

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**RODRIGO BERTOLDI**

**ENERGIA EÓLICA: UMA ALTERNATIVA NA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

Porto Alegre

2013

**RODRIGO BERTOLDI**

**ENERGIA EÓLICA: UMA ALTERNATIVA NA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2013

**RODRIGO BERTOLDI**

**ENERGIA EÓLICA: UMA ALTERNATIVA NA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Profª Drª Gladis Bordin, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

MSc. Júlio Vítor Kunzler Júnior

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais Waldemar e Janete, os quais amo muito, pelo exemplo de vida e família. A meus irmãos Douglas e Séfora, por tudo que me ajudaram até hoje. Ao meu avô Fermino (in memoriam), pelo exemplo de vida. À minha noiva Magali, pelo carinho, compreensão e companheirismo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar presente em todos os momentos da minha vida, e nunca me deixar faltar forças para seguir em frente mesmo em situações onde a vontade era de abandonar tudo.

Aos meus pais Waldemar e Janete, por me conduzirem no caminho da educação sempre apoiando e incentivando a superar os momentos difíceis com força, confiança e amor, ajudando-me a persistir nos meus objetivos e ajudando a alcançá-los. Tudo que sou e que ainda serei são vocês em mim.

Aos meus irmãos Douglas e Séfora, pela amizade, companheirismo e ajuda.

À UFRGS pelo ensino público de qualidade e gratuito.

Aos colegas pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso, pelas experiências compartilhadas e todo o aprendizado que a mesma gerou, pela amizade e pelos momentos de diversão e alegria.

À empresa Datacom por me conceder a oportunidade da realização do estágio.

Aos professores e funcionários da UFRGS, em especial ao professor Dr. Luís Fernando Alves Pereira por me conceder a oportunidade de estudar na Telecom ParisTech, uma das melhores Universidade de engenharia da França.

Ao professor Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro pela orientação, ensinamentos e dedicação dispensados no auxílio a concretização desse trabalho e pelo fornecimento de material de pesquisa.

À minha noiva Magali, pelo incentivo, confiança e tolerância nessa fase tão importante da minha vida, mesmo em momentos de ausência e longa distância.

O sofrimento é passageiro, mas desistir é para sempre.

*Lance Armstrong*

## RESUMO

Atualmente existe a necessidade do aumento da produção de energia elétrica para atender tanto à sua carência quanto o rápido crescimento do consumo mundial sem gerar poluição e a destruição do meio ambiente. Diante deste quadro, existe a necessidade da geração de eletricidade utilizando fontes de energias alternativas. Dentre essas fontes de energia, destaca-se a energia eólica, cujo combustível é o vento. Ela é considerada a energia mais limpa do planeta, disponível em diversos lugares e em diferentes intensidades. Seu custo, pelo avanço da tecnologia, está decrescendo muito rapidamente, incentivando novos investimentos, principalmente após a criação de programas de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica, como o Proinfa no Brasil. Baseado nesse cenário, o presente trabalho fará um estudo sobre o tema, tratando dos pontos positivos e negativos relacionados a questão ambiental, do seu desenvolvimento histórico, das tecnologias envolvidas na conversão da energia eólica em energia elétrica através dos aerogeradores, do contexto atual dessa energia no mundo e no Brasil, sendo que o objetivo final é fazer um estudo de caso, analisando a viabilidade econômica de um parque eólico, sendo que o parque objeto do estudo é o Complexo Eólico de Cerro Chato, em Santana do Livramento, no Rio Grande do Sul.

**Palavras-chaves: Energia Eólica. Impacto Ambiental. Ventos. Aerogeradores. Geração de Eletricidade.**

## **ABSTRACT**

Actually there is a need to increase the production of electricity to meet both its lack and the rapid growth consumption without generating pollution and environmental destruction. Given this framework, there is a need of generating electricity using alternative energy sources. Among them energy sources, stands out the wind energy whose fuel is wind. She is considered the cleanest energy of the planet, available in different places and in different intensities. Its cost, by the advance of technology is falling rapidly, encouraging new investments, mainly after the creation of incentive programs for alternatives sources of electricity, such as Proinfa in Brazil. Based on this scenario, the aim of this work is to do a study on this subject, addressing the positives and negatives aspects related to environmental issues, its historical development, the technologies involved in the conversion of wind energy into electrical energy through wind turbines, the current context of this energy in the world and in Brazil and do a case study by analyzing the economic viability of a wind farm, and the park that is the object of study is Cerro Chato Wind Farm in Santana do Livramento, in Rio Grande do Sul.

**Keywords: Wind Energy. Environmental Impact. Winds. Wind Turbines. Electricity Generation.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição Vertical da Velocidade do Vento. ....	17
Figura 2 - Frequência de Distribuição da Velocidade do Vento. ....	18
Figura 3 - Distribuição de Velocidades do Vento e da Função de Weibull. ....	19
Figura 4 - Distribuição de Rayleigh, para velocidade média de 7 m/s. ....	20
Figura 5 - Rosa dos Ventos, com setores de 30°. ....	21
Figura 6 - Fluxo de Vento através de uma Turbina Eólica. ....	22
Figura 7 - Turbina de Arraste. ....	24
Figura 8 - Turbina de Sustentação. ....	25
Figura 9 - Fluxo de ar na seção da pá de um rotor de uma Turbina Eólica de Sustentação. ....	25
Figura 10 - Turbina Eólica de eixo Horizontal e com diferentes números de pás. ....	26
Figura 11 - Turbina Eólica de eixo Vertical, Darrieus. ....	27
Figura 12 - Controle por Estol (Fluxo separado em volta do perfil da pá). ....	27
Figura 13 - Controle de Passo (Fluxo aderente ao perfil da pá). ....	28
Figura 14 - Moinho de Vento típico da Holanda. ....	29
Figura 15 - Principais marcos da Energia Eólica no período do Século XI ao XIX. ....	30
Figura 16 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX. ....	32
Figura 17 - Crescimento do diâmetro das turbinas eólicas. ....	32
Figura 18 - Investimentos Globais em Energias Renováveis, 2004 - 2011. ....	33
Figura 19 - Evolução da Capacidade Total Instalada no Mundo. ....	34
Figura 20 - Capacidade Total Instalada no mundo, 2010 – 2012 [GW]. ....	35
Figura 21 - Capacidade Instalada nos Maiores Mercados Mundiais em 2011 e 2012 [GW]. ...	36
Figura 22 - Matriz de Energia Elétrica. ....	38
Figura 23 - Participação das Renováveis na Matriz Energética brasileira e mundial. ....	39
Figura 24 - Capacidade de Geração Eólica do Brasil na Atualidade. ....	40
Figura 25 - Projeção da Evolução de Potência Instalada [GW]. ....	41
Figura 26 - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. ....	42
Figura 27 - Ambiente de Mercado para a Comercialização de Energia Elétrica. ....	45
Figura 28 - Matriz de Uso de Energia Primária no mundo, no final de 2010. ....	47
Figura 29 - Emissão de CO <sub>2</sub> por fonte na Produção de Eletricidade, em 2010. ....	48
Figura 30 - Emissão de CO <sub>2</sub> na Demanda de Energia Mundial. ....	49
Figura 31 - Uso Compartilhado do Solo entre Energia Eólica e Pecuária. ....	52
Figura 32 - Fazenda Eólica com Impacto Visual Favorável, Harmonizado com o Ambiente. ....	53
Figura 33 - Sombra de um Aerogerador. ....	53

Figura 34 - Estimativa de Morte Anual de Pássaros em Países baixos. ....	55
Figura 35 - Bando de Pássaros atravessando um Parque Eólico. ....	56
Figura 36 - Partes de um Aerogerador.....	58
Figura 37 - Diagrama Unifilar de uma Usina Eólica.....	66
Figura 38 - Requisitos técnicos gerais no Brasil para conexão ao sistema de potência. ....	68
Figura 39 - Esquema da Metodologia para o projeto e implantação de uma Usina Eólica.....	70
Figura 40 - Usina Eólica Cerro Chato. ....	71
Figura 41 - Localização das Usinas Coxilha Negra V, VI e VII. ....	73
Figura 42 - Subestação Coletora.....	74
Figura 43 - Escavação das valas da Rede de Média Tensão. ....	75
Figura 44 - Fluxograma do sistema de transmissão de Cerro Chato. ....	75
Figura 45 - Condições Financeiras. ....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Balanço Energético Nacional 2012. ....	38
Tabela 2 - Emissões de CO2 de diferentes tecnologias de Geração de Energia Elétrica. ....	50
Tabela 3 - Determinação da EAG de um Aerogerador em uma determinada localização. ....	62
Tabela 4 - Dados Técnicos do complexo Eólico. ....	72
Tabela 5 - Dados Técnicos dos aerogeradores da usina. ....	73
Tabela 6 - Composição do custo de implantação do complexo eólico de Cerro Chato. ....	78
Tabela 7 - Composição dos custos operacionais do complexo eólico de Cerro Chato. ....	81
Tabela 8 - VPL e TIR do complexo eólico de Cerro Chato. ....	84

## LISTA DE SIGLAS

CO2	Dióxido de Carbono
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
GWEC	Global Wind Energy Council
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
SIN	Sistema Elétrico Interligado Nacional
MME	Ministério de Minas e Energia
CCVE	Contratos de Compra e Venda de Energia
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ACL	Ambiente de Contratação Livre
IEA	International Energy Agency
Mtoe	Million tonnes of oil equivalent
Mt	Million Tonnes
EAG	Energia Anual Gerada
BT	Baixa Tensão
MT	Média Tensão
AT	Alta Tensão

EAT	Extra Alta Tensão
UAT	Ultra Alta Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
TIR	Taxa Interna de Retorno
RMT	Rede de Média Tensão
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
VPL	Valor Presente Líquido
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
O&M	Operação e Manutenção
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TJLP	Taxa Básica de Juros de Longo Prazo
MPMEs	Micro, Pequenas e Médias Empresas
TFSEE	Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PIS	Programa de Integração Social
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
ROB	Receita Operacional Bruta
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento

REIDI	Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura
IR	Imposto de Renda
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	EXPOSIÇÃO DO ASSUNTO .....	12
1.2	OBJETIVO .....	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2</b>	<b>ENERGIA EÓLICA.....</b>	<b>16</b>
2.1	O VENTO.....	16
2.1.1	A Velocidade do vento.....	17
2.1.2	A Direção do vento .....	21
2.1.3	Energia e potência extraída do vento.....	22
2.2	TURBINAS EÓLICAS .....	24
2.2.1	Tipos de turbinas eólicas.....	24
2.2.2	Orientação do eixo das turbinas eólicas .....	26
2.2.3	Controle de potência e velocidade das turbinas eólicas .....	27
2.3	HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA.....	28
2.4	ENERGIA EÓLICA NO CONTEXTO MUNDIAL.....	33
2.5	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E APROVEITAMENTO ATUAL .....	37
2.5.1	Potencial eólico Brasileiro.....	41
2.5.2	Mudanças no marco legal e incentivos .....	43
<b>3</b>	<b>QUESTÃO AMBIENTAL .....</b>	<b>47</b>
3.1	ASPECTOS POSITIVOS DA ENERGIA EÓLICA.....	49
3.2	ASPECTOS NEGATIVOS DA ENERGIA EÓLICA .....	51
3.2.1	Utilização do terreno .....	51
3.2.2	Impacto visual.....	52
3.2.3	Emissão de ruído.....	54
3.2.4	Impacto sobre as aves.....	54
3.2.5	Interferências eletromagnéticas .....	56
3.2.6	Segurança .....	57
<b>4</b>	<b>CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>58</b>
4.1	AEROGERADORES .....	58
4.1.1	Partes de um aerogerador.....	58
4.1.2	Controle de frequência de um aerogerador .....	60
4.1.3	Produção de energia de um aerogerador .....	61
4.1.4	Performance de um aerogerador .....	63
4.2	CONEXÃO DA USINA EÓLICA .....	64
4.2.1	Tipos de conexões .....	65
4.2.2	Qualidade da energia elétrica produzida em um parque eólico.....	66
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>69</b>
5.1	DADOS DO PARQUE EÓLICO .....	70
5.1.1	O empreendimento .....	71
5.1.2	Localização do parque eólico.....	72
5.1.3	Aerogeradores.....	73

5.1.4	Sistema de Transmissão .....	74
5.2	ASPECTOS ECONÔMICOS.....	76
5.2.1	Ferramentas de análise .....	76
5.2.2	Custos de implantação do parque eólico .....	77
5.2.3	Receitas da energia gerada .....	79
5.2.4	Custos da energia gerada.....	80
5.2.5	Resultados .....	84
6	CONCLUSÕES.....	86
	REFERÊNCIAS .....	88
	APÊNDICE - PROJEÇÃO DO FLUXO DE CAIXA DO PROJETO .....	94

# 1 INTRODUÇÃO

A energia eólica tem sido utilizada pelo homem desde a antiguidade para os mais diversos fins: as grandes navegações aconteceram devido à força dos ventos que empurravam as embarcações pelos mares e em muitas civilizações os cata-ventos eram utilizados para moer grãos e bombear água, etc. No entanto, apesar do homem utilizar o vento a seu favor desde há muito tempo, só no final do século XIX surgiram às primeiras tentativas de gerar eletricidade e somente um século mais tarde, mais exatamente na década de 70, com a crise internacional do petróleo, é que aumentou o interesse e os investimentos que possibilitaram o desenvolvimento e a aplicação dessa tecnologia em escala comercial [1].

## 1.1 EXPOSIÇÃO DO ASSUNTO

Um dos assuntos mais recorrentes da atualidade é a questão relativa à energia, devido a diversos fatores, tais como: a alta nos preços devido ao aumento do consumo mundial de energia, a constante ameaça de escassez e às pressões ambientais devido aos riscos ao meio ambiente. Isso ocorre, pois a energia tem repercussão tanto na economia e na política quanto na sociedade e na natureza [2].

A maior parte da energia utilizada no planeta é de origem não renovável. As energias de fontes não renováveis existem na natureza em quantidades limitadas, ou seja, elas se esgotam com a sua utilização e não podem ser repostas pelo homem ou pela natureza, a um prazo útil. Elas são também chamadas de energias sujas, pois a sua utilização produz importantes danos para o meio ambiente e para a sociedade: destruição dos ecossistemas, doenças, redução da produtividade agrícola, corrosão de edificações, monumentos e infraestruturas, deterioração da camada de ozônio e o efeito estufa [3].

As energias de fontes não renováveis são os combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural) e o urânio, que é matéria prima na obtenção da energia nuclear através dos processos de fissão e de fusão nuclear. Os combustíveis fósseis são extremamente poluentes, pois produzem grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), grande responsável pelo efeito estufa. Já os combustíveis nucleares, não emitem gases poluentes na atmosfera, mas são extremamente perigosos quanto aos riscos de explosão nuclear, vazamentos e contaminação radioativos e a produção de resíduos radioativos [3].

Diante dos problemas de ordem ambiental e do fato de que os combustíveis não renováveis são finitos, as fontes de energias renováveis surgem como uma alternativa ou complemento às convencionais, pois são inesgotáveis e não poluentes, ou seja, a produção de energia através das fontes renováveis, não gera a emissão dos gases causadores do efeito estufa, com exceção da biomassa, devido à queima de resíduos orgânicos. Uma fonte de energia é dita renovável quando ela é produzida de fontes que ocorrem repetidamente na natureza, ou seja, não é possível prever o fim temporal de sua utilização. Ela é inesgotável, mas limitada na quantidade de energia extraída a cada momento [3].

O Brasil é um dos poucos países que possui a energia hidráulica, limpa e renovável, como fonte principal de energia. Porém, com o aumento do consumo de energia no país, essa fonte não será suficiente. Devido às características geográficas do país: intenso recurso solar, vasta costa litorânea, dimensões continentais, bacias hidrográficas com diversidade hidrológica e abundância vegetal, todas as regiões do Brasil propiciam o aproveitamento das diversas fontes renováveis de energia. Dessa forma, o Brasil é um exemplo de matriz energética limpa e um dos maiores potenciais de energia renovável do mundo [4].

As principais fontes de energia renovável são: a hídrica, a eólica, a geotérmica, a biomassa, a solar e a marítima. Dentre essas fontes, a energia eólica é a que desperta maior atenção no momento, devido seu estágio avançado de maturidade internacional, assim como, a facilidade e agilidade de instalação, aliada a redução dos custos, sendo a fonte de energia que mais cresce no mundo [4].

Essa fonte de energia alternativa é abundante, renovável, disponível em muitos lugares e considerada a mais limpa do mundo, já que não emite dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Ainda, ao contrário do gás natural e do petróleo, a energia eólica não é vulnerável a pressões políticas e econômicas [5].

No Brasil a utilização da energia eólica ainda é recente quando comparada com alguns países Europeus, como a Alemanha e a Dinamarca, onde esta tecnologia faz parte da matriz energética desses países a muito tempo. Nos últimos anos, sua participação no contexto energético brasileiro vem aumentando, principalmente, a partir da criação do Proinfa (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) e, ultimamente, aos sucessivos leilões de compra e venda desta energia [5].

O Proinfa foi muito importante no sentido de criar condições e incentivos para o mercado brasileiro começar a dar os seus primeiros passos neste mercado. Após, com o sistema de leilões o mercado ficou competitivo e fez com que o investimento em energia eólica crescesse rapidamente, obtendo resultados mais convincentes em termos de capacidade.

Somado a importância dos programas no sentido de incentivar investimentos no mercado de energia eólica, o Brasil possui um enorme potencial eólico, principalmente no Nordeste e na região Sul. Segundo o *Global Wind Energy Council* (GWEC), o país mais promissor no mercado de energia eólica é o Brasil, pelo menos nos próximos cinco anos [5].

Com o novo Atlas Eólico Brasileiro, que deve ser lançado na primeira metade de 2013, a potência eólica estimada para medidas realizadas considerando as torres atuais com mais de 100 metros de altura, chega a 300 GW, o que equivale ao triplo da capacidade atual de toda a matriz elétrica brasileira. Isso confirma a tendência de crescimento do mercado eólico no Brasil. Assim, a fonte eólica pode ser uma opção complementar à fonte hidrelétrica predominante no sistema brasileiro, contribuindo com a diversificação da matriz energética do país [5].

## 1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo fazer um estudo da possibilidade de utilizar a energia eólica, na produção de energia elétrica, discutindo as suas vantagens e desvantagens relacionadas às questões ambientais e econômicas, avaliar os métodos e tecnologias existentes para a geração de energia elétrica a partir da força dos ventos; verificar os programas existentes para incentivar o uso deste tipo de energia no Brasil, fazer um estudo dos custos de construção e de manutenção de uma unidade geradora de energia elétrica a partir do vento e, por fim, através de um estudo de caso, analisar a viabilidade econômica do complexo eólico de Cerro Chato.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este projeto foi dividido nos seguintes capítulos: energia eólica, questão ambiental, conversão de energia elétrica, estudo de caso e conclusão.

No Capítulo 2, o tema é a energia eólica. Nele, foi realizado um estudo sobre a energia eólica como fonte de energia primária, abordando as questões históricas do uso dessa energia,

os aspectos dinâmicos relacionados ao vento, a potência eólica disponível e utilizável, as turbinas eólicas e seus tipos, a geração eólica no mundo e no Brasil, uma análise dos dados eólicos aplicáveis ao setor energético brasileiro e dos programas de incentivo à utilização da energia eólica.

No Capítulo 3, é desenvolvida a questão ambiental da utilização da energia eólica, abordando os pontos negativos em relação à utilização do terreno, impacto visual, emissão de ruídos, colisão de aves, segurança e outros. Assim como, os benefícios desta fonte, tais como, não emissão de gases poluentes e os ventos serem recursos abundantes e inesgotáveis.

No Capítulo 4 são abordados os tipos de aerogeradores e as partes que o compõem, citando as suas funcionalidades. Também, é tratado das formas de ligação de uma usina eólica à rede de energia.

No Capítulo 5, é feito um estudo de caso de um parque eólico. É estudada a viabilidade econômica do projeto através de ferramentas de análise financeira, analisando os custos e as receitas que um parque eólico produz, sendo que o parque objeto do estudo é o complexo eólico de Cerro Chato em Santana do Livramento, no Rio Grande do Sul.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 ENERGIA EÓLICA

Energia eólica é a energia obtida do vento, que é a energia cinética do ar em movimento na atmosfera terrestre. O termo *eólico* é derivado do latim *aeolicus*, nome associado à Éolo, que na mitologia grega é o Deus dos ventos, ou seja, pertencente ou relativo ao vento [6]. Portanto, o vento é o combustível de um sistema de energia eólica [7].

Para obter-se um aproveitamento energético de forma eficiente, é necessário estudar e conhecer o comportamento do vento. Os dados que descrevem o seu comportamento e que auxiliam a determinar o potencial eólico de uma região são relacionados à direção e à intensidade da velocidade do vento [7].

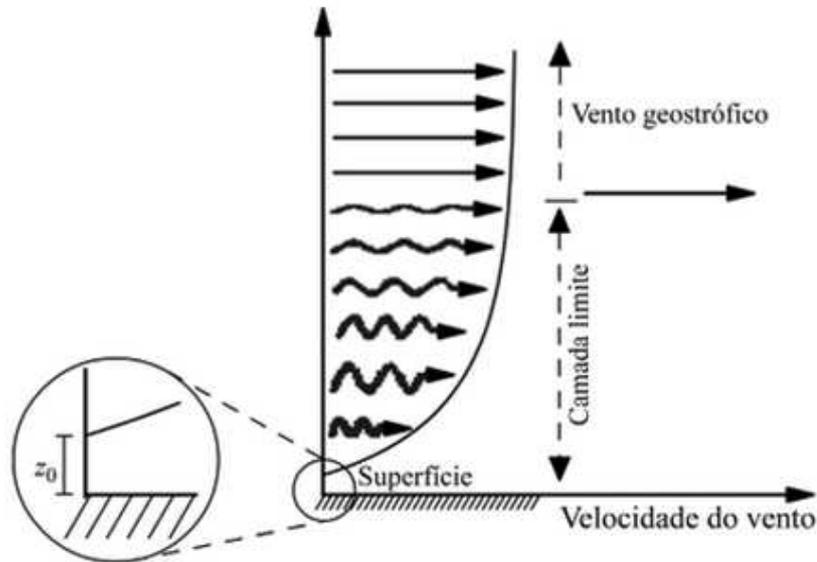
### 2.1 O VENTO

O vento é resultado do movimento do ar gerado principalmente pela diferença de temperatura entre as regiões polares e tropicais. Nas regiões tropicais, os raios solares são mais fortes causando o aquecimento do ar que se eleva, cedendo lugar ao ar polar mais frio e mais pesado que ocupa o lugar do ar quente tropical que, por sua vez, desloca-se para os polos. Além da diferença de temperatura, existem outros fatores que influenciam a origem do vento, tais como: a rotação da Terra, o relevo, a rugosidade do solo e a topografia do local. Por isso, o vento varia constantemente na direção do seu deslocamento, na intensidade e na velocidade [7].

O vento utilizado pelos geradores eólicos é aquele presente numa faixa próxima a superfície terrestre. A velocidade do vento varia conforme a altitude em função do tipo de terreno, produzindo uma distribuição vertical. A caracterização da distribuição vertical ocorre da seguinte forma: zona de alta turbulência, próximo ao solo, onde a velocidade do vento é nula devido ao atrito do ar com a superfície da terra; zona de baixa turbulência, a parte mais elevada da distribuição vertical, onde o vento não é perturbado pela superfície, chamado de vento geostrófico; e a camada presente entre as duas zonas anteriores, ao longo do eixo vertical, onde ocorre uma variação da velocidade do vento com o aumento da altura, conforme a Figura 1 [8].

O vento próximo ao solo sofre um retardo em sua velocidade, devido à rugosidade do terreno sendo que a mesma é devida a influência da superfície do terreno e dos obstáculos presentes, tais como vegetação e construções [10].

Figura 1 - Distribuição Vertical da Velocidade do Vento.



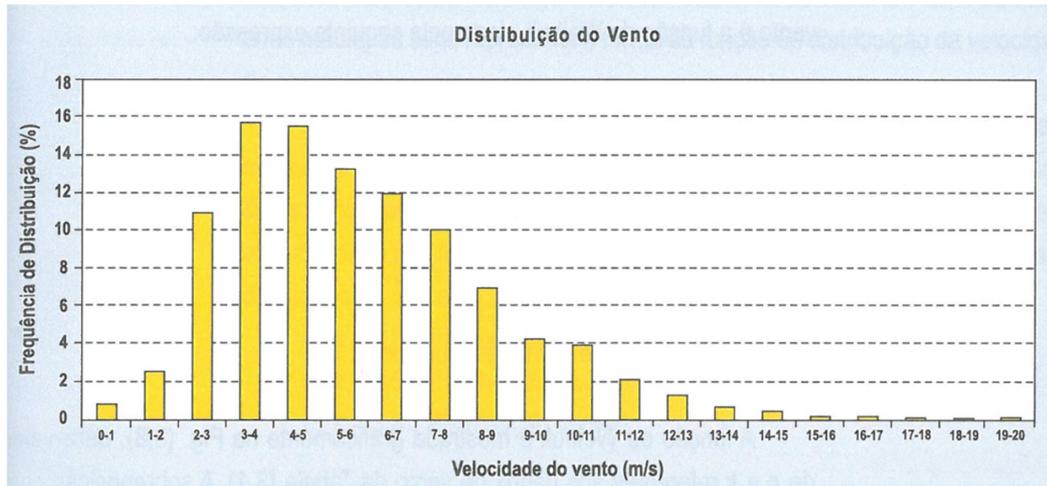
Fonte: O Aproveitamento da Energia Eólica, 2007 [9].

### 2.1.1 A VELOCIDADE DO VENTO

A velocidade do vento varia continuamente. A variação da velocidade pode ocorrer em um curto prazo, como ao longo de um mesmo dia, ao longo de um mês ou ao longo de um ano, ou mesmo em um longo prazo, como ao longo de vários anos [10]. A velocidade do vento pode ser medida através de um aparelho chamado anemômetro. As medições são realizadas em estações anemométricas com o aparelho colocado no mínimo a dez metros do solo [7]. Como o vento apresenta variações não determinísticas, para se obter informações sobre o seu comportamento, é necessário analisar os dados obtidos utilizando o tratamento estatístico [10].

No tratamento estatístico, os dados de velocidade do vento são divididos em faixas de 1 m/s, registrando a velocidade média dos ventos em períodos discretos de tempo, normalmente de 10 minutos, mas podem chegar a horas. De posse desses dados é possível gerar um gráfico com as frequências de distribuição da velocidade do vento, conforme a Figura 2, onde se pode observar na horizontal a velocidade do vento dividida em faixas de 1 m/s e na vertical o período de tempo em percentual que uma determinada velocidade foi observada [10].

Figura 2 - Frequência de Distribuição da Velocidade do Vento.



Fonte: Energia Eólica para produção de Energia Elétrica, 2009 [10].

A curva da frequência das velocidades é a curva mais importante, pois dela são derivadas outras curvas, como a curva de energia disponível, a curva com períodos de calmaria e dos ventos fortes, além de fornecer o período de tempo que uma determinada velocidade foi observada [7].

Pode-se obter a velocidade média do vento para o período em estudo, através da Equação (1).

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (1)$$

Onde:

$v_i$  = velocidade do vento registrada [m/s];

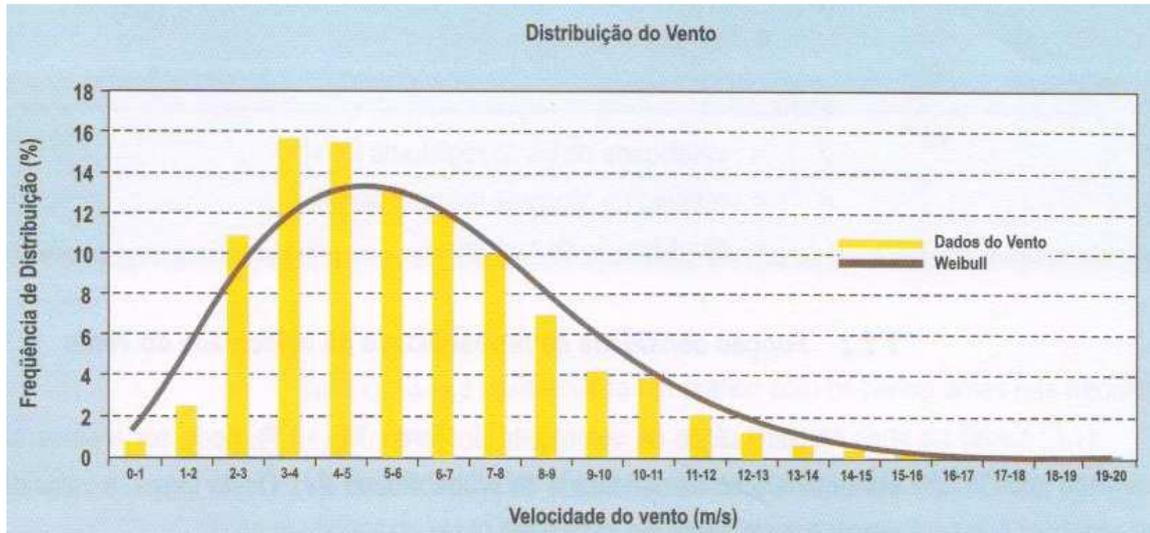
$n$  = número de registros;

$i$  = identificação do registro [10].

A curva da velocidade média do vento é importante, pois dela é possível estimar a energia produzida, já que os aerogeradores começam a gerar em uma determinada velocidade de vento (*cut-in*) e param de gerar quando um determinado valor de segurança (*cut-out*) é ultrapassado pela velocidade do vento. Ela também é importante para o dimensionamento do sistema de armazenamento [7].

A função de densidade de probabilidade que melhor representa a distribuição de velocidades do vento é a Função de Weibull, conforme se observa na Figura 3 [10].

Figura 3 - Distribuição de Velocidades do Vento e da Função de Weibull.



Fonte: Energia Eólica para produção de Energia Elétrica, 2009 [10].

A função densidade de probabilidade calculada pela Função de Weibull é dada pela Equação (2).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Onde:

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$c$  = fator de escala [m/s];

$k$  = fator de forma [10].

O fator de forma  $k$ , refere-se à forma da função de distribuição da velocidade do vento, ou seja, ele depende da variância da velocidade do vento em torno da velocidade média. O fator de escala  $c$ , depende da velocidade média do vento no local em estudo [10].

A partir da função densidade de probabilidade de Weibull, chega-se a velocidade média através da Equação (3).

$$V = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot dv \quad (3)$$

Onde:

$v$  = velocidade do vento [m/s] [10].

Com o fator de escala  $c$  mantido constante e variando o fator de forma  $k$  para alguns valores específicos, observam-se diversas curvas de Weibull, ou seja, alterando o valor de  $k$ , altera-se a forma gráfica da função. Uma das curvas obtidas é a que melhor representa os casos de distribuição da velocidade do vento. Ela é obtida com o fator de forma  $k = 2$  e é conhecida como, distribuição de Rayleigh [10].

A distribuição de Rayleigh é importante, já que ela é usada em estudos preliminares, onde o perfil do vento não é conhecido, pois caso não exista uma curva de frequência de velocidades do vento, as velocidades do vento podem ser obtidas a partir da velocidade média, utilizando essa distribuição [10].

A distribuição de Rayleigh é dada pela Equação (4).

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{V^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{v}{V}\right)^2} \quad (4)$$

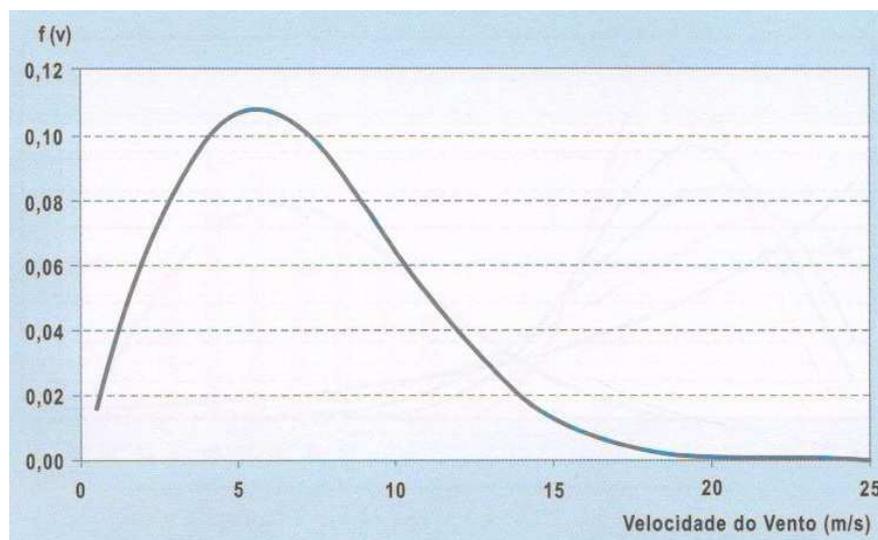
Onde:

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$V$  = velocidade média do vento [m/s] [10].

A Figura 4, ilustra a distribuição de Rayleigh representando a distribuição de velocidade do vento para uma velocidade média de 7 m/s [10].

Figura 4 - Distribuição de Rayleigh, para velocidade média de 7 m/s.



Fonte: Energia Eólica para produção de Energia Elétrica, 2009 [10].

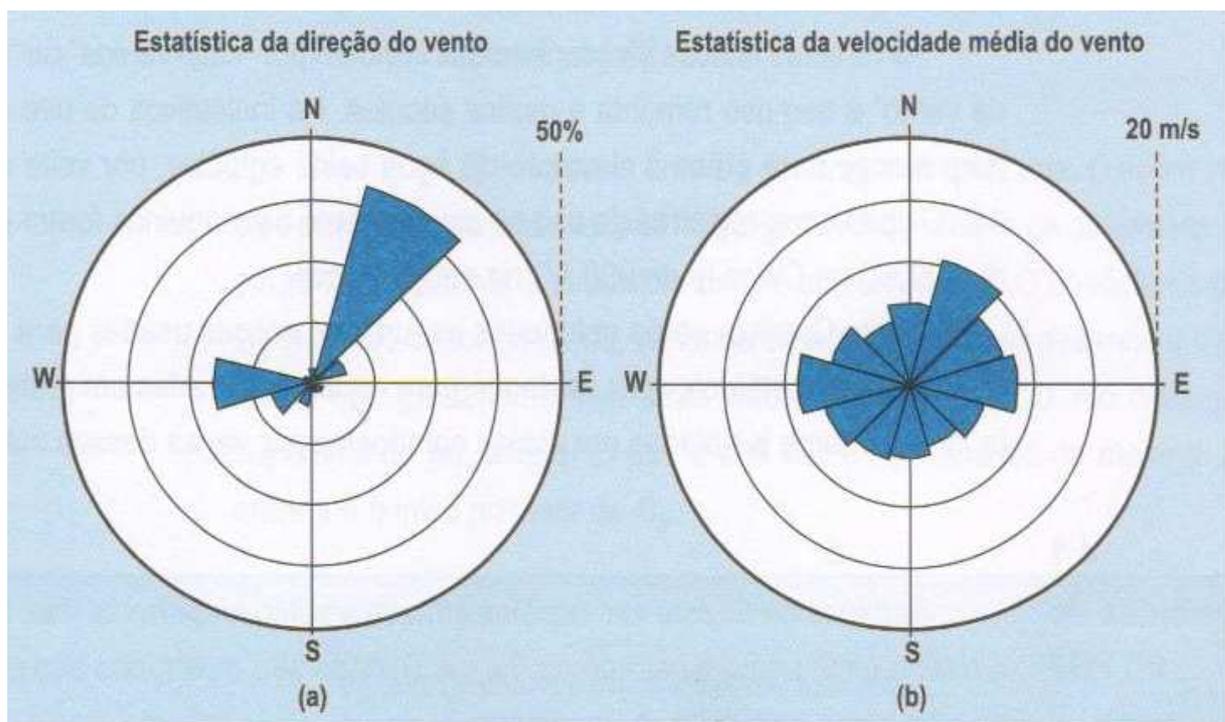
### 2.1.2 A DIREÇÃO DO VENTO

Assim como a velocidade, o vento também varia em direção e por isso seu comportamento deve ser estudado. A partir dos dados da direção do vento, determina-se a rosa dos ventos, que é uma representação gráfica da predominância do vento em determinada direção em percentual das ocorrências totais. Cada direção é dividida em geral em setores de  $30^\circ$ , onde são feitos os estudos do comportamento do vento [10].

Quando uma usina eólica é projetada, é preciso conhecer o comportamento do vento em cada setor da rosa dos ventos para determinar o desempenho das turbinas eólicas a serem instaladas e a produção de energia esperada [10].

A Figura 5, ilustra a rosa dos ventos.

Figura 5 - Rosa dos Ventos, com setores de  $30^\circ$ .



Fonte: Energia Eólica para produção de Energia Elétrica, 2009 [10].

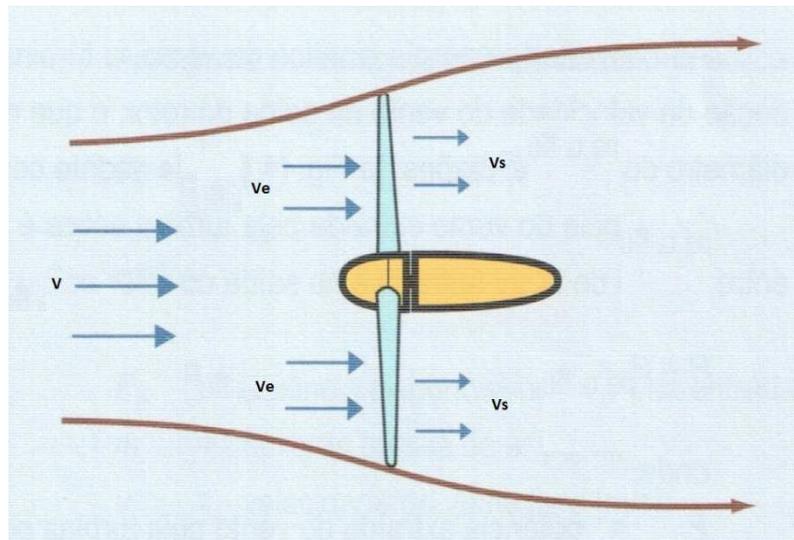
Observando a figura da Rosa dos Ventos, no gráfico da Estatística da direção do vento, observa-se a predominância do vento relacionado ao setor entre  $15^\circ$  e  $45^\circ$ , é normalmente determinado de setor de  $30^\circ$ , que é a direção central do setor. Na estatística da velocidade média do vento, é possível obter-se informações sobre a velocidade média do vento em cada um dos setores de  $30^\circ$ . Neste caso, a maior média também é no setor de  $30^\circ$  [10].

### 2.1.3 ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO

Energia é a quantidade de trabalho que um sistema é capaz de produzir. A energia cinética das moléculas do ar em movimento pode ser convertida em energia elétrica por um aerogerador acoplado a uma turbina eólica, sendo uma turbina eólica, qualquer sistema que converte a energia cinética do vento em energia elétrica. A porcentagem do aproveitamento da energia dos ventos que pode ser convertida em energia mecânica no rotor é muito baixa, sendo de 59,3%. Este limite é conhecido como limite de Betz, em homenagem ao físico alemão Albert Betz. A baixa porcentagem é devido a natureza das turbinas eólicas e não a ineficiências nos aerogeradores [7].

Para determinar o valor máximo de energia extraída do vento, Albert Betz, idealizou um tubo de vento, onde  $v_e$  representa a velocidade do vento na entrada da turbina [m/s],  $v_s$  a velocidade do vento na saída da turbina [m/s] e  $v$  a velocidade do vento livre, antes da turbina [m/s], conforme a Figura 6 [10].

Figura 6 - Fluxo de Vento através de uma Turbina Eólica.



Fonte: Energia Eólica para produção de Energia Elétrica, 2009 [10].

A velocidade do vento sofre uma redução provocada pela turbina eólica na saída do rotor, resultando no aumento do diâmetro do tubo de vazões. Apenas uma parte da potência disponível no vento é retirada pela turbina, conforme a Equação (5) [10].

$$P_t = P_e - P_s \quad (5)$$

Onde:

$P_t$  = potência extraída do vento [W];

$P_e$  = potência presente no vento na entrada do rotor [W];

$P_s$  = potência presente no vento na saída do rotor [W] [10].

Para uma turbina eólica extrair a máxima potência do vento, é preciso que a velocidade do vento na saída do rotor seja superior a 1/3 de sua velocidade original, ou seja, a máxima potência do vento é obtida conforme a Equação (6) [10].

$$v_e = \frac{2}{3} \cdot v \text{ e } v_s = \frac{1}{3} \cdot v \quad (6)$$

Onde:

$v_e$  = representa a velocidade do vento na entrada da turbina [m/s];

$v_s$  = a velocidade do vento na saída da turbina [m/s];

$v$  = a velocidade do vento livre, antes da turbina [m/s] [10].

Assim, pode-se obter a potência do vento na entrada da turbina eólica, conforme a Equação (7).

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \left( \rho \cdot A \cdot \frac{2}{3} \cdot v \right) \cdot v^2 \quad (7)$$

e na saída da turbina, conforme a Equação (8).

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot \left( \rho \cdot A \cdot \frac{2}{3} \cdot v \right) \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot v \right)^2 \quad (8)$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$A$  = área da seção transversal do rotor da turbina eólica [m<sup>2</sup>] [10].

Usando as Equações (5), (7) e (8), chega-se a máxima potência que uma turbina eólica pode extrair do vento, conforme a Equação (9).

$$P_{t_{\max}} = \frac{1}{2} \cdot \left( \rho \cdot A \cdot \frac{2}{3} \cdot v \right) \cdot v^2 - \frac{1}{2} \cdot \left( \rho \cdot A \cdot \frac{2}{3} \cdot v \right) \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot v \right)^2 = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \right) \quad (9)$$

Onde:

$P_{t_{m\acute{a}x}}$  = máxima potência que uma turbina ideal pode extrair vento [W] [10].

Assim, chega-se ao limite de Betz, onde apenas 16/27 da potência presente no vento pode ser extraída por uma turbina eólica, ou seja, uma eficiência de 59,3% [10].

Observando a expressão definida na Equao (9), constata-se que a potência máxima extraída do vento é proporcional ao cubo da velocidade do vento, a área varrida pelas ps da turbina e a densidade do ar. Com isso, para produo de energia elétrica, são interessantes somente locais onde os valores de velocidades mdias anuais sejam superiores a 6 m/s [11].

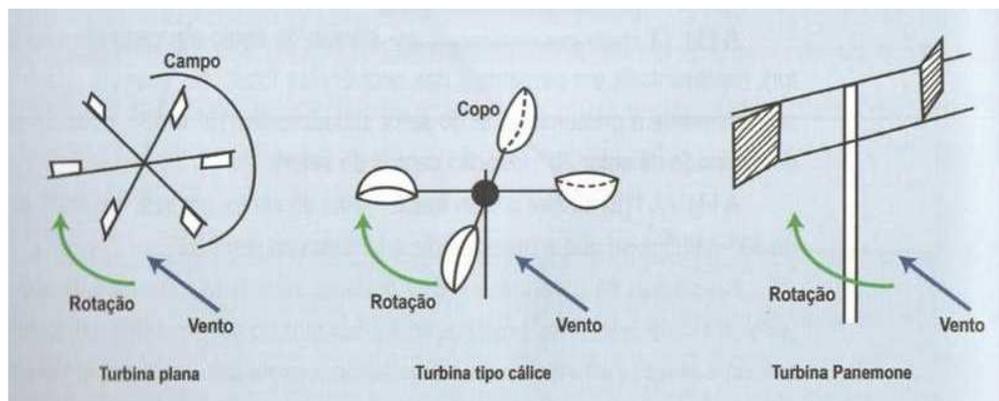
## 2.2 TURBINAS EÓLICAS

Turbinas eólicas são máquinas desenvolvidas para realizar a conversão da potência disponível no vento em potência mecânica, para conversão em energia elétrica [12]. As turbinas eólicas são classificadas por diferentes critérios, tais como: interao das ps com o vento, orientao do eixo, números de pós, controle de velocidade das turbinas e tamanho [13].

### 2.2.1 TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS

Existem dois tipos de turbinas eólicas conforme a sua interao aerodinâmica com o vento: as turbinas de arraste e de sustentao. As turbinas de arraste são aquelas em que a força dos ventos empurra as ps, forçando o rotor a girar. O vento sofre uma desacelerao ao incidir sobre as ps, resultando numa força de arraste que age perpendicularmente sobre a superfície das ps. Na Figura 7, pode-se observar a presença de três tipos de ps: plana, cálice e Panemone [12].

Figura 7 - Turbina de Arraste.



Fonte: Energia Eólica para produo de Energia Elétrica, 2009 [12].

Neste tipo de turbina, a velocidade das pás será sempre menor do que a velocidade do vento, limitando a sua eficiência [13].

As turbinas de sustentação possuem suas pás similares aos aerofólios de aviões, conforme a Figura 8 [12]. Elas são mais eficientes do que as turbinas de arraste, pois podem se mover mais rápido do que o vento [13].

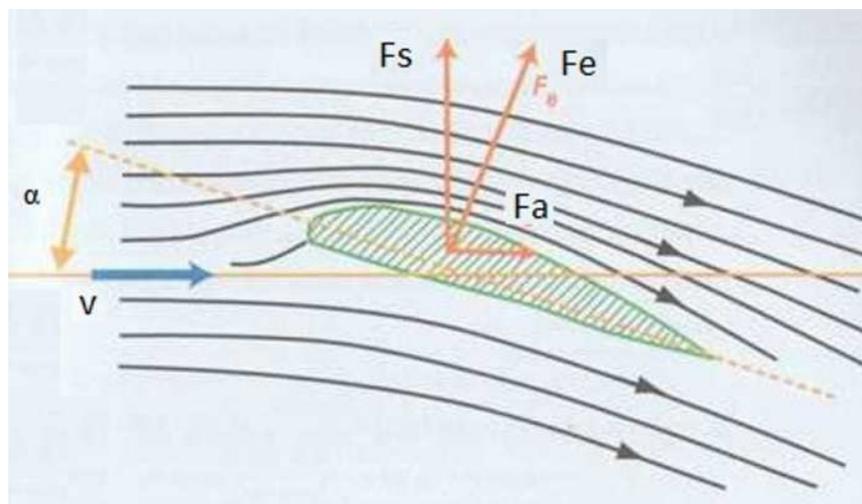
Figura 8 - Turbina de Sustentação.



Fonte: Introdução a Energia Eólica, 2003 [14].

Neste tipo de turbina, o vento “ $v$ ” que incide sobre a pá em um ângulo “ $\alpha$ ” é forçado a mudar de direção, fazendo com que a sua velocidade varie e surja uma força de empuxo “ $F_e$ ”. A força de empuxo pode ser decomposta na força de sustentação “ $F_s$ ” e na força de arraste “ $F_a$ ”, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Fluxo de ar na seção da pá de um rotor de uma Turbina Eólica de Sustentação.



Fonte: Energia Eólica para produção de Energia Elétrica, 2009 [12].

A força de sustentação “ $F_s$ ” que age sobre a pá de um rotor é dada pela Equação (10).

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_s \cdot A \quad (10)$$

Onde:

$F_s$  = força de sustentação [N];

$\rho$  = massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$C_s$  = coeficiente de sustentação [adimensional];

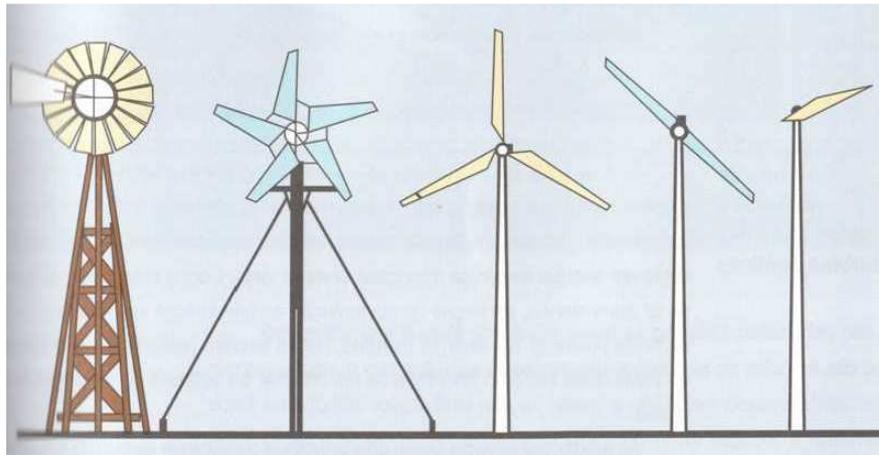
$A$  = área da superfície superior da pá [m<sup>2</sup>] [12].

### 2.2.2 ORIENTAÇÃO DO EIXO DAS TURBINAS EÓLICAS

Existem diferentes tipos de turbinas eólicas segundo a orientação do seu eixo. As turbinas podem ser de eixo horizontal ou vertical [12].

As turbinas de eixo horizontal possuem o rotor perpendicular à direção do vento e são as mais usadas atualmente. Elas podem ser fabricadas com diferentes números de pás no seu rotor, conforme a Figura 10 [12].

Figura 10 - Turbina Eólica de eixo Horizontal e com diferentes números de pás.



Fonte: Energia Eólica para produção de Energia Elétrica, 2009 [12].

As turbinas Darrieus e Savonius são exemplos de turbinas de eixo vertical. A turbina Savonius é mais usada para o bombeamento e a moagem, pois a velocidade do seu rotor é

baixa. Já a turbina Darrieus é usada na geração de energia elétrica, pois a velocidade do seu rotor é alta, girando mais rápido do que o vento, conforme a Figura 11 [12].

Figura 11 - Turbina Eólica de eixo Vertical, Darrieus.



Fonte: Energia Eólica para produção de Energia Elétrica, 2009 [15].

### 2.2.3 CONTROLE DE POTÊNCIA E VELOCIDADE DAS TURBINAS EÓLICAS

As turbinas possuem dois modos diferentes de controle aerodinâmico: um passivo, chamado de controle por estol (*stall control*), e um ativo, chamado de controle de passo (*pitch control*). Este controle é necessário, pois com o aumento da velocidade do vento, a potência extraída cresce proporcionalmente ao cubo da velocidade do vento, conforme a Equação (9) e as forças de sustentação aerodinâmicas crescem proporcionalmente ao quadrado da velocidade do vento, conforme a Equação (10) [12].

No controle por estol, o ângulo de passo das pás do rotor é fixo, ou seja, as pás não podem ser giradas em torno do seu eixo longitudinal. O ângulo é definido de modo que para velocidades maiores do que a nominal o fluxo de ar se afasta da superfície da pá (estol), gerando regiões de turbulência entre o fluxo e a superfície da pá, conforme a Figura 12 [12].

Figura 12 - Controle por Estol (Fluxo separado em volta do perfil da pá).

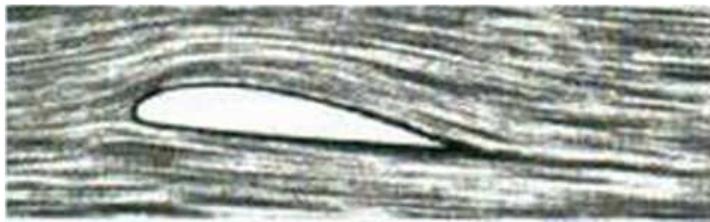


Fonte: Tutorial de Energia Eólica, 2008 [16].

Na Figura 12 se pode observar o fluxo de ar separado em volta do perfil da pá do rotor numa situação de estol. Esta configuração diminui a força de sustentação e aumenta a de arrasto, controlando a potência de saída da turbina [12].

No controle de passo, o ângulo de passo das pás do rotor é variável, ou seja, as pás são giradas em torno do seu eixo longitudinal para aumentar o ângulo de ataque do fluxo de ar. Este controle ocorre sempre que a potência do gerador for maior do que a nominal, devido ao aumento da velocidade do vento. Assim, é possível controlar as forças aerodinâmicas sobre as pás, a velocidade das turbinas e a potência extraída do vento. As pás neste tipo de turbina podem girar em torno de  $90^\circ$  de maneira a encontrar o ângulo de ataque adequado para que a turbina sempre produza uma potência constante e nunca ultrapasse a potência nominal. O fluxo em torno do perfil da pá do rotor é sempre aderente, obtido pelo controle de passo, em todas as condições de vento, até que a turbina atinja a potência nominal, conforme a Figura 13 [12].

Figura 13 - Controle de Passo (Fluxo aderente ao perfil da pá).



Fonte: Tutorial de Energia Eólica, 2008 [16].

Existe ainda um sistema de controle híbrido, que é uma mistura dos dois controles já citados, o controle por estol ativo. Neste sistema, o controle é feito para que as pás atinjam uma menor força de sustentação girando o rotor. As pás no controle por estol ativo possuem um movimento de giro com ângulos bem inferiores aos obtidos nas turbinas com controle de passo [12].

### 2.3 HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA

Com o desenvolvimento da agricultura pela humanidade, surgiu a necessidade da criação de ferramentas que auxiliassem nas atividades diárias. Inicialmente, foram utilizados moinhos movidos pela força humana ou animal, para moer grãos ou realizar o bombeamento de água. Após, passou-se a utilizar a força dos ventos como força motriz, surgindo os moinhos de vento [17].

Apesar de um dos primeiros registros da utilização da energia eólica através de cata-ventos para fazer o bombeamento de água e moagem de grãos ser proveniente da Pérsia, por volta de 200 A.C. acredita-se que civilizações como China, por volta de 2000 A.C., e o Império Babilônico, por volta de 1700 A.C., já utilizavam cata-ventos rústicos na irrigação [18]. Outras civilizações do oriente médio, como os muçulmanos, construíram os seus próprios moinhos de vento baseados no legado dos Persas, ou seja, usando cata-ventos com eixo vertical. Logo foi verificado que este tipo de moinho não era favorável, pois a superfície das pás acompanhava o vento em meia revolução, mas giravam contra o mesmo na outra metade [19].

Foi no retorno das Cruzadas que os cata-ventos foram introduzidos na Europa através dos soldados, mas a ideia do eixo vertical foi abandonada em favor do eixo horizontal. Os primeiros moinhos com eixo horizontal foram construídos a partir do século XII no Ocidente. Com início pela Inglaterra e França, logo se espalharam pela Holanda, Alemanha e Rússia. Um dos tipos de moinhos mais difundidos por toda a Europa foi o do tipo torre, chamado de moinho de vento holandês, conforme a Figura 14 [19].

Figura 14 - Moinho de Vento típico da Holanda.



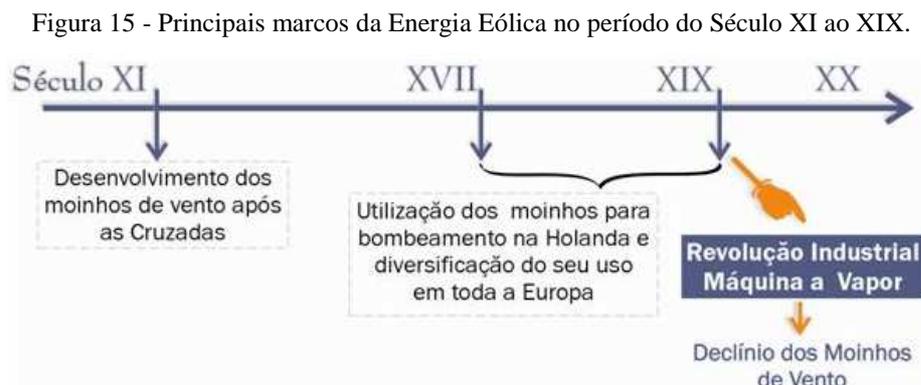
Fonte: História da Energia Eólica e suas utilizações, 2010 [20].

Com o passar dos anos, os moinhos foram sendo aperfeiçoados e suas aplicações diversificadas. Surgiram moinhos para produção de óleos vegetais em 1582, para fabricação de papel em 1586, para processar madeiras em serrarias, no fim do século XVI. Na metade do século XIX, já existiam na Holanda 9000 moinhos em funcionamento, em torno de 3000 na

Bélgica, 10000 na Inglaterra e perto de 650 na França [20]. Mas, com o advento da Revolução Industrial, o desenvolvimento dos cata-ventos foi interrompido, iniciando o declínio do uso da energia eólica na Europa, no final do século XVIII [19].

O surgimento do carvão, somado ao aparecimento das máquinas a vapor nos centros urbanos, trouxeram vantagens econômicas, tornando os moinhos de vento ultrapassados, sendo limitado o seu uso às áreas rurais. Um dos últimos desenvolvimentos no uso dos cata-ventos foram os moinhos com múltiplas pás, cerca de 20 pás com diâmetros de 3 a 5 metros e feitas de alumínio, na metade do século XIX nos Estados Unidos, para bombeamento de água de poços em fazendas isoladas [19], onde mais de 6 milhões de cata-ventos foram fabricados e instalados [20].

Na Figura 15 é possível verificar os principais acontecimentos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do século XI até o século XIX.



Fonte: História da Energia Eólica e suas Utilizações [18].

A geração de eletricidade usando a energia eólica aconteceu somente no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Brush construiu o primeiro cata-vento com esta finalidade, gerando 12 kW em corrente contínua para carregar baterias, destinadas a alimentar lâmpadas incandescentes. O cata-vento possuía 144 pás com 17 metros de diâmetro e uma torre de 18 metros de altura. O sistema funcionou durante 20 anos [20].

O físico alemão, Albert Betz, diretor do Instituto de Aerodinâmica em Gottingen, formulou a lei de Betz em 1920, que diz que a potência máxima que pode ser retirada do vento equivale a 59,3%. Também na Alemanha, surgiram projetos eólicos de grande porte, nas décadas de 30 e de 40. O projeto de Hermann Honnef, em 1932, foi um marco histórico,

apesar de nunca ter sido realizado. A ideia era gerar grandes quantidades de energia, usando cinco rotores de 160 metros de diâmetro, torres com 250 metros de altura e 20 MW de potência [19].

Durante a Segunda Guerra (1939-1945), diversos países desenvolveram aerogeradores de médio e grande porte para economizar petróleo. Nos Estados Unidos, foi desenvolvida a turbina eólica 1,25 MW Smith Putnam, em 1941, com duas pás de 53,3 metros de diâmetro feitas de aço e torre de 33,5 metros de altura. Ela produzia eletricidade usando um gerador síncrono que funcionava com corrente alternada [20].

Após a Segunda Guerra, as turbinas eólicas foram construídas quase que exclusivamente para fins de pesquisa, pois a tecnologia de geração eólica ainda não era economicamente competitiva se comparada aos combustíveis fósseis e as usinas hidrelétricas. Várias pesquisas com aerogeradores foram realizadas em países como Alemanha, Estados Unidos, França, Inglaterra e Dinamarca nas décadas seguintes. Como exemplo, em 1958, o engenheiro alemão Ulrich W. Huttner instalou uma turbina de 100 kW, gerador assíncrono e pás com 34 metros de diâmetro. O seu projeto é considerado um dos marcos da tecnologia de energia eólica moderna [19].

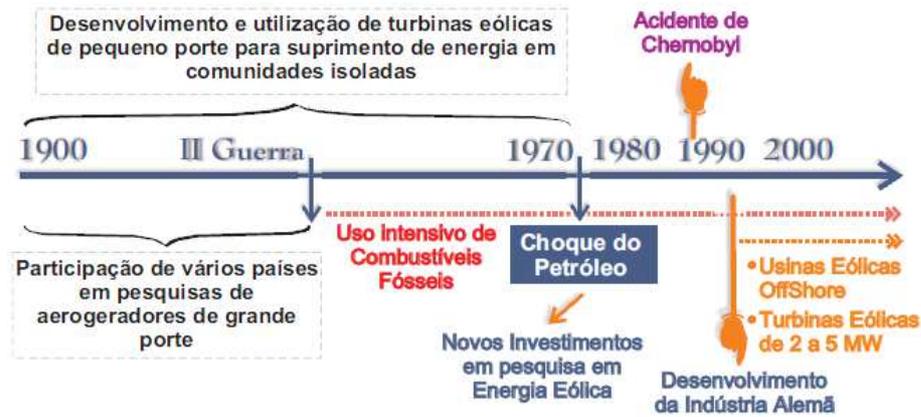
Na década de 60 os projetos eólicos continuaram limitados a pesquisas científicas sem interesse comercial. Somente a partir da década de 70, mais precisamente em 1973 com a primeira crise do petróleo é que o setor eólico recebeu um primeiro impulso. Como consequência, diversos países iniciaram programas de incentivo a pesquisa de instalações eólicas de grande porte [19].

Até a década de 90, a Dinamarca possuía a maior capacidade eólica instalada no continente Europeu, produzindo cerca de 2/3 (360 MW) da capacidade europeia. Em seguida, vinha a Alemanha e a Holanda, com 55 MW. Com os diversos incentivos que surgiram, como o programa 250 MW em 1990, a Alemanha iniciou diversas produções em escala comercial de unidades eólicas de médio porte, como as unidades E-32 com 300 kW, 3 pás, gerador síncrono e 32 metros de diâmetro, e E-40 com 500 kW, 3 pás, gerador síncrono e 40,3 metros de diâmetro, da empresa Enercon. Em 1996, a mesma empresa, desenvolveu unidades eólicas de 1,5 MW com 66 metros de diâmetro. Em 1991, foi construído o primeiro parque eólico marítimo, com potência de 4,95 MW, em Vindeby, na Dinamarca. Em 2002, também na

Dinamarca, em Horns Rev, entrou em funcionamento o maior parque eólico marítimo do mundo, com uma capacidade instalada de 160 MW [19].

Na Figura 16 é possível verificar os principais acontecimentos do desenvolvimento da Energia Eólica no século XX.

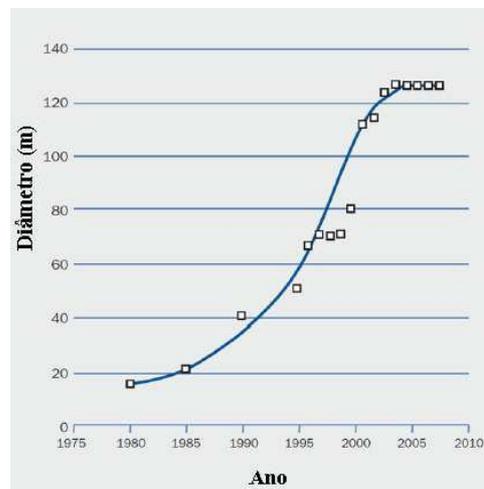
Figura 16 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX.



Fonte: História da Energia Eólica e suas Utilizações [18].

A partir da década de 90 até os dias atuais, a capacidade de energia instalada no mundo só aumentou. Na metade da década de 80, a potência das turbinas estava na faixa de 100 até 500 kW, passando para uma média de 1000 kW nos anos 90, e chegando a turbinas com 7 MW nos dias atuais. Outra característica que teve um crescimento acelerado, nos anos 90, foi o tamanho das turbinas, variando pouco nos anos 2000 e estabilizando na faixa dos 125 metros [17], conforme a Figura 17.

Figura 17 - Crescimento do diâmetro das turbinas eólicas.



Fonte: Energia Eólica no Brasil: Uma comparação do Proinfa e dos novos Leilões, 2011 [17].

## 2.4 ENERGIA EÓLICA NO CONTEXTO MUNDIAL

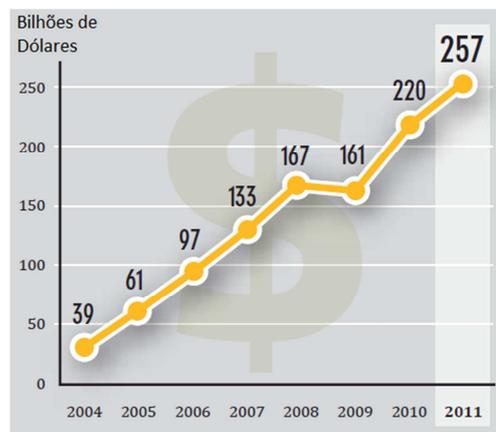
A crise financeira e econômica que ocorreu a partir da metade de 2008, uma das mais longas crises mundiais, desde 1930, interrompeu o fluxo crescente de investimentos em projetos de energia eólica [21]. O ano de 2008 atingiu um recorde de investimentos em energia limpa, com mais capacidade de energia renovável adicionada na Europa e nos Estados Unidos do que combustível fóssil e nuclear combinado, mas nos primeiros meses de 2009 houve uma redução de 50%, em relação ao mesmo período do ano anterior, sem considerar gastos com o P&D. Considerando o mesmo período, os investimentos foram baixos até mesmo quando comparados com os cinco anos anteriores. O setor somente reagiu no final de 2009 [22].

Entre os anos 2010 e 2011 houve um crescimento percentual de investimentos menor do que os 37% obtidos entre 2009 e 2010, mas aconteceu em um cenário onde o custo dos equipamentos de energia renovável, particularmente turbinas eólicas em terra, caiu. Os investimentos em dólares em 2011 seriam maiores se não fosse a deflação nos custos dos equipamentos [23].

Em 2011, os investimentos em energias limpas cresceram 17%, atingindo um novo recorde, 257 bilhões de dólares. Isto representa investimentos maiores do que seis vezes em relação a 2004 e 94% maiores do que o total de 2007, último ano antes da crise financeira global [24].

A Figura 18 mostra o crescimento dos investimentos em energia limpa entre 2004 e 2011, com expansão contínua após a recessão entre 2008 e 2009 [24].

Figura 18 - Investimentos Globais em Energias Renováveis, 2004 - 2011.



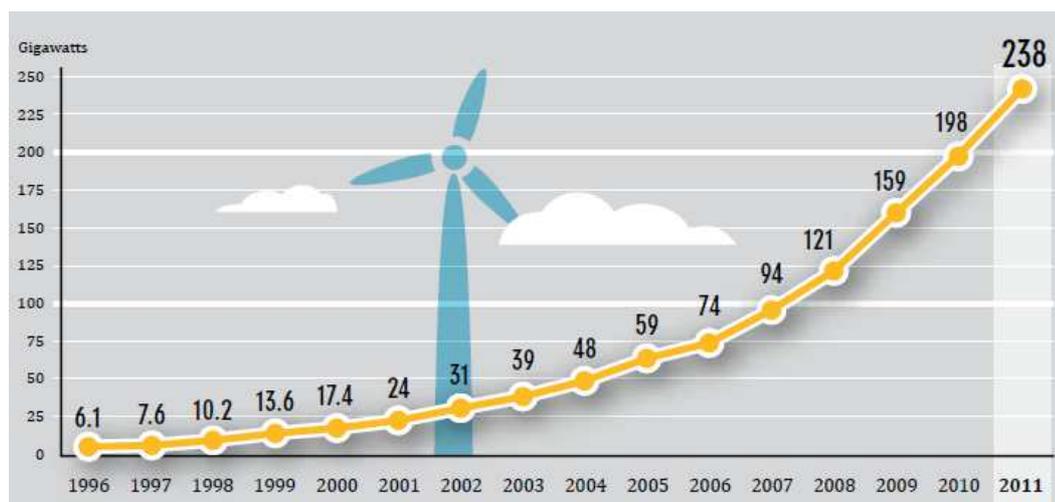
Fonte: Renewables 2012 Global Status Report, 2012 [24].

A chave para a recuperação do setor de energia limpa foram os investimentos das instituições do setor público ao longo dos últimos anos. Segundo o relatório do *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF), o financiamento de projetos de energia renovável pelos bancos de desenvolvimento, saltou de 4,5 bilhões de dólares em 2007 para 13,5 bilhões de dólares em 2010. Existem diversos bancos de desenvolvimento e agências entre os maiores financiadores dos projetos. O maior financiador foi o *US Federal Financing Bank* dos Estados Unidos (10,14 bilhões de dólares) seguido do brasileiro BNDES com empréstimos de 4,23 bilhões de dólares em projetos nacionais. O banco de desenvolvimento alemão KfW e o *Nordic Investment Bank* estão empatados em sexto lugar com empréstimos de 1,89 bilhões de dólares cada. Outros bancos de desenvolvimento com investimentos no setor foram o Banco Europeu de Investimento (empréstimos de 1,05 bilhões de dólares) e o Banco Mundial (empréstimos de 885 milhões de dólares) [21].

As energias limpas mais beneficiadas com o crescimento dos investimentos foram aquelas com nível de maturidade tecnológico mais consolidado, como a solar, a biomassa e a eólica. Destas, a tecnologia mais beneficiada até o momento foi a eólica, recebendo 7,2 bilhões de dólares em investimentos somente no ano de 2010 [21].

Na Figura 19 pode-se observar a evolução da energia eólica em termos de potência total disponível no mundo até o final de 2011.

Figura 19 - Evolução da Capacidade Total Instalada no Mundo.



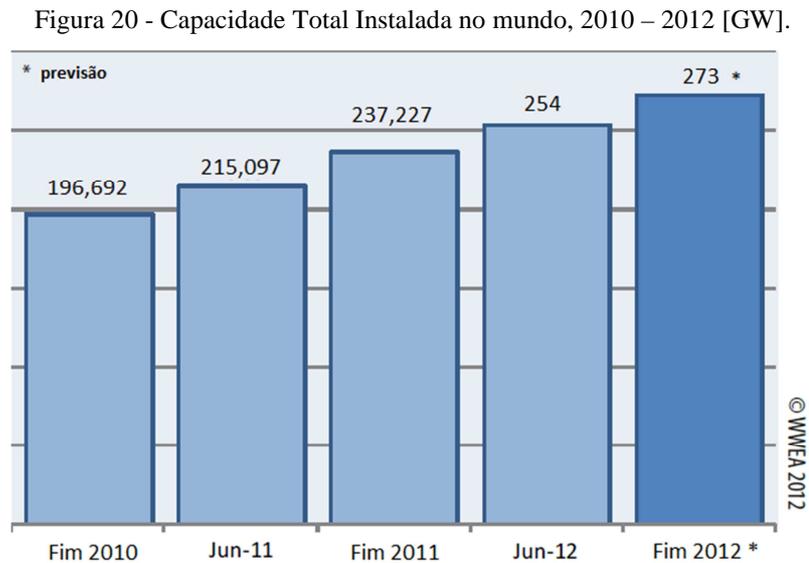
Fonte: Renewables 2012 Global Status Report, 2012 [24].

Em 2011, os projetos eólicos foram responsáveis por mais de 28% dos 257 bilhões de dólares investidos em projetos de energia limpa. Isso significa um crescimento do setor em

torno dos 6% em relação a 2010 e a colocação em operação de aproximadamente 40 GW de potência eólica, mais do que qualquer outra energia renovável, o que equivale a investimentos maiores do que 68 bilhões de dólares [21], um aumento na potência eólica global de 20%, chegando a 238 GW [24].

Analisando os dados dos primeiros seis meses do ano de 2012, a potência eólica alcançou os 254 GW, sendo que 16,546 GW foram adicionados durante estes seis primeiros meses, o que representa um acréscimo 10% menor do que os primeiros seis meses de 2011, quando foram adicionados 18,405 GW. Em termos de percentual, a capacidade eólica cresceu 7% até o final de junho deste ano, 2% a menos que o mesmo período de 2011, e 16,4% em termos anuais. A razão de crescimento anual de 2011 foi de 20,3%, como já informado anteriormente [25].

Na Figura 20 pode-se observar a capacidade total instalada no mundo para os primeiros seis meses do ano de 2012 e uma projeção da capacidade para o final do ano.



Fonte: Half-year Report 2012, 2012 [25].

Da capacidade eólica global, 74% são produzidos por apenas cinco países, que são: China, Estados Unidos, Alemanha, Espanha e Índia. Os primeiros seis meses deste ano resultaram num cenário diferente para os dez maiores mercados do setor. Enquanto os Estados Unidos, Alemanha, Itália, França e o Reino Unido estão mais fortes do que em 2011, a Índia manteve-se estável. Já, a China, Espanha, Canadá e Portugal viram seu mercado decrescer [25].

Apesar da queda, a China ainda é o maior mercado de energia eólica, com um acréscimo de 5,4 GW em seis meses, mas ainda assim, menor do que em 2011, onde foi adicionado 8 GW. Este país é responsável por 32% do mercado mundial de turbinas eólicas, um valor também inferior aos 43% de 2011. A capacidade instalada total até meados de 2012 foi aproximadamente de 67,7 GW [25].

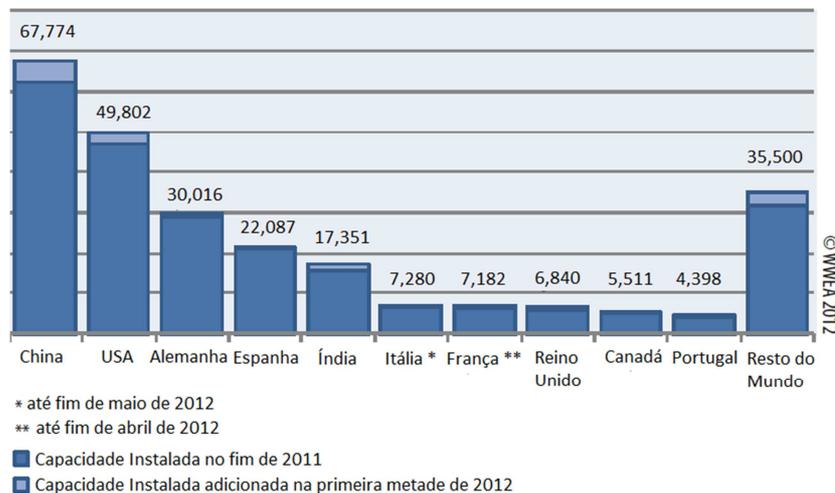
Na Índia, houve um acréscimo de 1,471 GW, semelhante ao início de 2011. A causa desta estagnação foi a decisão recente de abolir alguns programas de apoio a tecnologia eólica e alguma dívidas referentes a pagamentos de geradores eólicos [25].

A maioria dos países Europeus mostrou um crescimento na capacidade instalada neste início de ano em comparação a 2011. O país com maior mercado é a Alemanha com uma capacidade adicionada de 941 MW e um total de 30,016 GW. A Espanha adicionou 414 MW e possui um total de 22,087 GW. A Itália adicionou 490 MW e possui um total de 7,280 GW. A França adicionou 650 MW e possui um total de 7,182 GW. O Reino Unido adicionou 822 MW e possui um total de 6,840 GW. Portugal adicionou 19 MW e possui um total de 4,398 GW [25].

Os Estados Unidos acrescentaram 2,883 GW nos primeiros seis meses de 2012, o que equivale a um crescimento de 28% em relação ao mesmo intervalo de 2011. Já o Canada instalou 246 MW neste início de ano, inferior ao mesmo período de 2011 [25].

Na Figura 21 pode-se observar a capacidade total instalada nos dez maiores mercados mundiais de eólica.

Figura 21 - Capacidade Instalada nos Maiores Mercados Mundiais em 2011 e 2012 [GW].



Fonte: *Half-year Report 2012, 2012* [25].

Na América Latina, os dois maiores mercados do setor são o Brasil e o México que apresentaram crescimentos modestos, mas maiores do que a média global. O Brasil tinha em 2011 uma capacidade de 1425 MW e alcançou nos primeiros seis meses de 2012, 1543 MW. Já, o México partiu de 929 MW e alcançou 1002 MW [25].

Na Oceania, a Austrália apresentou um crescimento de 17% em relação a 2011, o que equivale a um adicional na capacidade instalada de 384 MW [25].

A previsão do GWEC é de que o mercado de energia eólica global instalará mais de 46 GW em 2012, e até 2016, a capacidade eólica estará perto de 500 GW, sendo instalados 255 GW entre 2012 e 2016, projetando um crescimento anual de 8%. Em cinco anos, o GWEC aposta que o crescimento do mercado será liderado pela Índia e pelo Brasil [26].

## 2.5 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E APROVEITAMENTO ATUAL

O Brasil possui potencial para se tornar a primeira grande economia a possuir toda a sua matriz energética proveniente de fontes limpas. A energia solar poderia atender em torno de dez vezes a demanda do país e a eólica poderia atender três vezes a demanda atual [27]. A participação das fontes renováveis na matriz de energia brasileira atingiu a marca de 88,8%, durante o ano de 2011 [28].

Na Figura 22 é mostrada a matriz de energia elétrica atual do Brasil, com o número total de 2.695 empreendimentos em operação, gerando 127.744.296 kW de potência. Cada fonte de energia é mostrada com o seu respectivo percentual de participação na matriz em relação à quantidade de potência fornecida [29].

Figura 22 - Matriz de Energia Elétrica.

Empreendimentos em Operação							
Tipo		Capacidade Instalada			Total		
		N.º de Usinas	(kW)	%	N.º de Usinas	(kW)	%
<b>Hidro</b>		1.019	83.420.366	65,30	1.019	83.420.366	65,30
<b>Gás</b>	Natural	105	11.550.013	9,04	145	13.381.696	10,48
	Processo	40	1.831.683	1,43			
<b>Petróleo</b>	Óleo Diesel	949	3.400.454	2,66	983	7.336.765	5,74
	Óleo Residual	34	3.936.311	3,08			
<b>Biomassa</b>	Bagaço de Cana	359	8.030.844	6,29	445	9.756.738	7,64
	Licor Negro	14	1.235.643	0,97			
	Madeira	44	378.035	0,30			
	Biogás	20	79.608	0,06			
	Casca de Arroz	8	32.608	0,03			
<b>Nuclear</b>		2	2.007.000	1,57	2	2.007.000	1,57
<b>Carvão Mineral</b>	Carvão Mineral	10	1.944.054	1,52	10	1.944.054	1,52
<b>Eólica</b>		81	1.721.832	1,35	81	1.721.832	1,35
<b>Importação</b>	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	6,40
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
<b>Total</b>		<b>2.695</b>	<b>127.744.296</b>	<b>100</b>	<b>2.695</b>	<b>127.744.296</b>	<b>100</b>

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012 [29].

Um dos destaques da matriz elétrica é a fonte eólica, que cresceu mais do que qualquer outra fonte de energia renovável e alcançou 2.704 GWh em 2011, o que representa um aumento de 24,2% em comparação ao ano de 2010, quando se alcançou 2.177 GWh, conforme pode ser observado na Tabela 1, onde é mostrado o balanço energético nacional de 2012, tendo 2011 como ano base [28].

Tabela 1 - Balanço Energético Nacional 2012.

<b>FONTES</b>	<b>2011</b>	<b>2010</b>	<b>Δ 11/10</b>
<b>OFERTA TOTAL [GWh]</b>	<b>571.302</b>	<b>551.704</b>	<b>3,6%</b>
<b>ENERGIA NÃO RENOVÁVEL</b>	<b>64.186</b>	<b>75.320</b>	<b>-14,8%</b>
Gás Natural	26.242	36.475	-28,1%
Derivados de Petróleo	14.401	16.065	-10,4%
Nuclear	15.659	14.523	7,8%
Carvão e Derivados <sup>1</sup>	7.883	8.256	-4,5%
<b>ENERGIA RENOVÁVEL</b>	<b>507.116</b>	<b>476.384</b>	<b>6,5%</b>
Hidráulica	428.570	403.290	6,3%
Importação <sup>2</sup>	38.430	35.906	7,0%
Biomassa <sup>3</sup>	37.411	34.940	7,1%
Eólica	2.704	2.177	24,2%

<sup>1</sup> Inclui gás de coqueira

<sup>2</sup> Hidráulica

<sup>3</sup> Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações

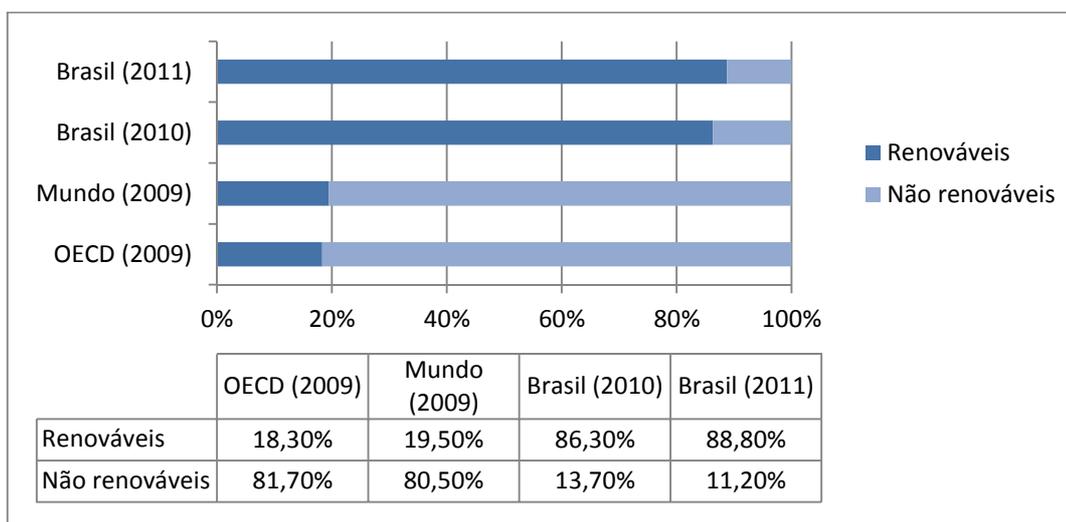
Fonte: Balanço Energético Nacional 2012, 2012 [28].

É possível observar na Tabela 1 que houve um aumento na oferta interna de energia de 3,6% em relação a 2010, e que além do crescimento de todas as renováveis, houve uma redução de todas as energias não renováveis, com exceção da energia nuclear que cresceu 7,8% [28].

Dentre todas as fontes de energia elétrica, a energia eólica é a segunda fonte mais competitiva atualmente no país. Somente as grandes hidrelétricas são mais competitivas, mas a sua instalação está cada vez mais difícil devido às questões ambientais no Brasil [30].

O crescimento das energias renováveis na matriz energética brasileira deixa o país líder na produção de energia limpa, em comparação com os demais países do mundo e membros da Organização e Cooperação para o Desenvolvimento Econômico (OCDE), conforme a Figura 23 [28].

Figura 23 - Participação das Renováveis na Matriz Energética brasileira e mundial.



Fonte: Balanço Energético Nacional 2012, 2012 [28].

A energia eólica está passando por uma fase destacável, que teve início nos anos de 2009 e principalmente 2010 quando o governo brasileiro tomou uma série de medidas de incentivo para introduzir a energia eólica na matriz elétrica nacional [30]. Desde então, já foram contratados pelos leilões de energia 6,7 GW de potência. Os investimentos realizados

pela indústria eólica no Brasil em todos os leilões realizados entre 2004 e 2011, alcançaram R\$ 25 bilhões de reais [31].

Em 2011, o país foi responsável por 50% das instalações efetuadas no continente latino-americano [32], com a instalação de 583 MW, elevando a capacidade instalada para 1509 MW, o que representa um aumento na potência instalada de 63% [21].

O Brasil não está entre os 10 países com as maiores potências, mas é o líder no mercado eólico da América Latina com uma capacidade atual de 1,747 GW e no decorrer deste ano ultrapassará os 2 GW o que equivale a mais de 1,37 % da matriz energética nacional [33].

Atualmente, existem em operação 81 empreendimento de geração eólica com uma capacidade instalada de 1.721.832 kW, 77 empreendimentos em construção que adicionarão 1.900.196 kW de potência e 212 empreendimentos outorgados entre 1998 e 2012, mas que não tiveram a sua construção iniciada, com uma capacidade de acrescentar 5.723.543 kW de potência ao sistema elétrico [29], conforme Figura 24.

Figura 24 - Capacidade de Geração Eólica do Brasil na Atualidade.

<b>Empreendimentos em Operação</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada [kW]</b>	<b>Potência Fiscalizada [kW]</b>	<b>%</b>
Eólica	81	1795028	1721832	1,44
<b>Empreendimentos em Construção</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada [kW]</b>		<b>%</b>
Eólica	77	1900196		6,79
<b>Empreendimentos Outorgados entre 1998 e 2012</b>				
(não iniciaram sua construção)				
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada [kW]</b>		<b>%</b>
Eólica	212	5723543		27,98

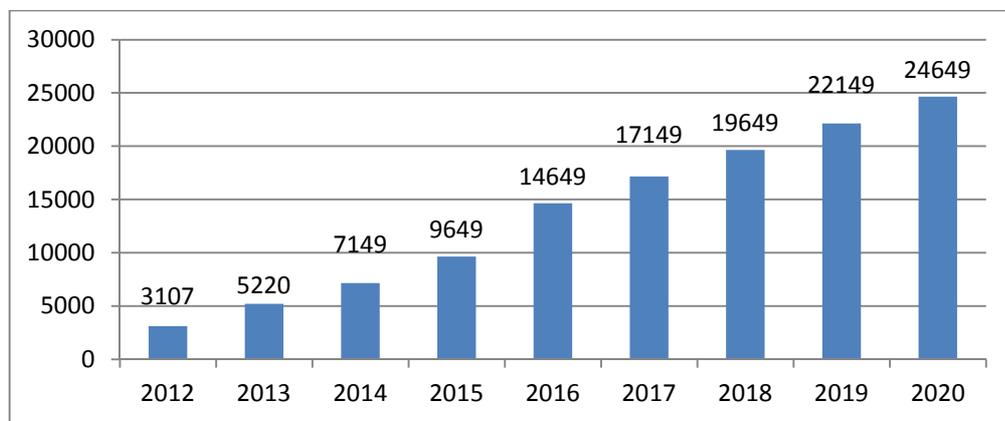
Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012 [29].

O elevado percentual de crescimento da energia eólica deve ser ainda mais acentuado nos próximos anos, quando os parques que já estão em construção entrarão em operação [28]. A meta até o final de 2016 é de inserir no sistema elétrico nacional mais de 8,4 GW de

potência eólica, o que significará 5,4% da matriz elétrica brasileira [31], um salto que colocará o país na quarta ou quinta posição em capacidade instalada no ranking mundial [33].

A expectativa é de contratar em leilões 2,5 GW por ano, até 2020, acrescentando, a partir de 2012, mais 20 GW de energia ao sistema [30], o que significará uma participação da fonte eólica de 15% da matriz elétrica brasileira, se for mantido o ritmo atual de contratação [31]. Os investimentos podem chegar a 50 bilhões de dólares, até 2020 [30]. Na Figura 25 se encontra a expectativa de crescimento anual da potência instalada no Brasil até 2020.

Figura 25 - Projeção da Evolução de Potência Instalada [GW].

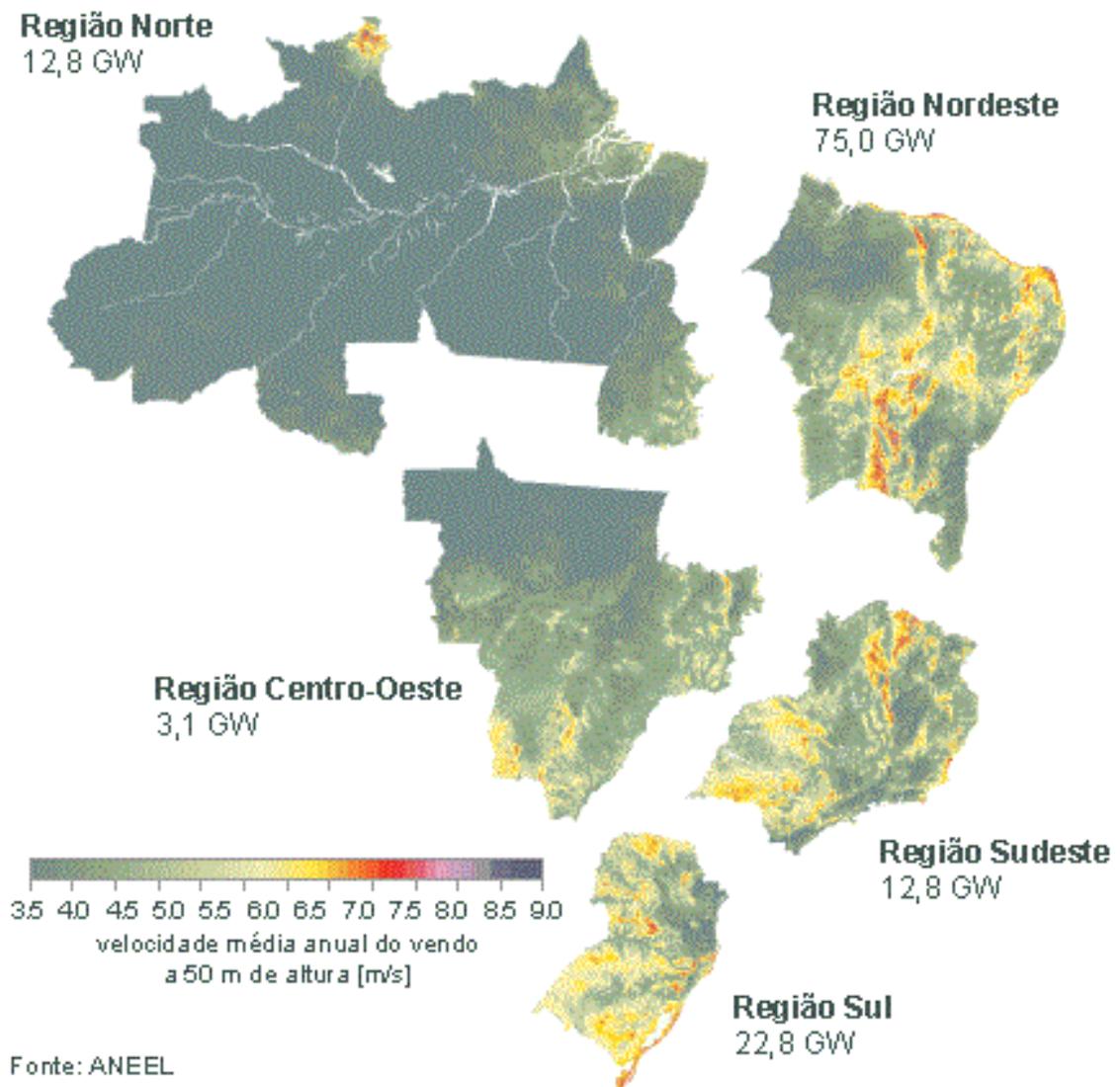


Fonte: *Brazil Windpower 2012, 2012* [30].

### 2.5.1 POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

A avaliação do potencial eólico no Brasil gira em torno de 143 GW, considerando apenas as principais regiões, como as regiões do Nordeste (Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte) e no Sul (Rio Grande do Sul), segundo o Atlas Eólico Brasileiro de 2001, mostrado na Figura 26. Essa avaliação é baseada em dados coletados há mais de 10 anos usando torres eólicas de 50 metros de altura. Considerando as torres atuais com mais de 100 metros de altura, o potencial de energia chega a 300 GW, o que equivale ao triplo da capacidade atual da matriz elétrica nacional [27].

Figura 26 - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.

**Atlas do potencial eólico brasileiro**

Fonte: *Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico*, 2012 [34].

O atlas avalia todo o território nacional e as suas informações são usadas por tomadores de decisão para avaliar áreas com potencial para a geração de energia elétrica. O atlas brasileiro apresenta mapas temáticos dos regimes médios de vento (velocidade, direções predominantes e parâmetros estatísticos de Weibull) e as médias anuais dos fluxos de potência eólica na altura de 50 metros para todo o país com uma resolução de 1km x 1km [35]. O novo Atlas Eólico deve ser publicado dentro de um ano e como já informado, leva em conta ventos disponíveis a 100 metros de altitude [36].

## 2.5.2 MUDANÇAS NO MARCO LEGAL E INCENTIVOS

As energias renováveis no mundo somente se desenvolveram quando os governos começaram a criar políticas públicas de desenvolvimento deste mercado. Em 2010, 119 países criaram algum tipo de políticas públicas para a geração de eletricidade através do uso de energias limpas, em comparação a 45 países em 2005. A política mais usada segue sendo o *feed-in*, cujos custos de tarifas são divididos entre os consumidores de eletricidade [27].

O Brasil também possui políticas para o desenvolvimento deste mercado, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), o Luz para Todos e realização de leilões periódicos de energia, mas ainda precisa investir e desenvolver o seu enorme potencial [27].

Maior programa do mundo de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica, o Proinfa foi criado em 2002, de acordo com a Lei 10.438/2002 [38], com o objetivo de aumentar a participação de empreendimentos baseados na fonte eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) [27] no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) [37].

O Ministério de Minas e Energia (MME) foi o órgão responsável por definir as diretrizes e planejar o programa, além de definir o valor econômico de cada fonte e o papel de agente executora às Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás) através da realização de contratos de compra e venda de energia (CCVE) [37].

Foi definido que o valor pago pela energia elétrica adquirida, além dos custos administrativos, financeiros e encargos tributários atribuídos pela Eletrobrás na contratação dos empreendimentos, fossem divididos entre todos os consumidores finais do SIN, exceto os consumidores de baixa renda (consumo igual ou inferior a 80 kWh/mês) [37].

Em um primeiro momento foram alocados 3.300 MW de capacidade para todas as fontes de energia limpa contempladas no programa, sendo 1.423 MW destinados a projetos de geração elétrica a partir da fonte eólica, sendo que este contingente deveria entrar em funcionamento antes de 30 de dezembro de 2008. A característica desta etapa é o direito de compra garantida pela Eletrobrás de toda a energia produzida por 20 anos com preço definido pelo executivo, baseado em 50%, 70% e 90% (PCHs, biomassa e parques eólicos) respectivamente, da tarifa média do fornecimento aos consumidores finais nos últimos 12 meses [39].

Depois de alcançado o objetivo da primeira etapa (produzir 3.300 MW), o segundo objetivo foi atender 10% do consumo anual do país através das fontes limpas alocadas no programa no prazo de 20 anos [39].

Fazendo um balanço do programa, algumas dificuldades surgiram durante a implantação da primeira etapa, o que comprometeu o desenvolvimento de alguns projetos causando atrasos na entrada em funcionamento da maioria dos mesmos, devido a problemas na obtenção ou renovação das licenças ambientais dos projetos, dificuldades para obter a Declaração de Utilidade Pública dos projetos (declaração que traz facilidades nas negociações), problemas na conexão às redes e a incapacidade da indústria nacional em atender a demanda por aerogeradores [39].

Por causa destas adversidades houve necessidade da prorrogação de prazos previstos no programa até a sua conclusão e no final de 2010, foram registrados 926 MW instalados em 51 parques eólicos correspondentes a 40 projetos através do Proinfa [39].

A vigência do Proinfa foi até 31 de dezembro de 2011, mais tarde do que o esperado, mas com um resultado positivo impulsionando a indústria eólica para o crescimento sustentado [21]. Foi implantado um total de 119 empreendimentos, sendo 41 eólicos, 59 PCHs e 19 térmicas a biomassa. A capacidade instalada foi de 2.649,87 MW, sendo 963,99 MW de usinas eólicas, 1.152,54 MW de PCHs e 533,34 MW de usinas de biomassa [38].

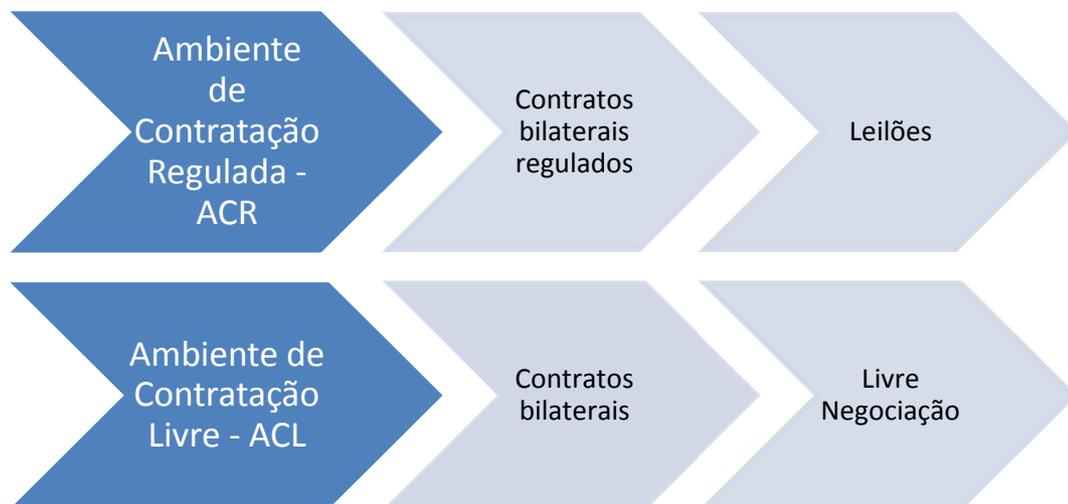
O programa terminou no final de 2011, mas as tarifas especiais continuam valendo para os parques previstos no programa e que ainda estão em construção. Para os novos empreendimentos somente existe a opção de contratação de energia através dos leilões de energia que está substituindo o Proinfa no objetivo de ampliar a capacidade instalada de energias limpas no país ou o mercado livre [27].

O sistema de leilões é realizado desde 2007 para fontes renováveis, mas somente a partir de 14 de dezembro de 2009, com o primeiro leilão exclusivo de energia eólica, foram obtidos resultados mais convincentes em termos de capacidade instalada com investimentos à frente do cumprimento da meta do Proinfa. O desenvolvimento da energia eólica através destes processos competitivos é uma abordagem regulatória pioneira no Brasil, que tem estimulado grandes investimentos em energia eólica. Se não fosse por esses leilões, o Brasil continuaria com o seu crescimento lento, prejudicando a criação e a continuidade da ampliação da capacidade instalada de energias limpas [39].

O novo formato de realização de leilões poderia ser melhorado acomodando as propostas iniciais do Proinfa, o que forneceria ao sistema uma maior segurança jurídica e de previsibilidade. O desenvolvimento da energia eólica no Brasil baseado na realização de licitações constitui uma mudança drástica em relação ao formato do Proinfa. Enquanto o Proinfa foi criado com o objetivo de diversificar a matriz energética, o modelo de leilão é baseado em uma política energética com o objetivo de garantir o fornecimento eficiente de eletricidade aos consumidores a módicas tarifas [39].

A comercialização de energia elétrica no Brasil no novo modelo se realiza em dois ambientes de mercado, conforme a Figura 27 [39].

Figura 27 - Ambiente de Mercado para a Comercialização de Energia Elétrica.



Fonte: *Analysis of the Regulatory Framework for Wind Power Generation in Brazil*, 2011 [39].

As concessionárias e outros agentes do serviço público de distribuição do Sistema Elétrico Interligado Nacional devem garantir o fornecimento a todo o mercado através da contratação regulada por meio de propostas, ou licitações. O formato atual se estende a geração de energia eólica que só pode ser contratada através do Ambiente de Contratação Regulada (ACR), ou seja, por leilões. Este quadro regulamentar em que a energia eólica é desenvolvida poderia ser melhorado se fosse permitido e estimulado o Ambiente de Contratação Livre (ACL) para não interromper o processo de investimento colocado em andamento, e com isso reduzir as incertezas a médio e longo prazo [39].

Os preços finais resultantes dos leilões reduziram drasticamente, atingindo reduções próximas de 50% das tarifas garantidas no Proinfa, devido à dinâmica global do mercado eólico e a desaceleração de outros países com maior implantação eólica [39].

Os leilões de energia para fontes alternativas que foram realizados em 2010 evidenciam os benefícios dos consumidores, pois a introdução da energia eólica no sistema elétrico representa uma redução do Custo Médio de Operação (CMO) próximo a 8%. Este efeito é semelhante a outros mercados com uma maior implantação de geração eólica, mas os benefícios poderiam ser superiores no Brasil, se houvesse uma maior certeza quanto a continuidade dos investimentos em longo prazo e se houvesse um aumento na participação da geração eólica na matriz energética. Os custos poderiam ser ainda menores e todo o sistema poderia se beneficiar, caso houvesse uma revisão profunda do regime tributário em vigor aplicado a geração eólica, que é extremamente oneroso quando comparado com os valores aplicados em outros mercados do mundo [39].

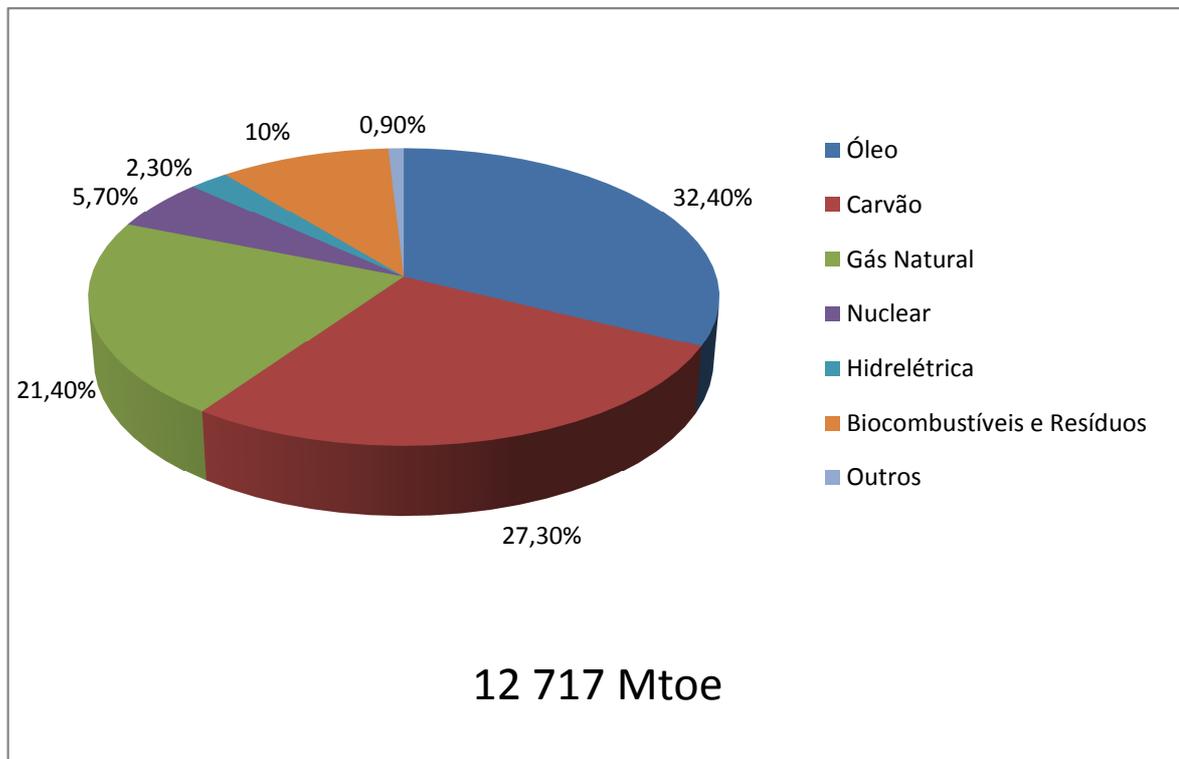
Os mecanismos da contratação regulada, habilitados pelo Ministério de Minas e Energia em dezembro de 2009 e agosto de 2010 para a contratação de energia elétrica através dos leilões, permitirá aumentar em até 5300 MW o potencial eólico até o final de 2013 com investimentos estimados de 10 bilhões de dólares no setor eólico [39].

### 3 QUESTÃO AMBIENTAL

A fim de atender as necessidades da humanidade nos dias atuais, a demanda energética está se tornando cada vez maior [40]. Os combustíveis fósseis são as principais fontes energéticas do mundo, mas o seu uso produz um grande impacto ambiental, devido o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera terrestre, o que contribui com o efeito estufa que produz o aquecimento da terra [41].

A grande predominância dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial pode ser vista na Figura 28, onde se verifica que aproximadamente 80% da eletricidade são geradas a partir dessas fontes, enquanto que as fontes renováveis participam com apenas aproximadamente 14%. Essa energia produzida é equivalente a 12.717 milhões de toneladas de petróleo (Mtoe) [41].

Figura 28 - Matriz de Uso de Energia Primária no mundo, no final de 2010.



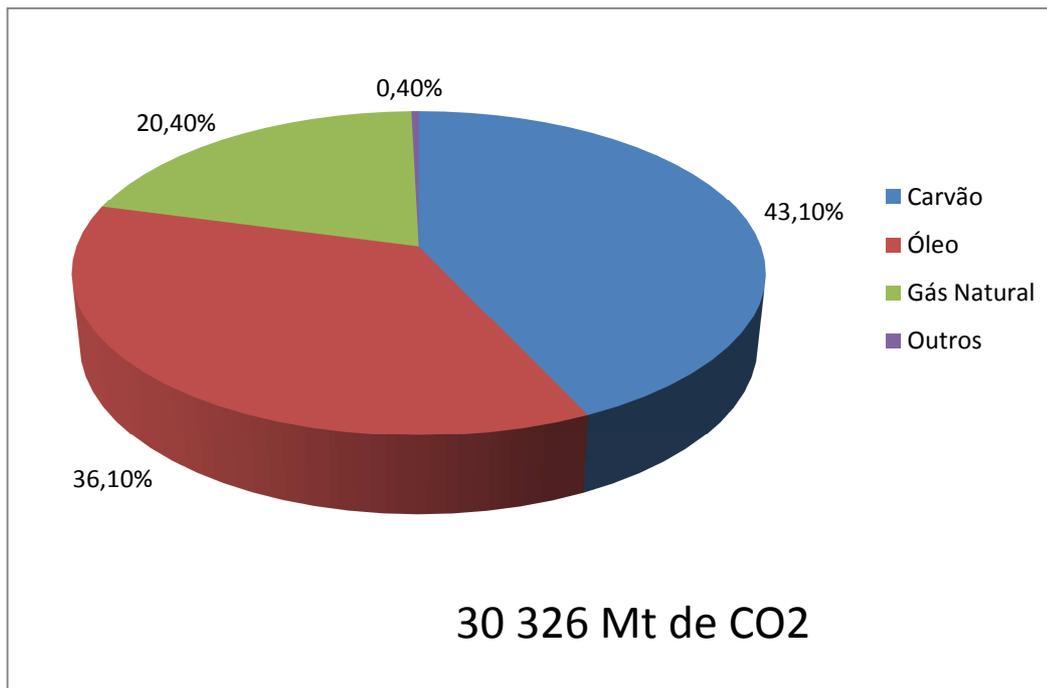
Fonte: *Key World Energy Statistics*, 2012 [42].

A energia eólica está computada no grupo “Outros”, que conta ainda com a energia solar, a biomassa e a geotérmica [42].

O resultado da predominância de fontes não renováveis na matriz é a grande emissão de gases na atmosfera terrestre, principalmente o gás carbônico [42].

A Figura 29 mostra o percentual de gás carbônico emitido por cada uma das fontes não renováveis na produção de eletricidade, em 2010, sendo que o total de gás emitido foi de 30326 milhões de toneladas (Mt) de CO<sub>2</sub> [42].

Figura 29 - Emissão de CO<sub>2</sub> por fonte na Produção de Eletricidade, em 2010.

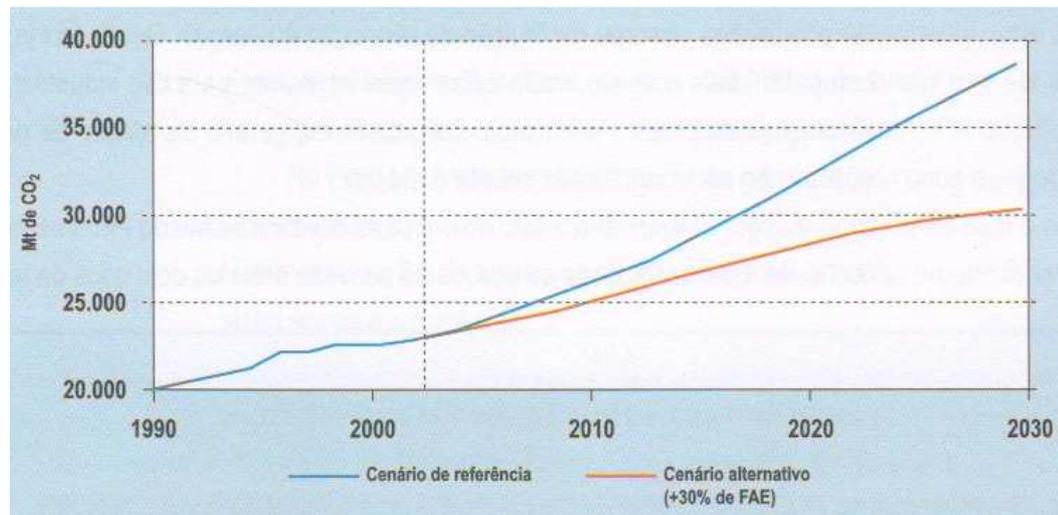


Fonte: *Key World Energy Statistics*, 2012 [42].

O grupo “Outros” inclui lixo industrial e lixo municipal não renovável [42].

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), as fontes fósseis continuarão dominando a matriz mundial de energia por muito tempo. As energias alternativas terão um acréscimo em relação à situação atual, mas ainda insuficiente, mantendo a mesma participação relativa na composição da matriz energética entre os anos de 2010 e 2020 [41].

Para poder recuperar ou diminuir os danos ambientais, essa tendência precisa ser modificada, aumentando o uso das energias renováveis em proporções bem superiores à atual. A Figura 30, mostra uma estimativa feita pela IEA sobre a emissão de CO<sub>2</sub> baseada na demanda de energia mundial até 2030, em um estudo realizado em 2004. Pode-se observar que caso ocorresse um aumento na participação das Fontes Alternativas de Energia (FAE) em 30% durante este período, haveria uma significativa redução das emissões de CO<sub>2</sub> [41].

Figura 30 - Emissão de CO<sub>2</sub> na Demanda de Energia Mundial.

Fonte: Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica, 2010 [41].

Com a crescente preocupação ambiental e a busca pelo desenvolvimento sustentável, as fontes renováveis, em especial a eólica, se mostram atraentes, por se apresentarem como fontes inesgotáveis de energia e pelo caráter não poluente [41].

O uso da energia eólica é uma das alternativas na geração de eletricidade com baixos impactos socioambientais [41]. Existem diversas vantagens na sua utilização, mas assim como qualquer tecnologia energética, ela possui algumas desvantagens [43].

### 3.1 ASPECTOS POSITIVOS DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica possui diversas vantagens na sua utilização comparadas às fontes não renováveis e mesmo em relação aos outros tipos de energias renováveis, devido o seu maior grau de desenvolvimento [44]. Esta fonte de energia não utiliza nenhum tipo de combustível e, portanto não existe a emissão de gases, partículas ou qualquer tipo de resíduo, ao contrário das usinas termelétricas, seja as que utilizam combustíveis fósseis, seja as que usam biomassa ou resíduos industriais [41].

Outros benefícios desta tecnologia, além dos já citados, são: redução da dependência dos combustíveis fósseis; o vento é um recurso abundante, renovável e inesgotável; possibilita a melhora na economia local e na oferta de empregos; é um mercado em ascensão e com grande potencial no Brasil; contribui com a diversificação da matriz energética; tecnologia dominada e em desenvolvimento contribuindo com a redução de custos; é uma das fontes de energia mais baratas; a fauna e a flora do espaço onde a usina está instalada são preservadas,

possibilitando que as atividades produtivas do entorno sejam mantidas [43], ou seja, as usinas eólicas permitem o aproveitamento do terreno sem provocarem o deslocamento de pessoas e a desapropriação de áreas, já que a produção de eletricidade usando o vento permite o uso da terra para a pecuária e a agricultura, principalmente no Brasil [41].

O benefício ambiental mais importante desta fonte é a não emissão de dióxido de carbono na atmosfera [43]. Cada kWh de energia elétrica produzida por um aerogerador compensa a emissão de 0,5 a 1 kg de CO<sub>2</sub> [41].

Assim, uma turbina de 600 kW, poderá evitar a emissão de 20 mil a 36 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, dependendo do regime dos ventos, do fator de capacidade e da fonte de geração que a eólica está substituindo, durante o tempo de vida estimado de 20 anos [43].

Na Tabela 2 são comparadas as emissões de gás carbônico para as diferentes tecnologias de geração de energia elétrica. Estes resultados foram obtidos pelo *World Energy Council*, em estudos realizados em 1993 [43].

Tabela 2 - Emissões de CO<sub>2</sub> de diferentes tecnologias de Geração de Energia Elétrica.

Tecnologia	Emissões de CO <sub>2</sub> nos estágios de produção de energia (t/GWh)			
	Extração	Construção	Operação	Total
Usina termelétrica a carvão mineral	1	1	962	964
Usina termelétrica a óleo combustível	-	-	726	726
Usina termelétrica a gás natural	-	-	484	484
Energia térmica dos oceanos	ND	4	300	304
Usinas Geotérmicas	< 1	1	56	57
Pequenas Centrais Hidrelétricas (< 10 MW)	ND	10	ND	10
Usinas Nucleares	2	1	5	8
Parques Eólicos	ND	7	ND	7
Energia solar fotovoltaica	ND	5	ND	5
Usinas Hidrelétricas	ND	4	ND	4
Energia solar térmica	ND	3	ND	3

ND: Não Disponível

Fonte: A Energia Eólica e o Meio Ambiente, 2002 [43].

Entre as tecnologias da Tabela 2 que apresentam emissões de CO<sub>2</sub> inferiores ao nível da energia eólica, somente as grandes hidrelétricas são competitivas comercialmente na atualidade, mas a sua utilização está sendo muito questionada em alguns países, como no Brasil, devido aos impactos ambientais. As grandes hidrelétricas causam o apodrecimento da vegetação submersa nos reservatórios produzindo uma enorme quantidade de gases causadores do efeito estufa [43]. Um dos produtos da decomposição é o metano que é cerca de 20 vezes mais potente do que o CO<sub>2</sub> [45].

Segundo a *BTM Consult*, a inclusão de 10% de energia eólica no sistema elétrico contribuiria com o cumprimento de metas definidas pelo “Protocolo de Kyoto”, na ordem de 20% a 30% das metas globais [41].

Ainda, a energia eólica permite a geração descentralizada de energia, pois ela permite o aproveitamento de recursos locais ou em lugares onde o uso do sistema convencional acarretaria grandes perdas elétricas na transmissão, ocasionando um aumento na confiabilidade da região [41].

### 3.2 ASPECTOS NEGATIVOS DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica apresenta baixos impactos socioambientais, mas como qualquer outra fonte de produção de energia, ela apresenta alguns impactos socioambientais, mesmo que pequenos quando comparados com as fontes convencionais. Alguns dos impactos que a energia eólica ocasiona, são: utilização do terreno, impacto visual, emissão de ruídos, colisão de aves, interferências eletromagnéticas e segurança [41].

#### 3.2.1 UTILIZAÇÃO DO TERRENO

Uma usina eólica ocupa uma grande área, mas o espaço do solo que realmente é ocupado é relacionado ao espaço ocupado pela base das torres dos aerogeradores. Isto permite que a área da usina tenha uma taxa de ocupação extremamente baixa possibilitando que o terreno seja usado para outras atividades, tais como a pecuária e a agricultura [41].

No entanto, a colocação de obstáculos ou o aumento da rugosidade do terreno ocasiona a redução da produção do parque. Portanto, algumas atividades são incompatíveis, tais como os florestamentos intensivos para uso industrial de plantações de pinus e eucaliptos [41].

Na Figura 31 observa-se um exemplo de parque eólico construído em uma fazenda voltada à pecuária e o convívio entre os dois usos da terra [41].

Figura 31 - Uso Compartilhado do Solo entre Energia Eólica e Pecuária.



Fonte: Capacidade instalada de energia eólica cresce 21% no mundo em 2011, 2012 [46].

### 3.2.2 IMPACTO VISUAL

O impacto visual causado por um parque eólico é difícil de estimar, por ser algo subjetivo. Enquanto para alguns, as turbinas eólicas são um símbolo de energia limpa, outros reagem de forma negativa em relação à nova paisagem [43]. É possível minimizar este tipo de impacto, pintando os aerogeradores com as cores da paisagem, dispondo os mesmos de forma harmônica com o ambiente [41] e conscientizando a população local da importância da geração eólica e os seus benefícios socioambientais [43].

Na Figura 32 é mostrado um exemplo de parque eólico com impacto visual minimizado pela disposição harmônica dos aerogeradores com o ambiente. Para este caso, os aerogeradores estão alinhados com a costa, o que proporciona uma visão mais suave e agradável da paisagem [41].

Figura 32 - Fazenda Eólica com Impacto Visual Favorável, Harmonizado com o Ambiente.



Fonte: Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica, 2009 [41].

Podem ser considerados, ainda, alguns efeitos que geram uma sensação de incômodo, tais como: o efeito das sombras em movimento e as reflexões intermitentes. Na Figura 33, ilustra-se a sensação de desconforto que a sombra de um aerogerador pode causar em algum morador sob este efeito, somada ao movimento das pás, que amplia ainda mais o incômodo [41].

Figura 33 - Sombra de um Aerogerador.



Fonte: Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica, 2009 [41].

Este efeito é pouco acentuado no Brasil, por ser um país tropical com azimute favorável, pois as sombras produzidas alcançam pequenas distâncias. De qualquer forma, com um correto planejamento do parque eólico, este efeito pode ser totalmente evitado [41].

Já, o efeito das reflexões intermitentes, causado pela incidência do sol sobre as pás em movimento, pode ser eliminado usando pinturas opacas [41].

### **3.2.3 EMISSÃO DE RUÍDO**

A emissão de ruído é causada por dois motivos: pelo efeito aerodinâmico do vento sobre as pás da turbina e pelo funcionamento mecânico dos aerogeradores. Os efeitos aerodinâmicos contribuem mais para a emissão de ruídos quando os aerogeradores possuem rotores com diâmetros superiores a 20 metros [41].

Já, os ruídos provenientes do funcionamento mecânico são derivados principalmente da caixa de engrenagens, que multiplica a rotação do eixo do gerador. Com o avanço da tecnologia na construção das turbinas, o nível de ruído mecânico pode ser reduzido. Outra tecnologia usada para eliminar o ruído mecânico é o uso de geradores multipolo que são conectados diretamente ao eixo das pás, pois este gerador funciona mesmo em baixas velocidades [43].

Normalmente, o ruído próximo a um aerogerador é de 50dB, decrescendo para 35dB a uma distância de 450 metros. Somente ruídos superiores a 65dB podem produzir danos ao sistema auditivo e prejudicar diversas funções orgânicas, mas ruídos acima de 30dB já ocasionam efeitos psíquicos no homem. A norma alemã VDI 2714 impõem um nível máximo de ruído de 45db e 35db, durante o dia e a noite, respectivamente, à uma distância de 500 metros dos aerogeradores [41].

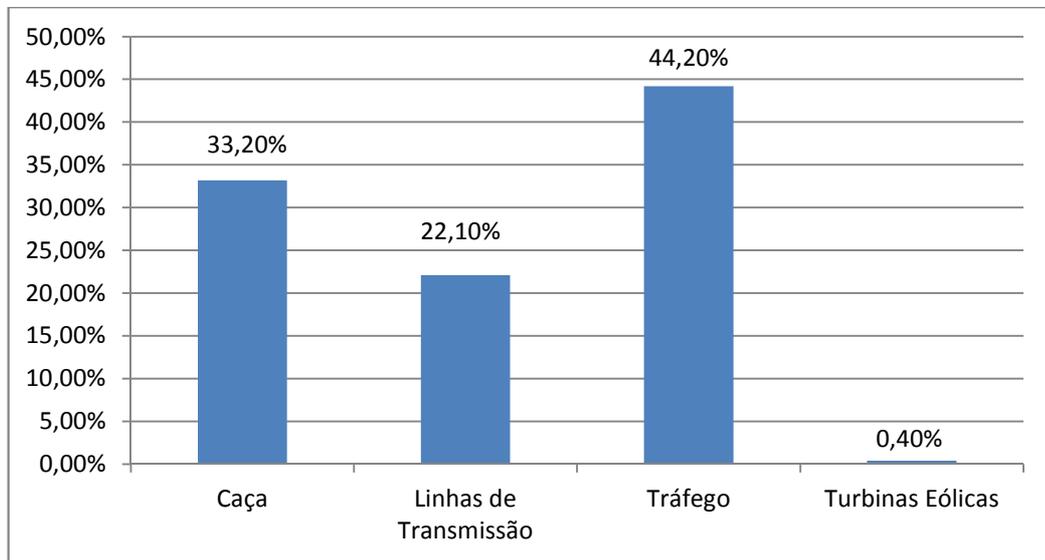
### **3.2.4 IMPACTO SOBRE AS AVES**

O principal e mais importante impacto causado pelos aerogeradores e parques eólicos sobre a fauna, é a interferência sobre as aves que podem colidir com estruturas que são de difícil visualização, como as torres, mastros, janelas de prédios e com as turbinas eólicas. O tráfego de veículos em estradas e a caça também são importantes causadores da morte dos pássaros [41].

O grande problema é a localização das usinas eólicas, que quanto mais próximas de áreas de alimentação, migração e nidificação, maior a probabilidade de causar danos à fauna. Existem os impactos diretos e indiretos. Os diretos são o resultado da colisão das aves com as turbinas e os indiretos são a perda do habitat e a perturbação [47].

Estimativas de morte de pássaros por diferentes causas mostram que as mortes causadas pelas turbinas não merecem um grande destaque, conforme os dados mostrados na Figura 34, que são válidos somente para os países baixos, mas que servem como exemplo para ilustrar essa situação [41].

Figura 34 - Estimativa de Morte Anual de Pássaros em Países baixos.



Fonte: Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica, 2009 [41].

Atualmente, os aerogeradores possuem rotores com baixa rotação (inferior a 30 rpm), minimizando a morte das aves, que visualizam e desviam das pás. Independentemente disso, estudos mostram que grandes bandos de pássaros foram observados atravessando um parque eólico e cruzando entre as pás das turbinas sem serem atingidos, conforme a Figura 35 [41].

Figura 35 - Bando de Pássaros atravessando um Parque Eólico.



Fonte: O Presente da Energia Eólica, 2009 [48].

Na Dinamarca, um estudo usando radares em um parque com uma turbina de 60 metros de diâmetro, mostrou que os pássaros mudam sua rota de voo entre 100 e 200 metros, passando acima ou ao redor da turbina, em distâncias seguras [41].

No entanto, em relação às rotas migratórias, os aerogeradores atuais com alturas na faixa dos 100 metros ou menos, não constituem um problema, pois as aves migram a grandes alturas, a centenas de metros do solo, portanto bem acima das hélices dos rotores [41].

Os grandes prejudicados com a construção dos parques eólicos são as populações de morcegos, pois o movimento das pás causa abruptas diminuições na pressão atmosférica, ocasionando o rompimento dos vasos sanguíneos dos pulmões destes mamíferos que não são capazes de detectar esta ameaça. Outra espécie prejudicada pelos aerogeradores são as abelhas, cuja população está em acentuado declínio, ameaçando a sustentabilidade agrícola a nível mundial [48].

### **3.2.5 INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS**

As interferências eletromagnéticas ocorrem quando os aerogeradores refletem as ondas eletromagnéticas interferindo e perturbando os sistemas de telecomunicações. São interferências pouco significativas, mas que exigem um maior estudo quando o parque se situa perto de aeroportos ou sistemas de retransmissão [41].

### **3.2.6 SEGURANÇA**

Em relação à segurança das pessoas, existem raros casos de pessoas feridas por pedaços de pás quebradas ou por pedaços de gelo que se desprenderam, no caso de países onde existe esta possibilidade [41].

## 4 CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

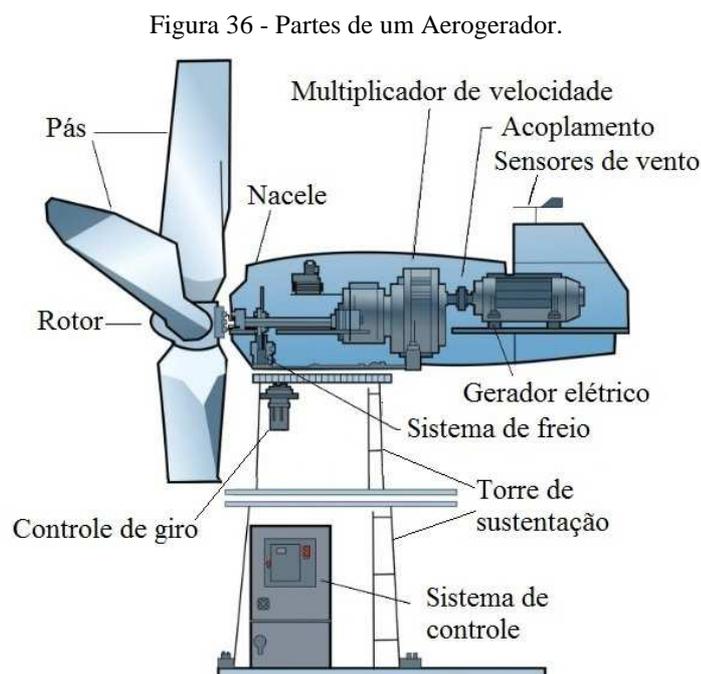
Neste capítulo é feito um estudo sobre os aerogeradores e seus principais componentes, assim como, é feito um estudo sobre os tipos de conexão de uma usina eólica com o sistema elétrico, abordando os principais parâmetros envolvidos.

### 4.1 AEROGERADORES

A função de um aerogerador é produzir energia elétrica utilizando a energia eólica. O processo de produção da energia elétrica a partir do vento acontece da seguinte forma: a turbina eólica converte a energia dos ventos em energia mecânica fazendo o eixo que acopla a turbina ao gerador girar. O gerador elétrico converte a energia mecânica do eixo em energia elétrica através da conversão eletromagnética. O acoplamento entre a turbina e o gerador pode ser feito diretamente ou por meio de caixas multiplicadoras. O gerador elétrico pode ser síncrono ou assíncrono [49].

#### 4.1.1 PARTES DE UM AEROGERADOR

Um aerogerador é formado por diversas partes e sistemas [49], sendo que algumas são mostradas na Figura 36.



Fonte: Componentes de um Aerogerador, 2009 [50].

As pás são responsáveis pela interação aerodinâmica com o vento, convertendo parte da energia cinética em energia mecânica. Elas são fixadas ao cubo e seu material é a fibra de vidro, usando como reforço epóxi e/ou madeira. Em turbinas onde existe o controle de passo, as pás possuem rolamentos em sua base para permitir o giro e a alteração do ângulo de ataque [49].

O cubo das pás é onde são fixadas as pás. Ele fica na ponta do eixo da turbina e possui a forma de cubo. O seu material é aço ou liga metálica de alta resistência [49].

O eixo é responsável por transferir a energia mecânica das turbinas até o gerador. O seu material é aço ou liga metálica de alta resistência [49].

A nacele é a carcaça que fica sobre a torre, protegendo o gerador, a caixa de engrenagens e outras partes do aerogerador [49].

A torre possui a função de elevar a turbina até alturas onde o vento é mais favorável aumentando o desempenho do aerogerador. Ela pode ser tubular cônica, construídas em aço ou concreto, ou treliçada, construídas em aço. No seu topo existe o rolamento principal que serve para movimentar a nacele e assim alinhar a turbina com o vento [49].

As fundações são responsáveis pela sustentação da torre do aerogerador. A sua estrutura é constituída de aço e concreto [49].

O sistema de mudança de direção se encontra dentro da nacele e sua função é deixar a turbina na direção do vento. Este controle é feito através de um sistema eletrônico que mede a direção do vento e quando for necessário girar a turbina, um motor elétrico gira a nacele, que gira sobre a torre utilizando o rolamento principal [49].

A caixa de engrenagens possui a função de acoplar a turbina que gira a baixas velocidades ao gerador elétrico que gira a velocidades altas. A caixa pode ser multiplicadora ou redutora de velocidade. Existem modelos de aerogeradores que fazem o acoplamento da turbina com o gerador sem o uso da caixa de engrenagem e para este caso utilizam geradores de baixa rotação, com elevado número de polos no seu rotor (geradores de polos salientes). A caixa multiplicadora é constituída de eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. O ruído produzido pelo multiplicador é uma das desvantagens, mas um bom isolamento acústico da nacele diminui o ruído externo [49].

A unidade hidráulica é a responsável por fazer a lubrificação e a refrigeração quando a caixa de engrenagem é usada, através de óleo. Para isto, existe um sistema hidráulico, com bombas, trocadores de calor e sistemas de comando, controle e supervisão [49].

O freio é usado em situações de emergência, em tempestades ou quando o aerogerador não está em operação. Ele possui normalmente a forma de disco e é feito de aço [49].

A unidade de controle como o nome diz, é responsável pelo controle elétrico e supervisão do aerogerador e dos sistemas. As partes que compõem a unidade de controle estão divididas entre a nacele, onde se encontram os sensores, motores e medidores, e a parte interna da base da torre, onde se encontra o painel de controle, com os sistemas digitais e analógicos usados para o controle e supervisão do aerogerador, um quadro de alarmes e sistema de comunicação para controle e supervisão à distância [49].

Os medidores de vento estão sobre a nacele e a sua função é medir a velocidade, através de um anemômetro do tipo concha, e a direção do vento, através de uma biruta. Essas informações servem para monitorar o desempenho do aerogerador e alimentar o sistema de controle [49].

O gerador é quem produz a energia elétrica. Dependendo do modelo do aerogerador são usados geradores síncronos ou assíncronos. Alguns aerogeradores utilizam dois geradores: um de potência menor para operar a velocidades de partidas baixas, e um de potência maior para operar quando a velocidade do vento for maior que uma determinada velocidade [49].

O transformador é responsável por elevar a tensão gerada pelo gerador ao valor da rede elétrica onde o aerogerador está conectado. Ele pode ser preso junto à torre, na parte interna ou externa, ou no chão junto ao aerogerador [49].

#### **4.1.2 CONTROLE DE FREQUÊNCIA DE UM AEROGERADOR**

Uma usina eólica precisa entregar a energia elétrica produzida na frequência da rede à qual ela está conectada. E como a frequência de geração elétrica é proporcional à velocidade de rotação do gerador, que é proporcional à velocidade de rotação da turbina, que é proporcional à velocidade do vento, que está sempre mudando, o controle de frequência é muito importante [49].

Em aerogeradores de velocidade variável são utilizados geradores síncronos que podem controlar a tensão e a potência reativa gerada ao contrário dos geradores assíncronos. Neste caso, existe a necessidade do uso de um sistema de conversão de frequência que utiliza a eletrônica de potência, para controlar a forma, frequência, fator de potência e amplitude da onda de saída. Para uma máxima eficiência aerodinâmica, é necessário que o rotor tenha velocidades baixas para velocidades do vento baixas, e velocidades altas para velocidades do vento altas, ou seja, o rotor deve mudar a sua velocidade rotacional conforme a velocidade do vento [49].

Para aerogeradores com velocidade constante são usados geradores assíncronos conectados diretamente à rede. Os geradores assíncronos, ou de indução, dispensam o uso de dispositivos de sincronismo, mas possuem uma alta corrente de partida e demandam potência reativa [49].

#### 4.1.3 PRODUÇÃO DE ENERGIA DE UM AEROGERADOR

A estimativa da produção de energia de um aerogerador pode ser feita baseada na velocidade do vento e na curva de potência do aerogerador. As incertezas relacionadas a essas variáveis devem ser eliminadas para não acontecerem riscos financeiros elevados. Por isso, a produção de energia de um aerogerador é um fator muito importante. Essas estimativas são feitas com bases anuais, pois o vento apresenta grandes variações ao longo de um ano. A energia produzida em um ano é chamada de energia anual gerada (EAG) [49].

Para estimar a EAG de um aerogerador, deve-se primeiramente determinar a frequência de distribuição da velocidade do vento e o histograma da velocidade do vento. Depois, a curva de potência do aerogerador. A determinação da EAG é efetuada cruzando os dados da estatística da velocidade do vento com a curva de potência do aerogerador, para todas as velocidades do vento, e assim obtêm-se a produção total de energia do aerogerador [49].

A EAG de um aerogerador, considerando que um ano possui 8.760 horas, pode ser calculada conforme a Equação (11).

$$EAG = \sum [f(v) \cdot P(v)] \cdot 8760 \quad (11)$$

Onde:

$EAG$  = energia anual gerada [kWh];

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$f(v)$  = frequência de ocorrência da velocidade do vento  $v$  [%];

$P(v)$  = potência produzida pelo aerogerador na velocidade do vento  $v$  [kW] [49].

Na Tabela 3 são apresentados dados referentes à velocidade do vento, frequência de ocorrência de cada velocidade do vento e a potência de um aerogerador para cada uma das velocidades do vento [49].

Tabela 3 - Determinação da EAG de um Aerogerador em uma determinada localização.

Velocidade do Vento [m/s]	Frequência de Ocorrência [%]	Potência do Aerogerador [kW]	$f(v).P(v)$
1	0,474	0	0
2	1,436	2	0
3	4,017	18	0,7
4	7,149	56	4
5	10,466	127	13,3
6	12,855	240	30,9
7	13,617	400	54,5
8	13,040	626	81,6
9	11,597	892	103,4
10	8,907	1223	108,9
11	6,144	1590	97,7
12	3,942	1830	72,1
13	2,797	1950	54,5
14	1,674	2050	34,3
15	0,885	2050	18,1
16	0,453	2050	9,3
17	0,268	2050	5,5
18	0,153	2050	3,1
19	0,091	2050	1,9
20	0,022	2050	0,5

Fonte: Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica, 2009 [49].

Assim, com os dados da Tabela 3 e a Equação (11), é possível calcular a EAG de um aerogerador, como mostrado a seguir:

$$EAG = \sum [f(v) \cdot P(v)] \cdot 8760 = 694,6 \cdot 8760 = 6.085 \text{ MWh}$$

Para o aerogerador do exemplo, a EAG é de 6.085 MWh [49].

#### 4.1.4 PERFORMANCE DE UM AEROGERADOR

Um aerogerador pode ser caracterizado pelo seu rendimento, pela sua disponibilidade e pelo fator de capacidade. Como outra máquina elétrica, ele possui perdas e devido a isso, ocorre a diminuição do seu rendimento. As perdas mais importantes de um aerogerador são na caixa multiplicadora, no gerador, no transformador e nos sistemas elétricos que o compõem [49].

As perdas do multiplicador são devidas ao atrito das engrenagens, gerando perdas por calor. As perdas nos geradores são devidas às perdas mecânicas causadas pelo atrito das partes móveis (mancais e ventilação), às perdas elétricas causadas pelo efeito joule e às perdas magnéticas causadas pelas correntes parasitas e por histerese. As perdas nos transformadores são semelhantes as dos geradores, com exceção das perdas relativas às partes móveis. As perdas nos sistemas elétricos são devidas aos fenômenos eletromagnéticos (efeito joule e corona) [49].

O cálculo do rendimento total de um aerogerador considera o rendimento individual de todos os componentes. Assim, a potência elétrica do mesmo pode ser calculada pela Equação (12).

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (12)$$

Onde:

$P$  = potência do aerogerador [W];

$C_p$  = coeficiente de potência [adimensional];

$\eta$  = rendimento do aerogerador [adimensional];

$\rho$  = massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$A$  = área da seção transversal do rotor da turbina eólica [m<sup>2</sup>];

$v$  = velocidade do vento que incide na turbina eólica [m/s] [49].

Apesar da grande quantidade de perdas, os aerogeradores apresentam rendimentos superiores a 95% [49].

Um aerogerador precisa de manutenção, como qualquer outra máquina elétrica. Para isso, ele precisa ser desligado e, portanto ele para de produzir energia. Alguns exemplos de manutenção que exigem o seu desligamento são: troca de óleo, revisão no gerador, correção de defeitos nas pás e no conversor de frequência e outros. Apesar disso, um aerogerador possui uma disponibilidade superior a 97% [49].

Outra característica de um aerogerador é o seu fator de capacidade que é a relação entre a energia elétrica produzida e sua capacidade de produção. O fator de capacidade anual de um aerogerador é dado pela Equação (13).

$$F_c = \frac{EAG}{8760 \cdot P} \quad (13)$$

Onde:

$F_c$  = fator de capacidade [adimensional ou % (se multiplicado por 100)];

$EAG$  = energia anual gerada [kWh];

8760 = números de horas em um ano;

$P$  = potência nominal [kW] [49].

Observando a Equação (13), pode-se observar que ela permite o cálculo do EAG de uma forma diferente da já citada no item anterior. Isolando o EAG, obtém-se a energia anual gerada em função do fator de capacidade, da potência instalada e do número de horas no ano.

## 4.2 CONEXÃO DA USINA EÓLICA

A conexão de uma usina eólica ao sistema elétrico é parte importante do projeto de um parque eólico, pois dependendo do local onde a usina é instalada, são necessários grandes investimentos em linhas de transmissão e subestações, tornando o projeto inviável e pouco atrativo economicamente. Também, é preciso conhecer as características e restrições do sistema elétrico ao qual uma usina será conectada, tais como: tensão, frequência, impedância

e capacidade, para o correto dimensionamento do gerador e dos sistemas de controle e proteção [51].

#### **4.2.1 TIPOS DE CONEXÕES**

A conexão de um parque eólico ao sistema elétrico é realizada através das redes de distribuição e do sistema elétrico de potência. O tipo de conexão depende da disponibilidade da região, da potência a ser injetada e do nível de tensão [51].

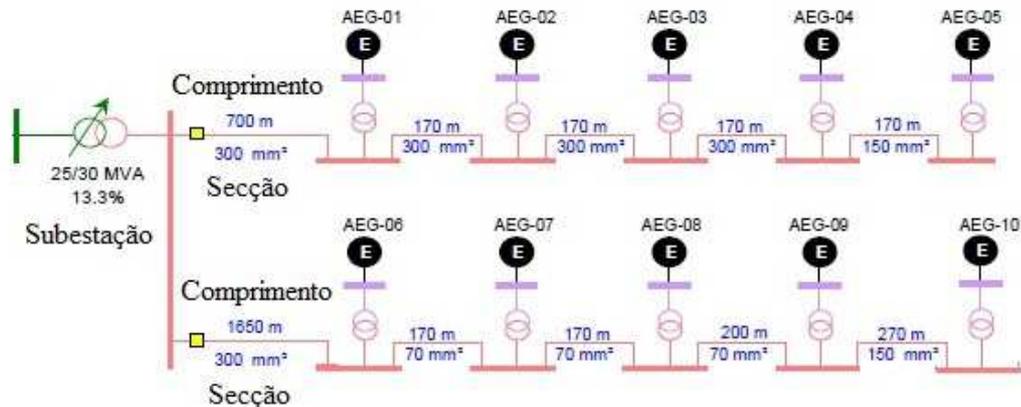
A rede de distribuição é classificada conforme o seu nível de tensão: Baixa tensão (BT), abaixo de 1 kV; Média tensão (MT), entre 1 kV e 34,5 kV; Alta tensão (AT), entre 34,5 kV e 230 kV; Extra alta tensão (EAT), entre 230 kV e 750 kV; Ultra alta tensão (UAT), acima de 750 kV [51].

O sistema elétrico é caracterizado conforme a função da rede: rede de transmissão, para o transporte de energia elétrica a longas distâncias, com potências acima de 200 MW e com tensões acima de 230 kV; rede de subtransmissão, para transporte de energia elétrica a distâncias e potências menores, com tensões entre 69 kV e 138 kV; rede de distribuição, para transporte de energia elétrica a distâncias e potências pequenas, com tensão menores que 34,5 kV [51].

As usinas eólicas de pequeno e médio porte podem ser conectadas em redes de distribuição ou subtransmissão e mesmo em redes de transmissão, embora exijam investimentos maiores. As grandes usinas, com potências acima de 100 MW, são conectadas em redes de transmissão [51].

Os aerogeradores de um parque eólico são conectados em paralelo, conforme o diagrama unifilar simplificado da Figura 37.

Figura 37 - Diagrama Unifilar de uma Usina Eólica.



Fonte: Conexão de Centrais de Geração Eólica na Rede básica e nos Sistemas de Distribuição, 2010 [52].

Os aerogeradores produzem energia elétrica entre 380 V e 690 V, exigindo o uso de transformadores elevadores na sua saída, que são conectados a uma subestação própria do parque. A função da subestação é interligar os aerogeradores e conectá-los aos transformadores que elevam a tensão ao nível de tensão da transmissão para a conexão com o sistema elétrico [51].

#### 4.2.2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA EM UM PARQUE EÓLICO

A qualidade da energia elétrica produzida e fornecida é determinada pela magnitude dos desvios do nível de tensão e na forma de onda. Uma usina eólica gera energia em função da velocidade do vento. Devido o vento não ser constante, a potência elétrica gerada também não é, podendo apresentar grandes variações e inclusive não produzir energia em períodos de calmaria [51].

As principais interferências causadas pelos aerogeradores de uma usina na rede são flutuações de tensão (sobretensão, flicker e harmônicos), consumo de energia reativa e picos e afundamentos de tensão. Esses parâmetros são usados para mensurar a qualidade da energia gerada. Os padrões de qualidade, no Brasil, são definidos pelos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [51].

A energia reativa que um gerador assíncrono demanda, em um aerogerador com velocidade constante, é parcialmente compensada por um banco de capacitores, mantendo o fator de potência deste acima de 0,96. Para aerogeradores com velocidade variável, a energia reativa é controlada por um inversor, que mantém o fator de potência perto de um [51].

As flutuações de tensão são devidas as variações da potência gerada que é causada pelas mudanças na velocidade do vento. A flutuação é a variação no valor eficaz da tensão que acontece de forma aleatória, repetitiva ou esporádica, devido à operação de cargas não lineares, para as duas primeiras formas, e a manobras de rede ou carga, para a última [51].

Os harmônicos são frequentes em um sistema elétrico como numa usina eólica. As distorções causadas na tensão e na corrente são devidas a presença de frequências que são múltiplos inteiros da onda fundamental. As causas dos harmônicos de tensão são os sistemas inversores e unidades de controle de capacitores. Já as causas dos harmônicos de corrente são devidos às cargas não lineares. Eles causam alguns efeitos indesejados, tais como: perdas adicionais, aquecimento dos motores, sobrecarga de capacitores, distorções nas medições e outros [51].

Os flickers ou cintilações são oscilações da tensão em baixas frequências, abaixo de 35 Hz. Eles são causados devido a variações no conjugado mecânico da turbina, que varia o torque eletromagnético do gerador, e por fim, varia a potência e a tensão geradas. Uma situação que pode ocasionar essas oscilações é devido ao efeito de sombra aerodinâmico da torre que é a perda de fluxo de vento quando a pá da turbina passa em frente à torre. A redução da velocidade do vento é de aproximadamente 1 m/s, reduzindo em torno de 20% a potência nominal da turbina. Nas turbinas modernas com 3 pás, a frequência da flutuação de potência do aerogerador chega a três vezes a frequência de rotação da turbina [51].

Na partida de um parque eólico os transitórios dos aerogeradores individuais podem se somar, embora as partidas não ocorram ao mesmo tempo, pois os aerogeradores não são acionados com velocidades de vento iguais. A parada e a comutação de geradores, quando existem dois geradores com potências diferentes, também provocam perturbações e diminuição na qualidade da energia produzida [51].

A conexão dos aerogeradores ao sistema de transmissão nacional deve atender alguns requisitos técnicos definidos pela ONS, listados na Figura 38, para que a energia elétrica produzida e fornecida apresente padrões de qualidade adequados [51].

Figura 38 - Requisitos técnicos gerais no Brasil para conexão ao sistema de potência.

Descrição	Requisito técnico mínimo	Benefício
1. Operação em regime de frequência não nominal	(a) Operação entre 56,5 e 63 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência instantâneos. (b) Operação abaixo de 58,5 Hz por até 10 segundos. (c) Operação entre 58,5 e 61,5 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência temporizados. (d) Operação acima de 61,5 Hz por até 10 segundos (1).	Evitar o desligamento dos geradores quando de déficit de geração, antes que o esquema de alívio de carga atue completamente ou em condições de sobrefrequência controláveis.
2. Geração/absorção de reativos	No ponto de conexão, a central geradora eólica deve propiciar os recursos necessários para, em potência ativa nominal (2) e quando solicitado pelo ONS, operar com fator de potência indutivo ou capacitivo dentro da faixa especificada abaixo: (a) mínimo de 0,95 capacitivo; (b) mínimo de 0,95 indutivo.	Participação efetiva no controle da tensão, aumentando as margens de estabilidade de tensão.
3. Operação em regime de tensão não nominal	No ponto de conexão da central geradora: (a) Operação entre 0,90 e 1,10 p.u. da tensão nominal sem atuação dos relés de subtensão e sobretensão temporizados. (b) Operação entre 0,85 e 0,90 p.u. da tensão nominal por até 5 segundos.	Evitar o desligamento da usina quando há variações de tensão no sistema.
4. Participação em Sistemas Especiais de Proteção SEP	Possibilidade de desconexão automática ou de redução de geração mediante controle de passo e/ou de <i>stall</i> das pás.	Minimizar conseqüências de perturbações no sistema, incluindo sobrefrequência no caso de ilhamento.

Fonte: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão, 2010 [53].

## 5 ESTUDO DE CASO

O projeto de um parque eólico requer um profundo estudo e conhecimento de alguns parâmetros que definirão as características técnicas e operacionais do mesmo, bem como a sua viabilidade econômica. Um parque eólico possui vida útil de 20 a 30 anos e um dimensionamento adequado é importante para o sucesso operacional e comercial do mesmo durante este período, devendo produzir energia suficiente para bancar os investimentos da sua implantação, os custos operacionais e ainda trazer um retorno financeiro ao investidor [54].

As características técnicas de um parque eólico são definidas pelos seguintes parâmetros: estudo do terreno e sua influência no comportamento do vento; estudo do vento; estudo da disposição dos aerogeradores e estudo da conexão do parque eólico na rede elétrica. A qualidade de um projeto está diretamente relacionada com a qualidade do estudo e levantamento desses dados, podendo aumentar em mais de 10% a energia gerada pela usina. Este estudo é complexo e detalhado, exigindo a aplicação de diversas ferramentas e conhecimentos [54].

O projeto, desenvolvimento e implantação de um parque eólico exige uma metodologia composta de diversas etapas, sendo que cada uma delas deve ser desenvolvida com cuidados técnicos e científicos adequados, além dos estudos de viabilidade técnico-econômica usados na construção de projetos de engenharia. Uma possível metodologia que atende as principais etapas de um projeto pode ser resumida no esquema mostrado na Figura 39 [54].

O objetivo do presente trabalho se restringirá a etapa do estudo da viabilidade econômica e financeira de um projeto eólico. Para este estudo é preciso considerar todos os custos, tais como: investimentos, juros de financiamentos, operação, manutenção, locação do terreno, impostos, taxas e outros, que devem ser descontados dos faturamentos da venda de energia. A partir deste estudo, é possível determinar a atratividade do investimento e se o empreendimento é viável ou não [54].

Normalmente, a ferramenta utilizada para avaliar a atratividade é a taxa interna de retorno (TIR) [54].

Figura 39 - Esquema da Metodologia para o projeto e implantação de uma Usina Eólica.



Fonte: Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos, 2012 [54].

## 5.1 DADOS DO PARQUE EÓLICO

O estudo de caso apresentado neste trabalho está relacionado ao complexo eólico de Cerro Chato, constituído por três usinas eólicas chamadas Coxilha Negra V, Coxilha Negra VI e Coxilha Negra VII [55]. O empreendimento, que faz parte do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC 2), é resultado de uma parceria formada pela Eletrosul, com 90% de participação, e pela empresa Wobben, com 10% de participação. As duas empresas constituíram a Eólica Cerro Chato S/A [56].

A energia gerada pelo complexo eólico foi comercializada em dezembro de 2009, no primeiro leilão exclusivo de energia eólica realizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e será entregue ao Sistema Interligado Nacional (SIN), reforçando o sistema elétrico brasileiro, principalmente na fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, diminuindo a dependência da energia das usinas termelétricas. O leilão alcançou um deságio médio de 21,49% em relação ao teto estabelecido que era de R\$ 189,00 / MWh. O lance ofertado pelo

consórcio liderado pela Eletrosul foi de R\$ 131,00 / MWh durante 20 anos de contrato e representou um deságio de 31,7% ante o preço inicial. A preços atuais, o MWh de Cerro Chato é vendido a R\$ 144,11/ MWh, valor que é reajustado pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) [56].

### 5.1.1 O EMPREENDIMENTO

O Complexo Eólico Cerro Chato começou a ser construído em junho de 2010 e ocupa uma área de 80 quilômetros quadrados na zona rural de Santana do Livramento [56], conforme a Figura 40.

Figura 40 - Usina Eólica Cerro Chato.



Fonte: Energia Eólica, 2012 [56].

Os estudos e medições sistemáticas de ventos na região de Santana do Livramento, que apontaram a viabilidade do empreendimento começaram em 2005. Foram instalados, no município, torres de medição e durante quatro anos os dados obtidos confirmaram o excelente potencial de geração de energia elétrica a partir da força do vento. A velocidade média dos ventos varia de 6,5 metros por segundo, no verão, a 9,5m/s, no inverno. Os aerogeradores do Complexo Eólico Cerro Chato são capazes de começar a gerar com ventos de 2,5 m/s e reduzem a produção a partir de 28 m/s [56].

Para a construção do complexo foram investidos R\$ 450 milhões, dos quais 50% foram oriundos de capital próprio (*Equity*) e os outros 50% foram oriundos de capital de

terceiros (*Debty*), que foram financiados pelo BNDES por meio de uma linha de crédito especial, o Programa de Sustentabilidade do Investimento (PSI) [56].

Cada usina produzirá energia através de 15 aerogeradores síncronos com potencial nominal de 2 MW, resultando em uma capacidade instalada de 30 MW cada usina e 11 MW de energia assegurada média, o que resulta em uma capacidade instalada total de 90 MW. A estimativa é de que a usina apresente uma produção anual de 300 GWh [56].

A geração de 90 MW pelos 45 aerogeradores é suficiente para atender o consumo de aproximadamente 500 mil pessoas, o equivalente a seis vezes a população de Santana do Livramento. O parque beneficia ainda a economia local através da geração de 500 empregos diretos e 1500 indiretos [56]. Os dados técnicos das usinas são resumidos na Tabela 4.

**Tabela 4** - Dados Técnicos do complexo Eólico.

<b>Complexo Cerro Chato</b>			
<b>Usinas Eólicas</b>	<b>Coxilha Negra V</b>	<b>Coxilha Negra VI</b>	<b>Coxilha Negra VII</b>
Potência Instalada (MW)	30	30	30
Fator de Capacidade (%)	37,8	37,72	36,52
Energia Assegurada (MW <sub>médios</sub> )	11,34	11,32	10,96
Número de aerogeradores (unidades)	15	15	15
Potência nominal dos aerogeradores (MW)	2	2	2
Modelo	Wobben E82	Wobben E82	Wobben E82
Altura de Hub Média (metros)	108,38	108,38	108,38

Fonte: Crédito de Carbono de Cerro Chato, 2010 [55].

### 5.1.2 LOCALIZAÇÃO DO PARQUE EÓLICO

O complexo está localizado a cerca de 20 km em linha reta do município de Santana do Livramento [55], no extremo Sul do Rio Grande do Sul, distante 495 km da capital Porto Alegre [56], conforme mostra a Figura 41.

Figura 41 - Localização das Usinas Coxilha Negra V, VI e VII.



Fonte: Crédito de Carbono de Cerro Chato, 2010 [55].

### 5.1.3 AEROGERADORES

Os aerogeradores utilizados nas três usinas são da Wobben Windpower, modelo E-82 com altura máxima de 150 metros e potência nominal de 2MW. Eles possuem acionamento direto, ou seja, não possuem caixa de multiplicação de velocidades, e por isso possuem um gerador multipolos (72 polos) síncrono (2 MW) [56]. Algumas das características técnicas deste modelo de aerogerador são descritas na Tabela 5.

**Tabela 5** - Dados Técnicos dos aerogeradores da usina.

Potência	
Potência Nominal	2 MW
Velocidade do vento nominal	12,5 m/s
Velocidade início de operação	2,5 m/s
Velocidade de parada	28 m/s
Rotor	
Diâmetro	82 m
Área varrida pelas pás	5281 m <sup>2</sup>
Número de pás	3
Velocidade de rotação	Variável, 6 – 18 rpm
Material	Fibra de Vidro, resina epóxi
Nacele	
Caixa de Multiplicação / Tipo	Sem caixa de engrenagens
Voltagem	400 V

---

Frequência da rede	50/60 Hz
--------------------	----------

---

Fonte: Modelo E-82, 2012 [57].

#### 5.1.4 SISTEMA DE TRANSMISSÃO

A tensão na saída de cada aerogerador é de 400 V, trifásica e com frequência de 60 Hz. Cada aerogerador possui um transformador de 2,3 MVA que eleva essa tensão para 34,5 kV. Essa tensão chega até a subestação coletora através de uma Rede de Média Tensão (RMT) subterrânea de 69 km que concentra a energia produzida pelo complexo e eleva a tensão de 34,5 kV para 230 kV [56].

A Figura 42 ilustra a subestação coletora.

Figura 42 - Subestação Coletora.



Fonte: Energia Eólica, 2012 [56].

A Figura 43 ilustra a escavação das valas para passar a rede de média tensão.

Figura 43 - Escavação das valas da Rede de Média Tensão.

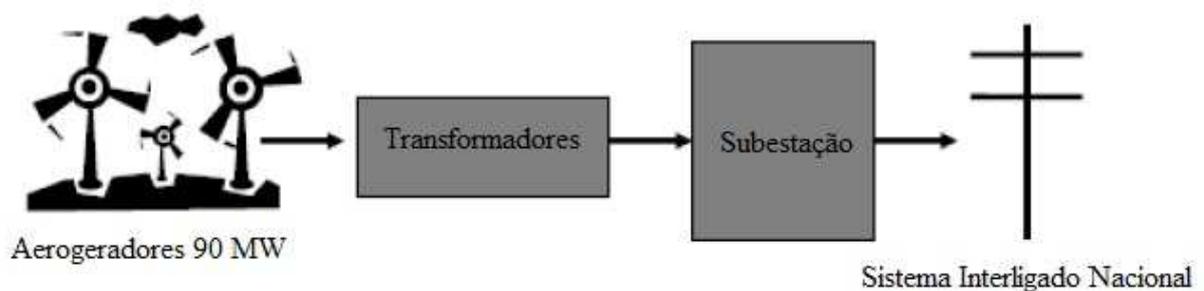


Fonte: Energia Eólica, 2012 [56].

Dessa subestação, a energia é transportada por uma linha de transmissão de aproximadamente 24 km de extensão para outra subestação, a Livramento 2, que pertence à Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e que foi ampliada para receber a energia de Cerro Chato [56].

Da subestação Livramento 2, a energia é distribuída para o Sistema Interligado Nacional (SIN) [56], conforme o fluxograma da Figura 44.

Figura 44 - Fluxograma do sistema de transmissão de Cerro Chato.



Fonte: Créditos de Carbono de Cerro Chato, 2010 [55].

## 5.2 ASPECTOS ECONÔMICOS

Definidos os aspectos técnicos referentes à energia eólica nos capítulos anteriores, assim como a sua situação no mundo e no Brasil, e as tecnologias de aerogeradores, parte-se para os aspectos econômicos. Inicialmente serão apresentadas as ferramentas usadas em uma análise econômica e posteriormente serão estimadas as projeções de receitas e custos do complexo eólico de Cerro Chato, para avaliar a sua viabilidade financeira.

### 5.2.1 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

O objetivo de um método de análise de investimento é verificar se um investimento é viável ou não e com isso identificar qual a ordem de prioridade, quando existem mais de uma opção de investimento [58]. Os métodos utilizados no trabalho são a TIR e o Valor Presente Líquido (VPL).

O VPL é o valor atual de um fluxo de caixa, ou seja, o valor presente de todas as entradas e saídas descontadas à taxa mínima de atratividade que é a taxa de juros que um capital pode render no mercado financeiro. A taxa normalmente utilizada como parâmetro é a taxa básica de juros do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC). Ela é a taxa referência para os títulos públicos do governo e funciona como um indicador para analisar a viabilidade de um projeto [55]. O valor da taxa SELIC é de quase 8% (cotação do dia 5/12/2012) [59].

O VPL pode ser calculado através da Equação (14) [58].

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{F_j}{(1 + tma)^j} \quad (14)$$

Onde:

$VPL$  = valor presente líquido [R\$];

$F_j$  = fluxo de caixa (entradas - saídas) no ano  $j$  [R\$];

$tma$  = taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade [%];

$n$  = período de vida útil do investimento [anos];

$j$  = contador de tempo [anos].

Quando o VPL for positivo, significa que o dinheiro investido no projeto foi recuperado à taxa mínima de atratividade [58]. No VPL mede-se o valor absoluto dos lucros [60].

A TIR é o método mais usado em estudos de viabilidade de projetos eólicos [54] e ela pode ser calculada pela Equação (15).

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{F_j}{(1 + tir)^j} = 0 \quad (15)$$

Onde:

$VPL$  = valor presente líquido [R\$];

$F$  = fluxo de caixa (entradas - saídas) no ano  $j$  [R\$];

$tir$  = taxa de desconto ou taxa interna de retorno [%];

$n$  = período de vida útil do investimento [anos];

$j$  = contador de tempo [anos].

A TIR é o valor que torna o VPL igual à zero. Ela depende somente dos fluxos de caixa projetados. Quando a TIR for maior do que a taxa mínima de atratividade do projeto, o investimento pode ser realizado [58].

Na TIR mede-se a taxa de lucros [60].

### 5.2.2 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO

O custo de implantação de um parque eólico varia de acordo com o local e o país. No Brasil, o custo médio em 2004 foi de R\$ 3.866 /kW. Ele é resultado do investimento necessário para a implantação do parque, aquisição e instalação dos aerogeradores, fundações, conexão à rede, administração, medições de vento, licenças ambientais e outros. O maior custo na implantação de um parque é proveniente dos aerogeradores, podendo chegar a 75% do investimento [61].

O investimento realizado na construção e instalação dos 90 MW do complexo eólico de Cerro Chato foi aproximadamente de R\$ 450 milhões e a composição do custo de implantação do mesmo é mostrada na Tabela 6.

**Tabela 6** - Composição do custo de implantação do complexo eólico de Cerro Chato.

Descrição	Investimento [%]
Aerogeradores	63,5
Fundações	9,7
Acessos (51 km) e Plataformas	6,6
Subestação Coletora	6,0
Infraestrutura Elétrica (RMT, LT e cabos)	8,6
Locação do Terreno	1,7
Fundiário	0,4
Fiscalização da Obra	0,8
Meio Ambiente	1,7
Administração	1,0

Fonte: Eólica Cerro Chato, 2012 [62].

Observando-se a Tabela 7, pode-se confirmar que os aerogeradores possuem o maior percentual do custo total de implantação no parque de Cerro Chato.

O custo estimado de implantação do complexo pode ser obtido através da Equação (16).

$$I = C \cdot P \quad (16)$$

Onde:

$I$  = investimento inicial [R\$];

$C$  = custo estimado de implantação [R\$/kW];

$P$  = potência elétrica instalada [kW].

Isolando o custo, e substituindo os valores citados acima, para o investimento e para a potência instalada, chega-se ao custo de implantação do parque de Santana do Livramento que é de aproximadamente R\$ 5.000,00 / kW.

Percebe-se que o custo de investimento do parque de Santana do Livramento está acima do valor praticado em 2004, sendo que o mesmo pode ser explicado devido ao forte aquecimento do mercado internacional de energia eólica e ao aumento das comodites usadas na indústria eólica, principalmente o aço [61].

### 5.2.3 RECEITAS DA ENERGIA GERADA

Inicialmente, no âmbito do primeiro leilão exclusivo de energia eólica realizado em dezembro de 2009, a energia do parque eólico contemplado neste estudo de caso foi comercializada a uma tarifa de R\$ 131,00 / MWh durante 20 anos de contrato, mas a preços atuais, o MWh de Cerro Chato é vendido a R\$ 144,11/ MWh [56], como citado no início do capítulo.

Para o cálculo da quantidade de energia a ser gerada anualmente, é necessário o estudo dos ventos do parque para determinar o Fator de Capacidade que é influenciado pela disponibilidade dos ventos. Como uma turbina não produz energia na sua capacidade máxima todo o tempo, o fator de capacidade serve para dimensionar o percentual de produção da mesma. Também é necessária a potência total instalada do parque e a quantidade de horas em um ano [63].

Para este cálculo, basta isolar a energia anual gerada da Equação (13), e assim obtêm-se a Equação (17).

$$EAG = P \cdot F_c \cdot 8760 \quad (17)$$

Onde:

$EAG$  = energia anual gerada [kWh];

$P$  = potência nominal [kW];

$F_c$  = fator de capacidade [adimensional ou % (se multiplicado por 100)];

8760 = números de horas em um ano.

A geração estimada de energia anual pode ser obtida através da Equação (17) e dos dados fornecidos na Tabela 4, resultando no seguinte valor, que é o valor estimado de produção anual, citado no trabalho:

$$EAG = P \cdot F_c \cdot 8760 = 90 \text{ MW} \cdot 0,38 \% \cdot 8760 \cong 300 \text{ GWh}$$

Para determinar a receita anual do complexo eólico analisado no trabalho, obtida com a venda da energia gerada, basta multiplicar a EAG encontrada pelo preço de venda comercializado no leilão em 2009. A expressão para este cálculo é definida na Equação (18).

$$R_E = EAG \cdot P_E \quad (18)$$

Onde:

$R_E$  = receita estimada anual [R\$];

$EAG$  = energia anual gerada [MWh];

$P_E$  = preço do MWh comercializado [R\$/MWh];

A receita nominal estimada anual obtida com a venda da energia possui o valor abaixo:

$$R_E = EAG \cdot P_E = 300000 \text{ MWh} \cdot 144,11 \frac{\text{R\$}}{\text{MWh}} \cong \text{R\$ } 43.174.000,00$$

A receita do complexo pode ainda ser incrementada com a comercialização dos créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), mas isso não será analisado no presente trabalho.

#### 5.2.4 CUSTOS DA ENERGIA GERADA

O custo de produção de energia elétrica em usinas eólicas depende dos custos de operação e manutenção (O&M) da mesma, das Tarifas pelo Uso do Sistema de Transmissão (TUST) e de Distribuição (TUSD), das despesas com o financiamento, da locação da terra, já que a maioria dos parques não se situa em áreas próprias, dos impostos, pelo valor do investimento (depreciação), dos tributos e outros [63]. Esses custos são fortemente influenciados pela velocidade média do vento no local, pois ela afeta a energia gerada [61].

O percentual de participação de cada um dos itens varia de acordo com o país. Por exemplo, no Brasil, os custos tributários são significativos, podendo chegar a 30% do custo total [61].

O maior dos custos da fase operacional de um parque é o custo relativo ao pagamento do financiamento do capital investido na instalação da usina. O custo de O&M também é significativo e varia conforme o período da vida útil do empreendimento [61].

A evolução dos custos de geração da energia elétrica a partir da energia eólica está constantemente diminuindo ao longo dos anos, conforme a tecnologia evolui, devido ao aumento da potência e do tamanho das máquinas. Somente a partir de 2006 começou a

inverter a tendência de redução, aumentando o custo da energia eólica. Este acréscimo é devido ao grande aquecimento do mercado internacional e ao aumento do custo dos insumos utilizados na fabricação das máquinas, em especial o aço, como citado no trabalho [61].

No complexo eólico de Cerro Chato, a composição dos custos operacionais é mostrada na Tabela 7.

**Tabela 7** - Composição dos custos operacionais do complexo eólico de Cerro Chato.

Descrição	Custos [%]
O&M Aerogeradores	5,6
Financiamentos	56,4
Encargos do Uso do Sistema de Transmissão	3,9
Aluguéis	0,7
Administrativo	2,3
Impostos e tributos	2,4
Taxas e Contribuições	0,3
Seguros	0,3
Depreciação	27,2
O&M Sistema de Transmissão	0,9

Fonte: Eólica Cerro Chato, 2012 [62].

Observando a Tabela 7, pode-se confirmar que para o parque objeto do estudo, o maior percentual do custo total, também é proveniente do pagamento do financiamento do projeto.

#### Despesas Financeiras:

As despesas financeiras são os juros pagos como remuneração do dinheiro pego emprestado para compor o capital usado na implantação do projeto [63]. Eles variam conforme a origem dos recursos. No Brasil, investimentos em infraestrutura são, na maioria das vezes, financiados pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) [61].

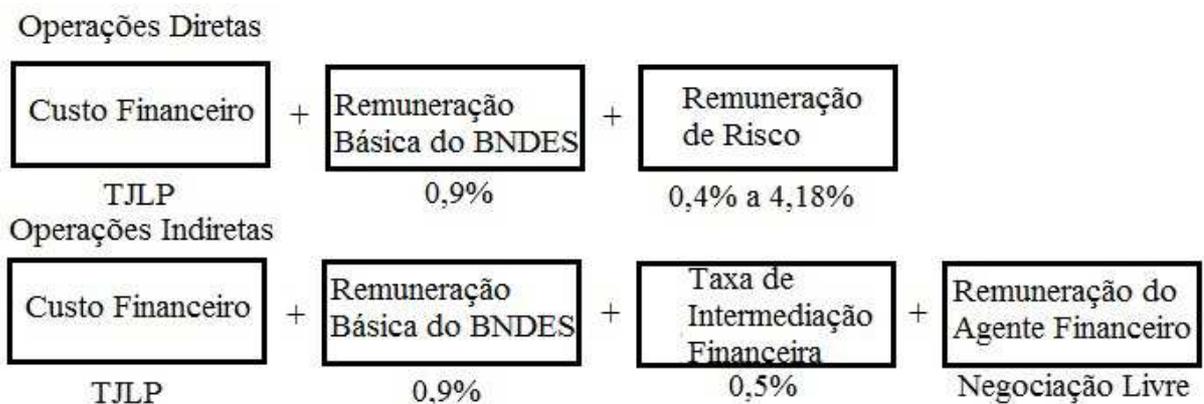
O BNDES apoia projetos que busquem diversificar a matriz energética nacional e contribuam para a sua sustentabilidade, através da linha Energias Alternativas. Os empreendimentos eólicos, na sua maioria, são financiados através do produto BNDES Finem.

A operação de financiamento pode ser direta, quando realizada pelo próprio BNDES ou indireta, quando realizada por meio de uma instituição financeira credenciada [64].

Para as operações diretas, a taxa de juros é composta por três partes: custo financeiro + remuneração básica do BNDES e taxa de risco de crédito. O custo financeiro é baseado na Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP), cujo valor para o período de outubro a dezembro de 2012 está fixado em 5,5% ao ano (a.a.). A remuneração básica do BNDES é de 0,9% a.a., e a taxa de risco de crédito é de até 4,18% a.a., conforme o risco de crédito do cliente. Para as operações indiretas, o custo financeiro e a remuneração básica são iguais, porém não existe a cobrança da taxa de risco de crédito, mas sim de uma taxa de intermediação financeira de 0,5% a.a. para as grandes empresas, pois as Micro, Pequenas e Médias Empresas (MPMEs) estão isentas. Também existe o custo de remuneração do agente financeiro credenciado e o cliente, cujo valor é negociado entre as partes [64].

As condições de taxas de juros mencionadas acima são ilustradas na Figura 45.

Figura 45 - Condições Financeiras.



Fonte: Energias Alternativas, 2012 [64].

O prazo de amortização é de até 16 anos fora o período de utilização dos recursos e a carência e a participação máxima do BNDES é de até 80% dos itens financiáveis. Alguns dos itens não financiáveis são as aquisições do terreno e desapropriações, gastos com a manutenção corrente, aquisição de bens importados e outros [64].

#### Encargos do Uso do Sistema de Transmissão:

No Brasil, o uso do sistema de transmissão e de distribuição de energia é pago. A energia é transportada por longas distâncias através de linhas de transmissão e subestações com tensões acima de 230 kV, chamada de rede básica. Qualquer agente que produza ou

consoma energia elétrica pode usufruir desta rede básica. O operador nacional do sistema (ONS) é quem administra a mesma. A distribuidora é remunerada através da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUST), que é calculada pela metodologia nodal, ou seja, considerando a economia do local. O cálculo contempla as linhas de transmissão, transformadores, geradores e cargas elétricas em cada subestação, ou nó, do sistema elétrico interligado [65]. O complexo eólico de Cerro Chato teve sua tarifa calculada no valor de R\$ 2,691 /kW.mês [66].

#### Taxas e Contribuições:

A Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE) foi criada com o objetivo de ser a receita da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a cobertura de suas despesas administrativas e operacionais [67]. Os valores da TFSEE são definidos pela ANEEL todos os anos. Para 2012 o valor do benefício unitário ficou estipulado em R\$ 418,39 / kW [68].

#### Impostos e tributos:

As tarifas que incidem sobre o Programa de Integração Social (PIS) e sobre a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) são de 0,65% e 3%, respectivamente, sendo a base para ambas o lucro presumido, ou seja, a Receita Operacional Bruta (ROB) [63].

Com o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), lançado em 2007, os projetos eólicos passaram a receber benefícios do Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI), que é um mecanismo que suspende por cinco anos a incidência da PIS e COFINS sobre os equipamentos do parque eólico [69].

Já, o Imposto de Renda (IR) e a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL), as alíquotas consideradas são de 25% e 9%, respectivamente, ambos baseados na ROB, antes do IR [61].

#### Custos de O&M:

A operação e a manutenção do parque eólico de Cerro Chato são realizadas pela empresa Wobben, subsidiária da alemã Enercon, fabricante de aerogeradores, parceira da

Eletrosul no projeto com participação de 10%. A Wobben foi a responsável pela implantação do parque e agora, pela operação e manutenção necessárias na usina [62].

Os custos com a O&M do parque não foram disponibilizados pela empresa Wobben nem pela Eletrosul por serem consideradas informações sensíveis e estratégicas para as mesmas. Então, para esta análise será usado como referência os valores divulgados pelo PROINFA, onde são considerados R\$ 50 / kW, para os dois primeiros anos, R\$ 100 / kW, do terceiro ao décimo ano e R\$ 120 / kW, a partir do décimo primeiro ano [70].

Baseado nas informações e valores citados acima se estimou a despesa anual da usina que é de R\$ 18.972.000,00, resultando em um fluxo positivo anual de R\$ 24.202.203,12 (APÊNDICE).

### 5.2.5 RESULTADOS

Considerando as premissas utilizadas nas projeções financeiras do parque eólico contemplado neste estudo de caso, e utilizando o software Microsoft Excel para obterem-se os resultados dos cálculos da análise econômica, é possível observar através da Tabela 8, os resultados em termos de VPL e TIR do complexo eólico de Cerro Chato (APÊNDICE).

**Tabela 8** - VPL e TIR do complexo eólico de Cerro Chato.

VPL do Projeto	R\$ 5.628.258,52
TIR do Projeto	8%

Os resultados da Tabela 8 mostram que o complexo eólico de Cerro Chato é economicamente viável, pois apresenta VPL e TIR positivos. Apesar de a TIR ser positiva, ela obteve o mesmo valor do que a TMA usada como parâmetro, no caso a taxa SELIC, ou seja, apesar de economicamente viável, o projeto enfrenta barreiras para o investimento por existirem outras opções mais atrativas no mercado financeiro baseados na taxa SELIC e que são muitas vezes menos complexos do que o investimento em uma usina eólica.

Uma alternativa para aumentar a TIR e melhorar a atratividade do projeto incentivando futuros investimento em outros projetos de geração de energia limpa é a comercialização dos créditos de carbono que poderão ser gerados e vendidos com a redução na emissão de CO<sub>2</sub>.

Outro fator, que poderia melhorar a atratividade do projeto, é a tarifa de energia considerada nos cálculos financeiros e que foi contratado no primeiro leilão do Brasil de energia eólica em dezembro de 2009. O objetivo do leilão foi de estimular os projetos de geração de eletricidade baseados em energias renováveis. Os preços praticados no leilão foram menores do que o esperado, devido a grande competitividade. Os preços ofertados variaram de R\$ 131 / MWh até R\$ 153,07 / MWh, uma média de R\$ 148,39 / MWh, o que correspondeu a um deságio de 21,5% em relação ao preço máximo de R\$ 189,00 / MWh estabelecido pela Aneel. O preço contratado pelo complexo de Cerro Chato foi o menor de todos os empreendimentos, ficando 14,4% mais baixo do que o maior preço leilado. Ainda, o contrato estabelecido de geração de energia foi de 20 anos, restringindo a possibilidade de aumento da receita.

## 6 CONCLUSÕES

Como observado no decorrer do trabalho, através das previsões de investimentos, dos programas de incentivo, dos projetos em andamento e do potencial eólico de diversos países, em especial o do Brasil, a tendência do uso da energia eólica para a geração de eletricidade nos próximos anos é de um grande crescimento, tanto a curto quanto a longo prazo. Conclui-se que isso se deve aos diversos benefícios e vantagens desta tecnologia, pois ela atende todas as exigências da sociedade moderna, com mínimos impactos ambientais, contribuindo com o desenvolvimento sustentável e complementando a produção de energia elétrica, cuja demanda é sempre crescente.

Em relação aos aspectos socioambientais, a energia eólica é uma das melhores opções quando se deseja minimizar os impactos decorrentes da produção de energia, inclusive dentre as fontes alternativas, devido aos seus baixos impactos ambientais. Dos impactos citados no trabalho, o único que realmente afeta a natureza negativamente é a morte dos pássaros que cruzam pelo meio das pás das turbinas. Os outros são aspectos subjetivos que podem ser contornados. Mesmo em relação à morte dos pássaros, a sua incidência é muito pequena quando comparada com a caça, por exemplo, que é uma atividade realizada por esporte ou lazer pelo homem, ao contrário das linhas de transmissão e do tráfego que são situações necessárias, assim como as turbinas dos aerogeradores.

Em relação aos aspectos econômicos inerentes a um projeto de geração elétrica baseado na fonte eólica, pode-se observar que ainda são necessários grandes investimentos para a construção de um parque eólico. Portanto, uma boa análise deve ser implementada para determinar os riscos e externalidades de um projeto eólico e assim verificar a sua viabilidade financeira. A indústria eólica no Brasil é ainda pequena, mas os investimentos estão crescendo, graças aos incentivos que começaram com a criação do Proinfa. A construção de usinas eólicas de grande porte não seria possível sem estes incentivos.

Com o avanço da tecnologia e o crescimento e expansão do mercado eólico mundial, a tendência é que os equipamentos e insumos utilizados reduzam os seus custos, favorecendo os investimentos em projetos eólicos.

O estudo de caso mostrou que o complexo eólico de Cerro Chato é viável, gerando retorno financeiro aos investidores, mas esse retorno poderia ser ainda maior com a criação de

novos incentivos e a busca por benefícios, o que atrairia novos investidores para futuros projetos de energia eólica, tornando este mercado ainda mais competitivo.

Quanto aos benefícios, uma opção seria a venda dos créditos de carbono que pode ser um mecanismo importante na implementação de projetos de energia renováveis que não somente em relação à eólica, aumentando a participação dessas fontes na matriz energética brasileira. O benefício dos créditos de carbono é grande incentivo para a implementação dos projetos eólicos tornando-os mais atrativos.

Quanto aos incentivos, uma opção seria a redução da carga tributária, que é elevada no Brasil, podendo chegar a 30% dos custos totais da energia elétrica gerada em um parque, como citado no trabalho.

Finalizando, diante de todas essas observações pode-se concluir que o mercado eólico está seguindo o caminho do crescimento e da expansão mundial, conforme as previsões mostradas no trabalho e que a utilização da energia eólica produz mínimas desvantagens comparadas ao grande retorno que ela pode ofertar em termos de aspectos socioambientais e econômicos.

## REFERÊNCIAS

- [1] – BRASIL. Ministério da Educação. **Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Disponível em: < <http://www.cerpch.unifei.edu.br/eolica.php> >. Acesso em: 10 de setembro de 2012.
- [2] – PORTAL TERRA. **Alternativas para a crise de Energia**. Disponível em: <<http://360graus.terra.com.br/ecologia/default.asp?did=26663&action=reportagem> >. Acesso em 10 de setembro de 2012.
- [3] – AGÊNCIA MUNICIPAL DE ENERGIA DE ALAMADA. **Energias Renováveis**. Disponível em: < <http://www.ageneal.pt/default.asp> >. Acesso em 11 de setembro de 2012.
- [4] – CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009 p. 13 – 14.
- [5] – BRASIL. **Energia Eólica**. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica/energia-eolica> >. Acesso em 20 de setembro de 2012.
- [6] – WIKIPÉDIA. **Energia Eólica**. Disponível em: < [http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_eolica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_eolica) >. Acesso em 21 de setembro de 2012.
- [7] – ALDABÓ, R. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber, 2002. p. 13 – 45.
- [8] – CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003 p. 12.
- [9] – MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E.B. **O Aproveitamento da Energia Eólica**. São José dos Campos, 2007, p. 7.
- [10] – CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009 280 p. 40 – 53.
- [11] – RAMOS, D. S. *et al.* **Projeto de Geração de Energia Eólica**. 2006. 75 f. Projeto de Graduação de Curso - Universidade Santa Cecília. Engenharia Industrial Mecânica, Santos, 2006.
- [12] – CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009 280 p. 54 – 80
- [13] – DUARTE, H. N. M. **Utilização da Energia Eólica em Sistemas Híbridos de Geração de Energia Visando pequenas Comunidades**. 2004. 70 f. Projeto de Graduação de Curso – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Engenharia Elétrica, Rio Grande do Sul, 2004.
- [14] – TROQUE DE ENERGIA. **Introdução a Energia Eólica**. Disponível em: <<http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosDocumentos/IntroducaoAEnergiaEolica.pdf>>. Acesso em 24 de novembro de 2012.

- [15] – HOMEM. **Novas Tecnologias: Turbina Eólica de eixo Vertical**. Disponível em: <<http://homem.net/2012/08/11/novas-tecnologias-turbina-eolica-de-eixo-vertical/>>. Acesso em 24 de novembro de 2012.
- [16] – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Tutorial de Energia Eólica**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=231> >. Acesso em 24 de novembro de 2012.
- [17] – SALINO, P. J. **Energia Eólica no Brasil: Uma comparação do Proinfa e dos novos Leilões**. 2011. 120 f. Projeto de Graduação de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2011.
- [18] – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **História da Energia Eólica e suas Utilizações**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial\\_eolica](http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial_eolica) >. Acesso em 08 de outubro de 2012.
- [19] – CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003 p. 39-47.
- [20] – PE DESENVOLVIMENTO. **História da Energia Eólica e suas utilizações**. Disponível em: <<http://pedesenvolvimento.com/2009/07/15/historia-da-energia-eolica-e-suas-utilizacoes/> >. Acesso em 09 de outubro de 2012.
- [21] – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2011**. Disponível em: <[http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual\\_report\\_2011\\_lowres.pdf](http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2011_lowres.pdf) >. Acesso em 10 de outubro de 2012.
- [22] – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2009**. Disponível em: <[http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/GWEC\\_Global\\_Wind\\_2009\\_Report\\_LOWRES\\_15th.-Apr..pdf](http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/GWEC_Global_Wind_2009_Report_LOWRES_15th.-Apr..pdf) >. Acesso em 10 de outubro de 2012.
- [23] – FRANKFURT SCHOOL – UNEP COLLABORATING CENTRE FOR CLIMATE E SUSTAINABLE ENERGY FINANCE. **Global Trends in Renewable Energy Investment 2012**. Disponível em: <<http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/globaltrendsreport2012final.pdf> >. Acesso em 14 de outubro de 2012.
- [24] – REN21 RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. **Renewables 2012 Global Status Report**. Disponível em: <[http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2012\\_low%20res\\_FINAL.pdf](http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf) >. Acesso em 14 de outubro de 2012.
- [25] – WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. **Half -year Report 2012**. Disponível em: <[http://www.wwindea.org/webimages/Half-year\\_report\\_2012.pdf](http://www.wwindea.org/webimages/Half-year_report_2012.pdf) >. Acesso em 14 de outubro de 2012.
- [26] – REENERGY BRAZIL. **Brasil e Índia lideram crescimento da energia eólica**. Disponível em: <<http://www.renergybrasil.com.br/noticias/detalhes/brasil-e-india-lideram-crescimento-da-energia-eolica-diz-gwec>>. Acesso em 14 de outubro de 2012.

- [27] – BERMANN, C *et al.* **O Setor Elétrico Brasileiro e Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios.** Brasília: Rios Internacionais, 2012. 47 p. Disponível em: < <http://www.simposioenergia.com.br/images/O%20Setor%20eletrico%20Brasileiro%20e%20a%20Sustentabilidade%20no%20Sec%2021-Oportunidades%20e%20Desafios.pdf> >. Acesso em 15 de outubro de 2012.
- [28] – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2012: Aumenta a participação das renováveis na matriz elétrica brasileira.** Disponível em: < [http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120611\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120611_1.pdf) >. Acesso em 15 de outubro de 2012.
- [29] – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Matriz de Energia Elétrica.** Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>. Acesso em 21 de outubro de 2012.
- [30] – BRAZIL WINDPOWER 2012. **Sobre o Brazil Windpower.** Disponível em: < <http://www.brazilwindpower.org/pt/about.asp> >. Acesso em 21 de outubro de 2012.
- [31] – REATIVA NA REDE – ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Investimentos em Energia Eólica devem chegar a R\$ 40 bilhões até 2020.** Disponível em: < <http://reativanarede.blogspot.com.br/2012/09/investimentos-em-energia-eolica-devem.html>>. Acesso em 22 de outubro de 2012.
- [32] – EÓLICAS TRAIRI. **Brasil tem lugar de destaque no American Wind Power 2012.** Disponível em: < <http://eolicastrairi.com.br/2012/06/brasil-tem-lugar-de-destaque-no-american-wind-power-2012/>>. Acesso em 22 de outubro de 2012.
- [33] – AMBIENTE ENERGIA. **Energia Eólica e Inovação.** Disponível em: < <http://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2012/10/energia-eolica-e-inovacao/21080/>>. Acesso em 23 de outubro de 2012.
- [34] – REVISTA EÓLICA Y DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO. **The Way Forward for the Brazilian Wind Power Market.** Disponível em: < <http://www.evwind.es/2012/08/31/the-way-forward-for-the-brazilian-wind-power-market/22735/> >. Acesso em 23 de outubro de 2012.
- [35] – REATIVA NA REDE – ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** Disponível em: < <http://reativanarede.blogspot.com.br/2010/10/atlas-do-potencial-eolico-brasileiro.html>>. Acesso em 24 de outubro de 2012.
- [36] – MUNDO GEO. **Novo Mapa Eólico do Brasil deverá ser Lançado em um ano.** Disponível em: < <http://mundogeo.com/blog/2012/08/09/novo-mapa-eolico-do-brasil-dever-ser-lancado-em-um-ano/> >. Acesso em 24 de outubro de 2012.
- [37] – PROINFA. **O Proinfa.** Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/> >. Acesso em 25 de outubro de 2012.
- [38] – ELETROBRAS. **Programas.** Disponível em: < <http://www.eletrobras.gov.br/ELB/data/Pages/LUMISABB61D26ITEMID4CD80A9D8141489CAE9A9A81D0E177E0PTBRIE.htm>>. Acesso em 25 de outubro de 2012

- [39] – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Analysis of the Regulatory Framework for Wind Power Generation in Brazil**. Disponível em: < [http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/1Brazil\\_report\\_2011.pdf](http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/1Brazil_report_2011.pdf) >. Acesso em 25 de outubro de 2012.
- [40] – ALDABÓ, R. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber, 2002. p. 105 – 112
- [41] – CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009 280 p. 234 – 247.
- [42] – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics**. Disponível em: < <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kWes.pdf> >. Acesso em 28 de outubro de 2012.
- [43] – TERCIOTE, R. **A Energia Eólica e o Meio Ambiente**. 2002. 7 p. Trabalho de aluno - UNICAMP. Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Energia. Campinas, 2002.
- [44] – BROGI, A. D. M. *et al.* **Recursos Energéticos e Ambiente**. 2012. 41 p. Trabalho de alunos - Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2012.
- [45] – ENGENHARIA EM SOLUÇÕES. **Projetos de redução de emissões em aterros sanitários se multiplicam**. Disponível em: <<http://www.engenhariaemsolucoes.com.br/index.php/projetos-de-reducao-de-emissoes-em-aterros-sanitarios-se-multiplicam/> >. Acesso em 22 de novembro de 2012.
- [46] – BLOG DO JR BASTOS. **Capacidade instalada de energia eólica cresce 21% no mundo em 2011**. Disponível em: < <http://blogjrastos.blogspot.com.br/2012/02/capacidade-instalada-de-energia-eolica.html> >. Acesso em 01 de novembro de 2012.
- [47] – AVES DE RAPINA DO BRASIL. **As Aves de Rapina e as Usinas Eólicas**. Disponível em: < [http://www.avesderapinabrasil.com/materias/avesderapina\\_usinaseolicas.htm](http://www.avesderapinabrasil.com/materias/avesderapina_usinaseolicas.htm) >. Acesso em 1 de novembro de 2012.
- [48] – DESPOLÉMICO. **O Presente da energia eólica**. Disponível em: < [http://despolemico.blogspot.com.br/2010\\_09\\_01\\_archive.html](http://despolemico.blogspot.com.br/2010_09_01_archive.html) >. Acesso em 2 de novembro de 2012.
- [49] – CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009 280 p. 81 – 125.
- [50] – ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Componentes de um Aerogerador**. Disponível em: < <http://apenergiasrenovaveis.wordpress.com/eolica/componentes-de-um-aerogerador/> >. Acesso em 29 de novembro de 2012.
- [51] – CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009 280 p. 195 – 233.
- [52] – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Conexão de Centrais de Geração Eólica na Rede básica e nos Sistemas de Distribuição**. Disponível em: < <http://www.ieee.org.br/t->

dlamerica2010/T\_D\_2010\_Brasil\_paineis\_PDF/on%2008\_11/room%201/geracao/Andesa%20geracao%20eolica.pdf >. Acesso em 29 de novembro de 2012.

[53] – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Requisitos Técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão**. Submódulo 3.6. Brasília, 2010. 34 p. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo\\_3/Subm%C3%B3dulo%203.6\\_Rev\\_1.1.pdf](http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_3/Subm%C3%B3dulo%203.6_Rev_1.1.pdf)>. Acesso em 29 de novembro de 2012.

[54] – CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009 280 p. 248 – 258.

[55] – ELETROBRAS. **Crédito de Carbono de Cerro Chato**. Disponível em: <[http://www.eletrosul.gov.br/home/Usinas\\_Eolicas/credito\\_carbono\\_cerro\\_chato\\_dcp.pdf](http://www.eletrosul.gov.br/home/Usinas_Eolicas/credito_carbono_cerro_chato_dcp.pdf)>. Acesso em 01 de dezembro de 2012.

[56] – APOLINÁRIO, M. R. **Energia Eólica**. Mensagem recebida por <magda@eletrosul.gov.br> em 5 de novembro de 2012.

[57] – WOBLEN ENERCON WINDPOWER. **Modelo E-82**. Disponível em: <<http://www.wobben.com.br/aerogeradores/gerador-eolico-modelo-e-82/>>. Acesso em 2 de dezembro de 2012.

[58] – ZOT, W. D. **Matemática Financeira**. Porto Alegre, 2008 190 p. 141 – 153.

[59] – BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Resultado da Correção pela SELIC**. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPelaSelic.do?method=corrigirPelaSelic>>. Acesso em 05 de dezembro de 2012.

[60] – FARIAS, E. **Engenharia Econômica e Avaliações**. 2009. 20 p. Notas de aula – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

[61] – CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009 280 p. 259 – 272.

[62] – BEDIN, D. **Eólica Cerro Chato**. Mensagem recebida por <diogo.bedin@eletrosul.gov.br> em 5 de dezembro de 2012.

[63] – MELO, M. S. M. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos**. 2012. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ciências em Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2012.

[64] – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Energias Alternativas**. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Areas\\_de\\_Atuacao/Infraestrutura/Energias\\_Alternativas/index.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atuacao/Infraestrutura/Energias_Alternativas/index.html)>. Acesso em 8 de dezembro de 2012.

[65] – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações Técnicas**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=94&idPerfil=2>>. Acesso em 9 de dezembro de 2012.

[66] – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Proposição das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão da EOL Cerro Chato.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/adsp20112319.pdf>>. Acesso em 9 de dezembro de 2012.

[67] – WIKIPÉDIA. **Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica.** Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Taxa\\_de\\_Fiscaliza%C3%A7%C3%A3o\\_de\\_Servi%C3%A7os\\_de\\_Energia\\_El%C3%A9trica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Taxa_de_Fiscaliza%C3%A7%C3%A3o_de_Servi%C3%A7os_de_Energia_El%C3%A9trica)>. Acesso em 9 de dezembro de 2012.

[68] – ENERGI CONSULTORIA E GESTÃO DE PROCESSOS LTDA. **Aneel fixa valores da TFSEE para 2012.** Disponível em: <<http://www.energiconsultoria.com.br/aneel-fixa-valores-da-tfsee-para-2012>>. Acesso em 9 de dezembro de 2012.

[69] – FISCONET. **REIDI – Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura.** Disponível em: <<http://www.fisconet.com.br/user/materias/pis/reidi.htm>>. Acesso em 9 de dezembro de 2012.

[70] – MATTUELLA, J. M. L. **Fontes Energéticas Sustentáveis: Um estudo sobre a viabilidade do aproveitamento da energia eólica em três localidades, no RS.** 2005. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Engenharia Civil, Rio Grande do Sul, 2005.

## APÊNDICE - PROJEÇÃO DO FLUXO DE CAIXA DO PROJETO

ANÁLISE ECONÔMICA DE VIABILIDADE			
<b>CUSTO DE IMPLANTAÇÃO</b>			
Investimento Inicial [R\$]	450.000.000,00		
Potência Total [kW]	90.000		
Custo de Implantação [R\$/kW]	5.000,00		
Financiamento [50%]	R\$ 223.200.000,00		
<b>DESPESA ANUAL</b>		<b>RECEITA ANUAL</b>	
Custo operacional médio anual	1.233.180,00	Potência Instalada Total (MW)	90
Depreciação média anual	5.160.384,00	Fator de Capacidade	0,38
Impostos, Administrativo e Aluguéis (média anual)	1.878.228,00	horas/ano	8760
Custo de financiamento médio anual	10.700.208,00	R\$/MWh	144,11
<b>TOTAL</b>	<b>18.972.000,00</b>	<b>TOTAL</b>	<b>43.174.203,12</b>
ANÁLISE DCF (Discounted Cash Flow)			
<b>n</b>	<b>DESPESAS</b>	<b>RECEITAS</b>	<b>FLUXO</b>
0	226.800.000,00		-226.800.000,00
1	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
2	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
3	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
4	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
5	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
6	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
7	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
8	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
9	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
10	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
11	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
12	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
13	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
14	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
15	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
16	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
17	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
18	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
19	18.972.000,00	43.174.203,12	24.202.203,12
<b>TOTAL= R\$ 233.041.859,28</b>			
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <b>TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE</b>  TMA= 8,00% </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <b>VALOR PRESENTE LÍQUIDO</b>  VPL= R\$ 5.628.258,52 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <b>TAXA INTERNA DE RETORNO</b>  TIR = 8% </div>			