

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

MESTRADO EM TECNOLOGIA

ADRIANA LUCAS ALCARAZ LÓPEZ

**A IMPORTÂNCIA DA ENERGIA EÓLICA NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NO
BRASIL**

SÃO PAULO

DEZEMBRO – 2011

ADRIANA LUCAS ALCARAZ LÓPEZ

**A IMPORTÂNCIA DA ENERGIA EÓLICA NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NO
BRASIL**

Dissertação apresentada como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia no Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no programa de mestrado em tecnologia: Gestão, Desenvolvimento e Formação, sob orientação do Professor Dr. Dirceu D'Alkmin Telles.

SÃO PAULO

DEZEMBRO – 2011

A348i López, Adriana Lucas Alcaraz

A importância da energia eólica na produção de
eletricidade no Brasil / Adriana Lucas Alcaraz López. –
São Paulo : Fatec-SP, 2011.

94 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dirceu D'Alkmin Telles.

Dissertação (Mestrado) – Centro Estadual de
Educação Tecnológica Paula Souza, 2011.

1. Fontes de energia renováveis e não renováveis. 2.
Eletricidade. 3. Energia eólica. I. Telles, Dirceu D'Alkmin.
II. Faculdade de Tecnologia de São Paulo. III. Título.

Avaliação

Adriana Lucas Alcaraz López

A importância da energia eólica na produção de eletricidade no Brasil

Prof. Dr. Dirceu D'Alkmin Telles

Prof. Dr. Dirceu Brasil Vieira

Prof. Dr. Alfredo Colenci Junior

São Paulo, Dezembro de 2011

Dedicatória

Aos meus familiares, pelo incentivo para iniciar este magnífico aprendizado. Em especial ao meu esposo Leonardo, pelo apoio e ajuda a busca de informações para a realização deste trabalho.

Agradecimentos

Aos professores, Elisabeth Pelosi, Silvia Irazusta e Dirceu Telles, do programa de pós-graduação do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, pela troca de experiências e pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários do mesmo programa, em especial a Cleonice Viana, pelo carinho e dedicação prestada nesta jornada.

Resumo

López, A. L. A. A importância da energia eólica na produção de eletricidade no Brasil. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2012.

Este trabalho contém os resultados de pesquisa sobre os problemas ambientais causados pela utilização e extração de fontes de energia não renováveis, nos últimos anos. Apresenta a situação atual de consumo de energia primária no mundo e no Brasil por fonte energética. Descreve os tipos e os processos de transformação das fontes de energia não renováveis e renováveis em eletricidade, com ênfase na energia eólica, considerada renovável e alternativa. Inclui a origem e evolução dos aerogeradores, a descrição do sistema eólico, os princípios e os métodos de cálculo do potencial elétrico. Apresenta o levantamento da matriz energética do Brasil e o potencial eólico *onshore* e *offshore* nas costas sul e sudeste do país para geração de eletricidade.

Palavras chave: fontes de energia, não renováveis, renováveis, eletricidade, energia eólica.

Abstract

López, A. L. A. The importance of wind energy in electricity production in Brazil. 2011. 94 f. Dissertation (Master of Technology) - Technological Education State Center Paula Souza, São Paulo, 2012.

This paper contains a brief account of the environmental problems caused by the use and extraction of non-renewable energy sources in recent years. Shown the current situation of primary energy consumption in the world and in Brazil by energy source. Describes the types and processes of transformation of non-renewable energy sources and renewable in electricity, with an emphasis on wind energy, renewable and alternative considered, including the origin and evolution of wind turbines, the description of the wind system, the principles and methods calculation of the potential. Presents a survey of Brazil's energy matrix and the off shore wind potential and on shore on the south coast and southeast to electricity production.

Keywords: energy sources, renewable, nonrenewable, wind energy.

Lista de tabelas

Tabela 1 – Reserva mundial de urânio em 2007	35
Tabela 2 – Classificação do carvão mineral	35
Tabela 3 – Valores típicos de comprimentos característicos de rugosidade	64
Tabela 4 – Quantidade de energia primária consumida no Brasil em 2010, de acordo com a fonte energética	72
Tabela 5 – Potencial eólico onshore brasileiro	75
Tabela 6 – Potencial eólico offshore da costa sul e sudeste, de acordo com a distância da costa	78
Tabela 7 – Situação atual dos empreendimentos eólicos onshore	79
Tabela 8 – Conversão de unidades	93
Tabela 9 – Unidades equivalentes	94

Lista de figuras

Figura 1 – Distribuição Mundial do PIB Nominal “ <i>per capita</i> ” em 2010	22
Figura 2 – Consumo mundial “ <i>per capita</i> ” de energia primária no mundo em 2010 ..	23
Figura 3 – Consumo mundial de energia primária por fonte energética em 2009 e 2010.....	24
Figura 4 – Principais consumidores de energia primária do mundo em 2010	24
Figura 5 – Distribuição do consumo de energia primária no Brasil em 2010, de acordo com a fonte energética	25
Figura 6 – Tipos de derivado de petróleo	27
Figura 7 - Esquema da produção de energia elétrica através da queima dos derivados de petróleo	28
Figura 8 - Reserva de petróleo mundial em 2007.....	29
Figura 9 - Movimentação de petróleo em 2010	30
Figura 10 - Esquema da produção de energia elétrica a partir da queima do gás natural.....	31
Figura 11 – Reserva mundial de gás natural em 2007	32
Figura 12 – Movimentação do gás natural em 2010.....	33
Figura 13- Esquema da produção de energia elétrica a partir de átomo de urânio ...	34
Figura 14 - Esquema da produção de energia elétrica a partir da queima do carvão mineral.....	36
Figura 15 – Reserva mundial de carvão mineral em 2007	37
Figura 16 - Esquema da produção de energia elétrica a partir da água.....	38
Figura 17 – Potencial hidrelétrico por bacias em 2008	39
Figura 18 – Diagrama esquemático da conversão energética da biomassa	40
Figura 19 – Esquema da produção de energia elétrica a partir da queima da biomassa	41
Figura 20 – Esquema da produção de energia elétrica a partir da energia solar	43

Figura 21 – Variação de energia solar.....	44
Figura 22 – Esquema da produção de energia elétrica a partir da geotérmica	45
Figura 23 – Esquema da produção de energia elétrica a partir do movimento das marés.....	46
Figura 24 – Esquema da produção de energia elétrica a partir do vento	47
Figura 25 – Evolução do diâmetro do aerogerador em relação a sua capacidade nominal de geração.	49
Figura 26 – Tipos de aerogeradores	50
Figura 27 – Nacele de um aerogerador.....	51
Figura 28 – Exemplo de medição do vento por anemógrafos	55
Figura 29 – Representação das rosas dos ventos	56
Figura 30 – Representação espectral do vento	57
Figura 31 – Representação da frequência de ocorrência de velocidade de vento	59
Figura 32 – Representação da frequência de ocorrência baseada na distribuição de Weibull.....	60
Figura 33 – Representação da função linearizada (X,Y)	62
Figura 34 – Representação da densidade de potência	66
Figura 35 – Representação da distância segura de afastamento entre turbinas.....	68
Figura 36 – Escoamento na zona que envolve o obstáculo	68
Figura 37 – Característica elétrica de um gerador eólico de 660 KW.....	70
Figura 38 – Velocidade média anual de ventos <i>onshore</i> no Brasil (m/s).....	73
Figura 39 – Potencial eólico <i>onshore</i> brasileiro por regiões	76
Figura 40 – Velocidade do vento na costa sul sudeste do Brasil.....	77
Figura 41 – Velocidade e direção dos ventos <i>offshore</i> – Satélite QuikSCAT (m/s)...	78
Figura 42 – Usinas eólicas instaladas na região nordeste.....	80
Figura 43 – Velocidade média anual de ventos terrestres na região nordeste (m/s).	80
Figura 44 – Usinas eólicas instaladas na região sudeste	81
Figura 45 – Velocidade média anual de ventos terrestres na região sudeste (m/s) ..	81

Figura 46 – Usinas eólicas instaladas na região sul	82
Figura 47 – Velocidade média anual de ventos terrestres na região sul (m/s)	82
Figura 48 – Velocidade média anual de vento terrestres na região norte (m/s)	91
Figura 49 – Velocidade média anual de ventos terrestres na região centro-oeste (m/s)	91
Figura 50 – Direções predominantes de ventos terrestres	92
Figura 51 – Modelo de rugosidade (m).....	92

Lista de abreviaturas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

OECD - Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (composto por Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Coreia do Sul, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos da América, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Islândia, Israel, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República da Irlanda, Suécia, Suíça e Turquia).

ANP – Agência Nacional do Petróleo

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

SO₂ – Dióxido de Enxofre

m/s – Metros por segundo (medida de velocidade)

PIB – Produto Interno Bruto

IMF – International Monetary Found (Fundo Monetário Internacional)

BP – British Petroleum

PNE – Plano Nacional Elétrico

WEC – World Energy Council (Conselho Mundial de Energia)

Mtoe – Milhões de toneladas de óleo equivalente

TW – Terawatts (equivalente a 10^{12} Watts)

GW – Gigawatts (equivalente a 10^9 Watts)

MW – Megawatts (equivalente a 10^6 Watts)

KW – Kilowatts (equivalente a 10^3 Watts)

TWh – Terawatts hora

W – Watts (medida de potência)

Sumário

Introdução.....	16
1. Objetivo	19
2. Revisão da literatura	20
2.1. Importância da energia.....	20
2.2. Consumo de energia	21
2.3. Fontes de energia	26
2.3.1. Fontes de energia não renováveis	26
2.3.2. Fontes de energia renováveis	38
2.3.3. Aspectos tecnológicos dos sistemas de energia eólica.....	48
2.3.4. Matriz energética do Brasil.....	71
3. A energia eólica no Brasil.....	73
3.1. Potencial e programação de produção de energia eólica	73
3.2. Estágio atual	79
4. Considerações finais	83
5. Conclusões	84
Referências bibliográficas.....	85
Anexos.....	90

Introdução

Durante todo o século XX, a oferta de energia, obtida principalmente a partir dos combustíveis fósseis, como derivados de petróleo e carvão mineral, deu suporte ao crescimento e as transformações da economia mundial (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Esta enorme dependência de fontes não renováveis de energia para o desenvolvimento socioeconômico tem gerado inúmeras preocupações, como o seu esgotamento, a emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) (SILVA *et al.*, 2003) e dióxido de enxofre (SO₂) (BRAGA *et al.*, 2002) na atmosfera através da queima dos combustíveis de origem fósseis para a geração de energia elétrica, além da impossibilidade de controlar os acidentes causados na extração e na utilização destas fontes energéticas.

Importantes acidentes ligados à extração de fontes energéticas e a geração de energia elétrica ocorreram nestes últimos tempos, causando impactos ambientais irreversíveis ao meio ambiente.

Em 1979, após o aquecimento do reator da usina nuclear de Three Mile Island, Pensilvânia - Estados Unidos, foram lançados milhares de litros de água radioativa no rio Susquehanna, além de gases radioativos na atmosfera. Essa radioatividade alcançou um raio de 16 km da usina (TMI, 1979).

Em 1986, após a explosão do reator da usina nuclear de Chernobyl, Ucrânia, foi liberada uma nuvem radioativa (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2011). Neste acidente, o nível de radiação foi centenas de vezes maior do que a bomba atômica de Hiroshima no Japão (DUPUY, 2007)

Em 1989, o navio petroleiro Exxon Valdez, naufragou na costa do Alaska, após colidir com um recife de corais, derramando cerca de 260 milhões de barris de óleo. A mancha de óleo alcançou 1.200 quilômetros quadrados, causando o óbito de 250.000 aves marinhas e 2.800 lontras, entre outros animais (DISCOVERY BRASIL, 2011).

Em 2010 no Golfo do México, após a explosão da plataforma da British Petroleum, houve um vazamento de aproximadamente cinco milhões de barris de petróleo, afetando a fauna local (THE NEW YORK TIMES, 2010).

Recentemente, em 2011, o mundo pôde assistir a catástrofe do acidente nuclear de Fukushima, no Japão, onde após um tsunami, ocorreram avarias no sistema de refrigeração da usina, ocasionando a explosão de parte dela. Em um raio de dezenas de quilômetros dos reatores, ainda se encontram vapores radioativos (BBC, 2011).

O governo Japonês solicitou que a população em um raio de 30 km evacuasse suas casas (AIEA, 2011). Até o momento não se sabe quais serão as reais conseqüências desta catástrofe.

Ainda em 2011, a Bacia de Campos sofreu um grave acidente, gerado pela companhia Chevron. Segundo a companhia, o derramamento de óleo ocorreu porque a parede do reservatório se rompeu em razão da pressão exercida pela lama injetada no poço, procedimento habitual na exploração de petróleo. O petróleo alcançou a superfície após encontrar fraturas geológicas que propiciaram o contato com a água do oceano. Este acidente, segundo a ANP, Agência Nacional do Petróleo, poderá ter proporções gigantescas (DIÁRIO DO GRANDE ABC, 23/11/2011).

Por outro lado, as hidrelétricas, considerada, até pouco tempo atrás, renováveis e sustentáveis, vem sendo reclassificada como não sustentável. Um dos problemas deste tipo de geração é a falta de água em meses de estiagem para a geração de energia elétrica, e a alteração do micro clima, da fauna e da flora da região, causada pela área inundada para a formação do reservatório (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2005), ao que se somam aos problemas de assoreamento do reservatório.

No Brasil, a usina hidrelétrica de Belo Monte, prevista para ser implementada no Rio Xingu, com o objetivo de aumentar a capacidade de geração de energia no país, vem sendo alvo de pressão popular. A comissão interamericana de direitos humanos da organização dos estados americanos solicitou ao governo brasileiro a suspensão do processo de licenciamento ambiental da hidrelétrica com o

objetivo de proteger as comunidades indígenas da Bacia do Rio Xingu (O ESTADO DE SÃO PAULO, 07/04/2011).

Em busca de um equilíbrio entre desenvolvimento socioeconômico dos países e a proteção do meio ambiente, técnicas de geração de eletricidade, através de fontes alternativas e renováveis, como biomassa, solar, biogás, geotérmica, marés e eólica, estão sendo estudadas e desenvolvidas, para que rompam o forte conflito de interesses, onde aparentemente, a visão econômica leva vantagem sobre a socioambiental.

Surge como alternativa válida, dado o atual estágio de desenvolvimento tecnológico, a energia eólica, que atualmente, é considerada como a mais promissora fonte de energia renovável.

Grandes parques eólicos vêm sendo implantados no mundo, principalmente na Alemanha, Dinamarca, Holanda e, mais recentemente, no Reino Unido e na Espanha (CASTRO, 2009), fato que direciona esta investigação.

1. Objetivo

O objetivo da presente pesquisa é caracterizar as potencialidades da energia eólica para geração de eletricidade no Brasil, especificamente, levantar o seu potencial e estágio de desenvolvimento em nosso país.

2. Revisão da literatura

2.1. Importância da energia

Nas sociedades primitivas, após a descoberta do fogo, a energia obtida através da queima da lenha era utilizada para aquecimento e atividades domésticas (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Durante a Idade Média, com a domesticação de animais foi proporcionada ao homem a energia mecânica, utilizada no transporte e na agricultura (SILVA *et al.*, 2003).

Energias obtidas através de cursos d'água e do vento também eram utilizadas, nesta época, para suprir algumas necessidades da população crescente nas cidades (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Com o advento da revolução industrial, no final do século XVIII, o homem e os animais foram substituídos por máquinas, aumentando a necessidade por mais energia. Para tanto, novas fontes energéticas, como o carvão mineral foram introduzidas (SILVA *et al.*, 2003), tendo como força motriz o vapor d'água.

Após a revolução industrial, no século XIX, foi descoberta a eletricidade, máquinas elétricas e veículos automotores foram inseridos na sociedade. Entretanto, para suprir essa nova demanda, foi introduzida outra fonte de energia, o petróleo, por ter um poder enérgico maior (SILVA *et al.*, 2003).

Desde então, para continuar o avanço do desenvolvimento, o consumo por fontes de energia de origem fósseis, se tornou indiscriminado, surgindo problemas ambientais graves, além da permanente preocupação com o esgotamento dessas fontes (SILVA *et al.*, 2003).

O efeito estufa e a chuva ácida, ocasionados pelo lançamento de CO₂ e SO₂ respectivamente na atmosfera (Braga *et al.*, 2002), gerados a partir da queima

de combustíveis fósseis, foram associados à forma que a sociedade utiliza essa fonte de energia (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

A partir desta triste realidade, nos primeiros anos do século atual, o cenário mundial mudou, com a necessidade de um desenvolvimento sustentável (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008), objetivando principalmente o conhecimento pleno do mecanismo da obtenção da energia, prevendo as consequências ambientais de sua utilização e da sua limitação (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

2.2. Consumo de energia

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Para mensurar a atividade econômica de um país, o indicador mais utilizado na macroeconomia é o produto interno bruto (PIB). Ele representa o valor total a preços correntes de bens e serviços finais, produzidos em um país durante um determinado período de tempo (INTERNACIONAL MONETARY FUND, 2011).

Dividindo este valor pela população do mesmo período, teremos o indicador “*per capita*”. A Figura 1 apresenta a distribuição mundial do PIB nominal por pessoa em 2010.

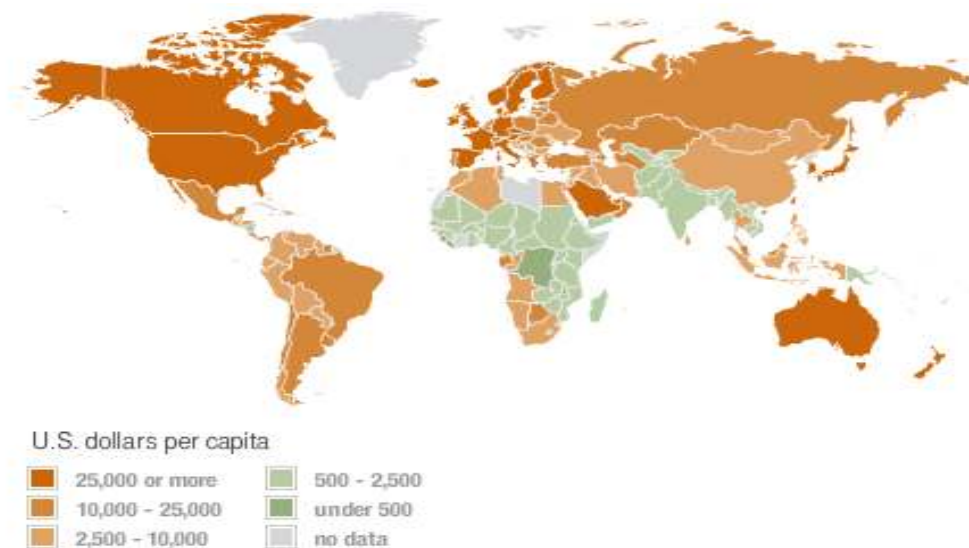


Figura 1 – Distribuição Mundial do PIB Nominal “*per capita*” em 2010
 Fonte: INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2011

A revisão estatística realizada pela British Petroleum em 2011, sobre o consumo mundial de energia primária, a qual é utilizada para a geração de energia elétrica, concluiu que predominam os países desenvolvidos na maioria dos grandes consumidores “*per capita*” de energia, em 2010.

Sendo que, os países pertencentes à Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD) são responsáveis pelo consumo de 46,39% do total de energia primária mundial.

A Figura 2 apresenta o consumo mundial, per capita, de energia primária em toneladas de óleo equivalente.

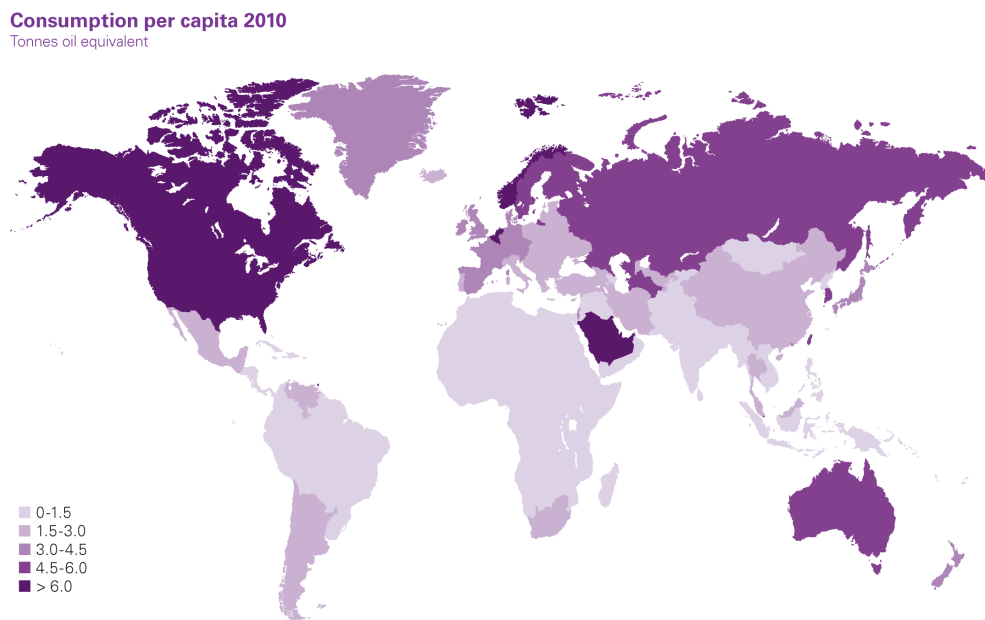


Figura 2 – Consumo mundial “*per capita*” de energia primária no mundo em 2010
Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2011

O consumo mundial de energia primária aumentou 5,3% em relação a 2009, ou seja, de 11.363,20 Mtoe (Milhões de toneladas de óleo equivalente), para 12.002,40 Mtoe em 2010, enquanto a população mundial cresceu de 6.809.972.000 para 6.892.319.000 habitantes, ou seja, 1,21% (POPULATION REFERENCE BUREAU, 2010), aproximadamente quatro vezes menor do que o crescimento do consumo de energia.

O estudo ainda demonstrou a dependência mundial para a geração de energia elétrica através de fontes não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural, apontando um consumo, em 2010, de respectivamente 33,56%, 29,62% e 23,81%, ou seja, 86,99% do total da energia primária mundial (BRITISH PETROLEUM, 2011).

A figura 03 representa o aumento do consumo, entre 2009 e 2010, das fontes energéticas mais consumidas.

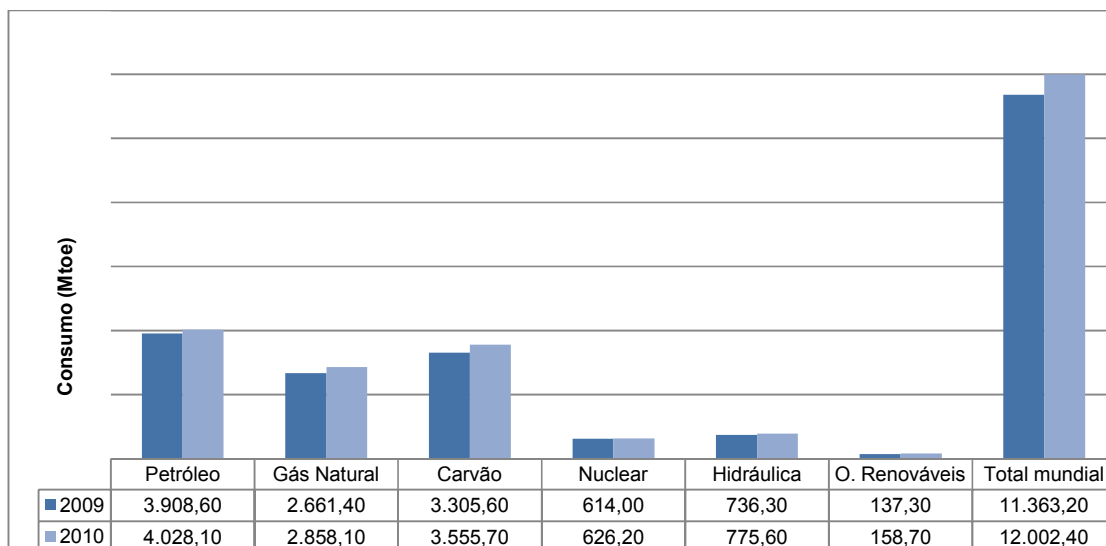


Figura 3 – Consumo mundial de energia primária por fonte energética em 2009 e 2010
 Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2011

Entre os países com os maiores consumo de energia primária do mundo, destacaram-se, de acordo com o estudo, China com 20% do total, seguido pelo Estados Unidos, Federação Russa, Japão, Índia, Canadá, Alemanha, França e Brasil, com 19%, 6%, 4%, 4%, 3%, 3%, 2% e 2% respectivamente, representando um consumo total de 65% de energia (Figura 4).

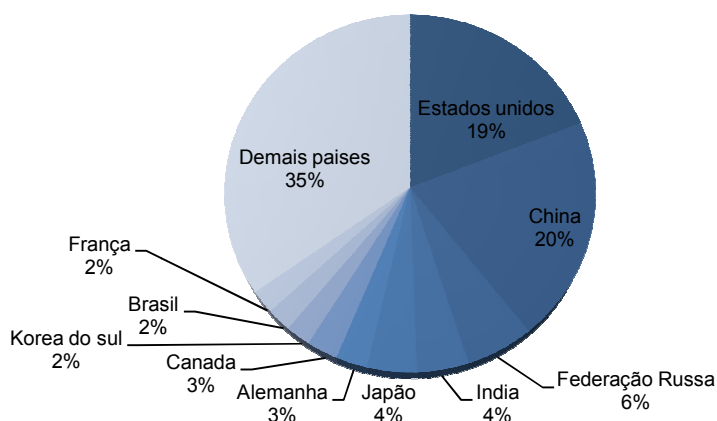


Figura 4 – Principais consumidores de energia primária do mundo em 2010
 Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2011

A China até 2009 consumia 2.187,70 Mtoe enquanto os EUA 2.204,10 Mtoe. Em 2010, a China alcançou o primeiro lugar entre os países que mais consomem no mundo, com 2.432,20 Mtoe contra 2.285,70 Mtoe dos EUA (BRITISH PETROLEUM, 2011).

O Brasil ocupou, de acordo com o estudo, o nono lugar entre os países com o maior consumo de energia primária e acompanhou a tendência mundial pelo consumo de derivados de petróleo para geração de eletricidade. Em 2010, 46% da energia consumida no Brasil eram provenientes do petróleo. A Figura 5 representa os percentuais das fontes de energia primária, mais consumidas no Brasil em 2010.

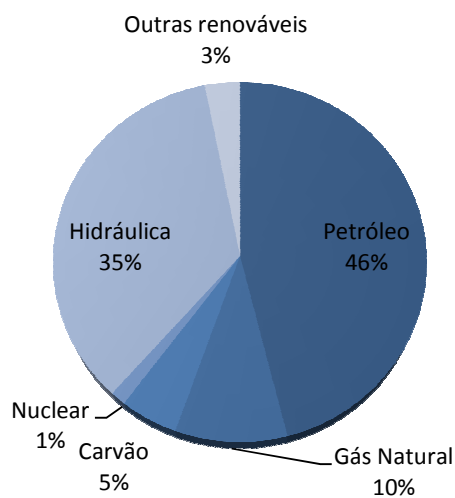


Figura 5 – Distribuição do consumo de energia primária no Brasil em 2010, de acordo com a fonte energética

Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2011

Em 2010, a geração de energia elétrica mundial, através da utilização destas fontes foi de 21.325 TWh, sendo os maiores geradores Estados Unidos, China, Japão, Federação Russa, Índia, Canadá, Alemanha, França, Coreia e Brasil, com respectivamente 4.325,90TWh, 4.206,54TWh, 1.145,26 TWh, 1.036,78 TWh, 922,24 TWh, 629,90 TWh, 621,00 TWh, 573,20 TWh, 497,22 TWh e 484,80TWh (BRITISH PETROLEUM, 2011).

2.3. Fontes de energia

As fontes de energia para geração de eletricidade são divididas em não renováveis e renováveis. A primeira é distribuída em derivados de petróleo, gás natural, energia nuclear e carvão mineral, e a segunda em hidráulica, biomassa, solar, geotérmica, marés e eólica.

2.3.1. Fontes de energia não renováveis

Derivados do petróleo

O petróleo é uma mistura de óleo cru, gás natural, e semi-sólido asfáltico, formado devido à decomposição da matéria orgânica, principalmente da marinha, a qual é composta de hidrogênio e carbono (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

Para que o petróleo bruto seja utilizado como fonte de energia, é necessário que ele passe por um processo de refino e seja transformado em combustíveis (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

De acordo com os diferentes pontos de ebulição, o petróleo bruto dá origem aos derivados, como coque, lubrificantes, óleos, querosene e gasolina, conforme ilustrado na Figura 6.

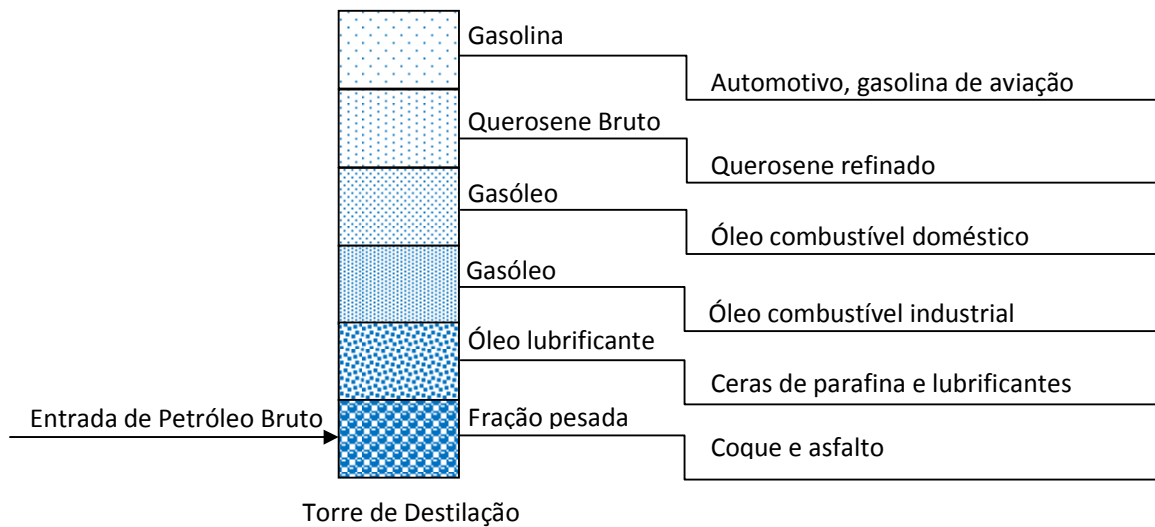


Figura 6 – Tipos de derivado de petróleo
 Fonte: HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010

Para transformar esta fonte de energia em eletricidade, os derivados de petróleo são queimados em uma câmara de combustão, em uma usina termoelétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O calor obtido nesse processo é utilizado para aquecer e aumentar a pressão da água, que se transforma em vapor, denominada de energia térmica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Este vapor movimenta as turbinas que transforma a energia térmica em energia mecânica. O gerador por sua vez, conectado a essa turbina, transforma a energia mecânica em energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Com a queima dos derivados de petróleo, são liberados na atmosfera, grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2) e de dióxido de enxofre (SO_2) (BRAGA *et al.*, 2002).

O enxofre é encontrado em conjunto com o petróleo e está relacionado à qualidade do óleo. O petróleo mais valioso é o leve, que possui pouca quantidade de enxofre (BRAGA *et al.*, 2002).

O esquema de produção de energia elétrica a partir da queima dos derivados de petróleo é representado na figura 7.

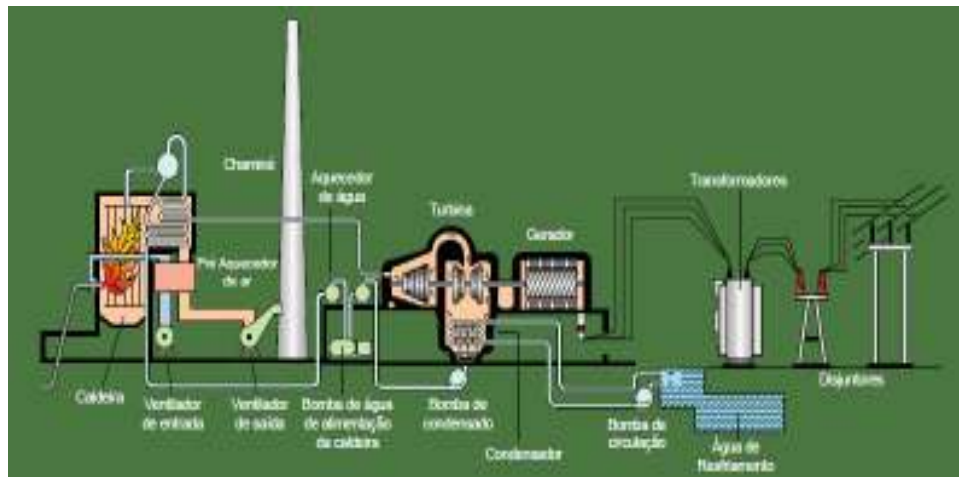


Figura 7 - Esquema da produção de energia elétrica através da queima dos derivados de petróleo

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

Segundo o estudo da British Petroleum de 2011, em 2010, as maiores reservas de petróleo se encontravam na Arábia Saudita, Venezuela, Iran, Iraque, Kuwait e Yemen, com o total de reservas mundiais de 19,10%, 15,30%, 9,90%, 8,30%, 7,30% e 7,10%, respectivamente. O Brasil possuía somente 1,00% dessas reservas, isto equivale a aproximadamente 2.000,00 Mtoe

A figura 8 ilustra a localização das reservas mundiais de petróleo em 2007.

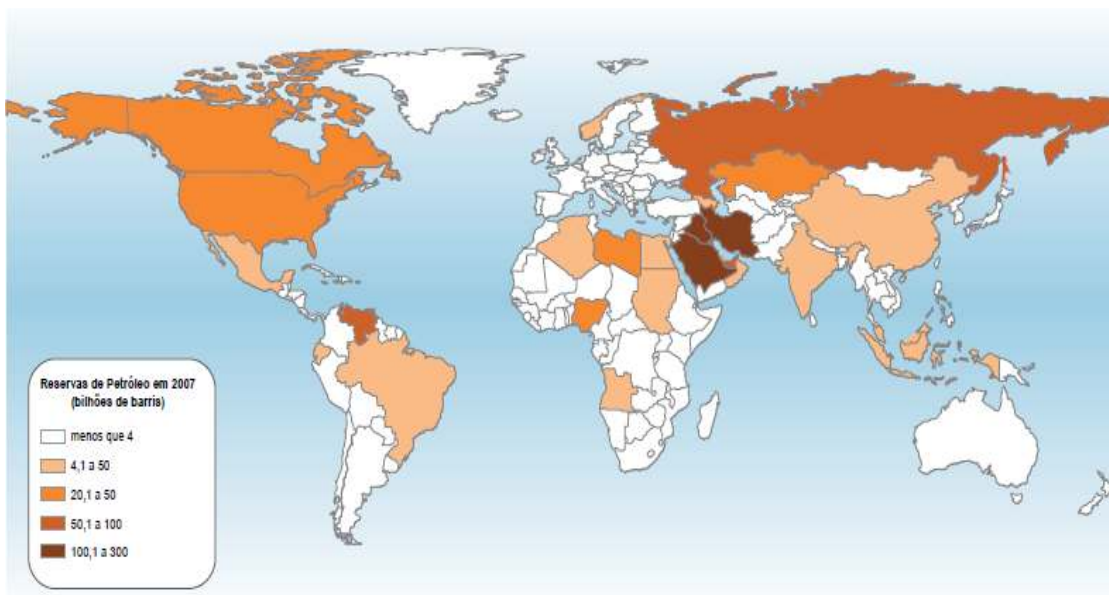


Figura 8 - Reserva de petróleo mundial em 2007

Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2009

Em 2010 foram produzidos, no Brasil, a quantidade de 105,70Mtoe (Milhões de toneladas de óleo equivalente) de petróleo e consumidos cerca de 116,90 Mtoe, ou seja, 10,60% a mais do produzido no país. (BRITISH PETROLEUM, 2011).

Para suprir o consumo adicional por petróleo, 11,20 Mtoe foram importados de outros países (BRITISH PETROLEUM, 2011).

A movimentação mundial, em 2010, de petróleo é representada na Figura 9.

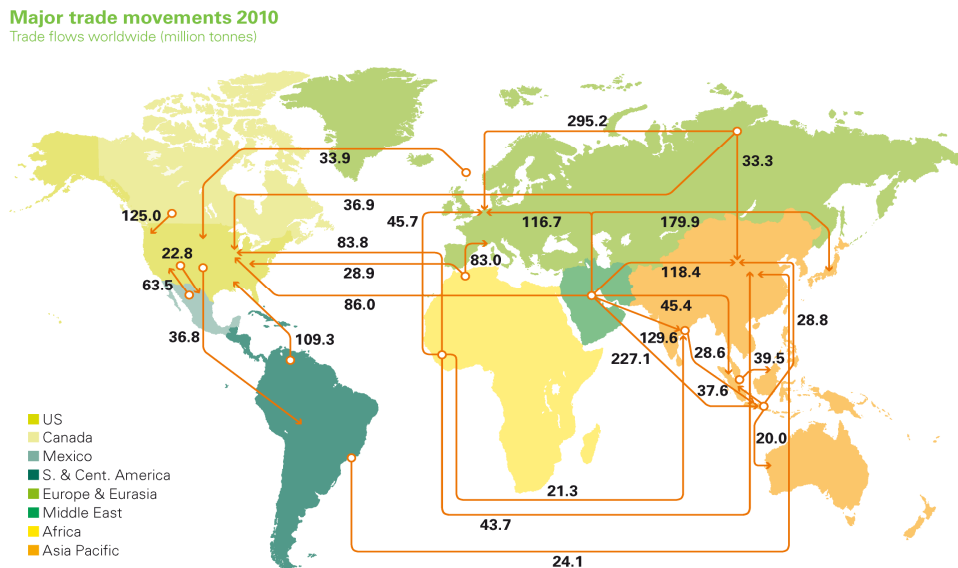


Figura 9 - Movimentação de petróleo em 2010

Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2011

Gás Natural

O gás natural pode ser encontrado em reservatórios em conjunto com outros materiais fósseis. Quando encontrado com petróleo, é denominado de gás associado e quando encontrado sozinho, é denominado de gás não associado (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

O gás natural é composto por uma mistura de hidrocarbonetos leves, e o gás metano (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

Em usinas termoeletricas, o gás natural é misturado ao ar comprimido, promovendo a combustão desta fonte de energia. A combustão resulta na emissão de gases em alta temperatura, denominada de energia térmica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Esta energia provoca o movimento das turbinas instaladas nas usinas, resultando em energia mecânica. As turbinas estão conectadas aos geradores de eletricidade, transformando a energia mecânica em energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O esquema de produção de energia elétrica a partir da queima do gás natural e representado na figura 10.

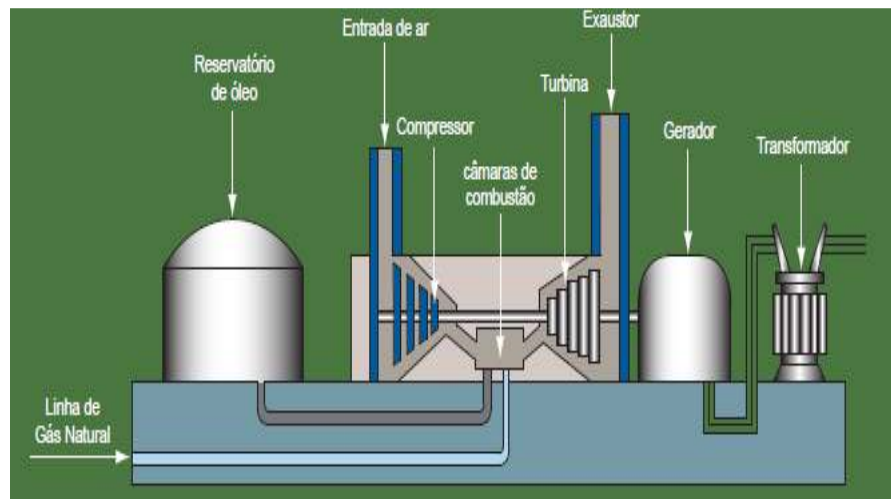


Figura 10 - Esquema da produção de energia elétrica a partir da queima do gás natural

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

Com a queima desta fonte em termoelétricas, são liberados na atmosfera em quantidade reduzida, dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de carbono (CO_2) se comparado a outras fontes energéticas de origem fóssil (BRAGA *et al.*, 2002).

As maiores reservas de gás natural se encontravam, em 2010, na Federação Russa, Iran e Qatar, com 23,90%, 15,80% e 13,50%, respectivamente de reservas, segundo o estudo realizado em 2011 pela British Petroleum.

O Brasil possuía somente 0,20% das reservas mundiais de gás natural, isto é, 359,25 Mtoe (Milhões de toneladas de óleo equivalente (BRITISH PETROLEUM, 2011).

A figura 11 ilustra a localização das reservas mundiais de gás natural em 2008.

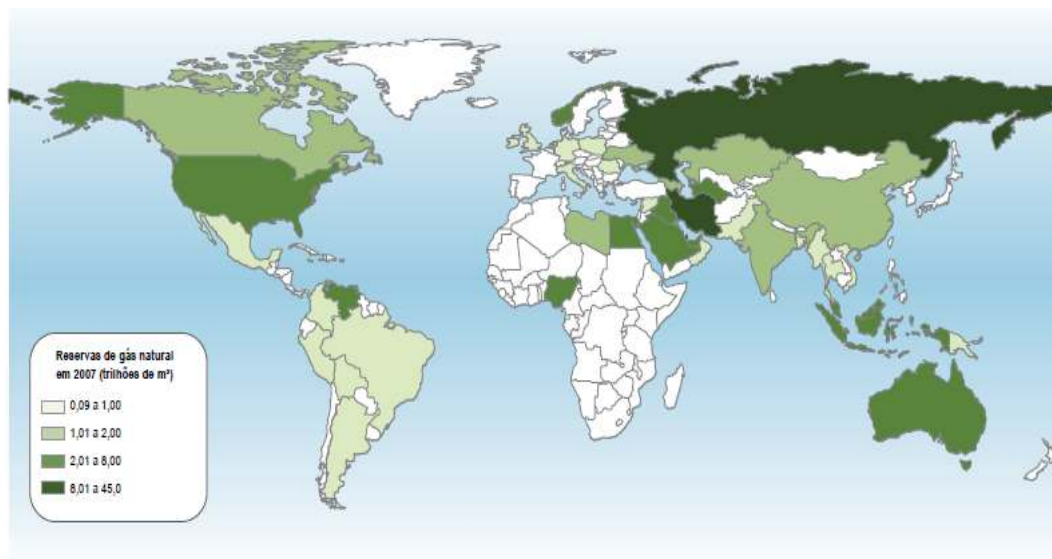


Figura 11 – Reserva mundial de gás natural em 2007
Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2009

Em 2010, o Brasil produziu 13,00 Mtoe (Milhões de toneladas de óleo equivalente) de gás natural e consumiu aproximadamente 23,80 Mtoe (BRITISH PETROLEUM, 2011).

Para suprir o consumo excedente por gás natural, cerca de 8,82 Mtoe foram importados da Bolívia através de gasoduto e 2,50 Mtoe dos Estados Unidos, Trinidad e Tobago, Peru, Bélgica, Guiné Equatorial, Nigéria, Qatar e Emirados Árabes Unidos como gás natural liquefeito (BRITISH PETROLEUM, 2011).

A movimentação mundial, em 2010, do gás natural é representada na Figura 12.

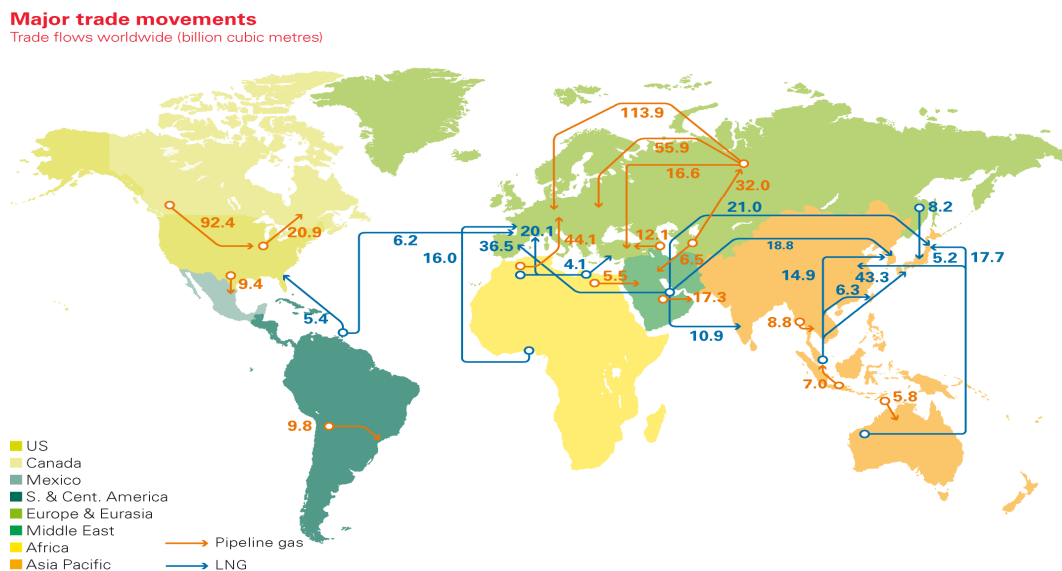


Figura 12 – Movimentação do gás natural em 2010

Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2011

Energia nuclear

Os minérios de urânio são retirados de minas com processo de extração igual à de outro minério. Após a sua extração, esse minério é levado a uma usina de enriquecimento, onde o urânio é separado dos outros elementos químicos, transformando-o em combustível, pronto para utilização (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

Em usinas termonucleares, o núcleo do átomo de urânio é submetido a um processo de fissão, divisão, para gerar a energia. Essa energia é liberada lentamente, manifestando-se sob a forma de calor. Esse calor aquece a água existente no interior dos reatores, produzindo vapor. Esse vapor movimenta as turbinas que estão conectadas aos geradores de eletricidade (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O esquema de produção de energia elétrica a partir do átomo de urânio é representado na figura 13.

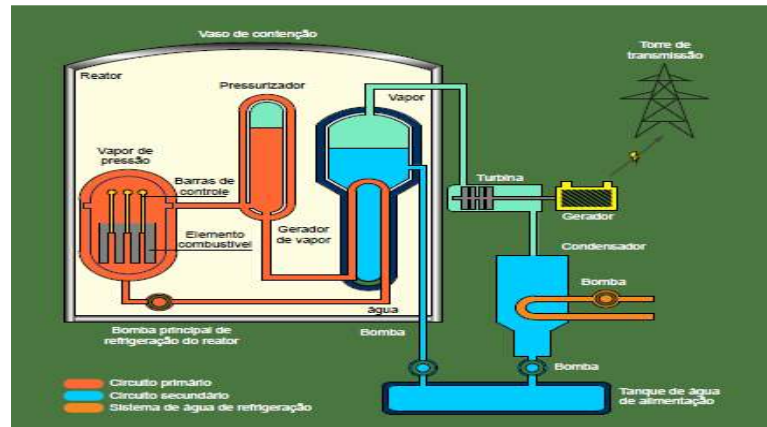


Figura 13- Esquema da produção de energia elétrica a partir de átomo de urânio
 Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

Este tipo de fonte não libera, na atmosfera, gases nocivos ao meio ambiente, mas em compensação, os resíduos nucleares têm que ser acondicionados e descartados de maneira segura. O decaimento radiativo leva muitos anos, entre 10.000 e 24.000 anos (BRAGA *et al.*, 2002).

Em 2010, no Brasil, foram consumidos e gerados 3,30 Mtoe e 14 TWh respectivamente, de energia nuclear (BRITISH PETROLEUM, 2011), sendo produzido por duas usinas, Angra I e II, com potência instalada de 657 MW e 1.350MW respectivamente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Em 2007, as maiores reservas de urânio se encontravam na Austrália, Cazaquistão, Canadá, Estados Unidos, África do Sul, Namíbia e Brasil, correspondendo 78,80% das reservas mundiais, como apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Reserva mundial de urânio em 2007

País	Quantidade (tU)
Australia	1.143.000
Cazaquistão	816.099
Canadá	443.800
Estados Unidos	342.000
Africa do Sul	340.596
Namibia	282.359
Brasil	278.700
Nigéria	225.459
Rússia	172.402
Ubequistão	89.836
Jordânia	78.975
Índia	64.840
Mongólia	61.950
China	59.723
Outros Países	227.588
Total	4.627.327

Fonte: WORLD ENERGY COUNCIL, 2007

Carvão mineral

O carvão mineral é formado a partir de material vegetal acumulado há milhões de anos (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010). Possui em sua composição, carbono, oxigênio, nitrogênio, enxofre, elementos rochosos e minerais (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

De acordo com a quantidade de carbono existente na sua composição, o carvão é classificado segundo a Tabela 2. Quanto maior o teor de carbono, maior é o poder calorífico.

Tabela 2 – Classificação do carvão mineral

Classificação	Teor de carbono %	Btu/lb
Lignito	30	5.000 – 7.000
Sub betuminoso	40	8.000 – 10.000
Betuminoso	50 – 70	11.000 – 15.000
Antracito	90	14.000

Fonte: HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010

O carvão mineral é empregado em usinas termelétrica utilizando o mesmo processo de transformação de energia térmica em mecânica e por fim em elétrica dos derivados de petróleo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O esquema de produção de energia elétrica a partir da queima de carvão mineral é representado na figura 14.

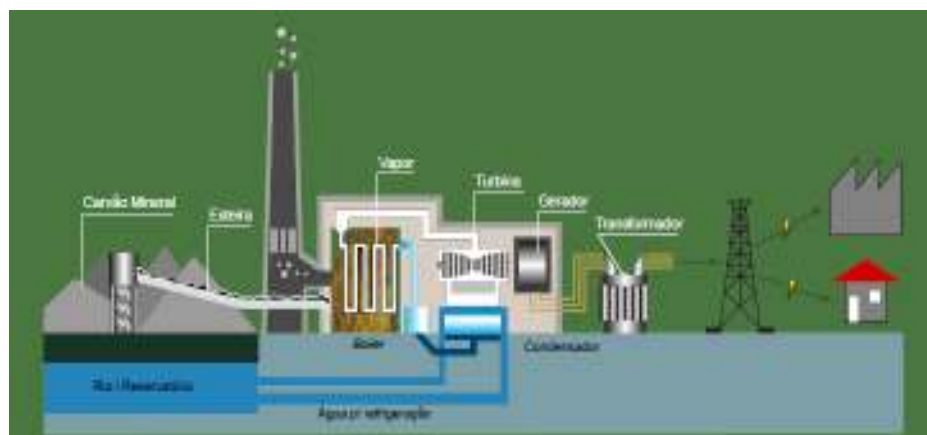


Figura 14 - Esquema da produção de energia elétrica a partir da queima do carvão mineral

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

Com a queima desta fonte em termoelétricas, são liberados na atmosfera em grande quantidade, óxido de enxofre (SO), óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de carbono (CO₂) (BRAGA *et al.*, 2002).

As maiores reservas de carvão mineral se encontravam, em 2010, na EUA, Federação Russa e China, com 27,60%, 18,20% e 13,30%, respectivamente da reserva mundial (BRITISH PETROLEUM, 2011).

A figura 15 ilustra a localização das reservas mundiais de carvão mineral em 2007.



Figura 15 – Reserva mundial de carvão mineral em 2007

Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2009

O Brasil, possuía somente 0,50% da reserva mundial de carvão mineral, isto é, 4.559 mil toneladas (BRITISH PETROLEUM, 2011).

Em 2010, foram produzidos no Brasil, 2,1 Mtoe e foram consumidos 12,40 Mtoe (BRITISH PETROLEUM, 2011). Para suprir o consumo excedente por carvão mineral, 10,3 Mtoe foram importados de outros países (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

2.3.2. Fontes de energia renováveis

Hidráulica

A energia hidráulica é produzida através do movimento da água, conhecida como energia cinética, que movimenta as turbinas da usina. Essa energia se transforma em mecânica, que por sua vez, através de geradores, é transformada em energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O esquema de geração de energia elétrica a partir da movimentação da água é demonstrado na Figura 16.

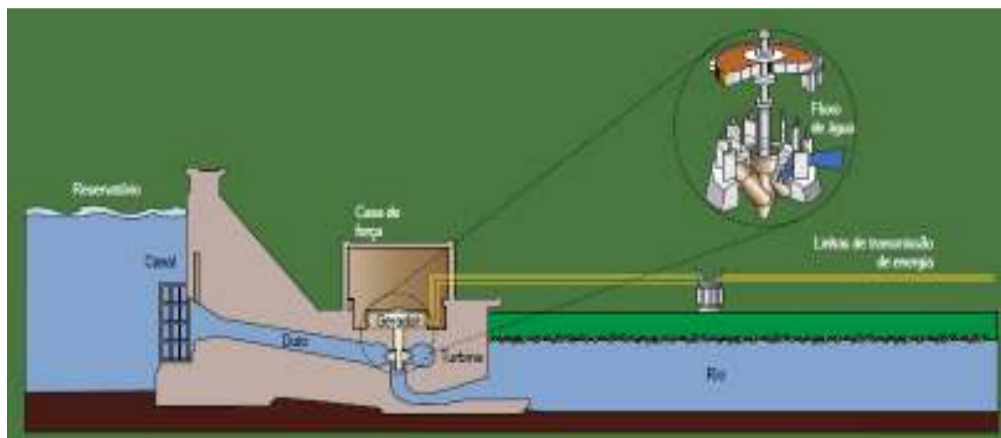


Figura 16 - Esquema da produção de energia elétrica a partir da água
Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005

Para a geração de eletricidade nas hidrelétricas é essencial a formação do reservatório, o qual causa impactos ambientais (BRAGA *et al.*, 2002), como a alteração do micro clima da região. Em períodos de estiagem, há uma diminuição do volume do reservatório e a geração é comprometida.

Em 2010, os países com maior produção de energia elétrica gerada a partir da água eram China com 163,10 Mtoe, Brasil com 89,60 Mtoe, Canadá com 82,90 Mtoe e Estados Unidos com 58,80 Mtoe (BRITISH PETROLEUM, 2011).

A figura 17 apresenta o potencial hidrelétrico (MW) do Brasil em 2008.

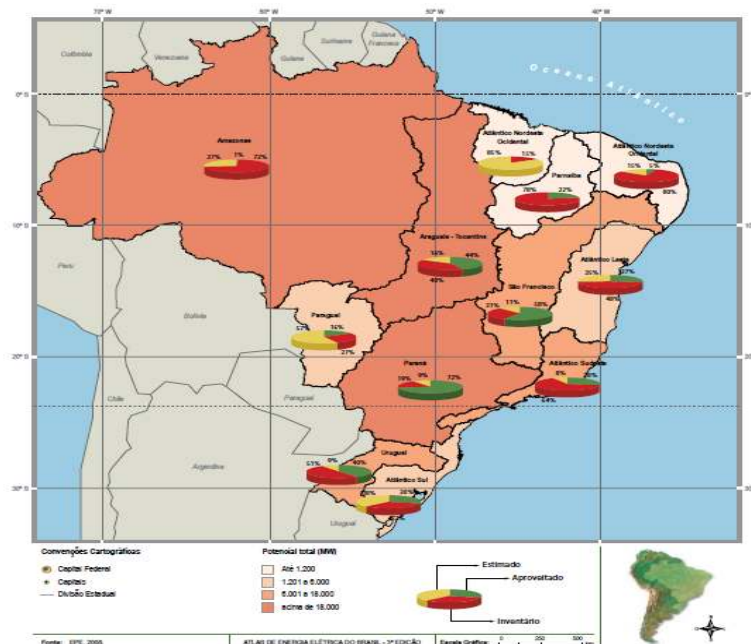


Figura 17 – Potencial hidrelétrico por bacias em 2008

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

Outras fontes renováveis

A energia gerada pela biomassa, solar, geotérmica e eólica são considerada pelo relatório de 2011 da British Petroleum, como outras fontes renováveis.

Os países com maior produção de energia utilizando estas fontes foram em 2010, Estados Unidos, Alemanha, Espanha e China, com 39,10, 18,60, 12,40 e 12,10 Mtoe respectivamente. O Brasil produziu segundo o relatório 7,90 Mtoe.

Biomassa

Energia de biomassa é aquela proveniente de matéria viva, como grãos, árvores, plantas, resíduos agrícolas e resíduos sólidos urbanos (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

De acordo com a fonte de biomassa, o processo de conversão energética é escolhida, conforme demonstrado na Figura 18.

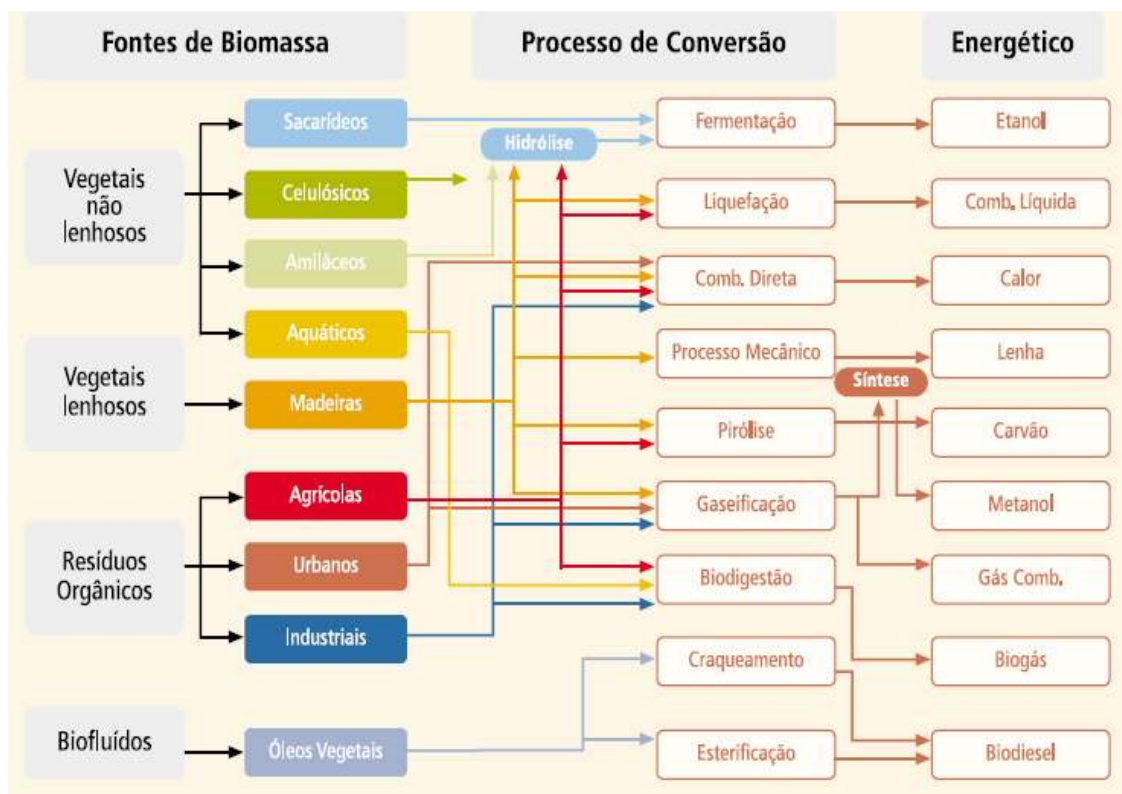


Figura 18 – Diagrama esquemático da conversão energética da biomassa

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 1982 *apud* AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008.

Há três técnicas para transformar a biomassa em energia elétrica, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008, ciclo de vapor com turbinas a compressão, condensação e extração, e ciclo combinado integrado.

A primeira consiste no emprego de forma integrada a processos produtivos por meio da co-geração, nele, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor. Este vapor pode acionar as turbinas usadas no trabalho mecânico requerido nas unidades de produção e em seguida a geração de energia elétrica.

O segundo consiste na condensação total ou parcial do vapor ao final da realização do trabalho na turbina para atendimento às atividades mecânicas ou térmicas do processo produtivo. Esta energia a ser condensada, quando inserida em um processo de co-geração, é retirada em um ponto intermediário da expansão do vapor que irá movimentar as turbinas.

E por fim, o terceiro, a gaseificação é a conversão do sólido em qualquer combustível líquido ou sólido, como a biomassa, em gás energético por meio da oxidação parcial em temperatura elevada. Esta conversão, realizada em gaseificadores, produz um gás combustível que pode ser utilizado em usinas térmicas movidas a gás para a produção de energia elétrica.

Após transformada, a biomassa é queimada em uma termoelétrica, gerando a energia elétrica, conforme de ilustrado na Figura 19.

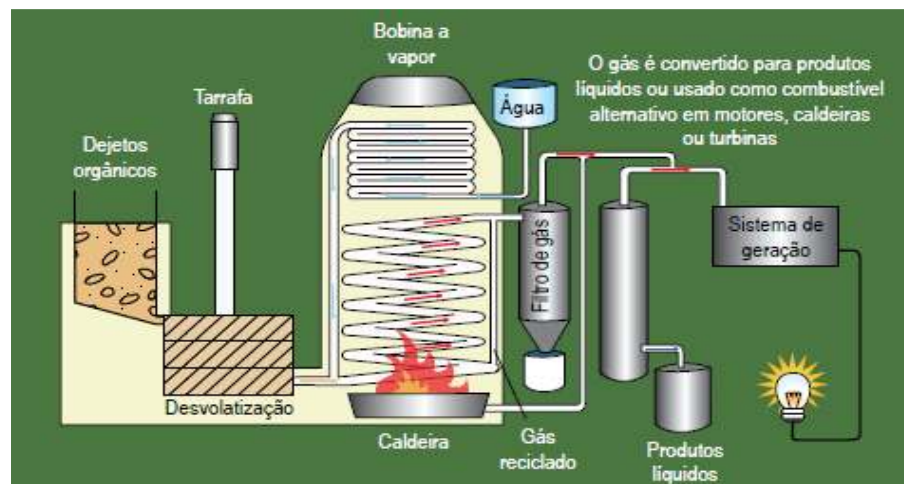


Figura 19 – Esquema da produção de energia elétrica a partir da queima da biomassa

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

No processo de geração de eletricidade é liberado na atmosfera, monóxido de carbono (CO), produzido através da queima da biomassa de vegetais lenhosos (BRAGA *et al.*, 2002).

De acordo com o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica, em novembro de 2008 existiam, no Brasil 302 termelétricas movidas à biomassa, que correspondem a um total de 5,7 GW (Gigawatts) instalados.

Do total de usinas relacionadas, 13 são abastecidas por licor negro, resíduo da celulose, com potência total de 944 MW, 27 por madeira, 232 MW, 3 por biogás, 45 MW, 4 por casca de arroz, 21 MW e 252 por bagaço de cana, 4 GW.

Uma das características desses empreendimentos é o pequeno porte com potência instalada de até 60 MW, o que favorece a instalação nas proximidades dos centros de consumo e suprimento (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Solar

A energia solar chega à terra nas formas térmica e luminosa, ao passar pela atmosfera terrestre, a maior parte desta energia se manifesta sob a forma de luz visível de raios infravermelhos e de raios ultravioleta (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Para a produção de energia elétrica existem dois sistemas: heliotérmico e o fotovoltaico. No primeiro, a irradiação solar é convertida em calor que é utilizado em usinas termelétricas para a produção de eletricidade (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O processo completo compreende quatro fases: coleta da irradiação, conversão em calor, transporte e armazenamento e, finalmente, conversão em eletricidade. Já no sistema fotovoltaico, a transformação da radiação solar em eletricidade é direta. Para tanto, é necessário adaptar um material semiconductor, geralmente o silício, para que, na medida em que é estimulado pela radiação, permita o fluxo eletrônico, partículas positivas e negativas (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

A Figura 20 representa o esquema de captação da energia solar e a transformação em elétrica.

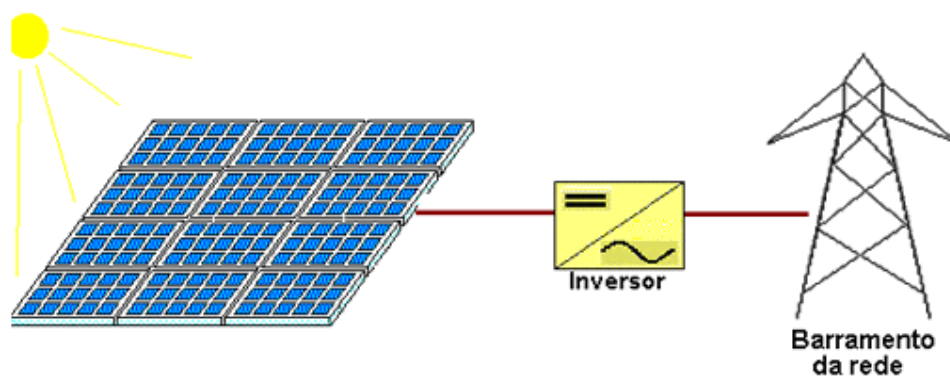


Figura 20 – Esquema da produção de energia elétrica a partir da energia solar
Fonte: CRESESB, 2006

A capacidade solar instalada no mundo em 2010 era de 39.777,80MW, liderados pelos países, Alemanha, Espanha, Japão, Itália e Estados Unidos com 1.77.320,00MW, 3.892,00 MW, 3.617,20 MW, 3.506,30 MW, 2.519,60 MW respectivamente (BRITISH PETROLEUM, 2011).

A Figura 21 apresenta a variação de energia solar no Brasil em 2007.

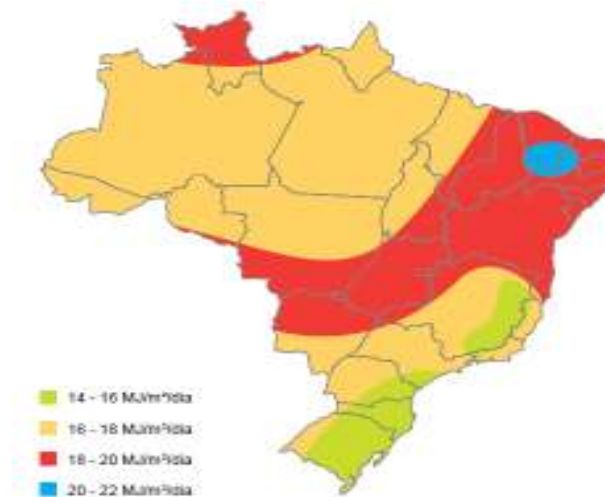


Figura 21 – Variação de energia solar

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2007 *apud* AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

O Brasil, apesar de possuir uma grande área com incidência solar, não produz energia elétrica por meio da energia solar, em escala comercial, somente para pequenas instalações utilizando sistemas fotovoltaicos (HINRICHS; LEINBACH; REIS, 2010).

Geotérmica

A energia geotérmica é aquela obtida pelo calor que existe no interior da Terra. Neste caso, os principais recursos são os gêiseres, fontes de vapor no interior da Terra que apresentam erupções periódicas, e, em localidades onde eles não estão presentes, o calor existente no interior das rochas para o aquecimento da água. A partir desta água aquecida é produzido o vapor utilizado em usinas termelétricas (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

A capacidade geotérmica instalada no mundo em 2010 era de 10.906,00 MW, liderados pelos países, Estados Unidos, Filipinas e Indonésia com 3.101,06 MW, 1.966,00MW e 1.189,00 MW respectivamente (BRITISH PETROLEUM, 2011).

O esquema de produção de energia através da energia geotérmica é apresentado na figura 22.

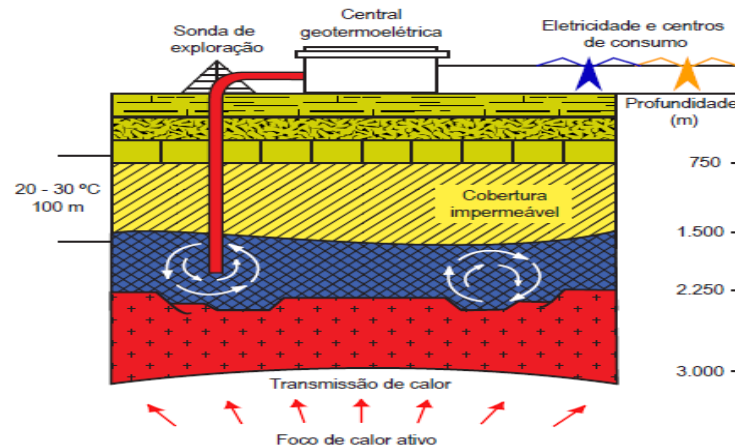


Figura 22 – Esquema da produção de energia elétrica a partir da geotérmica
Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

No processo de geração de eletricidade, utilizando esta fonte de energia, são emitidos amônia, gás sulfídrico e materiais radioativos, e são lançados compostos tóxicos em corpo hídrico receptor (BRAGA *et al.*, 2002).

No Brasil, não existem nenhuma forma de exploração deste tipo de energia, nem em forma experimental (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008), nem há planejamento estabelecido a respeito.

Marés

O potencial de geração de energia elétrica a partir do mar inclui o aproveitamento das marés, correntes marítimas, ondas, energia térmica e gradientes de salinidade, segundo o estudo sobre fontes alternativas inserido no plano nacional de energia 2030.

A eletricidade pode ser obtida a partir da energia cinética, do movimento, produzida pelo movimento das águas ou pela energia derivada da diferença do nível

do mar entre as marés altas e baixas (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

A figura 23 representa o esquema de produção de energia elétrica a partir do movimento das marés.



Figura 23 – Esquema da produção de energia elétrica a partir do movimento das marés

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008

No Brasil, há uma proposta de construir uma usina composta por 20 módulos, com capacidade de geração de 500 KW (Kilowatts) no litoral do Ceará (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Eólica

A energia eólica é, basicamente, aquela obtida da energia cinética, do movimento, gerada pela migração das massas de ar provocada pelas diferenças de temperatura existentes na superfície do planeta (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O esquema de produção da energia elétrica através da energia eólica é apresentado na Figura 24.



Figura 24 – Esquema da produção de energia elétrica a partir do vento
Fonte: EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2010

Em épocas de calmaria dos ventos, a geração de energia elétrica é prejudicada, sendo necessária a utilização de outras fontes energética para suprir a demanda por eletricidade (BRAGA *et al.*, 2002). As turbinas podem interferir negativamente na migração dos pássaros e no paisagismo da região.

A capacidade eólica instalada no mundo em 2010 era de 199.522,80MW incluindo, *onshore*, terrestre e *offshore*, no oceano. Os países que lideram essa capacidade são China, Estados Unidos, Alemanha e Espanha com 44.781 MW, 40.274 MW, 27.364 MW e 20.300 MW respectivamente (BRITISH PETROLEUM, 2011).

No Brasil, segundo relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica de 2008, a capacidade instalada era 1.261 MW.

2.3.3. Aspectos tecnológicos dos sistemas de energia eólica

Origem e evolução

Inicialmente a energia cinética, proveniente do vento, era utilizada pelos povos antigos, na moagem de cereais, técnica conhecida como moinho de vento e na elevação da água, bombeamento.

Já o aproveitamento do vento para geração de energia elétrica se iniciou na Dinamarca em 1891, com o Professor Poul La Cour, com o objetivo de fornecer eletricidade às comunidades rurais. Somente entre os anos de 1930 e 1940, que surgiram os projetos de grande porte. Neste período, foram instaladas na Alemanha unidades com potências entre 50 e 70KW. Em 1931, na União Soviética foi instalada uma unidade de três pás, com 30 metros de diâmetro e 100 KW de potência (CARVALHO, 2003).

A primeira turbina eólica de grande porte foi instalada em 1941 nos Estados Unidos, composta por duas pás, com potência de 1,25MW, altura da torre de 35,60 metros e 53,30 metros de diâmetro (CARVALHO, 2003).

No início da década de 1950, na Alemanha, foi utilizada esta técnica para geração de eletricidade em grande escala, com turbinas eólicas de 10 metros de diâmetro e equipadas com geradores de 10KW (CARVALHO, 2003).

Após a primeira grande crise de preços do petróleo na década de 1970 e meados da década de 1980, diversos países desenvolveram pesquisas para o aproveitamento da energia eólica para geração de eletricidade (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

Em 1977 na Dinamarca, entrou em operação a unidade TVIN, composta por três pás, com 54 metros de diâmetro, gerador síncrono e potência de 2MW. Na Alemanha a unidade GROWIAN, com potência de 3MW, gerador assíncrono de duas alimentações, diâmetro de 100 metros e composta por duas pás. Nos Estados Unidos, em 1987, a unidade BOEING MOD 5-B com 3,2 MW, diâmetro de 97 metros e composta por duas pás (CARVALHO, 2003).

No Brasil, em 1980, em conjunto com os institutos de pesquisa aeroespacial do Brasil e da Alemanha foi desenvolvida a turbina DEBRA (Deutsche Brasileira) (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001), primeiros passos para a utilização desta fonte de energia no país.

O primeiro parque eólico marítimo foi instalado em 1991 na Dinamarca com potência de 4,95 MW (CARVALHO, 2003), localizado no Mar Basáltico a 2 Km da costa terrestre, composto por 11 turbinas (CASTRO, 2009).

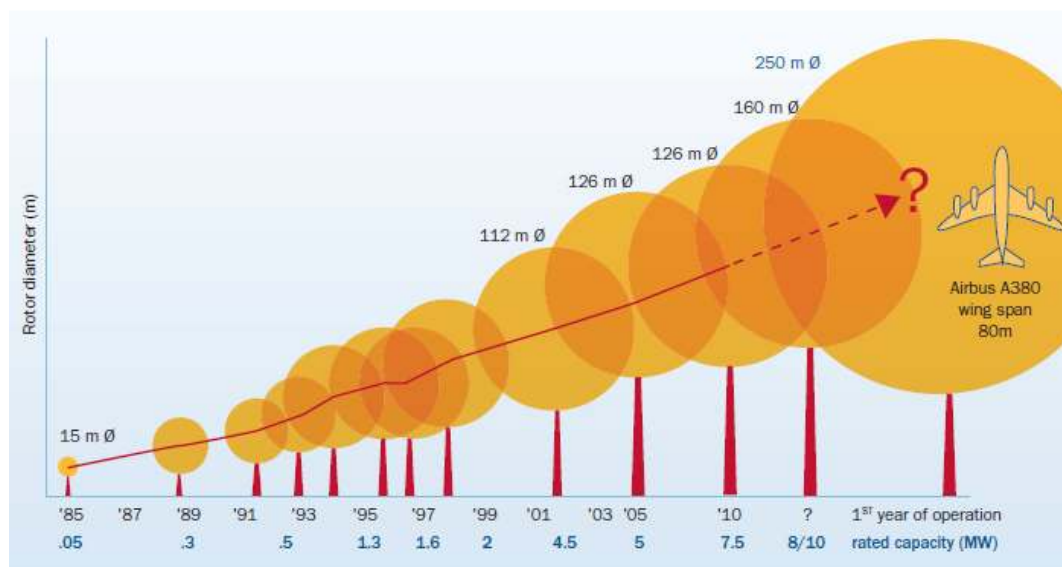


Figura 25 – Evolução do diâmetro do aerogerador em relação a sua capacidade nominal de geração.

Fonte: UPWIND, 2011

Com o passar dos anos, houve um aumento da capacidade nominal de geração de energia elétrica dos aerogeradores, Figura 25. Desta maneira, foi possível reduzir a quantidade de aerogeradores, ocasionando à redução dos custos de investimentos com infra-estrutura, tanto na instalação elétrica como na construção civil. Além de causar um impacto visual menor (CASTRO, 2009).

Sistema eólico

O sistema eólico é composto por aerogerador, transmissão, controle e sistema de abastecimento (ALDABO, 2002).

A pressão do vento faz girar um rotor composto por pás. Esse rotor está conectado a um eixo que por sua vez está interligado a um gerador elétrico por meio de engrenagens (HINRINKS; LEINBACH; REIS, 2010).

Há dois tipos de aerogeradores para geração de energia elétrica, os rotores de eixo vertical e os de eixo horizontal. Os de eixo vertical possuem a engrenagem e gerador ao nível do solo e os de eixo horizontal possuem a engrenagem e gerador apoiado sobre uma torre, (CARVALHO, 2003).

A Figura 26 ilustra os tipos de aerogeradores existentes

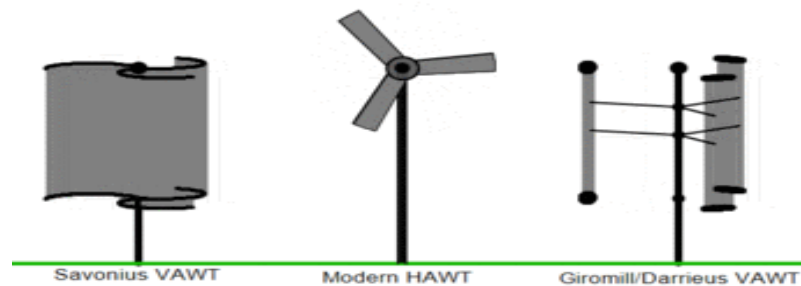
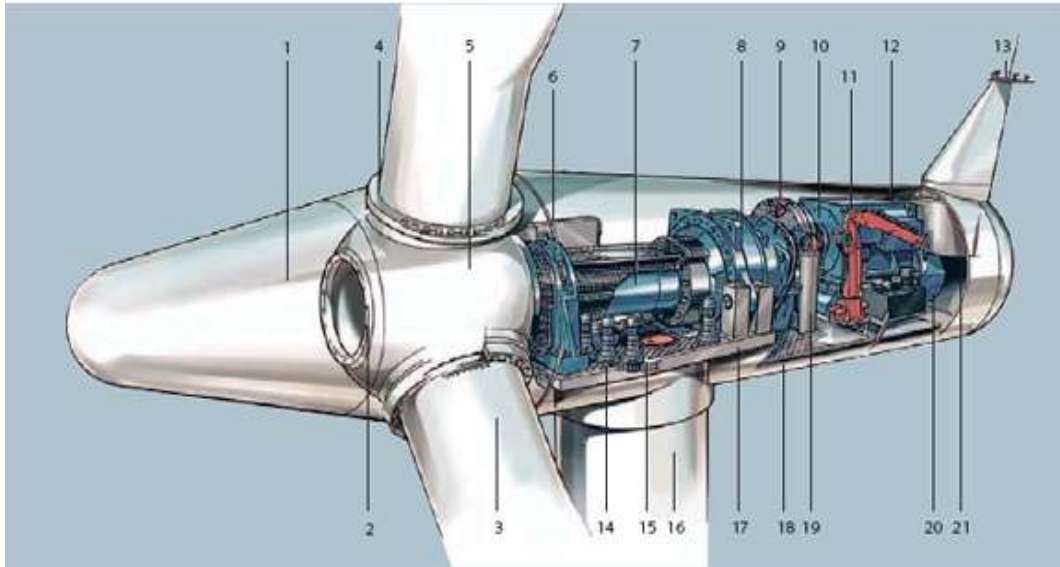


Figura 26 – Tipos de aerogeradores
Fonte: DESCONHECIDA

Os elementos que constituem um conjunto aerogerador horizontal compreendem principalmente de nacele e torre.

Os componentes da nacele de um aerogerador são apresentados na Figura 27.



1)Cone da hélice, 2)Suporte do cone, 3)Hélice, 4)Fixação da hélice no cubo, 5)Cubo do rotor, 6)Rolamento principal, 7)Eixo principal, 8)Multiplicador, 9)Disco de freio, 10)Acoplamento, 11)Guindaste de serviço, 12)Gerador, 13)Sensores meteorológicos, 14)Engrenagem de orientação, 15)Anel de orientação, 16)Torre, 17)Bancada do nacelle, 18)Dossel, 19)Filtro de óleo, 20)Ventilador do gerador, 21)Radiador de óleo

Figura 27 – Nacelle de um aerogerador

Fonte: SIEMENS, 2011

Segundo o autor Carvalho, 2003, as instalações eólicas para geração de energia elétrica possuem diversas classificações, tais como:

- Quanto ao abastecimento de carga:

1. Autônoma, o gerador eólico é o único responsável pelo fornecimento de energia elétrica para cargas que não possuem nenhum tipo de ligação com a rede elétrica.

2. Híbrida, o gerador eólico está associado a outras unidades geradoras, no fornecimento de energia elétrica para cargas que não possuem nenhum tipo de ligação com a rede elétrica.

3. Interligada a rede, quando o gerador eólico fornece energia para rede elétrica.

- Quanto ao número de pás:

1. Três pás com velocidade não superior a 70 m/s. Esse tipo de configuração é a mais utilizada por emitir menos ruído e diminuir os custos de operação, devido aos menores esforços mecânicos.

2. Duas pás, menor custo de investimento, maior geração de ruído e maiores custos de operação, devido aos maiores esforços mecânicos.

3. Uma pá, com velocidade de 120 m/s. Grande oscilação devido à rotação de uma única pá, maior emissão de ruído com relação as três configurações.

- Quanto à velocidade do rotor:

1. Constante, o gerador é conectado diretamente a rede, o que faz a rotação do rotor seja constante. Como a velocidade varia durante a operação, o coeficiente de potência apresenta um valor máximo para apenas uma velocidade.

2. Variável, com inversor entre o gerador e a rede. Ocorre o desacoplamento da frequência da rede em relação à rotação do motor. Essa operação possibilita que a velocidade seja mantida para cada velocidade de vento, no valor que conduz ao máximo coeficiente de potência.

- Quanto à caixa de engrenagens:

1. Com multiplicador, elemento que interliga a baixa rotação das pás e a alta rotação do gerador elétrico, geralmente de 4 a 6 pólos.

2. Acionamento direto, sem caixa de engrenagem, o eixo do rotor sendo o próprio eixo do gerador.

- Quanto à limitação do nível de potência:

1. Controle de passo, deslocamento angular das pás em torno do eixo longitudinal, possibilitando um ângulo de ataque constante.

2. Controle estol apresenta pás com ângulo de passo constante.

- Quanto à posição das pás em relação à torre:

1. A montante, o vento toca inicialmente as pás e em seguida a torre.
2. A jusante, o vento toca inicialmente a torre depois a pás.
 - Quanto ao mecanismo de acompanhamento da direção do vento:
 1. Via leme, leme situado a jusante do gerador.
 2. Via rotor lateral, pás laterais à nacele, cujo plano de rotação é perpendicular ao plano de rotação.
 3. Via motores, grupo de motores situado na base da nacele promove através das engrenagens a rotação da mesma em relação à torre.
 - Quanto ao tipo de gerador:
 1. Gerador síncrono, enrolamento de armadura no estator e enrolamento de campo no rotor.
 2. Gerador de indução funciona como um transformador, o qual transforma a potência elétrica entre o estator e o rotor, com a mudança de frequência.
 - Quanto à potência:
 1. Pequena potência, até 30 KW, utilizado para carregamento de baterias.
 2. Média potência de 100 a 500KW, mais utilizado em conexão a rede elétrica.
 3. Grande potência, acima de 1MW.
 - Quanto à localização:
 1. Parques terrestres, localizados sobre o continente, chamados de *onshore*;
 2. Parques marinhos, localizados sobre o mar, chamados de *offshore*.

Princípios da energia eólica

Os ventos são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre e marítima, ou seja, a radiação solar recebida na terra nas zonas equatoriais é maior do que nas zonas polares, estas movimentações de massas de ar quente e frio dão origem ao vento (CASTRO, 2009).

Segundo o mesmo autor, o atrito entre a superfície terrestre e o vento tem como consequência a redução da velocidade. As camadas mais baixas de ar retardam as que estão por cima, resultando numa variação da velocidade média do vento com a altura ao solo.

O efeito da força de atrito vai diminuindo até praticamente se anular. Esta altura é chamada como limite atmosférico, acima deste limite a atmosfera é chamada livre.

A camada de interesse para a instalação de turbinas eólicas em parques terrestres é chamada de superficial, com altura até 100 metros, onde a rugosidade e a topografia influenciam a velocidade do vento (CASTRO, 2009).

No mar o atrito é menor, portanto não há necessidade de instalação de torres altas, pois a velocidade do vento não varia muito com a altura (CASTRO, 2009).

Medições das velocidades dos ventos e direção

A medição da velocidade e da direção do vento é realizada através dos instrumentos chamados anemógrafos e sensores de direção, à altura que será instalada o cubo da turbina (CASTRO, 2009).

A Figura 28 exemplifica os registros de medição de vento por anemômetros

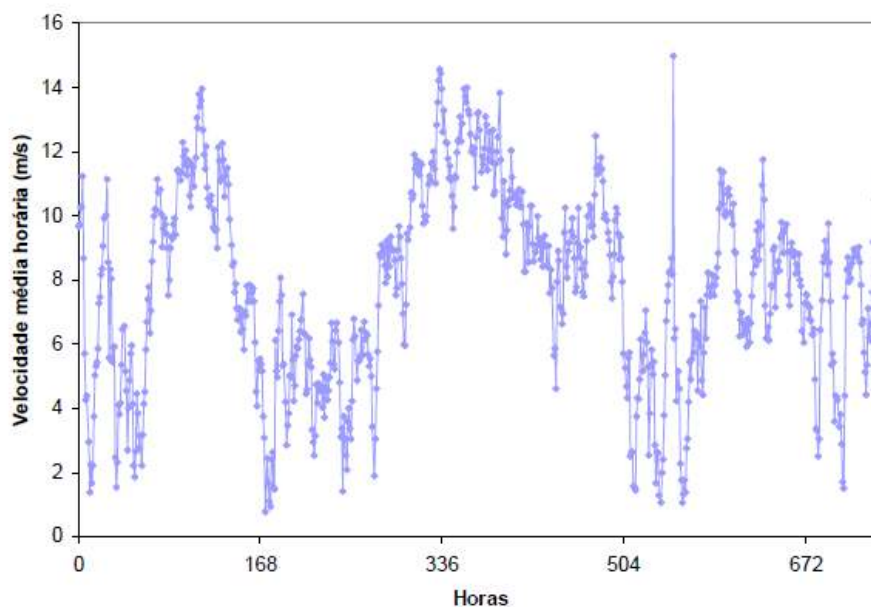


Figura 28 – Exemplo de medição do vento por anemógrafos
Fonte: CASTRO, 2008

A rosa-dos-ventos, ilustrada na Figura 29, apresenta:

- à proporcionalidade da frequência relativa com que o vento sopra naquela direção (1);
- a contribuição relativa da direção correspondente para a velocidade média do vento (2), e;
- a contribuição relativa daquela direção para a média do cubo da velocidade do vento (3).

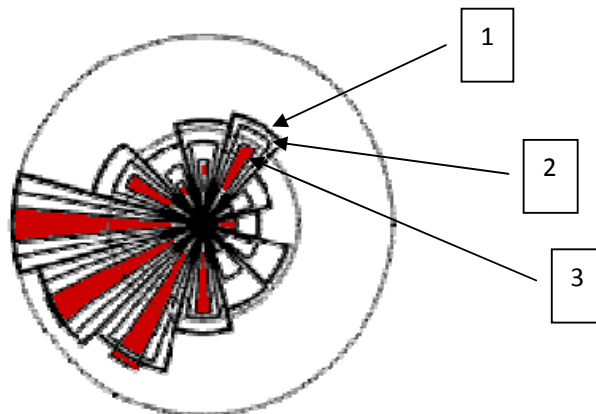


Figura 29 – Representação das rosas dos ventos
Fonte: CASTRO, 2008

Regimes de ventos

O vento pode ser descrito como domínio da frequência, ou seja, uma medida da energia cinética é associada a um componente horizontal da velocidade do vento (CASTRO, 2008)

O espectro de vento somente é válido para caracterizar a zona onde se efetuaram as medições. A Figura 30 representa o poder espectral da velocidade horizontal do vento.

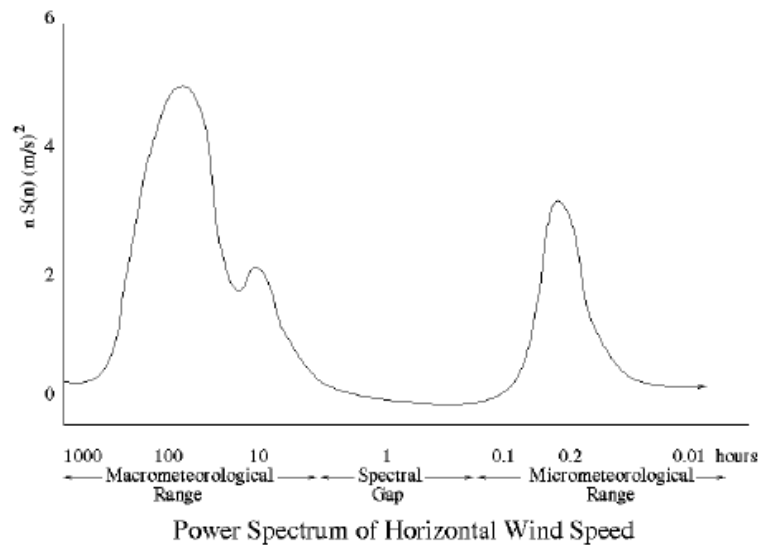


Figura 30 – Representação espectral do vento

Fonte: CASTRO, 2008

Na Figura 30, se verifica que há três regiões zonas distintas, sendo elas, a zona macro meteorológica, a zona do vazio espectral e a zona micro meteorológicas.

- Zona macro meteorológica, associada a frequências baixas (correspondendo a períodos da ordem de alguns dias) e relacionada com o movimento de grandes massas de ar, do tipo depressões ou anticiclones.

- Zona de vazio espectral, associada a períodos compreendidos aproximadamente entre 10 minutos e 2 horas, e relacionada com zonas do espectro correspondentes a muito pouca energia.

- Zona micro meteorológica, associada a frequências mais elevadas (correspondendo a períodos da ordem de poucos segundos) e relacionada com a turbulência atmosférica.

A turbulência atmosférica influencia na mudança de direção do vento e nos esforços causados na turbina.

Cálculo da velocidade do vento

A velocidade média anual do vento é calculada através da média das velocidades horárias de vento geradas a uma altura determinada, Fórmula 1.

Fórmula 1:

$$v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_f$$

Sendo:

v – velocidade média em m/s

N – número total de horas simulada

v_f – velocidade horária em m/s

Frequência de velocidade de vento

Os ventos não são constantes ao longo do dia, significando uma potência elétrica variável, por esta característica é necessário uma avaliação de frequência para cada ocorrência de velocidade do vento. Para esta análise, usualmente, se utiliza intervalos máximos entre uma velocidade e outra de 1m/s (CASTRO, 2008).

A Figura 31 representa a frequência da ocorrência de velocidade de vento.

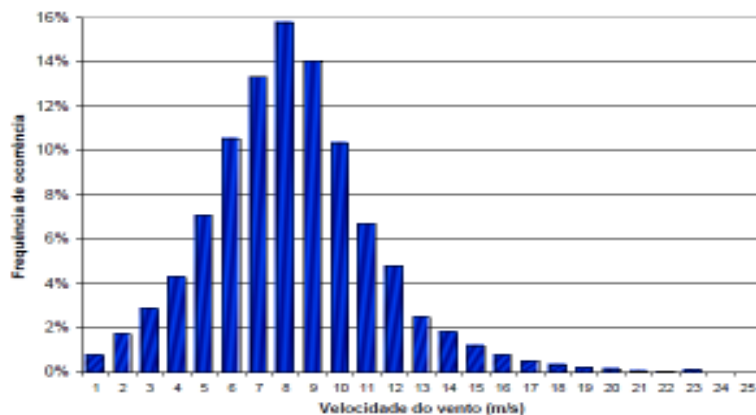


Figura 31 – Representação da frequência de ocorrência de velocidade de vento
 Fonte: CASTRO, 2008

Quando a frequência é expressa em forma matemática, se torna mais claro, a importância destes registros (CASTRO).

Lei de Weibull

A lei de Weibull considera os registros da densidade de probabilidade em expressão matemática (CASTRO, 2009), ou seja, a duração da ocorrência de uma velocidade v é aproximada por equações estatísticas (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

A probabilidade de Weibull tem relação com a velocidade média e os coeficientes de forma e de escala, dada pela Fórmula 2.

Fórmula 2:

$$p(v) = \frac{k}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k}$$

Sendo:

$\rho(v)$ – probabilidade de Weibull em m/s

κ – fator de forma sem unidade

C – fator de escala em m/s

v – velocidade média em m/s

A representação da freqüência de ocorrência da velocidade do vento baseada na distribuição de Weibull é exemplificada na Figura 32.

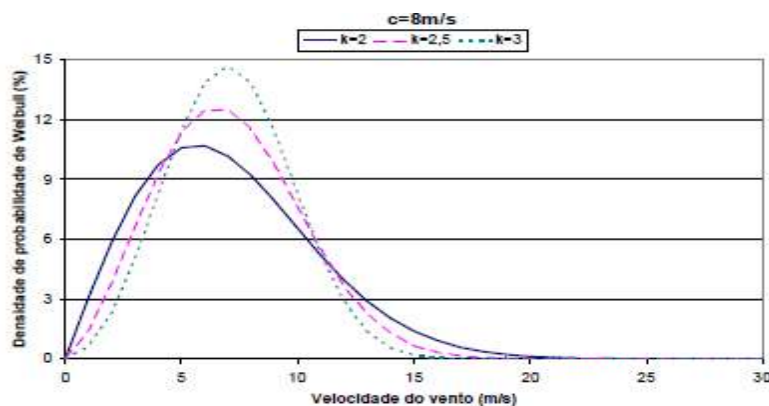


Figura 32 – Representação da freqüência de ocorrência baseada na distribuição de Weibull

Fonte: CASTRO, 2008

Para o cálculo do fator de escala C é necessário relacionar a velocidade média com o fator de forma, Fórmula 3.

Fórmula 3:

$$C = \frac{v}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right)}$$

Sendo:

C – fator de escala em m/s

v – velocidade média em m/s

κ – fator de forma sem unidade

Γ - função gama (no Excel® através do comando EXP(GAMMALN(x))).

O desvio padrão da velocidade do vento é calculado levando em consideração os fatores de forma e de escala, Fórmula 4.

Fórmula 4:

$$\sigma^2 = C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\kappa}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right)\right)^2 \right]$$

Sendo:

σ - desvio padrão em m/s

C – fator de escala em m/s

κ – fator de forma sem unidade

Γ - função gama

Para os cálculos dos fatores de forma e de escala, um dos métodos mais utilizados envolve uma regressão linear, Fórmula 5.

Fórmula 5:

$$Y = Ax + B$$

Fórmula 6:

$$Y = \ln(-\ln(f(v)))$$

Fórmula 7:

$$X = \ln(v)$$

Fórmula 8:

$$k = A$$

Fórmula 9:

$$C = \exp\left(-\frac{B}{A}\right)$$

A Figura 33 representa a função linearizada de X e Y.

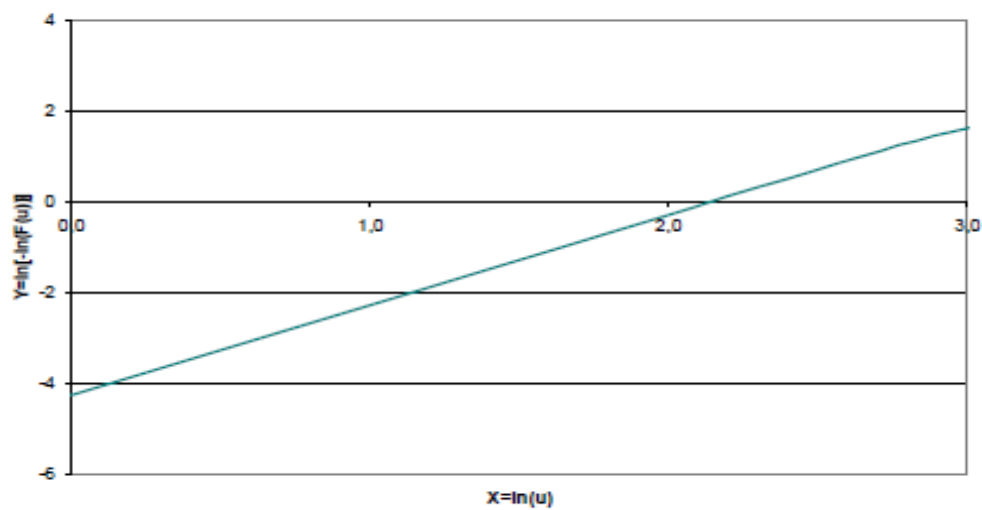


Figura 33 – Representação da função linearizada (X,Y)

Fonte: CASTRO, 2008

Com os dois fatores k e C e com a densidade média do ar, é geralmente possível estimar a produção anual de uma turbina eólica com boa exatidão (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001)

Rugosidade

A velocidade do vento é influenciada pela rugosidade, quanto maior a altura de medição do vento, menor será a influência gerada por ela. Para que seja permitido o cálculo da velocidade do vento para várias alturas é utilizado a lei de Prandtl (CASTRO, 2009).

Segundo a lei de Prandtl é possível calcular a variação da velocidade do vento de acordo com a altura, extrapolando o valor de velocidade média na altura de referência, Fórmula 10 (CASTRO, 2009).

Fórmula 10:

$$\frac{v(Z)}{v'(Z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_r}{Z_0}\right)}$$

Sendo:

$v(Z)$ – velocidade média a altura Z (m/s)

$v'(Z)$ – Velocidade a altura referencia (m/s)

Z – Altura (m)

Z_0 – Rugosidade (m)

Z_r – Altura referencia (m)

Os valores típicos para comprimentos característicos de rugosidade (Z_0) demonstrados na Tabela 3, foram determinados por Hassan, para facilitar os cálculos das velocidades em alturas diferentes da de referência, em terrenos planos

e homogêneos, não incluídos efeitos da topografia e de obstáculos (CASTRO, 2009).

Tabela 3 – Valores típicos de comprimentos característicos de rugosidade

Tipo de terreno	Z ₀ (m) – Mínimo	Z ₀ (m) – Máximo
Lama / gelo	1 x 10 ⁻⁵	3 x 10 ⁻⁵
Mar calmo	2 x 10 ⁻⁴	3 x 10 ⁻⁴
Areia	2 x 10 ⁻⁴	1 x 10 ⁻³
Neve	1 x 10 ⁻³	6 x 10 ⁻³
Campo de cereais	1 x 10 ⁻³	1 x 10 ⁻²
Selva baixa/ estepes	1 x 10 ⁻²	4 x 10 ⁻²
Descampados	2 x 10 ⁻²	3 x 10 ⁻²
Selva alta	4 x 10 ⁻²	1 x 10 ⁻¹
Terrenos com arvores	1 x 10 ⁻¹	3 x 10 ⁻¹
Floresta	1 x 10 ⁻¹	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centros da cidade	1	4

Fonte: CASTRO, 2009

Cálculo da potência

A turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica. A potência elétrica é função do cubo da velocidade de vento v , Fórmula 11 (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

Fórmula 11:

$$P_{elétrica} = \frac{1}{2}(\rho A r v^3 C_p \eta)$$

Sendo:

P elétrica – Potência elétrica em Watts

ρ – Densidade do ar em Kg/m³

Ar – Area do rotor em m²

v – Velocidade do vento em m/s

C_p – Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor de 0,59 (limite de Betz)

η – Eficiência do conjunto gerador/transmissão

A eficiência do conjunto gerador/transmissão é calculada a partir da divisão entre a potência elétrica do gerador e a potência disponível, conforme Fórmula 12. A potência disponível é calculada em função da área do rotor, densidade do ar e o cubo da velocidade, Fórmula 13.

Fórmula 12:

$$\eta = \frac{P \text{ elétrica}}{P \text{ disponível}}$$

Sendo:

P elétrica – potência efetiva do gerador em Watts

P disponível – potência disponível para a turbina eólica em Watts

Fórmula 13:

$$P \text{ disponível} = \frac{1}{2} (\rho A_r v^3)$$

Sendo:

P disponível – potência disponível para a turbina eólica em Watts

ρ – densidade do ar em Kg/m^3

A_r – área do rotor em m^2

v – velocidade do vento em m/s

O cálculo da potência disponível pode ser calculado independentemente das características da turbina a ser instalada, ou seja, pode ser apresentada em termos da densidade de potência disponível no vento (W/m^2), isto é, potência por unidade de área varrida pelas pás da turbina, Fórmula 14 (CASTRO, 2009).

Fórmula 14:

$$D_{pd} = \frac{P_{disponível}}{A_r}$$

Sendo:

D_{PD} - Densidade de potência disponível em W/m^2

P disponível - Potência disponível para a turbina eólica em Watts

A_r – Área do rotor em m^2

A Figura 34 representa a densidade de potencia disponível do vento.

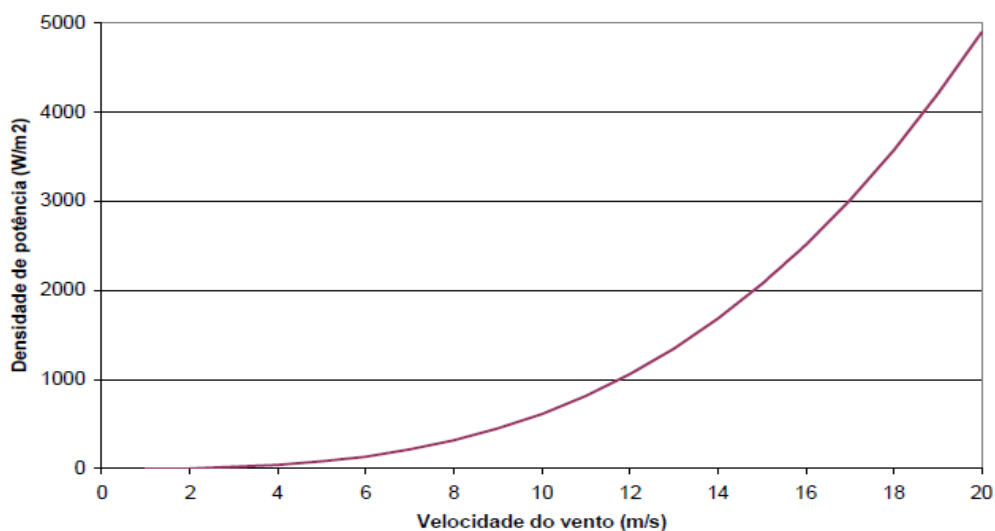


Figura 34 – Representação da densidade de potência

Fonte: CASTRO, 2001

Para Hinrinks; Leinbach; Reis, 2010, a potência é calculada levando em conta a densidade baixa do ar e o fator de conversão de 0,59, que representa a máxima eficiência que uma turbina de vento pode atingir (limite teórico de Betz), sendo de acordo com a Fórmula 15.

Fórmula 15:

$$P_{elétrica} = 2,83 \cdot 10^{-4} D^2 v^3$$

Sendo:

P elétrica – Potência elétrica em KW

D – Diâmetro em m

v – Velocidade em m/s

Projeto de instalação

Um parque eólico é um conjunto de aerogeradores dispostos adequadamente em uma mesma área. Segundo Amarante; Sá; Brower, 2001, a absorção de energia cinética reduz a velocidade do vento à jusante do aerogerador e ao atravessá-lo, o vento se mistura com as massas de ar predominantes do escoamento livre e recupera a velocidade e a força de sustentação aerodinâmica. Nas pás do rotor resulta uma esteira helicoidal de vórtices, que se dissipa gradualmente.

Para evitar interferências entre as turbinas instaladas em um parque eólico é necessário calcular a distância necessária para minimizar as perdas de desempenho. Essa distância varia com a velocidade do vento, as condições de operação da turbina, a rugosidade de terreno e a condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de novas turbinas é da ordem de 10 vezes o diâmetro D, a jusante, e 5 vezes D, se na lateral, em relação ao vento predominante, Figura 35 (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

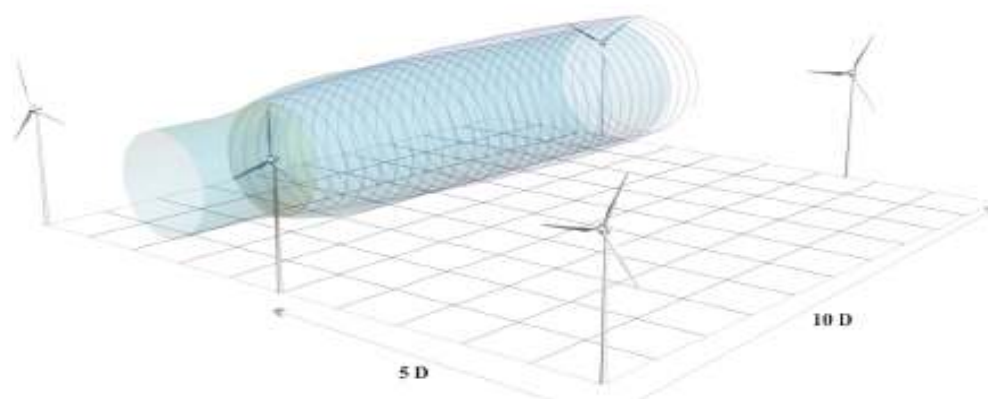


Figura 35 – Representação da distância segura de afastamento entre turbinas
 Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001

Outro aspecto que deve ser analisado são obstáculos, como edifícios, árvores e formações rochosas que mesmo distantes influenciam na velocidade do vento. Podemos verificar que a zona turbulenta pode se estender até três vezes a altura do obstáculo, sendo mais intensa na parte de trás do que na parte da frente do obstáculo (CASTRO, 2009).

A representação do escoamento na zona que envolve o obstáculo é ilustrada na Figura 36.



Figura 36 – Escoamento na zona que envolve o obstáculo
 Fonte: CASTRO, 2009

Geração de ruído

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro D. Usualmente, a rotação é otimizada no projeto, para minimizar a emissão de ruído aerodinâmico pelas pás. Uma fórmula prática para a avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica é representada, conforme a Fórmula 16 (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

Fórmula 16:

$$rpm = \frac{1150}{D}$$

Sendo:

rpm – Rotação do motor em rotações por minuto

D – Diâmetro em metros

Funcionamento das turbinas

A geração elétrica se inicia com velocidades de vento entre 3 e 5m/s, valores abaixo não são interessantes para extrair energia (CASTRO, 2009).

Velocidades superiores a aproximadamente de 12,0m/s a 15,0m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo de turbina (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001), isto porque não é econômico aumentar a potência, pois obrigaria a ter uma construção mais robusta (CASTRO, 2009).

Em ventos muito fortes, acima de 25m/s, atua o sistema automático de proteção (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001), onde a turbina é desligada (CASTRO, 2009).

Cada gerador possui sua própria característica de início de geração de energia elétrica. A Figura 37 apresenta a característica elétrica de aerogerador eólico de 660KW de potência.

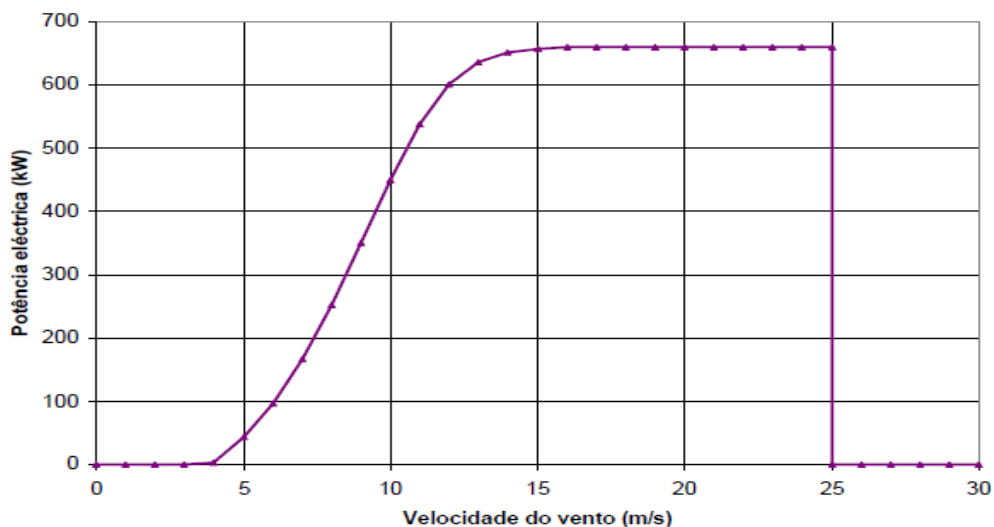


Figura 37 – Característica elétrica de um gerador eólico de 660 kW
 Fonte: CASTRO, 2009

Segundo o atlas, ventos muito fortes têm ocorrência rara e negligenciável em termos de aproveitamento e a turbulência associada é indesejável para a estrutura da máquina.

Por medida de segurança, a rotação das pás é reduzida (passo ou estol) e o sistema elétrico do gerador é desconectado da rede elétrica.

As curvas de potência fornecidas por fabricantes de turbinas, geralmente medidas por órgãos credenciados e independentes, usualmente referem-se a velocidades de vento quase instantâneas (médias de 10 minutos) e densidade $\rho = 1,225\text{kg/m}^3$ (15°C ao nível do mar).

No caso das temperaturas de grande parte do território brasileiro, correções para a densidade do ar local são necessárias (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

Cálculo da energia anual gerada

A energia anual é calculada através da somatória do produto entre a potência elétrica e a frequência relativa da ocorrência do vento, Fórmula 17.

Fórmula 17:

$$Ea = \sum (Pe . Fr)$$

Sendo:

Ea – Energia anual KWh

Pe – Potência elétrica em KW

Fr – Frequencia relativa de ocorrência da velocidade do vento em h

2.3.4. Matriz energética do Brasil

A matriz energética do Brasil é composta de fontes não renováveis, como gás natural, energia nuclear, derivados do petróleo e carvão mineral e de fontes renováveis, como hidráulica, eólica, biomassa e solar.

Seguindo a tendência mundial, o Brasil utiliza como principais fontes de energia primária, os derivados de petróleo com 116,90 Mtoe, seguindo de hidráulica com 89,60 Mtoe e o gás natural com 23,80 Mtoe, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantidade de energia primária consumida no Brasil em 2010, de acordo com a fonte energética

Fonte de energia	Quantidade (Mtoe)
Petróleo	116,9
Hidráulica	89,6
Gás Natural	23,8
Carvão	12,4
Outras renováveis	7,9
Nuclear	3,3
Total	253,9

Fonte: BRITISH PETROLEUM, 2011

3. A energia eólica no Brasil

3.1. Potencial e programação de produção de energia eólica

Potencial eólico *onshore*

O potencial eólico brasileiro *onshore* foi calculado através de mapas digitais utilizando recursos de geoprocessamento e a produção de energia a partir de curvas de potência de turbinas eólicas existentes em 2001 (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

O levantamento da velocidade do vento foi realizado levando em consideração apenas as velocidades entre 6 a 8,5 m/s, a uma altura de 50 metros, com intervalos de incrementos de 0,5 m/s para as velocidades médias anuais de vento (Figura 38).

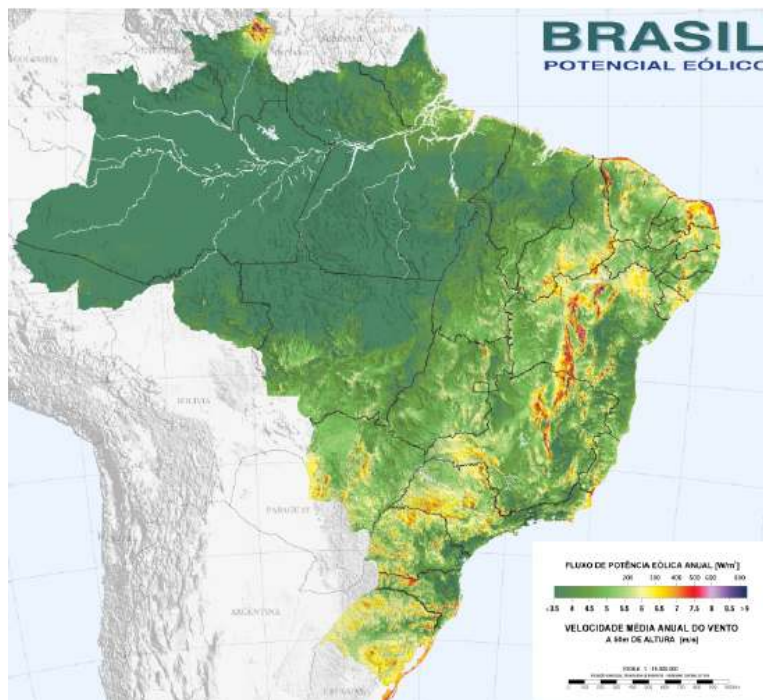


Figura 38 – Velocidade média anual de ventos *onshore* no Brasil (m/s)







Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001

Neste levantamento foram descartadas da integração as áreas cobertas por água, como lagos e lagoas, açudes, rios e mar. As maiores velocidades do vento se encontram nas regiões litorâneas do Brasil, como o litoral das regiões nordeste, sudeste e sul (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

O desempenho de turbinas eólicas foi calculado para os limites inferiores de cada intervalo, com um fator de disponibilidade de 0,98, considerado típico para usinas eólicas comerciais. A densidade média de ocupação de terreno de apenas 2 MW/ km². Esse valor é considerado conservativo, uma vez que representa cerca de 20% do realizável por usinas eólicas em terrenos planos (AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001).

A partir desses resultados, foi estimado um potencial disponível da ordem de 143 GW, para velocidade média anual de 7 m/s, onde os ventos foram mais intensos, conforme se mostra na coluna Integração Cumulativa da Tabela 5.

Tabela 5 – Potencial eólico *onshore* brasileiro

REGIÃO	INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADES					INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]	VENTO [m/s]	ÁREA (CUMULATIVA) [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
 NORTE	6 - 6,5	11480	22,92	0,13	26,58	>6	24206	48,41	70,49
	6,5 - 7	6326	12,65	0,17	18,46	>6,5	12746	25,49	44,91
	7 - 7,5	3300	6,60	0,20	11,33	> 7 m/s	6420	12,84	26,45
	7,5 - 8	1666	3,33	0,25	7,15	>7,5	3120	6,24	15,11
	8 - 8,5	903	1,81	0,30	4,65	>8	1454	2,91	7,96
	>8,5	551	1,10	0,35	3,31	>8,5	551	1,10	3,31
 NORDESTE	6 - 6,5	146589	293,18	0,13	327,19	>6	245105	490,21	649,50
	6,5 - 7	60990	121,98	0,17	178,02	>6,5	98516	197,03	322,31
	7 - 7,5	24383	48,77	0,20	83,73	> 7 m/s	37526	75,05	144,29
	7,5 - 8	9185	18,37	0,25	39,43	>7,5	13143	26,29	60,56
	8 - 8,5	3068	6,14	0,30	16,91	>8	3958	7,92	21,13
	>8,5	870	1,74	0,35	5,23	>8,5	870	1,74	5,23
 CENTRO-OESTE	6 - 6,5	41110	82,22	0,13	91,76	>6	50752	101,50	120,83
	6,5 - 7	8101	16,20	0,17	23,65	>6,5	9642	19,28	29,07
	7 - 7,5	1395	2,79	0,20	4,79	> 7 m/s	1541	3,08	5,42
	7,5 - 8	140	0,28	0,25	0,60	>7,5	146	0,29	0,63
	8 - 8,5	6	0,01	0,30	0,03	>8	6	0,01	0,03
	>8,5	0	0,00	0,35	0,00	>8,5	0	0,00	0,00
 SUDESTE	6 - 6,5	114668	229,38	0,13	255,99	>6	175859	351,72	446,07
	6,5 - 7	46302	92,60	0,17	135,15	>6,5	61171	122,34	190,08
	7 - 7,5	11545	23,09	0,20	39,64	> 7 m/s	14869	29,74	54,93
	7,5 - 8	2433	4,87	0,25	10,44	>7,5	3324	6,65	15,29
	8 - 8,5	594	1,19	0,30	3,06	>8	891	1,78	4,84
	>8,5	297	0,59	0,35	1,78	>8,5	297	0,59	1,78
 SUL	6 - 6,5	121798	243,60	0,13	271,86	>6	171469	342,94	424,74
	6,5 - 7	38292	76,58	0,17	111,77	>6,5	49671	99,34	152,88
	7 - 7,5	9436	18,87	0,20	32,40	> 7 m/s	11379	22,76	41,11
	7,5 - 8	1573	3,15	0,25	6,75	>7,5	1943	3,89	8,71
	8 - 8,5	313	0,63	0,30	1,81	>8	370	0,74	1,95
	>8,5	57	0,11	0,35	0,34	>8,5	57	0,11	0,34
 TOTAL BRASIL ESTIMADO	>6	667391	1334,78		1711,62	>6	667391	1334,78	1711,62
	>6,5	231746	463,49		739,24	>6,5	231746	463,49	739,24
	> 7 m/s	71735	143,47		272,20	> 7 m/s	71735	143,47	272,20
	>7,5	21676	43,35		100,30	>7,5	21676	43,35	100,30
	>8	6679	13,36		35,93	>8	6679	13,36	35,93
	>8,5	1775	3,55		10,67	>8,5	1775	3,55	10,67

Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001

A Figura 39 apresenta o potencial eólico *onshore* por regiões para velocidade média anual de 7 m/s.

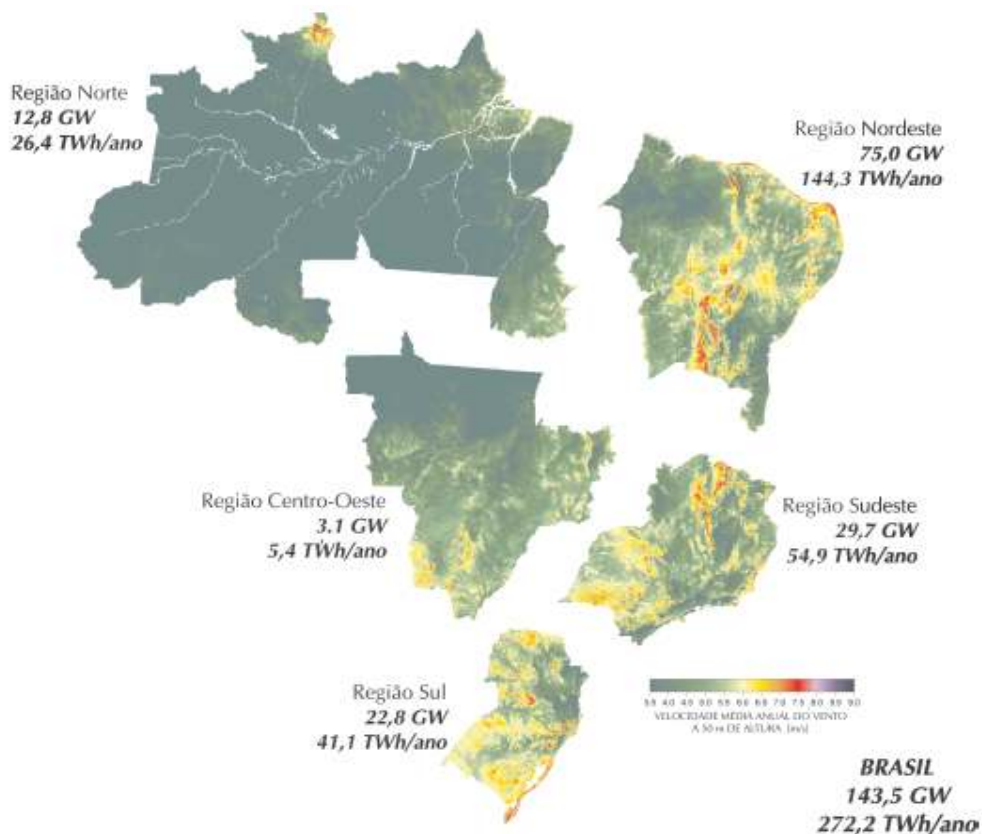


Figura 39 – Potencial eólico *onshore* brasileiro por regiões
 Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001

Potencial eólico *offshore*

O potencial eólico *offshore*, na costa sul e sudeste do Brasil, foi estimado através da correlação de dados entre o satélite *QuikSCAT*, medidas práticas e teóricas de desempenho de turbinas eólicas e estações meteorológicas, uma na plataforma da Petrobrás e a outra em uma bóia mantida pelo Centro de hidrografia da marinha brasileira (PIMENTA; KEMPTON; GARVINE, 2008).

O satélite *QuikSCAT* foi lançado em 1999 com a finalidade de verificar a cobertura glacial dos oceanos, além de ser utilizado para previsões de tempo e de onda. Por possuir ótima resolução e leituras diárias foram utilizadas por Pimenta; Kempton; Garvine, 2008 para o estudo do potencial eólico *offshore* brasileiro.

O Estudo revelou maiores velocidades na altura de 80 metros do que em 10 m do nível do mar, conforme Figura 40 (PIMENTA; KEMPTON; GARVINE, 2008).

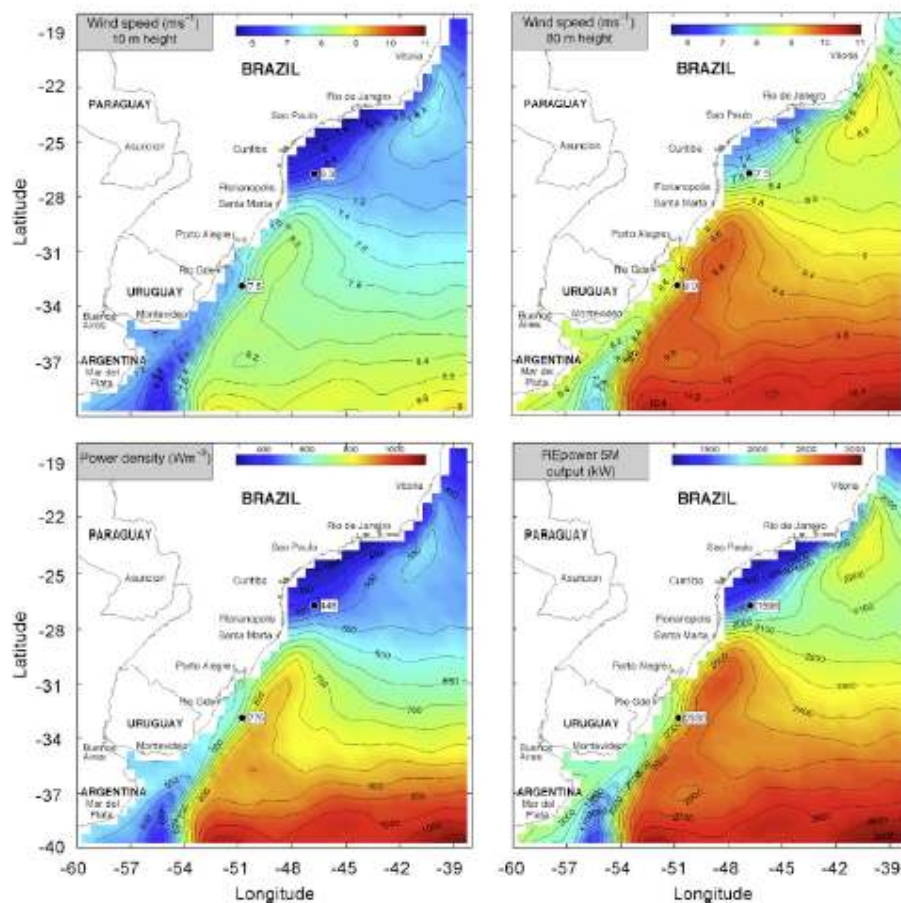


Figura 40 – Velocidade do vento na costa sul sudeste do Brasil
Fonte: PIMENTA; KEMPTON; GARVINE, 2008

A fim de obter uma avaliação inicial do potencial do *offshore* foram levados em conta três aspectos principais: (1) a área ocupada por cada aerogerador, (2) área da plataforma, e (3) a média de produção de turbinas e foi aplicado o procedimento descrito por Kempton, obtendo os resultados do potencial eólico *offshore* da costa sul e sudeste do Brasil em diferentes distâncias da costa, de acordo com a Tabela 6 (PIMENTA; KEMPTON; GARVINE, 2008).

Tabela 6 – Potencial eólico *offshore* da costa sul e sudeste, de acordo com a distância da costa

Distância da costa	Potência (GW)
0 a 20 km	27
20 a 50 km	75
50 a 100 km	115
Total	217

Fonte: PIMENTA; KEMPTON; GARVINE, 2008

Este estudo não levou em consideração à costa do nordeste, por se basear apenas em grandes centros, como São Paulo e outros (PIMENTA; KEMPTON; GARVINE, 2008).

Segundo dados do satélite *QuikSCAT*, de velocidade e direção do vento *offshore*, entre os períodos de Agosto de 1999 a Outubro de 2009, da costa do nordeste apresenta velocidades de ventos entre 7,5 e 12 m/s, Figura 41 (IFREMER, 2011).

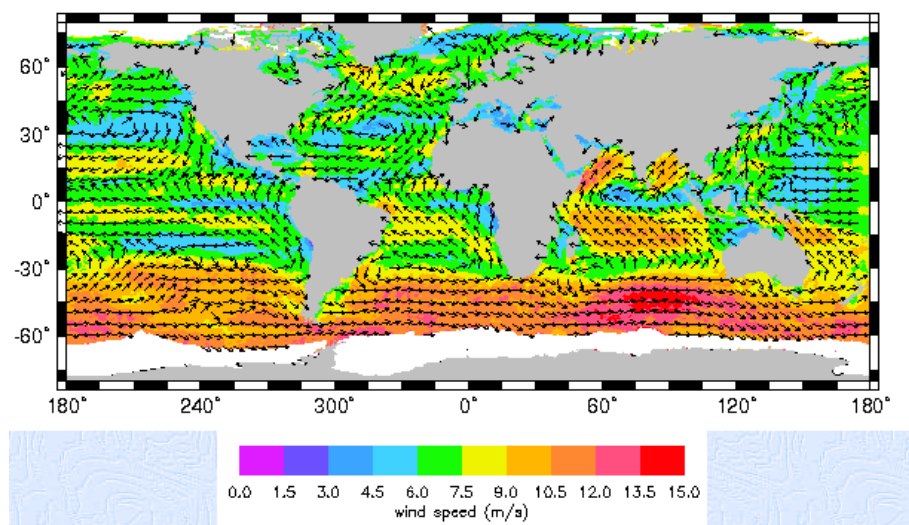


Figura 41 – Velocidade e direção dos ventos *offshore* – Satélite QuikSCAT (m/s)
Fonte: IFREMER, 2011

3.2. Estágio atual

Atualmente, o Brasil possui 131 usinas outorgadas *onshore*, 30 usinas em construção e 56 usinas em operação, com um total de 6,04 GW.

A maioria destas usinas se encontra na região nordeste, seguindo da região sudeste e sul, com um número total de empreendimentos, outorgadas, em construção e em operação, de 169, 3 e 45 respectivamente, ver Tabela 7.

Tabela 7 – Situação atual dos empreendimentos eólicos *onshore*

Região	Usinas Outorgadas (O)		Usinas em Construção (C)		Usinas em Operação (Op)		Total C+Op	
	Quant.	Potência (W)	Quant.	Potência (W)	Quant.	Potência (W)	Quant.	Potência (W)
Norte	0	-	0	-	0	-	0	-
Nordeste	109	3.426.573	20	593.990	40	725.590	60	1.319.580
Centro-Oeste	0	-	0	-	0	-	0	-
Sudeste	2	165.000	0	-	1	28.050	1	28.050
Sul	20	526.231	10	249.000	15	327.902	25	576.902
Brasil	131	4.117.804	30	842.990	56	1.081.542	86	1.924.532

Fonte: BANCO DE INFORMAÇÃO DE GERAÇÃO, 02/08/2011

Na região nordeste os estados que possuem usinas eólicas instaladas são Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe e Bahia (Figura 42), com potência de 725.590 Watts (Figura 42).

Nota-se que a maioria das usinas foi instalada, na costa do Brasil, com exceção do estado da Bahia, que possui suas usinas instaladas no interior do estado.



Figura 42 – Usinas eólicas instaladas na região nordeste
 Fonte: SISTEMA GEORREFERENCIADAS DO SETOR ELÉTRICO, 2011

Estes parques foram instalados seguindo o potencial *onshore* eólico identificado no Atlas de 2001, com velocidades médias levantadas de até 9m/s a 50 metros de altura, (Figura 43).

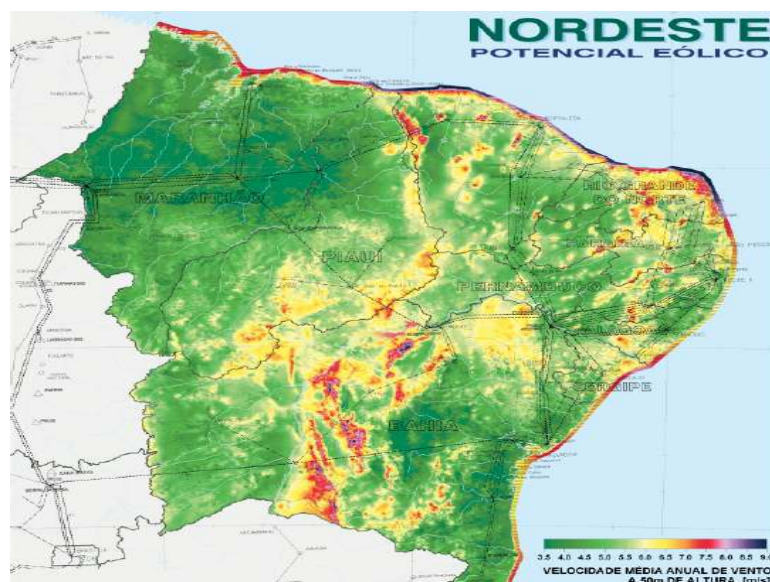


Figura 43 – Velocidade média anual de ventos terrestres na região nordeste (m/s)
 Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001

De maneira discreta, na região sudeste, os estados que possuem usinas eólicas instaladas são Rio de Janeiro e Minas Gerais, (Figura 44).



Figura 44 – Usinas eólicas instaladas na região sudeste

Fonte: SISTEMA GEORREFERENCIADAS DO SETOR ELÉTRICO, 2011

A velocidade média dos ventos levantados pelo potencial eólico *onshore* brasileiro atinge até 9m/s na costa dos estados de Vitória e do Rio de Janeiro, (Figura 45).

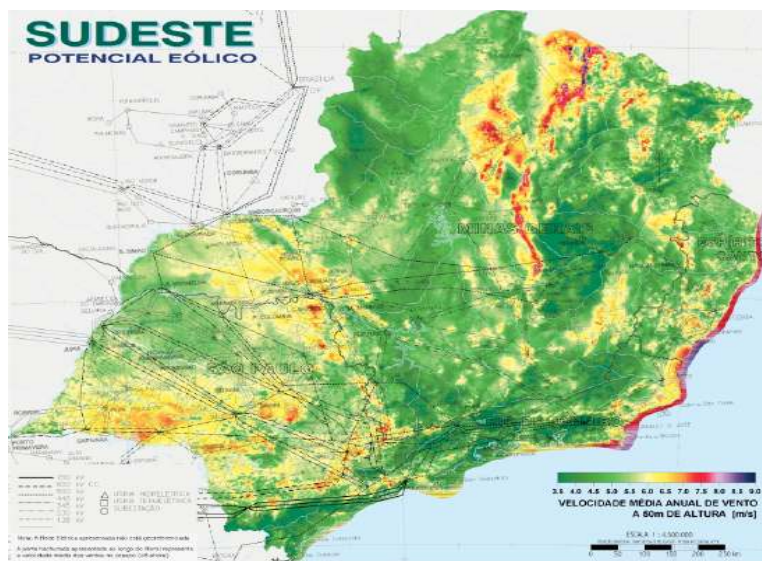


Figura 45 – Velocidade média anual de ventos terrestres na região sudeste (m/s)

Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001

Na região sul os estados que possuem usinas eólicas instaladas são Santa Catarina e Rio Grande do Sul, (Figura 46).



Figura 46 – Usinas eólicas instaladas na região sul
Fonte: SISTEMA GEORREFERENCIADAS DO SETOR ELÉTRICO, 2011

Segundo o atlas a velocidade média levantadas foram de até 9 m/s na costa do estado de Santa Catarina, (Figura 47).

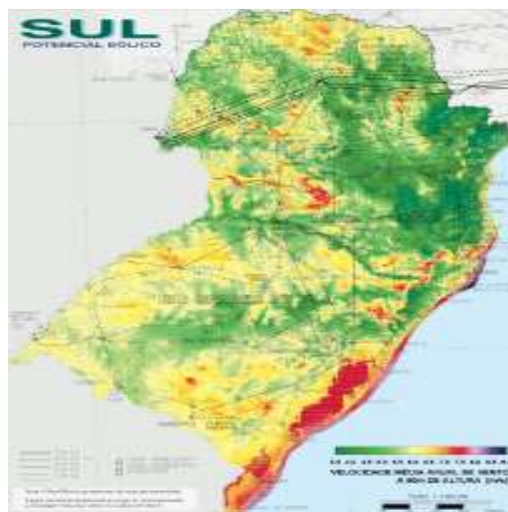


Figura 47 – Velocidade média anual de ventos terrestres na região sul (m/s)
Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001

4. Considerações finais

O Brasil consumiu em 2010, o total de 253,90 Milhões de toneladas de óleo equivalente (Mtoe) de energia primária, incluindo fontes não renováveis (156,40 Mtoe) e renováveis (97,5 Mtoe), segundo relatório da British Petroleum de 2011.

A matriz energética brasileira é composta de 61% de fontes de energia primária não renovável, proveniente de combustíveis fósseis.

Considerando os valores de 2010, as reservas brasileiras de fontes de energia fósseis eram de 2.362,29 Mtoe e o consumo de energia primária de 253,90 Mtoe. Nestas condições, se o país dependesse apenas de suas reservas de combustíveis fósseis, para abastecer a demanda interna, essas se esgotariam em um pouco mais de 9 anos.

Em termos de energia elétrica gerada, em 2010, a produção foi de 484,80 Terawatts-hora, provenientes de todos os tipos de fontes de energia primária.

Durante esta pesquisa não se detectou legislação específica sobre a energia eólica e nem realização de cursos profissionalizante e treinamentos para esta área.

Futuras pesquisas deverão estudar as condições para viabilização financeira da utilização da energia eólica e de fontes de fomento para a produção de equipamentos para pequenas centrais eólicas.

5. Conclusões

O Brasil possui potencial total eólico levantado de 360,50 GW, distribuídos em *onshore* de 143,5 GW (com aerogeradores a 50 metros de altura) e *offshore* da costa sul e sudeste, de 217 GW (com aerogerador a 80 metros de altura). Sabe-se que quanto maior a altura do aerogerador, maior a velocidade do vento. Atualmente a altura de exploração dos aerogeradores está próxima de 100 metros, e, portanto esses valores são maiores. Ressalta-se que não foi devidamente quantificado o potencial eólico *offshore* da costa da região nordeste, que segundo dados do satélite *QuilkSCAT*, a velocidade média do vento é alta.

Em termos de geração anual de energia elétrica, considerando o tempo de 1.896 horas/ano, adotado no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, o potencial eólico para geração anual de energia elétrica, é de 683,51 TWh.

Comparando os valores de energia elétrica gerada pelo potencial eólico (683,51 TWh), com o consumido no Brasil, em 2010, gerado por todas as fontes (484,80 TWh), verifica-se que o país é auto-suficiente para atender sua demanda interna por eletricidade, através do aproveitamento da energia eólica.

Por outro lado, verifica-se que, os empreendimentos eólicos instalados no país potencializam apenas 1,08 GW, representando aproximadamente 0,7% do potencial eólico *onshore*, revelando um vasto campo para instalação de usinas eólica.

Referências bibliográficas

AIEA, Fukushima **Log Update nuclear accident**, disponível em <http://www.iaea.org/newscenter/news/tsunamiupdate01.html>, acesso em 16/06/2011.

ALDABO, R. **Energia eólica**, 1ª Ed., Editora Artliber, São Paulo, 2002.

AMARANTE, O.A.C., SÁ, A. L., BROWER, M. **Atlas do potencial eólico brasileiro**, MME Brasília 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Atlas de energia elétrica do Brasil**, 3ª Ed., Brasília, 2008, disponível em http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Atlas de energia elétrica do Brasil**, 2ª Ed. ANEEL, Brasília, 2005, disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/index.html>.

BANCO DE INFORMAÇÃO DE GERAÇÃO, **Situação atual dos empreendimentos eólicos no Brasil**, disponível em www.aneel.gov.br/15.htm, acesso em 01/08/2011.

BBC, **Japan earthquake: Explosion at Fukushima nuclear plant**, 2011, disponível em <http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-pacific-12720219>, acesso em 16/06/2011.

BRAGA, B; HESPANHOL, I; CONEJO, J. G.; BARROS, M. T; SPENCER, M; PORTO, M; NUCCI, N; JULIANO, N; EIGER, S. **Introdução a engenharia ambiental**, 1ª Ed., São Paulo, Editora Prentice Hall, 2002.

BRITISH PETROLEUM, **Releases Report on Causes of Gulf of Mexico Tragedy**, disponível em [http://www.bp.com/genericarticle.do? categoryId=2012968& contentId=7064893](http://www.bp.com/genericarticle.do?categoryId=2012968&contentId=7064893), acesso em 16/06/2011.

BRITISH PETROLEUM, **2010 Statistical Review of world Energy**, 2011, disponível em <http://bp.com>

BRITISH PETROLEUM, **2008 Statistical Review of world Energy**, 2009 disponível em [http://www. bp.com](http://www.bp.com).

CASTRO, R. M. G. **Energia Renováveis e Produção Descentralizada – Introdução a energia eólica**, 4ª Ed., Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa, 2009

CARVALHO, P. **Geração eólica**, 1ª Ed., São Paulo, Editora imprensa universitária, 2003.

CRESEB, Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito, **Energia solar, princípios e aplicações**, MME, Brasília, 2006, disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>

DIARIO DO GRANDE ABC, **ANP investiga acidente maior em poço da Chevron**, disponível em <http://www.dgabc.com.br/News/5927889/anp-investiga-acidente-maior-em-poco-da-chevron.aspx>, acesso em 23/11/2011.

DISCOVERY BRASIL, **O derramamento do Exxon Valdez**, disponível em www.discoverybrasil.com/navios/emergencias_desastres/derramamento_exxon_valdez/index.shtml, acesso em 16/06/2011.

DUPUY, J. P. **A catástrofe de Chernobyl vinte anos depois**. Estudos Avançados 21 (59), São Paulo, 2007 págs 244-252.

EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION, **How a wind turbine works?**, disponível em <http://www.globalwindday.org/index.php?id=27>, acesso em 01/08/2011.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**, Estudos Avançados 21 (59), São Paulo, 2007.

HINRICHS, R. A.; LEINBACH, M; REIS, L. B. **Energia e meio ambiente**, São Paulo, 1ª Ed., Editora Cengage, 2010

IFREMER, **Velocidade e direção do vento offshore, satélite QuikSCAT**, disponível em <http://www.ifremer.fr/cersat/en/data/tools/browse.htm#mwf>, acesso em 19/09/2011.

INTERNATIONAL MONETARY FUND, **Distribuição mundial do PIB per capita**, disponível em <http://www.imf.org/external/datamapper/index.php>, acesso em 30/08/2011

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE, **Manual de educação para o consumo sustentável**, Brasília, 2005

O ESTADO DE SÃO PAULO, **OEA pede ao Brasil para suspender Belo Monte**, disponível em <http://www.estadao.com.br/noticias/impresso,oea-pede-ao-brasil-para-suspender-belo-monte,702246,0.htm> 07/04/2011.

PIMENTA, F. KEMPTON, W, GARVINE, R. **Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of southeastern Brasil**. Renew Energy, 2008.

POPULATION REFERENCE BUREAU, 2010 **World population**, <http://www.prb.org/Publications/Datasheets/2010/2010wpds.aspx>.

SIEMENS, **Wind turbines**, disponível em www.siemens.com, acesso em 01/08/2011.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEORREFERENCIADA DO SETOR ELÉTRICO, **Localização das usinas eólicas no Brasil**, disponível em www.sigel.aneel.gov.br, acesso em 01/08/2011.

SILVA, E.P., CAMARGO, J.C., SORDI, A., SANTOS, A.M.R. **Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento**. O futuro dos recursos #1, 2003.

THE NEW YORK TIMES, **Size of spill in Gulf of Mexico is larger than thought**, disponível em <http://www.nytimes.com/2010/04/29/us/29spill.html>, acesso em 16/06/2011.

TMI, **Report of the President's commission on the accident at the Three Mile Island, the need for change**, 1979.

UP WIND, **Design limits and solutions for very large Wind turbines**, 2011, disponível em http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/upwind/21895_UpWind_Report_low_web.pdf, acesso em 01/08/2011.

WORLD ENERGY COUNCIL, **2010 Survey of energy resources**, disponível em <http://www.worldenergy.org/publications/3040.asp>.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, **Chernobyl accident 1986**, disponível em <http://www.world-nuclear.org/info/chernobyl/inf07.html>, acesso em 16/06/2011.

Anexos

Anexo I – Mapas da velocidade média do vento na região norte e centro-oeste, mapa da direção predominante dos ventos e modelo de rugosidade terrestre



Figura 48 – Velocidade média anual de vento terrestres na região norte (m/s)
Fonte: Amarante, Sá, Brower, 2001

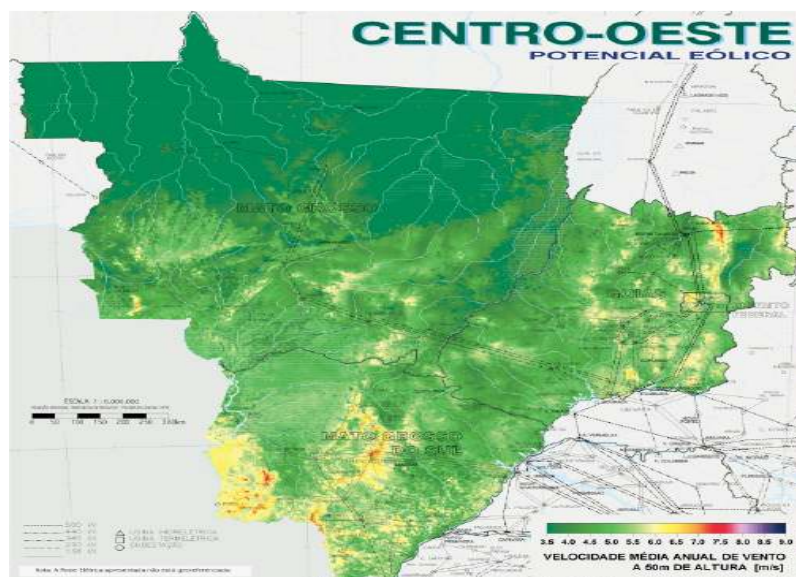


Figura 49 – Velocidade média anual de ventos terrestres na região centro-oeste (m/s)
Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001



Figura 50 – Direções predominantes de ventos terrestres
 Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001



Figura 51 – Modelo de rugosidade (m)
 Fonte: AMARANTE; SÁ; BROWER, 2001

Anexo II – Tabelas de conversão de unidades

Tabela 8 – Conversão de unidades

Óleo cru	Para				
	Toneladas	m ³	Barril	Galão americano	Toneladas/ano
De	Multiplicar por				
Toneladas	1	1,165	7,33	307,86	–
m ³	0,8581	1	6,2898	264,17	–
Barril	0,1364	0,159	1	42	–
Galão americano	0,00325	0,0038	0,0238	1	–
Barril/dia	–	–	–	–	49,8
Produtos	Para converter				
	Barril para toneladas	Toneladas para barril	m ³ para toneladas	Toneladas para m ³	
De	Multiplicar por				
GLP	0,086	11,6	0,542	1,844	
Gasolina	0,118	8,5	0,740	1,351	
Querosene	0,128	7,8	0,806	1,24	
Óleo diesel	0,133	7,5	0,839	1,192	
Óleo combustível residual	0,149	6,7	0,939	1,065	
Gás Natural e GLP	Para				
	Bilhões de m ³ de gás natural	Milhões de toneladas de óleo equivalente	Milhoes de toneladas de GLP	Trilhões de Btu	
De	Multiplicar por				
1 bilhão de m ³ de gás natural	1	0,90	0,74	35,7	
1 milhão de toneladas de óleo equivalente	1,11	1	0,82	39,7	
1 milhão de toneladas de GLP	1,36	1,22	1	48,6	
1 trilhão de Btu	0,028	0,025	0,021	1	
1 milhão de barris de óleo equivalente	0,15	0,14	0,11	5,41	

Fonte: Adaptado BRITISH PETROLEUM, 2011

Tabela 9 – Unidades equivalentes

Unidades equivalentes			
1 tonelada	2204.62 lb.		
1 kilocaloria (kcal)	4.187 kJ	3.968 Btu	
1 kilojoule (kJ)	0.239 kcal	0.948 Btu	
1 unidade termal Inglesa (Btu)	0.252 kcal	1.055 kJ	
1 kilowatt-hora (kWh)	860 kcal	3600 kJ	3412 Btu

Equivalência aproximada de calorias de 1 tonelada de óleo equivalente	
Unidades de calor	10 milhões kilocalorias
	42 gigajoules
	40 milhões Btu
Combustíveis sólidos	1.5 toneladas de carvão duro
	3 toneladas de lignite
Eletricidade	12 megawatt-hora

Equivalência aproximada de 1 milhão de tonelada de óleo	
Eletricidade	4400 gigawatt-hora

Equivalência para óleo	
1 barril de etanol	0,57 barril de óleo
1 barril de biodiesel	0,88 barril de óleo
1 tonelada de etanol	0,57 toneladas de óleo
1 tonelada de biodiesel	0,88 toneladas de óleo

Fonte: Adaptado BRITISH PETROLEUM, 2011