



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

SAMARA RAFAELLA DE CARVALHO CHAVES



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
O ESTADO DA ARTE DOS AEROGERADORES



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

SAMARA RAFAELLA DE CARVALHO CHAVES

O ESTADO DA ARTE DOS AEROGERADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
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, M. Sc.

Campina Grande
2018

SAMARA RAFAELLA DE CARVALHO CHAVES

O ESTADO DA ARTE DOS AEROGERADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
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 Roberto Silva de Siqueira
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

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

Dedico este trabalho a minha família,
em especial aos meus pais e aos meus dois
irmãos, que sempre me apoiaram e me deram
suporte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que é o meu apoio, que me guia pelos obstáculos ao longo da vida, mesmo que alguns deles me tenham trazido sofrimento.

Agradeço aos meus pais, Leonardo e Sandra, e aos meus dois irmãos, Hugo e Leo, que me deram apoio e incentivo em todas as minhas decisões e que não mediram esforços para que meus sonhos se tornassem realidade.

Sou grata também aos amigos que conquistei durante os anos de graduação, que se tornaram essenciais na minha vida, uma segunda família. Ao professor Leimar que aceitou ser o meu orientador e sempre esteve bastante solícito e prestativo. Agradeço também a Adail e Tchai que sempre dão o seu melhor pra nos ajudar.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.

.

“ A grandeza não consiste em receber honras, mas em merecê-la. ”

Aristóteles.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a evolução tecnológica dos aerogeradores, verificar o estágio de desenvolvimento atual e prospectar a tendência futura, em nível de pesquisa e desenvolvimento, como de inserção no mercado. A esse nível atingido, chama-se estado da arte. Aerogeradores, ou turbinas eólicas, são máquinas que capturam energia cinética do vento e a transforma em energia mecânica, no eixo utilizadas para a geração de energia elétrica através de acoplamento com geradores. Assim, este trabalho possibilita um melhor conhecimento da tecnologia, o entendimento de seu princípio e de seu funcionamento.

Palavras-chave: Aerogeradores, Tecnologia, Energia.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the technological progress and the complexity of wind turbines, which have systems composed of combinations of different engineering areas. Wind turbines, or wind turbines, are machines that capture kinetic energy from the wind and transform it into mechanical energy, are machines used for the generation of electric energy through coupling with generators. Thus, this work allows a better knowledge of the technology, the understanding of its principle and its operation.

Keywords: Wind turbine, Technology, Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Deslocamento das massas de ar na atmosfera.....	17
Figura 2 – Comportamento dos ventos sob influência das características do terreno....	19
Figura 3 – Torre Anemométrica.	21
Figura 4 – Mapa do Potencial Eólico Brasileiro	22
Figura 5 – Capacidade Instalada no Brasil.	23
Figura 6 – Configurações de um sistema isolado	25
Figura 7 – Configurações de um sistema conectado a rede de energia elétrica.	26
Figura 8 – Principais componentes do aerogerador.....	27
Figura 9 – Primeiro moinho de vento na Ilha Porto Santo, 1794.....	30
Figura 10 – Turbina eólica de eixo horizontal Charles F. Bush, 1887.....	31
Figura 11 – Turbina eólica Balaclava, 1931.....	32
Figura 12 – Turbina eólica Smith-Putnam, 1941	32
Figura 13 – Turbina de Savonius.....	34
Figura 14 – Turbina de Darrieus.....	34
Figura 15 – (a) Rotor com uma pá e contrapeso; (b) Rotor com duas pás; (c) Rotor com três pás; (d)Rotor com múltiplas pás	35
Figura 16 – Turbina de eixo horizontal de pequeno porte.....	36
Figura 17 – Regulação por pitch.....	38
Figura 18 – Regulação por stall.....	39
Figura 19 – Rotor em Gaiola	41
Figura 20 – Rotor Bobinado	42
Figura 21 – Esquema Geral do Funcionamento de um Aerogerador	43
Figura 22 – Esquema elétrico de um aerogerador de velocidade fixa.....	45
Figura 23 – Esquema elétrico de um aerogerador de velocidade fixa.....	47
Figura 24 – Características do sistema Tipo A.....	49
Figura 25 – Características do sistema Tipo B	49
Figura 26 – Características do sistema Tipo C	50
Figura 27 – Características do sistema Tipo D.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações típicas dos sistemas de conversão de energia eólica	48
--	----

.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SCIG	<i>Squirrel Cage Induction Generator</i>
WRIG	<i>Wound Rotor Induction Generator</i>
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
MW	Megawatt
kW	Quilowatt
CC	Corrente Contínua
m	Metro
cm	Centímetro
km	Quilômetro
RPM	Rotação por minuto

SUMÁRIO

Sumário.....	12
1 Introdução	13
1.1 Objetivo	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 Estrutura do Trabalho	14
2 Energia Eólica.....	16
2.1 Recursos Eólicos.....	16
2.1.1 Mecanismo de Formação dos Ventos	16
2.1.2 Fatores que Influenciam o Regime dos Ventos	18
2.2 Avaliação do Potencial Eólico	20
2.3 Potencial Eólico no Brasil.....	21
2.4 Sistemas de Geração Eólica	24
2.4.1 Sistemas Isolados.....	24
2.4.2 Sistemas Conectados à Rede Elétrica	25
3 Aerogeradores	27
3.1 Componentes dos Aerogeradores.....	27
3.2 Desenvolvimento Tecnológico dos Aerogeradores.....	29
3.3 Tipos de Aerogeradores	33
3.3.1 Aerogeradores de Eixo Vertical.....	33
3.3.2 Aerogeradores de Eixo horizontal	35
3.4 Mecanismo de Controle dos Aerogeradores	37
3.4.1 Controle Pitch	37
3.4.2 Controle Stall.....	38
3.5 Geradores Elétricos	39
3.5.1 Aerogeradores Assíncronos ou de Indução.....	40
3.5.2 Aerogeradores Síncronos.....	42
3.6 Sistema Elétrico dos Aerogeradores	43
3.6.1 Aerogeradores de Velocidade Fixa	44
3.6.2 Aerogeradores de Velocidade Variável	46
4 Principais Configurações dos Aerogeradores	48
5 Conclusão.....	51
Referências	52

1 INTRODUÇÃO

No final do século XX e início do século atual, a questão energética tem se tornado o foco de debates, devido ao aumento no consumo de combustíveis fósseis no mundo e os impactos ambientais ocasionados pela sua utilização. Existem diversos recursos energéticos exploráveis, sendo que esses recursos podem ser provenientes de fontes renováveis, em que se destacam o aproveitamento da energia eólica, hidráulica, solar e biomassa, ou originários de fontes não renováveis, como petróleo, carvão, gás natural e nuclear.

A utilização de fontes renováveis de geração de energia surge como alternativa para a redução dos impactos ambientais e para o suprimento de uma parte da demanda de energia elétrica. Entretanto, os altos custos tecnológicos agregados às fontes renováveis impedem o crescimento da participação dessas fontes na matriz de energia, tornando algumas economicamente inviáveis. Sendo necessários incentivos governamentais para investimentos em pesquisas.

Entre as fontes renováveis, devido ao seu constante desenvolvimento tecnológicos, a energia eólica vem se destacando como uma ótima possibilidade de geração de energia elétrica em grandes blocos. Podendo vir a concorrer economicamente com fontes renováveis tradicionais.

Os países desenvolvidos foram os impulsionadores dos avanços tecnológicos que permitiram que a energia eólica atingisse o grau de maturidade que apresenta hoje. Além disso, os países em desenvolvimento vêm cada vez mais promovendo o aumento da participação destas fontes nas suas respectivas matrizes de geração elétrica. No Brasil, a energia eólica já possui grande participação em sua matriz de energia, conseguindo até apresentar competitividade frente à fonte hídrica.

A geração eólica possui, atualmente, uma tecnologia que aparenta ser bastante simples. Entretanto, o aerogerador é um sistema bastante complexo, são máquinas utilizadas para a geração de energia elétrica através de acoplamento com geradores.

Entre os avanços neste campo de geração de energia se destacam o aumento da escala dos projetos de geração eólica, para ajudar a reduzir os custos envolvidos, e a mudança de sistemas de velocidade fixa para sistemas de velocidade variável. Portanto, para se obter um produto final viável e competitivo no mercado existente, a pesquisa e análise do estado da arte dos aerogeradores são de grande importância para o projeto em questão.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste relatório é realizar o estudo sobre o avanço tecnológico dos aerogeradores, permitindo verificar o desenvolvimento, comportamento, operação e interação na rede elétrica onde serão conectados. Deste modo, possibilitando um melhor conhecimento da tecnologia, o entendimento de seu princípio de funcionamento e a proposição de novos tipos de controle na tentativa de melhorar alguma característica desejada.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O Realizar o estudo da evolução dos geradores eólicos, dos dispositivos e dos equipamentos que moldam o conjunto de geração; explicitar qual a tecnologia dominante e qual a sua tendência; focalizar os principais centros existentes de desenvolvimento tecnológico.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este relatório apresenta a distribuição seguinte. A seção 1 é a introdução, apresenta a contextualização do trabalho, a definição dos objetivos e a apresentação de sua estrutura.

Na seção 2 é apresentado um retrospecto da cadeia eólica de geração, analisa a formação dos ventos, os diversos tipos, regimes, avalia o seu potencial e divide a geração entre isolada e conectada à rede elétrica.

Na seção 3 será descrito o conceito dos aerogeradores, detalhando sua estrutura, os tipos existentes, o sistema elétrico e o desenvolvimento tecnológico.

Por fim, na seção 4 serão apresentadas as principais configurações dos aerogeradores, sendo o trabalho propriamente dito, analisa os aerogeradores mais utilizados no mercado.

2 ENERGIA EÓLICA

Atualmente, a energia eólica vem ganhando destaque, tendo uma verdadeira evolução, considerada como um tipo de energia bem diferenciado dos demais e que vem indicando resultados significativos de crescimento tanto em países desenvolvidos como em países emergentes.

Uma grande vantagem do uso de eólicas é a possibilidade de um usuário comum gerar sua própria energia, e então diminuir a dependência em relação à energia elétrica fornecida pelas concessionárias, nem ficar à mercê da variação do preço da energia do mercado.

Entretanto, se deve levar em consideração as desvantagens como o barulho gerado e a necessidade de escolha criteriosa do local onde será instalada a eólica. Além disso, esta tecnologia ainda não está totalmente desenvolvida e seu custo ainda é bem elevado, tornando difícil uma população ter seu próprio fornecimento de energia elétrica.

A energia eólica é produzida através da energia cinética dos ventos. Para a produção de eletricidade, o aproveitamento da energia cinética se dá por um processo de conversão de energia utilizando turbinas eólicas acopladas a geradores elétricos.

2.1 RECURSOS EÓLICOS

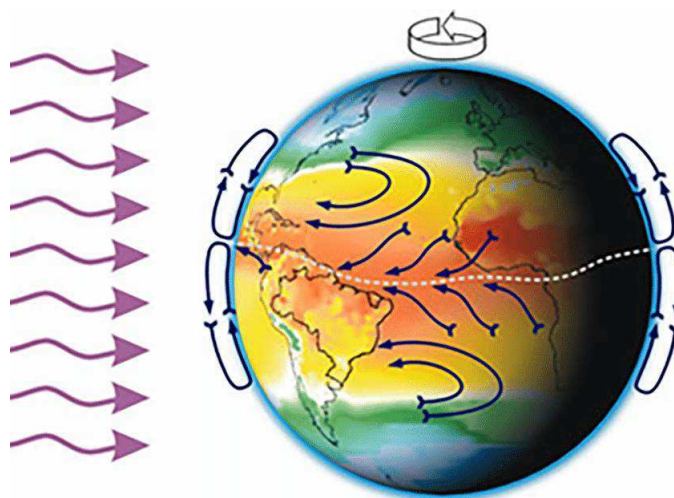
2.1.1 MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS VENTOS

A energia eólica provém da energia solar, uma vez que os ventos são gerados por causa do aquecimento não uniforme da superfície terrestre e esse aquecimento é causado pela radiação solar. As explicações desse aquecimento irregular são o tipo de orientação dos raios solares e a movimentação do planeta.

A rotação do planeta forma um ciclo de aquecimento e resfriamento na superfície terrestre, pois enquanto o sol aquece um lado do planeta, o outro lado é resfriado por radiação térmica enviada para o espaço.

A formação dos ventos é determinada pelo deslocamento de massas de ar. Devido às regiões tropicais serem mais aquecidas por receberem mais radiação solar do que as regiões polares, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir. Assim, esse ar quente é substituído por uma massa de ar frio que se desloca das regiões polares. A Figura 1 mostra esse mecanismo.

Figura 1: Deslocamento das massas de ar na atmosfera.



Fonte: CEPEL, 2001.

Existem locais no planeta que os ventos não cessam em momento algum, nestes locais os mecanismos que produzem os ventos estão sempre presentes. Estes ventos são chamados de ventos planetários ou constantes, sendo normalmente classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em pequenas altitudes;
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os polos, em altitudes elevadas;
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os polos;
- Polares: ventos frios que sopram dos polos para as zonas temperadas.

Tendo em vista que o eixo de rotação da Terra está $23,45^\circ$ inclinado em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição da radiação solar recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre.

Como resultado da inclinação do eixo da Terra, que resulta em um aquecimento diferenciado da superfície, surgem os ventos continentais ou periódicos, que são as monções e as brisas. As monções são ventos que mudam de direção a cada seis meses, aproximadamente, ou seja, no inverno sopram em uma direção e no verão sopram em direção contrária.

Em função das diferentes capacidades que cada tipo de superfície apresenta em refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol surgem as brisas, que são ventos periódicos que ocorrem próximo das regiões litorâneas, e que mudam de direção diariamente.

2.1.2 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.

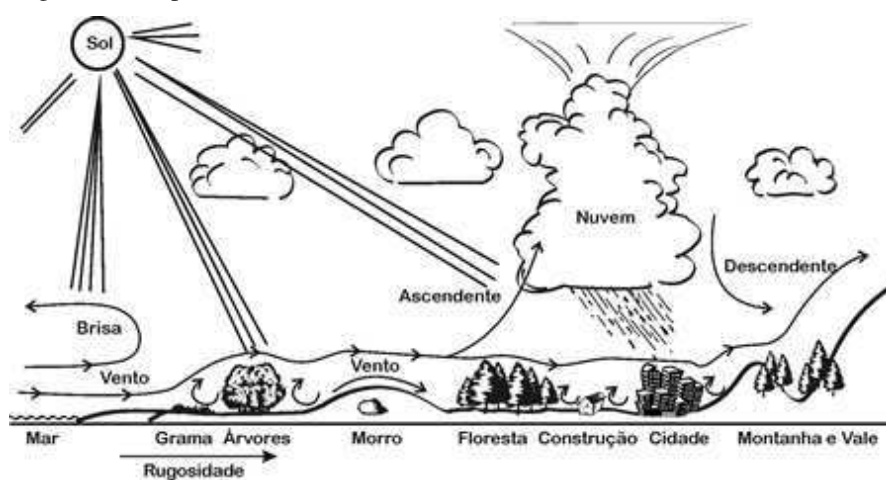
A velocidade do vento pode variar bastante em curtas distâncias, logo, os procedimentos para avaliar o local em que serão instaladas turbinas eólicas deve levar em consideração todos os fatores que influenciam nas condições do vento. Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos destacam-se:

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pelo conjunto de elementos formados por árvores, vegetações e pequenas construções na superfície do solo.

Este conjunto de elementos oferece resistência à passagem do vento, além de desviar a sua trajetória;

- Presença de obstáculos nas redondezas, como pedras, rochas de grandes dimensões, os morros, as edificações e os agrupamentos de árvores de grande altura. Estes obstáculos obstruem o movimento dos ventos e também atuam modificando a sua distribuição e velocidade;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

Figura 2: Comportamento dos ventos sob influência das características do terreno.



Fonte: MOLLY *et al*, 2001.

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. Recomenda-se que a instalação dos sistemas eólicos seja feita em locais mais elevados onde os ventos ocorrem em uma concentração maior.

A direção do vento também é um importante parâmetro a ser analisado, pois a medida da direção do vento auxilia na determinação da localização das turbinas em um parque eólico. Também é importante distinguir os vários tipos de alterações temporais da velocidade dos ventos, como exemplo, as variações anuais, sazonais, diárias e de curta duração.

2.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO

Um fato importante que se deve levar em consideração quanto aos investimentos de parques eólicos, diz respeito aos riscos associados com a oferta e a demanda de energia. Assim, um grande desafio consiste na elaboração de planejamentos para a geração de energia estável e segura.

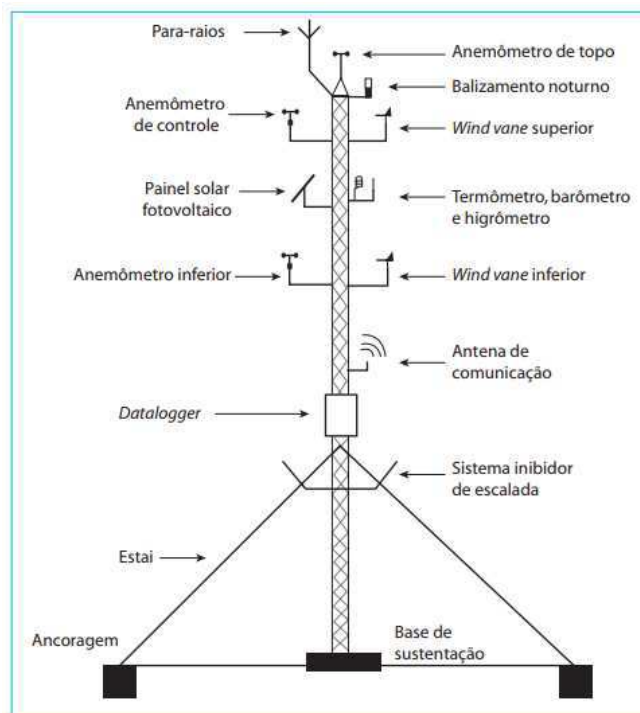
A compreensão das complexas interações e as magnitudes dos fatores de risco, bem como a demanda e as questões de preços, que muitas vezes são exclusivos para cada região, são igualmente importantes. Com isso as indústrias eólicas vêm requerendo maior precisão nas previsões do tempo e com mais resolução espacial e temporal.

Apesar de o vento apresentar uma grande variabilidade espacial e temporal, é importante efetuar rigorosos estudos e avaliações antes de se instalar um parque para fins de produção eólica. Assim a determinação de locais propícios à instalação de fazendas eólicas depende da disponibilidade de observações meteorológicas, realizadas com grande resolução espacial e temporal.

A medição do potencial eólico é de extrema importância para a utilização adequada dos recursos eólicos. Essa medição é feita através de um modelo macro ou mais conhecido por mesoescala.

No modelo mesoescala se utiliza dados de torres anemométricas com alturas entre 10 e 50 m, que se encontram localizadas por uma região e que já possua um histórico de dados da velocidade e direção dos ventos durante um ano para que as torres anemométricas tenham eficiência e qualidade. Os dados medidos são comparados com dados de estações meteorológicas existentes na região. Podem-se ver os equipamentos presentes na torre anemométrica na Figura 3.

Figura 3: Torre Anemométrica.



Fonte: Equipe Grupo SAN, 2017.

Os dados validados são tratados para considerar a influência do relevo e da rugosidade da região utilizando um programa de simulação em mesoescala. Como resultado, são apresentados os regimes de ventos interpolados para o restante da região pretendida, considerando os principais processos físicos que atuam na movimentação da atmosfera da área. Formando, assim, o mapa eólico da região.

2.3 POTENCIAL EÓLICO NO BRASIL

A produção de energia eólica no Brasil vem se expandindo cada vez mais rapidamente ao longo dos últimos anos. No entanto, esse crescimento ainda é bastante limitado.

Um dos fatores limitantes para empreendimentos eólicos tem sido a falta de dados consistentes e confiáveis. Uma parte significativa dos registros anemométricos disponíveis pode ser mascarada por influências aerodinâmicas de obstáculos, relevo e

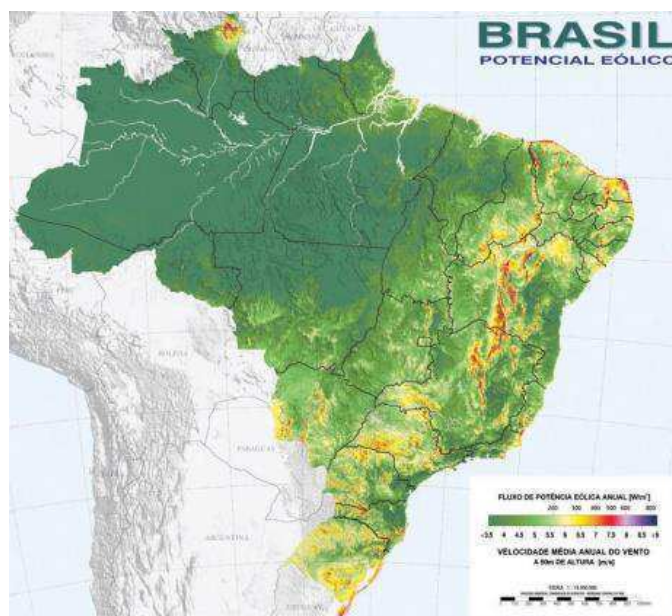
rugosidade. E estes dados são importantes no desenvolvimento da energia eólica no Brasil, que ainda não utiliza deste recurso tão intensamente quanto em outros países.

Existe uma grande área, a maior parte dela nas costas do nordeste, que dispõe de ventos acima de 7 metros por segundo, que propiciam um grande potencial eólico, que não é aproveitada pelo Brasil.

O índice de aproveitamento eólico na matriz energética brasileira é menor que 1%, e esse aproveitamento é muito pequeno se comparado a outros países líderes em geração eólica. A energia eólica só teve seu impulso com o programa do Governo Federal, o PROINFA, que possibilitou a instalação de novos geradores em diversas localidades brasileiras, no litoral nordestino e do Sul.

Praticamente toda energia renovável utilizada pelo Brasil é proveniente de hidrelétricas. Na Figura 4 está mostrando o mapa do Potencial Eólico Brasileiro, ele é usado para fornecer dados para a identificação de possíveis locais para o uso da energia eólica.

Figura 4: Mapa do Potencial Eólico Brasileiro.



Fonte: AMARANTE, 2001.

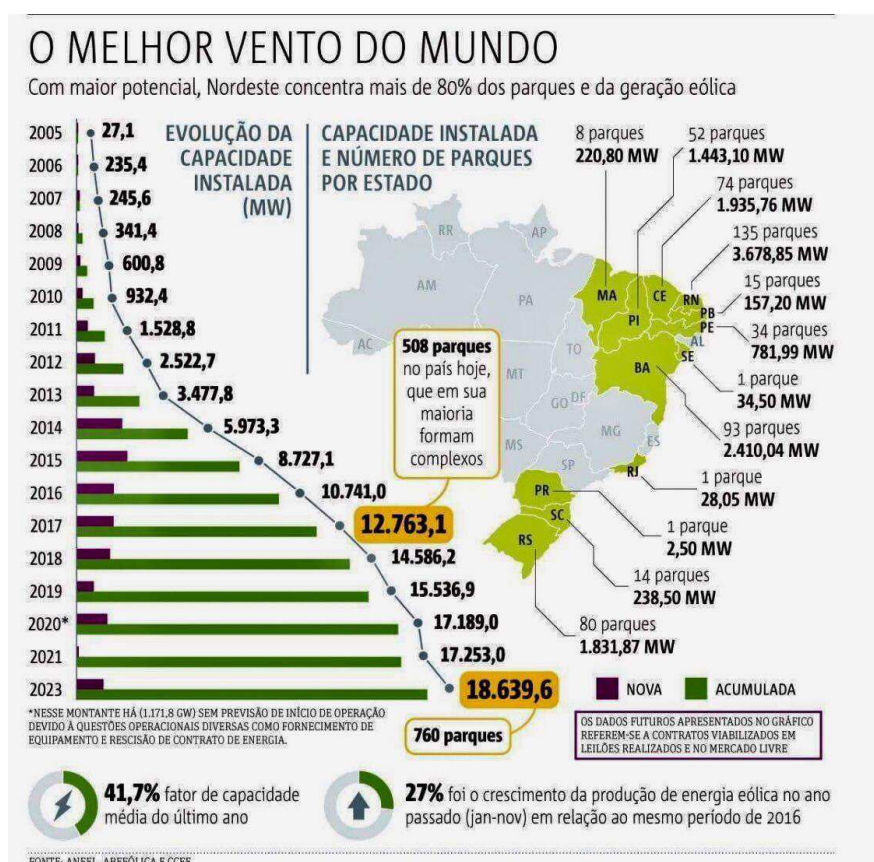
Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente

consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje a maioria dos estudos indica valores maiores que 60.000 MW.

A energia eólica no Brasil, atualmente, tem capacidade instalada de 12.763 GW, distribuídos por 508 parques eólicos. Esta capacidade é o equivalente a 11% da potência energética total instalada no país, os avanços do país no setor se devem diretamente à boa qualidade dos ventos do Nordeste e do Rio Grande do Sul. O país tem os melhores ventos do mundo para gerar energia, os aerogeradores possuem uma produtividade que costuma ser o dobro da produtividade do restante do mundo.

O Brasil possuía a capacidade instalada de geração de um pouco mais de 27 MW em 2005, e chegou à marca de 5.973 MW em 2014 com 181 parques eólicos instalados. Em 2013 encontrava-se na 13ª posição no ranking dos países com maior produção de energia eólica e atualmente ocupa a 8ª posição desde 2017. Sendo que, cerca de 300 GW podem ser extraídos no território nacional e a expectativa é de que chegue a quase 20 GW em 2023, como se pode ver na Figura 5.

Figura 5: Capacidade Instalada no Brasil.



Fonte: ANEEL.

Os principais produtores de energia eólica no Brasil são: o Rio Grande do Norte, com 3.679 MW e 137 parques; a Bahia, com 2.410 MW e 100 parques; o Ceará, com 1.936 MW e 75 parques; o Rio Grande do Sul, com 1.832 MW e 80 parques; e o Piauí, com 1.443 MW e 52 parques.

Apesar do Nordeste e do Sul dominarem a produção, justamente devido à melhor condição climática, todo o país tem potencial para a geração de energia eólica. Produzir energia com um custo mais barato é um fator que faz a diferença nos leilões promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), visando o fornecimento para o Sistema Interligado Nacional (SIN).

2.4 SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA

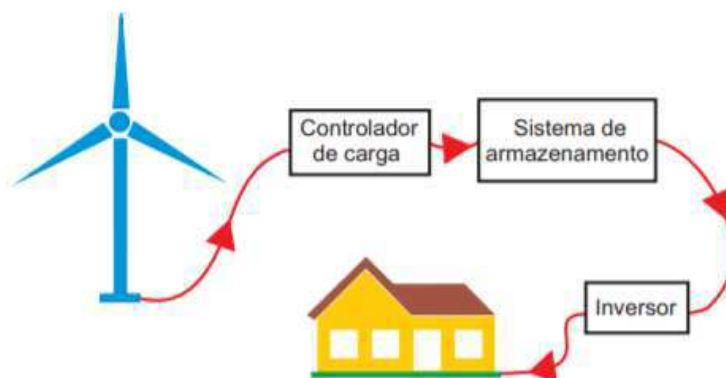
Os sistemas de geração eólica podem ocorrer de duas maneiras, sistemas isolados ou sistemas conectados à rede elétrica.

2.4.1 SISTEMAS ISOLADOS

O sistema isolado consiste basicamente do gerador eólico, um regulador de carga e um sistema de armazenamento de energia. O elemento armazenador se faz necessário para que a energia exigida pela carga seja fornecida mesmo em momentos com pouco ou nenhum vento. A inconstância dos ventos faz com que a autonomia do sistema seja dada pelo tempo que o banco de baterias sozinho é capaz de suprir a demanda da carga.

Geralmente o controlador de carga é composto por um retificador passivo e um conversor CC-CC, sendo este responsável por controlar o fluxo de potência do aerogerador para as baterias. O estágio inversor é responsável por converter a tensão contínua das baterias em alternada para se adequar à tensão exigida pela carga.

Figura 6: Configurações de um sistema isolado.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

2.4.2 SISTEMAS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

As características do circuito de conexão do sistema de geração com a rede de energia elétrica podem variar de acordo com a potência do gerador e dos critérios estabelecidos pela concessionária de energia ao qual o sistema é conectado.

Algumas das especificações definidas pela concessionária estão relacionadas a questões como critérios básicos de conexão, proteção, medição e qualidade de energia. No entanto, a concessionária não se responsabiliza por danos que possam ocorrer no sistema de geração proveniente de defeitos, correntes de sequência negativa excessiva, surtos atmosféricos e outras perturbações.

Em um sistema conectado a rede de energia elétrica o armazenamento de energia não é necessário, a energia necessária para alimentar as cargas é fornecida pelo aerogerador e a rede elétrica supre a demanda quando a energia gerada pelo aerogerador não é suficiente.

Quando a demanda de energia solicitada pela carga seja menor do que a produzida pelo aerogerador, o excedente é entregue à rede. Portanto, este tipo de sistema exige um medidor eletrônico bidirecional para que esta troca de energia entre a rede, a carga e o gerador seja contabilizada.

Figura 7: Configurações de um sistema conectado a rede de energia elétrica.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

3 AEROGERADORES

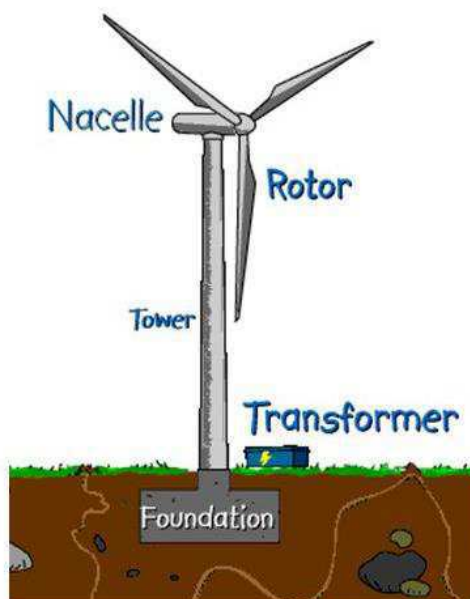
Os aerogeradores são dispositivos mecânicos que captam a energia do vento através de pás projetadas aerodinamicamente e as convertem em potência mecânica rotativa. O desenho aerodinâmico dessas pás é responsável pela eficiência na interação com a massa de ar e captação de energia.

A força do vento gira as pás que propulsionam o rotor, este se conecta com o eixo principal que move o gerador. Dentro da turbina há um multiplicador de velocidade que gira o rotor a 1.500 giros por minuto, isso permite que o gerador produza eletricidade que é enviada por cabos que descem pelo interior da torre e se conectam com a rede de energia.

3.1 COMPONENTES DOS AEROGERADORES

De uma forma geral, um aerogerador é constituído por três partes fundamentais, como se pode ver na Figura 8.

Figura 8: Principais componentes do aerogerador.



Fonte: IFRN, Prof. Gustavo F. de Lima.

○ TORRE DE SUPORTE

A torre apresenta uma forma tubular e suporta a cabina de modo a elevar o rotor da turbina a uma altitude em que o vento apresenta as características adequadas para seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema, em geral as torres são fabricadas de metal (treliça ou tubular) ou de concreto, e podem ser ou não sustentadas por cabos tensores.

○ CABINA (NACELE)

É a carcaça montada sobre a torre, onde se situam os sistemas de controle, medição e de transmissão mecânica, o gerador elétrico e o mecanismo de orientação direcional. O gerador elétrico é responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.

A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos.

Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construir os aerogeradores. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessárias para alcançar a elevada rotação dos geradores, utilizam-se geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões.

O mecanismo de controle é responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade e controle da carga. Pela variedade de controles existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).

○ ROTOR

O rotor é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica de rotação. O rotor é onde fixa as pás da turbina ao cubo que é uma estrutura metálica fabricada com aço ou liga de alta resistência situada à frente do aerogerador e acoplada ao eixo que aciona o gerador elétrico.

Os rotores ao extraírem a energia do vento reduzem a sua velocidade, a velocidade do vento frontal ao rotor é maior do que a velocidade do vento atrás do rotor. Além disso, o fato do rotor eólico funcionar em uma faixa limitada de velocidade de vento também irá contribuir para reduzir a energia por ele captada.

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice e normalmente compostos de três pás. A quantidade de pás influencia diretamente nos estudos aerodinâmicos, custo de produção e capacidade de captação de energia.

Em casos extraordinários podem ser compostos por uma ou duas pás onde exista a disponibilidade de ventos com velocidades médias muito altas e também onde exista a possibilidade de geração de ruído acústico mais elevado sem que tal seja um incômodo.

Na projeção das pás, a forma da pá e o ângulo de ataque em relação à direção do vento têm influência determinante. A seleção dos materiais utilizados na construção das pás trata-se de uma operação delicada, em que critérios como o peso, robustez e resistência à fadiga são fatores significativos.

3.2 DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DOS AEROGERADORES

O aproveitamento da energia eólica vem desde a antiguidade com a necessidade cada vez mais de ferramentas para auxiliar nas diversas etapas do trabalho agrícola. Assim, foi desenvolvida uma maneira de converter uma forma de energia primária em energia mecânica através da utilização dos moinhos de vento. Tarefas como o

bombeamento de água a moagem de grãos, que exigiam bastante esforço braçal ou animal, foram beneficiadas.

Os primeiros moinhos de vento eram formados por um eixo vertical acionado por uma longa aste presa, onde a força motriz era homens ou animais caminhando em uma gaiola circular. Esse sistema foi aperfeiçoado com a substituição da força motriz humana ou animal pela utilização de cursos d'água e do vento.

Figura 9: Primeiro moinho de vento na Ilha Porto Santo, 1794.



Fonte: CEPEL, 2008.

Com a utilização de cursos naturais de rios como força motriz, surgiram as rodas d'água. Porém, já que não havia rios em todos os lugares para o aproveitamento das rodas d'água, o vento tornou-se uma fonte natural de energia, sendo a força motriz mais utilizada.

Mesmo com sua baixa eficiência, os primeiros moinhos de vento apresentavam vantagens notórias para o desenvolvimento das necessidades básicas na agricultura. Deste modo, esse sistema foi se aprimorando cada vez mais, um importante melhoramento da tecnologia primitiva foram os modelos utilizando velas de sustentação em eixo horizontal.

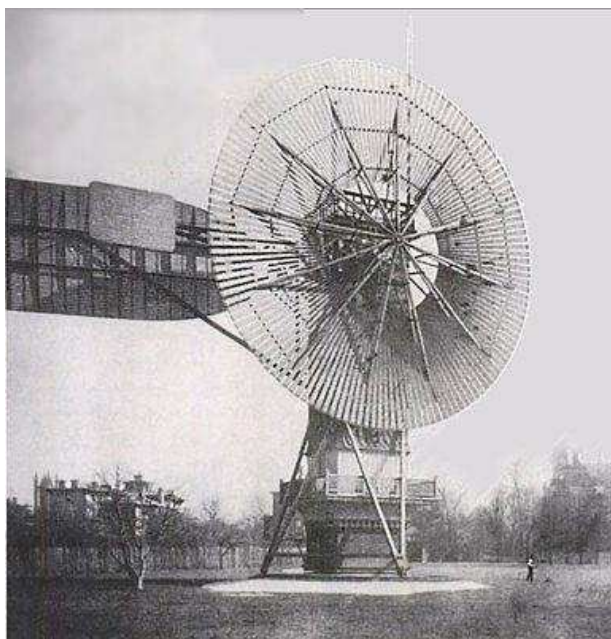
Com a Revolução Industrial, surgiram as máquinas a vapor, dando início ao declínio do uso do vento como força motriz. Porém, para não ocorrer à extinção dos moinhos de vento, alguns países investiram na melhoria de desempenho e de uma

utilização mais efetiva deles. Logo, se desenvolveu um sistema de múltiplas pás de fácil operação e manutenção.

O crescimento da demanda de consumo de energia elétrica motivou a aplicação dos princípios básicos de funcionamento dos moinhos de vento para a produção de energia elétrica. Charles F. Bush, em 1887, que era um industrial voltado para eletrificação em campo, colocou em funcionamento a primeira turbina eólica.

A primeira turbina eólica possuía um rotor de 17 m de diâmetro constituído por 144 pás de madeira em uma torre de 18 m de altura, fornecendo uma potência nominal de 12 kW. Sendo sustentado por um tubo metálico central de 36 cm que possibilitava o movimento de rotação acompanhando o vento predominante.

Figura 10: Turbina eólica de eixo horizontal Charles F. Bush, 1887.



Fonte: CEPEL, 2008.

O sistema de múltiplas pás se adaptou facilmente as condições agrícolas, com uma estrutura feita de metal e o sistema de bombeamento constituído por bombas e pistões.

Em 1931, foi desenvolvido um modelo de turbina eólica de grandes dimensões para a produção de energia elétrica, o aerogerador Balaclava de 100 kW. Conectado a uma usina termelétrica de 20MW, por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km.

O sistema de controle e o gerador se localizavam no alto da torre de 30 m de altura. A rotação era controlada pela variação do ângulo de passo das pás e o controle da posição era feito através de uma estrutura em treliças inclinadas.

Figura 11: Turbina eólica Balaclava, 1931.



Fonte: CEPEL, 2008.

No ano de 1941, foi criado o modelo Smith-Putnam, possuindo um rotor de duas pás de aço, diâmetro de 53,3 m, com peso de 16 toneladas e altura de 33,5 m. O modelo era equipado com um gerador síncrono de 1250 kW com rotação constante de 28 rpm, funcionando em corrente alternada e diretamente conectado a rede elétrica.

Figura 12: Turbina eólica Smith-Putnam, 1941.



Fonte: CEPEL, 2008.

Com o final da Segunda Guerra Mundial, os combustíveis fósseis e as grandes usinas hidrelétricas se tornaram mais competitivos economicamente, devido à descoberta de novas reservas. Deste modo, a construção de aerogeradores se tornou algo relevante apenas para fins de pesquisa nessa época.

Porém, através do desenvolvimento tecnológico, estimulado por mecanismos institucionais de incentivo, hoje tornou possível o surgimento de técnicas de construção de aerogeradores permitindo o aumento da potência nominal unitária.

O aumento da potência nominal unitária dos aerogeradores melhora o aproveitamento das infraestruturas elétricas e de construção civil, reduzindo de maneira significativa o custo do kW instalado. A tecnologia da energia eólica se tornou uma tecnologia madura, o aproveitamento da energia eólica apresenta uma escala significativa em termos de geração, eficiência e sustentabilidade.

3.3 TIPOS DE AEROGERADORES

Vários tipos de turbina já surgiram ao longo do desenvolvimento tecnológico dos aerogeradores. As turbinas eólicas são classificadas quanto à sua forma construtiva e a sua potência nominal.

3.3.1 AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL

Os rotores de eixo vertical têm a vantagem do gerador e a transmissão serem instalados no solo. Outra vantagem é que não necessitam de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto. Sendo os principais tipos de rotores de eixo vertical turbina de Darrieus, turbina de Savonius e turbinas com torre de vórtices.

A turbina de Savonius é utilizada em bombeamento e moagem por ter uma velocidade do rotor baixa. É uma turbina que possui possibilidade de controle de torque com regulação da passagem de ar entre as pás e que utiliza um rotor que não é estritamente de arraste, mas tem a característica de pá com grande área para interceptar o vento.

Figura 13: Turbina de Savonius.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

Porém, possuir características de pá com grande área significa mais material e problemas com a força do vento com grandes velocidades. As vantagens dessa turbina é que é uma turbina fácil de ser construída.

A turbina de Darrieus possui rotores com uma alta velocidade, são rotores movidos por forças de sustentação, formados por lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico e atadas pelas duas pontas ao eixo vertical.

Figura 14: Turbina de Darrieus.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

3.3.2 AEROGERADORES DE EIXO HOZIRONTAL

Os rotores de eixo horizontal são os mais utilizados no mercado, principalmente nas instalações de maior potência para produção de energia elétrica, onde o gerador é instalado no alto junto à turbina.

São rotores movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação e forças de arrasto. As turbinas de eixo horizontal precisam se manter perpendiculares à direção do vento para capturar o máximo de energia possível.

Os rotores que giram predominantemente sobre o efeito de forças de sustentação permitem liberar uma potência maior do que aqueles que giram sobre o efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento. Tais rotores podem ser constituídos por uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás, mostrados na Figura 15.

Figura 15: (a) Rotor com uma pá e contrapeso; (b) Rotor com duas pás; (c) Rotor com três pás; (d) Rotor com múltiplas pás.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Adaptada Google Imagens.

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode se encontrar a jusante do vento ou a montante do vento. Quando o disco varrido pelas pás está à jusante do vento, a sombra da torre provoca vibrações nas pás. E quando está a montante do vento, a sombra das pás provoca esforços vibratórios na torre.

Sistemas a montante do vento necessitam de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento, enquanto nos sistemas a jusante do vento a orientação se realiza automaticamente.

Figura 16: Turbina de eixo horizontal de pequeno porte.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

3.4 MECANISMO DE CONTROLE DOS AEROGERADORES

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência a potência nominal do aerogerador, controle estol (Stall) e controle de passo (Pitch). Os primeiros aerogeradores utilizavam o controle stall simples, entretanto, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão optando pelo sistema de controle pitch, que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas.

3.4.1 CONTROLE PITCH

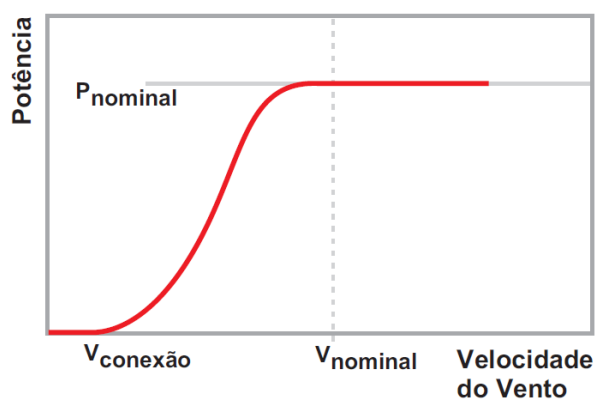
O controle de pitch é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal.

Portanto, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque e esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e 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.

Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície, produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto.

Aerogeradores com controle de pitch têm como vantagens o fato de que permitem controle de potência ativo sob todas as condições de vento e sobre potências parciais, alcançam a potência nominal mesmo sobre condições de baixa massa específica do ar, tem maior produção de energia sob as mesmas, possuem partida simples do rotor pela mudança do passo, possuem fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor, as cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal e as massas das pás do rotor menores levam a massas menores dos aerogeradores.

Figura 17: Regulação por pitch.



Fonte: DUTRA, 2008.

3.4.2 CONTROLE STALL

O controle stall 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. Para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o ângulo de passo é escolhido de forma que o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto.

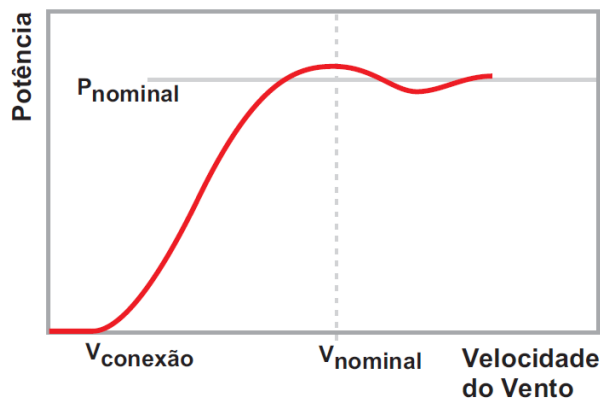
Menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito stall ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito.

Sob todas as condições de ventos superiores à velocidade nominal o fluxo em torno dos perfis das pás do rotor é parcialmente descolado da superfície, produzindo sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas.

Os aerogeradores com controle stall são mais simples do que os aerogeradores com controle pitch, pois não necessitam de um sistema de mudança de passo. Possuindo, em princípio, vantagens na inexistência de sistema de controle de passo, na

estrutura de cubo do rotor ser simples, no custo da manutenção ser menor devido a um número menor de peças móveis e na auto confiabilidade do controle de potência.

Figura 18: Regulação por stall.



Fonte: DUTRA, 2008.

Em ambos os casos de regulação, picos instantâneos de potência podem ser transmitidos ao gerador elétrico por causa de rajadas momentâneas de vento. A escolha de um determinado tipo de regulação de potência está relacionada ao custo/benefício.

3.5 GERADORES ELÉTRICOS

O uso de cada tipo de gerador é função de uma série de fatores que consideram normalmente, as características de amortecimento, a capacidade de consumo e/ou fornecimento de potência reativa, a resposta dinâmica frente a curtos-circuitos, a robustez de sua construção, a possibilidade de projeto e construção de equipamentos com alto número de polos, as dificuldades de sincronismo com a rede elétrica e os custos de aquisição e de operação.

Muitos tipos de máquinas elétricas servem para a função de geradores de turbinas eólicas, contudo, o conceito de geradores elétricos de corrente alternada se consolidou como a alternativa mais adequada.

Os tipos de máquinas elétricas propostos para a utilização em sistemas de geração para aerogeradores são as máquinas de indução em gaiola ou com rotor bobinado e as máquinas síncronas com excitação elétrica ou a ímãs permanentes.

3.5.1 AEROGERADORES ASSÍNCRONOS OU DE INDUÇÃO

Nas máquinas assíncronas o campo magnético é criado por indução eletromagnética. O termo “assíncrono” deriva do fato da velocidade do campo girante no estator ser diferente da velocidade mecânica do rotor. Esses geradores não possuem campo de excitação, mas necessitam de maior torque de partida.

Para o gerador de indução, variações limitadas de rotação são possíveis dentro da margem de escorregamento do gerador. Isto permite maior elasticidade em rotação do que o gerador síncrono, o que reduz tensões mecânicas e flutuações elevadas da potência gerada quando ocorrem rajadas de vento de curta duração. Portanto, ao permitir alguma absorção da energia da rajada de vento na forma de energia cinética pela inércia do rotor são eliminados os problemas de instabilidades em transientes.

Por não ter problemas com sincronismo e produzir eletricidade na tensão e na frequência especificada, se tornaram atrativas para geração em parques eólicos e fazem parte da grande maioria dos projetos de aerogeradores.

A máquina de indução possui uma simetria estrutural com enrolamentos trifásicos em estator e em rotor, essa estrutura se diversifica em rotor e possui duas construções particulares. Essas duas construções particulares são a de rotor em gaiola e a de rotor bobinado.

○ ROTOR EM GAIOLA

O rotor em gaiola é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são inseridas barras de cobre, dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, que curto-circuitam as barras. O rotor em gaiola possui anéis metálicos na tampa e na base, de tal modo a curto-circuitar as barras e permitir a circulação de correntes por elas.

As barras de cobre nem sempre são paralelas ao eixo do rotor, elas podem ser deslocadas ou colocadas segundo um pequeno ângulo em relação a ele para produzir um torque mais uniforme e para reduzir o ruído magnético durante a operação do motor.

O estator do motor é também constituído por um núcleo ferromagnético laminado, nas cavas do qual são colocados os enrolamentos alimentados pela rede de corrente alternada trifásica.

Figura 19: Rotor em Gaiola.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

Um motor de indução com rotor em gaiola se comporta como um transformador, a gaiola forma a bobina secundária de curto-circuito. Sob a influência do campo rotativo magnético alternado gerado pelas bobinas do estator, as correntes de indução começarão a funcionar nos enrolamentos secundários e, devido à força de Lorentz que está integrada entre o campo magnético e a gaiola atual, o rotor começará a girar.

No entanto, a velocidade de rotação do rotor será um pouco menor que a velocidade de rotação do campo giratório magnético gerado pelas bobinas do estator. Se o rotor operasse em sincronia com o campo do estator, não haveria diferença no fluxo ou geração de energia e não haveria força.

○ ROTOR BOBINADO

O motor de indução com rotor bobinado se difere do motor com rotor em gaiola apenas em relação ao rotor. O rotor é composto por um núcleo ferromagnético laminado sobre o qual são alojadas as espiras que constituem o enrolamento trifásico, geralmente em estrela. Os três terminais livres de cada uma das bobinas do enrolamento trifásico são ligados a três anéis coletores.

Os três anéis estão externamente a um reostato de partida, constituído por resistências variáveis ligadas em estrela. Deste modo os enrolamentos do rotor também ficam em circuito fechado. O acesso ao rotor é obtido através de escovas de carvão apropriadas, fixadas à estrutura do motor.

A função do reostato de partida que se encontra ligado aos enrolamentos do rotor, é a de reduzir as correntes de partida elevadas e ao mesmo tempo elevar o torque para possibilitar a partida de cargas pesadas no caso de motores de elevada potência.

Figura 20: Rotor Bobinado.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

3.5.2 AEROGERADORES SÍNCRONOS

Máquinas síncronas são aquelas que utilizam uma fonte de corrente contínua independente para alimentar o campo magnético. Nesta máquina há um sincronismo

entre a frequência da tensão alternada aplicada nos terminais da máquina e a velocidade de rotação mecânica, o gerador gira na velocidade do campo magnético. O princípio de funcionamento consiste em uma excitação de fluxo no rotor.

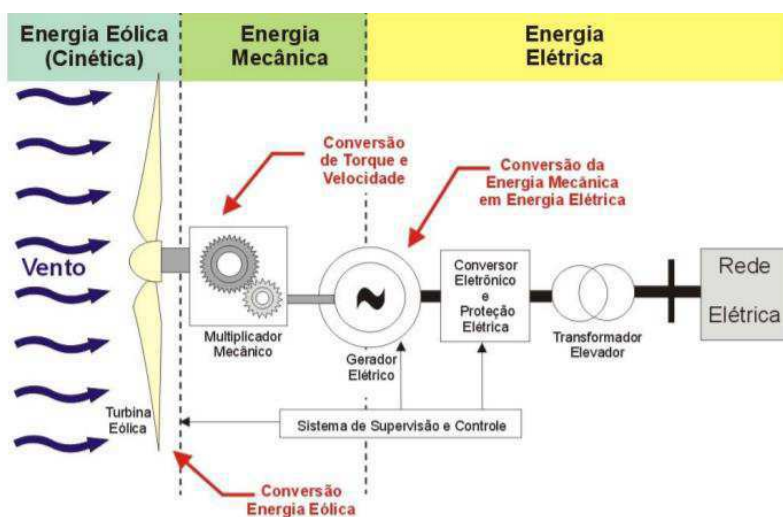
Máquinas síncronas a ímãs permanentes vêm tendo uma utilização cada vez maior em baixas e médias potências especialmente quando se necessitam de velocidade variável, alto rendimento e respostas dinâmicas rápidas.

O gerador síncrono é amplamente utilizado em sistemas de geração de energia eólica, onde o gerador síncrono pode ser usado para controle de potência reativa na rede isolada.

3.6 SISTEMA ELÉTRICO DOS AEROGERADORES

Há dois tipos de aerogeradores distintos, os aerogeradores de velocidade fixa e os de velocidade variável. Os primeiros aerogeradores construídos eram de velocidade fixa, devido às limitações da tecnologia da época.

Figura 21: Esquema Geral do Funcionamento de um Aerogerador.



Fonte: FIORINI, 2005.

Cada aerogerador possui um sistema de controle principal que monitora, aperfeiçoa e protege o aerogerador de operações indevidas. O sistema de controle monitora as principais grandezas mecânicas e elétricas da máquina, para obter uma operação correta e estável.

Os aerogeradores de velocidade fixa usam uma caixa de engrenagens de múltiplos estágios e um gerador de indução gaiola de esquilo (SCIG), diretamente conectado à rede.

Os aerogeradores de velocidade variável podem usar de dois tipos. O primeiro tipo usa uma caixa de engrenagens de múltiplos estágios e um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG).

Já o segundo tipo usa um sistema sem engrenagens com um gerador de acionamento direto, normalmente um gerador síncrono de alto torque e baixa velocidade e um conversor eletrônico de potência em escala real.

Além disso, existe uma variedade de conceitos inovadores de aerogeradores, um exemplo, é a alternativa de ser uma solução mista com uma caixa de engrenagens e um gerador síncrono de ímã permanente de menor velocidade (PMSG).

3.6.1 AEROGERADORES DE VELOCIDADE FIXA

O gerador é diretamente conectado à rede elétrica para os aerogeradores com velocidade fixa. A velocidade da turbina é determinada pela frequência da rede, o deslizamento da máquina, a relação da caixa de engrenagens e o número de polos do gerador. Sendo que a frequência da rede determina a rotação do gerador e, portanto, a do aerogerador.

Os aerogeradores de velocidade fixa são máquinas que usam geradores elétricos assíncronos, ou de indução, da qual sua maior vantagem é sua construção ser simples e de baixo custo. Além de dispensar dispositivos de sincronismo.

As desvantagens do uso de aerogeradores de velocidade fixa são as altas correntes de partida e sua demanda por potência reativa. Entretanto, as altas correntes de partida podem ser suavizadas por um tiristor de corrente ou de partida.

Quando ocorre uma mudança na velocidade do vento não afeta a velocidade da turbina, mas tem efeitos significativos sobre o torque eletromagnético e, conseqüentemente, sobre a potência de saída. Deste modo, em aerogeradores de velocidade fixa faz-se necessário utilizar o controle aerodinâmico das pás para

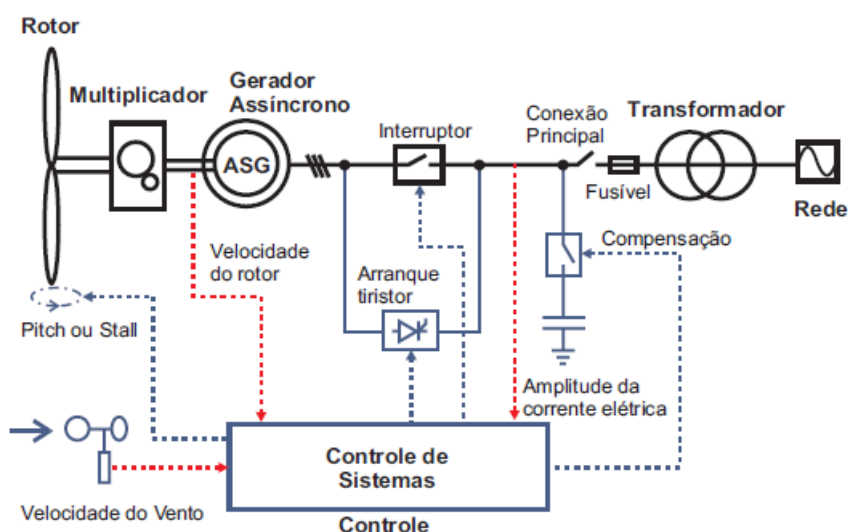
aperfeiçoar todo o desempenho do sistema, introduzindo sistemas de controle adicionais, complexidades e custos.

Quanto ao sistema de geração, quase todos os aerogeradores existentes utilizam sistemas com gerador de indução. A máquina de indução é a máquina elétrica mais utilizada, pois é robusta, necessita pouca manutenção e tem baixo custo.

Existem aerogeradores de velocidade fixa com gerador de indução gaiola de esquilo, gerador de indução duplamente alimentado ou gerador síncrono de acionamento direto.

As principais características do sistema de velocidade fixa são turbinas com regulação stall equipada com gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo ligado à rede através de um transformador, funcionamento a uma ou duas velocidades, baterias de condensadores para compensação do fator de potência máximo e sistema de arranque suave para limitar a corrente de arranque.

Figura 22: Esquema elétrico de um aerogerador de velocidade fixa.



Fonte: DUTRA, 2008.

Entretanto, um sistema de velocidade fixa não extrai tanta energia do vento quanto um sistema de velocidade variável.

3.6.2 AEROGERADORES DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Os aerogeradores de velocidade variável podem utilizar geradores síncronos ou assíncronos. O sistema de geração de velocidade variável é capaz de armazenar a energia eólica de entrada variável como energia rotacional, alterando a velocidade da turbina eólica e mantendo a geração de energia ideal.

A conexão ao sistema elétrico é feita através de um conversor de frequência eletrônico formado por um conjunto retificador/inversor. Assim, 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 de tiristores.

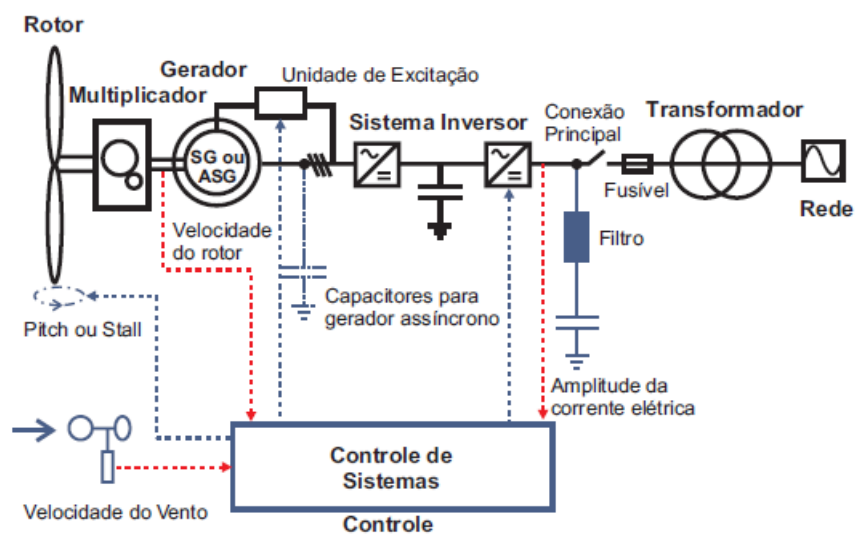
A frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação, assim a frequência será variável em função da variação da rotação da turbina eólica. Entretanto, a frequência da energia elétrica fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico através do conversor.

Quando se utiliza geradores assíncronos, ou de indução, faz-se necessário prover energia reativa para a excitação do gerador. Deste modo, pode-se fazer por auto-excitação ou utilizando capacitores instalados antes do retificador.

Ao contrário de um sistema de velocidade fixa, um sistema de velocidade variável mantém o torque do gerador praticamente constante. Assim, as variações no vento são absorvidas pelas mudanças de velocidade do gerador.

Portanto, as vantagens dos aerogeradores de velocidade variável são a redução da tensão mecânica nos componentes mecânicos como eixo e caixa de velocidades, maior absorção de energia e a redução do ruído acústico.

Figura 23: Esquema elétrico de um aerogerador de velocidade fixa.



Fonte: DUTRA, 2008.

4 PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES DOS AEROGERADORES

Da combinação dos sistemas de controlo da potência máxima com os modos de exploração do gerador elétrico (velocidade fixa ou velocidade variável) resultam quatro configurações principais que caracterizam a oferta comercial de aerogeradores predominante desde a década de 1980.

Essas configurações são tipicamente designadas por Tipo A, Tipo B, Tipo C e Tipo D, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - 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: Adaptada Google Imagens.

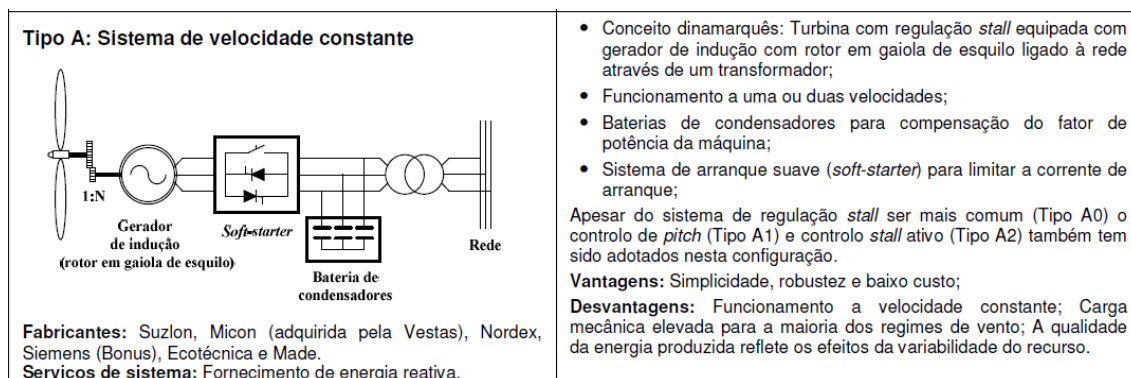
O conceito de velocidade variável, visto no capítulo 4.6.2, é utilizado pelas três últimas configurações, Tipo B, Tipo C e Tipo D. Relativamente ao controlo da potência máxima, estes sistemas utilizam apenas um mecanismo de controlo rápido do ângulo de passo (regulação de *pitch*) de modo a evitar a saída de serviço do sistema da sequência da ocorrência de uma rajada de vento, por exemplo, durante a operação á potência máxima.

A seguir é apresentada uma caracterização das quatro configurações típicas e as soluções tecnológicas adotadas pelos nove fabricantes com maior potência instalada nos últimos anos em alguns dos seus modelos de aerogeradores:

O gerador utilizado na ligação da turbina de velocidade fixa é o de indução em gaiola de esquilo (SCIG), nesta conexão o gerador é conectado diretamente ao

transformador que liga à rede elétrica. Os aerogeradores comerciais que utilizam geradores de indução com rotor em gaiola possuem rotor em frente da torre, turbina eólica de três pás e regulação de potência mecânica por stall. Na Figura 24 podem-se ver as configurações de aerogeradores comerciais de velocidade fixa.

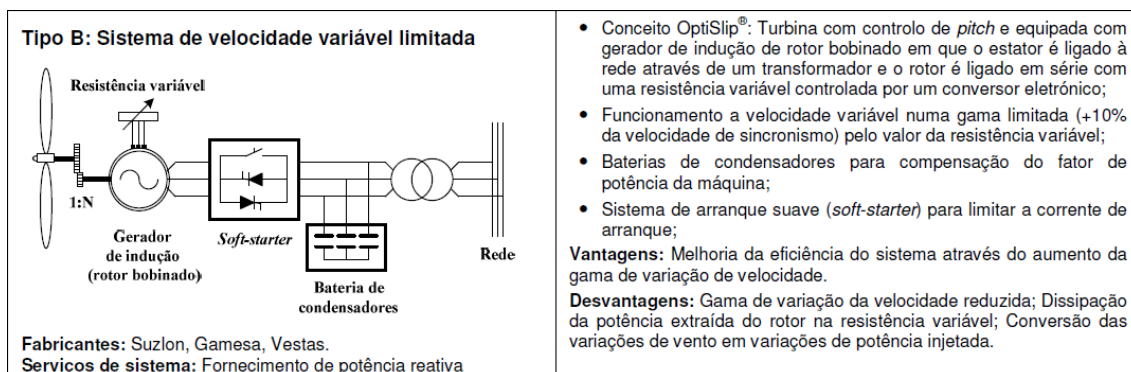
Figura 24: Características do sistema Tipo A.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

Os aerogeradores comerciais que utilizam geradores de indução com rotor bobinado podem ser geradores que utilizam uma resistência externa variável através de um conversor eletrônico de potência para controlar a resistência do rotor do gerador. Utilizando o conversor montado diretamente no eixo do rotor do gerador é possível controlar o escorregamento do gerador, o controle do escorregamento implica no controle da potência gerada pelo sistema. Na Figura 25 encontram-se as configurações desses tipos de aerogeradores.

Figura 25: Características do sistema Tipo B.

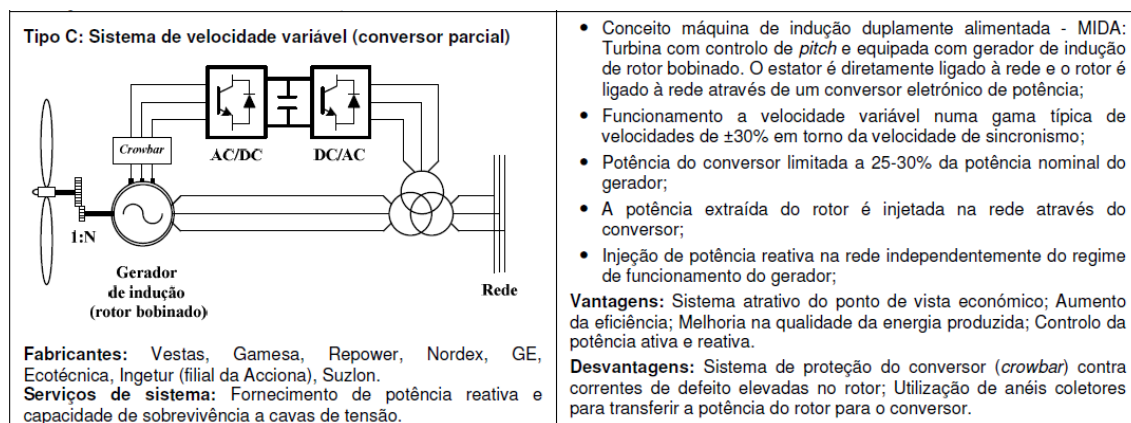


Fonte: Adaptada Google Imagens.

Outra topologia é o gerador assíncrono duplamente alimentados (DFIG) que possui um conversor eletrônico que controla diretamente a corrente nos enrolamentos

do rotor permitindo o controle completo da potência a ser disponibilizada. As configurações de aerogeradores assíncronos duplamente alimentados podem ser vistas na Figura 26.

Figura 26: Características do sistema Tipo C.

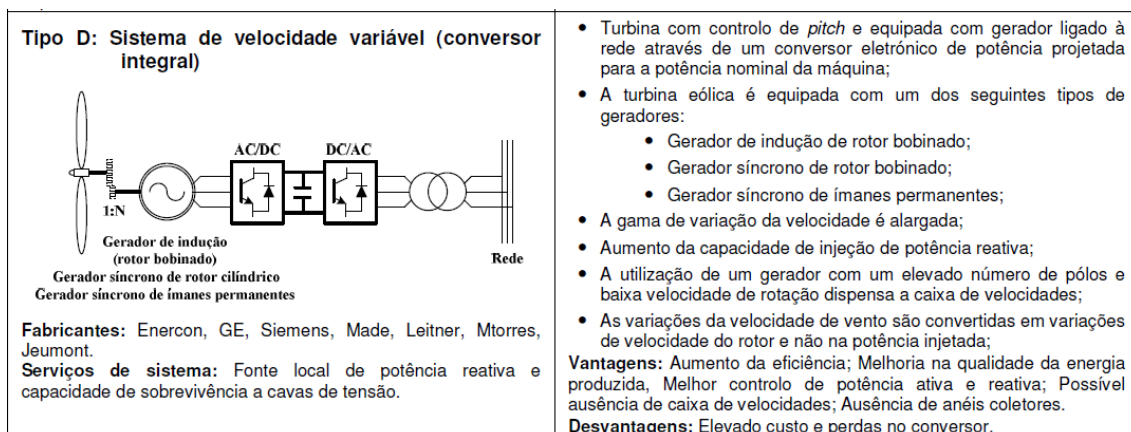


Fonte: Adaptada Google Imagens.

Os aerogeradores comerciais que utilizam geradores síncronos com rotor com ímã permanente são usados para aplicações isoladas de rede elétrica. As turbinas eólicas de duas ou três pás são conectadas diretamente a um gerador síncrono com ímãs permanentes, que tem como função carregar um banco de baterias através de um retificador.

Na Figura 27, encontram-se as configurações de aerogeradores com controle de pitch, podendo utilizar geradores de indução de rotor bobinado, síncrono de rotor bobinado e síncrono de ímãs permanentes.

Figura 27: Características do sistema Tipo B.



Fonte: Adaptada Google Imagens.

5 CONCLUSÃO

Os aerogeradores para ligação à rede apresentaram uma considerável evolução tecnológica nos últimos anos, desde os simples e robustos aerogeradores de velocidade constante, até aos sistemas de velocidade variável em toda a gama de operação. Devido, ao reflexo no aumento progressivo da capacidade instalada nos sistemas de conversão, na qualidade da energia produzida, na capacidade de controlo da potência gerada e no aumento da integração de energia eólica nas redes elétricas.

Nos aerogeradores de velocidade constante, a velocidade de rotação da turbina é ditada pela frequência da rede, impedindo assim o ajuste da velocidade do gerador à velocidade do vento e a operação do sistema na eficiência máxima para a maioria dos regimes de vento. Contudo, a robustez e o baixo custo dos sistemas de velocidade constante, têm mantido este conceito na oferta comercial de alguns fabricantes.

Nos aerogeradores de velocidade variável, a utilização dos conversores eletrônicos de potência permite efetuar o desacoplamento entre a frequência da rede e a frequência imposta ao gerador, pela velocidade de vento local em conjunto com o controlo aerodinâmico da turbina, tornando possível a operação do sistema numa gama alargada de velocidades. Assim, a operação do sistema a velocidade variável conduz ao aumento da eficiência de conversão para os vários regimes de vento, reduz a carga mecânica do sistema, torna possível o controlo da potência ativa, permite a geração local de potência reativa independentemente do regime de carga do gerador e contribui para o fornecimento de serviços de sistema e consequentemente para a melhoria da sua estabilidade.

Além disso, os efeitos resultantes da variabilidade do recurso são convertidos em variações da velocidade do gerador e não se refletem na potência injetada na rede. O conceito de velocidade variável tem sido progressivamente adotado pelos fabricantes e atualmente integra a maioria da oferta comercial.

Portanto, para se obter um produto final viável e competitivo no mercado existente, a pesquisa e análise do estudo da arte dos aerogeradores são de grande importância para o projeto em questão.

REFERÊNCIAS

- [1] RAMPINELLI, Giuliano Arns; DA ROSA, Celso Generoso da Rosa. Análise da geração eólica na matriz brasileira de energia elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica Faculdade SATC, Criciúma, SC.
- [2] TARNOWSKI, Germán Claudio. Metodologia de regulação da potência ativa para operação. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [3] ALMEIDA, Antenor Timo Pinheiro; SILVA, Micael Martins. Desenvolvimento e montagem de um gerador eólico com pás compósitas. Projeto de Graduação da Universidade Federal de Brasília.
- [4] MELO, Marcelo Silva de Matos. Energia eólica: Aspectos técnicos e econômicos. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [5] RESENDE, Fernanda de Oliveira. Evolução Tecnológica dos sistemas de conversão de energia eólica para ligação à rede. Universidade Lusófona do Porto.
- [6] PAVINATTO, Eduardo Fiorini. Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [7] BRONZATTI, Fabrício Luiz; NETO, Alfredo Iarozinski. Matrizes energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [8] DUTRA, Ricardo. Energia eólica, princípios e tecnologia. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.
- [9] CASTRO, Rui M G. Energias renováveis e produção descentralizada, introdução à energia eólica. Instituto Superior Técnico na Universidade Técnica de Lisboa. DEEC/Área Científica de Energia.
- [10] MAURI, Fhelippe. Estudo de geradores eólicos de velocidade fixa conectados à rede elétrica. Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa.
- [11] SILVEIRA, Karoline Claro Pereira. Análise de uma configuração de parque eólico baseada em sistema de transmissão multiterminal CC com conversores multinível modular. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [12] OLIVEIRA, Karina Lino Miranda. Projeto Básico de um Parque Eólico e Estudos de Conexão. Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal de Juiz de Fora.