



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Perspectiva do Mercado Brasileiro no Setor de Energia Eólica

Autor: Caroline Borges Agustini

Orientador: Nilson Romeu Marcilio

Co-Orientador: Luiz Elody Sobreiro

Porto Alegre, janeiro de 13

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas	vii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Histórico da Energia Eólica no Mundo	3
2.1.1 A Exploração Offshore	4
2.2 Histórico da Energia Eólica no Brasil	6
2.3 Impactos Socioambientais da Energia Eólica	8
2.3.1 Aspectos Negativos	8
2.3.2 Aspectos Positivos	9
2.4 Aerogeradores	11
2.5 Influência do Terreno	13
2.5.1 Velocidade do vento com relação à altura	13
2.5.2 Rugosidade do terreno	14
3 Resultados	16
3.1 Potencial Eólico Brasileiro	16
3.2 Mercado Atual e Posicionamento do Setor de Energia Eólica Brasileiro	18
3.3 Perspectivas Futuras de Mercado para o Setor de Energia Eólica Brasileiro	19
3.3.1 Métrica dos Próximos Anos para a Energia Eólica	20
3.3.2 Materiais para a Construção dos Aerogeradores	22
3.3.3 Rumo do Mercado Eólico Brasileiro	23
4 Conclusões e Trabalhos Futuros	25
5 Referências	26

Agradecimentos

Agradeço à UFRGS, ao DEQUI e a todos os seus professores, pelo ensino de excelência.

Ao meu orientador, Nilson Romeu Marcílio, pelo incentivo e orientação prestada durante toda a execução deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Luiz Elody Sobreiro, pelo conhecimento e dedicação que tornaram possível a realização deste estudo.

A toda minha querida família, especialmente aos meus pais, Nilcem e José Roberto, que me apoiaram e me incentivaram a vida inteira.

Aos meus colegas de faculdade, em especial, Camila Pilatti, Camila Ribeiro, Carolina Chaves, Luciano Knevez, Mirian Tedesco, Ana Emília Poersch e Débora Jaeschke pelo companheirismo ao longo desses cinco anos de faculdade. A partir de agora não serão mais colegas, mas sim grandes amigos, que vou levar pro resto da vida.

A todos os meus amigos, em especial, às minhas amigas de infância e melhores amigas, Raquel Rapach, Thaís Barcarolo, Rochelle Maciel, Caroline Machado, Caroline Fialho, Bruna Gerstner e Ingrid Lopes, pela amizade e dedicação. Não só nessa etapa da minha vida, como em todas as demais, cada uma foi essencial e especial.

E por fim, agradeço à pessoa mais importante da minha vida, ao meu namorado, Jader, simplesmente por existir.

Resumo

A energia eólica é uma das fontes renováveis que menos causa impactos ambientais. Ela apresenta potencial para se desenvolver, devido à busca do governo por fontes alternativas para garantir a segurança energética do país. Com programas de incentivo do governo, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), por exemplo, ela tem ganhado cada vez mais espaço, de forma a ficar cada vez mais competitiva. É nesse novo cenário que esse trabalho se insere, com o objetivo de avaliar as perspectivas de mercado dessa fonte no Brasil. Para tal, fez-se uma revisão bibliográfica da história da energia eólica no país e no mundo, suas formas de instalação, impactos ambientais favoráveis e desfavoráveis, principais constituintes e materiais dos aerogeradores e influência do terreno de instalação do parque, para, a partir disso, analisar o potencial eólico brasileiro, o posicionamento do setor eólico na matriz energética brasileira e traçar um rumo para o mercado de energia eólica no Brasil. Concluiu-se que mesmo que a matriz elétrica brasileira seja dominada pela fonte hidrelétrica, a dificuldade de licenciamento ambiental dessa fonte impulsionou o desenvolvimento de fontes menos desenvolvidas, que hoje são competitivas. Além disso, mesmo com o alto custo de instalação de um parque eólico, que tende a diminuir, devido ao BNDES somente conceder benefícios aos produtores de aerogeradores com operações em território brasileiro, a fonte eólica, dentre as fontes renováveis, é a que tem melhores perspectivas no país devido à sua complementaridade com a energia hidrelétrica.

Lista de Figuras

Figura 1. Moinho de vento construído por Charles Bruch, em 1888, em Cleveland, Ohio...3	
Figura 2. Parque eólico <i>offshore</i> de Horns Ver, na Dinamarca.5	
Figura 3. Estimativa de mortes anuais de pássaros.9	
Figura 4. Complementaridade sazonal entre os ventos e as vazões hídricas.....10	
Figura 5. Principais componentes de um aerogerador.11	
Figura 6. Evolução da potência e tamanho dos aerogeradores comerciais.13	
Figura 7. Camada limite atmosférica.14	
Figura 8. Variação da direção do vento dentro da camada limite em função da altura, no hemisfério Sul.14	
Figura 9. Potencial Eólico Estimado por região para vento médio igual ou superior a 7 m/s.16	
Figura 10. Potência instalada de geração de energia elétrica no Brasil.18	
Figura 11. Evolução da geração eólica total no Brasil entre os anos de 2000 e 2009.19	
Figura 12. Projeção de Instalação de Aerogeradores.....20	
Figura 13. População no Censo Demográfico segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação – 2010.....24	

Lista de Tabelas

Tabela 1. Capacidade eólica mundial instalada por região.	4
Tabela 2. Principais Países com Exploração Offshore.	5
Tabela 3. Valores econômicos do PROINFA 1ª Fase (base: Março de 2004).....	7
Tabela 4. Histórico dos projetos do PROINFA.	8
Tabela 5. Classificação da superfície quanto à rugosidade.	15
Tabela 6. Potência eólica instalada no Brasil por estado.	17
Tabela 7. Previsão de instalação de energia eólica no Brasil.....	21
Tabela 8. Evolução da Capacidade Instalada.	21
Tabela 9. Principais fabricantes em atuação no Brasil.	22

Lista de Abreviaturas e Siglas

AGDI	Agência Gaúcha de Desenvolvimento e Promoção do Investimento
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COELCE	Companhia Energética do Ceará
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CRESESB	Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
ELETRONBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras
FCR	Fator de Capacidade de Referência
GWEC	Global Wind Energy Council
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SDPI	Secretaria de Desenvolvimento e Promoção do Investimento
SEMC	Secretaria de Energia, Minas e Comunicação

1 Introdução

Diante da crescente importância das fontes renováveis de energia, devido às altas taxas de poluição e sérios impactos ambientais causados pelas fontes tradicionais, vários países vêm investindo na complementação e transformação de sua matriz energética, através de políticas públicas para o incentivo das mesmas. A Europa, por exemplo, além de sua fonte nuclear bastante desenvolvida, investe hoje na implantação de parques eólicos em alto-mar, para firmar cada vez mais seu compromisso com as fontes renováveis.

O Brasil, por sua vez, é um país privilegiado nesse aspecto, pois sempre teve uma matriz energética renovável muito expressiva. Só a fonte hidrelétrica representa mais de 70% da matriz energética brasileira, sendo esse o principal motivo para a tardia entrada do país no mercado de outras energias renováveis, como a energia eólica.

A complexidade do licenciamento ambiental das hidrelétricas tem influência na escassa oferta de concessões dessas usinas pelo governo, por isso manter esse alto índice de fontes renováveis na matriz energética apenas com a fonte hidrelétrica tem se tornado uma tarefa difícil.

A fonte eólica tem então se tornado atrativa, dentre as demais fontes renováveis de baixo impacto ambiental, devido, principalmente, a segurança proporcionada por esse sistema, tanto no quesito de suprimento energético quanto na integridade da população que vive próxima aos parques, havendo raros casos de pessoas feridas por pedaços caídos de pás. Além disso, os impactos ambientais da geração eólica como, por exemplo, impacto visual, ruído dos aerogeradores e interferência na fauna devido às colisões de pássaros com os aerogeradores, são poucos e contornáveis, principalmente, através da adequação da localização dos parques.

Na busca da expansão da fonte eólica na matriz energética nacional, o governo estabeleceu algumas ações visando o desenvolvimento dessa tecnologia, tais como internalização de tecnologia e consolidação da indústria eólica nacional de fornecimento de componentes e montagem, aprimoramento da legislação, do conhecimento dessa fonte e da sua interação energética com os parques geradores base hidráulica.

Ainda que essas iniciativas de aproveitamento da energia eólica tenham sido implantadas no país, a capacidade instalada em aproveitamentos eólicos ainda era muito reduzida, quando comparada com seu potencial. No sentido de ampliar esse potencial, foi criado, em 2002, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e gerenciado pela Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS). Esse programa se fundamentou em um sistema de tarifas de aquisição, visando atrair investimentos para as fontes renováveis e diversificar a matriz energética brasileira, objetivando uma maior segurança de suprimento.

Devido ao PROINFA, a fonte eólica tem ganhado lugar no setor energético do país na última década. Entretanto, alguns argumentos desfavoráveis, como custo inicial alto e desconhecimento da tecnologia, tornando a mão-de-obra especializada escassa, têm freado o avanço dessa tecnologia.

É nesse contexto que esse trabalho se insere, através de uma análise da situação da energia eólica no país, dentro desse novo cenário energético que o país se encontra, para dar uma perspectiva do mercado da fonte eólica no Brasil.

Para tanto, o estudo se dividiu em uma revisão bibliográfica da história da energia eólica no país e no mundo, formas de instalação, impactos ambientais favoráveis e desfavoráveis, principais constituintes e materiais dos aerogeradores e influência do terreno de instalação do parque, para, a partir desses dados, analisar de forma criteriosa o potencial eólico brasileiro e o posicionamento do setor eólico na matriz energética brasileira e, por fim, traçar um rumo para o mercado de energia eólica no Brasil.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Histórico da Energia Eólica no Mundo

Embora sem documentos comprobatórios, acredita-se que, há pelo menos 5.000 anos, a energia eólica começou a ser utilizada pelos egípcios e fenícios para a movimentação de barcos e velas (BANDEIRA JUNIOR, 2010). Com o desenvolvimento da agricultura, surgiu a necessidade de ferramentas que substituíssem o esforço humano e animal para a realização de atividades como moagem de grãos e bombeamento de água (SALINO, 2011). Os primeiros registros históricos da utilização de cata-ventos de eixo vertical datam de 1.700 AC, na Mesopotâmia, para fins de irrigação (CARVALHO, 2003).

No retorno das Cruzadas, no início da Idade Contemporânea, século XI, a tecnologia dos cata-ventos foi então levada à Europa, e influenciou a economia agrícola europeia por vários séculos. No século XII, essa fonte de energia já estava disseminada na Inglaterra, França e Holanda, especialmente (BANDEIRA JUNIOR, 2010).

Somente no início do século XIX que a energia eólica foi utilizada para a geração de energia elétrica. O primeiro cata-vento com essa finalidade, mostrado na Figura 1, foi erguido por Charles Brush, em 1888, na cidade de Cleveland, Ohio. Ele fornecia 12 kW em corrente contínua para o carregamento de baterias que, por sua vez, forneciam energia para lâmpadas incandescentes (SALINO, 2011).

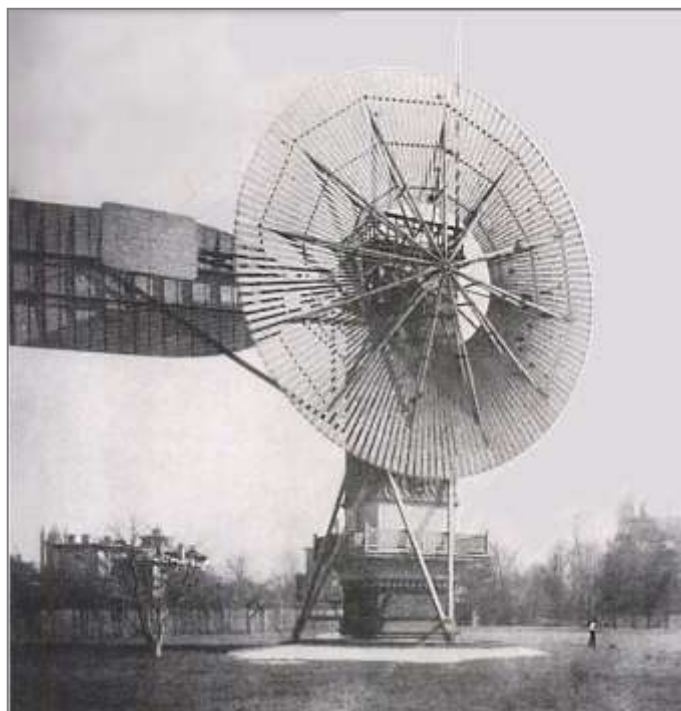


Figura 1. Moinho de vento construído por Charles Brush, em 1888, em Cleveland, Ohio.
Fonte: MARQUES (2004).

Segundo Salino (2011), durante a Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945), os países realizaram grandes esforços para economizar combustíveis fósseis, o que contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte. Entretanto, após o fim da guerra, a tecnologia de geração eólica ainda não era economicamente competitiva se comparada aos combustíveis fósseis e usinas hidrelétricas, o que levou ao seu abandono para fins comerciais.

Na década de 70, entretanto, com a crise do petróleo, vários países precisaram procurar fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, o que impulsionou o desenvolvimento das tecnologias de geração eólica já existentes, aumentando a produção e diminuindo os custos (BANDEIRA JUNIOR, 2010). Em 1976, foi instalada na Dinamarca a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública (ALMEIDA e SILVA, 2011).

Em 2011, foram instalados 40,5 GW em todo o mundo, representando um investimento de US\$68 bilhões, totalizando 238 GW de capacidade mundial instalada (GWEC, 2011).

A China e a Índia têm sido os principais motores do crescimento global nos últimos anos, e em 2011 representaram juntas 50% do mercado global de energia eólica. Na Europa, os principais países que tiveram um crescimento significativo nos últimos anos foram Romênia, Polônia, Turquia e Alemanha, refletindo o compromisso da Europa com energias renováveis em detrimento da fonte nuclear. Na América Latina, o Brasil e o México são as principais potências que investem em energia eólica e são os mercados com maiores índices de crescimento do hemisfério ocidental (GWEC, 2011).

A distribuição regional da capacidade eólica mundial instalada em 2010 e 2011, assim como a quantidade de energia eólica instalada em 2011 são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Capacidade eólica mundial instalada por região.

Região	Total 2010 (MW)	Instalado em 2011 (MW)	Total 2011 (MW)
África e Oriente Médio	1.065	28	1.093
Ásia	61.107	20.922	82.029
Europa	86.647	9.961	96.608
América Latina e Caribe	1.477	853	2.330
América do Norte	44.825	7.928	52.753
Região do Pacífico	2.516	343	2.859

Fonte: GWEC (2011).

2.1.1 A Exploração Offshore

A exploração *offshore*, ou seja, a instalação de parques eólicos no mar, é uma alternativa quando não se tem mais espaço em terra. As principais vantagens desse tipo de instalação são ventos de maior intensidade e menor turbulência, maior disponibilidade de espaço e torres menores devido à menor rugosidade do local. As principais desvantagens são custos adicionais para a fundação marinha, gastos de conexão com a rede elétrica e acesso limitado para operação e manutenção (OLIVEIRA, 2011).

Segundo Oliveira (2011), até o final de 2009, parques eólicos instalados no mar eram encontrados em doze países onde dez deles estão na Europa e algumas instalações menores na China e Japão. A Tabela 2 mostra a capacidade instalada nos anos de 2008 e 2009 dos principais países com exploração *offshore*, bem como a quantidade adicionada em 2009 e a taxa de crescimento entre estes dois anos.

Tabela 2. Principais Países com Exploração Offshore.

País	Capacidade Instalada em 2008 (MW)	Capacidade Adicionada em 2009 (MW)	Capacidade Instalada em 2009 (MW)	Taxa de Crescimento 2008 – 2009 (%)
Reino Unido	574,0	104,0	678,0	18,1
Dinamarca	426,6	237,0	663,6	55,6
Holanda	247,0	0	247,0	0
Suécia	134,0	30,0	164,0	22,4
Alemanha	12,0	60,0	72,0	500,0
Bélgica	30,0	0	30,0	0
Finlândia	30,0	0	30,0	0
Irlanda	25,0	0	25,0	0
China	2,0	21,0	23,0	1.050,0
Espanha	10,0	0	10,0	0
Noruega	0	2,3	2,3	0
Japão	1,0	0	1,0	0
Total	1.491,6	454,3	1.945,9	30,5

Fonte: OLIVEIRA (2011).

A exploração *offshore* se destaca na Europa devido à falta de espaço para implantação de grandes parques eólicos no continente e à disponibilidade de águas rasas em sua costa (OLIVEIRA, 2011). A Figura 2 mostra o parque eólico *offshore* de Horns Ver, na Dinamarca, com 160 MW instalados, inaugurado em 1997 devido ao apoio governamental sócio-democrata do país (VITERBO, 2008).



Figura 2. Parque eólico *offshore* de Horns Ver, na Dinamarca.
Fonte: VITERBO (2008).

2.2 Histórico da Energia Eólica no Brasil

Desde o descobrimento do Brasil (1500) até o surgimento de máquinas a vapor, a Europa já utilizava largamente moinhos de vento para diversas tarefas mecânicas. Essa utilização foi mais tardia no Brasil, devido ao seu modelo de colonização, baseado na mão-de-obra escrava, como também o grande potencial existente nos rios, que inibiram o avanço dessa tecnologia no país (ROCHA *et al.*, 2003).

Segundo Marques (2004), os primeiros relatos do uso da energia eólica no Brasil datam do final do século XIX, com a utilização de moinhos de vento para o bombeamento de água em sistemas isolados e de pequena escala.

Somente em 1976 houve os primeiros estudos visando o domínio da tecnologia eólica nos laboratórios do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), devido à crise do petróleo, ocorrida três anos antes. Como resultado, em 1979 foi construído o primeiro aerogerador no Brasil que operou por nove meses no campo de testes no Rio Grande do Norte. Até 1983, foram construídos ao todo 15 protótipos, porém as atividades do CTA foram encerradas por motivos de diretrizes internas (CARVALHO, 2003).

Segundo Carvalho (2003), em novembro de 1984, a Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS) firmou convênio com a Fundação Padre Leonel França, ligada à PUC-RJ, com o objetivo de elaborar o Atlas do Potencial Eólico Nacional. Desta forma, pela primeira vez foram feitos esforços no sentido de determinar a viabilidade da utilização da energia eólica no Brasil. Os dados eólicos foram apresentados em isolinhas de velocidade média, velocidade máxima, probabilidade de calmaria e densidade de potência de cada uma das regiões do Brasil e a síntese para todo o país.

O Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) iniciou suas atividades em 1995 como resultado do "I Encontro para Definição de Diretrizes para o Desenvolvimento de Energias Solar e Eólica no Brasil" realizado em abril de 1994, promovido pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Além do início do CRESESB, também foram elaboradas metas e diretrizes para o setor, visando à discussão sobre os rumos das energias solar e eólica no país (CARVALHO, 2003).

A partir dos levantamentos de potencial eólico, a nível estadual, que começaram a surgir em 2000, realizados por diferentes empresas em cada estado, como, por exemplo, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) no Paraná e a Companhia Energética do Ceará (COELCE) no Ceará, o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro foi lançado em 2001, com o objetivo de auxiliar a identificação de áreas adequadas para o aproveitamento eólico no país (CARVALHO, 2003). No Rio Grande do Sul, foi criado o Atlas do Estado do Rio Grande do Sul em 2002, desenvolvido pela equipe da área de energia eólica da Secretaria de Energia, Minas e Comunicação (SEMC), liderados pelo Engenheiro Ronaldo dos Santos Custódio (SEMC, 2002).

Segundo Oliveira (2011), a crise no abastecimento elétrico nacional creditada ao aumento na demanda sem o efetivo investimento na construção de novas usinas geradoras afetou negativamente o setor elétrico fazendo com que o governo passasse a se preocupar em diversificar a matriz energética, já que o contínuo crescimento econômico demandava também um grande crescimento energético. Após a crise

energética ocorrida em 2001, o debate sobre a segurança energética nacional, no qual a forte dependência das usinas hidrelétricas foi questionada, ganhou espaço.

Em 26 de abril de 2002 foi criado o Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), através da publicação da Lei Federal nº 10.438 sendo mais tarde revisada e modificada através da Lei nº 10.762 de 11 de novembro de 2003. Os principais objetivos do programa, desde sua criação, são maior participação das fontes eólica, biomassa e hidrelétrica na matriz energética nacional, diversificação dessa matriz a partir de fontes renováveis e, principalmente, redução da emissão de gases de efeito estufa nos termos do Protocolo de Quioto (DUTRA *et al.*, 2005). Em resumo, o programa pretendia estimular o desenvolvimento de energias renováveis no Brasil e, para tanto, baseou-se em um sistema de tarifas de aquisição, destinados a atrair investimentos em energia eólica, biomassa e pequenas hidrelétricas (GWEC, 2011).

Em sua primeira fase, o PROINFA consistia na estipulação de uma tarifa de compra de energia para projetos com contratos de vinte anos, como também apresentava mecanismos de subsídios para investimentos através de linhas especiais fornecidas pelo Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) para os projetos selecionados pelo programa (DUTRA *et al.*, 2005).

Na Tabela 3 são mostrados os valores das tarifas de energia para empreendimentos eólicos de acordo com o Fator de Capacidade de Referência (FCR) do parque eólico, proporção entre a produção efetiva e a capacidade total máxima de uma usina em um mesmo período de tempo. Esses valores foram publicados através da Portaria MME nº 45 de 30 de março de 2004 (DUTRA *et al.*, 2005).

Tabela 3. Valores econômicos do PROINFA 1ª Fase (base: Março de 2004).

Central Eólica de Geração de Energia Elétrica	Valor Econômico da Tecnologia Específica da Fonte (R\$/MWh)
FCR ≤ FCR mínimo (FCR _{MIN} = 0,324041)	204,35
FCR ≥ FCR máximo (FCR _{MAX} = 0,419347)	180,18
FCR _{MIN} ≤ FCR ≤ FCR _{MAX}	$VE = 204,35 - \left[\left(\frac{24,17}{FCR_{MAX} - FCR_{MIN}} \right) \cdot (FCR - FCR_{MIN}) \right]$

Fonte: DUTRA *et al.* (2005).

O primeiro leilão de energia eólica, realizado em 14 de dezembro de 2009, marcou um ponto decisivo para o desenvolvimento de energia eólica no Brasil, quando 1.805 MW foram adicionados à quantidade contratada pelo PROINFA. Além disso, novas políticas de financiamento foram introduzidas pelo BNDES, dando um estímulo ao programa, bem como para a nova dinâmica criada pelos leilões de energia eólica realizados em 2009, 2010 e 2011 (GWEC, 2011).

Em 2011, 13 parques eólicos do PROINFA entraram em funcionamento. No total, até o final do programa, 1.325,6 MW estavam em atividades e conectados à rede. A taxa de instalação de nova capacidade de energia eólica aumentou significativamente nos últimos dois anos, um reflexo do fato de que essa indústria está se tornando firmemente

estabelecida no Brasil (GWEC, 2011). Na Tabela 4 pode-se ver o histórico da quantidade de parques eólicos que entraram em funcionamento através do PROINFA ao longo de seu período de funcionamento.

Tabela 4. Histórico dos projetos do PROINFA.

Ano	Projeto Eólico	MW anual	MW acumulado
Até 2005	10 parques eólicos	26,6 MW	26,6 MW
2006	5 parques eólicos	208,3 MW	234,9 MW
2007	1 parque eólico	10,2 MW	245,1 MW
2008	5 parques eólicos	94,0 MW	339,1 MW
2009	15 parques eólicos	261,4 MW	600,5 MW
2010	14 parques eólicos	326,6 MW	927,1 MW
2011	13 parques eólicos	399,1 MW	1.326,2 MW

Fonte: GWEC (2011).

O PROINFA terminou em 31 de dezembro de 2011 com resultados positivos em termos do aumento da indústria de energia eólica para o crescimento sustentável do país (GWEC, 2011).

2.3 Impactos Socioambientais da Energia Eólica

2.3.1 Aspectos Negativos

O impacto visual causado pela sombra intermitente dos aerogeradores pode ser incomodativo para pessoas que residam próximas a parques eólicos. Esse efeito é menos acentuado no Brasil, que por ser um país tropical, produz sombras de pequenas distâncias quando comparadas com outras regiões do planeta, como a Europa. Além disso, pode-se evitá-lo através de uma distribuição planejada das turbinas, de modo a evitar a incidência de sombra nas residências próximas. Outro efeito visual negativo é a reflexão intermitente causada pela incidência do sol nas pás em movimento, que pode ser evitado através de pinturas opacas. Ainda, a existência de grandes áreas com baixa densidade populacional e favoráveis para a instalação de parques eólicos faz com que esses desconfortos sejam facilmente evitados (CUSTÓDIO, 2007).

A emissão de ruído nos aerogeradores depende da sua dimensão. Para aerogeradores com diâmetro de rotor acima de 20 metros, que são os que mais contribuem para a emissão de ruído, pode-se assumir um valor de 50 dB junto ao aerogerador e de 35 dB a uma distância de 450 metros. Apenas ruídos acima de 65 dB podem provocar efeitos fisiológicos como danos ao sistema auditivo. Porém, valores acima de 30 dB podem provocar efeitos psíquicos sobre o homem. Para garantir a segurança das possíveis habitações instaladas nas proximidades dos parques eólicos, usa-se como referência a norma alemã VDI 2714 que limita o ruído a 45 dB durante o dia e 35 dB durante a noite, a uma distância de 500 metros do aerogerador (CUSTÓDIO, 2007).

Entretanto, com o desenvolvimento da aerodinâmica das pás e das partes mecânicas mais problemáticas já é possível uma redução considerável no ruído dos aerogeradores mais modernos (CORREA, 2010).

O principal impacto negativo da energia eólica sobre a fauna é a interferência dos aerogeradores sobre as aves. Os pássaros podem colidir com os aerogeradores, devido sua dificuldade de visualização. Portanto, a instalação de parques eólicos em regiões densamente povoada por pássaros deve ser analisada com cautela, principalmente no caso de detecção de rotas migratórias. Entretanto, as baixas rotações do rotor e as baixas alturas de instalação das torres fazem com que, mesmo em lugares onde há parques eólicos instalados, a representatividade dessas colisões na causa de morte de aves seja muito inferior a caça, linhas de transmissão e tráfego, como mostrado na Figura 3, no estudo feito para estimar a causa da morte de pássaros nos Países Baixos no ano de 1998 (CUSTÓDIO, 2007).

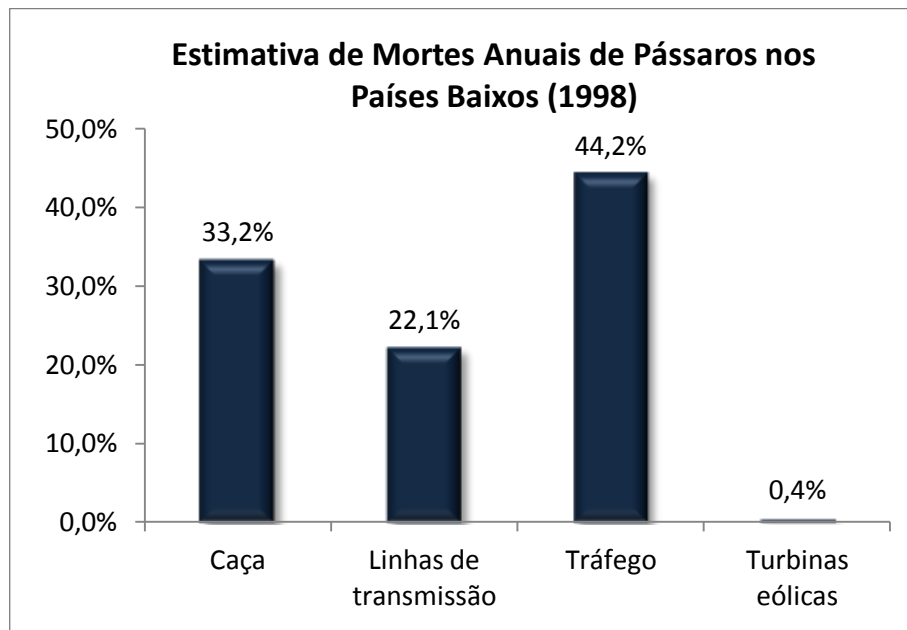


Figura 3. Estimativa de mortes anuais de pássaros.
Fonte: CUSTÓDIO (2007).

Segundo Custódio (2007), os aerogeradores, em alguns casos, podem refletir as ondas eletromagnéticas. Isto significa que podem interferir e perturbar sistemas de telecomunicações. Estas interferências não são significativas. No entanto, são necessários estudos mais detalhados quando o parque se situa próximo a aeroportos ou a sistemas de retransmissão.

2.3.2 Aspectos Positivos

A energia eólica não contribui para o efeito estufa e por isso seu impacto ambiental é baixo. Para cada 1 kWh de energia eólica produzido se evita a emissão de 0,6 a 1,0 kg de CO₂, além da economia de combustíveis fósseis e a diminuição da contaminação que eles provocam. Além disso, não há utilização de água como fonte motriz, nem para refrigeração, como também não há produção de resíduos radioativos nem gasosos (CORREA, 2010).

A área que um parque eólico solicita é muito grande, da ordem de 10 MW/km². Entretanto, o espaço efetivamente utilizado, referente à base do aerogerador, é da ordem de 1% (CORREA, 2010). Por isso, ele pode ser conjuntamente aproveitado para outra finalidade, como pecuária e agricultura (CUSTÓDIO, 2007). Além disso, o solo

permanece nas condições originais. Não há alteração do lençol freático por consumo, contaminação, geração de resíduos ou lançamento (CORREA, 2010).

A dependência de energia eólica garante segurança no suprimento, pois o vento, sua fonte, é própria, inesgotável e gratuita. Além disso, a economia independe de preços externos como gás e petróleo. O desenvolvimento dessa energia gera empregos e estimula o desenvolvimento econômico do país (PETRY e MATTUELLA, 2008).

Segundo Rocha *et al.* (2003), uma característica marcante da geração eólica é a capacidade de atender rapidamente ao aumento real da demanda e na medida exata desse, evitando-se investimentos com base em projeções econômicas de longo prazo, que nem sempre se confirmam. Como o prazo de implantação de uma planta eólica é inferior a um ano, a expansão do sistema pode ser adequada à conjuntura de curto prazo e não à de longo prazo, como no caso das hidrelétricas. Isto permite o planejamento da expansão do sistema exatamente de acordo com a expansão da demanda.

A geração eólica está entre as formas mais seguras de geração de energia elétrica. Há raros relatos de pessoas feridas por pedaços caídos de pás ou pedaços de gelo. Além disso, para a implantação de um parque eólico inexistente deslocamento de populações, animais ou plantas, não há alagamentos de áreas, cidades, sítios arqueológicos ou florestas e não existe inviabilização da área utilizada (CUSTÓDIO, 2007).

Com uma geração hidrelétrica bastante desenvolvida no Brasil, a estabilização sazonal de oferta de energia é um desafio, pois esse regime tem caráter estocástico com flutuações sazonais de amplitude significativa (ROCHA *et al.*, 2003). Entretanto, a geração eólica pode ser aproveitada para potencializar uma maior estabilidade sazonal, devido à complementaridade estacional entre os ventos e as vazões hídricas, como pode ser observado na Figura 4, que mostra as vazões do Rio São Francisco, entre os estados de Sergipe e Alagoas, e a produção de energia elétrica dos parques eólicos instalados no Nordeste (CEPEL e ELETROBRAS, 2012).

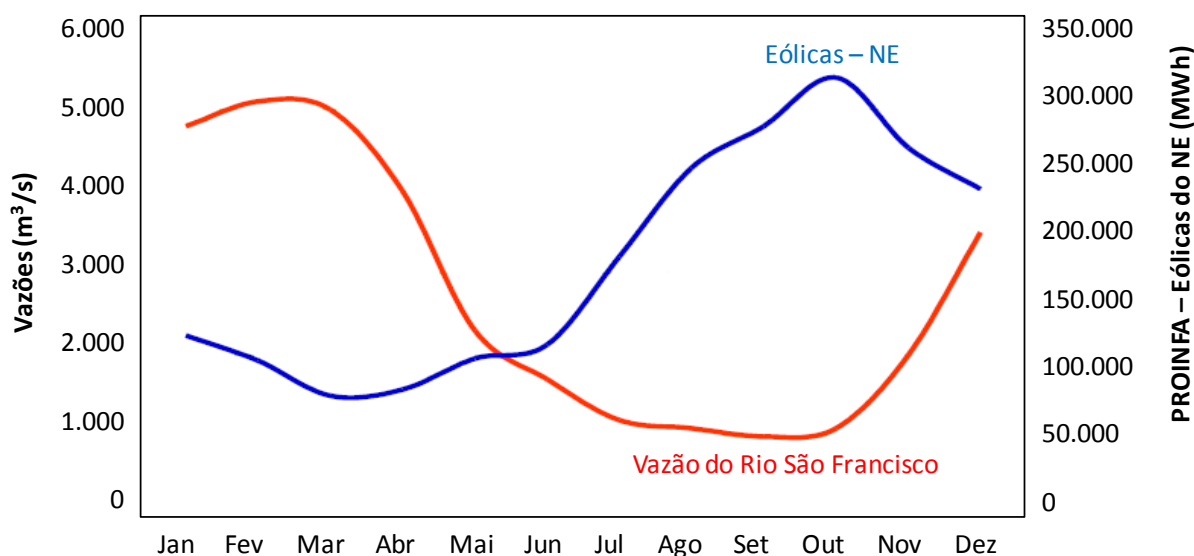
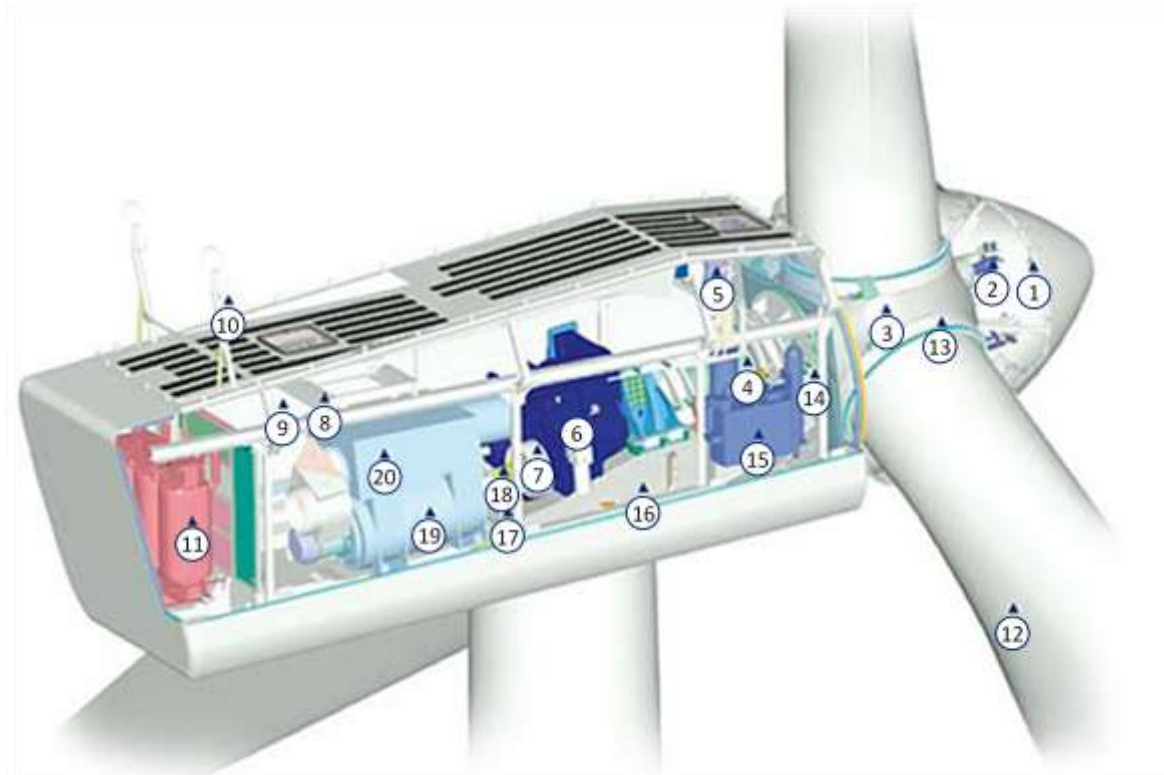


Figura 4. Complementaridade sazonal entre os ventos e as vazões hídricas.

Fonte: CEPEL e ELETROBRAS (2012).

2.4 Aerogeradores

A produção de energia elétrica através da fonte eólica fundamenta-se no princípio da transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica que então é convertida em energia elétrica. Os ventos impulsionam as pás, que provocam o giro do rotor. Esse movimento é transmitido para o conversor, que, através de um processo de indução eletromagnética, transforma a energia cinética de rotação em energia elétrica (KOTO, 2009). Os aerogeradores, por sua vez, são os equipamentos responsáveis por essa conversão de energia (CUSTÓDIO, 2007). Seus principais componentes são mostrados na Figura 5.



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

Figura 5. Principais componentes de um aerogerador.
Fonte: CRESESB (2006).

Segundo o CRESESB (2006), um aerogerador é composto pelos seguintes subconjuntos:

- Rotor: componente que efetua a transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação. No rotor são fixadas as pás da turbina. Todo o conjunto é conectado a um eixo que transmite a rotação das pás para o gerador, muitas vezes através de uma caixa multiplicadora;
- Nacele: compartimento instalado no alto da torre e que abriga todo o mecanismo do gerador, o qual pode incluir: caixa multiplicadora, freios, embreagem, mancais, controle eletrônico, sistema hidráulico, etc.
- Torre: elemento que sustenta o rotor e a nacele na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. Em geral, as torres são fabricadas de metal (treliçada ou tubular) ou de concreto. As torres de aerogeradores de pequeno porte são estaiadas (sustentadas por cabos tensores) enquanto as das turbinas de médio e grande porte são auto-portantes.

O gerador elétrico, quando acionado pela rotação da turbina, converte a energia mecânica em energia elétrica. O acoplamento entre esses dois componentes é feito através de caixas multiplicadoras, devido às diferentes rotações entre eles (KRUMMENAUER, 2009).

Segundo Krummenauer (2009), alguns modelos de aerogeradores utilizam mais de um gerador, de diferentes potências. Um gerador de potência maior é projetado para operar na potência nominal do aerogerador, operando a partir de uma determinada velocidade do vento. Outro gerador, de potência menor, é utilizado no início da operação e permite que a velocidade de partida seja bem reduzida (até 2,5 m/s), melhorando o desempenho do aerogerador. O menor gerador é desligado quando a velocidade do vento alcança um valor maior, momento no qual o maior gerador é posto em operação.

Ainda, é necessário um transformador que eleve a tensão de geração até a indicada para a conexão, para que a energia gerada possa ser entregue à rede. Esse equipamento pode ser instalado próximo ao aerogerador ou à torre em uma altura intermediária ou no chão, tanto interna como externamente (KRUMMENAUER, 2009).

As pás do rotor capturam o vento e transmitem sua potência. Possuem o mesmo formato de asas de aviões e usam a mesma aerodinâmica. Esse formato aerodinâmico está tanto no perfil quanto na torção ao longo do comprimento, o que permite extrair o máximo possível de energia do vento. Como a velocidade do vento vai mudando do centro até a extremidade da pá, a torção acompanha essa variação, oferecendo sempre um ângulo ideal (MARQUES, 2004).

A Figura 6 mostra a evolução do tamanho das turbinas eólicas comerciais, bem como o aumento de sua potência, até a data de 2010 (BARROS, 2010).

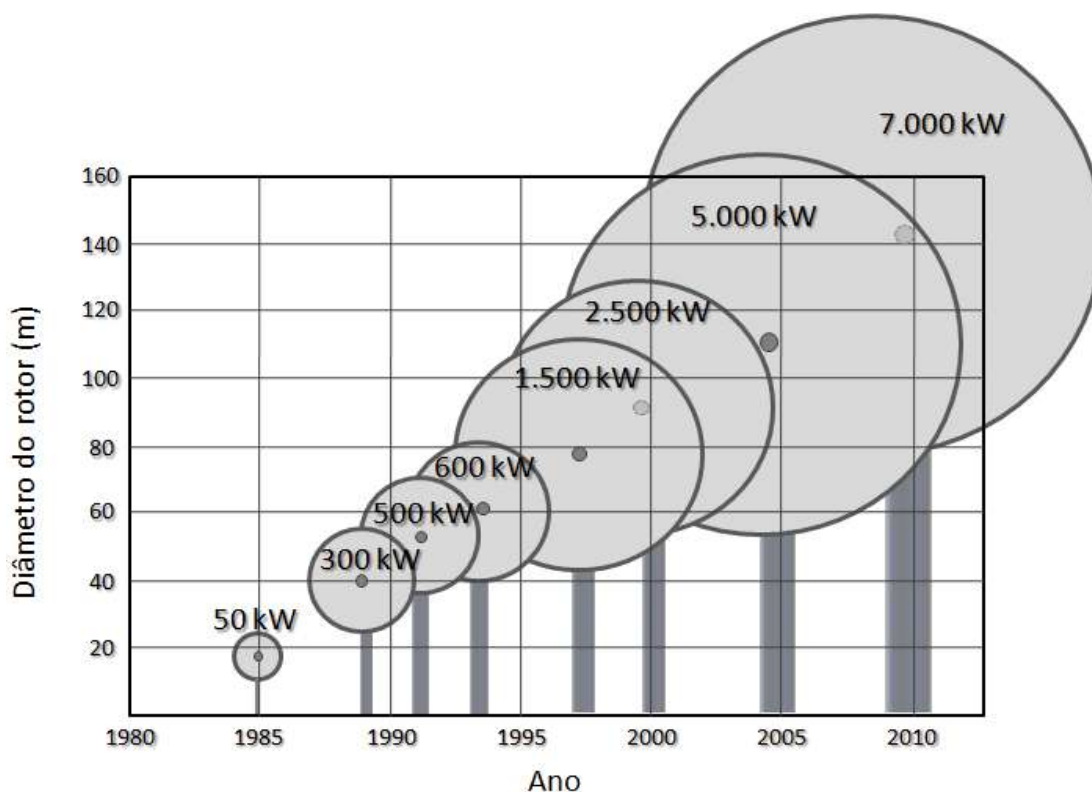


Figura 6. Evolução da potência e tamanho dos aerogeradores comerciais.
Fonte: CUSTÓDIO (2007).

Segundo Vergara (2005), os materiais mais empregados para a fabricação das pás de turbinas eólicas são aço, alumínio e materiais compósitos de madeiras, fibra de vidro e fibra de carbono. Uma pá deve ser leve o suficiente para minimizar as cargas inerciais e giroscópicas as quais contribuem para a fadiga da pá e atender os requisitos de rigidez e resistência mecânica. O material ideal para a fabricação da pá deve apresentar uma boa relação de resistência por peso e atender requisitos de custo e facilidade de fabricação.

2.5 Influência do Terreno

Um fator fundamental na decisão de escolha da instalação de um parque eólico é o terreno. Para tanto, devem ser feitos estudos de forma a descrever esse, de acordo com suas características topográficas e orográficas, que irão impactar diretamente na produção de energia elétrica do parque (CUSTÓDIO, 2007).

2.5.1 Velocidade do vento com relação à altura

O atrito do ar com a superfície do terreno resulta numa força horizontal sobre o movimento do ar, produzindo um retardo do fluxo nas proximidades do solo. É criado um gradiente de velocidades, conhecido como camada limite, até certa altura, a partir da qual esse gradiente se torna desprezível, conhecida como zona de atmosfera livre. (CUSTÓDIO, 2007). Esse comportamento é mostrado na Figura 7.

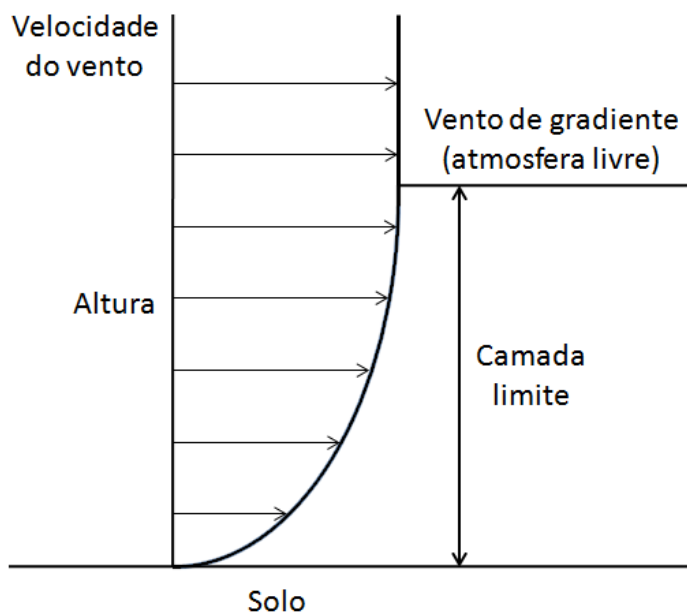


Figura 7. Camada limite atmosférica.

Fonte: CUSTÓDIO (2007).

A velocidade dos ventos na atmosfera livre também aumenta acima do limite superior da camada limite, porém de forma quase linear, até atingir a tropopausa, onde começa a diminuir novamente. Esse aumento acima da camada limite até a tropopausa se deve ao fato da diferença de pressão também variar em função da altura, como ilustrado na Figura 8 (CUSTÓDIO, 2007).

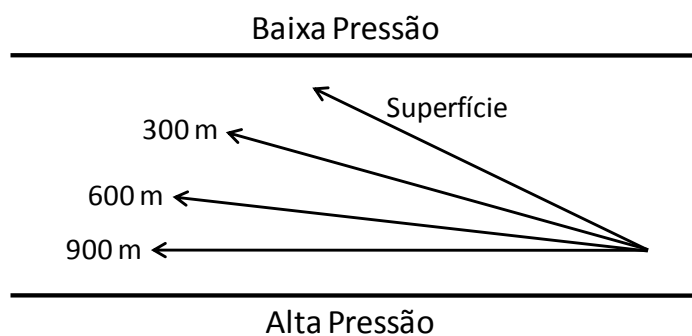


Figura 8. Variação da direção do vento dentro da camada limite em função da altura, no hemisfério Sul.

Fonte: CUSTÓDIO (2007).

2.5.2 Rugosidade do terreno

A rugosidade de um terreno é definida como a influência da superfície desse e dos obstáculos, resultando num retardo do vento próximo ao solo. Contudo, nem todos os elementos topográficos de um terreno contribuem para a rugosidade, como, por exemplo, longos morros lisos, que não provocam o aumento da turbulência e, por conseguinte, não afetam a rugosidade (CUSTÓDIO, 2007).

Um determinado terreno tem sua rugosidade determinada pelo tamanho e distribuição dos elementos topográficos de rugosidade que o compõem. Para quantificar a rugosidade, normalmente se utiliza o comprimento de rugosidade, z_0 , que é definido

como a altura onde a velocidade do vento é zero, caso o vento tenha um comportamento logarítmico com a variação de altura – válido para condições de vento moderado e forte (CUSTÓDIO, 2007).

Lettau (1969) estabeleceu uma relação empírica entre os elementos de rugosidade e o comprimento de rugosidade que tem servido de referência nos estudos de energia eólica. Desta forma, o comprimento de rugosidade é dado pela expressão:

$$z_0 = 0,5 \cdot \frac{h \cdot S}{A_H} \quad (1)$$

Onde:

h: altura do elemento de rugosidade (m);

S: seção transversal, na direção do vento, do elemento de rugosidade (m²);

A_H: área horizontal média dos elementos de rugosidade uniformemente distribuídos (m²).

A Equação 1 considera que a porosidade é aproximadamente nula, isto é, que os elementos de rugosidade são sólidos. Se essa premissa não for aceitável, o comprimento de rugosidade será reduzido proporcionalmente à rugosidade (LETTAU, 1969).

Troen e Petersen (1989) fizeram uma classificação das superfícies quanto à rugosidade, propondo quatro classes, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Classificação da superfície quanto à rugosidade.

Classe	z ₀ (m)	Tipo de área
0	0,0002	Com água, tais como mares e lagos
1	0,03	Aberta com poucos quebra-ventos, plana ou levemente ondulada, podendo apresentar simples fazendas e árvores ou arbustos
2	0,1	Terrenos de fazendas com quebra-ventos afastados a mais de 1.000 metros entre si, e algumas construções espalhadas; caracterizados por grandes áreas abertas entre alguns quebra-ventos, com uma passagem aberta; o terreno pode ser plano ou ondulado.
3	0,4	Áreas urbanas, florestas e terras com muitos quebra-ventos; a área de fazenda é caracterizada por muitos quebra-ventos aglomerados, com separação média de poucas centenas de metros

Fonte: TROEN E PETERSEN (1989).

Segundo Custódio (2007), os valores de comprimento de rugosidade definidos para cada classe apenas dão uma ordem de grandeza e servem para estudos preliminares e aproximados da influência do terreno no perfil de vento.

3 Resultados

3.1 Potencial Eólico Brasileiro

O potencial eólico brasileiro, como mostrado na Figura 9, segundo Amarante (2001), é de 143 GW para ventos com velocidades maiores que 7 m/s e altura de 50 m, a partir de curvas médias de desempenho de turbinas eólicas em torres de 50 m. Ainda, a Secretaria do Desenvolvimento e Promoção no Investimento (SDPI) e a Agência Gaúcha de Desenvolvimento e Promoção do Investimento (AGDI) (2012) estimam que o potencial eólico brasileiro a 100 m é superior a 300 GW.

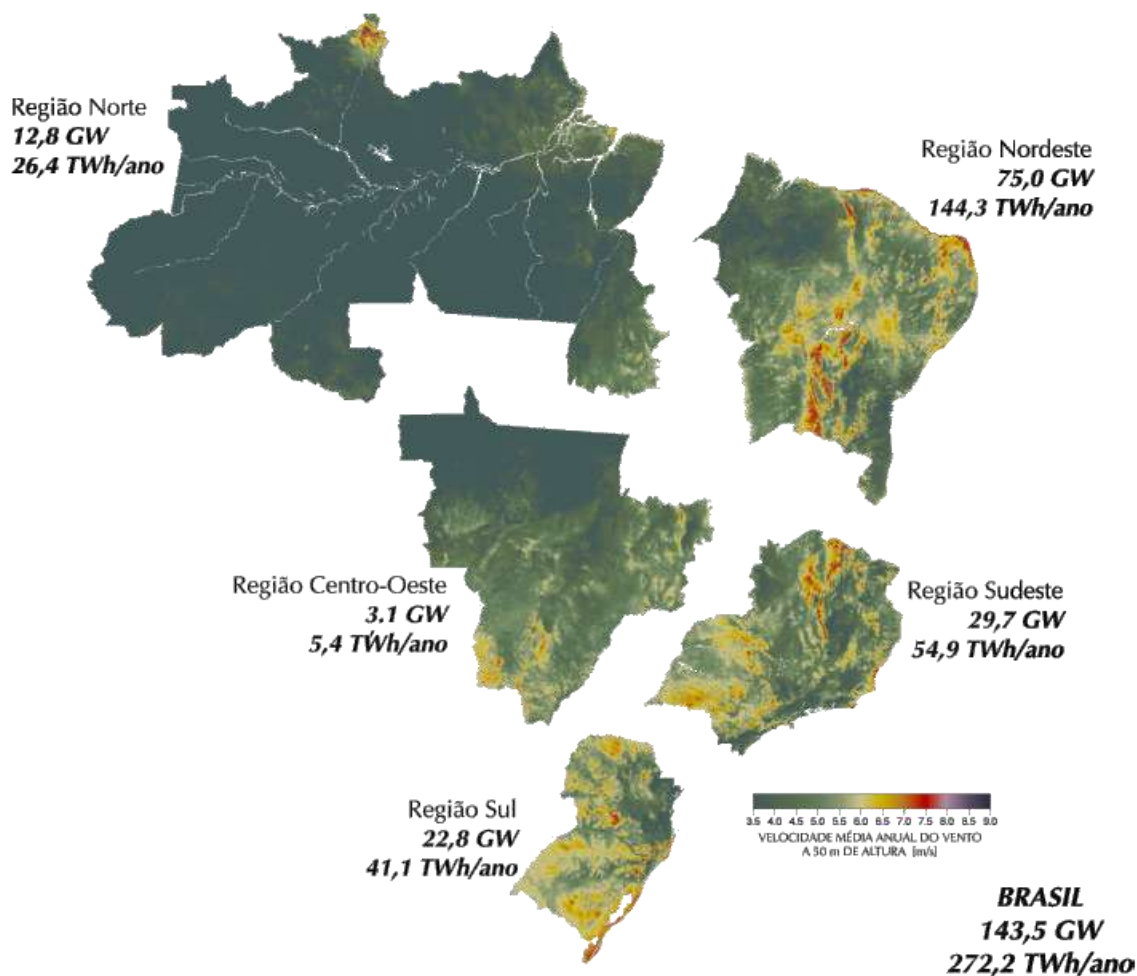


Figura 9. Potencial Eólico Estimado por região para vento médio igual ou superior a 7 m/s.
Fonte: AMARANTE (2001).

Entretanto, o país tem uma capacidade instalada de 1,4 GW, representando aproximadamente 1 % de seu potencial. A Tabela 6 mostra como essa capacidade está distribuída entre os estados brasileiros, assim como o n° de parques em operação de cada um.

Tabela 6. Potência eólica instalada no Brasil por estado.

Estado	Potência		N° de parques
	(MW)	(%)	
CE	518,9	35,3	17
PB	66,0	4,5	13
PE	24,8	1,7	5
PI	18,0	1,2	1
PR	2,5	0,2	2
RJ	28,1	1,9	1
RN	236,6	16,1	11
RS	340,0	23,1	10
SC	236,4	16,1	13
Total	1.471,2	100	73

Fonte: SDPI e AGDI (2012).

Os projetos de parques eólicos dependem da localidade onde serão instalados, pois sua potência é proporcional ao cubo da velocidade do vento. Entretanto, na prática, devido a perdas por atrito, aerodinâmica, conversões mecânicas e elétricas e eficiência da turbina eólica essa relação pode ser menor, chegando ao quadrado da velocidade do vento. Em outras palavras, a energia produzida por uma turbina eólica aumenta aproximadamente 20% para um aumento de 10% na velocidade do vento (PASQUALI, 2006).

Segundo Pasquali (2006), os sistemas eólicos atuais, com maiores potências, operam automaticamente, em conjunto com um anemômetro, que mede constantemente a velocidade do vento. Quando o mesmo é suficiente para vencer o atrito do sistema mecânico das turbinas, os controles automáticos permitem que as turbinas girem, iniciando a produção de uma pequena quantidade de energia. Essa velocidade mínima é de aproximadamente 2 m/s. A energia produzida aumenta rapidamente com o aumento da velocidade do vento. Quando a produção de energia atinge o valor para o qual a turbina foi projetada, os controles automáticos regulam a potência gerada, sendo a velocidade usual de projeto de 15 m/s. Acima dessa velocidade, a energia produzida não ultrapassa o valor de projeto, sendo mantida constante através de freios e controles aerodinâmicos das turbinas. Eventualmente, as velocidades podem atingir valores maiores do que 25 m/s, que poderiam danificar as turbinas e seus componentes. Nestes casos, a turbina é paralisada para evitar maiores danos.

A instalação de parques eólicos *offshore* elimina muitas desvantagens da instalação *onshore*, como, por exemplo, efeito incomodativo do ruído, da sombra e da reflexão dos raios solares dos aerogeradores às residências próximas, além do mar ser o terreno com menor rugosidade resultando num retardo quase nulo do vento próximo à superfície. Porém, as suas desvantagens, tais como, custos adicionais para a execução das fundações marítimas e gastos de conexão com a rede elétrica, fazem com que essa forma de

instalação só se destaque quando há falta de espaço para implantação de parques eólicos no continente, como é o caso da Europa.

3.2 Mercado Atual e Posicionamento do Setor de Energia Eólica Brasileiro

O comportamento do mercado energético brasileiro é definido, principalmente, pela demanda energética do país, pela capacidade instalada de geração de energia e, principalmente por ser de base hidrelétrica, pelo nível de armazenamento dos reservatórios. Além disso, visando reduzir o risco de suprimento, os contratos desse setor devem ser de longo prazo (MARTINS, 2010).

A energia eólica tem uma participação muito pequena, de apenas 1,3%, na oferta interna de energia elétrica, como mostrado na Figura 10, quando comparada com outras fontes.

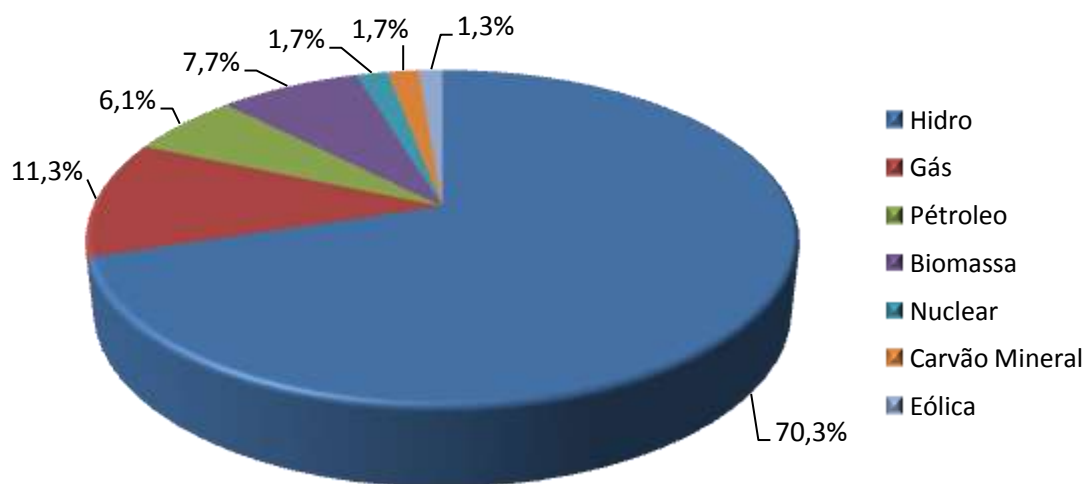


Figura 10. Potência instalada de geração de energia elétrica no Brasil.

Fonte: SDPI e AGDI (2012).

Contudo, ao longo da última década, o país teve um crescimento na geração de energia eólica, principalmente após o ano de 2005, quando a produção passou de 53 GWh para 342 GWh, chegando em 2009 com uma produção de 1.238 GWh, como pode ser visto na Figura 11.

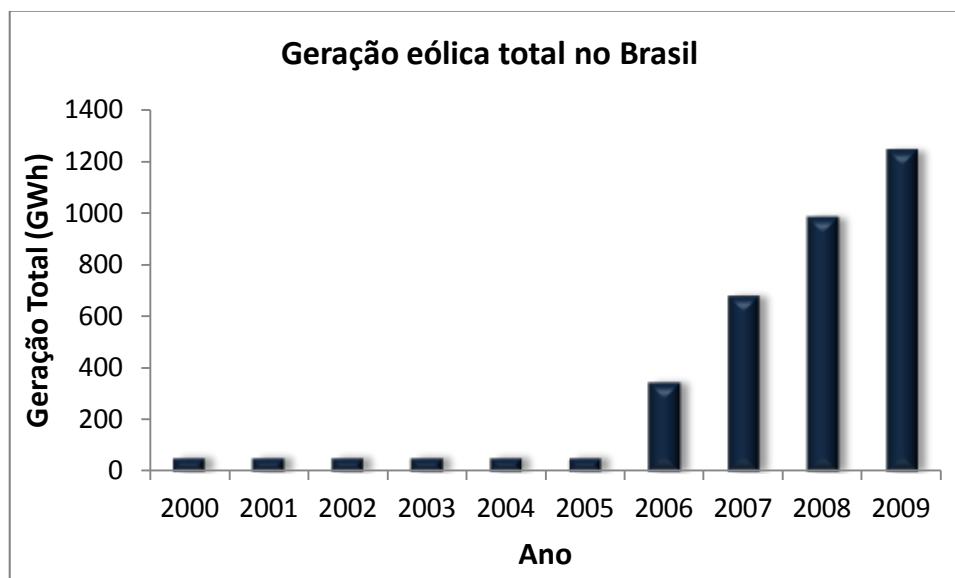


Figura 11. Evolução da geração eólica total no Brasil entre os anos de 2000 e 2009.
Fonte: MME (2009).

Na Figura 11 é possível ver que entre 2005 e 2009, a geração eólica brasileira total aumentou mais de 23 vezes. Isso não se deve somente ao fato da quantidade de parques eólicos novos instalados, mas também ao aumento da potência individual das turbinas que cresceu de aproximadamente 100 kW para 2 MW ou mais (PASQUALI, 2006).

3.3 Perspectivas Futuras de Mercado para o Setor de Energia Eólica Brasileiro

Segundo Amarante (2001), os grandes argumentos favoráveis à fonte eólica são a renovabilidade, perenidade, grande disponibilidade, independência de importações e custo zero para obtenção de suprimento, ao contrário do que ocorre com as fontes fósseis.

O Brasil, por possuir uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo (mais de 70% de sua matriz energética é proveniente de geração hidrelétrica), entrou tardiamente no ramo de energia eólica (BANDEIRA JUNIOR, 2010).

Segundo Correa (2010), a “pressão” exercida pelos governos, instituições internacionais e também por organizações não governamentais para a geração de energias limpas também tem estimulado o desenvolvimento da indústria eólica.

O mercado brasileiro de energia eólica *onshore* é um dos mais promissores, e permanecerá assim por pelo menos mais 5 anos. O apoio em infraestrutura do país e a experiência no setor foram adaptados para atender as condições locais. Isso coloca o Brasil em uma posição excelente para ser o líder regional em geração e desenvolvimento de energia eólica. No entanto, alcançar o desenvolvimento sustentável exige um novo quadro regulamentar que ofereça segurança em termos de volumes de desenvolvimento a médios e longos prazos, segurança jurídica na execução do projeto e um sistema de apoio que aumente ainda mais a competitividade (GEWC, 2011).

O desenvolvimento tecnológico da indústria eólica tem um custo inicial alto, entretanto, com a disseminação desta tecnologia através de um número cada vez maior de concorrentes, há a tendência de esse custo reduzir (CORREA, 2010).

3.3.1 Métrica dos Próximos Anos para a Energia Eólica

Em um estudo realizado em 2003, o Greenpeace (2003) vê boas perspectivas para o desenvolvimento da indústria eólica. Ao analisar a taxa de crescimento anual acumulada, entre os anos de 1999 e 2011, verifica-se que esta foi de aproximadamente 40%, taxa de crescimento significativa, não vista em outros setores da economia e em outras fontes de obtenção de energia elétrica. E esse mesmo estudo coloca como perspectiva que, até o ano de 2020, a energia eólica será responsável pela geração de 12% da demanda global de energia elétrica consumida.

A Figura 12 mostra uma estimativa de instalação de aerogeradores do MME, baseada no crescimento da capacidade instalada de aerogeradores por ano, em MW. Considera-se que cada aerogerador é de 2 MW e, dessa forma, estima-se o número destes por ano.

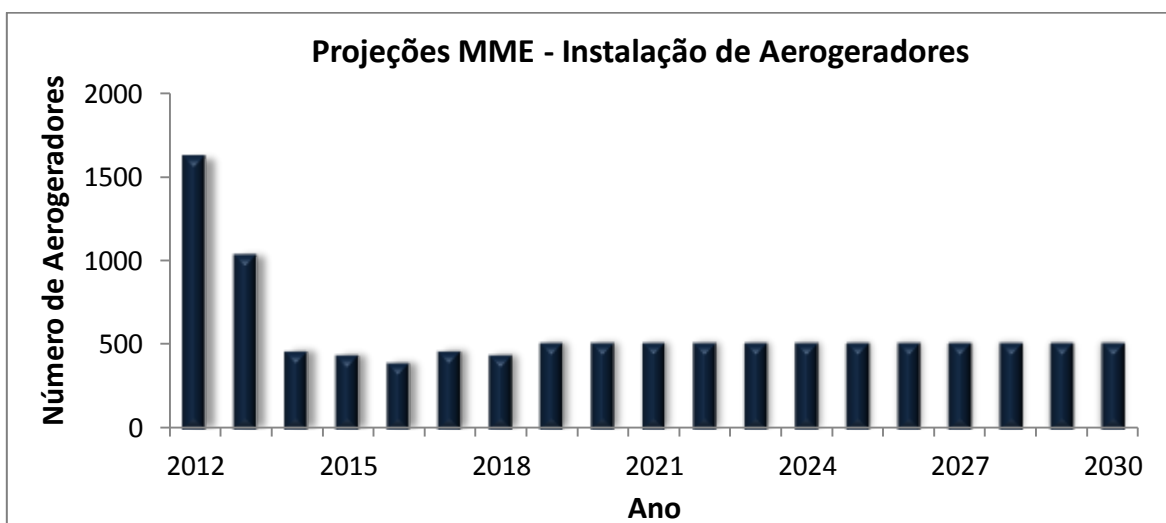


Figura 12. Projeção de Instalação de Aerogeradores.
Fonte: PORTO (2007).

Como os aerogeradores estão cada vez mais potentes, estima-se que, ao longo dos anos, para uma mesma capacidade instalada, cada vez menos aerogeradores sejam necessários.

A Tabela 7 mostra a previsão de instalação de parques eólicos no Brasil até 2015, expressa em total de MW, feita pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de acordo com a situação dos licenciamentos ambientais dos parques eólicos que estão com seu projeto em execução ou em andamento (ANEEL, 2012).

Tabela 7. Previsão de instalação de energia eólica no Brasil.

UF	2012	2013	2014	2015	Sem previsão	Total por UF (MW)
BA	48	572	469	54	-	1.144
CE	67	623	455	79	92	1.315
MA	-	20	-	403	-	423
PE	-	-	78	-	-	78
PI	-	30	47	-	-	77
RJ	-	-	-	-	135	135
RN	70	907	607	887	200	2.700
RS	44	333	506	94	56	1.033
Total por ano (MW)	230	2.485	2.171	1.517	483	6.914

Fonte: ANEEL (2012).

Essa previsão não implica em prorrogação ou em acatamento dos motivos pelos eventuais atrasos e descumprimentos do cronograma. Também é prevista, pela ANEEL, a instalação de um parque com capacidade de 28,8 MW no RN em 2016.

A ampliação e o desenvolvimento tecnológico do uso da energia eólica são muito maiores quando comparados com as demais tecnologias renováveis de geração de energia elétrica, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8. Evolução da Capacidade Instalada.

Fonte energética	Capacidade Instalada em Operação (MW)		Crescimento entre 2001 e 2010 (%)
	2001	2010	
Hidrelétrica	62.430	81.630	30,8
Termelétrica	10.481	29.689	183,3
Nuclear	1.966	2.007	2,1
Eólica	21	927	4.314,3

Fonte: ANEEL (2010).

Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento, oriundos de políticas voltadas para a criação de um mercado consumidor, amadureceram o setor eólico e sua escala de produção (CORREA, 2010).

Segundo Bronzatti e Neto (2008), a partir do ano de 2020, assim que a tecnologia de geração via fonte eólica e solar apresentarem maior maturidade e menor custo, a entrada em maior participação dessas matrizes energéticas é imprescindível. Projeta-se que, com inovação e com evolução na curva de aprendizado, o custo de geração elétrica via energia eólica pode aproximar-se de 33 U\$/kWh igualando-se ao custo de geração de uma usina hidroelétrica.

Com o resultado dos últimos leilões, o Brasil tem se tornado um forte pólo de atração de fabricantes de equipamentos para aerogeradores. Atualmente, nove estão cadastrados na FINAME e são elegíveis ao financiamento do BNDES, que só concede benefícios a fabricantes com operação em território nacional. A Tabela 9 mostra esses nove fabricantes e suas características de atuação.

Tabela 9. Principais fabricantes em atuação no Brasil.

Fabricante	Característica de atuação
General Electric Energy	Um dos principais fornecedores mundiais; Projeto de criação de aerogerador 100 % nacional.
Suzlon	Maioria entre os parques em operação no Brasil; Pretende atingir 1 GW até 2012; Implantação de fábrica de pás em Pacém.
Impsa Wind	Opera uma planta em Suape (PE) com capacidade de produzir 400 turbinas de 1,5 MW por ano.
Gamesa	A fabricante espanhola se fortalece com sua fábrica de hubs na Bahia.
Siemens	Instalação de planta no Nordeste.
Alstom	Empresa investira R\$50 milhões em fábrica de aerogeradores na BA, e R\$ 30 milhões em fábrica no RS.
Vestas	Fábrica no Nordeste está sendo negociada.
Fuhländer	Planta será instalada em Pecém (CE).
Wobben Wind Power	Primeira grande fabricante de aerogeradores a se instalar no Brasil; Possui duas fábricas, uma em SP e outra no CE, totalizando 412 MW implantados no país; Construção de fábrica de torres no RN.

Fonte: BNDES (2012).

3.3.2 Materiais para a Construção dos Aerogeradores

No âmbito da perspectiva para futuros materiais na construção de aerogeradores, tem-se que os responsáveis pela resistência mecânica dos rotores de turbinas eólicas de grande porte são o aço e o alumínio, porém, esses apresentam baixa resistência à fadiga. A fibra de carbono apresenta as melhores propriedades de resistência e rigidez mecânica, peso e resistência à fadiga, entretanto, seu alto custo e dificuldade de manuseio não permitiu seu uso em grande escala (VERGARA, 2005).

Sendo assim, a tendência é que as pás eólicas sigam sendo fabricada de plásticos reforçados de fibra de vidro, GRP, isto é, poliéster de fibra de vidro ou epóxi reforçado de fibra de vidro, devido ao seu valor ser de 61% de uma mesma turbina utilizando pás em fibra de carbono e suas propriedades apropriadas e largamente conhecidas (ALMEIDA E SILVA, 2011).

3.3.3 Rumo do Mercado Eólico Brasileiro

A evolução do setor eólico se deu nos anos 80 e foi a partir dos anos 90 que a redução nos custos ocorreu de forma significativa. Isso porque os aerogeradores passaram de 0,1 para 1 MW de potência e, principalmente, a Europa passou a fazer investimentos pesados para a evolução desse setor energético (CORREA, 2010).

Indústrias de outros setores, as quais possuem geração própria, geralmente tendiam a buscar alternativas de fornecimento para seu suprimento nas termoelétricas. Neste novo cenário, no qual o custo da energia gerada pelos parques eólicos tornou-se competitiva e no qual há uma grande pressão social a favor das tecnologias “limpas”, as usinas eólicas tornaram-se uma alternativa viável (BANDEIRA JUNIOR, 2010).

No Brasil, o fornecimento de energia eólica encontra-se em situação semelhante de vulnerabilidade e baixa definição do marco regulatório, principalmente por funcionar como uma fonte complementar às convencionais, que explicaria porque do planejamento das operações eólicas serem condicionadas às condições hidrológicas (MARTINS, 2010).

O Brasil apresenta boas condições para o crescimento do setor energético dos ventos, porque possui vantagens competitivas neste setor. Um fator importante é o fato de mais de 70 % da população viver na faixa litorânea, local no qual se encontra a maior parte do potencial eólico, como mostrado na Figura 13, no mapa do país com a população por região estimada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

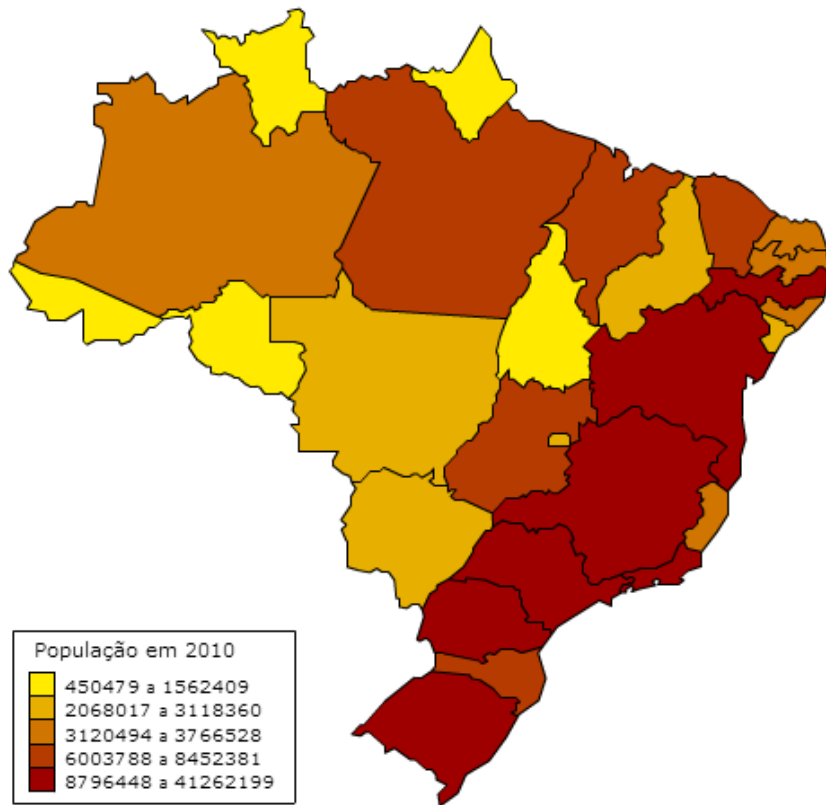


Figura 13. População no Censo Demográfico segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação – 2010.

Fonte: IBGE (2010).

Segundo Martins (2010), os ventos brasileiros, em média, têm velocidades altas e, em geral, são estáveis e bem comportados, além de apresentarem uma complementaridade energética decorrente da sazonalidade dos ventos e chuvas.

Diante desse quadro, observa-se que no Brasil tem muito espaço para evoluir em relação ao desenvolvimento da geração de energia eólica, visto que o país possui ótimas condições naturais, mas está longe do seu nível de capacidade de geração em virtude de uma série de empecilhos nas etapas de licenciamento ambiental, bem como uma grande dificuldade de conexão à rede (regulamentação, custo e estrutura física) e um ambiente político-regulatório incerto (o que acaba se traduzindo em aumento dos custos) (MARTINS, 2010).

O resultado desse progresso, não só a nível brasileiro como a nível mundial, é um custo de energia eólica compatível com as fontes usuais de energia, como a nuclear e a térmica (PASQUALI, 2006).

4 Conclusões e Trabalhos Futuros

Dentro do segmento de energias renováveis no Brasil, a fonte hidrelétrica é dominante, devido ao potencial hídrico brasileiro e por consequência, às quase mil usinas instaladas no país e ao tempo que essa fonte já está alocada. Por isso, além da tecnologia estar em desenvolvimento, criaram-se restrições ao desenvolvimento do mercado de fontes renováveis alternativas, em especial, a energia eólica.

Entretanto, com a dificuldade de licenciamento ambiental das hidrelétricas e para garantir o suprimento energético do país, o governo criou políticas de incentivos, como o PROINFA, que impulsionaram essas fontes menos desenvolvidas no Brasil, e que hoje são competitivas no cenário energético do país.

O principal argumento desfavorável à fonte eólica é o alto custo de instalação do parque, porém, com o incentivo do BNDES de somente conceder benefícios aos produtores de aerogeradores com operações em território brasileiro, a indústria está se desenvolvendo, e com a disseminação da tecnologia o custo fica cada vez menor.

Dentre as demais fontes alternativas renováveis, a energia eólica tem melhores perspectivas no país devido à sua complementaridade com a energia hidrelétrica.

Como sugestão para trabalhos futuros fica a indicação para um estudo de análise de investimentos regionalizados na instalação das indústrias de aerogeradores em comparação com a centralização em uma única região. Avaliar os custos de transporte de aerogeradores para diferentes pontos do país, e quantificar a diferença de custos e o impacto que a instalação de novas indústrias terá no custo de instalação do parque e o impacto sócio ambiental para as regiões afetadas.

5 Referências

ALMEIDA, A. T. P. D.; SILVA, M. M. D. **Desenvolvimento e Montagem de um Gerador Eólico com Pás Compósitas**. (Graduação). Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, p. 84, 2011.

AMARANTE, O. A. C. D.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. D. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**: p. 44, 2001.

ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. 2010. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> >.

ANEEL. Acompanhamento das Centrais Geradoras Elétricas. 2012. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=37> >.

BANDEIRA JUNIOR, E. **Geração eólica: análise de investimentos**. (Graduação). Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 64, 2010.

BARROS, A. S. **Estudo do Desalinhamento das Fibras nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Estruturais de Pás Eólicas**. (Doutorado). Engenharia e Tecnologia Espaciais. Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 182, 2010.

BNDES. Credenciamento de Fabricantes de Equipamentos. 2012. Disponível em: < http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Ferramentas_e_Normas/Credenciamento_de_Equipamentos/index.html >.

BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I. **Matrizes Energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Imprensa Universitária, ISBN 85-7485-039-X, p. 146, 2003.

CEPEL; ELETROBRAS. **As Energias Solar e Eólica no Brasil**. Casa Solar 2012.

CORREA, P. M. **Energia Eólica: Análise Teórica e sua Aplicação no Mundo**. (Graduação). Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 56, 2010.

CRESESB. Componentes de um Aerogerador. 2006. Disponível em < <http://www.cresesb.cepel.br/content.php> >.

CUSTÓDIO, R. D. S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. ELETROBRAS. ISBN 978-85-87083-09-8. p. 280, 2007.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S.; TOLMASQUIM, M. T. **Experiência de Políticas para o Desenvolvimento de Mercados Eólicos, Perspectivas e Transformações no Parque Gerador de Energia Elétrica Brasileiro**. Coletânea de Artigos Energias Solar e Eólica: CRESEB. V. 2, p. 203 a 216, 2005.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report**. p.25 e 26. 2011. Disponível em < http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2011_lowres.pdf >.

GREENPEACE. Mercado de energia eólica pode movimentar €75 bilhões até 2020. 2003. Disponível em: < <http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Noticias/mercado-de-energia-e-lica-pode1/> >.

IBGE. Sinopse do Censo Demográfico 2010. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=4&uf=00> >.

KOTO, S. M. **Fontes Renováveis para a Produção de Energia Elétrica no Contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Estudo de Caso de Duas Fontes - Eólica e Fotovoltaica**. (Especialização). Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético, Instituto de Eletrotécnica e Energia - Universidade de São Paulo. p. 60, 2009.

KRUMMENAUER, L. **Fontes Alternativas e Renováveis para Geração de Energia Elétrica**. (Graduação). Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 76, 2009.

LEI FEDERAL Nº 10.438 DE 26 DE ABRIL DE 2002. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm >.

LEI FEDERAL Nº 10.762 DE 11 DE NOVEMBRO DE 2003. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/L10.762.htm >.

LETTAU, H. Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description. **Journal of Applied Meteorology**, v. 8, 1969. Disponível em < [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450\(1969\)008%3C0828%3ANOARPE%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450(1969)008%3C0828%3ANOARPE%3E2.0.CO%3B2) >

MARQUES, J. **Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação**. (Mestrado). Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria. p. 158, 2004.

MARTINS, A. P. S. **O Desempenho da Energia Eólica Frente ao seu Ambiente Regulatório.** (Graduação). Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 82, 2010.

MME. **Expansão da Geração Eólica no Brasil:** p. 29, 2009.

MME. **Portaria N° 45, de 30 de março de 2004.** Diário Oficial da União - Seção 1. p. 53 a 64.

OLIVEIRA, L. D. S. D. **Regras e Boas Práticas para Instalação de Torres Anemométricas Voltadas para Estudo de Potencial Eólico.** 2011. 115 (Mestrado). Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PASQUALI, L. M. **Estudo sobre a Influência da Reservação Hidráulica em Sistemas de Geração Eólica Isolados.** (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 79, 2006.

PETRY, A. P.; MATTUELLA, J. M. L. **Analysis of PROINFA program performance focusing for economic-financial brazilian wind projects feasibility.** German Wind Energy Conference. Bremen, Germany 2008.

PORTO, L. **Energias Renováveis.** Departamento de Desenvolvimento Energético - Ministério de Minas e Energia. 2007.

ROCHA, N. D. A.; AMARANTE, O. C. D.; SCHULTZ, D. J.; SUGAI, M. V. B.; BITTENCOURT, R. M. **Estabilização Sazonal da Oferta de Energia através da Complementaridade entre os Regimes Hidrológico e Eólico.** Coletânea de Artigos Energia Solar e Eólica: CRESESB. V. 1, p. 213 a 221, 2003.

SALINO, P. J. **Energia Eólica no Brasil: Uma comparação do PROINFA e dos Novos Leilões.** (Graduação). Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro. p. 120, 2011.

SDPI; AGDPI. **Energia Eólica no Rio Grande do Sul.** p. 37, 2012.

SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÃO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas Eólico do Estado do Rio Grande do Sul.** CDU 62-67(816.5). p. 70, 2002.

TROEN, I.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas.** ISBN 87-550-1482-8. p. 656, 1989.

VERGARA, R. F. **Análise Estrutural de Torres Anemométricas e de Sustentação de Turbinas Eólicas**. (Mestrado). Engenharia Oceânica, Fundação Universidade do Rio Grande. p. 161, 2005.

VITERBO, J. C. **Geração de Energia Elétrica a partir da Fonte Eólica Offshore**. (Mestrado). Engenharia Naval Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. p. 168, 2008.