

MEC-SETEC
INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS – Campus Formiga
Curso de Engenharia Elétrica

**ENERGIA EÓLICA: CONTRIBUIÇÃO PARA DIVERSIFICAÇÃO DA
MATRIZ ENERGÉTICA E REDUÇÃO DO CUSTO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Leonardo César Ferreira Santos

**Orientador: Prof. Ms. Renan Souza
Moura**

FORMIGA – MG

2015

LEONARDO CÉSAR FERREIRA SANTOS

**ENERGIA EÓLICA: CONTRIBUIÇÃO PARA DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ
ENERGÉTICA E REDUÇÃO DO CUSTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Minas Gerais como
requisito para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ms. Renan Souza Moura

FORMIGA – MG

2015

LEONARDO CÉSAR FERREIRA SANTOS

ENERGIA EÓLICA: CONTRIBUIÇÃO PARA DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ
ENERGÉTICA E REDUÇÃO DO CUSTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Aprovado em: ___/___/_____.

Resultado: _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Renan Souza Moura
Orientador

Prof. Dr. Niltom Vieira Júnior
Avaliador

Prof. Ms. Carlos Bernardes Rosa Júnior
Avaliador

LEONARDO CÉSAR FERREIRA SANTOS

ENERGIA EÓLICA: CONTRIBUIÇÃO PARA DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ
ENERGÉTICA E REDUÇÃO DO CUSTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Minas Gerais como
requisito para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Renan Souza Moura
Orientador

Prof. Dr. Niltom Vieira Júnior
Avaliador

Prof. Dr. Carlos Bernardes Rosa Júnior
Avaliador

Formiga, 19 de junho de 2015.

Dedico este trabalho em especial, aos meus pais Carlos e Maria de Lourdes, familiares e amigos que sempre me deram força para conquistar mais essa vitória em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me abençoou em todos os momentos da minha vida, me dando a força necessária para vencer as barreiras do dia a dia.

Aos meus pais Carlos e Maria de Lourdes, pelo apoio e suporte desde o início da graduação, através deles pude obter conhecimento e sabedoria e motivação para sempre alcançar os meus objetivos.

Aos meus familiares que sempre me deram apoio nos momentos difíceis ao qual tive de enfrentar.

Aos meus colegas de graduação, sempre ajudando uns aos outros na busca da sonhada formatura.

Ao Prof. Renan Souza Moura, pela ajuda, dedicação, paciência, atenção e disponibilidade em todo o período da construção deste trabalho.

Aos professores Niltom Vieira Júnior e Carlos Bernardes Rosa Júnior, por aceitarem participar da banca examinadora.

Aos demais professores e funcionários do Instituto Federal de Minas Gerais que ensinaram e contribuíram para minha formação acadêmica.

E a todos que encontrei pelo caminho até a formatura que contribuíram de alguma forma para a realização deste sonho.

RESUMO

Em um cenário, onde a procura por demanda de energia é alta e o setor energético, não tem suficiência para atender a demanda, a busca por outras formas de geração se faz necessária. Para isso se faz necessário buscar novas fontes de geração utilizando recursos naturais renováveis. Uma dessas formas de geração, é o tipo de geração que aproveita a força dos ventos, geração de energia eólica. Este trabalho analisa a situação da produção de energia eólica no Brasil e faz uma projeção de como a sua utilização pode influenciar no sistema elétrico brasileiro.

Palavras chave: Geração de energia elétrica. Energia eólica. Fonte alternativa. Fonte renovável.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PROCEL – Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica

MME – Ministério de Minas e Energia

IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia

ZVT – Zonas de Visibilidade Teóricas

ZIV – Zonas de Influência Visual

EWEA – *European Wind Energy*

WWEA – *World Wind Energy Association*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN – Sistema Interligado Nacional

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

IEA – Agência Nacional de Energia

CLP – Controlador Lógico Programável

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia

BIG – Banco de Informações de Geração

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

BDMG – Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais

UEEE – Usina Eólicoelétrica Experimental

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TAXA DE MORTALIDADE DE PÁSSAROS EM VÁRIOS PARQUES EÓLICOS.	25
FIGURA 2 - TAXA DE MORTALIDADE DOS MORCEGOS NOS VÁRIOS PARQUES EÓLICOS.	25
FIGURA 3 - CUSTO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL EM 2008.	28
FIGURA 4 - CUSTO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA EM ALGUNS PAÍSES EM 2009.	30
FIGURA 5 - CAPACIDADE INSTALADA (MW) NO MUNDO DE 2006 ATÉ 2014.	32
FIGURA 6 - PROJEÇÃO CAPACIDADE INSTALADA EM GW DE 2014 A 2019.	32
FIGURA 7 - POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO NO ANO DE 2007.	34
FIGURA 8 - PARQUE EÓLICO DE GERIBATU.	35
FIGURA 9 - SISTEMA TARIFÁRIO BRASILEIRO.	36
FIGURA 10 - BANDEIRAS TARIFÁRIAS.	41
FIGURA 11 - DATAS PREVISÃO DE DIVULGAÇÃO DE BANDEIRA TARIFÁRIA.	42
FIGURA 12 - REGIÕES ONDE SE INCLUI O SISTEMA DE BANDEIRAS TARIFÁRIAS.	42
FIGURA 13 - TURBINA EÓLICA GEDSER.	46
FIGURA 14 - TURBINA TIPO DARRIEUS.	47
FIGURA 15 - TURBINA NEG MICON.	47
FIGURA 16 - PRINCÍPIO AERODINÂMICO DA TURBINA EÓLICA.	48
FIGURA 17 - COMPONENTES DE UMA TURBINA DE EIXO HORIZONTAL.	50
FIGURA 18 - TURBINAS UPWIND E DOWNWIND.	53
FIGURA 19 - FLUXO NA SEÇÃO DA PÁ DE UM ROTOR DE UMA TURBINA EÓLICA DE SUSTENTAÇÃO.	55
FIGURA 20 - FLUXO DE VENTO ATRAVÉS DE UMA TURBINA DE EIXO HORIZONTAL.	56
FIGURA 21 - ESTEIRA AERODINÂMICA E AFASTAMENTO ENTRE TURBINAS EÓLICAS.	60
FIGURA 22 - TURBINA EÓLICA DE ALTA ALTITUDE MARS.	63
FIGURA 23 - FUNCIONAMENTO TURBINA MARS.	63
FIGURA 24 - TURBINA EÓLICA COM LEVITAÇÃO MAGNÉTICA.	65
FIGURA 25 - TORRE TÉRMICA SOLAR.	66
FIGURA 26 - FUNCIONAMENTO DE UMA TORRE TÉRMICA SOLAR.	66
FIGURA 27 - PARQUE EÓLICO OFFSHORE.	68
FIGURA 28 - ESTRUTURA MONOPILAR OFFSHORE.	69
FIGURA 29 - DIAGRAMA BÁSICO DE UM SISTEMA EÓLICO.	71
FIGURA 30 - VÁRIOS TIPOS DE PÁS DE TURBINA EÓLICA EM UM PÁTIO.	72
FIGURA 31 - MODELO DE UM CUBO DE PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA.	73
FIGURA 32 - TURBINA INCENDIANDO DURANTE TEMPESTADE EM NORTH AYRSHIRE, NA ESCÓCIA EM 2011.	74
FIGURA 33 - GERADOR CONECTADO À CAIXA DE ENGRENAGENS (À DIREITA).	75
FIGURA 34 - ACOPLAMENTO DIRETO ENTRE TURBINA E GERADOR.	75
FIGURA 35 - ACOPLAMENTO ELÉTRICO AEROGERADOR E TORRE.	76
FIGURA 36 - GERADOR CONVENCIONAL.	77
FIGURA 37 - GERADOR MULTIPOLOS.	77
FIGURA 38 - GERADOR SÍNCRONO CONECTADO À REDE VIA CONVERSOR.	79
FIGURA 39 - GERADOR ASSÍNCRONO (DE INDUÇÃO) DUPLAMENTE ALIMENTADO.	80
FIGURA 40 - GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO DIRETAMENTE À REDE ELÉTRICA.	82
FIGURA 41 - ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM UM PARQUE EÓLICO.	83
FIGURA 42 - ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA DE CONTROLE POR CLP.	84
FIGURA 43 - ESQUEMÁTICO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO.	86
FIGURA 44 - RECURSOS APLICADOS E PREVISTOS NO PERÍODO DE 2009 A 2018.	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EMISSÕES DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.	21
TABELA 2 - POTÊNCIA INSTALADA NO MUNDO EM 2014.....	31
TABELA 3 - PERÍODOS DO ANO PARA TARIFAÇÃO.	38
TABELA 4 - EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM OPERAÇÃO NO BRASIL.....	87
TABELA 5 - LEGENDA TIPOS DE GERAÇÃO.....	88
TABELA 6 - MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA.	88
TABELA 7 - RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL DOS EMPREENDIMENTOS.	90
TABELA 8 - NÚMERO DE USINAS POR ESTADO BRASILEIRO.....	91
TABELA 9 - CUSTOS DE INVESTIMENTO REFERENCIAIS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problema	15
1.2	Justificativa	15
1.3	Hipótese	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	Desenvolvimento sustentável	17
3.1.1	A poluição e os efeitos causados pelas fontes de geração não renováveis	18
3.1.2	Geração de energia por meio de fontes renováveis	19
3.2	Impactos ambientais	21
3.2.1	Emissão de ruído	22
3.2.2	Impacto visual	22
3.2.3	Impacto sobre a fauna	24
3.3	Segurança no trabalho e danos a pessoas	26
3.4	Interferências eletromagnéticas	27
3.5	Custos envolvidos na produção de energia elétrica	27
3.6	Energia eólica instalada no mundo	30
3.7	Energia eólica instalada no Brasil	33
4	ESTRUTURA TARIFÁRIA BRASILEIRA	36
4.1	Modalidades tarifárias	37
4.1.1	Tarifa horo sazonal azul	38
4.1.2	Tarifa horo sazonal verde	39
4.1.3	Tarifa convencional	39
4.1.4	Outras modalidades tarifárias	39
4.2	Bandeiras tarifárias	40
4.3	A resolução normativa 482 de 2012 da ANEEL	43
5	ENERGIA EÓLICA CONSTRUINDO UMA USINA	45
5.1	Turbinas eólicas	45
5.1.1	Funcionamento de uma turbina	48
5.1.2	Componentes	49

5.1.3	Geometria de alguns componentes.....	51
5.1.3.1	Turbinas upwind e downwind	52
5.1.4	Sistema para controle de segurança da turbina	53
5.1.5	Potência de uma turbina eólica	54
5.1.6	Disposição de turbinas eólicas	59
5.1.7	Rendimento da turbina eólica	61
5.1.8	Peso da turbina eólica	61
5.1.9	Novas tecnologias no segmento de turbinas eólicas.....	62
5.1.9.1	Turbina eólica de alta altitude MARS	62
5.1.9.2	Turbina com levitação magnética	64
5.1.9.3	Torre térmica solar	65
5.1.9.4	Turbinas eólicas offshore	67
5.2	Aerogeradores.....	70
5.2.1	Aerogerador com velocidade variável	78
5.2.1.1	Aerogerador com velocidade variável e gerador síncrono	79
5.2.1.2	Aerogerador com velocidade variável e gerador assíncrono duplamente alimentado	80
5.2.1.3	Aerogerador com velocidade variável e gerador assíncrono conectado à rede via conversor.....	80
5.2.2	Aerogerador com velocidade constante	81
5.2.3	Sistema de controle.....	82
5.2.4	Sistema de segurança.....	85
5.2.5	Sistema de aterramento	85
6	SISTEMA EÓLICO BRASILEIRO	87
6.1	Potencial de geração de energia elétrica no Brasil.....	87
6.2	Incentivos governamentais para o mercado de energia	89
6.2.1	Viabilidade econômica.....	91
7	CONCLUSÃO	95
7.1	Considerações finais	95
7.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	96
8	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas no mundo todo, sendo atualmente uma das necessidades básicas do ser humano, trabalhando juntamente com os outros sistemas básicos como, água e saneamento, telecomunicações, transporte, entre outros. (REIS, 2011)

Quando surgiram as primeiras usinas de geração de energia elétrica, a quantidade de consumidores era relativamente pequena, o que era autossuficiente para a época, porém com o passar de décadas, o número de consumidores e o desenvolvimento de novas tecnologias tem aumentado significativamente ao ponto de enfrentarmos uma crise energética e problemas com o meio ambiente, devido a emissão de gases poluentes na atmosfera terrestre. Sendo assim uma corrida pelo desenvolvimento sustentável é formada, envolvendo fatores tecnológicos, econômicos, sociais, políticos e ambientais.

A energia eólica é vista como uma das fontes de geração de eletricidade alternativa, que possui melhores índices para se obter energia em quantidades atrativas, fornecendo menores impactos ambientais.

Seu desenvolvimento começou em meados da década de 1980. Sua evolução foi impactante, pois com as políticas sendo voltadas para o lado das energias renováveis no contexto sustentável, desencadeou em uma evolução rápida, onde pouco tempo depois, passou de fontes alternativas, para industrial de ponta, onde fabricantes fazem um mercado competitivo no mundo. (LOPES, 2012)

Será visto mais à frente projetos de lei, onde são incentivados, locais de pequeno porte, virem a ser geradores de energia para si próprios, além de poder compensar as redes de distribuição em uma troca de mercado.

Outro projeto de lei, é a obrigação de contratações anuais durante uma década de 200 MW de usinas eólicas, 200 MW de geradoras a biomassa e 200 MW de pequenas centrais hidrelétricas. No total, após o período de dez anos, serão 6000 MW que serão inseridos na matriz energética brasileira. Além disso, todas as

concessionárias distribuidoras devem contratar energia de usinas com capacidade maior que 50 kW e menor que 1 MW. (LOPES, 2012)

1.1 Problema

A energia eólica é um importante sistema de geração de energia atualmente. Porém no Brasil o sistema eólico não há desenvolvimento adequado, pois a falta de estudos na área de eficiência e desempenho nessa fonte é um dos grandes contribuidores para o alto custo de turbinas e o pouco desenvolvimento tecnológico na área.

1.2 Justificativa

Realizar o estudo sobre os diversos tipos de sistemas eólicos utilizados no mundo, além de realizar uma análise de viabilidade econômica e notar qual a contribuição atual e futura que o setor pode representar na matriz energética brasileira, são os passos para um desenvolvimento tecnológico da área.

1.3 Hipótese

Analisar quanto o potencial eólico no país representa em capacidade de transformar a matriz energética, analisar se há e quais são os impactos causados pela instalação de turbinas eólicas no ambiente e realizar uma análise econômica para descobrir se com um aumento de parques eólicos fará uma diminuição nos custos da geração no país, reduzindo os tributos pagos pelos consumidores.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho, é analisar o mercado energético brasileiro, em relação aos parques eólicos que estão em projeto e os que já estão em operação. Mostrar fontes alternativas de geração de energia elétrica como a energia eólica, demonstrando como é a construção de um parque eólico e em quais locais são propícios para a instalação dos mesmos.

2.2 Objetivos específicos

Esta obra, mostra especificamente se o funcionamento de parques eólicos contribui significativamente no setor econômico do país, responder qual a parcela de contribuição para o setor energético brasileiro e mostrar quais são os requisitos, sistemas e equipamentos para se construir uma usina de geração de energia elétrica utilizando a energia eólica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, será mostrado o conteúdo literário sobre o tema abordado.

3.1 Desenvolvimento sustentável

Com o aumento do consumo de energia, embora seja refletido no setor econômico e na qualidade de energia, tem-se problemas, como a escassez de recursos para se gerar eletricidade, bem como impactos ambientais desde a construção de novas usinas, além de operação de unidades que emitem gases que afetam negativamente o meio ambiente e gastos elevados em projetos utilizando novas fontes de energia. (ANEEL, 2008)

O melhor recurso a ser utilizado para evitar o alto consumo sem prejudicar a qualidade de vida e o crescimento econômico está no uso mais eficiente da energia. O governo brasileiro tem trabalhado para melhorar a eficiência de energia desde o ano de 1985 quando foi implantado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) o Procel (Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica), abrangendo todo o país e com coordenação da Eletrobrás. (ANEEL, 2008)

Fatores como o crescimento desordenado de cidades e indústrias, aumentam a degradação do meio ambiente, com isso foi criado o conceito do desenvolvimento sustentável, que é definido como o atendimento às necessidades da humanidade no presente, sem comprometer a habilidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades.

3.1.1 A poluição e os efeitos causados pelas fontes de geração não renováveis

A poluição é definida como uma alteração no meio ecológico, efeito esse causado pelos seres humanos, que prejudica de forma direta ou indireta, a vida ou o bem-estar, causando danos aos recursos da natureza, por exemplo a água, ar, solo, entre outros elementos. (NASS, 2002)

De acordo com o Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), o efeito estufa, é o fenômeno que mantém a Terra aquecida, essencial para o controle do clima e do ecossistema como um todo. Através de gases, que apesar de ser em pequenas quantidades, formam uma espécie de camada, sendo capazes de facilitar a passagem de calor proveniente do sol aquecendo a superfície do planeta. Esta mesma camada dificulta a saída do calor (radiação infravermelha), mantendo a Terra aquecida. Alguns dos gases constituintes são dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e também o vapor d'água (H_2O). Porém, a poluição da atmosfera tem aumentado o volume desses gases, afetando no efeito estufa, diminuindo a qualidade de vida dos seres vivos, tais fontes geradoras de gases poluentes, estão nos motores a combustão, centrais de geração de energia elétrica que utilizam combustão para gerar energia, entre outras formas. (IPAM)

As fontes não renováveis de energia, são aquelas, onde os elementos utilizados para movimentar os geradores são encontrados em quantidades limitadas na natureza. Após o esgotamento, as reservas não podem ser regeneradas. Consideradas como energias sujas, devido aos danos causados à natureza pela sua utilização.

Uma das principais preocupações é com relação a queima de combustíveis fósseis onde gases provenientes desta queima, são injetados na atmosfera tendo aumento da temperatura da superfície terrestre.

As fontes não renováveis são:

- Gás natural;

- Derivados do petróleo;
- Energia nuclear;
- Carvão mineral.

Como solução para solucionar a falta de recursos para este tipo de geração e um meio de evitar a poluição e se ter então um desenvolvimento sustentável, a próxima subseção tratará das fontes renováveis, chegando ao foco deste trabalho.

3.1.2 Geração de energia por meio de fontes renováveis

Pensando na redução da poluição, foram então planejadas, soluções para evitar a emissão de gases poluentes. Essas soluções, são as fontes alternativas de energia, que utilizam a energia da própria natureza, convertendo-a em energia elétrica, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto (LOPES 2012), cita as principais características da energia elétrica tendo uma perspectiva do desenvolvimento sustentável são:

- As diversidades de fontes de energia, tendo sua variação conforme a região. Fornecendo a combinação entre vários tipos de geração, como energia hídrica e fontes renováveis intermitentes como eólica e fotovoltaica, biomassa e célula combustível;
- A eficiência sendo a principal característica de qualquer fonte de energia. Facilitando a introdução de combustíveis como o metanol e o hidrogênio, para se ter a otimização nos processos de geração que são baseadas no meio ambiente, tais como, energia hídrica e biomassa;
- Fontes renováveis intermitentes fornecem 33% da eletricidade em muitas regiões, não havendo a necessidade de se criar tecnologias de armazenamento de energia.

Algumas das formas de se gerar energia elétrica de forma sustentável são listadas abaixo:

- Hidráulica;
- Solar (fotovoltaica e térmica);
- Eólica;
- Geotérmica;
- Marés.

Analisando a energia hidrelétrica (que no Brasil é utilizada em larga escala), com o conceito de sustentabilidade, é a forma de geração que não agride o meio ambiente (quando em operação), pois ela é dependente apenas da força das águas. Porém, a construção de grandes usinas, pode ser considerada como um agente degradante, já que demanda grande espaço, desvio do curso natural das águas, que prejudica a fauna, flora e populações localizadas no novo percurso da água na região. Outro fator é o acúmulo dessa fonte, uma vez que ela é escassa e totalmente dependente das chuvas.

Outra forma que tem se desenvolvido bastante é a geração de energia por meio da radiação solar. Esta que depende dos raios do sol, também não afeta o meio ambiente de maneira negativa. Porém sua tecnologia ainda não tem alta eficiência e o custo é elevado.

A energia eólica, assim como as demais, depende apenas da natureza, ou seja, da força dos ventos, para gerar energia. Esta também não polui o ambiente na sua operação e muito pouco na sua construção. Tem-se custo elevado apenas no projeto e nos materiais, o que será discutido mais à diante. Esta forma de geração será então o foco deste trabalho.

Nas próximas seções, será apresentada uma visão geral dos tipos de impactos ambientais que esta fonte produz, bem como os custos envolvidos na produção de energia elétrica.

3.2 Impactos ambientais

Em relação a emissão de gases poluentes devido a ação de usinas geradoras que utilizam combustíveis fósseis, nota-se o favorecimento por parte de muitos países na busca por geração de energia limpa, ou seja, gerar energia elétrica sem emitir gases do efeito estufa. Assim como o uso da energia eólica. LOPES (2012) indica que, uma turbina de 600 kW, que esteja em uma região de ventos contínuos e com boa velocidade, poderá evitar a emissão entre 20 mil a 36 mil toneladas de CO₂, o que equivale a geração convencional, durante estimados 20 anos de vida útil.

Na tabela 1 notamos o estudo feito pelo *World Energy Council*, que compara as emissões de gases de tecnologias distintas de produção de energia.

Tabela 1 - Emissões de diferentes tecnologias de produção de energia elétrica.

Tecnologias	Emissão de CO ₂ nos estágios de produção de energia [ton/ GWh]			
	Extração	Construção	Operação	Total
Planta convencional de queima de carvão	1	1	962	964
Planta de queima de óleo combustível	-	-	726	726
Planta de queima de gás	-	-	484	484
Energia térmica dos oceanos	Na	4	300	304
Plantas geotérmicas	<1	1	56	57
Pequenas hidrelétricas	Na	10	Na	10
Energia eólica	Na	7	Na	7
Solar fotovoltaico	Na	5	Na	5
Grandes hidrelétricas	Na	4	Na	4
Solar térmico	Na	3	Na	3
Lenha (extração planejada)	-1.509	3	1.346	-160

Na: não aplicável

Fonte: LOPES, 2012.

Dessas tecnologias, apenas as grandes centrais hidrelétricas contêm níveis abaixo da energia eólica que possui um mercado competitivo comercialmente.

3.2.1 Emissão de ruído

A emissão de ruídos dos aerogeradores são advindas do funcionamento mecânico e efeitos aerodinâmicos. O ruído mecânico provém, principalmente, da caixa de engrenagens onde o ruído é transmitido da caixa para as paredes da nacelle ou as paredes externas da turbina. (LOPES, 2012)

Outra tecnologia usada em turbinas eólicas é o uso de um gerador elétrico multipolo que é conectado ao eixo das pás. Assim dispensando o uso de caixas de engrenagem, pois este gerador funciona mesmo em baixas rotações. (LOPES, 2012)

Já o ruído aerodinâmico está relacionado diretamente com a velocidade dos ventos incidentes sobre a turbina. Existem estudos relacionados com o desenvolvimento de novas pás que possam aumentar o aproveitamento dos ventos e a diminuição dos ruídos. (LOPES, 2012)

3.2.2 Impacto visual

Este tipo de impacto é bastante subjetivo, uma vez que, muitas pessoas veem as usinas como sinônimo de energia limpa, já outras acreditam que esses parques expõem de maneira negativa a nova paisagem.

Ultimamente, têm sido utilizadas técnicas que envolvem o uso de fotomontagens de diversos ângulos, juntamente com ferramentas de georeferenciamento e análise de modelos de mapas, denominando Zonas de

Visibilidade Teóricas (ZVT), ou Zonas de Influência Visual (ZIV), que definem zonas de impacto conforme descrito a seguir (SALINO, 2011):

- Zona I – Visualmente dominante

As turbinas têm percepção como de grande porte. A paisagem imediata é alterada, com distâncias de até 2 km.

- Zona II – Visualmente intrusiva

As turbinas são consideradas importantes, mas não necessariamente dominantes. O movimento das pás é visível, o que pode atrair a atenção. A distância considerada é de 1 km até 4,5 km.

- Zona III – Perceptível

Turbinas são visíveis, porém não intrusiva, ou seja, elas parecem pequenas na paisagem. O parque eólico é notado apenas como um elemento em um panorama visual. Distância de 2 km a 8 km.

- Zona IV – Elemento na paisagem distante

Neste campo de visão, o tamanho aparente das turbinas é relativamente pequeno, provendo uma percepção das mesmas como qualquer outro elemento que esteja no panorama. A distância é acima de 7 km.

Vale ressaltar que todas as distâncias ditas nas classificações das zonas devem ser analisadas de acordo com as condições atmosféricas.

Para diminuir o impacto visual, o método utilizado para tal, é o de conscientização da população local sobre a geração de energia através dos parques eólicos. Isso tem sido feito através de audiências públicas e seminários. Com isso as pessoas daquele local aprendem dos benefícios que a energia eólica traz, melhorando a aceitação sobre essa fonte alternativa. (SALINO, 2011)

3.2.3 Impacto sobre a fauna

O maior problema em relação a animais está no fato de que usinas que são instaladas em rota de migração de aves são causas de morte devido as colisões com estruturas, como torres de transmissão de energia. O comportamento das aves e a taxa de mortalidade são específicos de cada espécie e local. Esses resultados se dão pela falta de planejamento, má localização e tecnologia adotada para turbinas e torres. (MMA, [s. d.]

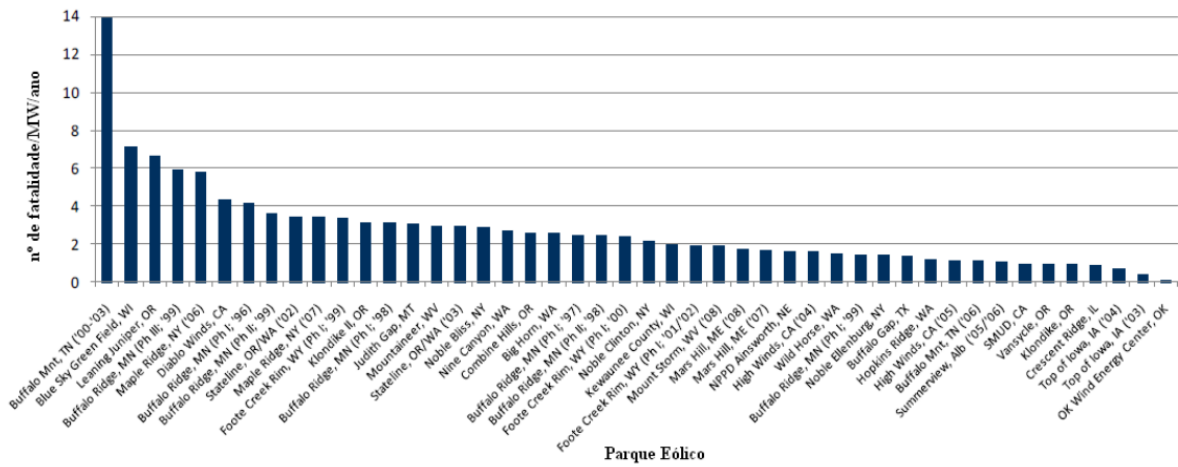
Estes impactos podem ser reduzidos, através de planejamento, evitando lugares como rotas de migração das aves, bem como redes de transmissão subterrâneas. (MMA, [s. d.]

Alguns fatores que influenciam nos impactos em pássaros são (SALINO, 2011):

- Perda de Habitat;
- Distúrbio, o que leva ao deslocamento ou à exclusão;
- Risco de colisão;
- Obstáculos ao movimento.

Abaixo segue um gráfico mostrando as taxas de mortalidade de pássaros em diferentes parques eólicos e em diferentes anos:

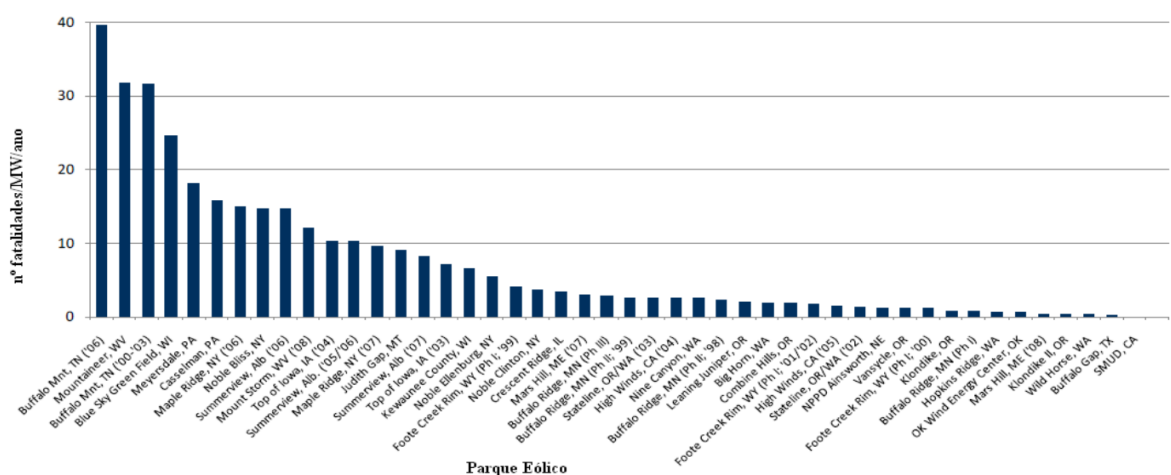
Figura 1 - Taxa de mortalidade de pássaros em vários parques eólicos.



Fonte: SALINO, 2011

Mas não apenas pássaros sofrem com este tipo de impacto, estudos feitos nos EUA e na Europa, mostraram que morcegos podem também colidir com as turbinas eólicas, chegando a elevar esse índice com o aumento das turbinas, porém a grande parte dessas fatalidades está no período de migração e não as atividades locais desses mamíferos. A seguir notamos no gráfico a taxa de mortalidade de morcegos devido aos diferentes parques eólicos (SALINO, 2011):

Figura 2 - Taxa de mortalidade dos morcegos nos vários parques eólicos.



Fonte: SALINO, 2011

Para animais terrestres, o impacto não chega a ser tão significativo. Os motivos que levam a preocupações são danos ou perdas de áreas utilizadas como refúgio, território de caça ou rotas utilizadas com maior frequência. (SALINO, 2011)

Os mecanismos que podem ser utilizados para que se diminua o impacto sobre esses animais tanto aves como os terrestres, são (SALINO, 2011):

- Evitar áreas de conservação e sensibilidade;
- Proteção de habitats sensíveis;
- Estabelecer um regime de monitoramento ambiental durante e após todas as fases de construção;
- Realizar corredores entre os grupos de turbinas;
- Aumentar a visibilidade das pás e rotores;
- Sessar o funcionamento da usina em períodos migratórios e;
- Reduzir a velocidade dos rotores em períodos críticos.

3.3 Segurança no trabalho e danos a pessoas

O sistema de geração eólica, tem demonstrado ser um ícone em segurança, uma vez que apresentam casos raros de acidentes, sejam por pedaços partidos de pás ou por construção de uma torre. (LOPES, 2012)

O trabalho perigoso se relaciona a:

- Transporte;
- Localização;
- Montagem;
- Manutenção e;
- Partição de peças.

Ainda não existem normas técnicas brasileiras específicas com relação a proteção do trabalhador, conseqüentemente, sem muitas exigências a quem trabalhe nesse setor.

3.4 Interferências eletromagnéticas

As turbinas eólicas, podem refletir ondas eletromagnéticas, causando interferências a sistemas de comunicação. No entanto essas interferências são pouco significativas, porém se uma usina é construída próximo a um aeroporto, ou centrais de telecomunicações, deve-se efetuar estudos que detalhem se esse tipo de interferência será prejudicial. (LOPES, 2012)

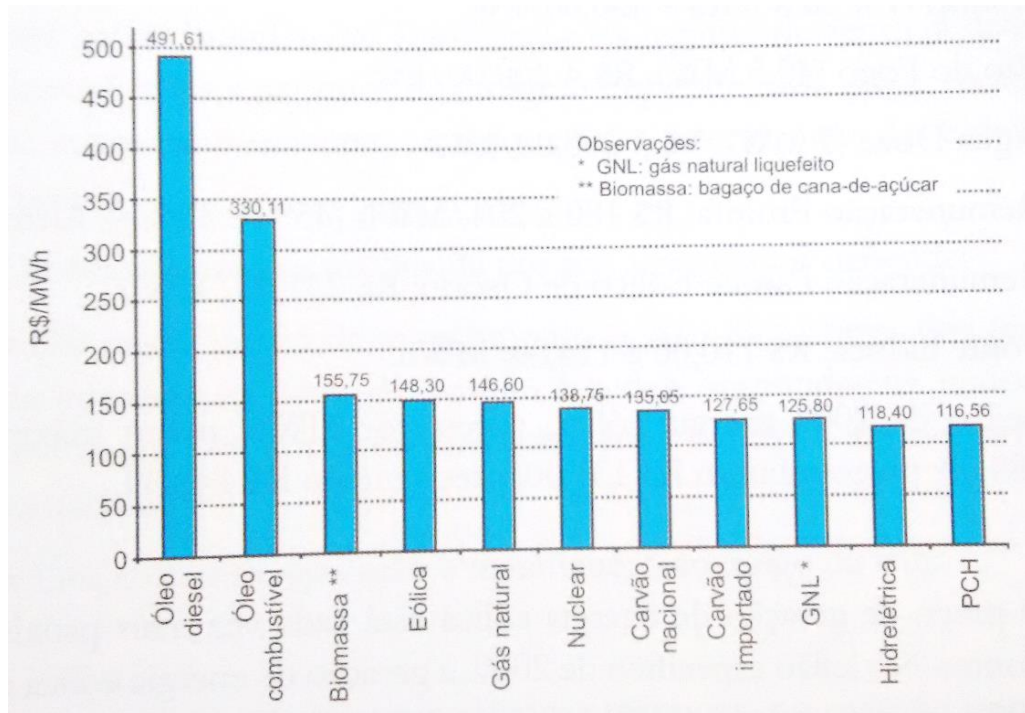
3.5 Custos envolvidos na produção de energia elétrica

Além de obter pequenos impactos ambientais, uma das principais vantagens da energia eólica, é que esse sistema não possui dependências quanto a combustíveis fósseis, ou de outro combustível convencional, assim sendo retirado da variação dos preços dessas mercadorias na economia, tendo menor flutuação no preço da geração. (SALINO,2011)

De acordo com Lopez, entre os anos de 1990 e 2002, a capacidade da energia eólica mundial foi duplicada em intervalos de três em três anos, sendo que para cada duplicação, os custos dessa tecnologia diminuíram em 15%. Se tornando competitiva com outras formas de geração, como o carvão e a capacidade nuclear. Porém para máquinas de grande porte, os custos são mais altos em relação a geração hidrelétrica.

No gráfico a seguir veremos os custos da produção de energia elétrica no Brasil no ano de 2008:

Figura 3 - Custo da produção de energia elétrica no Brasil em 2008.



Fonte: LOPES, 2012

Fazendo um comparativo entre os custos da energia eólica no Brasil no ano de 2008 (LOPES,2012):

Osório (150 MW): R\$ 4.400,00/ kW.

Rio do Fogo (49,3 MW): R\$ 4.200,00/ kW.

Água Doce (9 MW): R\$ 3.200,00/ kW.

Remuneração Proinfa: R\$ 180 a 204/ MWh (45% e 37% < Alemanha).

Remuneração Parque eólico de Osório: R\$ 231,00/ MWh.

Fonte hídrica: R\$ 110,00 a 114,00/ MWh.

No leilão de 2009, o preço da geração eólica chegou ao preço de R\$ 189,00 o megawatt-hora (MWh), chegando próximo ao das térmicas a gás e carvão que

continham o preço de R\$ 180,00 o MWh e muito abaixo das térmicas a óleo diesel (R\$ 780,00 o MWh). (LOPES, 2012)

Os custos da energia eólica em seus estágios iniciais de projeto, são altos se aproximando dos preços de construção e compra de equipamentos de uma central hidrelétrica, devido aos problemas de logística, por exemplo, precariedade de estradas no caso da região nordeste e a restrição de mercado, ou seja, a falta de concorrência de fabricantes nacionais de aerogeradores. (GESEL, 2009). Considerando as principais fontes de energia do sistema elétrico, com o tempo, os custos de manutenção e operação simplesmente diminuem, pois, a fonte (água ou vento), são gratuitos. (LOPES, 2012)

Tanto as centrais elétricas, como os parques eólicos, geram o máximo de suas capacidades quando os reservatórios estão em níveis máximos e o regime dos ventos no máximo detectado. Essas duas fontes se complementam, uma vez que nos períodos de estiagem, é o momento onde se tem mais ventos. Portanto, o sistema eólico ajuda o hidroelétrico a recompor seus reservatórios. (LOPES 2012)

Os custos da energia produzida por um aerogerador (que será definido mais à frente) dependerá de dois fatores, o primeiro será os custos iniciais do investimento (turbinas, torres, terrenos, construção civil, ligação à rede de distribuição). Segundo, será os custos da operação e manutenção durante o período útil da turbina.

O próximo gráfico nos apresenta o custo de produção de energia em alguns países, mostrando um comparativo entre Brasil, Estados Unidos, entre outros continentes (LOPES, 2012):

Figura 4 - Custo da produção de energia eólica em alguns países em 2009.



Fonte: LOPES, 2012

Tendo em vista esses conceitos, a seguir será analisado como está a situação das usinas instaladas tanto no mundo quanto no Brasil.

3.6 Energia eólica instalada no mundo

Para se ter a medição de um potencial eólico confiável devemos notar que o aproveitamento da energia eólica requer extensões de área adequada contendo, velocidades médias em períodos anuais para que se possa viabilizar a instalação de usinas geradoras, ou seja, a produção de energia elétrica é dependente das velocidade dos ventos, mantendo uma certa constância durante o ano, e para que se tenha uma predição mais confiável para uma construção deste tipo, deve ser analisado a viabilidade técnica e econômica. Para se realizar um estudo deste tipo, normalmente é requerido uma rede anemométrica qualificada, que utiliza equipamentos com alguns requisitos como, confiabilidade, durabilidade e dispostos adequadamente em torres de medições altas, com anemômetros calibrados e um

sistema que tenha alta eficiência de coleta de dados e verificação de falhas. O período para estes testes deve ter no mínimo um prazo de um ano. (LOPES, 2012)

Um estudo realizado pela *European Wind Energy Association* (EWEA), em conjunto com o Greenpeace, revelou que independentemente do crescimento acelerado da demanda por energia elétrica, a geração pelas fontes eólicas teria capacidade de fornecer 10% da demanda mundial no ano de 2020. Implicando em um crescimento médio anual da potência eólica instalada de 30% até o ano de 2010, ao qual já foi superada, e 20% entre os anos de 2010 e 2020. Já em outros países, a energia eólica é economicamente competitiva em relação aos combustíveis fósseis e energia nuclear, tendo em conta os custos ambientais.

Na tabela seguinte notamos o *ranking* de potência instalada no ano de 2014.

Tabela 2 - Potência instalada no mundo em 2014.

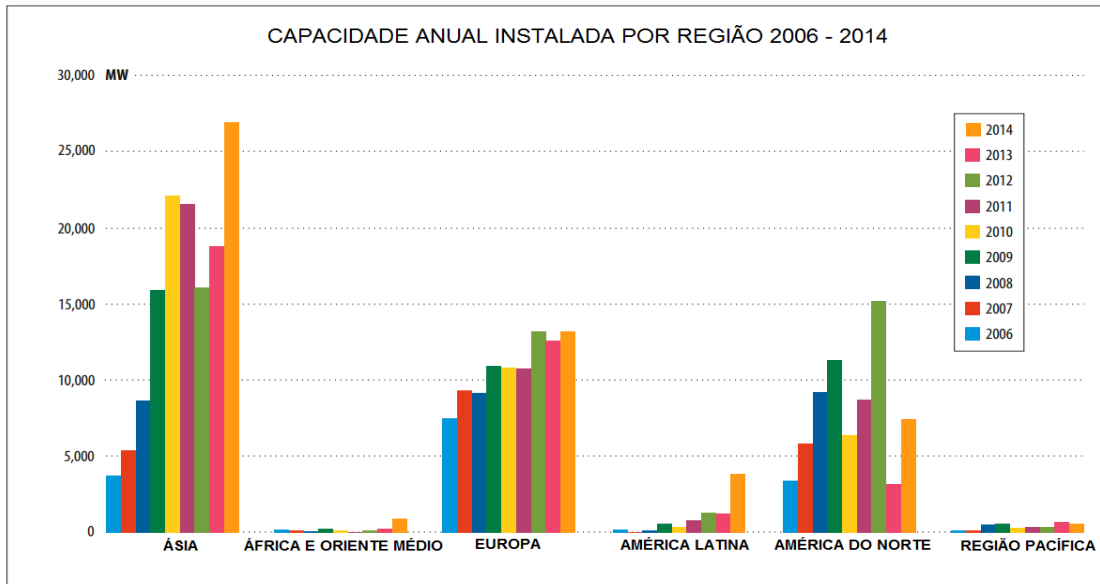
País	Capacidade (MW)	% do Total
China	114,763	31
EUA	65,879	17.8
Alemanha	39,165	10.6
Espanha	22,987	6.2
Índia	22,465	6.1
Reino Unido	12,44	3.4
Canadá	9,964	2.6
França	9,285	2.5
Itália	8,663	2.3
Brasil	5,939	1.6
(Resto do mundo)	58,275	15.8
Total mundial	369,553	100%

Fonte: Adaptado, GWEC, 2015.

Em muitos países, onde os combustíveis fósseis são mais utilizados, existem muitos projetos para expansão do parque eólico em um período a médio prazo. Sendo que para o ano de 2010 foram projetados uma potência mundial instalada de 170 mil MW, sendo o dobro da atual até aquele momento.

Na Figura 5, o gráfico mostra as capacidades instaladas em MW no mundo até do ano de 2006 até 2014:

Figura 5 - Capacidade instalada (MW) no mundo de 2006 até 2014.

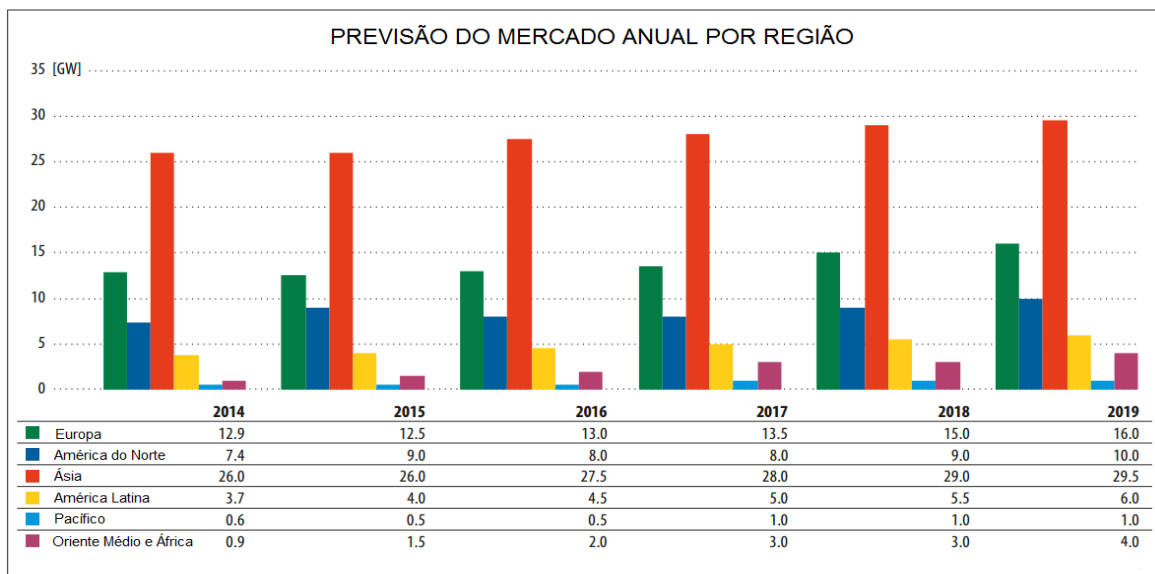


Fonte: Adaptado, GWEC, 2015.

Assim notamos o crescimento em relação a potência instalada dos países em apenas um ano.

A Figura 6 mostra a previsão da capacidade instalada em GW por região do planeta do ano de 2014 até 2019:

Figura 6 - Projeção capacidade instalada em GW de 2014 a 2019.



Fonte: Adaptado, GWEC, 2015.

Assim notamos o alto crescimento dessa fonte alternativa no mundo com o passar dos anos. Relacionando esse crescimento mundial, a próxima seção será apresentada a situação no Brasil em relação ao uso dessa tecnologia.

3.7 Energia eólica instalada no Brasil

A maior parte da geração de energia elétrica é feita através de fonte renováveis, como as hidrelétricas que compõe 70%, 4% biomassa (térmica) e 0,2% do total é a eólica, dados estes informados pela ANEEL. (LOPES, 2012)

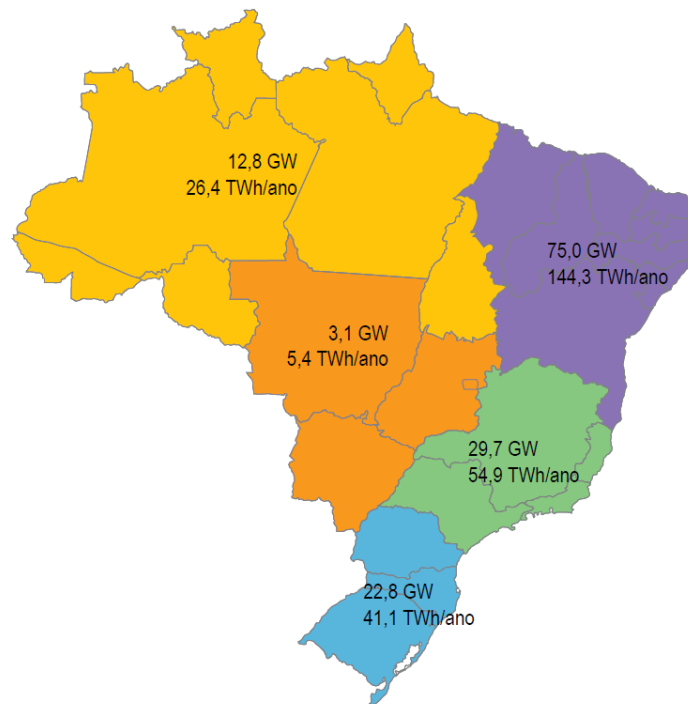
Apesar da geração de energia eólica ser pequena, esta dispõe da vantagem de servir como fonte complementar à energia hídrica do país, sendo evidenciado na região nordeste, que possui uma das características mais favoráveis em relação a taxa de ventos em períodos de seca na região, economizando as reservas hídricas, mantendo seus níveis mais adequados.

A grande desvantagem do sistema eólico, está na falta de concorrência no mercado brasileiro, aumentando assim o preço da energia. Pois o custo necessário para implementação vem basicamente dos estudos de viabilidade técnica, onde se analisa as medições de qualidade e constância dos ventos, bem como a aquisição de equipamentos e instalação dos mesmos.

De acordo com Atlas da ANEEL em sua terceira edição, o Brasil é favorecido, devido à presença de ventos ser duas vezes maior em relação à média mundial, além de possuir volatilidade (oscilação da velocidade) de 5%, dando assim uma melhor previsão do volume a ser produzido.

Na Figura 7, temos o mapa do Brasil, mostrando o seu potencial eólico feito no ano de 2007:

Figura 7 - Potencial eólico brasileiro no ano de 2007.



Fonte: ANEEL, 2008.

Onde notamos que a região nordeste contém a maior capacidade, sendo principalmente no litoral. Na região sudeste o potencial encontra-se particularmente no Vale do Jequitinhonha. Na região sul, atualmente de acordo com as obras do Programa de Aceleração do Crescimento – PAC, onde se encontra o maior parque eólico da América Latina, chamado de Complexo Eólico Campos Neurais, composto por três parques, Geribatu com potência de 258 MW e 129 aerogeradores inaugurado no dia 27 do mês de fevereiro deste ano (2015), e os que estão em fase de construção, Chuí com potência de 144 MW e Hermenegildo com 181 MW.

Figura 8 - Parque eólico de Geribatu.



Fonte: Blog do Planalto, 2015

Neste cenário, será que as atuais usinas de geração eólica no Brasil, são viáveis do ponto de vista econômico? Qual é a parcela de contribuição para o setor energético brasileiro?

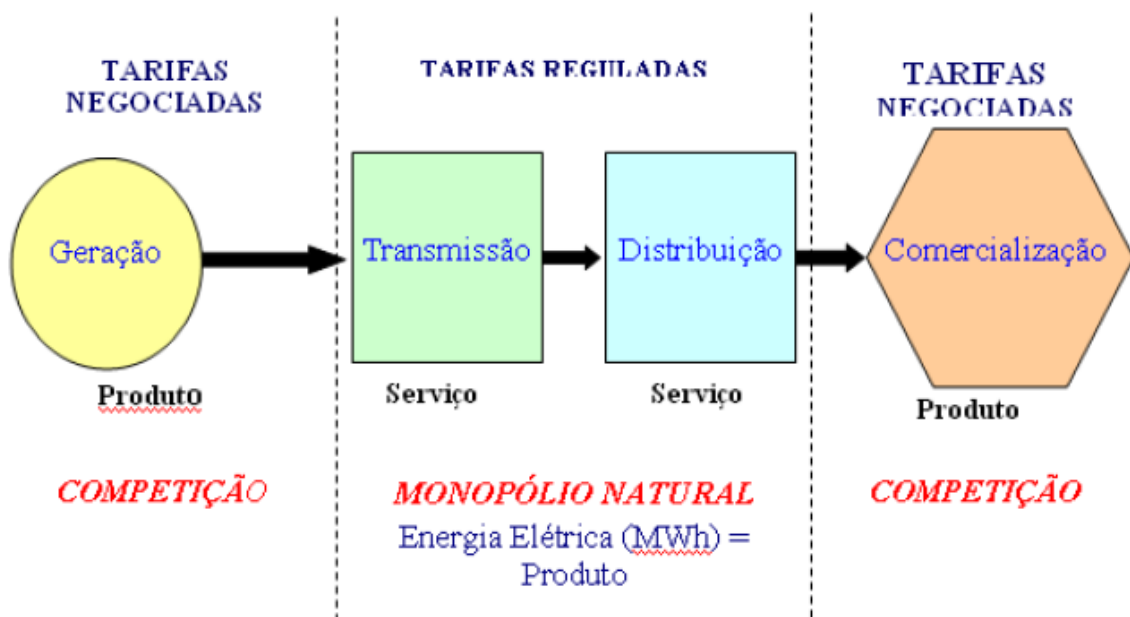
Para responder este questionamento, este trabalho divide-se da seguinte maneira: no capítulo 3, um referencial teórico mostrando os princípios de geração alternativa de energia elétrica, para um desenvolvimento sustentável, juntamente com os impactos causados pela geração eólica, bem como os custos envolvidos, num cenário brasileiro e mundial. No quarto capítulo, será realizado um estudo relativo ao mercado de energia brasileiro e a influência da resolução normativa 482 de 2012 no que se refere a pequenos produtores de energia eólica. O quinto capítulo tratará de assuntos mais técnicos de como é feita a transformação de energia por meio de geradores eólicos. O sexto capítulo analisará as usinas já instaladas no Brasil e quais são as suas contribuições para a matriz energética brasileira. Ainda nesse capítulo será indicado os impactos das obras que estão sendo construídas e uma previsão do quanto, estas podem ajudar no desenvolvimento energético brasileiro. Por fim, no sexto e último capítulo serão feitas as considerações finais.

4 ESTRUTURA TARIFÁRIA BRASILEIRA

A energia elétrica é um importante indicador de desenvolvimento de um país, mas o consumo desta tem um custo, devendo ser arcado por aqueles que usufruem da energia, sendo cobrada pela quantidade, tipo e horário de uso.

Dentro do setor elétrico, a estrutura do mercado da energia se divide em algumas formas de acordo com cada setor do sistema, conforme ilustra a figura abaixo:

Figura 9 - Sistema tarifário brasileiro.



Fonte: Tarifas de energia elétrica no Brasil, 2011.

Na geração de energia, o produto (energia elétrica), é vendido através de leilões em audiências públicas, para concessionárias de energia, do setor de transmissão e distribuição, onde existe o monopólio natural. No final os consumidores, que pagam pelo produto cedido pelas distribuidoras.

Neste contexto a resolução 414/2010 da ANEEL, define os consumidores em dois grupos, A e B. Onde o grupo A é composto de unidades consumidoras com o

fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômia e é subdividido em:

- Subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- Subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- Subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
- Subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- Subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- Subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

No grupo B, composto de unidades consumidoras com fornecimentos em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômia e subdividido em:

- Subgrupo B1 – residencial;
- Subgrupo B2 – rural;
- Subgrupo B3 – demais classes;
- Subgrupo B4 – iluminação pública.

4.1 Modalidades tarifárias

Para o grupo que pertence a alta tensão, as modalidades de tarifas são de três tipos:

- Horo sazonal azul;
- Horo sazonal verde;

- Convencional.

4.1.1 Tarifa horo sazonal azul

Nesse tipo de tarifa, os consumidores pagam pela demanda de potência em (kW) com preços que variam com as horas utilizadas ao dia, enquanto o consumo de energia em (kWh) variam conforme o horário do dia e o período do ano.

Os horários que constituem essa mudança de preço durante o dia, são chamados de horário de ponta, que corresponde em um período de três horas consecutivas diárias excluindo finais de semana e feriados nacionais, compreendidas entre 18 horas às 21 horas (fora do horário de verão) e das 19 horas às 22 horas (no horário de verão), e horário fora de ponta, corresponde nas 21 horas restantes.

Outra característica deste tipo de modalidade, está na variação do preço da tarifa consumida em kWh de acordo com cada período do ano, sendo dois períodos (seco e úmido).

Tabela 3 - Períodos do ano para tarifação.

Período do ano	Meses compreendidos
Seco	Maio a novembro
Úmido	Dezembro a abril

Fonte: próprio autor.

Nesse tipo de modalidade participam às unidades consumidoras do grupo A, que contém unidades consumidoras atendidas a uma tensão maior ou igual a 69 kV, já as unidades com tensão inferior a 69 kV, a modalidade é opcional.

4.1.2 Tarifa horo sazonal verde

Nesta modalidade, o consumidor deverá pagar por uma única tarifa de demanda de potência e as tarifas de consumo de energia, variam conforme o horário do dia e o período do ano, ou seja, horário de ponta ou fora de ponta e período seco ou úmido.

Os consumidores do grupo A, com alimentação inferior a 69 kV à sua aderência é opcional.

4.1.3 Tarifa convencional

Na tarifa convencional, tanto a demanda de potência quanto o consumo de energia elétrica não têm qualquer alteração quanto ao horário utilizado ou período do ano.

Consumidores do grupo A com tensão de alimentação inferior a 69 kV e com demanda contratada menor que 300 kW, são encaixados na modalidade convencional binômia, já a convencional monômia é aplicada as unidades do grupo B.

4.1.4 Outras modalidades tarifárias

Existem outras modalidades tarifárias como determina a ANEEL no submódulo 7.1:

- Modalidade tarifária horária Branca: aplicada às unidades consumidoras do grupo B, exceto os subgrupos B1 subclasse Baixa Renda e B4,

caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia;

- Modalidade tarifária Geração: aplicada às centrais geradoras conectadas aos sistemas de distribuição, caracterizada por tarifas de demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia;
- Modalidade tarifária Distribuição: aplicada às concessionárias ou permissionárias de distribuição conectadas aos sistemas de outra distribuidora, caracterizada por tarifas diferenciadas de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia, e de consumo de energia elétrica.

4.2 Bandeiras tarifárias

Devido a condições adversas em relação às poucas chuvas nos últimos anos e a crescente demanda de energia, a ANEEL a partir de 2015 instituiu um novo modelo de tarifação chamado de bandeiras tarifárias através da resolução normativa nº 547, de 16 de abril de 2013, onde cada uma delas é representado por uma cor, sendo:

- Verde;
- Amarela;
- Vermelha.

É uma forma de apresentar ao consumidor, como estão os custos para gerar energia. Esta é uma maneira de que o usuário possa se adaptar ao melhor consumo quando as tarifas passarem por custos maiores.

A figura abaixo mostra cada situação quando uma bandeira for utilizada na fatura:

Figura 10 - Bandeiras tarifárias.

 <p>BANDEIRA VERDE</p>	 <p>BANDEIRA AMARELA</p>	 <p>BANDEIRA VERMELHA</p>
<p>Condições favoráveis de geração de energia.</p> <p>A tarifa não sofre nenhum acréscimo.</p>	<p>Condições de geração menos favoráveis.</p> <p>A tarifa sofrerá acréscimo de R\$0,025 a cada kWh consumido (valor informado sem cálculo de impostos).</p>	<p>Condições mais caras de geração.</p> <p>A tarifa sofrerá acréscimo de R\$0,055 a cada kWh consumido (valor informado sem cálculo de impostos).</p>

Fonte: CEMIG, 2015.

Assim o consumidor, por exemplo, quando sua fatura estiver com a bandeira vermelha poderá regular seu consumo de forma a pagar o menor valor possível.

É importante ressaltar que as bandeiras tarifárias, representam apenas os custos da geração de energia elétrica, ou seja, sem o cálculo de imposto, objetivando uma maior transparência aos consumidores. Já a tarifa em si, representa a maior parte da conta de energia, dando cobertura aos gastos com geração, transmissão e distribuição, além de encargos setoriais. (ANEEL, 2015a)

De acordo com a (ANEEL, 2015a), a cada mês, as condições de operação do sistema são reavaliadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, que define a melhor estratégia de geração de energia para atendimento da demanda. A partir dessa avaliação, define-se as térmicas que deverão ser acionadas. Se o custo variável da térmica mais cara for menor que R\$ 200/MWh, então a Bandeira é verde. Se estiver entre R\$ 200/MWh e R\$ 388,48/MWh, a bandeira é amarela. E se for maior que R\$ 388,48/MWh, a bandeira será vermelha. Abaixo segue a tabela com as datas de acionamento das bandeiras, definido conforme datas de realização das reuniões do PMO do NOS, ao qual podem ser alteradas.

Figura 11 - Datas previsão de divulgação de bandeira tarifária.

CALENDÁRIO PREVISTO DE DIVULGAÇÃO DAS BANDEIRAS - 2015*	
Fevereiro	30/jan
Março	27/fev
Abril	27/mar
Maio	30/abr
Junho	29/mai
Julho	26/jun
Agosto	31/jul
Setembro	28/ago
Outubro	25/set
Novembro	30/out
Dezembro	27/nov
Janeiro de 2016	23/dez

Fonte: ANEEL, 2015a.

Esse modelo não é utilizado em todos os estados brasileiros ainda, pois como nos estados do Amazonas, Amapá e Roraima não estão totalmente incluídos no Sistema Interligado Nacional – SIN, estes então não participam do programa de bandeiras tarifárias, conforme figura abaixo:

Figura 12 - Regiões onde se inclui o sistema de bandeiras tarifárias.



Amazonas, Amapá e Roraima não estão no SIN e, portanto, nesses estados não funcionará o sistema de Bandeiras Tarifárias.

Fonte: ANEEL, 2015a.

Após esta análise do mercado energético brasileiro, a seguir na próxima seção, será mostrado o funcionamento da norma 482.

4.3 A resolução normativa 482 de 2012 da ANEEL

A resolução normativa 482 de 2012 ou resolução 482 da ANEEL, diz respeito às condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, além de outras providências, uma vez que o mercado energético tem estado em crise e como incentivos governamentais tem aumentado nesse sentido, dando condições para consumidores criarem pequenas unidades geradoras, a serem conectadas ao sistema de distribuição.

Primeiramente, esta Resolução define que a microgeração distribuída, é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utiliza fontes renováveis, como, energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, de acordo com a regulamentação da ANEEL, que estão conectadas na rede de distribuição por meio de unidades consumidoras. (ANEEL, 2015b).

Segundo, ela define, a minigeração distribuída, como uma central geradora, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW, para fontes renováveis como a microgeração distribuída, conforme a regulamentação da ANEEL, que esteja conectada na rede de distribuição. (ANEEL,2015b).

E terceiro, define-se sistema de compensação de energia elétrica, o sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com um dos dois tipos de geração acima citados, é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade com mesma titularidade. (ANEEL,2015b).

Após as definições a ANEEL em sua resolução se volta para a distribuição, onde as distribuidoras de energia deverão se adequar em seus sistemas comerciais,

revisando ou elaborando normas técnicas para tratar do acesso a micro e minigeração distribuída, utilizando como base os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, bem como normas brasileiras e internacionais.

Para a unidade consumidora do grupo B, a central geradora que participa do sistema de compensação de energia elétrica fica limitado à carga instalada, já o grupo A, fica limitado na demanda contratada.

Após ressaltar os deveres das concessionárias de distribuição, a ANEEL diz sobre o sistema de compensação que é interligado na rede de distribuição, mostrando que as unidades de micro e minigeração, possam gerar energia ativa para seu próprio consumo e o excedente enviar para o sistema, deste modo essas unidades geradoras recebem créditos de energia válidos por um período de 36 meses. Assim quando o consumo é maior que a geração a concessionária, disponibiliza energia ativa para a unidade consumidora, o que pode ser bastante viável, trazendo reduções nas faturas de energia a serem pagas.

O custo para montagem dessas micro e minigeradoras, não estão a cargo da ANEEL, mas sim do próprio consumidor que deseja implementar esse tipo de sistema, a análise do custo/benefício deve levar em conta cada caso e suas particularidades, como por exemplo:

- Tipo de fonte a ser utilizada (solar, eólica, hidrelétricas de pequeno porte, entre outros tipos de geração do tipo renováveis);
- Classe da unidade consumidora;
- Porte da unidade consumidora e da central de geração.

Após a análise sobre as micro e minigerações, vejamos no próximo capítulo, como deve ser escolhido cada componente, para construir uma central de geração de energia.

5 ENERGIA EÓLICA CONSTRUINDO UMA USINA

Neste capítulo será discutido, os componentes utilizados em um sistema eólico, ou seja, em um parque ou usina eólica, indicando qual modelo é melhor para cada local.

5.1 Turbinas eólicas

Nesta subseção mostra-se alguns tipos de turbinas que foram construídas ao longo da história. A primeira operada automaticamente, foi instalada no ano de 1888, por Charles Brush, contando com um diâmetro do rotor de 17 m e 144 pás de madeira. Tal turbina possuía um gerador com capacidade de 12 kW e funcionou durante 20 anos. (LOPES, 2012)

Considerado um dos pioneiros na aerodinâmica moderna, Poul la Cour (1846-1908), descobriu que turbinas com menor número de pás, seriam mais rápidas e mais eficientes no quesito geração de energia.

O dinamarquês Christian Riisager nos anos de 1980 construiu uma turbina pequena com potência de 22 kW, se baseando no modelo de Gedser como é indicado na Figura 13, o que se tornou um marco no desenvolvimento no setor.

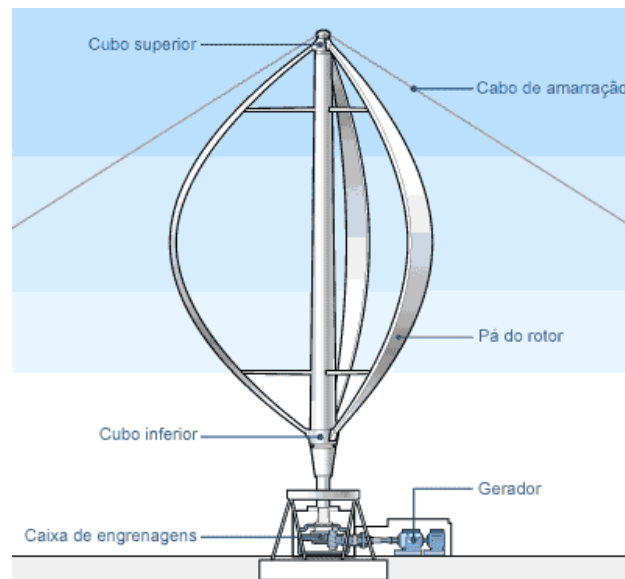
Figura 13 - Turbina eólica Gedser.



Fonte: Asociación danesa de la industria eólica, 2003

Ainda na década de 1980, ficou conhecida a máquina de eixo vertical, conhecida como Darrieus, ela utilizava abas (*flaps*), para controlar a potência e o sistema de transmissão hidráulico, a figura 13 é um exemplo dessa turbina. Na mesma época foi criada a máquina Tvind com potência de 2 MW, diâmetro de rotor de 54 m, acoplado a um gerador síncrono, e o modelo Bonus 300 kW, que viria a ser muito popular na Europa. (LOPES, 2012)

Figura 14 - Turbina tipo Darrieus.



Fonte: LAYTON, 2011

Avançando um pouco no tempo, no ano de 1999, foi desenvolvida a turbina NEG Micon, com 2,2 MW de potência e 72 m de diâmetro do rotor. A Figura 15 mostra o modelo dessa turbina.

Figura 15 - Turbina NEG Micon.



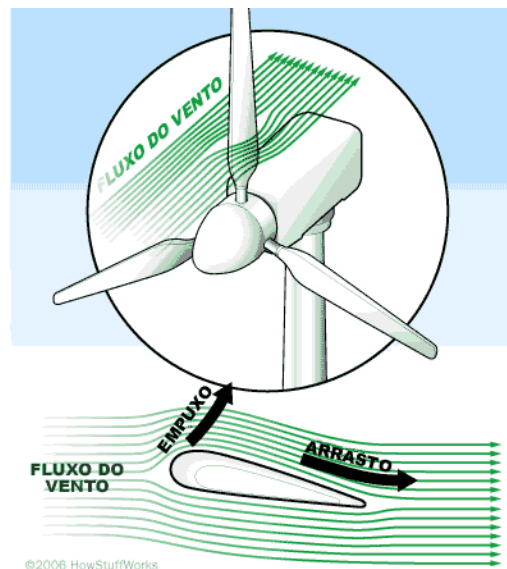
Fonte: Asociación danesa de la industria eólica, 2003

5.1.1 Funcionamento de uma turbina

Visto alguns desses modelos, esta subseção mostra o seu funcionamento, ou seja, o princípio aerodinâmico envolvido para se gerar energia mecânica e transmitir a mesma a um gerador elétrico.

As turbinas eólicas são movidas através do arrasto, onde o vento entra em contato com as pás, o que movimenta as mesmas, fazendo girar o rotor. Na Figura 16 nota-se uma turbina com eixo horizontal, mostrando esse princípio:

Figura 16 - Princípio aerodinâmico da turbina eólica.



Fonte: LAYTON, 2011

O fluxo do ar atravessa em ambos os lados de uma pá. Assim a velocidade do vento é maior em uma das superfícies, aquela com área mais extensa, em vista disso, uma superfície com baixa pressão é criada. A diferença de pressão entre as faces, resultará numa força, denominada elevação aerodinâmica ou empuxo. (LOPES, 2012)

A força de empuxo é perpendicular à força de arrasto e a relação entre elas é o principal objetivo, quando se pensa num projeto de turbina, sempre se busca uma alta relação entre elas para a construção de uma pá. Essa razão pode variar ao

longo do comprimento da pá, o que otimizará a energia produzida em várias velocidades do vento. (LOPES, 2012)

Como visto anteriormente, há dois tipos de eixos em turbinas eólicas, as de eixo paralelo ao solo (horizontais) e as perpendiculares (verticais). Em uma turbina de eixo vertical, são bastante raras. Como elas são construídas de forma a estarem sempre alinhadas com o vento, nenhum ajuste se faz necessário à medida que o vento muda de direção, diferentemente das turbinas de eixo horizontal. Porém esse tipo, exige um impulso de seu sistema elétrico para dar partida, além de utilizar cabos de amarração para sua sustentação, resultando em uma menor elevação do rotor. Em consequência disso, a velocidade do vento é menor, sendo menos eficientes quando comparados com as turbinas eólicas de eixo horizontal. São mais utilizadas em pequena escala e para bombeamento d'água. (LOPES, 2012)

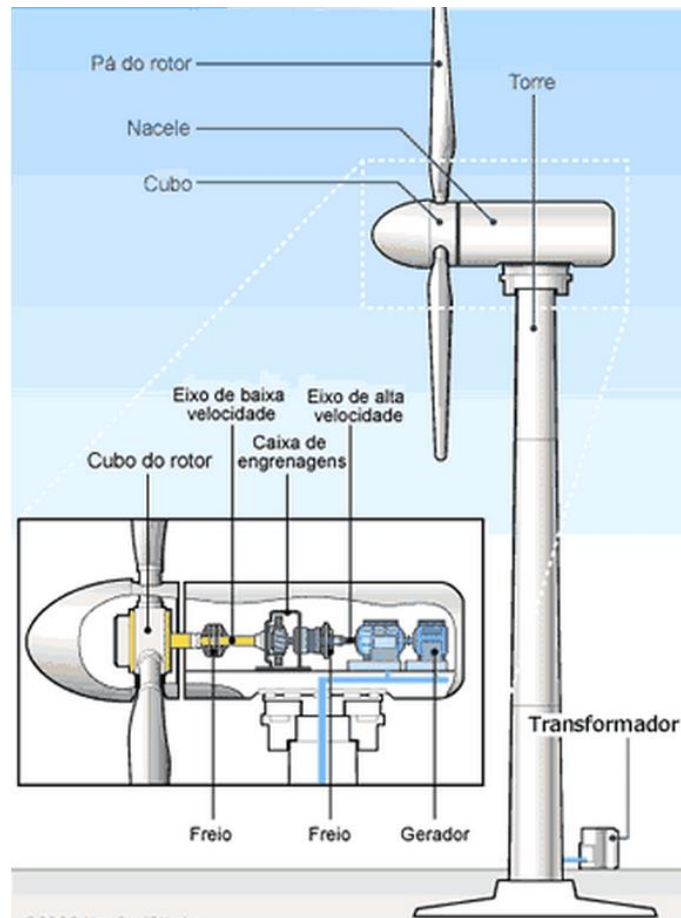
Para grande escala, são utilizadas apenas as turbinas de eixo horizontal, estas que precisam estar sempre alinhadas com a direção do vento, sendo utilizados mecanismos para esse ajuste, como motores elétricos e caixas de engrenagens. Os dispositivos eletrônicos fazem leitura da posição de um cata-vento, alinhando o rotor, de forma a captar o máximo da energia eólica. A torre eleva a turbina e seus componentes aproveitando a velocidade do vento e ocupam pouco espaço no solo. (LAYTON, 2011)

Visto seu funcionamento, será analisado na próxima subseção, quais componentes estão presentes em uma turbina eólica.

5.1.2 Componentes

Os componentes de uma turbina eólica são mostrados na Figura 17.

Figura 17 - Componentes de uma turbina de eixo horizontal.



Fonte: LAYTON, 2011

Onde:

- Pás do rotor – capturam a energia do vento e a convertem em energia rotacional no eixo;
- Eixo – transfere a energia rotacional para o gerador;
- Nacele – carcaça que abriga os componentes;
- Caixa de engrenagens – controla a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e o gerador;
- Gerador – máquina que utiliza a energia rotacional do eixo para gerar energia elétrica através da teoria do eletromagnetismo;
- Unidade de controle eletrônico – monitora o sistema, deligando a turbina se necessário e ajuste de posição da turbina;
- Controlador – move o sistema alinhando à direção do vento;

- Freios – detêm a rotação do eixo em caso de sobrecarga de energia ou falhas no sistema;
- Torre – sustenta todo o conjunto, elevando as pás para girar de forma segura e distante do solo;
- Equipamentos elétricos – transmitem a eletricidade do gerador até as subestações.

As turbinas atuais apresentam funcionamento à medida que o vento alcança uma velocidade de 19 km/h, conseguem ter seu rendimento máximo com velocidades dos ventos entre 40 km/h e 60 km/h e são paradas quando se atinge 72 km/h. Locais considerados ideais para instalação de aerogeradores, são onde a média da velocidade dos ventos está em torno de 21 km/h. (LOPES, 2012)

Analisando cada componente, será mostrado a importância na geometria de alguns deles.

5.1.3 Geometria de alguns componentes

O rotor, responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em rotacional, é um dos componentes fundamentais para a geração de eletricidade, assim sua geometria compromete diretamente na eficiência global do sistema. Para isso vários testes, combinando diferentes formatos, foram feitos para se ter alto desempenho com baixo custo de fabricação e operação.

Já nas pás da turbina, sua forma é parecida com as asas de um avião, utilizando o formato de um aerofólio, para aproveitar melhor as forças aerodinâmicas, tais como o arrasto e o empuxo. Assim aumentando a captura dos ventos e tornando o sistema mais eficaz. As pás são torcidas de modo a apresentar um ângulo tirando vantagem da relação ideal da força de empuxo/arraste. (LOPES, 2012)

Além da aerodinâmica, o tamanho da turbina também é importante. Quanto maior as pás, maior o diâmetro do rotor, e mais energia poderá ser gerada. De maneira geral ao se dobrar o diâmetro do rotor, quadruplica a produção de energia.

Outro fator é a altura da torre de elevação. Quando elevamos a turbina, esta capta mais energia, pois quanto mais distante do solo menor a interrupção da passagem dos ventos. Experiências de fabricantes mostram um aumento de 12% na velocidade do vento, para cada vez que se tem o dobro de elevação. (LOPES, 2012)

A seguir, nota-se dois tipos de turbinas que contém diferenças em suas áreas e quais vantagens e desvantagens elas possuem.

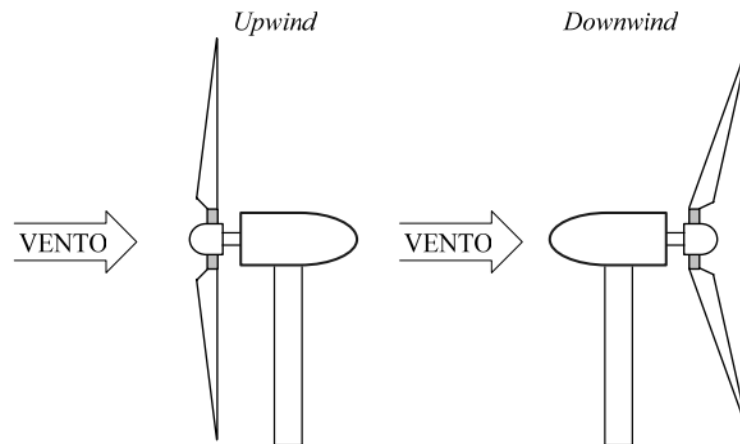
5.1.3.1 Turbinas upwind e downwind

Upwind, projetada para operação com a face contra a direção do vento. Sua vantagem é que a torre não se torna um obstáculo direto do vento. Esse conceito é muito utilizado nas turbinas modernas. Entretanto, um pequeno desvio na direção do vento é causado pela torre. O vento desvia antes mesmo de encontrar-se com a torre. Assim cada vez que uma pá passa em frente a torre uma pequena perda de potência é notada. A desvantagem desse tipo está na exigência de um afastamento das pás em relação a torre e a necessidade de um controle para manter a posição contra o vento.

Downwind é contrária a anterior, ou seja, esta é construída a favor dos ventos. A vantagem, é que este tipo não possui necessidade de um dispositivo de orientação, caso o sistema contenha um formato aerodinâmico com liberdade de posicionamento. Porém, com a ausência deste dispositivo cria-se um problema, pois se a turbina girar muitas vezes no mesmo sentido, os cabos elétricos podem se enroscar causando perigo de partir os mesmos. (LOPES, 2012)

A Figura 18 mostra os dois tipos de sistema de turbinas descritos anteriormente:

Figura 18 - Turbinas upwind e downwind.



Fonte: MARQUES, 2004

Comparando os dois modelos, a vantagem do tipo *downwind* é que ela pode ser construída como um sistema mais leve, de menor custo e mais flexível do que o tipo *upwind*. A desvantagem é o problema de flutuação na intensidade do vento através do obstáculo da torre, o que provoca cargas de fadiga na turbina. (LOPES, 2012)

Tendo em mente estes tipos de turbinas, será mostrado a seguir como funciona o sistema que controla a segurança para que a turbina não sofra com velocidades excessivas dos ventos.

5.1.4 Sistema para controle de segurança da turbina

O sistema de segurança frequentemente utilizado é o de frenagem, que são ativados quando a velocidade dos ventos passa do limite pré-estabelecido. Os sistemas de controle de potência, acionam os freios quando a velocidade se eleva a 72 km/h, e os libera quando esse nível é menor. (LOPES, 2012)

Para grandes turbinas, existem alguns tipos de sistema de frenagem aos quais são descritos abaixo:

- Controle de passo – para monitorar a geração de potência da turbina, tem-se um controlador eletrônico. Com velocidades acima de 72 km/h,

potência será excessiva, assim o controlador realiza o comando para que as pás alterem seu passo, de modo a ficarem desalinhadas com o vento, diminuindo a rotação. Esse sistema requer que o ângulo de montagem das pás em relação ao rotor, seja ajustável. (LAYTON, 2011)

- Controle passivo de perda de eficiência aerodinâmica – as pás são montadas no rotor com ângulo fixo, porém são projetadas para que a torção das mesmas aplique a frenagem quanto o vento é excessivo. Quando essa velocidade é excessiva, a disposição das pás nesse ângulo, vão causar uma turbulência no lado contrário da pá, o que induzirá a perda de eficiência aerodinâmica. Portanto, ocorre essa perda quando o ângulo da pá voltado para a chegada do vento se torna muito acentuado, eliminando a força de empuxo, diminuindo a velocidade das pás. (LAYTON, 2011)
- Controle ativo de perda de eficiência aerodinâmica – as pás, possuem passo variável. Um sistema ativo de perda de eficiência aerodinâmica faz a leitura de geração de potência do mesmo modo que o controle de passo, mas ele altera as pás de modo a gerar a perda de eficiência. (LAYTON, 2011)

Esses são os três tipos de frenagem utilizados para a segurança. Será visto a seguir na próxima seção, como é o cálculo da potência de uma turbina eólica.

5.1.5 Potência de uma turbina eólica

Como foi visto anteriormente, o vento, quando incide sobre as pás de uma turbina, provoca o surgimento de uma força de arraste, esta sendo formulada como:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_a \cdot A \cdot v^2 \quad (1)$$

Onde:

F_a = força de arraste aerodinâmico [N];

ρ = massa específica do ar [kg/m³];

v = velocidade do vento [m/s];

C_a = coeficiente de arrasto [adimensional];

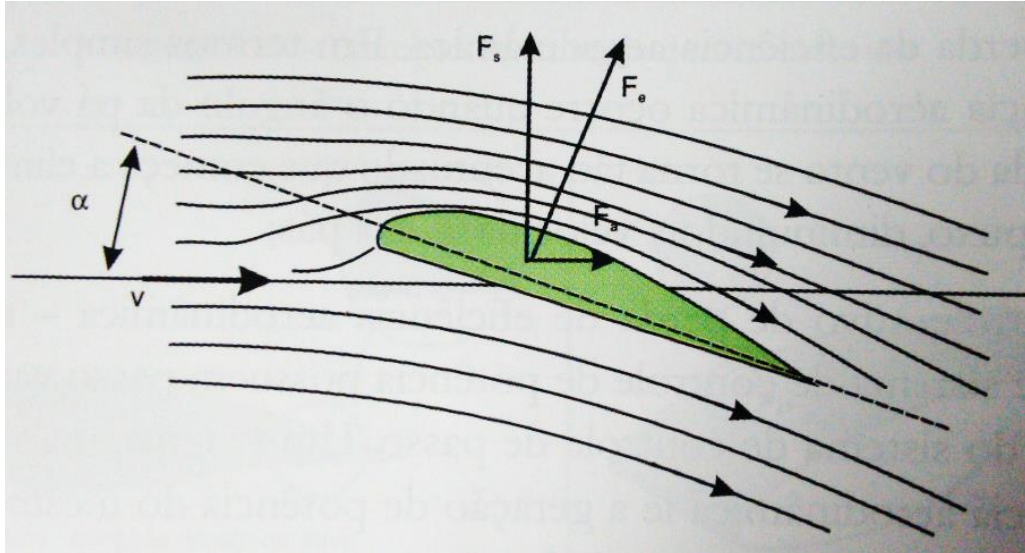
A = área da pá [m^2]

O vento v incide na pá e a sua desaceleração resulta em uma força de arraste, agindo perpendicularmente à superfície da pá, empurrando-a. O coeficiente de arrasto dependerá da forma da pá, sendo variado pela geometria e dimensões. A superfície da pá é representada por A .

Nas turbinas de arraste, a velocidade das pás não pode ser maior que a do vento, o que implica em limitação da eficiência.

O vento incidindo na pá com um ângulo α em relação ao eixo dela, provoca uma mudança na direção do fluxo de ar variando sua velocidade, e de acordo com a segunda lei de Newton, essa mudança provoca uma força de empuxo. O sistema é descrito na imagem abaixo:

Figura 19 - Fluxo na seção da pá de um rotor de uma turbina eólica de sustentação.



Fonte: LOPES, 2012

Onde a força de empuxo é decomposta pela força de sustentação F_s , que é responsável pela sustentação aerodinâmica da pá, e a força de arraste F_a , provocada pela pressão do vento sobre a superfície da pá. A força de sustentação é dada por:

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_s \cdot A \cdot v^2 \quad (2)$$

Onde:

F_s = força de sustentação [N];

ρ = massa específica do ar [kg/m^3];

v = velocidade do vento [m/s];

C_s = coeficiente de sustentação [adimensional];

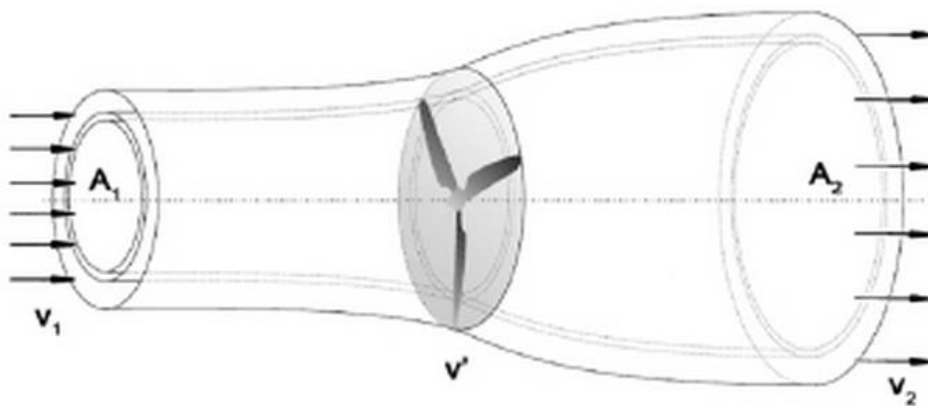
A = área da superfície da pá [m^2].

O coeficiente C_s , depende das dimensões e características aerodinâmicas da seção da pá. Podendo variar ao longo do comprimento longitudinal da pá, como consequência da sua alteração dimensional.

Para que haja, trabalho ou torque, a geometria da pá e a sua inclinação em relação à direção do vento, devem ser feitos para direcionar a força de empuxo resultante, no sentido da rotação do rotor da turbina. (LOPES,2012)

Na figura a seguir, é mostrado o fluxo de ar incidente sobre uma turbina de eixo horizontal:

Figura 20 - Fluxo de vento através de uma turbina de eixo horizontal.



Fonte: PICOLO, 2014

A equação da continuidade de Bernoulli define que a vazão de fluido é constante para toda localização ao longo do tubo de vazão, tendo algumas considerações:

- Não há fluxo de massa através dos limites do tubo de vazões e;

- A massa específica do ar é constante.

Essas condições são válidas para velocidades menores que 100 m/s. (LOPES, 2012)

Então a equação da continuidade é:

$$Q = Av = A_e v_e = A_s v_s \quad (3)$$

Onde:

Q = vazão de ar que atravessa a turbina, nos limites do tubo de vazão [m³/s];

A = área da seção transversal do tubo de vazão do ar que atravessa turbina, antes dela, onde o vento é livre [m²];

v = velocidade do vento livre, antes da turbina [m/s];

A_e = área da seção transversal do tubo de vazão do ar na entrada do rotor da turbina [m²];

v_e = velocidade do vento na seção do tubo de vazão na entrada da turbina [m/s];

A_s = área da seção transversal do tubo de vazão do ar na saída do rotor da turbina [m²];

v_s = velocidade do vento na seção do tubo de vazão na saída da turbina [m/s].

Quando se converte a energia cinética do vento, a turbina provoca a redução da velocidade do vento na saída, resultando em um aumento do diâmetro do tubo de vazões de acordo com a fórmula. Assim a potência do vento extraída pela turbina eólica, é a diferença de potência entre o fluxo de ar na entrada e na saída do rotor, ou: (Lopez, 2012)

$$P_t = P_e - P_s \quad (4)$$

Onde:

P_t = potência extraída do vento pela turbina eólica [W];

P_e = potência disponível do vento na entrada do rotor eólico [W];

P_s = potência disponível do vento na saída do rotor eólico [W].

A potência de uma turbina é:

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (5)$$

Onde:

P_t = potência da turbina eólica [W];

C_p = coeficiente de potência [adimensional];

ρ = massa específica do ar [kg/m³];

A = área varrida pelo rotor da turbina eólica [m²];

v = velocidade do vento que incide na turbina eólica [m/s].

Assim nota-se que a potência fornecida por uma turbina eólica varia diretamente com o cubo da velocidade do vento e com o diâmetro do seu rotor. Para cada tipo de turbina, normalmente o fabricante apresenta na forma gráfica, a curva de potência da turbina. (LOPES, 2012)

Uma pá girando no espaço onde outra já passou, corta um ar perturbado, o que reduz a velocidade do rotor. Porém, com um maior número de pás, maior o torque produzido sobre o eixo do rotor. Então conclui-se que quanto menor for o número de pás, mais rápido o rotor gira.

Como regra geral para a otimização do número de pás em um rotor eólico:

- Para a geração de energia elétrica, necessita-se de alta velocidade, conseqüentemente um baixo torque, sendo requisitado turbinas que contenham poucas pás;
- Para o bombeamento de água e de moinhos, é exatamente o contrário, ou seja, necessita-se de alto torque e baixa velocidade. Então adquire-se turbinas com várias pás.

O rotor com uma pá é possível sua utilização quando é colocado um contrapeso. Para esta situação o movimento do rotor possui irregularidade muito alta, pois a incidência do vento é maior na pá do que no contrapeso. A desvantagem

do seu uso está nas dificuldades de se balancear o sistema, o que produz vibrações e ruídos. (LOPES, 2012)

O rotor que utiliza duas pás é bastante comum, mas não possui estabilidade e emite mais ruídos se comparado com o de três pás. Portanto o rotor com três pás, já é mais utilizado, devido ao fácil balanceamento e maior estabilidade que os anteriores, apresentando menores ruídos e vibrações. (LOPES, 2012)

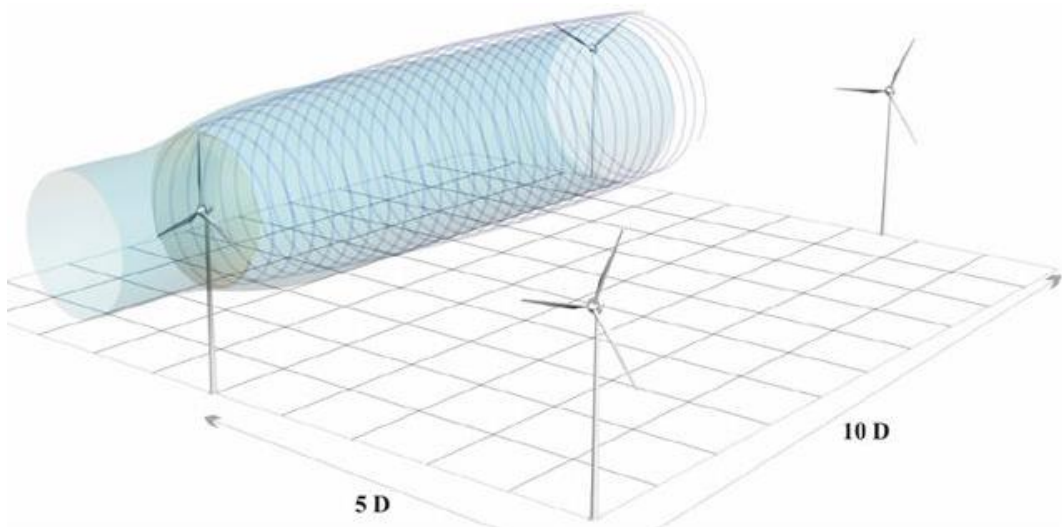
Um parque eólico, nada mais é que um conjunto de aerogeradores que estão dispostos adequadamente em uma mesma área de instalação. A seguir, será visto como alocar as turbinas da melhor forma.

5.1.6 Disposição de turbinas eólicas

Com a instalação das turbinas em locais estratégicos numa área delimitada, a proximidade geográfica tem a vantagem econômica de minimização de custos. Por exemplo, nos arrendamentos de área, fundações, aluguel de guindastes e montagem, bem como equipes de operação, manutenção e estoques de reposição.

Forças de sustentação aerodinâmica nas pás resultam em uma esteira helicoidal de vórtices, que se dissipa gradualmente, com o encontro de massas de ar do escoamento livre. Quando percorrido determinada distância a jusante do rotor, o escoamento praticamente recupera a velocidade original, o que permite a instalação de outras turbinas eólicas. Na Figura 21 percebe-se como funciona esse sistema: (LOPES, 2012)

Figura 21 - Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas.



Fonte: LOPES, 2012

Na prática os fatores que influenciam na distância entre os aerogeradores são:

- Velocidade do vento;
- Condição de operação da turbina;
- Rugosidade de terreno;
- Condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera.

A determinação da disposição das máquinas em um parque eólico, idealmente, requer medições anemométricas específicas, além de levantamentos detalhados dos itens apresentados acima, bem como topografia do terreno e o cálculo do campo de velocidades e interferência aerodinâmica entre todos os rotores. Para otimizar, usualmente envolve o compromisso de maximizar a eficiência e produção energética bem como o aproveitamento do terreno e infraestrutura. (LOPES, 2012)

Nas próximas seções nota-se dois aspectos importantes como rendimento e peso de uma turbina eólica.

5.1.7 Rendimento da turbina eólica

O rendimento máximo de uma turbina teoricamente, dado pelo equacionamento da potência é de 59%. O rendimento de um aerogerador é:

$$\eta = \eta_B \times \eta_A \times \eta_M \times \eta_G \quad (6)$$

Onde:

η_B = eficiência teórica;

η_A = rendimento aerodinâmico (pás);

η_M = rendimento do multiplicador de velocidade (câmbio)

η_G = rendimento do gerador.

5.1.8 Peso da turbina eólica

O aumento progressivo no diâmetro de uma turbina, aumenta significativamente o peso do conjunto. Assim o peso do sistema praticamente fica no topo da torre onde estão o rotor, nacelle – mancais, gerador e sistemas. Podendo ser estimado por:

$$P_t \cong \frac{D^2}{57,8} \quad (7)$$

Onde:

P_t = massa do conjunto no topo da torre [toneladas];

D = diâmetro do rotor da turbina [m].

Com esta aproximação, o peso do sistema no topo da torre é da ordem de 30 toneladas para máquinas de 40 m de diâmetro, e para turbinas com 100 m de diâmetro a ordem é de 170 toneladas. Com esse porte, nota-se que com o crescente mercado, a geração eólica, constitui em uma indústria importante no consumo de aço e resinas para materiais compostos. (LOPES, 2012)

Anteriormente havíamos citado as principais turbinas utilizadas no mundo todo. A frente será visto novas tecnologias nesse segmento.

5.1.9 Novas tecnologias no segmento de turbinas eólicas

O desenvolvimento de projetos nessa área, deverá focar na melhoria da tecnologia que temos hoje. Além do aumento contínuo da capacidade de geração, as pesquisas têm voltado sua atenção para o desenvolvimento dos conceitos fundamentais, sistemas de controle e monitoração inteligente e utilização de locais remotos.

Apesar do futuro da tecnologia não conter uma previsão, onde conceitos de outras áreas serem implementados em projetos futuros, os dispositivos de eletrônica de potência ainda continuarão a influenciar de maneira significativa, no segmento de novas usinas eólicas de grande capacidade. Seguindo essa linha de raciocínio, novos conceitos de geradores, voltados para aplicações específicas deverão ser desenvolvidos, tendo em vista atender às expectativas do mercado. (LOPES, 2012)

A seguir nota-se essas turbinas com atendimento a novas tendências.

5.1.9.1 Turbina eólica de alta altitude MARS

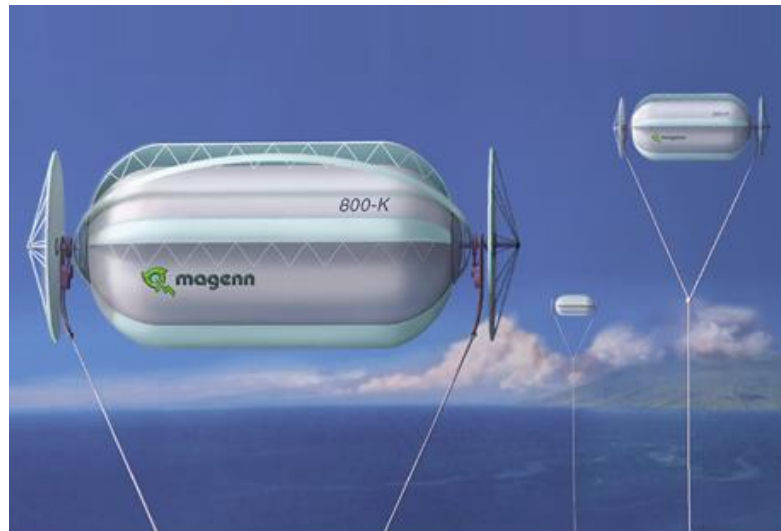
A turbina eólica MARS, é produzida pela Magenn, ela tem como objetivo apresentar vantagens sobre as turbinas convencionais. Essas possibilidades são:

- Maior possibilidade de aplicações;
- Menor custo;
- Melhor performance operacional e;
- Menor impacto ambiental.

Ela é uma turbina mais leve do que o ar que gira sobre um eixo horizontal de vento, gerando energia elétrica. Estacionada a uma altura de 300 m, a energia elétrica é transferida para a estação no solo para uso imediato, armazenando a energia em baterias ou conectando à rede. A MARS é feita com gás hélio e o

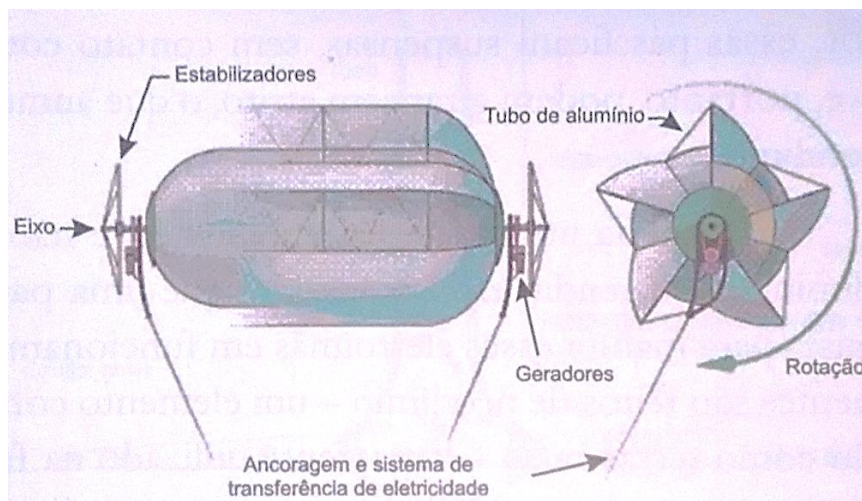
sistema de ancoragem possibilita a fixação e o mapeamento para o controle do tráfego aéreo. A Figura 22 e Figura 23 mostram essa turbina.

Figura 22 - Turbina eólica de alta altitude MARS.



Fonte: HOUGHTON, 2013

Figura 23 - Funcionamento Turbina MARS.



Fonte: LOPES, 2012

Alguns dados feitos em testes (dezembro de 2009) do modelo MARS 100 kW:

- Volume de hélio: 11 700 m³;
- Velocidade do vento de partida: 2,5 m/s;
- Velocidade do vento *cut-in*: 3,0 m/s;
- Velocidade do vento *cut-out*: 24 m/s;
- Velocidade máxima do vento: 30 m/s;

- Tensão de saída: 380V trifásico 50 Hz; 480 V, 600 V trifásicos 60 Hz ou CC regulada;
- Vida útil: 10 a 15 anos.

5.1.9.2 Turbina com levitação magnética

Diferentemente das turbinas convencionais, a MagLev tem como princípio a levitação magnética, que oferece um desempenho maior. As pás verticais da turbina são suspensas no ar acima da base do equipamento. Essas pás ficam suspensas não por rolamentos, nem outras partes mecânicas, o que diminui o atrito ao girar, aumentando o rendimento de forma exponencial. (LOPES, 2012)

Esse modelo utiliza ímãs permanentes, e não eletroímãs, o que evitaria gastos com o desvio de parte da energia gerada para manter o sistema suspenso. Suas vantagens são notáveis, já que um sistema assim possui alto rendimento, menor manutenção devido ao uso de ímãs permanentes, dispensa lubrificação e troca de rolamentos. (LOPES, 2012)

De acordo com a empresa que fabrica essa turbina, ela pode gerar energia elétrica, com brisas de apenas 1,5 m/s de velocidade e suportar vendavais de até 40 m/s, ou 140 km/h. Uma MagLev, com tamanho relativamente maior que as turbinas convencionais, pode gerar 1 GW. Isso é permitido, pois essa turbina pode ser construída em dimensões muito grandes, diferentemente das convencionais. Como a sua manutenção é baixíssima, o fabricante estima que sua vida útil chegue a 500 anos funcionando de forma contínua. Além disso, ela pode gerar 20% mais energia e custo de 50% menor. A Figura 24 mostra o modelo dessa turbina.

Figura 24 - Turbina eólica com levitação magnética.



Fonte: HOUGHTON, 2013

5.1.9.3 Torre térmica solar

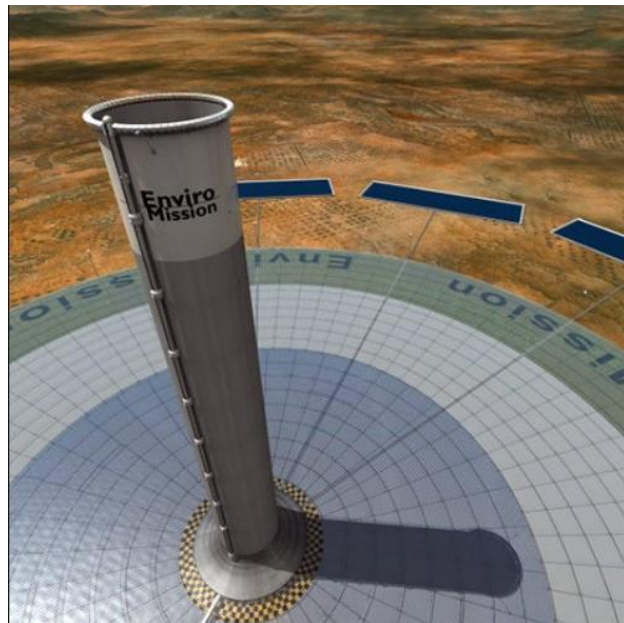
O funcionamento da torre solar, tem seu conceito baseado nos princípios da energia solar fototérmica e eólica. A eficiência é diretamente proporcional à razão entre a altura da torre e a temperatura externa. Na prática, há limitações em relação à altura da torre, pois ela é proporcional às perdas por fricção do fluxo de ar na parte interna da torre. Assim, conclui-se que o material utilizado nas paredes internas da torre se torna um fator crítico. Utiliza-se então, cerâmica vitrificada ou filme plástico. (LOPES, 2012)

Outro fator é a superfície do coletor solar. Sendo que a quantidade de energia térmica tem relação direta com a área do coletor. Portanto, a eficiência da torre depende da diferença em relação à temperatura interna e externa.

Para se obter o máximo de energia do ar quente, as pás da turbina devem cobrir toda a área da seção transversal da torre. A parte que tem maior importância é a torre. Quando ela possui pequenas perdas de fricção, ela se comporta como um tubo de pressão.

A Figura 25 mostra uma torre térmica solar.

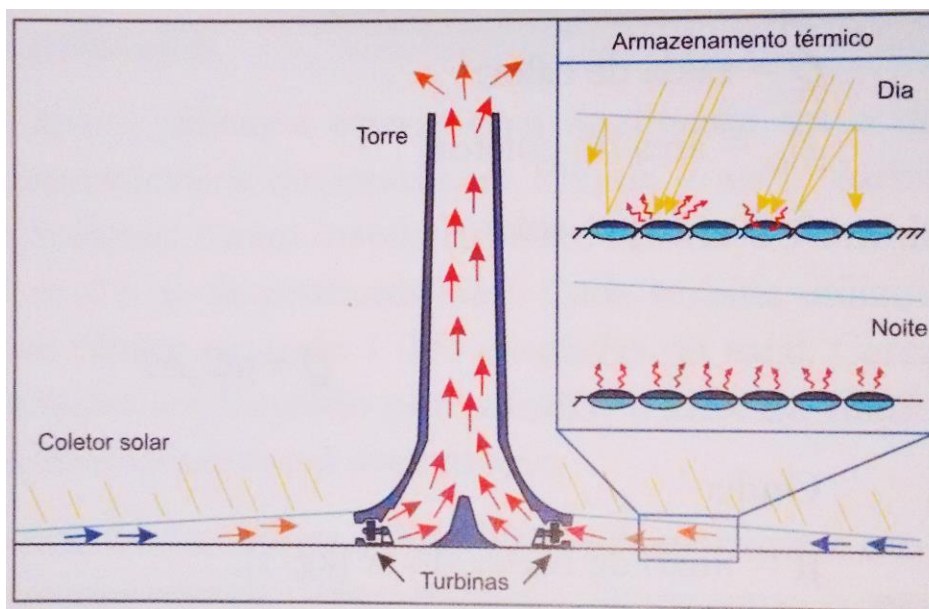
Figura 25 - Torre térmica solar.



Fonte: MARTINEZ, 2011

Já a Figura 26 nos mostra o funcionamento desse tipo de sistema:

Figura 26 - Funcionamento de uma torre térmica solar.



Fonte: LOPES, 2012

Apesar de analisarmos esse sistema como nova tecnologia, essa torre não é um projeto completamente novo, pois um protótipo foi desenvolvido na Espanha em

1982 e funcionou durante sete anos. A partir desse modelo, projetos maiores serão desenvolvidos, e estima-se uma produção de 200 MW. (LOPES, 2012)

A seguir é analisado, o modelo *offshore*, ou seja, turbinas instaladas no mar, próximo às costas marítimas.

5.1.9.4 Turbinas eólicas *offshore*

Comercialmente, o primeiro parque eólico utilizando o sistema *offshore*, foi o de Vindeby. O projeto continha, 11 turbinas do tipo Bonus com potência de 450 kW. Sendo elas instaladas na faixa entre 1,5 km e 3 km da costa. (LOPES, 2012)

As vantagens no uso de geração desse tipo de sistema são: (LOPES, 2012)

- Disponibilidade de grandes áreas abertas;
- Velocidade dos ventos é alta, o que aumenta com a distância da costa;
- Ventos com menor turbulência, aumentando a eficiência das turbinas e menor carga de fadiga;
- Menor altura das torres, pois o vento atua na camada superficial da água.

Já as desvantagens: (LOPES, 2012)

- Em função das fundações marinhas, o custo é mais alto;
- Custo adicional para integrar o sistema de transmissão de energia elétrica;
- Acesso dificultado no que diz respeito a manutenção e operação.

A Figura 27 mostra como é um parque eólico *offshore*.

Figura 27 - Parque eólico *offshore*.



Fonte: CicloVivo, 2011

A medida que se desenvolve as tecnologias em eficiência das turbinas eólicas, o aumento desse sistema, é evidente. Muitos países já possuem parques instalados em funcionamento. A maioria se encontra no Mar do Norte, na Europa. (LOPES, 2012)

Até o ano de 2006, os parques com estrutura mais profunda do tipo monopilar tinham, 20 m de água e mais 15 m solo adentro. Essa estrutura apresenta: (Lopes, 2012)

- Tubo de aço;
- Diâmetro 4,5 m a 5 m;
- Espessura do tubo de 30 a 60 mm;
- Fácil remoção.

Figura 28 - Estrutura monopilar *offshore*.



Fonte: Dillinger Hütte, 2011

Alguns aspectos para outros sistemas de fundação:

- Fundação por gravidade:
 - Comporta estrutura de aço ou concreto;
 - Pode utilizar lastro;
 - Necessita preparação do solo no fundo o mar.
- Estrutura multipilar:
 - Tubos de aço de pequeno diâmetro;
 - Adequada para águas profundas;
 - Difícil remoção.
- Caixa de sucção:
 - Instalação relativamente barata;
 - Fácil remoção;
 - Penetração no solo pelo próprio peso.

As dificuldades em um sistema deste tipo, está no alto custo de aquisição de turbinas e cabeamento submarino. Custos altos envolvendo, fatores naturais, como o difícil acesso, alta salinidade e cargas provenientes de ondas e correntes

marinhas. Todos esses fatores influenciam nos custos de manutenção e controle. (LOPES, 2012)

Apesar, dos preços altos, certos locais apresentam vantagens maiores em relação ao sistema *onshore*, caso da Holanda, Bélgica, Dinamarca, entre outros. Esses países apresentam potenciais a partir de 20 km de distância da costa e menos de 20 m de profundidade. A Agência Internacional de Energia (IEA) aponta que países como o Brasil, China, Japão e os Estados Unidos possuem grandes reservas eólicas do tipo *offshore*, porém com profundidades superiores a 30 m.

A seguir será analisado o segmento completo de um aerogerador.

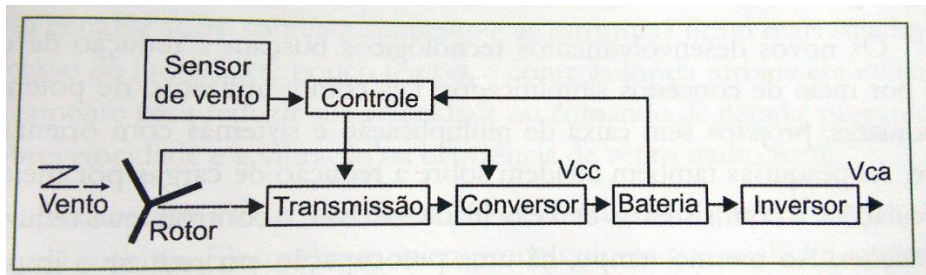
5.2 Aerogeradores

Aerogeradores, são definidos como equipamentos para produção de energia elétrica através da energia cinética contida nos ventos. Os componentes principais envolvidos são: turbina eólica e o gerador. Outros componentes que estão envolvidos são dispositivos e sistemas. (LOPES, 2012)

Através da energia mecânica desenvolvida por uma turbina, é transferida para um gerador e conseqüentemente transforma em energia elétrica. O acoplamento entre o rotor da turbina e o gerador, geralmente são feitos por engrenagens multiplicadoras, devido às diferentes rotações entre rotor da turbina e o gerador. O gerador elétrico pode ser de dois tipos, síncrono ou assíncrono.

A Figura 29 resume em um diagrama básico, os principais componentes envolvidos em um sistema eólico autônomo:

Figura 29 - Diagrama básico de um sistema eólico.



Fonte: LOPES, 2012

O sistema rotor, capta a energia cinética dos ventos, e a converte em energia mecânica no eixo. Os rotores atuais operam com velocidades na faixa de 60 a 100 m/s, independentemente do diâmetro. Então nota-se que as velocidades de rotação são baixas, em torno de 15 a 200 rpm. (LOPES, 2012)

O sistema de transmissão transfere a energia mecânica do eixo do rotor ao eixo do gerador. Para se gerar energia, os geradores precisam de uma velocidade maior, ou seja, rotações típicas de geradores conectados à rede de distribuição como 1800 rpm para 60 Hz de frequência ou 1500 rpm para 50 Hz. Assim o sistema mais usado e eficiente é o de engrenagens, que multiplicam a velocidade angular. (LOPES, 2012)

Para sistemas que utilizam baterias para armazenamento de energia, o gerador mais utilizado é o síncrono associado a um retificador para se obter corrente contínua. Quando o sistema é conectado na rede, os geradores podem ser síncronos ou assíncronos.

O sistema de controle, possui sensores como:

- Sensor de vento;
- Rotação do rotor;
- Carga da bateria;
- Temperatura.

Com todo esse controle, o funcionamento é equilibrado, seguro e maior eficiência com o melhor aproveitamento dos ventos.

O sistema de armazenamento é constituído pela banca de baterias, que armazenam energia nos momentos de maior potência disponível que a carga

necessita, e fornece nos momentos em que a carga exige mais potência do sistema quando este não consegue suprir. (LOPES, 2012)

A seguir será apresentado, os componentes envolvidos em um aerogerador.

Pás: responsáveis pela interação com o vento e convertendo essa energia cinética em mecânica para o rotor. Para turbinas com controle de velocidade por passo, a pá dispõe de rolamentos em sua base, podendo alterar o ângulo de atuação. (LOPES, 2012)

Figura 30 - Vários tipos de pás de turbina eólica em um pátio.



Fonte: DUTRA, 2008

Cubo das pás: é a ponta do eixo da turbina, possui forma de cubo, local onde se fixa as pás, por meio de flanges. Abaixo a imagem mostra um modelo de cubo.

Figura 31 - Modelo de um cubo de pás de uma turbina eólica.



Fonte: DUTRA, 2008

Medidores de vento: montados sobre a nacela, seu objetivo é o de medir a velocidade e a direção do vento. Através de um anemômetro do tipo concha, mede-se a velocidade e a direção através de birutas. Essas medições vão para o sistema de controle monitorando o desempenho do aerogerador. (LOPES, 2012)

Freio: é utilizado quando em situações de emergência, seu sistema pode ser mecânico, elétrico ou hidráulico. Geralmente são em forma de disco. Fabricantes geralmente recomendam que quando não estiver em operação manter os freios acionados. (LOPES, 2012)

Controlador: aciona o sistema quando a velocidade supera 3,6 m/s e desliga quando em 29 m/s. Turbinas de eixo horizontal não podem ser operadas em velocidades acima do limite, pois o gerador sofre sobreaquecimento e a estrutura fica sujeita a fadigas. Atualmente são utilizados microprocessadores para otimizar o sistema. São construídos na nacela e na base da torre no seu interior no painel de controle. (LOPES, 2012)

Figura 32 - Turbina incendiando durante tempestade em North Ayrshire, na Escócia em 2011.



Fonte:

<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=turbina-eolica-explode#.VV4nV_IVhBc>

Engrenagens: é o sistema de transmissão de velocidades, aumentando do eixo lento (30 a 60 rpm), para o eixo rápido (1200 e 1500 rpm). Esse sistema é necessário para que o gerador possa produzir energia elétrica. É um componente pesado e de alto custo. (CRESEB, 2008)

Alguns aerogeradores utilizam o acoplamento direto, operando em baixas rotações. Desenvolvimentos nessa área são importantes, para melhorar a performance e diminuir os gastos. Já que neste caso evitaria o uso de transmissão.

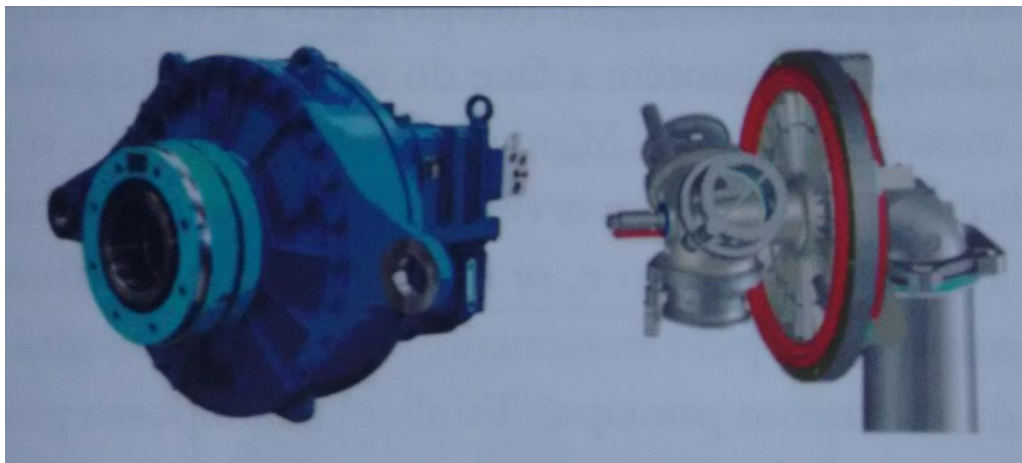
Nas Figuras 33 e 34 temos respectivamente um gerador acoplado em um sistema de transmissão com engrenagens e um sistema de acoplamento direto.

Figura 33 - Gerador conectado à caixa de engrenagens (à direita).



Fonte: DUTRA, 2008

Figura 34 - Acoplamento direto entre turbina e gerador.



Fonte: LOPES, 2012

Unidade hidráulica: com o uso de engrenagens, a necessidade de lubrificação existe. Assim utiliza-se óleos que lubrificam e refrigeram o sistema.

Nacele: é o compartimento que protege todo o conjunto de equipamentos instalados próximo a turbina. Em aerogeradores de grande porte, a nacele contém ferramentas de manutenção e espaço para acesso de operadores.

Passo: giro controlado das pás, para manter a velocidade da turbina controlada.

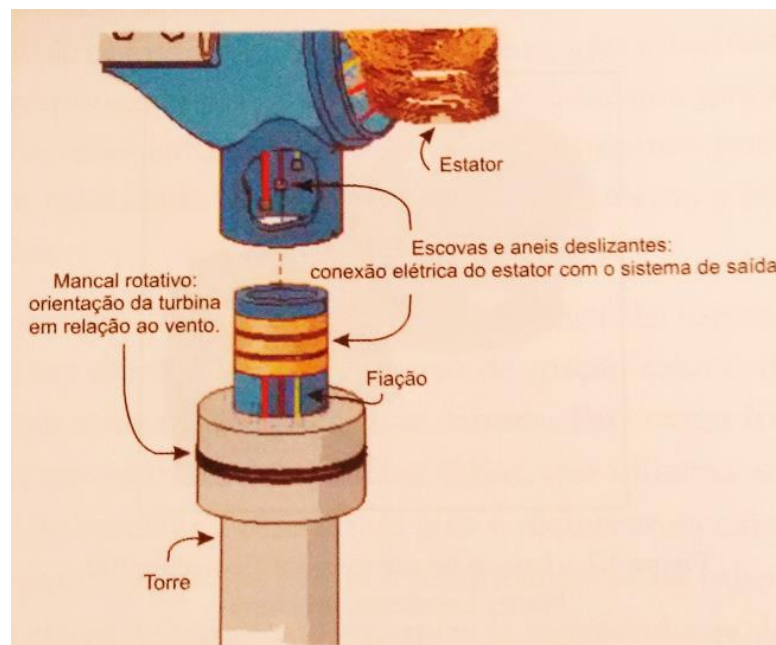
Rotor: composto pelas pás e o cubo, que interligam o sistema de acionamento.

Veleta (sensor de vento): através dele é sabe-se a orientação do vento para que o sistema oriente a turbina.

Dispositivo de orientação (dispositivo yaw): composto por um atuador (*yaw drive*) que mantem a face do rotor em sentido do fluxo dos ventos e um motor. Dispõe de um sistema eletrônico que verifica a direção do vento e quando necessário atua girando a turbina. (LOPES, 2012)

Torre: sua função é a de elevar a turbina do solo até a altura onde o vento possui maior velocidade e onde o desempenho do sistema é melhor. Existem dois tipos: a tubular cônica ou treliçada. (LOPES, 2012)

Figura 35 - Acoplamento elétrico aerogerador e torre.



Fonte: LOPES, 2012

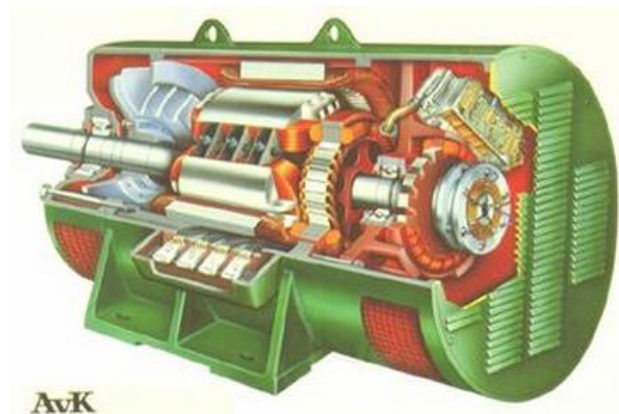
Fundações: estrutura de aço e concreto que sustenta o aerogerador.

Gerador: sistema que produz energia elétrica. Podem ser síncronos ou assíncronos, dependendo do modelo, potência e condições de uso. Necessita também de um conversor de frequência, já que a frequência é diretamente proporcional à velocidade de rotação do rotor. Os conversores utilizam dispositivos de eletrônica de potência que constituem em um retificador (CA em CC) e um inversor (CC em CA), podendo controlar a onda de saída. (LOPES, 2012)

Em alguns modelos de aerogeradores utilizam mais de um gerador, de forma a facilitar a partida do sistema, ou seja, um gerador possui potência maior para trabalhar nas condições nominais, enquanto um de menor potência é utilizado apenas na partida e depois desconectado. (LOPES, 2012)

Nas Figuras 36 e 37 temos respectivamente um gerador convencional e um gerador multipolos em construção:

Figura 36 - Gerador convencional.



Fonte: DUTRA, 2008

Figura 37 - Gerador multipolos.



Fonte: DUTRA, 2008

Transformador: Equipamento utilizado para elevar a tensão de geração para o valor da rede.

A seguir será apresentado aerogeradores funcionando com velocidade variável.

5.2.1 Aerogerador com velocidade variável

Normalmente este tipo de aerogerador é combinado com o sistema de passo. Tendo assim uma faixa extensa de adaptações a diferentes condições de operação.

Para manter a máxima eficiência aerodinâmica, o rotor deve mudar a velocidade de rotação para equivaler a velocidade do vento, ou seja, ventos fracos, rotor em baixas velocidades, ventos fortes, rotor com velocidades altas. (LOPES, 2012)

O aerogerador de velocidade variável possui conversor, gerador síncrono, gerador de indução duplamente alimentado ou, gerador com escorregamento aumentado para casos onde a faixa de velocidade é menor que 10%. (LOPES, 2012)

As vantagens desse tipo de aerogerador são: (LOPES, 2012)

- Maior extração de energia do vento;
- Flutuação mínima de potência;
- Cargas no rotor menores devido à ação das rajadas;
- Taxas de variação de passo pequena;
- Baixa velocidade do rotor, para ventos fracos, reduzindo ruídos.

A desvantagem, em relação ao sistema de velocidade constante, é o custo mais elevado devido ao uso de componentes eletrônicos de potência.

A próxima subseção mostrará os tipos de conexão existentes para os aerogeradores de velocidade variável.

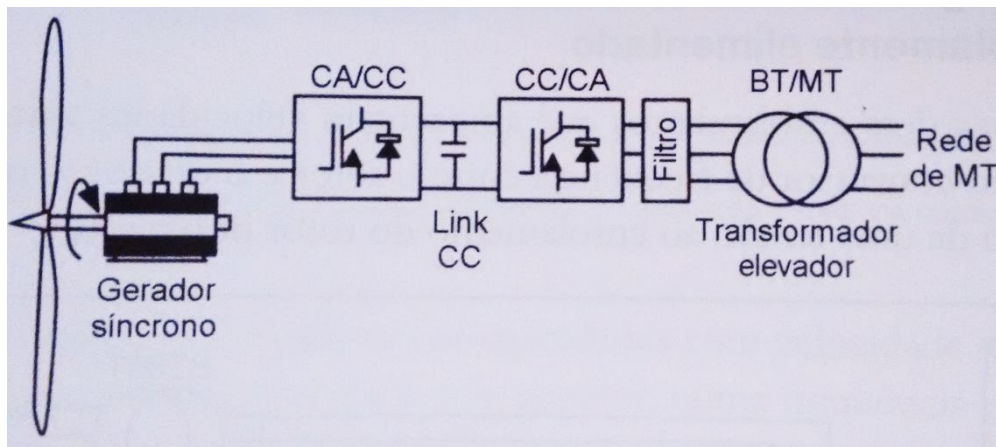
5.2.1.1 Aerogerador com velocidade variável e gerador síncrono

Um conversor de frequência é utilizado para fazer a conexão do gerador com a rede elétrica. O eixo do rotor é conectado diretamente a máquina síncrona, eliminando a transmissão por caixa de engrenagens. (LOPES, 2012)

Já a conexão com o sistema elétrico é feita através de conversores de frequência eletrônicos, formados pelo conjunto retificador/inversor. A tensão gerada é retificada e a corrente contínua resultante deste processo é invertida, onde a frequência de saída é feita por tiristores. Com este sistema, independentemente da variação da velocidade da turbina, o aerogerador enviará a rede a mesma frequência, assim como sua sincronia. (LOPES, 2012)

O sistema anteriormente descrito é amostrado na Figura 38.

Figura 38 - Gerador síncrono conectado à rede via conversor.



Fonte: LOPES, 2012

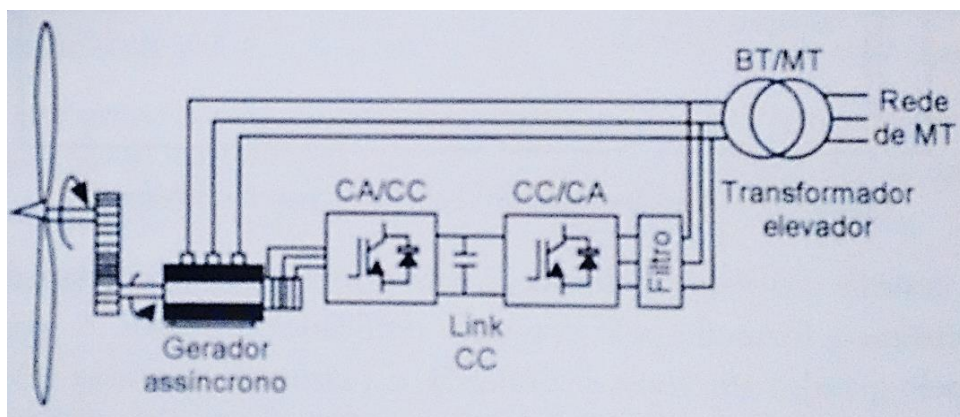
Geradores síncronos têm vantagem em relação aos assíncronos devido ao fácil controle do fator de potência e tensão. Também eliminam a necessidade de engrenagens de transmissão, já que eles podem ser construídos com muitos números de polos, com o estator em anel. Resultado de uma máquina de baixa rotação, o que compatibiliza com as baixas velocidades dos ventos. Essa tecnologia é utilizada em aerogeradores de grande porte. (LOPES, 2012)

5.2.1.2 Aerogerador com velocidade variável e gerador assíncrono duplamente alimentado

Este tipo utiliza dois enrolamentos com velocidades síncronas diferentes. Um conversor de frequência entre o rotor e o estator, permite a aplicação de tensão ao enrolamento do rotor bobinado. (LOPES, 2012)

Pode ser utilizado em sistemas de velocidade variável com controle de passo. A geração de energia se dá tanto para a velocidade de rotação acima quanto abaixo da velocidade síncrona, em função da potência ativa ser absorvida ou injetada no rotor. (LOPES, 2012)

Figura 39 - Gerador assíncrono (de indução) duplamente alimentado.



Fonte: LOPES, 2012

5.2.1.3 Aerogerador com velocidade variável e gerador assíncrono conectado à rede via conversor

Esse aerogerador, necessita de energia reativa para excitar o gerador, sendo feita por capacitores. Sendo estes conectados antes do retificador, pois o conversor de frequência realiza o isolamento galvânico entre o gerador e o sistema, realizando a não absorção de energia reativa externa. (LOPES, 2012)

Utilizada em sistemas com velocidade variável, em razão da tensão produzida pelo gerador, em uma frequência relativa à rotação da turbina, onde é isolada da tensão e frequência da rede pelo conversor. (LOPES, 2012)

A seguir é mostrado outro tipo de sistema de aerogerador, utilizando a velocidade constante.

5.2.2 Aerogerador com velocidade constante

Este sistema é simples, utilizando um gerador assíncrono que é conectado diretamente à rede. Como o sistema elétrico é robusto, a frequência do gerador é mantida, assim o rotor opera com velocidade aproximadamente constante, permitindo o sincronismo. (LOPES, 2012)

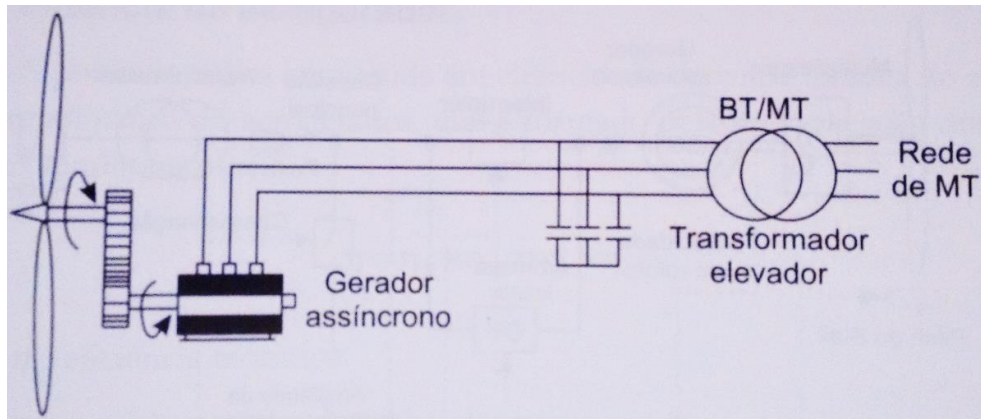
Para melhorar a operação do rotor, pode ser utilizado geradores de indução de dupla velocidade, ou seja, quando operar em velocidade menor, utiliza-se o número de polos maior, enquanto em velocidades maiores, utiliza número menor de polos. (LOPES, 2012)

As vantagens:

- Sistema de controle de velocidade do rotor, não é exigida;
- Regulação simples da velocidade do rotor, sendo feita pela própria rede elétrica;
- Custo menor de projeto.

O sistema é mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Gerador de indução conectado diretamente à rede elétrica.



Fonte: LOPES, 2012

Depois de analisar os tipos de aerogeradores com velocidade variável e constante, vamos ver os sistemas de controle em um aerogerador.

5.2.3 Sistema de controle

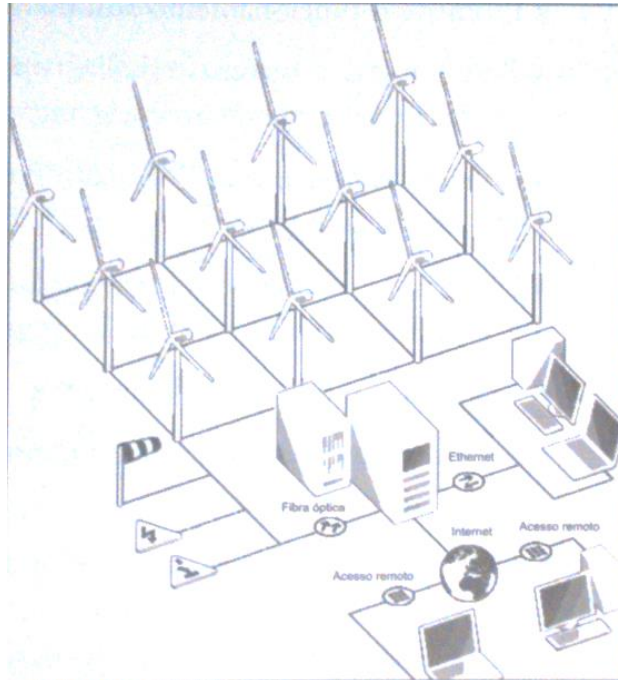
Quando é necessário controlar o passo da hélice, o sistema controlado faz a verificação da potência muitas vezes por segundo. Quando a potência está fora de seus limites, o controlador envia o sinal para o mecanismo de passo, controlando a velocidade para regular a potência automaticamente.

O sistema de controle também atua no sentido de supervisionar e acionar, dispositivos diversos, sejam eles chaves, bombas hidráulicas, válvulas e motores. Ele também realiza comunicação, trocando informações via rádio ou cabeados telefônicos, ou seja, ele informa ao operador ou a uma sala de controle, informações de alarmes, sinalização ou comandos realizados. (LOPES, 2012)

Essa tecnologia pode controlar várias variáveis que são necessárias para um bom desempenho do sistema como um todo. Variáveis essas como: velocidades de rotação, tensão, corrente, temperaturas externa e interna, temperatura do óleo e mancais de transmissão, entre outros. (LOPES, 2012)

A Figura 41 mostra o esquema de como é interligado o sistema de controle nas torres até o monitoramento remoto:

Figura 41 - Esquemático de um sistema de controle em um parque eólico.



Fonte: LOPES, 2012

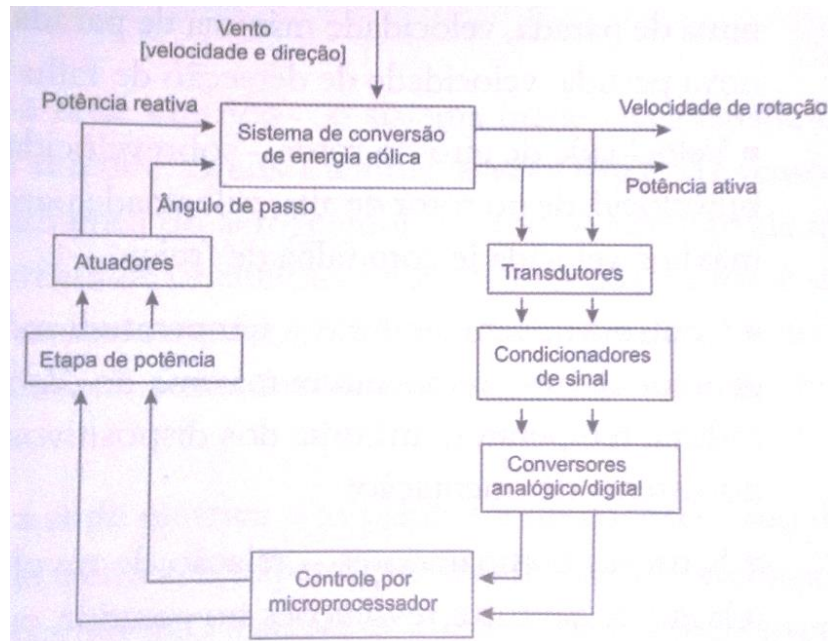
Os principais objetivos são: (LOPES, 2012)

- Promover um funcionamento automático;
- Fazer com que a turbina trabalhe de forma harmoniosa com o fluxo dos ventos;
- Conectar e desconectar o gerador realizar corretamente, partidas e paradas do aerogerador;
- Proteger o sistema de fenômenos excessivos, como alta velocidade, sobreaquecimento, vibração, enrolamento de cabos de interconexão;
- Sinalizar avarias ou mal funcionamento.

Microprocessadores dedicados são os componentes mais utilizados na atualidade para realizar o controle. Com esses dispositivos, é possível a interação de usuários e, se for necessário, realizar modificações em sua programação, além de realizar comunicação, registro de dados, possibilita operação manual e amostragem de dados em tempo real do sistema. (LOPES, 2012)

O sistema tem confiabilidade, pois todos os sinais de medição, possuem isolamento eletromagnético. O sistema é controlado por um CLP (Controlador Lógico Programável), juntamente com um ou mais microprocessadores. Um sistema de controle de um CLP é mostrado na Figura 42.

Figura 42 - Esquemático de um sistema de controle por CLP.



Fonte: LOPES, 2012

As principais etapas que integram um sistema de controle:

- Entrada de controle – conduz os sinais de sensores para o controle central, que os processa e envia ordens de controle mais adequados aos atuadores;
- Sinalização e alarme – caso haja anomalias em locais vitais, é recebido o sinal e ordena com prioridade a parada de emergência do aerogerador, até não haver mais a causa do problema;
- Saída de controle – transmite os sinais elétricos de execução, acionando os atuadores correspondentes.

Vejamos como funciona o sistema de segurança, quando ocorre falhas.

5.2.4 Sistema de segurança

Quando está na iminência de ocorrer, ou ocorre, falhas graves. O sistema de segurança leva o aerogerador para a condição segura de parada. Ele deve ser independente dos outros sistemas e garantir alta confiabilidade.

Os eventos típicos para o acionamento da segurança são: (LOPES, 2012)

- Sobrevelocidade no rotor: limite excedido ao delimitado por software do sistema supervisor;
- Sensor de vibração indicando falha de estrutura;
- Botão de emergência acionado pelo operador;
- Falha no controle principal.

A seguir, o sistema de aterramento de um aerogerador.

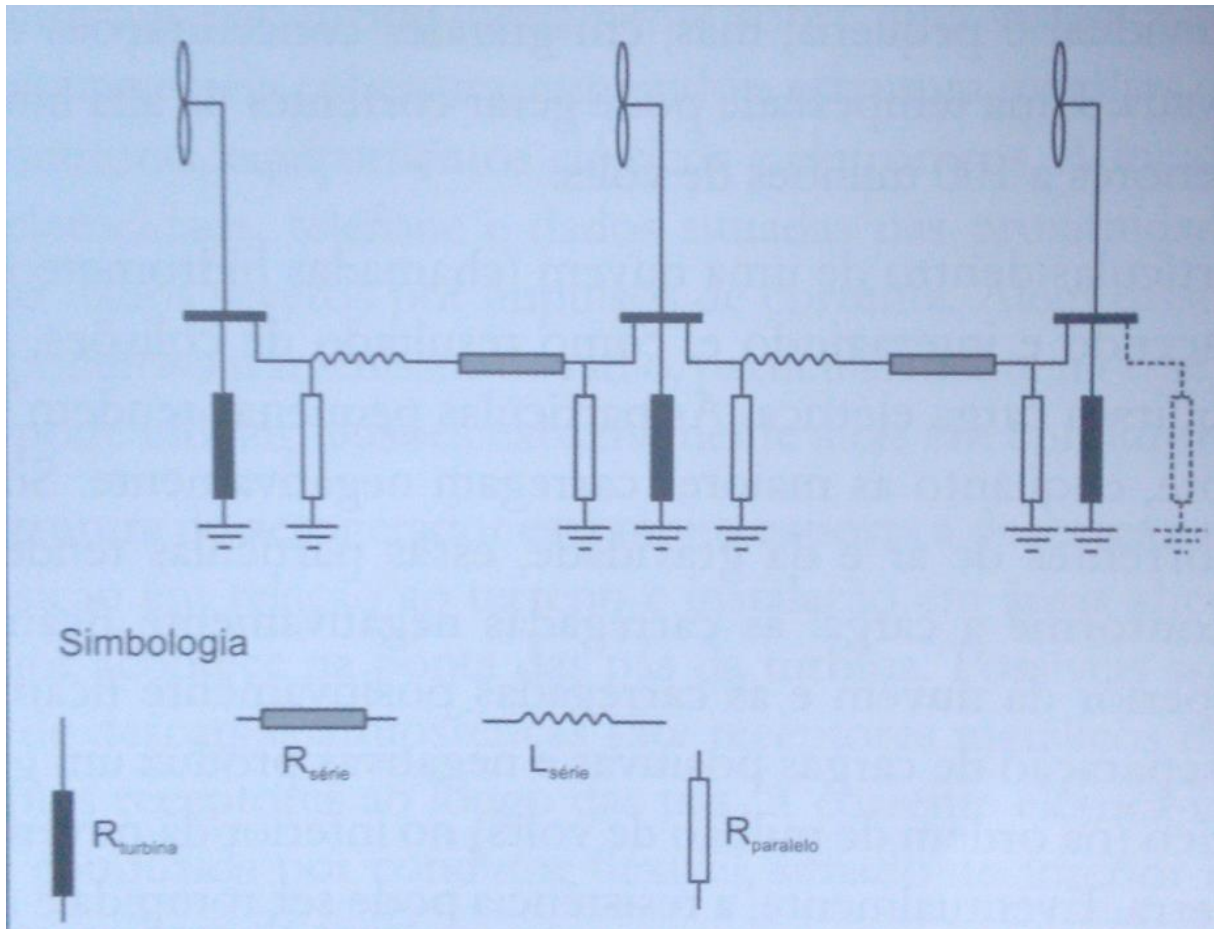
5.2.5 Sistema de aterramento

Assim como qualquer instalação elétrica deve ser aterrada, o aerogerador não é diferente. O Aterramento elétrico é feito para evitar que descargas elétricas vindas da atmosfera, atinjam pessoas ou animais, sendo um caminho mais fácil, ou seja, de baixa impedância, para a corrente elétrica seja descarregada na terra e não nos seres vivos.

Nos sistemas eólicos, algumas precauções devem ser tomadas. Devido à altura das torres e a distância entre elas, a corrente elétrica proveniente de descargas atmosféricas, encontra esse “caminho” mais fácil para percorrer. Em vista dessa situação, a IEEE recomenda que parques eólicos tenham um sistema de aterramento que seja do tipo contínuo, conectando todos os equipamentos por exemplo, subestações, transformadores, torres, aerogeradores, entre outros. (LOPES, 2012)

A Figura 43 mostra como seria um aterramento de um parque com vários aerogeradores.

Figura 43 - Esquemático sistema de aterramento de um parque eólico.



Fonte: LOPES, 2012

Para cada aerogerador deve ser providenciado, um terra local onde se colocará um anel condutor em torno da fundação, com profundidade de 1 m, para inserir hastes verticais no solo. É considerado como bom sistema de aterramento, quando a resistência máxima é de até 10 Ω . Os eletrodos horizontais que interligam cada aerogerador, apresentam comportamento similar às linhas de transmissão, e são representados como circuito equivalente. Para longas redes de aterramento dos parques, a impedância série deve ser levada em conta. (LOPES, 2012)

6 SISTEMA EÓLICO BRASILEIRO

Este capítulo responderá ao questionamento feito no capítulo 3, sobre a viabilidade econômica e a porcentagem correspondente na matriz energética brasileira.

6.1 Potencial de geração de energia elétrica no Brasil

Primeiramente é amostrada na Tabela 4 a matriz energética brasileira, com todos os tipos de geração de energia, verificando o percentual de contribuição de cada usina para o país. O Brasil hoje possui atualmente: (ANEEL, 2015c)

- 4.349 empreendimentos em operação;
- 136.636.862 kW de potência instalada.

A tabela a seguir mostra os empreendimentos que estão em operação:

Tabela 4 - Empreendimentos de geração de energia em operação no Brasil.

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	497	325.711	327.388	0,24
EOL	268	6.012.961	5.908.449	4,32
PCH	476	4.824.588	4.795.162	3,51
UFV	317	19.179	15.179	0,01
UHE	201	87.308.965	84.853.838	62,1
UTE	2.588	40.193.741	38.746.846	28,36
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,46
Total	4.349	140.675.145	136.636.862	100

Fonte: ANEEL, 2015c

Onde, os valores que estão em porcentagem são referentes a potência fiscalizada.

Na Tabela 5 segue a legenda indicando cada tipo de geração da Tabela 4.

Tabela 5 - Legenda tipos de geração.

Legenda	
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
EOL	Central Geradora Eólica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear

Fonte: ANEEL, 2015c

De acordo com a tabela 4, nota-se que a geração eólica em operação compreende a terceira maior contribuição (exceto importações), para a matriz energética brasileira.

Abaixo vê-se com mais detalhes a Tabela 6 com os tipos de combustíveis de cada geração além da importação de outros países na matriz energética:

Tabela 6 - Matriz de energia elétrica.

Fonte			Capacidade Instalada			Total		
Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de Usinas	(KW)	%	Nº de Usinas	(KW)	%
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	388	10.010.550	6,9130	404	10.117.505	6,9868
		Biogás-AGR	2	1.722	0,0011			
		Capim Elefante	3	65.700	0,0453			
		Casca de Arroz	11	39.533	0,0273			
	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	2	4.350	0,0030	2	4.350	0,0030
		Floresta	Carvão Vegetal	7	51.397	0,0354	79	2.305.289
	Gás de Alto Forno - Biomassa		8	109.865	0,0758			
	Licor Negro		17	1.785.102	1,2327			
	Resíduos de Madeira		47	358.925	0,2478			
	Resíduos animais	Biogás - RA	12	2.081	0,0014	12	2.081	0,0014
Resíduos sólidos urbanos	Biogás - RU	10	62.317	0,0430	10	62.317	0,0430	
Eólica	Cinética do vento	Cinética do vento	268	5.908.449	4,0802	268	5.908.449	4,0802
Fóssil	Carvão mineral	Calor de Processo - CM	1	24.400	0,0168	23	3.614.155	2,4958
		Carvão Mineral	13	3.389.465	2,3406			
		Gás de Alto Forno - CM	9	200.290	0,1383			
	Gás natural	Calor de Processo - GN	1	40.000	0,0276	138	12.898.200	8,9071
		Gás Natural	137	12.858.200	8,8795			
	Outros Fósseis	Calor de Processo - OF	1	147.300	0,1017	1	147.300	0,1017
		Petróleo	Gás de Refinaria	7	339.960			
	Óleo Combustível		40	4.091.353	2,8253			
	Óleo Diesel		1856	4.226.408	2,9186			
	Outros Energéticos de Petróleo		16	937.928	0,6477			
Hídrica	Potencial hidráulico	Potencial hidráulico	1174	89.976.389	62,135	1174	89.976.389	62,135
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,3742	2	1.990.000	1,3742
Solar	Radiação solar	Radiação solar	317	15.179	0,0104	317	15.179	0,0104
Importação	Paraguai			5.650.000	3,9017			5,6419
	Argentina			2.250.000	1,5537			
	Venezuela			200.000	0,1381			
	Uruguai			70.000	0,0483			
Total			4349	144.806.863	100	4349	144.806.863	100

Fonte: ANEEL, 2015d

Analisando a Tabela 5, percebe-se que a geração eólica tem menor contribuição do que a energia que é importada. Isso se dá ao fato de que a energia importada tem menor custo em kWh, do que a gerada pelos ventos. Assim ficando a eólica em sexto lugar na contribuição total da matriz.

Visto que o país passa por problemas com oferta de energia, a próxima subseção mostra quais são os incentivos realizados pelo governo brasileiro para amenizar esse problema.

6.2 Incentivos governamentais para o mercado de energia

No ano de 2003, o governo brasileiro, criou o chamado Proinfa (Programa de Incentivo às Fontes alternativas de Energia Elétrica), sendo este considerado o maior programa de incentivo à produção de energia por meio de fontes renováveis, com base na lei nº10.438, de abril de 2002. O programa é gerenciado pela Eletrobrás, responsável pelo investimento na expansão do sistema elétrico nacional. A primeira fase do programa, previa a instalação de uma capacidade total de 3,3 mil MW. (ANEEL, 2008a)

Na primeira fase, do total da potência instalada, 1,2 mil MW seriam gerados por 63 PCHs (pequenas centrais hidrelétricas), 1,4 mil MW, a 54 usinas eólicas e 685 MW, a 27 pequenas usinas utilizando biomassa. (ANEEL, 2008a)

Já a segunda fase ocorreria logo após o término da primeira e encerrada em 2022, sendo que a meta é que três fontes que forem eleitas, tenham participação de 10% na matriz nacional. (ANEEL, 2008a)

A Tabela 7 mostrará como está o quadro de usinas que já estão em operação ou em construção, ou ainda estão em fase de projeto.

Tabela 7 - Resumo da situação atual dos empreendimentos.

Resumo da Situação Atual dos Empreendimentos		
Fonte de Energia	Situação	Potência Associada (kW)
330 empreendimento(s) de fonte Eólica	Construção não iniciada	7.684.304
112 empreendimento(s) de fonte Eólica	Construção	2.952.610
268 empreendimento(s) de fonte Eólica	Operação	5.908.449
26 empreendimento(s) de fonte Fotovoltaica	Construção não iniciada	708.458
317 empreendimento(s) de fonte Fotovoltaica	Operação	15.179
176 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	Construção não iniciada	2.358.412
49 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	Construção	15.697.797
1174 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	Operação	89.976.389
1 empreendimento(s) de fonte Maré	Construção não iniciada	50
133 empreendimento(s) de fonte Termelétrica	Construção não iniciada	8.117.838
24 empreendimento(s) de fonte Termelétrica	Construção	3.068.595
2590 empreendimento(s) de fonte Termelétrica	Operação	40.736.846

Fonte: ANEEL, 2015e

Nota-se então, que o governo tem investido bastante para o crescimento de centrais geradoras, principalmente, das que utilizam como combustíveis as provenientes de fontes renováveis de energia, mas existem parques que estão prontos para gerar energia elétrica, porém estes não estão conectados por linhas de transmissão entre os aerogeradores e as subestações que interligam ao sistema de distribuição de energia, mostrando o descaso do governo em relação aos projetos implantados, como é a situação do parque eólico localizado em Caetité, Bahia, onde a usina ficou pronta no ano de 2012 e até o ano de 2014 não havia gerado nenhum kW de energia.

O Brasil possui 268 usinas eólicas em operação, sendo elas divididas por regiões e estados, através da Tabela 8 nota-se as informações do Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL:

Tabela 8 - Número de usinas por estado brasileiro.

Região	Estado	Nº de usinas
Nordeste	RN	76
	CE	59
	MA	2
	BA	37
	PE	9
	PI	4
	PB	13
	SE	1
Sudeste	MG	1
	RJ	1
	SP	1
Sul	PR	1
	RS	48
	SC	15
TOTAL		268

Fonte: Próprio autor

A potência total é de 5.908.449,03 kW. Portanto, a região nordeste tem predominância no quesito potencial eólico, visto que o maior número de usinas se encontra naquele local. (ANEEL, 2015e)

A viabilidade econômica dessa fonte é analisada na próxima subseção.

6.2.1 Viabilidade econômica

O principal problema em relação a produção de energia elétrica através da eólica, é o seu custo devido ao mercado pouco competitivo e as poucas unidades de desenvolvimento existentes no país, o que torna mais difícil sua implantação.

A busca por eficiência energética ao longo dos anos, se torna indispensável para o desenvolvimento do setor elétrico. Nesse seguimento, o crescimento das fontes alternativas de energia tem mostrado ser um processo lento, porém com os

incentivos governamentais, em uma perspectiva a médio prazo esse desenvolvimento deve ganhar maiores reforços, uma vez que o país tem aumentado a demanda de energia ao longo dos anos.

A MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL (2007), indica alguns valores em investimentos globais no setor de geração para o período entre 2005 e 2030, sendo um valor estimado em US\$ 168 bilhões, onde US\$ 22 bilhões (13%) são destinados as fontes alternativas. A Tabela 9 mostra os custos de investimento na geração de energia elétrica:

Tabela 9 - Custos de investimento referenciais na geração de energia elétrica.

Fonte de Geração	US\$/kW
Hidrelétrica ¹	1.330
Potencial até 60.900 MW ²	1.100
Potencial entre 60.900 E 70.900 MW	1.450
Potencial entre 70.900 E 80.900 MW	1.800
Potencial acima de 80.900 MW	2.500
PCH	1.200
Cogeração a partir da biomassa da cana	900
Centrais eólicas	1.200
Resíduos sólidos urbanos	1.250
Centrais nucleares	2.200
Térmicas a carvão mineral	1.600
Térmicas a gás natural	750
Outras usinas ³	500

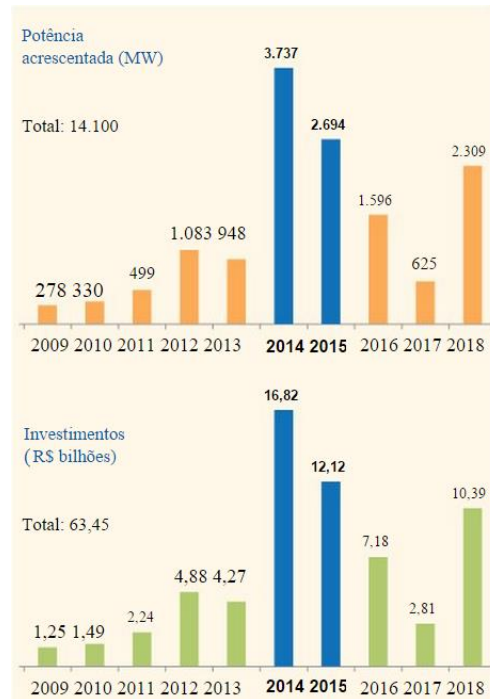
Notas: 1) valor médio, considerando a instalação de 88.200 MW, conforme indicado nos estudos deste PNE; 2) inclui a capacidade indicada nos estudos do plano decenal; 3) instalações nos sistemas isolados remanescentes (predominantemente motores diesel).

Fonte: MME, 2007

Nota-se que o investimento para o futuro energético, utilizando os sistemas alternativos é pequeno.

A Figura 44 faz um comparativo entre a potência acrescentada e os investimentos relativos a esse aumento no período entre 2009 a 2018 para o setor eólico.

Figura 44 - Recursos aplicados e previstos no período de 2009 a 2018.



Fonte: ABEEólica, 2015.

Analisando esses valores, nota-se que o investimento é alto, porém acrescentando pouco na matriz energética nacional.

Deve-se entender que o custo de produção de uma usina eólica tende a ser mais barato, pois ela é dependente apenas do vento, que é um recurso natural. O grande problema se encontra no fator de capacidade de geração que uma turbina possui na atualidade, pois sendo baixo, faz com que o custo médio US\$/MWh se mantenha em valores altos.

Este cenário apenas se tornará diferente quando autoridades governamentais, realizarem investimentos maiores no setor, entendendo que o país possui um potencial eólico de alto nível, tornando o que hoje é chamado de fonte alternativa, para fonte primária de energia.

A medida que esta fonte aumenta sua contribuição na matriz energética, menor seria a preocupação em relação as condições serem ou não favoráveis para se gerar energia elétrica, uma vez que esse sistema é instalado em condições onde os ventos são mais constantes e ajudando a diminuir o uso de centrais termelétricas que fazem o custo de geração de energia se elevar, fazendo com que o governo diminuísse o valor das faturas de energia que os consumidores pagam. Por exemplo, com a energia eólica, as condições de geração seriam mais favoráveis na

maior parte do tempo, evitando o pagamento de tributos a mais devido a bandeira vermelha, do grupo de bandeiras tarifárias.

O próximo capítulo finaliza este trabalho com as considerações finais.

7 CONCLUSÃO

7.1 Considerações finais

O sistema eólico apresenta muitas vantagens, como, alta disponibilidade, independência de importações, custo inexistente para obtenção de suprimento, afinal os ventos são recursos naturais e os impactos ambientais são extremamente pequenos. O único parâmetro que desafia o uso desse sistema é o custo de implantação que é alto, devido à falta de concorrência no mercado brasileiro, o que influencia no preço do MWh. Porém com os incentivos governamentais, criando projetos de lei que incentivam a instalação de pequenas centrais geradoras ajudando na diminuição dos custos com consumo de energia e menor injeção de gases poluentes. Além de existirem projetos de lei que obrigam as concessionárias distribuidoras de energia a comprar quantidades de energia elétrica para incentivar o crescimento do setor. Dessa forma a matriz energética brasileira incrementa cada vez mais fontes renováveis, contribuindo para aumentar a qualidade de vida e desenvolver tecnologias sustentáveis e em um futuro próximo, diminuir a utilização de centrais termelétricas e cooperar com as hidrelétricas, diminuindo os gastos com tarifas de energia nos tempos em que os recursos hídricos, por exemplo, estiverem escassos. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias e o aumento de usinas eólicas são fundamentais para uma melhor estrutura de oferta de energia bem como evitar a emissão de poluentes para a atmosfera, cuidando do planeta e oferecendo para as próximas gerações, condições de sobrevivência e disponibilidade de recursos a serem utilizados em benefício próprio.

Portanto os geradores de energia utilizando a conversão da energia eólica para elétrica serão considerados fontes que um dia deixarão de ser tratadas como alternativa, para se tornarem fontes primárias de energia.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para estudantes que se interessarem nesta área de geração eólica, sugere-se que busque conhecimento sobre dados específicos de cada fabricante de turbinas e geradores, também dispositivos eletrônicos de potência além dos sistemas supervisórios e de controle. Estudar modelamentos de geradores bem como os vários tipos de conexões à rede para que possa ser realizado um maior número de casos fazendo com que as simulações se aproximem do sistema real, assim sendo melhor analisado e desenvolvido, refinando situações, por exemplo, de curto circuito do tipo simétrico ou assimétrico no sistema elétrico de potência, aterramento do sistema e disposição dos aerogeradores no parque eólico. Analisando o comportamento da geração eólica na qualidade da energia entregue a rede.

8 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. Ed. Brasília, DF, 2008.

_____. **Bandeiras tarifárias**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=758> > Acesso em: 07 abr. 2015a

_____. **BIG – Banco de Informações de Geração**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 25 mai. 2015c

_____. **Matriz de energia elétrica**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>> Acesso em: 25 mai. 2015d

_____. **Matriz energética do Brasil**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=7&ger=Combustivel&principal=E%F3lica>> Acesso em: 25 mai. 2015e

_____. **Resolução Normativa n° 482**. Disponível em: <

<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> > Acesso em 09 abr. 2015b

BRASIL. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia – IPAM. **O que é o efeito estufa?** [s. d.] Disponível em: < <http://www.ipam.org.br/saiba-mais/abc/mudancaspergunta/O-que-e-o-efeito-estufa-/9/1>> Acesso em: 11 mai. 2015.

_____. - ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica) 2015. Disponível em:

< <http://www.portalabeeolica.org.br/>> Acesso em: 01 jul. 2015

_____. - Blog do Planalto Presidência da República. **Parque eólico aumenta arrecadação, geração de empregos e turismo no extremo sul gaúcho**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://blog.planalto.gov.br/assunto/parque-eolico-geribatu/>> Acesso em: 26 mai. 2015

_____. – MME (Ministério de Minas e Energia). **MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL 2030**. Brasília, 2007. 254p.

_____. - MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Energia eólica**. [s. d.]. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica>> Acesso em: 22 abr. 2015

_____. - Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. **Submódulo 3.6 –**

Requisitos técnicos mínimos para conexão à rede básica. 2009. Disponível em: <http://www.ons.com.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_3/Submodulo%203.6_Rev_1.0.pdf> Acesso em: 29 mai. 2015

AMARANTE, O. A. C. **Atlas eólico: Minas Gerais**. Belo Horizonte, MG. 2010

Asociación danesa de la industria eólica. **Pioneros de la energía eólica: el aerogenerador de Gedser**. 2003. Disponível em:

<http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/pictures/juul.htm>

Acesso em: 18 mai. 2015

_____. **Aerogeneradores multimegavattios**. 2003. Disponível em:

<http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/pictures/multimeg.htm> Acesso em: 18 mai. 2015

Carção, J. F.C. **Tarifas de energia elétrica no Brasil**. São Paulo, 2011. Dissertação (mestrado em engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-31102011-121410/publico/Dissertacao_Joao_Francisco_de_C_Carcao.pdf> Acesso em: 23 abr. 2015

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais (Brasil). **Bandeiras Tarifárias**.

Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/Bandeiras_tarif%C3%A1rias.aspx>

Acesso em: 25 abr. 2015

CicloVivo. **Europa eleva produção de energia limpa em 51%**. 2011. Disponível em:

<http://www.ciclovivo.com.br/noticia/europa_eleva_producao_de_energia_limpa_em_51>. Acesso em: 18 mai. 2015

Dillinger Hütte. **Dillinger Hütte investing in offshore Wind**. 2011. Disponível em: <<http://www.dillinger.de/dh/aktuelles/presse/00028561/index.shtml.en>>. Acesso em: 18 mai. 2015

DUTRA, R. M. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias** (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, Rio de Janeiro, 2008). Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2015

GESEL – GRUPO DE ESTUDOS DO SETOR ELÉTRICO (Brasil). **Os custos da energia eólica brasileira**. Rio de Janeiro, 2009

GWEC, **Global Wind Statistics 2014**. 2015. Disponível em:

<http://www.gwec.net/wpcontent/uploads/2015/02/GWEC_GlobalWindStats2014_FINAL_10.2.2015.pdf> Acesso em 01 jul. 2015.

HOUGHTON, C. **A journey through the evolution of the most spectacular wind turbines designs in the world**. 2013. Disponível em:

<<http://www.mywindpowersystem.com/2013/12/26/the-most-amazing-wind-turbines-designs/#sthash.m9u6nYWY.dpuf>> Acesso em: 18 mai. 2015

- LAYTON, Julia. **Como funciona a energia eólica**. Traduzido por HowStuffWorks Brasil. 2011. Disponível em: <http://www.fiec.org.br/artigos/energia/energia_eolica.htm > Acesso em: 5 mai. 2015
- LOPES, R. A. **Energia eólica**. 2. Ed. São Paulo, Artliber, 2012
- MARQUES, J. **Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. 2004. Dissertação (mestrado engenharia elétrica). Universidade de Santa Maria, RS. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_arquivos/7/TDE-2008-01-04T185458Z-1224/Publico/JEFERSON%20MARQUES.pdf >. Acesso em: 18 mai. 2015
- MARTINEZ, A. **Torre solar, una nueva tecnologia solar térmica**. 2011. Disponível em: < <http://desenchufados.net/torre-solar-una-nueva-tecnologia-solar-termica/>> Acesso em: 18 mai. 2015
- NASS, D. P. **O conceito de poluição**. 2002. Artigo científico. (curso de química) – Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art_13/poluicao.html> Acesso em: 11 mai. 2015.
- OLIVEIRA, K. L. M. **Projeto Básico de um parque eólico e estudos de conexão**. Juiz de Fora, 2014. Monografia (Bacharelado engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia – Universidade de Juiz de Fora.
- PICOLO, A. P., A. J. Rühler, G. A. Rampinelli. **Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica**. 2014. Revista brasileira de ensino de física. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172014000400007&script=sci_arttext#fig12 > Acesso em: 18 mai. 2015.
- REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. 2. Ed. Barueri, SP, Manole, 2011.
- SALINO, P. J. **Energia eólica no Brasil: uma comparação do PROINFA e dos novos leilões**. 2011. 110 p. Projeto de graduação (graduação engenharia ambiental) – UFRJ/ Escola Politécnica. 2011.