuração do controle direcional fixo, mostrado acima. Opcionalmente, a pressão nas pastilhas de freio pode aumentar quando a máquina é desligada devido a altas velocidades do vento. No terceiro caso a cabine é suportada sob um rolamento do tipo rolo giratório de três linhas, mas com rolos substituídos por pastilhas de composto de elastômero para gerar o atrito.
- Controle direcional suave: este é um controle direcional fixo amortecido hidraulicamente. As linhas de óleo de cada lado do motor do controle direcional hidráulico são ligadas a um acumulador por meio de uma válvula de estrangulamento, que permitem o deslocamento amortecido para frente e para trás a fim de aliviar as cargas súbitas.
- Controle direcional com amortecimento livre: um motor hidráulico para o controle direcional é usado como descrito acima, porém as linhas de óleo para cada lado do motor hidráulico são ligadas juntas no circuito via válvulas de estrangulamento, ao invés de serem conectadas a uma fonte de pressão hidráulica. Esse arranjo evita movimentos bruscos em resposta às rajadas de vento, mas depende da estabilidade do controle direcional em uma ampla gama de velocidades do vento. Infelizmente estabilidade para altos ventos é rara.
- Controle direcional livre: é o mesmo que o controle direcional com amortecimento livre, exceto que corrige o controle direcional quando necessário.

Controle direcional com amortecimento por atrito é o mais utilizado.

3.10 TORRE

3.10.1 INTRODUÇÃO

A torre suporta a cabine e eleva o rotor até uma altura em que a velocidade do vento é menos perturbada do que junto ao solo (BURTON et al,2001).

As torres modernas podem ter mais de cinquenta metros de altura, por isso que a estrutura tem ser dimensionada para suportar cargas significativas, bem como para resistir a uma exposição em condições naturais ao longo da sua vida útil, estimada em cerca de 20 anos.

A grande maioria das torres eólicas é de aço. Torres de concreto são viáveis também, exceto para aerogeradores de pequeno porte, que exigem transferência de um elemento substancial de trabalho da fábrica para o local da turbina, que normalmente não é viável economicamente. Então serão tratados os dois modelos de torre de aço: a tubular e a entrelaçada.

Os fabricantes têm-se dividido entre dois tipos de torres: tubulares e entrelaçadas.

3.10.2 TORRE TUBULAR EM AÇO

Na ausência de deformação, uma carcaça cônica, com um ângulo de 45° abaixo da zona crítica de afastamento da ponta, seria a estrutura mais eficiente para transferência de um rotor de eixo horizontal atuando em qualquer direção ao nível do solo. No entanto, além dos aspectos práticos de transporte e montagem, a instabilidade das finas paredes comprimidas da carcaça impede a solução do problema. Nota-se que a fabricação de torres suavemente afiladas só foi possível graças ao desenvolvimento de técnicas de laminação cada vez mais sofisticadas, e que as torres tubulares foram, primeiramente, construídas a partir de uma série de cilindros com diâmetro reduzindo gradativamente com pequenas soldas entre as elas.

Torres cônicas geralmente são fabricadas a partir de uma série de pares de placas formando um tronco e com duas soldas verticais. A altura de cada tronco formado é limitada em dois a três metros pela capacidade de laminação do equipamento. Deve-se

tomar cuidado com as soldas horizontais para minimizar a ocorrência de distorções locais, que enfraquecem a torre (BURTON et al,2001).

Supondo que um projeto de uma torre com conicidade uniforme deve ser feito, os parâmetros-chave para o projeto ser estabelecido são o diâmetro e a espessura da parede para a base da torre. Por outro lado, o diâmetro do topo da torre é determinado pelo tamanho do rolamento do controle direcional, e a espessura das paredes intermediárias pode ser obtida através de interpolação entre o valor da base e um mínimo razoável na parte superior de cerca de um centésimo do raio local.

As principais considerações para a determinação das dimensões da torre são a deformação da parede da carcaça sob compressão, força sob carregamento de fadiga e requisitos da rigidez para atuar na frequência natural (BURTON et al,2001).

Como as máquinas estão cada vez maiores, um aspecto importante que deve ser observado é o transporte da base de suas estruturas. Pois existe um limite do diâmetro para transportes rodoviários no Brasil.



FIGURA 49 - TORRE TUBULAR DE UM AEROGERADOR

(FONTE: <http://robertoacruche.blogspot.com.br/2010/04/primeira-torre-ja-esta-montada.html>)

3.10.3 TORRES ENTRELAÇADAS DE AÇO

Estas torres geralmente são montadas a partir de seções angulares, com elementos de fixação para fixar os componentes de travamento para as pernas e juntar as seções das pernas. Geralmente as torres são quadradas no plano, com quatro pernas, para facilitar a fixação dos membros.

Uma das vantagens das torres entrelaçadas é que a economia do material pode ser obtida através da abertura das pernas, amplamente separadas na base, sem comprometer a estabilidade e causar problemas de transporte.

As cargas nas pernas da torre resultam de momentos de torção, enquanto que as cargas nos membros de suporte resultam da combinação de cargas de cisalhamento e torção na torre. Em cada caso, a torção do membro sob cargas extremas foi considerada, e cargas de fadiga nas junções também. Dois dispositivos são usados para aumentar a estabilidade: membros de suporte são organizados como pares de interseções diagonais, ao invés de usar um único sistema triangular, de modo que a tensão diagonal pode estabilizar a compressão diagonal para cada interseção, e os pontos de interseção das pernas e do suporte em ambos os lados de cada perna são dispostos verticalmente de forma a reduzir o espaçamento do suporte das pernas.

Cargas de fadiga em parafusos são evitadas pelo uso de parafuso de aperto por atrito. Então, usa-se, comumente, a galvanização para evitar a corrosão ao invés de usar a pintura, a fim de atingir um coeficiente de atrito adequado (BURTON et al,2001).



FIGURA 50 - TORRE ENTRELAÇADA DE UM AEROGERADOR

(FONTE: [HTTP://WWW.BRAMETAL.COM.BR/_CONTEUDO/2013/08/NOTICIAS/91-BRAMETAL-FECHA-PARceria-COM-EMPRESAS-ALEMAS-E-VAI-PRODUZIR-TORRES-TRELICADAS-PARA-AEROGERADORES.HTML](http://www.brametal.com.br/_conteudo/2013/08/noticias/91-brametal-fecha-parceria-com-empresas-alemas-e-vai-produzir-torres-trelicadas-para-aerogeradores.html))

3.11 BASE DA TORRE

3.11.1 INTRODUÇÃO

O projeto da base da torre turbina eólica é, em grande parte, impulsionado pelo momento de capotamento da base da torre sob condições extremas de vento. Uma variedade de laje com múltiplas estacas e mono estaca têm sido adotadas para torres tubulares.



FIGURA 51 - PROJETO DA BASE DE UMA TORRE

(FONTE: [HTTP://PINIWEB.PINI.COM.BR](http://piniweb.pini.com.br))

3.11.2 LAJE DA BASE

A laje da base é escolhida quando existem materiais competentes a poucos metros da superfície. O momento de queda da torre resiste por uma reação excêntrica para o peso da turbina, torre, base e sobrecarga (permitindo flutuação, caso o nível da água esteja acima da laje da base). A magnitude do momento de restauração, é limitado pela capacidade de carga do substrato, que determina a largura da área na borda da laje necessária para suportar cargas gravitacionais. Brinch Hansen forneceu simples regras

para calcular a capacidade de rolamento da laje sob essas condições, baseadas no princípio do carregamento uniforme sob a área carregada. Contudo, se o substrato comporta-se elasticamente, a inclinação da laje da base é susceptível de provocar uma distribuição linear de tensões do rolamento sobre a área carregada, de modo que uma abordagem alternativa é a concepção com base no máximo, ao invés do valor médio. As regras adicionais requerem que tensões positivas de rolamento existam ao longo de toda largura da base, quando a turbina estiver em funcionamento, que limita o momento máximo da queda da (BURTON et al,2001).

Quatro modelos de arranjos da laje da base são mostrados na figura abaixo. A figura 52(a) mostra uma laje de espessura uniforme, com a superfície superior um pouco acima do nível do solo, que é escolhida quando o alicerce está próximo à superfície da terra. O principal reforço consiste em esteiras superiores e inferiores para resistir a torções da laje e a laje é feita espessa o suficiente para não ser necessárias armaduras de cisalhamento. Já a figura 52(b) é uma laje montada sob um pedestal. Este modelo é usado quando o alicerce está numa profundidade maior que a espessura da laje necessária para resistir aos momentos de torções da laje e cargas de cisalhamento. A carga gravitacional sobre substrato é aumentada em virtude da camada de terra, de modo que as dimensões totais do plano da laje podem ser reduzidas. Já o terceiro modelo, figura 52(c), é similar ao modelo da figura 52(b), porém pode ter duas modificações que podem ser aplicadas independentemente: substituição do pedestal por uma torre de raiz embutida na laje e introdução da laje profunda e afilada.

Âncoras de pedra eliminam a necessidade de adicionar peso para fins de contrapeso na fundação, e assim permite que o tamanho da fundação seja reduzido, desde que a capacidade de rolamento seja suficientemente alta (figura 52(d)). Necessitam-se de empresas especializadas na instalação da rocha ancora (BURTON et al,2001).

A forma ideal da fundação gravitacional, (porque o peso próprio tem um papel importante na sustentação), é circular, mas tendo em vista as complicações em determinar esta forma, escolhe-se a octogonal.

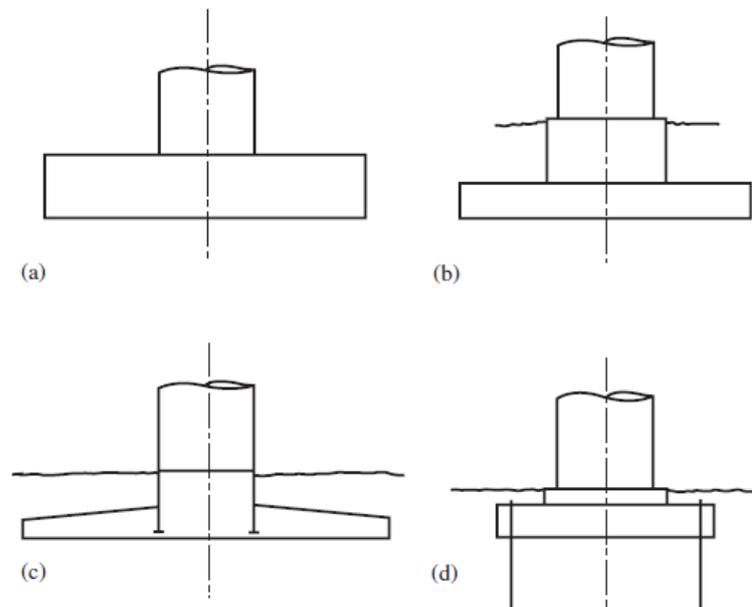


FIGURA 52 -- (A) LAJE PLANA; (B) LAJE SOB PEDESTAL; (C) TORRE EMBUTIDA EM LAJE CÔNICA; (D) LAJE SEGURA POR ANCORAS DE PEDRA.

(FONTE: BURTON et al,2001)

3.11.3 FUNDAÇÃO DE MÚLTIPLAS ESTACAS

Em um terreno mais fraco, uma fundação com estacas, muitas vezes, faz um uso mais eficiente de materiais do que uma laje. A figura 53(A) ilustra uma fundação sob oito estacas cilíndricas arranjadas em forma circular. O capotamento da torre é resistido tanto pelas pilhas verticais quanto pelas cargas laterais, sendo a última gerada por momentos aplicados no topo de cada estaca. Assim o reforço deve estar organizado de modo a providenciar momentos completos entre as estacas e a tampa da estaca (BURTON et al,2001).

3.11.4 FUNDAÇÃO MONO ESTACA DE CONCRETO

A fundação mono estaca de concreto consiste de um cilindro de concreto de amplo diâmetro, que resiste ao capotamento através da mobilização de cargas laterais do solo, figura 53(B). Estas cargas laterais podem ser calculadas para areia usando qualquer teoria de Rankine simples para pressões passivas em paredes, que ignora a fricção solo/parede, ou teoria de Coulomb, que a inclui.

Este tipo de fundação é uma opção atraente quando o lençol freático é baixo e as propriedades do solo permitem que um buraco profundo seja escavado sem as laterais desabarem (BURTON et al,2001). Apesar de ser simples, este método é muito caro em termos de materiais. Um cilindro oco, mostrado na figura 53 (C) usa materiais muito menos extravagantes para substituir o concreto no corpo do cilindro.

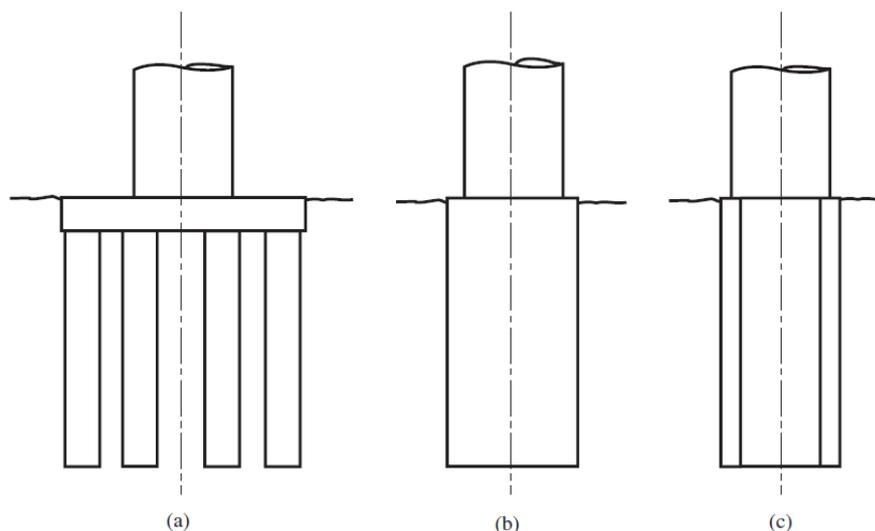


FIGURA 53 – (A) GRUPO DE ESTACAS E TAMPA; (B) MONO ESTACA SÓLIDO; (C) MONO ESTACA OCO.

(FONTE: BURTON et al,2001)

3.11.5 FUNDAÇÃO PARA TORRES METÁLICAS ENTRELAÇADAS

As pernas das torres metálicas entrelaçadas são, relativamente, bastante espaçadas e servem para separar as fundações. Estacas são comumente usadas, ver figura 54. O mecanismo para resistir ao capotamento é simplesmente elevar o peso sob as estacas. Mas as estacas também devem ser concebidas para resistir aos momentos de torções induzidos por uma carga de cisalhamento horizontal. Elevação de estaca é resistida por atrito na superfície das estacas, que depende do ângulo de atrito do solo/pilha e a pressão lateral do solo.

As seções de ângulo, formando a base das pernas das torres são moldadas no local quando o concreto para as estacas é derramado. A estrutura é montada com antecedência, incorporando as seções da base das pernas, de modo que as pernas possam ser definidas no espaçamento e inclinação corretos antes de derramarem o concreto (BURTON et al,2001).

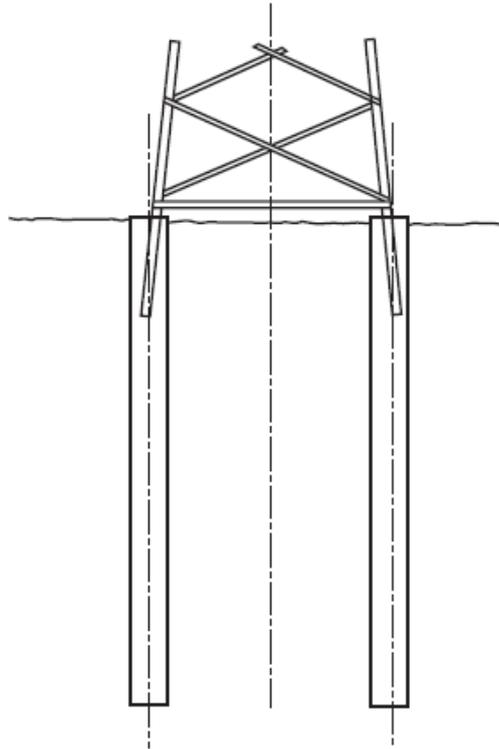


FIGURA 54— FUNDAÇÃO DE ESTACAS PARA TORRES DE METAL ENTRELAÇADAS.

(FONTE: BURTON et al,2001)

4 CONFIGURAÇÕES TÍPICAS DOS SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Da combinação dos sistemas de controle da potência máxima de um aerogerador com os modos de exploração do gerador elétrico, resultam quatro configurações principais que caracterizam a oferta comercial de turbinas eólicas que predominam no mercado desde a década de 80. Estas configurações são, tipicamente, designadas por tipo A, tipo B, tipo C e tipo D. Na tabela abaixo, pode-se observar os tipos.

TABELA 4 – CONFIGURAÇÕES TÍPICAS DOS SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Controlo de velocidade	Controlo de potência		
	Regulação <i>stall</i>	Controlo de <i>pitch</i>	<i>Stall</i> ativo
Velocidade constante	Tipo A (A0)	Tipo A (A1)	Tipo A (A2)
Velocidade variável limitada		Tipo B (B1)	
Velocidade variável		Tipo C (C1)	
		Tipo D (D1)	

(FONTE: RESENDE, F., UNIVERSIDADE DO PORTO)

O conceito de velocidade variável é utilizado pelos tipos B, C e D. Em relação ao sistema de controle da potência máxima, estes sistemas utilizam apenas um mecanismo de controle rápido de ângulo de passo de modo a evitar saída de serviço do sistema com a ocorrência de uma rajada de vento durante a operação à potência máxima. A seguir, as quatro configurações serão explicadas sucintamente.

4.1 SISTEMA DE VELOCIDADE CONSTANTE – TIPO

A

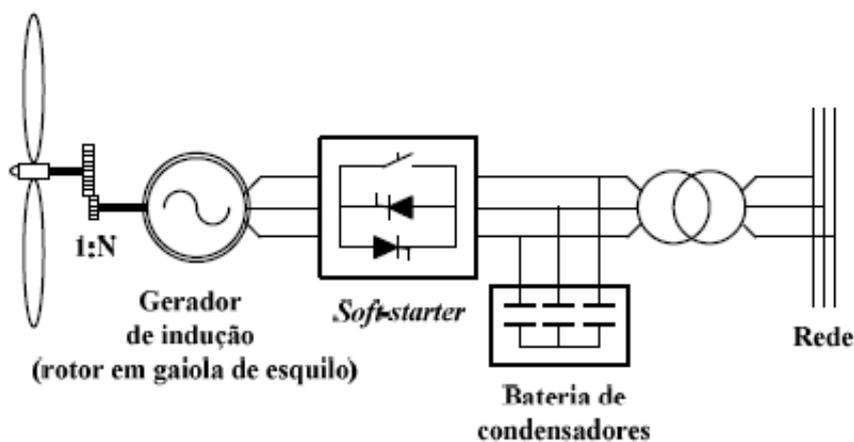


FIGURA 55 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE VELOCIDADE CONSTANTE

(FONTE: RESENDE, F., UNIVERSIDADE DO PORTO)

Este sistema, responsável pelo fornecimento de energia reativa, é equipado com um gerador de indução, onde o rotor é do tipo em gaiola de esquilo diretamente ligado à

rede através de um transformador, pois a velocidade de rotação do gerador (superior à velocidade de sincronismo) é imposta pela frequência da rede, levando em conta o número de polos e o limite de variação do deslizamento que é, em geral, cerca de 1 a 2%. Usa-se também um sistema de arranque suave, conhecido como soft-starter, a fim de limitar a corrente de arranque, visto que sem ele a corrente é muito elevada devido ao esforço realizado. As baterias de condensadores objetivam compensar o fator de potência da máquina e injetar potência reativa. Tendo em vista que a frequência do rotor é quase constante, existe um único ponto em torno do qual o rendimento de conversão é máximo. De modo a aumentar a eficiência do sistema, alguns fabricantes criaram soluções que suportam a operação do sistema a duas velocidades, utilizando um gerador com comutação do número de polos ou dois geradores com números de polos diferentes. Assim, devido ao ajuste da velocidade não ser feito de forma contínua, implica numa elevada carga mecânica no sistema. Pode-se notar que devido à simplicidade, baixo custo e robustez, este modelo foi bastante utilizado nas décadas de 1980 e 1990.

Como observado na tabela 4, apesar do sistema de regulação stall ser mais comum (tipo A0), o controle de pitch (tipo A1) e controle de stall ativo (tipo A2) também têm sido adotado na configuração do sistema de velocidade constante.

4.2 SISTEMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL

LIMITADA – TIPO B

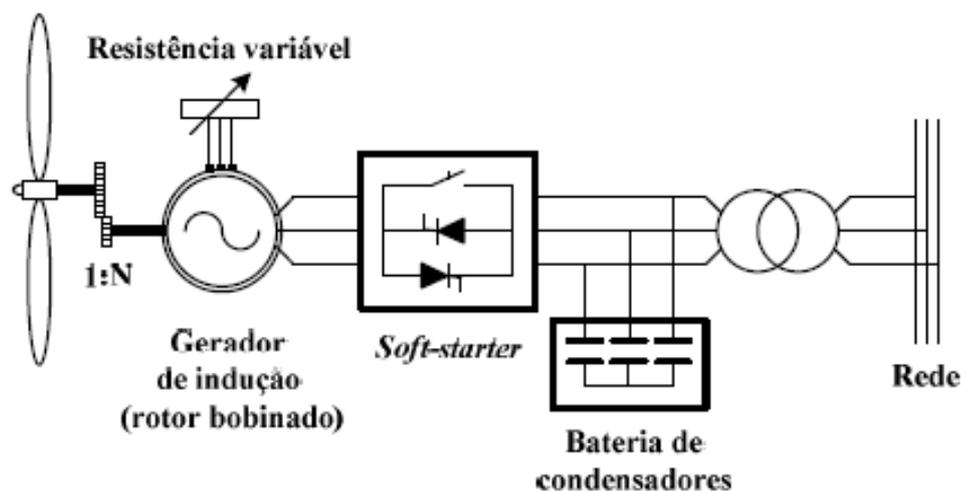


FIGURA 56 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL LIMITADA

(FONTE: RESENDE, F., UNIVERSIDADE DO PORTO)

O conceito do sistema de velocidade variável limitada, que converte variações dos ventos em variações de potência injetada, foi criado com o objetivo de diminuir a carga mecânica do sistema e aumentar a eficiência. Desenvolvido, primeiramente, pelo fabricante dinamarquês Vestas, em meados de 1990. O aerogerador, responsável por fornecer potência reativa, é equipado com um gerador de indução do tipo rotor bobinado, onde o estator é ligado a rede através de um transformador e o rotor é ligado, em série, com uma resistência variável controlada através de um conversor eletrônico de potência de modo a controlar a resistência total do rotor. Assim, é possível controlar a potência extraída do rotor e, como consequência, a variação da velocidade (numa gama limitada de +10% da velocidade de sincronismo) do gerador numa gama limitada pelo valor da resistência adicional. Também conta com o sistema de arranque suave para limitar a corrente de arranque e baterias de condensadores para compensação do fator de potência da máquina e injeção de potência reativa. Mas este sistema possui a desvantagem de ter parte da potência extraída do rotor dissipada sob a forma de calor, na resistência variável.

Este modelo de aerogerador é equipado com controle de passo.

4.3 SISTEMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL COM CONVERSOR PARCIAL – TIPO C

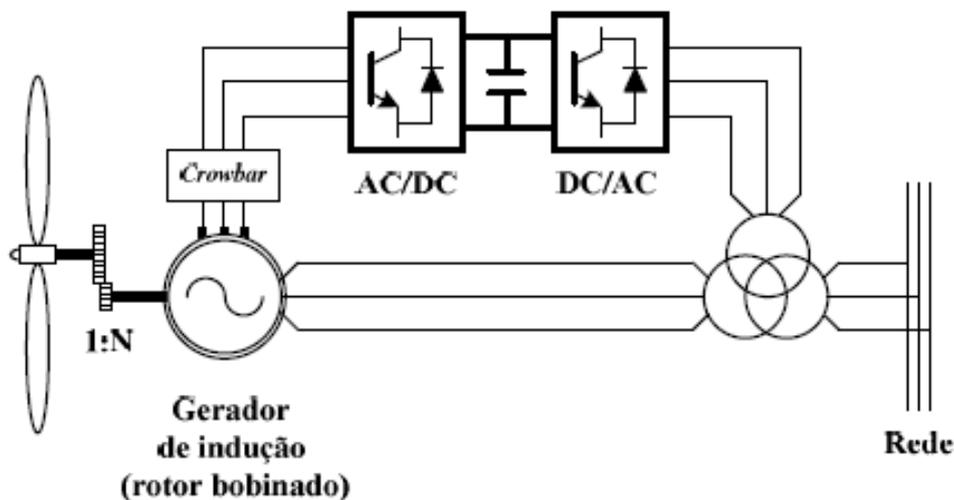


FIGURA 57 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL COM CONVERSOR PARCIAL

(FONTE: RESENDE, F., UNIVERSIDADE DO PORTO)

O conceito de gerador de indução duplamente alimentado, responsável pelo fornecimento de potência reativa, que independe do regime de funcionamento do gerador, e capacidade de sobrevivência às interrupções de tensão, é baseado na utilização da máquina de indução de rotor bobinado onde o estator é diretamente ligado à rede e o rotor é ligado à rede através de um conversor AC/DC/AC, também conhecido com conversor de frequência. Este conversor é responsável pelo desacoplamento entre a frequência da rede e a frequência do gerador, possibilitando um controle sobre a velocidade de rotação do gerador numa gama de variação maior ($\pm 30\%$ em torno da velocidade de sincronismo), de modo a aumentar a eficiência do sistema. A potência extraída do rotor é injetada na rede através de um conversor que possui uma potência limitada a 25 – 30% da potência nominal do gerador; Pelo fato do estator ser diretamente ligado a rede, este conceito é também designado por sistema de velocidade variável com conversão parcial.

Este sistema é vantajoso na perspectiva econômica em relação aos modelos anteriores; melhora a qualidade de energia produzida e controla a potência ativa e reativa. No entanto utiliza anéis coletores para transferir a potência do rotor para o

conversor e, também, conta com um sistema de proteção do conversor (crowbar) contra correntes de defeitos elevadas no rotor.

4.4 SISTEMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL COM CONVERSOR INTEGRAL – TIPO D

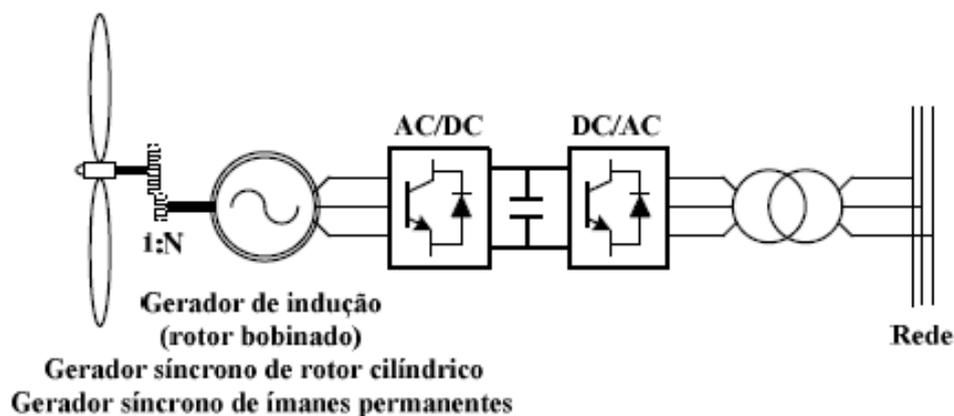


FIGURA 58 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE VELOCIDADE VARIÁVEL COM CONVERSOR PARCIAL

(FONTE: RESENDE, F., UNIVERSIDADE DO PORTO)

Os sistemas de velocidade variável com conversão integral, responsável pelo fornecimento local de potência reativa e capacidade de sobrevivência às interrupções de tensão, podem ser equipados com geradores de indução de rotor bobinado, geradores síncronos de rotor cilíndrico ou de ímãs permanentes, os quais são ligados à rede através de conversores AC/DC/AC, projetados para a potência nominal do gerador. Este conversor assegura o desacoplamento total entre as frequências da rede e do gerador, permitindo, assim, alargar a gama de variação da velocidade de operação do sistema a velocidades de ventos reduzidas.

Esta configuração, cujas variações de velocidade de vento são convertidas em variações de velocidade, permite o aumento da capacidade de injeção de potência reativa, aumento da eficiência, melhoria na qualidade de energia produzida, melhor controle de potência ativa e reativa, e possível ausência de caixa de velocidades, pois utiliza um gerador com um elevado número de polos e baixa velocidade de rotação.

Também dispensa a presença de anéis coletores. No entanto apresenta elevado custo e perdas no conversor de frequência.

5 CONCLUSÃO

Constata-se que o aproveitamento de energia eólica para gerar energia elétrica em larga escala tem sido crescentemente explorado em virtude de diversas vantagens, dentre as principais, podem ser citadas: a fonte primária de energia é inesgotável e gratuita; não gera lixo radioativo; sua operação não emite gases tóxicos; e, não causa impactos ambientais significativos. Estes e outros atrativos característicos de uma fonte alternativa de energia aliados a um potencial pouco explorado e, atual viabilidade econômica, alimenta estimativas de uma participação considerável da geração eólio-elétrica do atendimento da demanda energética mundial.

Pôde-se verificar, através do presente estudo, que a energia eólica vem aumentando sua participação no contexto energético brasileiro e mundial nos últimos anos. O Brasil é um dos países mais promissores do mundo em termos de produção de energia eólica, na avaliação do Global Wind Energy Council, organismo internacional que reúne entidades e empresas relacionadas à produção desse tipo de energia

Tendo em vista a importância dessa fonte de energia renovável, seu crescimento e potencial de energia gerada, estudou-se recursos eólicos, fatores que influenciam a origem dos ventos, aerogeradores, seus principais componentes e modelos e impactos ambientais.

Os aerogeradores ligados à rede apresentaram uma considerável evolução tecnológica nos últimos 30 anos, desde simples aerogeradores com velocidade constante comercializado em massa até o final da década de 1990, até os sistemas de velocidade variável em toda sua gama de operação, que culminaram com o aumento progressivo na capacidade instalada nos sistemas de conversão, na qualidade de energia produzida, na capacidade de controle da potência gerada e no aumento da integração de energia eólica nas redes elétricas.

Na primeira categoria, mencionada no trabalho, a velocidade de rotação da turbina é ditada pela frequência da rede, impossibilitando, assim, o ajuste de velocidade do aerogerador à velocidade do vento e, assim, a operação na eficiência máxima para a maioria dos regimes do vento. Ainda assim, a robustez e o baixo custo dos sistemas de velocidade constante, têm mantido este conceito na oferta comercial de alguns fabricantes.

Nos sistemas de velocidade variável, com a utilização de conversores eletrônicos de potência, pode-se efetuar o desacoplamento entre a frequência da rede e a frequência imposta ao gerador, pela velocidade do vento em conjunto com o controle aerodinâmico da turbina, possibilitando a operação do sistema em uma gama alargada de velocidades. Dessa forma, para os diversos regimes de ventos, a operação do sistema à velocidade variável proporciona um aumento da eficiência de conversão, torna possível o controle da potência ativa, reduz a carga mecânica do sistema, permite a geração local de potência reativa de maneira independente ao regime de carga do gerador e contribui para o fornecimento de serviços de sistemas possibilitando uma melhoria de sua estabilidade. O conceito de velocidade variável tem sido progressivamente adotado pelos fabricantes e, atualmente, integra a maioria da oferta comercial global.

6 BIBLIOGRAFIA

ABNT. (2003). NBR 6028 - Informação e documentação - Resumo - Apresentação. (p. 2). Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT. (30 de 12 de 2005). NBR 14724 - Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação. *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 9). ABNT.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd 2001.

CASTRO, R.M.G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução A Energia Eólica**. Porto, 2003, 70p.

CRESESB. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=231>. Acessado em: 10 de janeiro de 2014, 2001, 605p.

DW. Disponível em: <<http://www.dw.de/mais-barata-energia-e-eolica-registra-expansao-mundial/a-16814392>> Acessado em: 05 de abril de 2014.

JORNAL DA ENERGIA. Disponível em: <http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=8458&id_tipo=3&id_secao=9>. Acessado em 02 de dezembro de 2013,

PINA, A. C.F. R. **Parque Eólico de Videmonte**. Trabalho de conclusão de curso(graduação em engenharia elétrica)- Faculdade de Engenharia FEUP, Universidade do Porto, Porto, 2005-2006.

PORTAL ENERGIA. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/fabricantes-chineses-de-aerogeradores-superam-rivais-no-mercado-mundial/>>. Acessado em: 15 de novembro de 2013.

RESENDE, F.O. Evolução Tecnológica Dos Sistemas De Conversão de Energia Eólica Para Ligação A Rede. Porto, 22-36p.

SUA

PESQUISA

Disponível:<http://www.suapesquisa.com/o_que_e/energia_eolica.htm>. Acessado em: 12 de novembro de 2013.

UDOP. Disponível

em:<<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1110232#nc>. > Acessado em :23 de fevereiro de 2014,

