



Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190

ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA

Taubaté - SP
2017



Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190

GEILSON FERREIRA DOS SANTOS

ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA

Taubaté - SP

2017

GEILSON FERREIRA DOS SANTOS

ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica, da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis

Taubaté, SP

2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

S237a	<p>Santos, Geilson Ferreira dos</p> <p>Estado da arte dos sistemas de geração eólica. / Geilson Ferreira dos Santos. – 2017.</p> <p>78f. : il; 30 cm.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, 2017</p> <p>Orientação: Prof. Dr. Luiz Octavio Mattos dos Reis, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.</p> <p>Coorientação: Eng. João Roberto de Moraes.</p>
-------	--



ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA

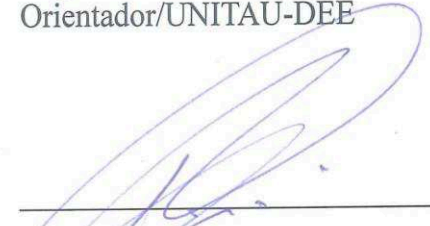
GEILSON FERREIRA DOS SANTOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA”

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis
Orientador/UNITAU-DEE



Prof. Rubens Castilho Júnior
Avaliador – UNITAU-DEE



Eng. Roberto Rennó Cogo
Avaliador – Membro Externo

E como todos não têm fé, buscai diligentemente e ensinai-vos uns aos outros, palavras de sabedoria; sim, nos melhores livros buscai palavras de sabedoria; procurai conhecimento, sim, pelo estudo e também pela fé.

Doutrina e convênios 109:7

AGRADECIMENTOS

A Deus, que, por Cristo e pela luz do Espírito Santo, iluminou e vem guiando o meu caminho na direção das pessoas que me forneceram os conhecimentos necessários e ajudaram-me a superar os momentos de dificuldades e angústias.

Agradeço à minha mãe por me ajudar, incentivar e sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, por chorar comigo a cada nota baixa e pelos sorrisos a cada nota alta obtida e por matéria vencida.

Em especial aos meus amigos: João por sua amizade e por sempre estar próximo a mim, ajudando-me a adquirir novos conhecimentos. A Gilberto por sua paciência e compreensão durante este período de estágios.

Ao pessoal do Departamento de Engenharia Elétrica, Prof. Eder e Gabriela.

Aos professores da Universidade de Taubaté por compartilharem seu conhecimento e sua vivência no mercado de trabalho e acadêmico.

À Universidade de Taubaté pela oportunidade de graduação nesta instituição tão renomada.

E a todos aqueles que não tenham sido citados, porém merecem uma justa homenagem e meu agradecimento.

RESUMO

Esta Monografia propõe o estudo de sistemas de geração eólica, demonstrando seus circuitos desde a fase de geração pelos aerogeradores até o ponto de acoplamento, bem como a influência que a conexão dos parques eólicos podem ter sobre a rede, preservando a qualidade da energia e a estabilidade do sistema. Este tema vem se tornando um assunto da maior importância para o setor elétrico, tendo em vista o ganho que sua aplicação pode trazer à rede e seus usuários. Os estudos realizados contemplam aspectos dinâmicos dos modelos de aerogeradores e serão estudadas os componentes, as modelagens e os métodos de controle usuais.

Pretende-se demonstrar as diferentes características dos modelos de unidades eólicas e formas de emprego destas visando atenuar os efeitos negativos e as possibilidades inerentes ao sistema.

O principal desafio para interligação dos parques eólicos no SEP está relacionado a conexão elétrica. A fim de preservar a segurança operacional do sistema elétrico, as concessionárias de energia definem critérios que regulamentam a conexão das centrais eólicas no SEP.

PALAVRAS-CHAVE: Aerogeradores. SEP. Aspectos dinâmicos. Conexão à rede. Geração eólica.

ABSTRACT

This work proposes the study of wind power generation systems, demonstrating their circuits from the generation phase by the wind turbines to the coupling point, as well as the influence that the connection of the wind farms can exert on the network, preserving the quality of the energy and the stability of the system. This issue has become a matter of major importance for the electric sector, given the gain that its application can bring to the network and its users. The studies contemplate dynamic aspects of wind turbine models, their components, modeling and control methods. The aim of this study is to demonstrate the different characteristics of wind turbine models and their use in order to mitigate the negative effects and possibilities inherent in the system. The main challenge for the interconnection of wind farms in SEP is related to the electrical connection. In order to preserve the operational safety of the electricity system, utilities define criteria that regulate the connection of wind power plants to the SEP.

KEYWORDS: Wind turbines. SEP. Dynamic aspects. Connecting to the network. Wind generation.

FIGURAS

Figura 1	Gráfico da Matriz Elétrica Brasileira	19
Figura 2	Gráfico das fontes de energia em operação	20
Figura 3	Gráfico da capacidade eólica total instalada no mundo	20
Figura 4	Gráfico de previsão da capacidade eólica instalada no Brasil até 2020 (MW)	21
Figura 5	Gráfico de potência instalada (MW)	22
Figura 6	Cilindro de vento fictício	23
Figura 7	Incidência de velocidade da massa de vento sobre as lâminas (rotor da turbina eólica)	24
Figura 8	Coeficiente de Potência, C_p , em função da razão da velocidade periférica, A_e	29
Figura 9	Curvas de torque contra rotação de turbinas de vento	30
Figura 10	Curvas de torque contra rotação e potência constante para cada velocidade do vento	32
Figura 11	Gráfico de curvas de torque para potência constante	33
Figura 12	Gráfico de curvas de potência de uma turbina	34
Figura 13	Ação das forças aerodinâmicas da turbina eólica do eixo horizontal	36
Figura 14	Demonstração do vento frontal	36
Figura 15	Demonstração do vento retaguarda	37
Figura 16	Componentes de uma Nacele tradicional (de eixo horizontal)	38
Figura 17	Cubo do aerogerador de eixo horizontal sendo fabricado	39
Figura 18	Vista aérea do pátio da empresa Enercon (Wobben) das pás	40
Figura 19	Gerador conectado à caixa de engrenagens	41
Figura 20	Gerador convencional	42
Figura 21	Montagem de um aerogerador	43
Figura 22	Torres de concreto	43
Figura 23	Partes dos componentes de um gerador convencional (eixo horizontal)	44
Figura 24	Partes dos componentes da turbina eólica tipo Darrius	45
Figura 25	Turbina eólica vertical tipo Gorlov	46
Figura 26	Turbina eólica tipo Savonius	47

Figura 27	Turbina eólica tipo Savonius, modelo eólico-solar	48
Figura 28	Aerogerador Vortex	48
Figura 29	Aerogerador de eixo horizontal Whisper	49
Figura 30	Energia eólica sendo produzida no ar	50
Figura 31	Energia eólica sendo produzida no modelo câmara	50
Figura 32	Energia eólica sendo produzida no estator	51
Figura 33	Energia eólica sendo produzida no ar	51
Figura 34	Energia eólica no sistema de torres	52
Figura 35	Absorção de energia no sistema offshore	52
Figura 36	Energia eólica na ART turbine	53
Figura 37	Representação do sistema geração e seu cabeamento até a subestação.....	54
Figura 38	Capacidade instalada e geração de energia em usinas eólicas onshore em 2050.	55
Figura 39	Sistema de geração offshore	58
Figura 40	Grupo eólico de velocidade fixa conectada diretamente à rede elétrica	60
Figura 41	Grupo eólico conectado à rede por um conjunto retificador/inversor	62
Figura 42	Grupo eólico com gerador de indução duplamente alimentado	63
Figura 42	Grupo eólico com gerador com (a) rotor bobinado, (b) rotor de ímãs permanentes	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Eletrica

ABEE- Associação Brasileira de Energia Eólica

ACL- Ambiente de Contratação Livre

Betz- teorema de betz serve para determinar o funcionamento e a potencia de um rotor ideal

CCD- Conexão das Instalações Distribuição

CUSD – Contrato de Uso do Sistema Distribuição

CIT- Conexão as Instalações de Transmissão

CUST- Contrato de Uso do Sistema de Transmissão

DIT- Divisão de Instalação e Transmissão

EPE- Empresa de Pesquisa Energetica

GIDA- Gerador de Indução de Dupla Alimentação

ICG- Instalação de Centrais de Geração

IEA- Internacional Energy Agency

MME- Ministerio de Minas e Energia

ONS Operadora Nacional de Sistema

TUST- Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SUMÁRIO

Capítulo	Item	Título	Páginas
1		MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.	15
	1.1	Objetivos gerais.	16
	1.2	Objetivos específicos.	16
2		APECTOS GERAIS SOBRE ENERGIA EÓLICA.	17
	2.1	Considerações iniciais.	17
	2.2	O setor de energia eólica no Brasil.	18
3		O MODELO DE TURBINAS EÓLICAS UTILIZADOS EM ESTUDOS.	22
	3.1	Rendimento aerodinâmico.	27
	3.2	Rotação, torque e potência nas turbinas de vento.	28
	3.3	Curvas de torque e potência obtidas dos modelos de turbinas eólicas.	32
4		AEROGERADORES.	34
	4.1	Aerogeradores de eixo horizontal.	34
	4.2	Principais componentes dos aerogeradores.	37
	4.3	Aerogeradores de eixo vertical (aevs).	44
	4.4	Outros tipos de turbinas, não convencionais.	47
5		CLASSIFICAÇÃO DAS FAZENDAS DE VENTOS.	53
	5.1	Sistema de geração eólica onshore.	53
	5.2	Sistema de geração eólica offshore.	54
	5.3	Por que o Brasil não investe em sistemas eólicos offshore.	55
6		AEROGERADORES E SUAS CONFIGURAÇÕES.	58
	6.1	O Gerador de velocidade fixa.	58
	6.2	O Gerador de velocidade variável.	59
	6.3	O gerador assíncrono conectado à rede por conversor eletrônico.	60
	6.4	Gerador de indução duplamente alimentado.	61
	6.5	O Gerador síncrono.	62
7		ATENDIMENTOS PARA CONEXÃO DE PARQUES EÓLICOS AO SISTEMA ELÈTRICO.	64
	7.1	Regulamentação técnica.	64
	7.2	Requisitos de acesso à rede elétrica no Brasil.	64
	7.3	Formas de acesso ao sistema elétrico brasileiro.	66
8		CONCLUSÕES.	68
		REFERÊNCIAS.	69

1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

As novas tecnologias, sejam em quaisquer áreas, são geralmente advindas de dificuldades e da evolução propriamente dita. Quanto mais evoluem as tecnologias, mais se dá a necessidade de adequação dos recursos a essa evolução.

Nas últimas décadas também, além da acelerada inovação tecnológica, observam-se mudanças climáticas cada vez mais acentuadas, como por exemplo, a escassez de chuvas durante longos períodos, o que faz com que os reservatórios não consigam atingir níveis necessários para a produção de energia pelas hidrelétricas, quando se trata do sistema tradicional de geração de energia, tornando-o ineficaz para atender à demanda.

Observa-se inclusive um aumento no consumo de energia, devido ao aumento também da utilização de equipamentos eletrônicos no país, assim como em outros países do mundo, um fenômeno que tende somente a crescer nas futuras gerações.

Essa combinação de aumento de consumo, baixo índice pluviométrico e aparecimento de novas tecnologias com a evolução industrial é uma equação que tem como resultado, nada menos do que um colapso energético no país, quiçá, no mundo.

Em 2006 o Brasil passou por grandes “apagões”, ausência de energia em grande parte do território nacional, por este motivo a população começou a ficar insatisfeita com o fornecimento, tendo em vista que o custo da energia para os consumidores é alto. O governo da época, também ficou preocupado com a situação e com o futuro, passando a conceber a necessidade de se buscarem fontes alternativas de energia, de forma a aumentar a geração e reduzir o custo.

O Brasil, por sua vez, demonstra uma grande capacidade de gerar energia elétrica eólica, principalmente em regiões como a nordeste, tendo em vista as altas temperaturas, durante a maior parte do ano, bem como a grande incidência de ventos.

Muitos empresários brasileiros resolveram busca parcerias com empresas que já atuava no mercado exterior, visando implantar os campos eólicos no país, assim como já existia em outros países do mundo. Conhecendo o mercado e já sendo um exportador de pás eólicas, o grupo Votorantim investiu muito na área, instalando na cidade de Sorocaba, onze fábricas para a construção das pás eólicas, tornando-se a maior empresa do ramo no Brasil. Passou então a abastecer o mercado nacional em parceria com outras responsáveis pela montagem dos parques eólicos.

Para as empresas que quisessem investir no mercado de energia eólica, por meio da montagem de parques, manutenção e prestação de serviços, o governo ofereceu subsídios no

custeio das obras e concessão de 20 a 30 anos para a empresa que criasse o parque, administrasse-o e vendesse a energia gerada para o governo.

Ao estudar o mercado e seu grande crescimento na parte de geração de energia pelo sistema eólico, muitas pessoas vem buscando conhecer a área em expansão, visando cada vez mais à melhoria dos sistemas que compõem um aerogerador, procurando aprimorar seus componentes, tais como suas pás, torres, engrenagens, inversores e etc.

O sistema eólico tem sido considerado o melhor sistema alternativo para geração de energia no país, em virtude de fatores como o pouco tempo necessário na montagem de um campo eólico, os benefícios ao meio ambiente, visto que não polui o ar e não exige desmatamento de áreas verdes. Estas características levam à constatação de que o sistema eólico é o mais viável para o Brasil.

A quantidade de energia eólica gerada no país já tem atingido grandes números. A busca pelo aerogerador mais aerodinâmico possível que atinja qualidade ideal de geração por unidade fez com que chegassem ao mercado aerogeradores de 225 metros de diâmetro gerando 10 MW, com uma única turbina.

A grande motivação para o aprofundamento do estudo nessa área nasce tanto do vislumbre das possibilidades que esse mercado pode trazer hoje e futuramente com a expansão desta fonte de energia e suas ramificações, com retorno de cunho financeiro e de conhecimento tecnológico, bem como da preocupação em relação ao abastecimento de energia do país e do mundo.

1.1. OBJETIVOS GERAIS

Estudar os sistemas eólicos envolvendo os tipos de turbinas e geradores, bem como sua operação e as grandezas de controle, envolvidos no sistema de geração.

Fazem parte do trabalho, os sistemas eólicos, os conversores que interligam a rede elétrica, bem como, tecnologias envolvidas neste processo.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Demonstrar possíveis vantagens da utilização dos sistemas eólicos de geração de energia, observando-se às exigências técnicas estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para a conexão dos parques eólicos.

2 ASPECTOS GERAIS SOBRE ENERGIA EÓLICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nestas últimas duas décadas, o Brasil vem passando por uma crise energética, devido, inclusive, a uma grande redução nos volumes de chuva, gerando, como consequência, baixos níveis de água nos reservatórios, os quais, não atingindo seus limites máximos, afetam a geração de energia nas hidroelétricas. A escassez dos combustíveis fósseis que ocasiona a alta do preço do barril de petróleo e a diversidade da matriz energética são outros elementos que impulsionam o crescimento das fontes renováveis, dentre elas, a eólica, a solar, a biomassa e as pequenas centrais hidroelétricas. Na Tabela 1 é demonstrado o valor do kWh da energia elétrica gerada.

Tabela 1: Comparação de custo de energia

Tipo de recurso	Custo médio (centavos US\$ por kWh)
Hidroelétrica	2-5
Nuclear	3-4
Carvão	4-5
Gás Natural	4-5
Vento	4-10
Geotérmica	5-8
Biomassa	8-12
Célula de Hidrogênio	10-15
Solar	15-32

Fonte: ABEE (Associação Brasileira de Energia Eólica)

Em meio a este cenário, o Brasil reconheceu a necessidade de aumentar e diversificar o setor energético nacional, adotando fontes de energia renovável, as quais, até então, não vinham sendo utilizadas em grande escala no país, devido ao custo pouco competitivo, se comparado ao custo da energia gerada pelas hidroelétricas e termoeletricas, pois, no caso das hidroelétricas, este sistema enfrenta restrições, tendo em vista o grande impacto que causa ao meio ambiente, outra preocupação em crescimento na maioria dos países.

O rendimento da energia eólica vem se destacando como uma das fontes mais promissoras economicamente, em virtude do avanço que este tipo de tecnologia vem alcançado, com a geração de energia eólica se aproximando do custo das fontes convencionais de energia usadas no mundo. Essa aproximação tem sido possível em razão dos incentivos

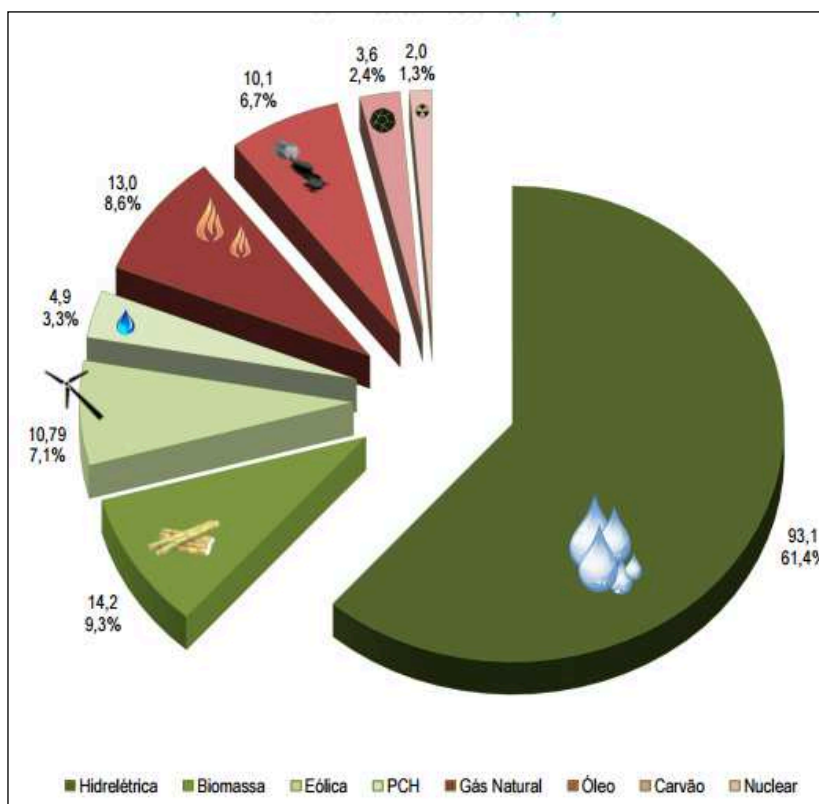
fiscais que estão passando a ser empregados em grande escala no setor. Os incentivos permitem que a geração de energia eólica tenha a tecnologia necessária para a geração de energia com origem nos parques eólicos.

Este sistema apresenta produção e consumo de energia com economia, eficiência e segurança e a integração das fontes renováveis com as fontes convencionais leva a um novo modelo de sistema de geração de energia elétrica menos centralizada que o atual, como por exemplo, as redes inteligentes que preveem o uso de sistemas de geração de energia local em pequena escala (micro geração), preferencialmente renovável, e o gerenciamento do consumo. Neste aspecto, a interligação de parques eólicos ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) oferece maior segurança no suprimento nos momentos em que a produção por fontes tradicionais é menor (MME, 2010).

2.2- O SETOR DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A matriz energética brasileira, que apresenta uma configuração renovável-térmica, foi criada em fevereiro de 2017 com uma capacidade eólica instalada de 10,79GW. A participação de fonte de energia eólica na matriz alcançou 7,1%. Conforme ilustrado no Gráfico da Figura 2.

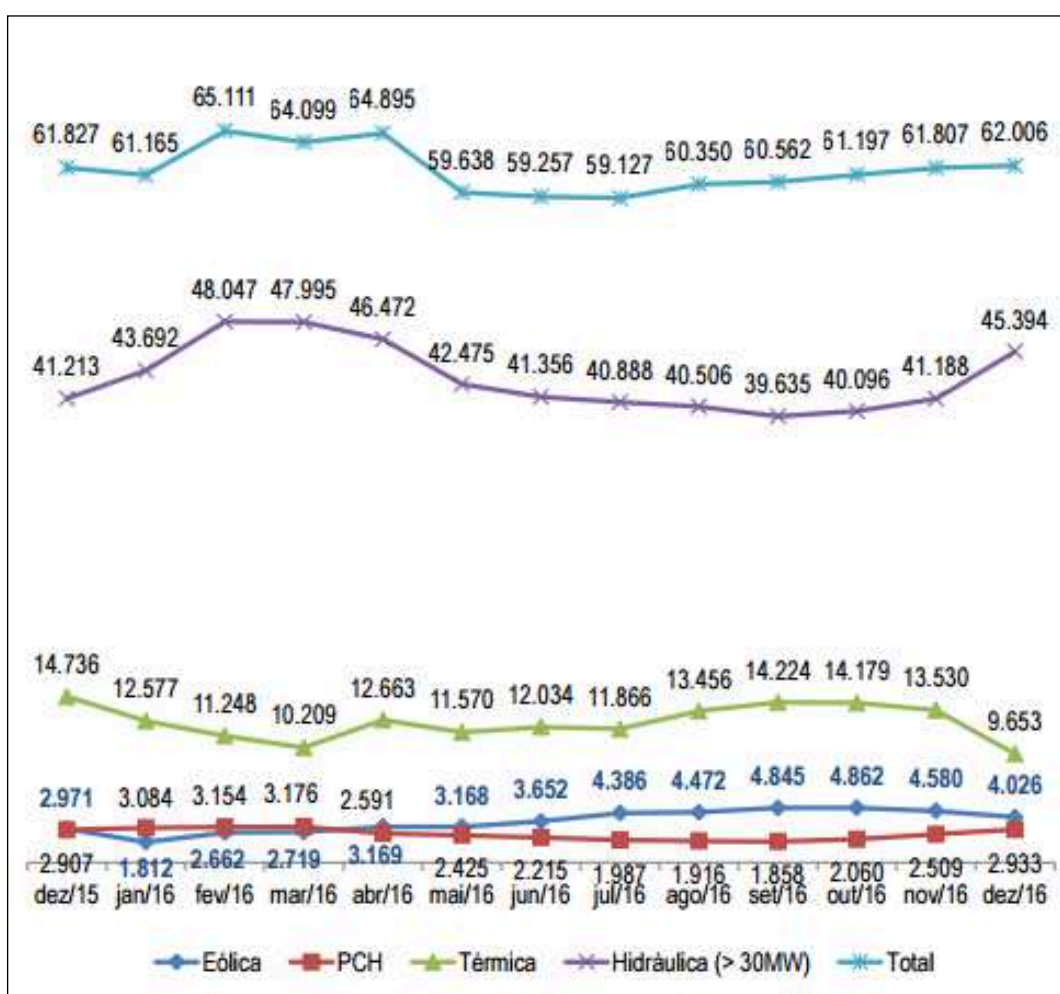
Figura 1 – Gráfico da Matriz Energética Brasileira (GW)



Fonte: AEEólica

A geração total das usinas hidroelétricas em operação e em teste atingiu, em dezembro de 2016, 62,01 GW médios, sendo que a fonte eólica foi responsável por 4,03 GW médios dessa geração. Esses montantes de geração foram verificados nos meses de mais estiagem e podem ser visualizados na Figura 3. Com as informações de dezembro completou-se um novo ciclo de 12 meses de dados, representando o ano de 2016. Ao todo, foram gerados 33,15 TWh de energia eólica ao longo do ano, sendo em média 6% do total produzido por todas as fontes. Em comparação com 2015, a produção de energia dos ventos foi superior em 52%.

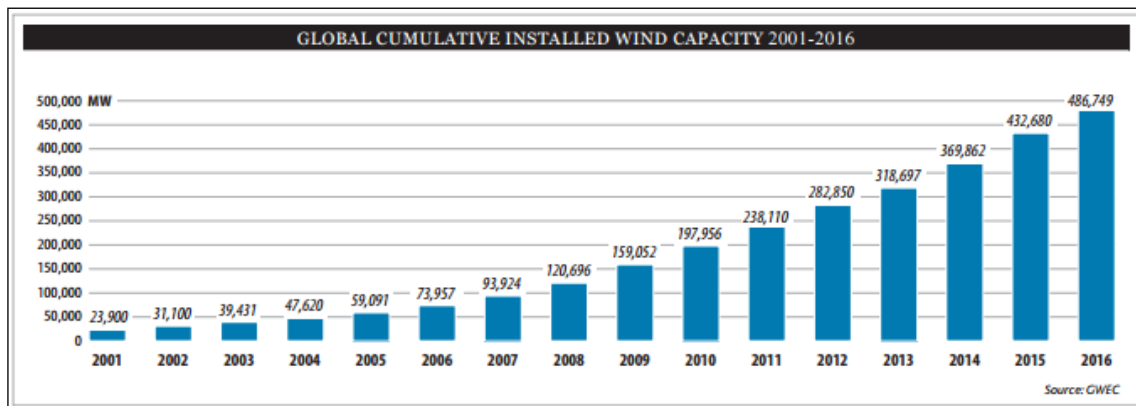
Figura 2 – Gráfico das fontes de energia em operação



Fonte: ANEEL.

O gráfico da Figura 3 ilustra a evolução mundial da instalação de parques eólicos no período de 2001 a 2016, no qual fica evidente a quantidade de potência eólica, 486,749 MW, inserida no setor elétrico até 2016.

Figura 3 - Capacidade eólica total instalada no mundo [MW]

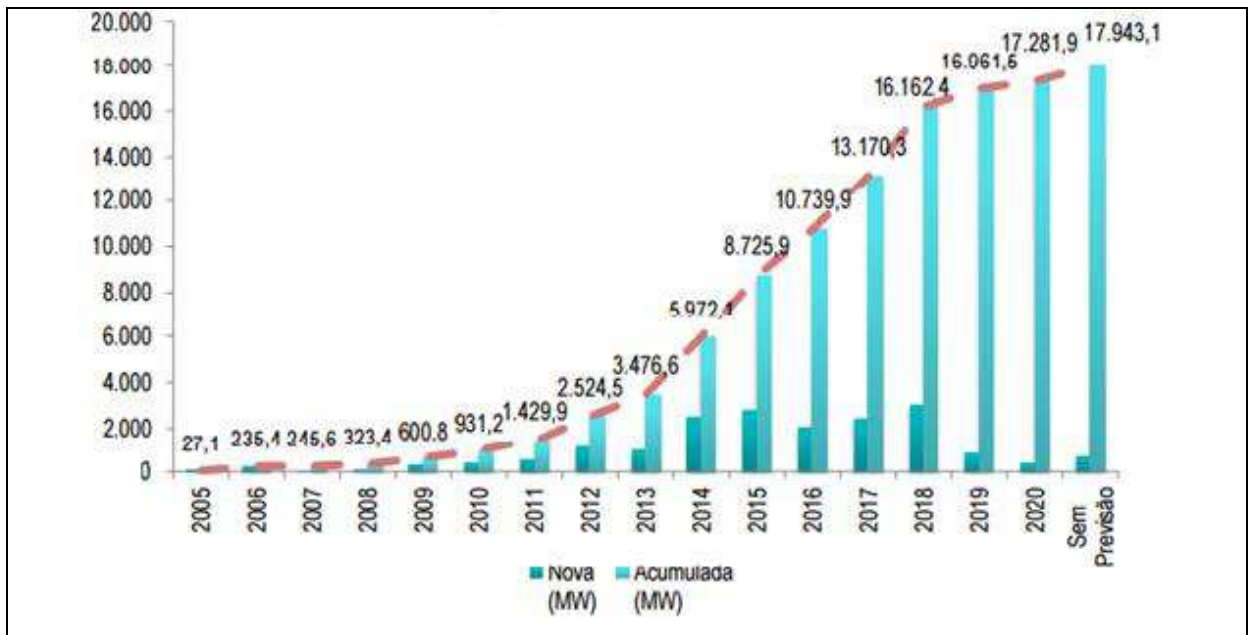


Fonte: Global wind capacity 2001-2016

O intenso crescimento da capacidade nos últimos anos provocou a redução dos custos da tecnologia eólica disponível no mercado, o que se deve aos incentivos governamentais de cada país, que estimulam o investimento em pesquisa, desenvolvimento de conhecimento e geração de empregos no setor. Esses fatores contribuem para a expansão da oferta energética e, o Brasil, apesar de possuir um potencial econômico evidentemente menor quando comparado aos países líderes em instalação de parques eólicos, já possui experiência na execução de programas de incentivo a fontes limpas que visam à ampliação da capacidade de geração desse tipo de energia elétrica.

O gráfico da Figura 4 expressa a curva da capacidade instalada da fonte eólica e demonstra o crescimento virtuoso da fonte no decorrer dos anos. A composição dos dados é feita por meio da consolidação das capacidades contratadas nos ambientes de contratação livre (ACL). Há também a contabilização da usina eólica de Tubarão, fruto de um programa de Pesquisa & Desenvolvimento. Ao final de 2020 estão previstos 17,94 GW instalados em território brasileiro.

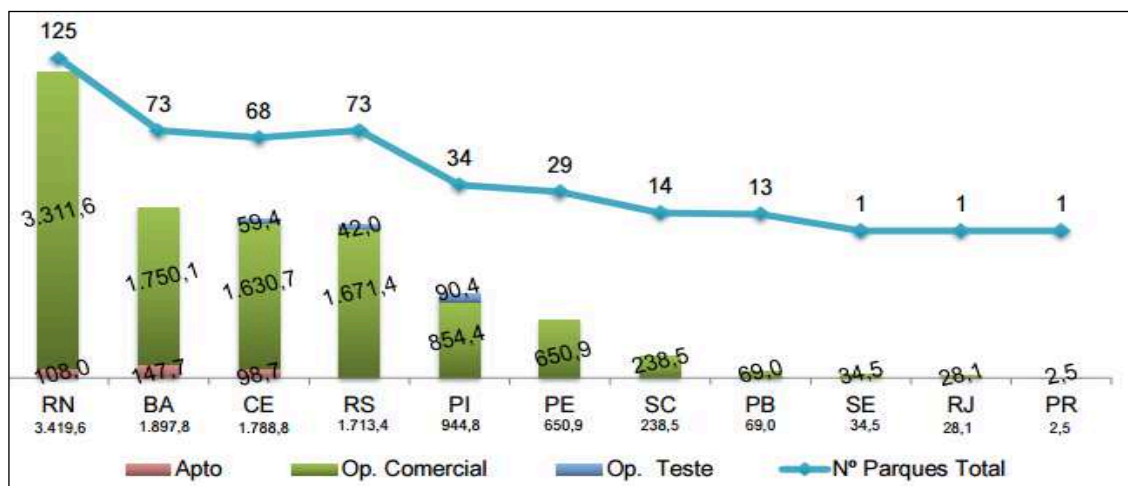
Figura 4 – Gráfico de previsão capacidade eólica instalada no Brasil ate 2020 [MW]



Fonte: Global wind capacity 2001-2016

Os parques instalados em cada um dos estados brasileiros estão subdivididos em três categorias: aptos a operar, operando sob teste e operando comercialmente. Assim capacidade instalada calculada no início de fevereiro de 2017 foi 10,79 GW, conforme demonstra a o Gráfico da Figura 5.

Figura 5 - Gráfico de Potência instalada [MW]

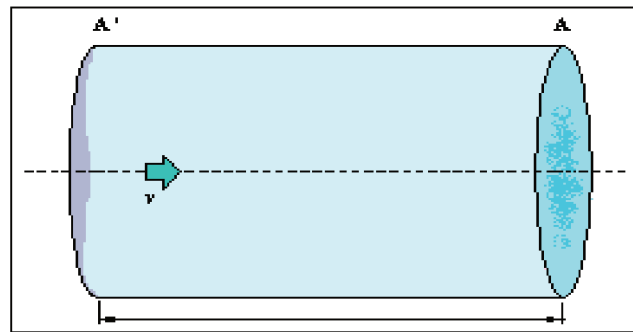


Fonte: Global wind capacity 2001-2016

3. O MODELO DE TURBINAS EÓLICAS UTILIZADOS EM ESTUDOS

Para o cálculo desejado, é necessária a análise do movimento da massa de ar dentro de um cilindro fictício, conforme o ilustrado na Figura 6. Considera-se o fluxo de vento deslocando a uma velocidade constante e uniforme.

Figura 6 – Cilindro de vento fictício



$$L = v\Delta t$$

Fonte: lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica

No cilindro as duas bases A' e A possuem áreas iguais e denominadas por A . A primeira base A' está em movimento, deslocando-se com o vento que flui pela superfície considerada com mesmo módulo de velocidade v . O tempo necessário para o deslocamento da seção A' , ao longo do comprimento L é definido como Δt . Portanto, a massa de fluido m de massa específica ρ , contida no volume do cilindro fictício é calculada por (1).

$$m = \rho A v \Delta t \quad (1)$$

A energia cinética, W , desenvolvida pela massa de ar durante o percurso é calculada pela expressão (2).

$$W = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2)$$

Substituindo-se a expressão (1) em (2) e manipulando-se os membros da equação, obtém-se a potência, P_w , contida na massa de ar:

$$\frac{W}{\Delta t} = P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

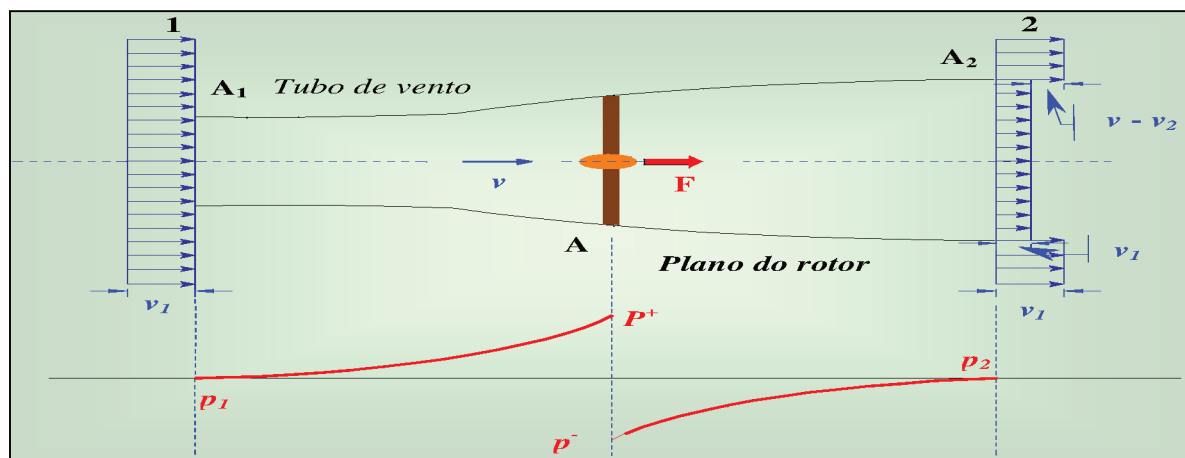
Apesar da massa de ar conter uma grande quantidade de energia, esta não é totalmente transferida ao eixo da turbina. O montante de energia transferida às pás da turbina foi estabelecido por Betz, que definiu o coeficiente de potência, C_p , calculado por (4). Este coeficiente é obtido pela relação entre a potência captada pelas pás da turbina, P_{Cap} , e a potência disponível na massa de ar e expressa o rendimento aerodinâmico da máquina.

$$C_p = \frac{P_{Cap}}{P_w} \quad (4)$$

Betz, recorrendo à teoria da quantidade de movimento, determinou os limites deste coeficiente que pode ser determinado analiticamente, a partir da análise da Figura 7, e ainda admitindo-se que:

- Não considera a turbulência provocada pela rotação do rotor;
- O ar pode ser considerado um fluido ideal, sem viscosidade, em todo o volume considerado, com exceção nas proximidades ao plano do rotor;
- O movimento em todo volume de fluido é subsônico, com números de Mach muito baixos, portanto pode ser considerado um fluido incompressível;
- O movimento do fluido é considerado em regime permanente;
- Não considera a turbulência provocada pela rotação do rotor;
- Considera o rotor um disco poroso, com hélices extremamente finas;

Figura 7 – Incidência da velocidade da massa de vento sobre as lâminas (rotor) da turbina eólica.



Fonte: lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica

As grandezas definidas na figura são:

$v_1 \Rightarrow$ velocidade do vento a montante do rotor;

$v_2 \Rightarrow$ velocidade do vento a jusante do rotor;

$v \Rightarrow$ velocidade incidente no plano do rotor da turbina;

$F \Rightarrow$ força devido a corrente de ar sobre o plano do rotor;

$p_1 \Rightarrow$ pressão a montante do rotor ($p_1 = p_2 = p_{atm}$);

$p^+, p^- \Rightarrow$ pressão no plano do rotor na tomada de ar e na saída de ar respectivamente.

Aplicando-se o teorema da conservação da quantidade de movimento ao modelo, e sabendo-se que a massa específica do ar é ρ , tem-se (5).

$$SF = \rho Q \Delta v \rightarrow F = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (5)$$

A força exercida pela massa de ar nas lâminas do rotor da turbina pode ser calculada por (6).

$$F = A(P^+ - P^-) \quad (6)$$

O sistema proposto na Figura 7 é conservativo. Aplicando-se a equação da continuidade entre os pontos: um referente à seção A_1 e dois referente à seção A_2 , obtém as equações (2.7) e (2.8).

$$P_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = P^+ + \frac{\rho}{2} v^2 \quad (7)$$

$$P_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = P^- + \frac{\rho}{2} v^2 \quad (8)$$

Sabendo-se que $p_1 = p_2 = p$ e comparando-se as equações (6), (7) e (2.8), obtém o valor da força exercida sobre o rotor da turbina.

$$F = A(P^+ - P^-) = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho A (v_1 - v_2)(v_1 + v_2) \quad (9)$$

Admitindo-se que o valor da velocidade incidente no plano do rotor seja uma média entre a velocidade na entrada da seção A_1 e na saída da seção A_2 , obtém-se (10):

$$\frac{v_1 + v_2}{2} \quad (10)$$

Na condição proposta, a velocidade da massa de ar incidente na turbina, v , em relação à velocidade, v_1 , em um ponto infinito a montante da turbina, é menor. Pode-se dizer que a velocidade ficou reduzida de um fator, a , que será denominado de coeficiente de velocidade induzida. Matematicamente obtém-se a expressão (11):

$$v = v_1 - av_1 \leftrightarrow v = v_1(1 - a) \quad (11)$$

Para a velocidade, v_2 a jusante da turbina, a velocidade será calculada pela Equação (12)

$$v_2 = v_1(1 - 2a) \quad (12)$$

Definida a velocidade no rotor da turbina, pode-se calcular o valor da potência captada pelo rotor da turbina (P_{cap}), conforme Equação (13).

$$P_{Cap} = Fv \leftrightarrow P_{Cap} = \rho Av(v_1 - v_2)v \quad (13)$$

Substituindo-se as equações (11) e (12) em (13) e reagrupando os termos, obtém a expressão (14).

$$P_{Cap} = \left(\rho A \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) \quad (14)$$

Verifica-se por meio da expressão matemática que a potência captada pela turbina possui dois termos distintos, definidos em (14) por I e II. O primeiro refere-se ao fluxo da massa de ar incidente na turbina; e o segundo termo retrata a variação da energia cinética da

massa de ar incidente. Portanto, fica comprovado que a potência desenvolvida por uma turbina eólica é igual ao produto do fluxo da massa de ar que atravessa o rotor da turbina, pela variação da energia cinética da corrente de ar.

É fato que a condição ideal para que toda a energia existente na massa de ar seja transferida à turbina é que a velocidade, v_2 , seja igual a zero. Mas esta condição é fictícia, assim deve-se determinar o valor ideal da velocidade v_2 para que se obtenha a potência máxima de transferência. Esta questão reside em determinar-se o valor da constante da equação de Betz definida em (11).

Verifica-se, portanto, que a potência captada pela turbina depende do coeficiente de potência denominado por C_p e que este coeficiente é obtido a partir da razão entre a potência captada, P_{cap} , e a potência da massa de ar, P_w . Como são conhecidas as equações que definem ambas as potências, pode-se então calcular o valor ideal do coeficiente de potência, obtendo-se a equação indicada em (2.16) e a solução conduz ao valor de C_p procurado.

$$C_p = \frac{P_{cap}}{P_w} = \frac{2\rho Av_1^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho Av_1^3}$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (15)$$

O valor máximo do coeficiente de potência é obtido derivando-se a equação (15) e igualando-se a zero, resultando na expressão:

$$\frac{dC_p}{da} = 3a^2 - 4a + 1 = 0 \quad (16)$$

O máximo valor para o qual ocorre a maior transferência de potência é: $a = \frac{1}{3}$.

Assim, o valor de C_p para a máxima potência que pode ser retirada da massa de ar é:

$$C_p = 0,5926 .$$

3.1. RENDIMENTO AERODINÂMICO

Em (14) e (15) determinou-se a equação da potência transferida a uma turbina de vento. Esta é a potência disponível no rotor da turbina, uma vez que o rendimento aerodinâmico já foi considerado nas equações pelo fator de Betz (coeficiente de potência) definido por C_p . Este fator é afetado principalmente pelo tipo de geometria das pás da turbina, que é projetado em função do perfil de velocidade do vento na região, e também pelo número de pás instaladas na turbina, considerando o aspecto prático que se aumentado o número de pás reduz-se a rotação da turbina. Assim C_p é um coeficiente que varia em função da rotação da turbina e da velocidade do vento. Uma grandeza adimensional que define esta relação é a razão entre a velocidade periférica das pás pela velocidade do vento incidente na turbina, conhecida como razão de velocidade periférica e representada em algumas literaturas por (λ_E) e em outras, pela sigla em inglês **TSR** (“tip-speed-ratio”). Matematicamente esta razão é representada por (17).

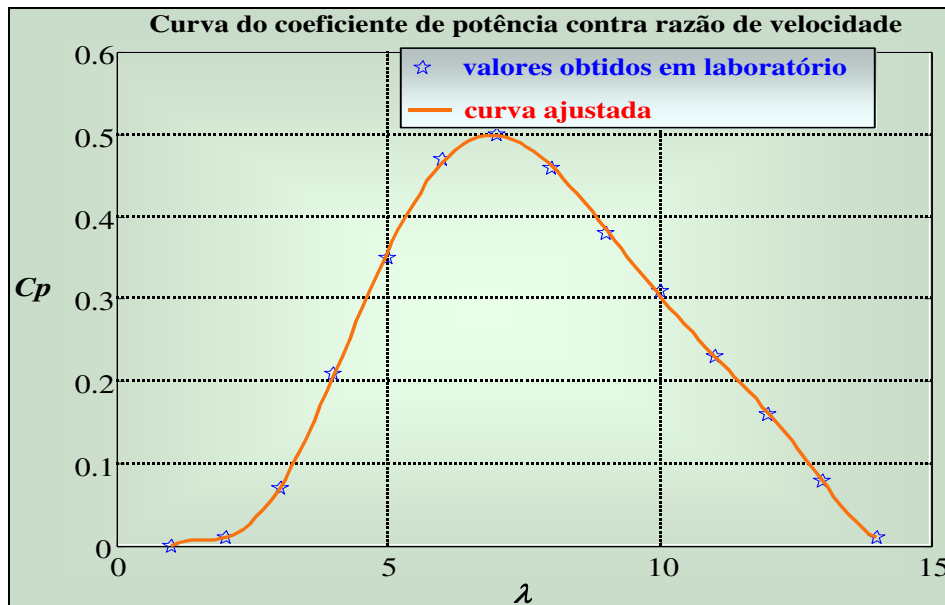
$$\lambda_E = \frac{\omega R}{V_w} \quad (17)$$

Onde:

- λ_E \Rightarrow é a razão de velocidade periférica (“tip-speed-ratio”);
- ω \Rightarrow é a rotação da turbina em rd/s;
- v_w \Rightarrow é a velocidade do vento em m/s.
- R** \Rightarrow é o raio da turbina em m.

Portanto, C_p está relacionado com λ_E por uma relação obtida por meio de medições efetuadas em ensaios em túneis de vento. Com os ajustes dos pontos da curva, pode-se representar $C_p = f(\lambda_E)$ como funções polinomiais. Uma curva típica para turbinas horizontais está ilustrada na Figura 9 onde o ajuste pelo método das interpolações dos pontos obteve-se a curva ajustada.

Figura 8 – Coeficiente de potência, C_p , em função da razão de velocidade periférica, λ_E .



Fonte: lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica

A curva em questão retrata a variação do rendimento aerodinâmico nas turbinas de vento. Portanto, nos projetos de sistemas de geração de energia eólica, é importante que as mesmas operem próximas ao ponto máximo da curva de rendimento aerodinâmico.

3.2. ROTAÇÃO, TORQUE E POTÊNCIA NAS TURBINAS DE VENTO

Turbinas de vento operam com velocidades periféricas variando entre 60 m/s a 100 m/s, sendo estas velocidades pouco afetadas pelo diâmetro da turbina. Estas velocidades periféricas correspondem a baixas rotações entre 15 RPM a 200 RPM. Na geração de energia elétrica, sistemas de multiplicação de velocidades devem ser utilizados, uma vez que os geradores elétricos utilizam rotações da ordem de 1500 RPM em 50 Hz e 1800 RPM em 60 Hz. A transmissão mais utilizada nestes casos é a transmissão por engrenagens devido à simplicidade e rendimentos elevados apresentados. A relação é especificada por $1:n_g$, onde n_g representa o fator de amplificação de rotação.

O torque aerodinâmico das turbinas eólicas pode ser obtido do desenvolvimento matemático da expressão (5), resultando na equação (18), definindo-se que o torque obtido é o disponível no eixo da turbina para sua respectiva rotação.

$$T_{ae} = C_p(\lambda_E) \frac{1}{2[\rho\pi r^2 v_w^2]r} \quad (18)$$

Onde,

T_{ae} \Rightarrow torque aerodinâmico da turbina em N.m.

O torque transmitido ao gerador será o disponível na saída da caixa de engrenagens multiplicadora de rotação. Para aumentos na rotação tem-se diminuição no valor do torque. A relação de rotação é definida pelo fator de amplificação, n_g , assim o torque ficará diminuído proporcionalmente a este valor. A Equação (19) determina o valor do torque transferido ao gerador elétrico.

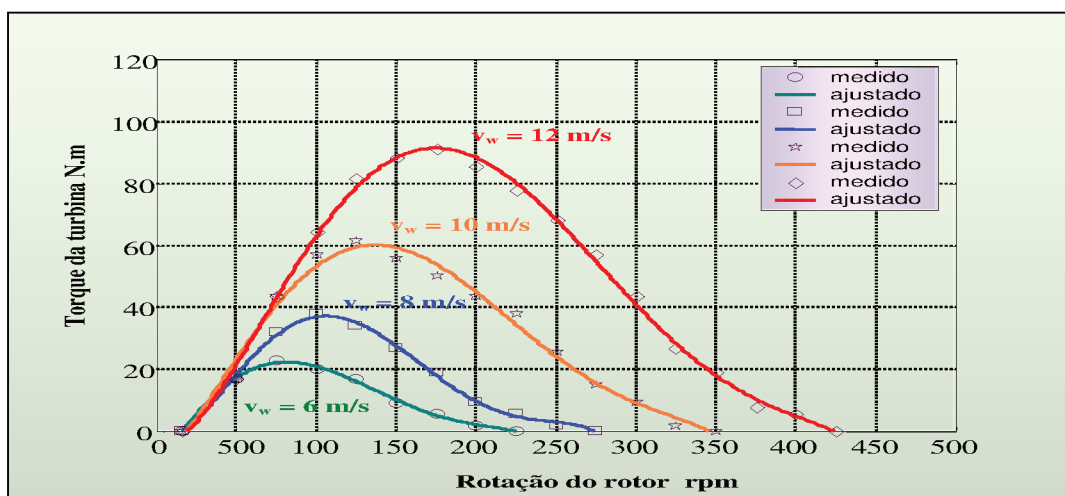
$$T_t = C_p(\lambda_E) \frac{1}{2 \left[\frac{\rho\pi r^2}{n_g} \right] v_w^2} \quad (19)$$

Onde,

T_t \Rightarrow é o torque efetivo da turbina transmitido ao gerador em N.m.

Fabricantes de turbinas disponibilizam em seus informativos técnicos as curvas de torque de seus produtos. Por meio de ensaios em túneis de vento, os valores de torque e rotação são obtidos para cada projeto de turbina, considerando diversas faixas de velocidade de vento em que as turbinas estarão submetidas quando estiverem em operação. A Figura 09 ilustra os valores obtidos para uma turbina de potência nominal de 12,5 kW e rotação nominal de 205 RPM acoplada a uma caixa de engrenagens. A velocidade nominal do vento em que a turbina fornecerá potência nominal é de 12 m/s.

Figura 09 – Curvas de torque contra rotação de turbinas de vento



Fonte: lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica

A potência das turbinas de vento pode ser obtida da Equação (19). Assim a potência que será transmitida ao eixo do gerador será calculada por (20).

$$P_t = C_p \frac{1}{2 \left[\frac{\rho \pi r^2}{n_g} \right] v_w^3} \quad (20)$$

Onde:

$P_t \Rightarrow$ é a potência da turbina transmitida ao gerador.

E a potência elétrica disponível na saída do gerador considerando os rendimentos do gerador de indução como sendo η_{GI} e o rendimento do acoplamento entre a turbina e o gerador, que é feito pela caixa de engrenagens amplificadora de rotação, como η_g , a potência útil será calculada pela expressão (21).

$$P_{el} = n_{GI} n_g C_p \frac{1}{2 \left[\frac{\rho \pi r^2}{n_g} \right] v_w^3} \quad (21)$$

Onde,

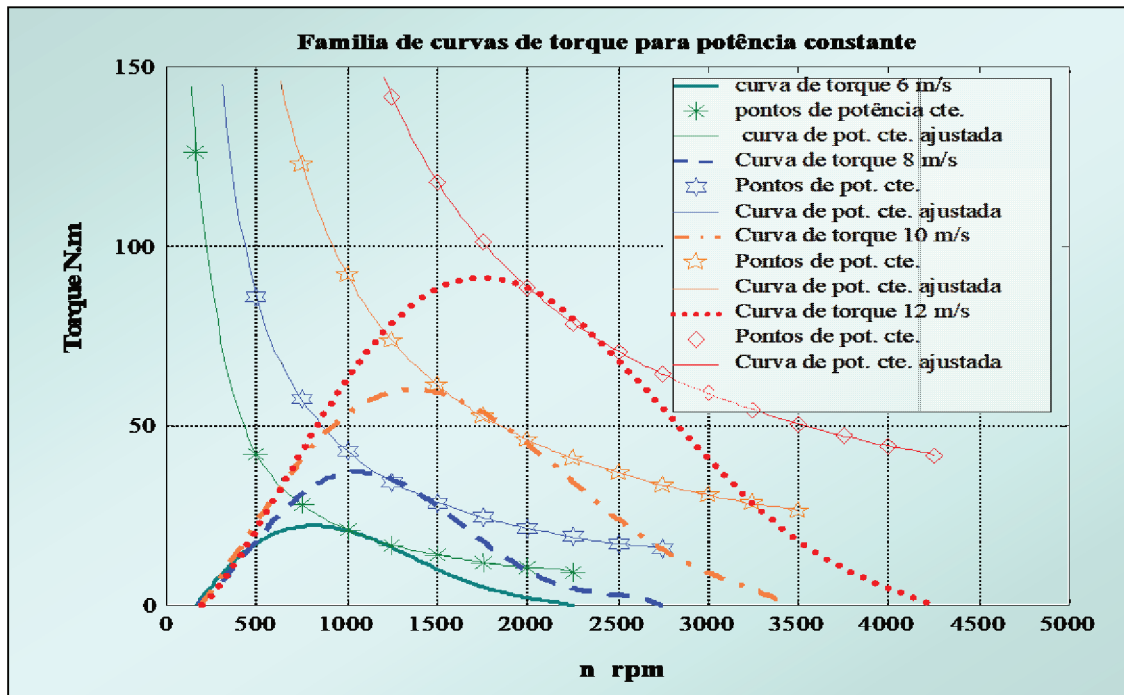
- $P_{el} \Rightarrow$ é a potência elétrica do gerador.

Curvas de potências em turbinas de vento podem ser obtidas a partir das curvas de torque por rotação apresentadas na Figura 10. Porém, uma característica importante que deve ser observada é que o ponto de máximo torque nas turbinas de vento não coincide com o ponto de máxima potência.

Sob o ponto de vista da engenharia de controle, essas turbinas apresentam dois pontos a serem considerados: O primeiro diz respeito às largas faixas de variação da rotação que são definidas pelas velocidades do vento, resultando em frequências variáveis, dificultando o ajuste dos controladores. O outro é uma busca do ponto de máxima potência que não coincide com o ponto de máximo torque.

Esta situação pode ser observada nas curvas apresentadas na Figura 11, onde estão plotadas as curvas de torque com as curvas de potência constante da turbina.

Figura 10 – Curvas de torque contra rotação e potência constante para cada velocidade de vento.



Fonte: lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica

Analisando-se as curvas da Figura 10, o ponto de máxima potência fica definido pelo ponto em que as curvas de potência constante interceptam as curvas de torque. É evidente que o ponto de potência máxima fica deslocado em relação ao ponto máximo da curva de torque. Sob o ponto de vista operacional das turbinas de vento, caso o ponto de operação fique localizado à direita do ponto de máxima potência, a turbina estará cedendo maior potência que a permitida, o que resultará em perda de rotação (stall), pois a equação do balanço dos torques dinâmicos, (21), resultará em um torque desacelerante, ou seja, a parcela à direita da equação será negativa.

$$T_t - T_g = J \frac{d\omega}{dt} \quad (21)$$

Onde:

T_g ⇒ torque do gerador elétrico,

J ⇒ é o momento de inércia da turbina e gerador,

ω ⇒ é a velocidade angular do conjunto turbina-gerador.

Por outro lado, se o ponto de operação ficar à esquerda, abaixo do ponto de potência máxima, a turbina estará fornecendo uma potência em que boa parte não estará sendo transformada em energia elétrica. Nesta situação, haverá um torque acelerante levando a

turbina a velocidades maiores, assim ficando a potência excedente disponibilizada como energia cinética no eixo da turbina.

A operação no ponto de potência máxima é o ideal, pois para esta situação os torques envolvidos se anulam, sendo toda a potência produzida pela turbina entregue ao gerador.

De uma forma geral pode-se definir o torque nas turbinas por (22), determinando um aspecto importante dos pontos de torque máximo, ou seja, esses pontos seguem uma lei quadrática que pode ser representada por um polinômio de segunda ordem.

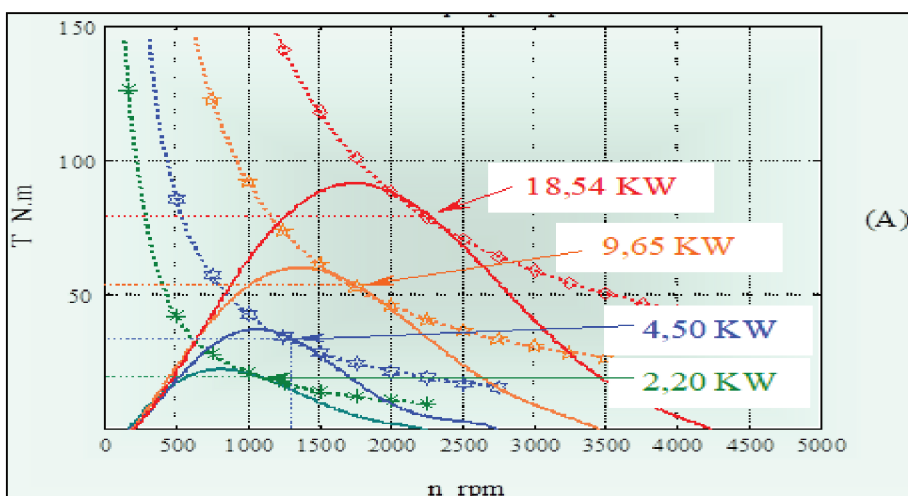
$$T_t = k\omega_t^2 \quad (22)$$

A Equação (20) mostra que os pontos de potência máxima seguem a lei do cubo da rotação, sendo esses pontos alinhados segundo um polinômio de terceira ordem.

3.3. CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA OBTIDAS DOS MODELOS DE TURBINAS EÓLICAS

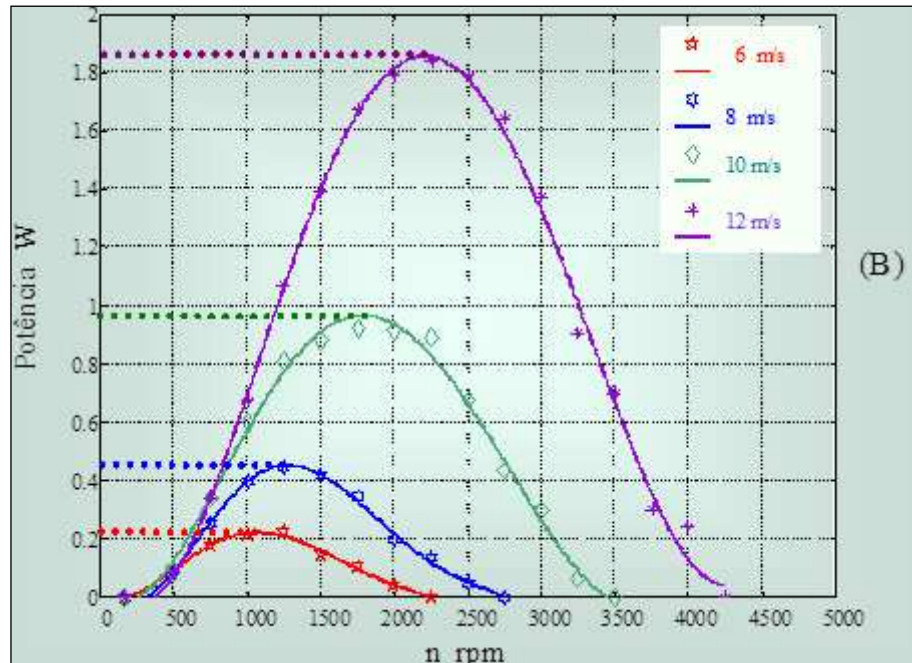
As equações desenvolvidas, juntamente com as curvas da turbina obtidas, serão utilizadas para o desenvolvimento do modelo da turbina eólica. Foi comprovado que o torque da turbina modifica de acordo com a alteração da velocidade do vento e que a potência é afetada pela variação cúbica da velocidade do vento. Outro aspecto demonstrado é que os pontos de máxima potência não serão os mesmos para o máximo torque, conforme ilustrado na Figura 12, quando há variação na velocidade do vento nas pás da turbina. As linhas onde a potência permanece constante interceptam a curva de torque por rotação da turbina no ponto onde a potência é máxima, vide gráfico ilustrado na Figura 12.

Figura 11 - Gráfico das curvas de torque para potência constante



Fonte: lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica

Figura 12 - Gráfico das curvas de potência de uma turbina 12,5 kW



Fonte: lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica

O gráfico da Figura 12 demonstra os pontos indicados pelas setas correspondem aos pontos de potência máxima nessas curvas de torque, e que correspondem ao ponto máximo das curvas de potência no gráfico. As linhas cheias nessas curvas de potência foram representadas através de polinômios que foram obtidos por interpolações. Assim foi dada maior precisão para estas curvas de potência na região de máxima potência que é a região localizada nas proximidades dos pontos de potência máxima e que representam as regiões de interesse para o sistema de controle. Os intervalos nas extremidades das curvas não apresentam boa precisão, pois no caso em estudo não serão utilizados.

4. AEROGERADORES

Os aerogeradores apresentam pás que se movimentam com a força dos ventos. Parte da energia cinética, devido ao movimento dos ventos, é transferida para as pás do rotor e se torna a energia cinética rotacional das pás. Consequentemente, o eixo, que está acoplado às pás e é por elas, acionado. A energia cinética rotacional do eixo é transmitida ao eixo do gerador para ser transformada em energia elétrica. Por fim, o transformador é responsável por acoplar adequadamente o sistema eólico ao sistema elétrico.

Como resultado das buscas por novas tecnologias, as quais tinham como objetivo melhorar o rendimento dos parques eólicos, por meio do aprimoramento dos equipamentos a serem utilizados, surgiram alguns modelos de aerogeradores, cada um com suas características próprias, sua tecnologia, capacidade e rendimento.

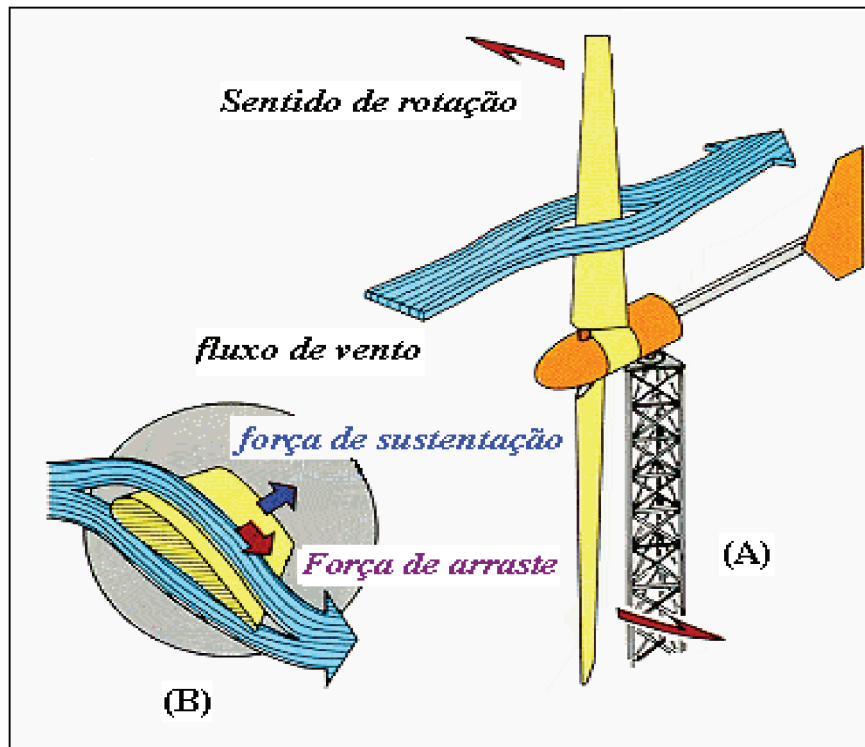
4.1 AEROGERADORES DE EIXO HORIZONTAL

Este modelo baseia-se no princípio de funcionamento dos moinhos de vento. Constitui-se de turbinas de uma a três pás ou múltiplas (acima de três pás), com um perfil aerodinâmico. Rotores de três pás são os mais comuns, pois asseguram um bom compromisso entre coeficiente de potência, custo e velocidade de rotação, bem como melhor estética comparada às turbinas de duas pás.

Apesar mais eficientes, os rotores com duas pás são mais instáveis e propensos a turbulências, trazendo risco a sua estrutura, o que não acontece nos rotores de três pás por serem muito mais estáveis, barateando seu custo e possibilitando a construção de aerogeradores de mais de 250 metros de diâmetro e com capacidade de geração de energia que pode chegar a 10 MW (megawatts). Seu pico de geração de energia é atingido com ventos fortes e sua eficiência pode passar dos 45%.

Rotores múltiplos são mais utilizados para bombeamento de água de poços artesianos, mas nada impede que sejam utilizados para geração de energia elétrica. Impulsionados tanto por força de arrasto, como por força de sustentação, conforme ilustra a Figura 13, esses rotores têm seu pico de eficiência em ventos fracos, atingindo 30%.

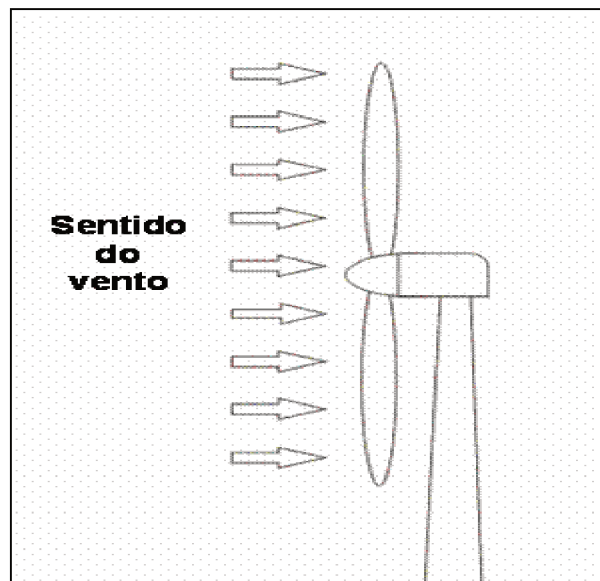
Figura 13 – Ação das forças aerodinâmicas da turbina eólica de eixo horizontal.



Fonte: lógica fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica

- a) **Frontal (“upwind”)**: o vento sopra pela parte frontal, conforme ilustra a Figura 15. As pás são rígidas e o rotor é orientado segundo a direção do vento através de um dispositivo motor.

Figura 14 – demonstração do vento frontal



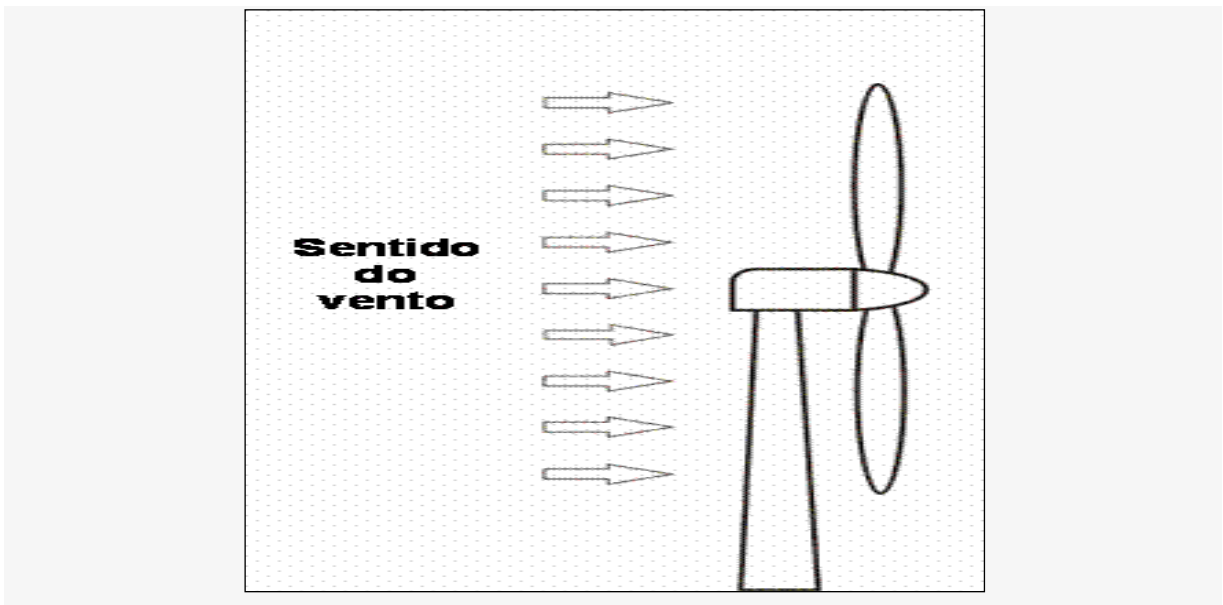
Fonte: AEEólica

O rotor em uma turbina contra o vento está na frente da unidade, conforme ilustra a Figura 14, posicionado de forma semelhante a um avião acionado por hélice. Este é o tipo mais comum de turbinas utilizadas no Brasil.

A desvantagem deste tipo de turbina é que nela, o rotor precisa ser posicionado a distância mínima da torre para evitar problemas com uma greve de lâmina. As próprias lâminas devem ser um pouco rígidas para evitar que dobrem com o vento, chocando-se com a torre. Isso significará que o ponto onde a lâmina se liga ao cubo do rotor será estressado durante condições elevadas de vento com rajadas

b) **Retaguarda (“downwind”)**: o vento sopra pela retaguarda das pás conforme ilustra a Figura 15. O rotor é flexível e auto-orientável.

Figura 15 – demonstração do vento Retaguarda



Fonte: AEEolica

A colocação da turbina no topo é a forma mais utilizada por ser a mais simples e a que conduz a melhores resultados para grandes potências; são menores os esforços de manobra e melhor a estabilidade. As pás da turbina devem sempre ser orientadas segundo a direção do vento.

Atualmente, aerogeradores de eixo horizontal com um rotor do tipo hélice possuem grande importância para a produção de eletricidade em grande escala.

4.2 – PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

a. Nacele:

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. A Figura 16 mostra os principais componentes instalados em uma nacele, utilizando um gerador convencional.

Figura 16 - Componentes de uma Nacele convencional (de eixo horizontal):



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

Fonte: Wobben do S/A

b. Pás, cubo e eixo

As pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, conforme ilustra a Figura 17, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Inicialmente fabricadas em alumínio, atualmente são fabricadas em fibras de vidro reforçadas com epoxi. Nos aerogeradores que usam controle de velocidade por passo, a pá dispõe de rolamentos em sua base para que possa girar, modificando assim seu ângulo de ataque.

As pás são fixadas por meio de flanges em uma estrutura metálica a frente do aerogerador denominada cubo, conforme ilustra a Figura 18. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência. Para os aerogeradores que utilizem o controle de velocidade por passo, o cubo, além de apresentar os rolamentos para fixação das pás, também acomoda os mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de ataque de todas as pás. É importante citar que por se tratar de uma peça mecânica de alta resistência, o cubo é montado de tal forma que, ao sair da fábrica, este apresenta-se como peça única e compacta viabilizando que, mesmo para os aerogeradores de grande porte, seu transporte seja feito sem a necessidade de montagens no local da instalação.

O eixo é o responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador, fazendo a transferência da energia mecânica da turbina. É construído em aço ou liga metálica de alta resistência.

Figura 17 – Cubo do aerogerador de eixo horizontal sendo fabricado



Fonte: Wobben S/A

Figura 18 – Vista aérea do pátio da empresa Enercon (wobben) das pás:



Fonte: Wobben S/A

c. Transmissão e Caixa multiplicadora

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. A figura 19 apresenta a localização da caixa multiplicadora dentro do sistema de geração eólica.

O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador, de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (tip speed). Entretanto, geradores (sobretudo síncronos) trabalham em rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1.200 a 1.800rpm), tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

Recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construí-los. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores, utilizam geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões. Os dois tipos de projetos possuem vantagens e desvantagens e a decisão de usar o multiplicador ou fabricar um aerogerador sem caixa de transmissão é, antes de tudo, uma questão de filosofia do fabricante, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Gerador conectado a caixa de engrenagens (vista à direita)



Fonte: Wobben S/A

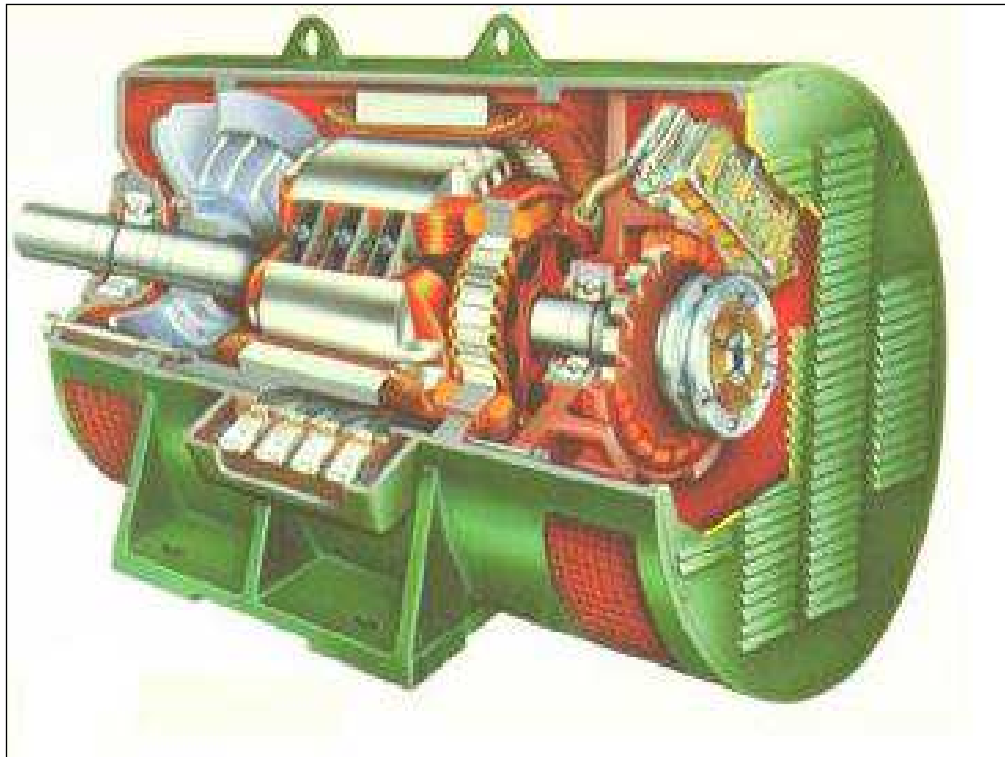
d. Gerador

A transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica por equipamentos de conversão eletro-mecânica é um problema tecnologicamente dominado e, portanto, encontram-se vários fabricantes de geradores disponíveis no mercado. Entretanto, a integração de geradores no sistema de conversão eólica constitui-se em um grande problema, que envolve principalmente:

- variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- variações do torque de entrada (uma vez que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo);
- exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida;
- dificuldade de instalação, operação e manutenção devido ao isolamento geográfico de tais sistemas, sobretudo em caso de pequena escala de produção (isto é, necessitam ter alta confiabilidade).

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação ao sistema de conversão de energia eólica, conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20 - Gerador convencional



Fonte: Wobben do S/A

e. Torre

As torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento, conforme ilustra as Figuras 21 e 22. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo do sistema. Inicialmente, as turbinas utilizavam torres de metal treliçado.

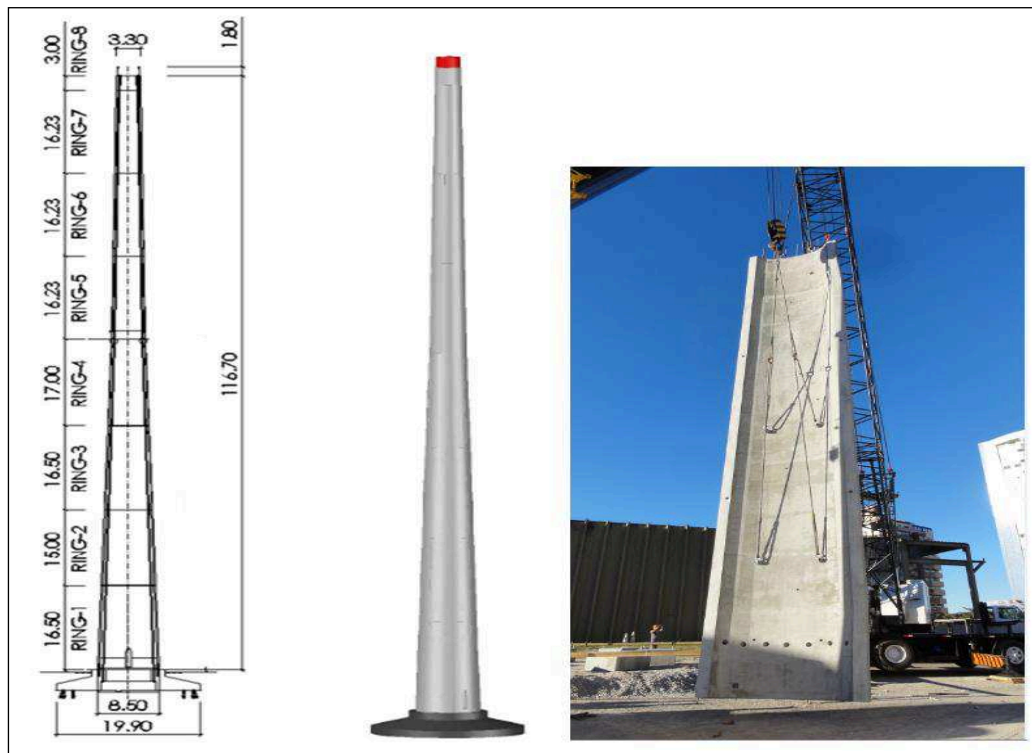
Com o uso de geradores com potências cada vez maiores, as naceles passaram a sustentar um peso muito elevado tanto do gerador quanto das pás. Desta forma, para dar maior mobilidade e segurança para sustentar toda a nacela em alturas cada vez maiores, tem-se utilizado torres de metal tubular ou de concreto que podem ser sustentadas ou não por cabos tensores.

Figura 21 - montagem de um aerogerador:



Fonte: complexo_eólico_bom_jardim_da_serra_sc

Figura 22 - Torres de concreto

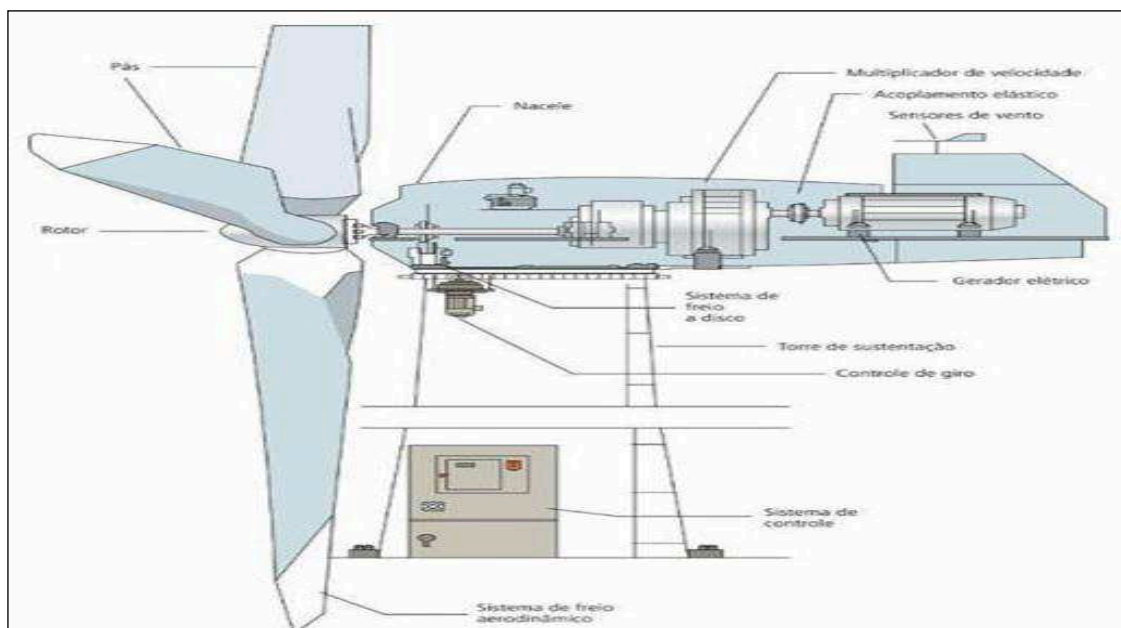


Fonte: vendascassol.com.br/produtos/aerogerador

Uma descrição da função dos principais componentes aerogerador, conforme Figura 23.

- Pás do Rotor: Capturam a energia eólica e a convertem em energia rotacional no eixo;
- Eixo: Transfere a energia de rotação para o gerador;
- Nacele: Carcaça onde são abrigados os componentes;
- Caixa de Engrenagens: Aumenta a velocidade de rotação do eixo entre o gerador e o cubo do rotor;
- Gerador: Usa a energia rotacional para gerar eletricidade utilizando eletromagnetismo;
- Unidade de Controle Eletrônico: Monitora todo o sistema, realiza o desligamento da turbina em caso de falha e ajusta o mecanismo de alinhamento da turbina com o vento;
- Controlador: Alinha o rotor com a direção do vento;
- Freios: Em caso de falha no sistema ou sobrecarga de energia, detém a rotação do eixo;
- Torre: Sustenta o rotor e a nacele, além de erguer todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo;
- Equipamentos Elétricos: Transmitem a eletricidade do gerador pela torre e controlam os elementos de segurança da turbina.

Figura 23 - Partes dos componentes de um gerador convencional (de eixo horizontal):



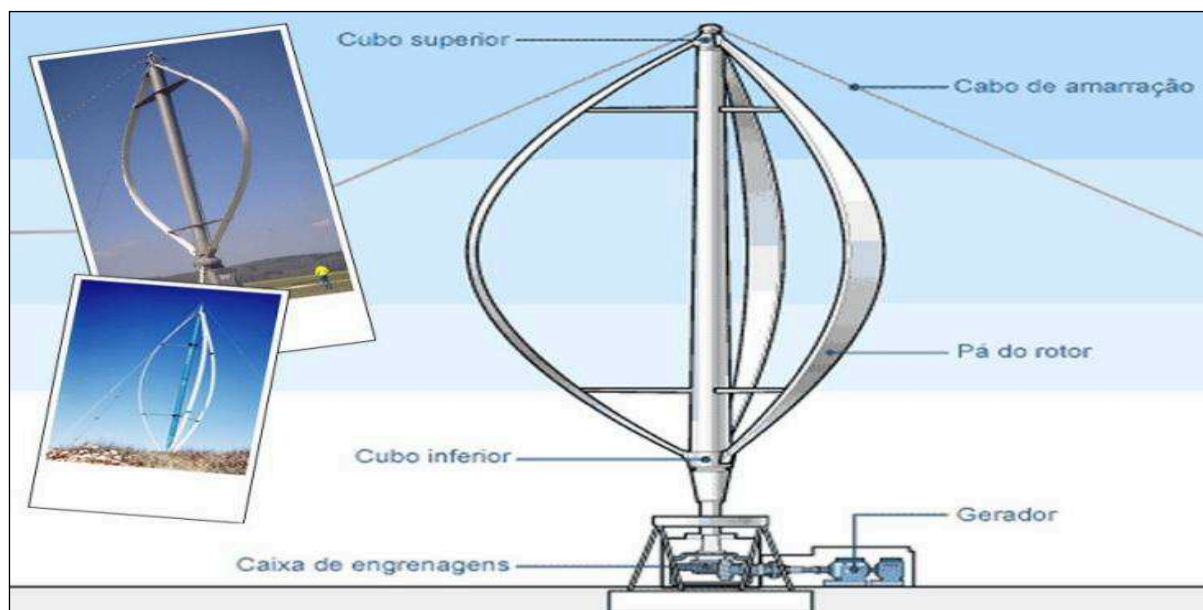
4.3 – AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL (AEVs)

São modelos que apresentam menor rendimento, porém tendem a ser mais seguros, mais fáceis de construir, podendo ser montados mais perto do solo e operam muito melhor em condições de turbulência. Possuem torres baixas, entre 0,1 e 0,5 vezes a altura do próprio rotor, o que permite a colocação de todo o dispositivo de conversão de energia (gerador, caixa de velocidades, etc.) na base do aproveitamento e isso facilita as operações de manutenção.

Além disso, neste tipo de aerogerador não é necessário o dispositivo de orientação da turbina face ao vento, tal como acontece nos aerogeradores de eixo horizontal. Este possui também uma velocidade de arranque mais baixa do que a dos aerogeradores de eixo horizontal, o que lhes dá vantagem em condições de vento reduzido. Por outro lado, eles não são tão eficientes como os aerogeradores de eixo horizontal. Isso acontece porque a intensidade de vento junto ao solo é menor, o que implica um menor rendimento deste tipo de aerogerador e a torre fica sujeita a elevados esforços mecânicos. Devido a essas razões, os construtores atualmente privilegiam os aerogeradores de eixo horizontal.

Este tipo de aerogerador é especialmente indicado para meios urbanos porque além de ser silencioso, aproveita o vento mesmo que a direção deste não seja constante e haja a formação de turbilhões, o que acontece frequentemente em áreas com edifícios, árvores e outros obstáculos. A Figura 24 ilustra as partes de um aerogerador vertical.

Figura 24 - Partes dos componentes da turbina eólica tipo Darrius



Fonte: JádíVentin/energia-eólica.

- Pás do rotor: São as velas do sistema e atuam como barreiras para o vento. Transferem a energia mecânica rotacional para o eixo.
- Eixo: Está ligado em uma extremidade ao cubo do rotor, girando junto com ele. Na outra extremidade está ligado a um gerador elétrico.
- Gerador: Usa as propriedades da indução eletromagnética para produzir tensão elétrica (força que move a corrente elétrica de um ponto para outro). Um gerador simples consiste em ímãs e um condutor que é um fio enrolado na forma de bobina. Dentro do gerador, o eixo se conecta a um conjunto de ímãs permanentes que circunda a bobina.

Turbina Gorlov

Este modelo é essencialmente uma turbina *Darrieus*, conforme ilustra a Figura 24 em uma configuração helicoidal, patenteado em 2001. Ele foi desenvolvido com o objetivo de solucionar a maioria dos problemas do rotor original *Darrieus*. Esta turbina apresenta menor oscilação de torque, baixa vibração e ruído, além de baixo estresse cíclico. Pelo menos dois produtos de turbinas eólicas verticais tipo Gorlov já estão no mercado, incluindo a turbina eólica Turby e a turbina eólica Quietrevolution. Seus fabricantes apostaram em turbinas discretas que apresentam bons resultados em áreas urbanas, podendo ser montadas no topo de edifícios, precisam de pouca manutenção e menor investimento. Já funcionam em algumas lojas de varejo, departamentos governamentais, escolas e universidades.

Este mecanismo alcança até 35% de eficiência, um resultado bastante competitivo entre as turbinas de eixo vertical, de acordo com o fabricante.

Figura 25 - Turbina eólica vertical tipo Gorlov.



Fonte: solar-wind-nature-energy.com/win_turbine

Turbina Savonius

Este aerogerador foi desenvolvido na Finlândia pelo engenheiro S. J. Savonius. Apresenta torque de partida e é, relativamente, de fácil construção, porém apresenta velocidade de rotação reduzida e baixo rendimento, cerca de 15% de eficiência. Este tipo de dispositivo com duas ou mais pás em forma de conchas é muito utilizado em anemômetros e sistemas de ventilação, tais como, o ventilador Flettner, que usa um rotor Savonius. Ainda é fabricado e muito comum em ônibus e telhados. Uma nova variedade de turbina tipo Savonius usa velas que podem abrir ou fechar de acordo com as mudanças na velocidade do vento.

Figura 26 - Turbina eólica tipo Savonius



Fonte: solar-wind-nature-energy.com/win_turbines

A Turbina Eólico-Solar é baseada em engenharia à vela e utiliza um rotor Savonius coberto por células solares (ou células fotovoltaicas) capazes de transformar a energia luminosa, proveniente do sol, em energia elétrica, como ilustra a Figura 31. Desse modo, sol e vento podem produzir eletricidade simultaneamente, melhorando o desempenho da turbina. Este mecanismo produz pouco ou nenhum ruído.

Figura 27 - Turbina eólica tipo Savonius, modelo eólico-solar:



Fonte: solar-wind-nature-energy.com/win_turbines

4.4 – OUTROS TIPOS DE TURBINAS NÃO CONVENCIONAIS

Vortex Bladeless

O gerador eólico Vortex Bladeless foi criado pela empresa espanhola de mesmo nome e promete ser uma boa alternativa ambiental para a geração de energia. A empresa fabricante se baseou em um efeito aerodinâmico conhecido como “vorticidade” para criar a turbina. Possui o formato de uma torre, que utiliza a força do vento por meio de sua oscilação para gerar energia, a partir deste movimento. O dispositivo é composto por um mastro fixo, um gerador de energia e um cilindro oco de fibra de vidro, conforme ilustra a Figuras 28.

Figura 28 - Aero gerador Vortex



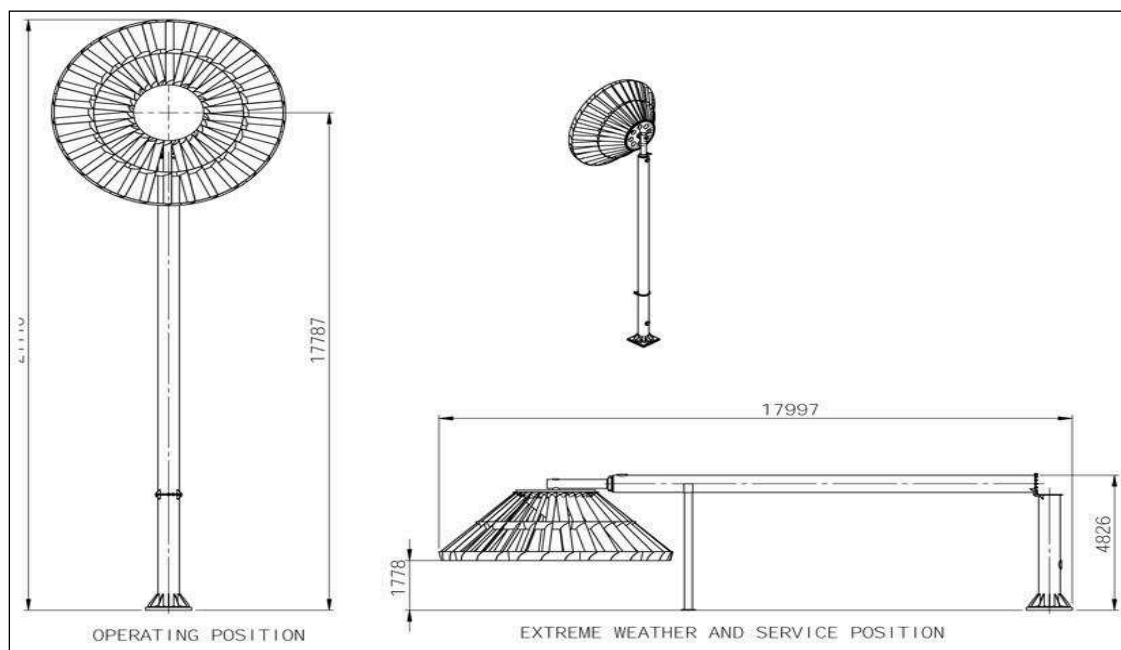
Fonte: Vortex+Bladeless&oq

Eco Whisper

A turbina de geração eólica *Eco Whisper* foi concebida e fabricada na Austrália. Proporciona maior quantidade de energia do que as turbinas convencionais, a partir da velocidade do vento. Sua produção energética anual chega a ser até 30% maior do que a dos modelos tradicionais. Seu desempenho varia de um local para outro. Além de apresentar melhor desempenho, esta turbina elimina o ruído e a vibração presente nas tradicionais turbinas eólicas de três lâminas. Com esta tecnologia não existem perdas e a coleta de vento é feita de forma mais eficiente. A turbina converte e gera mais energia a despeito da baixa velocidade de arranque em comparação às outras. Todas essas vantagens são obtidas ao mesmo tempo em que a turbina tem a metade da altura e diâmetro do disco, também em comparação às turbinas comuns.

Em vez das três habituais pás gigantes, ela possui 30 lâminas, com 6,5 m de diâmetro, que se estendem para fora a partir de um eixo central com aproximadamente 21m de altura. Este tipo de turbina pode suportar ventos de até 220 km/h e a geração de kWh dependerá da incidência de vento do local de instalação, na seguinte proporção, com velocidades de vento acima da média de 5m/s (18 km/h) poderá gerar entre 18 MWh a 32 MWh por ano. Sua sólida estrutura, inclusive, maximiza a visibilidade para as aves, oferecendo maior segurança, conforme ilustra a Figura 29.

Figura 29 - Aerogerador de eixo horizontal Whisper



Fonte: wind turbinas

Makani Airborne

É uma “asa” amarrada que gera energia ao voar em grandes círculos, onde o vento é mais forte e mais consistente, conforme ilustra a Figura 30. Ela elimina 90% do material usado em turbinas eólicas convencionais e pode acessar os ventos tanto em altitudes mais altas quanto acima das águas profundas offshore - recursos atualmente inexplorados.

Figura 30 - Energia eólica sendo produzida no ar



Fonte: seao2.com/vawt/

Implux

Um inovador dispositivo gerador de energia eólica omnidirecional e vertical, que utiliza rotor aerofóil axial acondicionado em um invólucro de captação de vento, não móvel, conforme Figura 31. Possui apenas um grande componente móvel, o rotor da turbina. O dispositivo patenteado incorpora lâminas toroidais fixas horizontais que capturam e aceleram o vento de qualquer direção para uma câmara central onde o rotor de turbina gera eletricidade.

Figura 31 - Energia eólica sendo produzida no modelo câmara



Fonte: seao2.com/vawt/

Gual Statocolian

É um conceito revolucionário, com um eixo vertical composto por um estator fixo que canaliza o vento em sua força ideal para um rotor móvel. A energia é transportada pelo vento e transformada em eletricidade, como ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Energia eólica sendo produzida no estator



Fonte: seao2.com/vawt/

Altaeros

A Altaeros Energy está desenvolvendo uma inovadora turbina eólica para produzir energia renovável abundante e de baixo custo, por meio de tecnologia aeroespacial segura e confiável para levantar turbinas eólicas e operar em maiores alturas, como ilustra a Figura 33, onde os ventos são muito mais fortes e mais consistentes do que no solo. As turbinas Altaeros são projetadas para fácil mobilidade e rápida implantação em locais remotos, militares e offshore.

Figura 33 - Energia eólica sendo produzida no ar

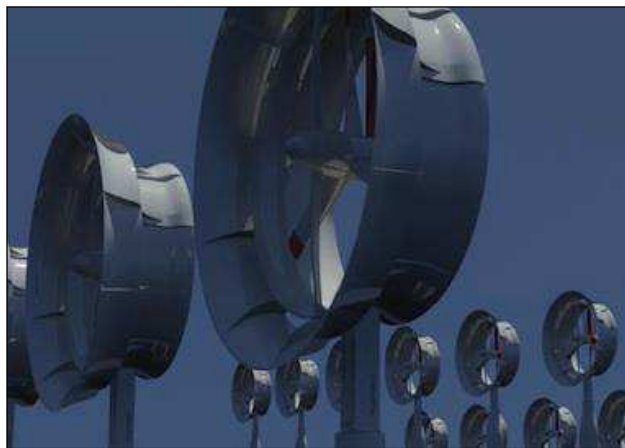


Fonte: seao2.com/vawt/

Whetar

É um novo dispositivo internacionalmente patenteado para exploração de energia eólica, caracterizado por dois rotores contra-rotativos duplos encapsulados em um condutor. Esta mistura única de tecnologias oferece vantagens sobre qualquer outra turbina eólica convencional. Apresenta três seguintes grandes avanços: praticamente nenhum ruído, quase nenhuma vibração e cinco vezes mais potência.

Figura 34 - Energia eólica no sistema de torres



Fonte: seao2.com/vawt

SeaTwirl

É uma estrutura simples, sem linha de transmissão ou rolamento, utilizando o próprio peso da turbina. Também usa a água como um rolamento liso, conforme ilustra a Figura 35.

Figura 35- Absorção de energia no sistema offshore



Fonte: seao2.com/vawt/

ART Turbine

A Turbina ART é construída como um único sistema de peça móvel, com sua lâmina contendo uma disposição magnética, a qual gira em torno de um mastro interno estacionário que transporta os enrolamentos do estator. É um vento de eixo vertical que converte energia de um fluido em movimento para energia de eixo útil, usado para gerar eletricidade, bombear água ou fazer muitas outras coisas úteis, conforme ilustra a Figura 36.

Figura 36 - Energia eólica ART Turbine



Fonte: seao2.com/vawt/

5. CLASSIFICAÇÃO DAS FAZENDAS DE VENTOS

Existem dois tipos de parques eólicos, onshore e offshore, como demonstra a figura 37. Os parques eólicos onshore encontram-se localizados em terra ao largo da costa marítima ou no interior. Os parques eólicos offshore são parques onde os aerogeradores são instalados no mar.

Figura 37 – Representação do sistema geração e seu cabeamento até a subestação.



Fonte: general cable.

5.1. SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA ONSHORE

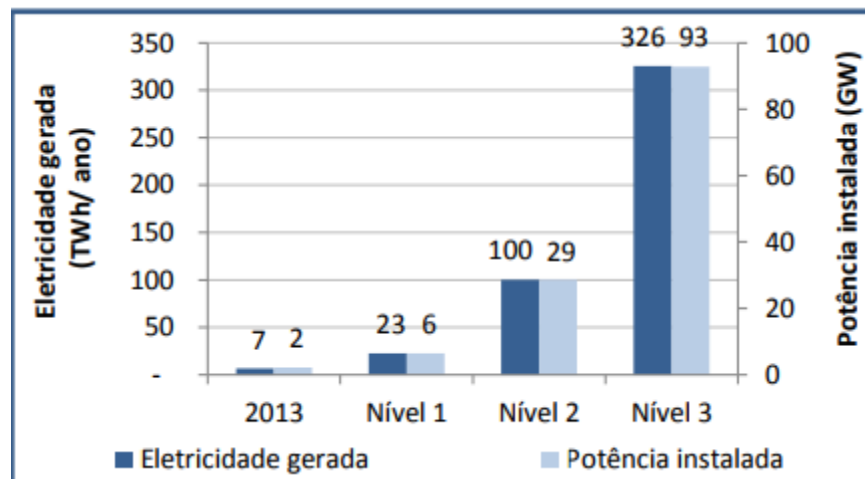
A geração eólica onshore é hoje uma das fontes mais competitivas no país, com preços equiparados a fontes de geração fóssil, como o gás natural. Em 2013, o parque eólico nacional apresentava potência instalada de 2,2 GW com uma geração de 6,5 TWh, equivalendo apenas a 1% da geração nacional. No entanto, dada a sua competitividade atual no país e a consolidação cada vez maior da sua indústria de equipamentos, espera-se que a tecnologia eólica onshore seja adotada de forma significativa até 2050.

O nível 1 de geração eólica onshore corresponde ao parque eólico instalado atualmente, mais os projetos em construção e em outorga, segundo ANEEL (2014). Neste cenário conservador, nenhum outro projeto além dos já aprovados hoje são considerados e a máxima capacidade de geração é atingida entre 2015 e 2020, segundo relatório da ANEEL(2017)

O nível 2 de geração eólica onshore no Brasil se baseia no cenário de novas políticas de Internacional Energy Agency (IEA 2013) em que o país atinge a capacidade instalada de 21 GW em 2035. A taxa crescimento de capacidade e geração dado entre 2020 e 2035 foi extrapolado para 2050.

O nível 3 para eólica onshore considera a premissa de Sardinha (2014), em que se diz que fontes intermitentes podem participar em até 20% da geração de eletricidade no país sem necessidade de grandes investimentos de adaptação de infraestrutura. Assim, assume-se que em 2050 a geração eólica onshore atingirá 326 TWh, segundo estudo da ANEEL (2014). Conforme ilustra a Figura 38.

Figura 38 - Capacidade instalada e geração de energia em usinas eólicas onshore, em 2050



Fonte: calculadora 2025

5.2. SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE

A energia eólica offshore consiste em construir parques eólicos ao longo da costa marítima. Esta tecnologia possibilita aumentar a potência instalada de energia eólica e ainda proporciona algumas vantagens face aos parques eólicos terrestres, a saber:

- ➔ mais vento no mar do que em terra, o que se deve ao fato da inexistência de obstáculos no mar e a menor rugosidade da superfície marítima quando comparada com a terrestre.
- ➔ maior facilidade de transportar os elementos que compõem os aerogeradores por mar do que por terra. Visto que, ficam abertas as portas a fabricação de aerogeradores de maior porte, que permitirão retirar mais energia do vento.

Contudo também existem dificuldades e inconvenientes na implementação desta tecnologia, como:

- ➔ o custo da fabricação das fundações é elevado, tendo em vista ser necessário fabricar torres mais altas, pois parte da estrutura fica submersa.
- ➔ o custo da manutenção é mais elevado, pois o mar é um ambiente corrosivo, além de que o deslocamento de técnicos é mais caro.
- ➔ Esta tecnologia fica limitada a 40 metros de profundidade, para instalar aerogeradores a profundidades maiores, está a ser desenvolvida uma tecnologia flutuante, que está em fase de testes.

5.3. POR QUE O BRASIL NÃO INVESTE EM SISTEMAS EÓLICOS OFFSHORE?

Por tratar-se de um país com dimensões continentais, de uma plataforma continental imensa, que não explora todo o potencial eólico e que, por vezes passa por riscos de um apagão de energia. Estudos comprovam que o potencial de energia eólica em alto mar é cerca de doze vezes maior que o potencial de energia eólica em terra.

Fala-se de energia suficiente para promover um crescimento sustentável da economia do país a médio-longo prazo. Para se ter uma idéia, enquanto o Reino Unido luta para ter uma capacidade de geração eólica instalada em ambiente marítimo de 40 GW, no Brasil, somente nas regiões Sul – Sudeste, este potencial é de 215 GW, na faixa onde o mar apresenta entre 0 e 100 metros de profundidade. Esta medida foi realizada a 10 metros de altura, mas considerando-se que o diâmetro de um rotor de uma turbina eólica é de cerca de 80 metros, este potencial pode aumentar.

Se juntar-se com o potencial da Região Nordeste, essa capacidade sobe para 606 GW onde o mar possui até 100 metros de profundidade. Se avaliar-se o potencial em termos de distância, pode-se produzir 57 GW na faixa até 10 km da costa, ou seja, algo bem próximo do litoral e viável, para uma capacidade de geração bastante interessante, segundo comprovam os estudos.

Em termos de capacidade total eólica para o país, o Brasil possui algo em torno de 1,78 TW para sua ZEE (Zona Econômica Exclusiva), o que certamente mudaria a matriz energética do País.

Os estados que mais se destacam por seu potencial eólico: Rio Grande do Norte, Sergipe, Alagoas, Ceará, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Assim, é possível ver que o potencial eólico offshore dentro da ZEE brasileira supera em muito o potencial de eólicos onshore.

Investindo nas eólicas offshore, além de desenvolver o potencial energético do país, o Brasil estaria gerando mais empregos na atividade marítima, pois embarcações bem parecidas com as que fazem o apoio à atividade petrolífera teriam que ser utilizadas para diversos fins dando apoio à atividade eólica offshore.

Mais do que isso, o país estaria profundamente engajado na geração de uma energia limpa, totalmente renovável, reduzindo-se a emissão de gases do efeito estufa.

Apesar de apresentar algumas desvantagens, pelo alto custo de instalação e manutenção, além da poluição visual, no caso das eólicas instaladas próximas à costa, há uma série de vantagens altamente compensatórias das instalações offshore, Figura 37, a saber:

- perenidade e uniformidade dos ventos, o que resulta em menores efeitos decorrentes de turbulência;
- maior velocidade dos ventos (possivelmente de modo proporcional à distância da costa);
- redução de alguns efeitos negativos, como emissão de ruídos e impactos à vizinhança;
- não utilização de terras habitáveis e/ou agricultáveis;
- possibilidade de implantação de turbinas maiores, ante a ausência de limite de peso para transporte dos componentes (problema enfrentado pelas instalações onshore) .

O impacto à paisagem litorânea, apesar de ser uma desvantagem, pode ser mitigado com a limitação à instalação próxima às praias e locais turísticos marítimos.

Incentivos político-regulatórios já seriam algo interessante, até mesmo para aliviar a questão dos custos, que somada à alta carga tributária no Brasil, pode simplesmente impedir que isso se realize um dia.

Buscar expertise em países que já desenvolvem a atividade, vendo como funcionam seus marcos regulatórios de exploração deste tipo de energia e sua legislação como um todo, bem como entender como esta atividade nova iria interagir com as já existentes no mar, tais como a pesca, o apoio marítimo e a navegação costeira, já que fatalmente campos assim iriam

impactar diretamente o ambiente onde essas atividades são realizadas, o que seria um bom início.

Figura 39 – Sistema de geração offshore



Fonte: Portal marítimo

6. AEROGERADORES E SUAS CONFIGURAÇÕES

A transformação de energia eólica em energia elétrica é a chave que possibilita a utilização dessa fonte de energia alternativa. Existem atualmente dois tipos de geradores elétricos responsáveis pela conversão da energia eólica em energia elétrica:

- Gerador de velocidade fixa que utilizam geradores assíncronos (de indução)
- Gerador de velocidade variável que utilizam geradores síncronos e assíncronos.

6.1. GERADOR DE VELOCIDADE FIXA

Este tipo de gerador oferece algumas vantagens aos parques eólicos constituídos que o utilizam, em relação a outras tecnologias, tais como

- Tecnologia simples e robusta;
- Ausência de conversores eletrônicos;
- Menor custo inicial;
- Regulação de velocidade do rotor simples.

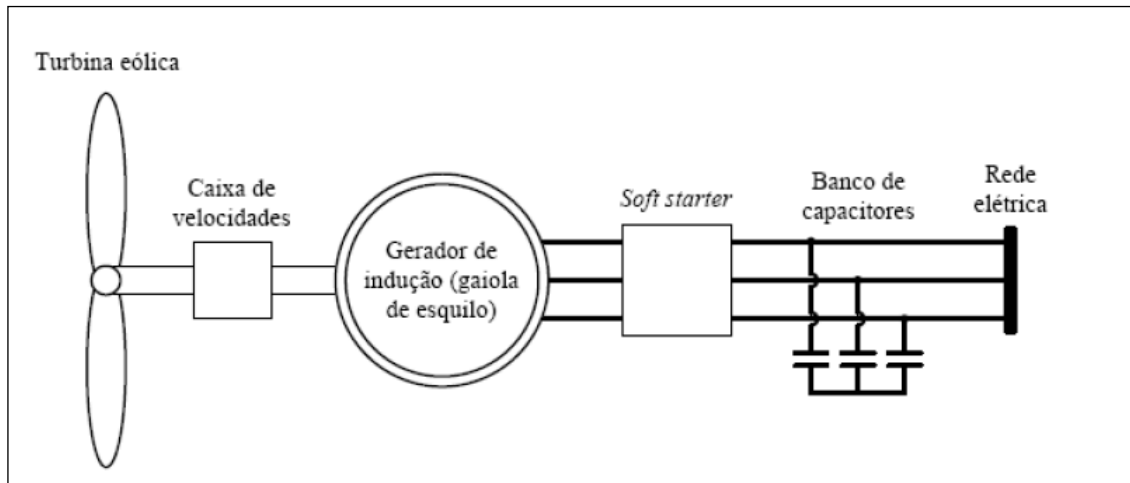
A tecnologia empregada na configuração dos geradores de velocidade fixa diferencia-os dos demais por uma conexão direta com a rede elétrica, visto que, variações na velocidade do vento podem causar variação na potência gerada e esta é diretamente transmitida à rede elétrica induzindo a uma variação no torque e estresse mecânico no eixo de transmissão e caixa de velocidade (caixa de engrenagens). Os aerogeradores de velocidade fixa são empregados em redes de potência máxima de 1MW e, preferencialmente nas regiões onde a velocidade dos ventos é geralmente constante (Rüncos et al., 2005).

As partes que constituem o gerador de velocidade fixa são a turbina eólica, o multiplicador de velocidade ou caixa de engrenagem, o gerador assíncrono ou gaiola de

esquilo e um banco de capacitores para excitação básica da máquina, bem como para a correção do fator de potência que pode ser necessária devido ao consumo de reativo.

A Figura 39 demonstra um esquema da aplicação da turbina eólica com gerador de velocidade fixa interligado à rede elétrica por meio do equipamento *soft-starter*, que tem a função de promover uma partida suave do gerador (Carvalho, 2006).

Figura 40 – Grupo eólico de velocidade fixa conectada diretamente à rede elétrica.



Fonte: (Carvalho, 2006)

Esta configuração muitas vezes tem seu custo operacional elevado, devido ao fato de que, em caso de falha no equipamento, a demanda de tempo para reparo é grande, permanecendo por mais tempo o aerogerador inoperante. Esta, portanto, é uma desvantagem deste tipo de sistema, já que torna indispensável a chamada caixa de engrenagens ou multiplicador de velocidade, em função de possíveis intervenções de manutenção corretivas e preventivas submetidas ao aerogerador (Carvalho, 2006).

6.2. GERADOR DE VELOCIDADE VARIÁVEL

O grande destaque dos parques eólicos de velocidade variável tem sido sua aplicação envolvendo altas potências, o que é possível tendo em vista que sua tecnologia oferece como vantagem a possibilidade de otimizar a energia capturada pelo aerogerador proporcionando ajuste de velocidade de sua rotação de acordo com a velocidade do vento.

Outras vantagens no emprego desta tecnologia (Carvalho, 2006):

- ➔ Otimização da potência do vento: o rendimento máximo aerodinâmico deste tipo de aerogerador ocorre em função da velocidade do vento e da velocidade da ponta da pá. Contando com essa variação da velocidade do vento torna-se possível levar o funcionamento do aerogerador ao rendimento máximo por meio da igual variação da velocidade de rotação do rotor do gerador;
- ➔ Condição de controle das potências ativas e reativas na rede elétrica: tanto a potência ativa quanto a reativa, injetadas na rede são controláveis por meio do uso de conversores de frequência. A influência de grupos eólicas na matriz energética torna esta característica indispensável, pois proporciona melhorias no âmbito da qualidade de energia e dinâmica do sistema;
- ➔ Ausência da caixa multiplicadora de velocidade: alguns tipos de geradores eólicos operam normalmente sem a presença da caixa de velocidade, um dos equipamentos apontados como causadores de falhas e indisponibilidade nos sistemas eólicos, esta possibilidade diminui os índices destas falhas significativamente;
- ➔ Redução dos níveis de ruído em velocidades baixas de operação. Uma característica que torna sua aplicação nos centros urbanos, mais aceita e viável.

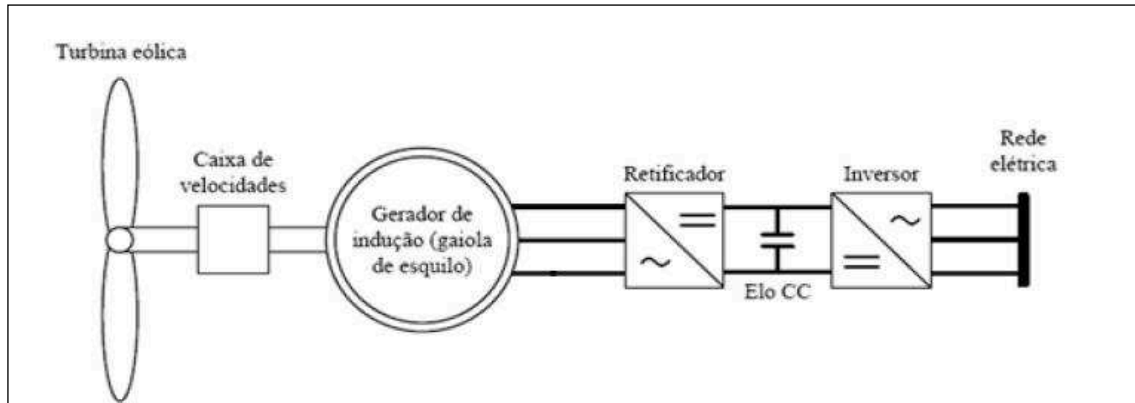
O gerador síncrono ou assíncrono que constitui um grupo eólico de velocidade variável apresenta algumas configurações principais como resistência rotórica, conexão à rede por um conversor eletrônico, fonte de alimentação dupla e sincronicidade.

6.3. O GERADOR ASSÍNCRONO CONECTADO À REDE POR CONVERSOR ELETRÔNICO

Este sistema apresenta um gerador de indução (gaiola de esquilo ou rotor bobinado) conectado à rede elétrica por conversores de frequência, formado por um conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador de indução é retificada e a resultante é invertida, com o controle de saída realizado eletronicamente pelos conversores. A energia elétrica gerada será constante e sincronizada com a rede, por meio do conversor de frequência. A excitação reativa que pode ser estimulada pelo conversor de frequência é necessária para que o gerador produza a energia.

A Figura 40 apresenta um esquema da conexão deste grupo eólico com o sistema elétrico (Carvalho, 2006; Custódio, 2009).

Figura 41 - Grupo eólico conectado à rede por um conjunto retificador/inversor.



Fonte: Carvalho, 2006

6.4. O GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO

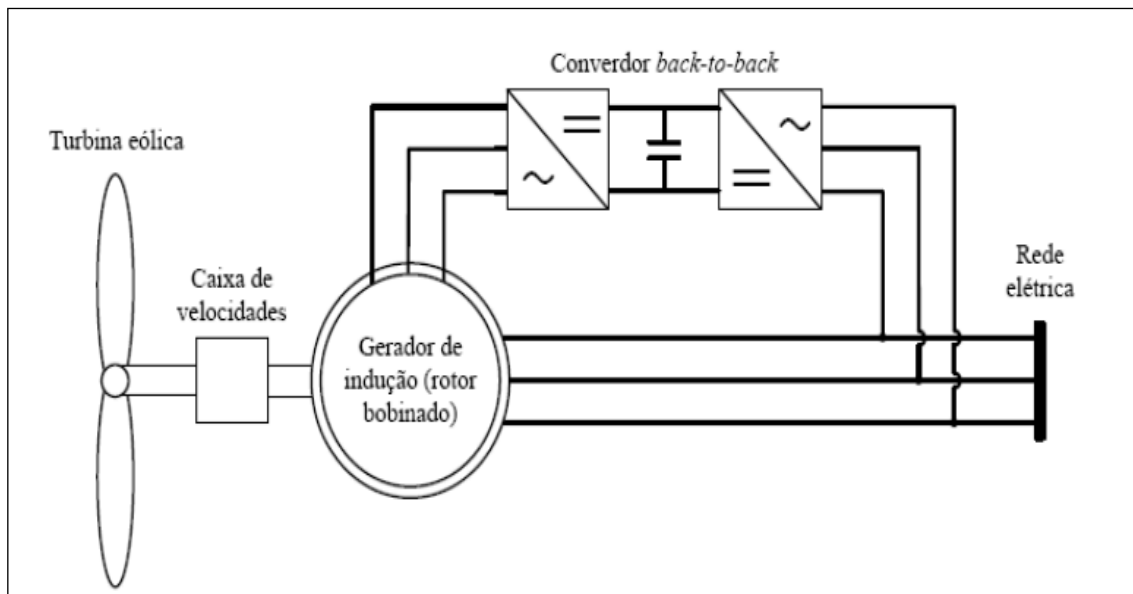
Este sistema utiliza um gerador de indução com rotor bobinado duplamente alimentado por escovas e é mais conhecido como GIDA – Gerador de Indução de Dupla Alimentação.

A Figura 40 apresenta o esquema do GIDA conectado diretamente à rede elétrica pelo estator e pelo rotor interligados via um conversor de potência *back-to-back*, que deve ser bidirecional, ou seja, operar enviando o fluxo de potência do rotor para rede e da rede para o rotor, dependendo de sua velocidade em relação à velocidade síncrona do campo do estator (se sub-síncrono, o rotor absorve potência útil; se super-síncrono, o rotor entrega potência útil).

Este tipo de gerador é de grande eficiência na transformação eletromecânica da energia dos ventos devido a sua característica de ampla regulação da velocidade (da ordem de +/- 30%) em torno da rotação síncrona, o que permite o aproveitamento energético em uma ampla faixa de velocidade do vento.

Este modelo é utilizado pela maioria dos fabricantes de aerogeradores com potências até 5MW, visto que apresenta custo inicial baixo, robustez e alto índice de eficiência na conversão da energia eólica, embora apresente pontos fracos, como o uso de caixa multiplicadora de velocidade e escovas, o que eleva o custo de manutenções realizadas no grupo eólico com GIDA (Carvalho, 2006; Runcos et al., 2005).

Figura 42 – Grupo eólico com gerador de indução duplamente alimentado.



Fonte:Carvalho, 2006

6.5. O GERADOR SÍNCRONO

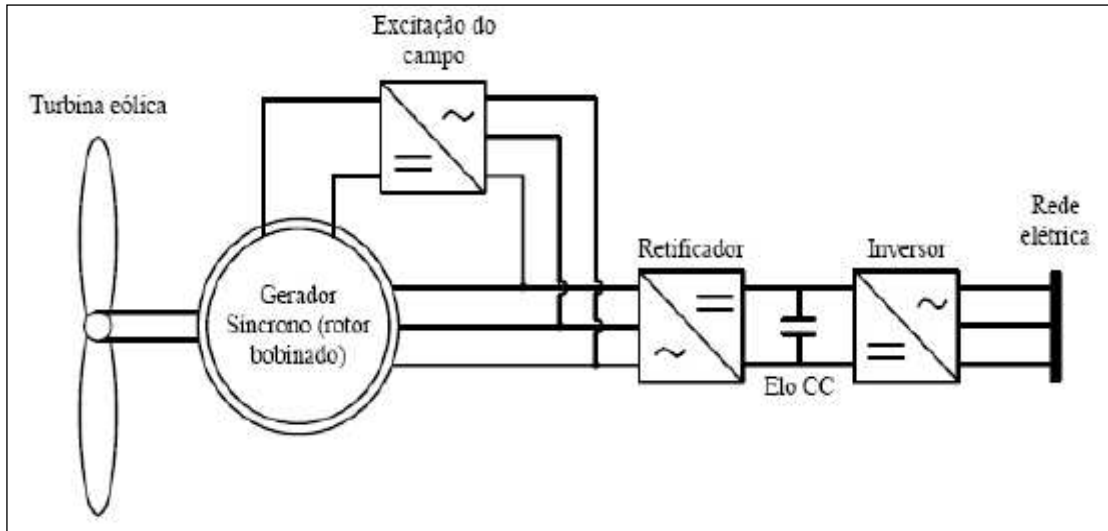
Este sistema é constituído de um gerador síncrono conectado à rede elétrica por de um conversor de frequência. O rotor pode ser bobinado ou de ímãs permanentes.

Uma vantagem desse sistema e que o gerador pode ser construído com muitos polos (multipolos), girando em baixas velocidades, compatíveis com o aerogerador, dispensando um multiplicador de velocidade. Uma redução do número de polos com a inclusão de uma caixa menor de engrenagens, em caso de gerados com ímãs permanentes e uma alternativa para aplicação offshore. Já um modelo sem caixa de engrenagens pode permitir a conexão da turbina diretamente ao gerador, sendo esta característica uma influência na crescente tendência para construção dos arranjos de aerogeradores de grande potência (até 5MW).

Para o gerador síncrono de rotor bobinado com excitação independente, a regulação da tensão gerada é feita por excitação independente, enquanto o gerador de ímãs permanentes não permite essa regulação devido ao tipo do rotor. Apesar disso, a solução com ímãs permanentes no rotor apresenta um rendimento maior (não há perdas nos enrolamentos do rotor).

A Figura 42 apresenta os esquemas de grupos eólicos com geradores síncronos com rotor bobinado (a) e rotor de ímãs permanentes (b). (Carvalho, 2006; Ramos, 2009).

Figura 43 – Grupo eólico com gerador com: (a) rotor bobinado; (b) rotor de ímãs permanentes.



Fonte:Carvalho, 2006

7. ATENDIMENTOS PARA A CONEXÃO DE PARQUES EÓLICOS AO SISTEMA ELÉTRICO.

Um dos desafios da interligação de parques eólicos no SEP está relacionado à conexão elétrica. Com a crescente penetração da geração eólica nos últimos anos, os códigos de rede vêm exigindo efetivamente o controle dos indicadores da qualidade de tensão e confiabilidade do sistema, como a participação no restabelecimento da tensão em condições de distúrbios na rede definido pelo requisito de sustentação durante faltas por parte dos parques eólicos. A fim de preservar a segurança operacional do sistema elétrico, as concessionárias de energia definem critérios que regulamentam a conexão das centrais eólicas no SEP. Esta regulamentação varia de país para país e depende da robustez do sistema e do nível de penetração eólica (Pires et al.; 2008). Dado o pioneirismo dos países europeus em geração eólica, algumas normas definem padrões de qualidade de energia que são exigidos na interligação de novas geradoras à rede através da regulamentação de acesso, a fim de elevar a qualidade de energia.

7.1. REGULAMENTAÇÕES TÉCNICAS

A regulamentação técnica para conexão de plantas eólicas deve assegurar que os aerogeradores tenham o controle e as propriedades necessárias para a operação do sistema de potência com relação à segurança do suprimento e a qualidade da tensão. parâmetros definidos em regulamentação de acesso aos sistemas de potência (grid code) variam de país para país, pois as diferenças dependem do nível de penetração de parques eolielétrica e da robustez da rede elétrica.

7.2 – REQUISITOS DE ACESSO À REDE ELÉTRICA NO BRASIL

No Brasil, os procedimentos para avaliação de novas unidades geradoras, estão em desenvolvimento, porém ainda não contemplam aspectos específicos da interligação da geração eolielétrica. Isso não significa que a norma brasileira não possua indicadores de qualidade de energia para avaliar e viabilizar a interligação de novas geradoras com a rede básica. Toda a legislação de acesso ao sistema de transmissão está definida nos Procedimentos de Rede, que são normas e requisitos técnicos mínimos aplicáveis às novas 32 geradoras, em particular às centrais eólicas, estabelecido pelo ONS e homologado pela

ANEEL. Para os acessos diretamente ao sistema de distribuição, a legislação é definida pelo PRODIST – conjunto de normas que disciplinam a forma, condições, responsabilidades, penalidades, e planejamento entre as distribuidoras de energia elétrica, consumidores e centrais geradoras conectadas ao sistema de distribuição (ONS, 2012; Aneel, 2012).

A requisição de ligação de novas geradoras à rede brasileira está definida em dois processos distintos:

- Consulta de acesso;
- Solicitação de acesso.

A Consulta de acesso caracteriza-se pelo momento em que o acessante procura definir de forma abrangente os dados do sistema que pretende conectar sua unidade geradora na rede.

Nesta etapa, o acessante informa à concessionária dados preliminares sobre a instalação. Alguns dados a serem fornecidos pelo ONS ao acessante são:

- Características elétricas das redes;
- Potência de curto-circuito mínima e máxima nos barramentos das subestações;
- Características e parâmetros da regulação de tensão nas subestações;
- Potências ativas e reativas, máximas e mínimas, consumidas em cada subestação da rede de interesse.

A Solicitação de acesso configura-se na etapa em que o acessante apresenta propriamente à concessionária o requerimento de acesso à rede básica. Nesta etapa, o acessante deve apresentar ao acessado dados completos, obras de ligação e dados complementares que possibilitem ao acessado avaliar os impactos sobre a rede receptora. Assim, um conjunto de análises fundamentadas nos indicadores de qualidade da energia deve ser realizado, sempre que ocorrerem solicitações de acesso de consumidores livres, agentes de geração, agentes de distribuição, agentes de importação e exportação, ou ainda as integrações de novas geradoras, cujas instalações possam interferir no desempenho da rede básica. Os estudos de maior interesse são:

- Variação dos perfis de tensão;
- Curto-circuito e suportabilidade do acessante;

- ➔ Variação dos níveis de flicker e distorção harmônica;
- ➔ Avaliação do comportamento dinâmico do sistema frente às perturbações: retirada súbita da unidade produtora, variações relevantes de nível de produção, curto-circuito em nós importantes da rede, possibilitando avaliar o impacto da saída da unidade geradora em virtude da atuação de sua proteção;
- ➔ Avaliação dos sistemas frente a riscos de afundamento de tensão, uma vez que se tem a presença de geradores assíncronos conectados à rede. Os estudos definidos na etapa de solicitação devem apresentar resultados em acordo com os limites estabelecidos pelo acessado, no que os mesmos julgam ser seguros para garantir a integridade da rede e a continuidade do fornecimento de energia para os consumidores.

7.3 FORMAS DE ACESSO AO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

O acesso de parques eólicos ao sistema elétrico brasileiro pode ser feito de três formas (EPE, 2012). Por meio de Rede Básica, de Rede Básica ICG (Instalação de Centrais de Geração) ou Rede de Distribuição.

A - Rede Básica

Os novos acessos à Rede Básica existente podem ser por meio de instalações de conexão de propriedade de centrais de geração, de propriedade de centrais de geração em caráter compartilhado ou de propriedade de concessionária de transmissão. O acesso à Rede Básica pode ser feito por meio do seccionamento de uma linha de transmissão ou da conexão a uma subestação existente, quer seja em caráter exclusivo ou compartilhado.

Os agentes deverão assinar Contrato de Uso do Sistema de Transmissão – CUST com o ONS e Contrato de Conexão às Instalações de Transmissão – CCT com a concessionária proprietária da instalação na qual o acesso se dá. O CUST contém o encargo de uso do sistema de transmissão, definido com base na Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão – TUSTRB. Os custos referentes à conexão são de responsabilidade do acessante. No caso de acesso em caráter compartilhado, quando são utilizadas as 34 instalações de propriedade do acessante, a divisão dos custos deve ser acordada entre as partes.

B - Rede Básica por meio de ICG

As incertezas que antecederam as análises da conexão de usinas a biomassa no estado do Mato Grosso do Sul fizeram com que o MME e a ANEEL procedessem ao aprimoramento da regulamentação do setor elétrico com o Decreto nº 6.460/2008, que instituiu a Instalação de Transmissão de Interesse Exclusivo de Centrais de Geração para Conexão Compartilhada – ICG. As ICGs são instalações de conexão para acesso de centrais de geração de propriedade da concessionária de transmissão. A ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 320/2008, que estabeleceu os critérios para classificação das ICG, e regulamentou a realização de Chamada Pública, com vistas a subsidiar o planejamento setorial, ao apurar compromissos firmes dos empreendedores de geração interessados em participar de uma ICG, caracterizados por intermédio do aporte de garantias financeiras. A modalidade de ICG é uma importante alternativa de acesso ao sistema elétrico quando se verifica cumulativamente a demanda por conexão de um número expressivo de geradores em regiões geográficas atendidas por malhas de transmissão com baixa capilaridade e/ou por sistemas de distribuição sem capacidade para incorporar volumes significativos de potência e energia.

C - Rede de Distribuição

Os novos acessos ao Sistema de Distribuição podem ser por meio de instalações de conexão de propriedade da(s) central(is) de geração. Nesse caso, as centrais de geração deverão assinar Contrato de Uso do Sistema de Distribuição – CUSD com a concessionária de distribuição da região e o Contrato de Conexão com a concessionária proprietária da instalação na qual ocorre o acesso à rede, que pode ser por:

- ➔ Contrato de Conexão às Instalações de Distribuição - CCD, para instalações de propriedade de concessionária de distribuição;
- ➔ Contrato de Conexão às Instalações de Transmissão - CCT, para instalações de propriedade de transmissão – DIT;

Os custos referentes à conexão são de responsabilidade do acessante. No caso de acesso compartilhado, a divisão dos custos deve ser acordada entre as partes. O acesso de usinas ao sistema elétrico é um direito assegurado a qualquer agente de geração, tendo como premissas o tratamento não discriminatório aos usuários, o ressarcimento do custo de transporte envolvido, o estímulo a novos investimentos na expansão energética e a modicidade tarifária na utilização racional e custos de ampliação e reforços dos sistemas elétricos.

8. CONCLUSÕES

O estudo de turbinas eólicas mostrou que as turbinas de eixo horizontal são mais utilizadas em sistemas de geração de grande porte. No entanto as turbinas de eixo vertical, apesar de apresentarem elevadas potências necessitam de sistemas auxiliares de partida. Os outros tipos de turbinas são aplicados em sistemas de geração distribuída de menor porte. A topologia dos conversores utilizados para interligação ao sistema elétrico dependem do tipo do gerador a ser utilizado.

A pesquisa mostrou que apesar de existir uma legislação para utilização de sistemas eólicos de pequeno, médio e grande porte, os investimentos no Brasil ainda são pequenos para ter-se um maior impacto na matriz energética, em que pese o país possuir uma posição geográfica adequada aos sistemas de geração eólica.

REFERÊNCIAS

Neves, Priscila Souza

Interligação da geração eolieletrica com sistema elétrico de potência- dissertação=UFB, Salvador,2014

Pinto, Milton

Fundamentos de energia renováveis

http://www.conferconstrutora.com.br/ultimas_obras/3/complexo_eolico_bom_jardim_da_serra_sc-17

<http://www.vendascassol.com.br/produtos/aerogerador-eolico1437416569.html>

<http://www.enercon.de/en/news>

http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231

<http://calculadora2050.epe.gov.br/assets/onepage/10>

<https://www.portalmaritimo.com/2017/01/23/por-que-o-brasil-nao-investe-em-eolicas-offshore/>

<http://www.seao2.com/vawt/>

<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/>

http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false

<http://www.aneel.gov.br/dados/geracao>

<http://www.abeeolica.org.br/>

<https://www.iea.org/>

<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/energia-eolica-brasil>

<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=28/>

https://www.generalcable.com/eu/getattachment/ca5f5641-3b79-46de-ac83-b6a33d3f6555/Windfarms_2.jpg_04/12/17

Reis, Luiz Octávio Mattos dos

Lógica Fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica: eólica, fotovoltaica e biogás / Luiz Octávio Mattos dos Reis. – Guaratinguetá : [s.n.], 2002