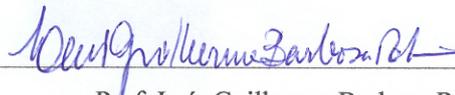


**MODELO DINÂMICO DE VISUALIZAÇÃO DE UM AEROGERADOR COM VELOCIDADE
DE ROTAÇÃO VARIÁVEL E CONTROLE DE PASSO EM VRML**

Bruno Eduardo Moreira Montezano

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:



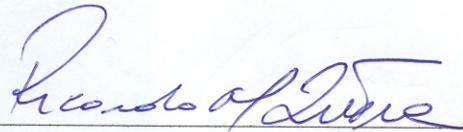
Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr-Ing.

(Orientador)



Prof. Antonio Lopes de Souza, Ph.D.

(Co-orientador)



Eng. Ricardo Marques Dutra, D.Sc.



Eng. Hamilton Moss de Souza, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2007

DEDICATÓRIA

Para minha companheira Tatiana Araújo pelo suporte e compreensão, aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, e especialmente ao meu Pai, Roberto Montezano, pela paciência e por acreditar no meu futuro, sempre investindo na minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas de faculdade, com os quais convivi em diversos períodos ao longo do curso.

Aos pesquisadores do CEPTEL, Antônio Leite e Vanessa Gonçalves, sempre dispostos a ajudar.

A equipe do CRESESB pelo apoio e principalmente ao pesquisador Ricardo Dutra que me guiou ao longo de todo o projeto compartilhando parte do seu conhecimento e sua sabedoria.

Ao meu Co-orientador, professor Antônio Lopes, pelo apoio e incentivo e ao meu Orientador, professor Luís Guilherme Rolim, pela sugestão do tema, apoio e compreensão.

RESUMO

O presente trabalho pretende apresentar um modelo dinâmico de visualização de um aerogerador com velocidade de rotação variável e controle de passo em Realidade Virtual utilizando a linguagem VRML (Virtual Reality Modeling Language).

A energia eólica tem se mostrado como uma alternativa viável para o fornecimento de energia, inserindo-se como uma importante fonte no mercado energético mundial.

Além de ser uma alternativa energética cada vez mais competitiva economicamente, um dos grandes incentivos para o uso dessa forma de energia está nos baixos impactos ambientais causados por ela.

No Brasil, chegou-se a 237 MW de potência eólica instalada. Um marco importante, porém muito aquém do potencial eólico estimado de 140 GW.

Um dos obstáculos à introdução de uma nova tecnologia é a falta de informação. A utilização de meios de comunicação para divulgação de informações sobre essas tecnologias é uma forma de propiciar a aceitação pela sociedade, além de estimular a formação de recursos humanos, indispensáveis ao desenvolvimento.

O uso de ambientes virtuais interativos é apontado como um meio de comunicação capaz de auxiliar a difusão e assimilação de assuntos complexos como a tecnologia de geração eólica.

Além de permitir ao aluno uma maior flexibilidade no aprendizado, o uso de ambientes interativos na educação rompe com o paradigma do ensino presencial, indo além dos limites físicos da sala de aula. Essa perspectiva permite o alcance de uma audiência muito mais ampla.

O objetivo desse trabalho é criar uma ferramenta de auxílio ao ensino e a difusão da tecnologia eólica, favorecendo indiretamente o desenvolvimento dessa energia.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA.....	3
2.1	História da Energia Eólica e Suas Utilizações.....	3
2.1.1	Desenvolvimento de Aero geradores no Século XX.....	7
2.1.2	A evolução comercial de turbinas eólicas de grande porte.....	15
2.1.3	A potência eólica instalada no mundo.....	16
2.1.4	Potencial eólico Brasileiro.....	18
2.2	O Vento.....	19
2.2.1	Mecanismos de Geração dos Ventos.....	20
2.2.2	Fatores que influenciam o regime dos ventos.....	21
2.3	O meio ambiente e a energia eólica.....	22
2.3.1	Emissão de gases.....	23
2.3.2	Emissão de ruído.....	24
2.3.3	Impacto visual.....	25
2.3.4	Impacto sobre a fauna.....	25
2.4	Energia e Potência extraída do vento.....	26
2.5	Tipos de Turbinas Eólicas para Geração de Energia Elétrica.....	32
2.5.1	Rotores de Eixo Vertical.....	32
2.5.2	Rotores de Eixo Horizontal.....	32
2.5.3	Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal.....	33
2.5.4	Mecanismo de Controle.....	39
2.6	Sistema Elétrico de um aerogerador e qualidade de energia.....	42
2.6.1	Aerogeradores com velocidade constante.....	42
2.6.2	Aerogeradores com velocidade variável.....	43
2.6.3	Qualidade da energia.....	44
2.7	Aplicações dos Sistemas Eólicos.....	46
2.7.1	Sistemas Isolados.....	46
2.7.2	Sistemas Híbridos.....	47
2.7.3	Sistemas Interligados à Rede.....	48
2.7.4	Sistemas Off-Shore.....	48
2.8	Considerações finais.....	49
3	REALIDADE VIRTUAL E EDUCAÇÃO.....	50
3.1	Interação na Educação.....	50
3.1.1	Educação a Distância e Educação Presencial.....	50
3.1.2	Educação Virtual Interativa – EVI.....	52
3.2	Realidade Virtual.....	55
3.2.1	Justificativas ao uso de Realidade Virtual na Educação.....	56

3.2.2	Modalidades de Interação em RV	57
3.3	Laboratórios Virtuais.....	59
3.3.1	Laboratórios Remotos	59
3.3.2	Laboratórios com Conteúdo Exclusivamente Virtual	59
3.3.3	Exemplos de Laboratórios Virtuais.....	60
3.4	Tecnologias e Interfaces para desenvolvimento de conteúdo de EVI através da internet.....	63
3.4.1	HTML	63
3.4.2	HTML DOM.....	64
3.4.3	VRML	64
3.4.4	JavaScript.....	66
3.4.5	External Authoring Interface (EAI)	67
3.5	Considerações Finais	69
4	MODELO DINÂMICO DO AEROGERADOR	71
4.1	Configuração do aerogerador.....	71
4.2	Especificações do aerogerador.....	72
4.3	Modelagem do aerogerador	72
4.3.1	Modelo dinâmico da turbina eólica	73
4.3.2	Modelo do conjunto rotor	74
4.3.3	Modelo do sistema de controle do aerogerador	75
4.4	Considerações Finais	81
5	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DO AEROGERADOR EM VRML ..	82
5.1	Controle de passo do modelo	82
5.2	Implementação do modelo em VRML.....	87
5.2.1	Modelagem da estrutura do aerogerador	88
5.2.2	Controle de tempo de animação	91
5.2.3	Gerador de sinais.....	92
5.2.4	Dinâmica e controle de velocidade de rotação.....	92
5.2.5	Controle de passo.....	96
5.2.6	Sistema de proteção	97
5.3	Interface do Modelo.....	98
5.4	Considerações finais	100
6	CONCLUSÕES.....	101
6.1	Recomendações	102
7	BIBLIOGRAFIAS	103
ANEXO – I.....	107
ANEXO – II	114
ANEXO – III	126

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 2.1 - Um moinho de vento persa ainda em funcionamento na cidade de Neh (a) a pedra do moinho está abaixo do rotor e as velas estão fixadas nas palhetas, (b) vista geral da parede sul do moinho, (c) vista ampliada das velas da palheta (Fonte: SHEPHERD, 1994).....	4
Figura 2.2 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do Século XI ao Século XIX (fonte: DUTRA, 2001)	5
Figura 2.3 - Detalhes da complexidade de um moinho de vento holandês (Fonte: DIVONE,1994 e NREL,1996)	6
Figura 2.4 - Exemplo de um cata-vento de múltiplas pás instalado no Kenia. (fonte: NEW ENERGY, 1999)	7
Figura 2.5 - Vista frontal (a) e vista interna (a) da turbina eólica de Brush. Primeira planta de geração eólica operada entre 1888 a 1908 na cidade de Cleveland – Ohio. (Fonte: SPERA,1994)	8
Figura 2.6 - Turbina Eólica Balaclava 1931 (Fonte: SHEPHERD, 1994)	9
Figura 2.7 - Turbina eólica <i>Smith-Putnam</i> (1941): Primeira planta eólica de classe MW (Fonte: SHEPHERD, 1994)	10
Figura 2.8 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX (Fonte: Dutra, 2001)	10
Figura 2.9 - Turbina eólica da Ilha de Gedser com 200 kW	11
Figura 2.10 - Turbina eólica de eixo vertical de 34m de diâmetro projetada e instalada pelo SANDIA para testes na cidade Bushland, Texas (Fonte: SANDIA, 2000).....	14
Figura 2.11 - Turbina eólica Mod-5B instalada na Ilha de Oahu – Hawaii em 1987 no projeto de cooperação DOE/NASA (Fonte: NREL, 1996).....	15
Figura 2.12 - Evolução do tamanho dos aerogeradores comerciais. (Fonte: DEWI, 2006)	16
Figura 2.13 - Distribuição da Velocidade Média Anual no Território Brasileiro. (Fonte: CEPEL, 2001).....	19
Figura 2.14 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar. (Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998).....	20
Figura 2.15 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno (Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998).	22
Figura 2.16 - Estimativa de mortes anuais de pássaros nos Países Baixos (Fonte: EWEA, 1998c)	26
Figura 2.17 - Fluxo de ar através de uma área transversal A (Fonte: GASCH; TWELE, 2002)	27
Figura 2.18 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás. (Fonte: GASCH; TWELE, 2002)	27
Figura 2.19 - Distribuição de C_p em função de v_3/v_1 (Fonte: Dutra, 2007).....	29
Figura 2.20 - Principais forças atuantes em uma pá de turbina elétrica.	30
Figura 2.21 - Característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função das equações (2.14) e (2.15).	31
Figura 2.22 - Turbina experimental de eixo vertical (Fonte: SANDIA, 2006)	32

Figura 2.23 - Turbina de eixo horizontal.....	33
Figura 2.24 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal (Fonte: DUTRA, 2007).....	34
Figura 2.25 - Vista do interior da nacele de uma turbina eólica utilizando um gerador convencional (Fonte: VESTAS, 2006).....	35
Figura 2.26 - Vista do interior da nacele de uma turbina eólica utilizando um gerador multi-polos (Fonte: ENERCON, 2006).....	36
Figura 2.27 - Um pátio com diversos modelos de pás e detalhe de um cubo.....	36
Figura 2.28 - Gerador conectado a caixa de engrenagens (vista a direita).....	37
Figura 2.29 - Gerador convencional (Fonte: ENERCON, 2007).....	38
Figura 2.30 - Gerador multipolos (Fonte: ENERCON, 2007).....	38
Figura 2.31 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil (Fonte: CRESESB, 2007).....	40
Figura 2.32 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle tipo estol (Fonte: DEWI, 2007)....	41
Figura 2.33 - Fluxo aderente ao perfil (Fonte: CRESESB, 2007).....	41
Figura 2.34 - Forma típica de uma curva de potência de um aerogerador com controle de passo (Fonte: DEWI, 2007).....	42
Figura 2.35 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante (DEWI, 2005).....	43
Figura 2.36 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável que usa uma conversora de frequência para o controle da frequência da geração elétrica (DEWI, 2005).....	43
Figura 2.37 - Considerações sobre o tamanho das turbinas eólicas e suas principais aplicações (Fonte: NREL, 2006).....	46
Figura 2.38 - Configuração de um sistema eólico isolado (Fonte: CRESESB, 2000).....	47
Figura 2.39 - Configuração de um sistema híbrido solar-eolico-diesel (Fonte: CRESESB, 2000).....	47
Figura 2.40 - Parque eólico conectado à rede – Parque Eólico da Prainha - CE.....	48
Figura 2.41 - Parque eólico instalado no mar do norte (Fonte: BRITSC, 2005).....	49
Figura 3.1 - Simulação do funcionamento de um conversor do tipo Buck (Fonte: KOLAR, 2007).....	60
Figura 3.2 - Lei de Faraday por VRML Gallery of Eletromagnetism (Fonte: SALGADO, 2007).....	61
Figura 3.3 - Página WEB do Programa AVIT - Página Inicial (Fonte: CARDOSO e TORI, 2002).....	62
Figura 3.4 - Interface da Visita Virtual a Casa Solar Eficiente do CEPEL. (Fonte: CRESESB, 2007).....	63
Figura 4.1 - Esquema do aerogerador escolhido (Fonte: PAVINATTO, 2005).....	71
Figura 4.2 - Curva característica de potência (Fonte: ENERCON, 2007).....	72
Figura 4.3 - Modelo de duas massas equivalentes, usado na modelagem do conjunto rotor do aerogerador (Fonte: PAVINATTO, 2005).....	74
Figura 4.4 - Modelo equivalente mecânico simplificado do conjunto rotor (Fonte: PAVINATTO, 2005)...	75
Figura 4.5 - Esquema elétrico simplificado do aerogerador (Fonte: PAVINATTO, 2005).....	77
Figura 4.6 - Curva característica de potência (Fonte: ENERCON, 2007).....	127

Figura 5.1 - Técnica básica de controle de passo (Fonte: DEWI, 2004).....	82
Figura 5.2 - Curva característica de potência (Fonte: ENERCON, 2007).....	83
Figura 5.3 - Curva $c_p(\lambda, \beta)$ de controle de passo obtida a partir de dados do aerogerador e das equações (2.12), (4.2) e (2.15).	84
Figura 5.4 - Primeira parte da função utilizada no MAPLE.....	84
Figura 5.5 - Segunda parte da função utilizada no MAPLE.....	85
Figura 5.6 - Curva de potência elétrica [KW] em função da velocidade do vento [m/s].....	86
Figura 5.7 - Curva de torque eletromagnético [kN.m] em função da velocidade de rotação do rotor [rpm] .	87
Figura 5.8 - Diagrama de Blocos do controle do aerogerador implementado em VRML	88
Figura 5.9 - Passos para modelagem de objetos complexos no <i>3D Max Studio</i> usando a função editPoly (Fonte: ROGER, 2007).....	89
Figura 5.10 - Efeito de torção (Fonte: DEWI, 2004), perfil de pá (Fonte: ENERCON, 2007) e vista da nacele do modelo E-70 da ENERCON (Fonte: DEWI, 2004).....	90
Figura 5.11 - Aerogerador modelo no <i>CosmoWorlds</i>	90
Figura 5.12 - Interface do modelo dinâmico de visualização do aerogerador.....	100

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho se propõe a desenvolver um modelo dinâmico de visualização de um aerogerador com velocidade de rotação variável e controle de passo em Realidade Virtual. A escolha do tema se deve ao destaque que a energia eólica vem ganhando recentemente no mundo e a dificuldade de obtenção de informação sobre a tecnologia de geração eólica.

A energia eólica tem se mostrado como uma alternativa viável para o fornecimento de energia, se inserindo como uma importante fonte no mercado energético mundial. Além de ser uma alternativa energética cada vez mais competitiva economicamente, um dos grandes incentivos para o uso dessa forma de energia está nos baixos impactos ambientais causados por ela.

No Brasil, chegou-se a 237 MW de potência eólica instalada. Um marco importante, porém muito aquém do potencial eólico estimado de 140 GW.

Um dos obstáculos à introdução de uma nova tecnologia é a falta de informação. A utilização de meios de comunicação para divulgação de informações sobre essas tecnologias é uma forma de propiciar a aceitação pela sociedade, além de estimular a formação de recursos humanos, indispensáveis ao desenvolvimento.

Ambientes virtuais interativos são apontados como um meio de comunicação capaz de auxiliar a difusão e assimilação de assuntos complexos como a tecnologia de geração eólica.

Além de permitir ao aluno uma maior flexibilidade no aprendizado, o uso de ambientes interativos na educação rompe com o paradigma do ensino presencial, indo além dos limites físicos da sala de aula. Essa perspectiva permite o alcance de uma audiência muito mais ampla. Dentro dessas ferramentas destaca-se a Realidade Virtual (RV).

A simulação em RV permite apresentar temas complexos como a geração eólica de uma forma sintética, permitindo visualizar o funcionamento de um aerogerador em tempo real. E o referencial tridimensional se identifica bastante com a experiência vivenciada em um ambiente real, tornando o ambiente mais intuitivo e familiar.

O tema proposto então é escolhido tendo em vista a complexidade da tecnologia de geração eólica e considerando seu potencial de desenvolvimento no Brasil, com o objetivo criar uma ferramenta de auxílio ao ensino e a difusão dessa tecnologia.

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos básicos da energia eólica. Começa com um breve histórico de sua evolução até a presente situação no Brasil e no mundo, seguido dos mecanismos de geração dos ventos e os impactos ambientais dessa fonte de energia. Por fim apresenta o mecanismo de conversão eletromecânica da energia do vento, a configuração de um aerogerador e suas aplicações.

No Capítulo 3, são discutidos os paradigmas da educação e o uso de ambientes multimídias interativos como ferramentas de auxílio ao aprendizado. Depois são apresentadas as perspectivas do uso da realidade virtual na educação e plataformas para o desenvolvimento de ambientes virtuais interativos.

O Capítulo 4 apresenta a tecnologia do aerogerador utilizado e os modelos matemáticos para a simulação do comportamento dinâmico do aerogerador operando conectado à rede elétrica.

No Capítulo 5 discute a implementação do modelo proposto no Capítulo 4, com ajuste dos dados do modelo do aerogerador fornecido pelo fabricante as técnicas básicas de controle extração de potência tipo *pitch* (passo) conhecidas, sendo posteriormente implementado em VRML.

Por fim, no Capítulo 6 realiza o fechamento desse trabalho, apresentando as conclusões e recomendações.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica tem-se mostrado como uma alternativa viável para o fornecimento de energia, se inserindo como uma importante fonte no mercado energético mundial. Historicamente, a energia eólica tem ajudado o homem em diversas atividades, já desde épocas remotas, com a utilização de máquinas simples e rústicas para o bombeamento de água e moagem de grãos.

Nos últimos vinte anos, a indústria eólica mundial cresceu significativamente no amadurecimento de suas tecnologias e também na procura de novos mercados. A partir de iniciativas políticas, diversos países como a Alemanha, Estados Unidos, Dinamarca e Espanha alcançaram um importante destaque na energia eólica mundial. No final de 2006, existiam mais de 70 GW de potência instalada no mundo.

Além de ser uma alternativa energética cada vez mais competitiva economicamente, um dos grandes incentivos para o uso dessa forma de energia está nos baixos impactos ambientais causados por ela.

Este capítulo apresenta os fundamentos básicos da energia eólica. Começa com um breve histórico de sua evolução até a presente situação no Brasil e no mundo, seguido dos mecanismos de geração dos ventos e os impactos ambientais dessa fonte de energia. Por fim apresenta o mecanismo de conversão eletromecânica da energia do vento, a configuração de um aerogerador e suas aplicações.

2.1 História da Energia Eólica e Suas Utilizações

À medida que a agricultura avançava novas ferramentas eram criadas com o intuito de auxiliar as diversas etapas do trabalho. Atividades como a moagem de grãos e o bombeamento de água exigiam cada vez mais trabalho humano e animal, fator que restringia o desenvolvimento agrícola. Isso conduziu ao desenvolvimento de uma forma primitiva de moinho de vento, utilizada no beneficiamento de produtos agrícolas, que consistia de um eixo vertical acionado por uma longa haste presa a ela, movida pela força de homens ou animais caminhando numa trajetória circular. Houve também outra tecnologia onde uma gaiola cilíndrica era conectada a um eixo horizontal e a força motriz (homens ou animais) caminhava no seu interior, utilizada no beneficiamento agrícola (DUTRA, 2001).

Tal sistema foi aperfeiçoado com a utilização de cursos d'água como força motriz, que ficou conhecido como roda d'água. Historicamente, o uso das rodas d'água precede a utilização dos moinhos de ventos devido a sua concepção mais simplista de utilização de cursos naturais de rios como força motriz. Como não havia disponibilidade de rios em todos os lugares para o aproveitamento em rodas d'água, a percepção do vento como fonte natural de energia permitiu o surgimento de moinhos de ventos substituindo a força motriz humana ou animal em atividades agrícolas. (DUTRA, 2001)

É datado por volta de 200 A.C, o primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos na Pérsia. Tratava-se de um cata-vento de eixo vertical como mostrado na figura 2.1. Esse tipo de moinho de eixo vertical difundiu-se pela região islâmica sendo utilizado por diversos séculos. Existem indícios que levam a crer que antes da invenção dos cata-ventos na Pérsia, a China (2000 A.C.) e o Império Babilônico (1700 A.C.) também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação (CHESF-BRASCEP, 1987). (SHEPHERD, 1994)

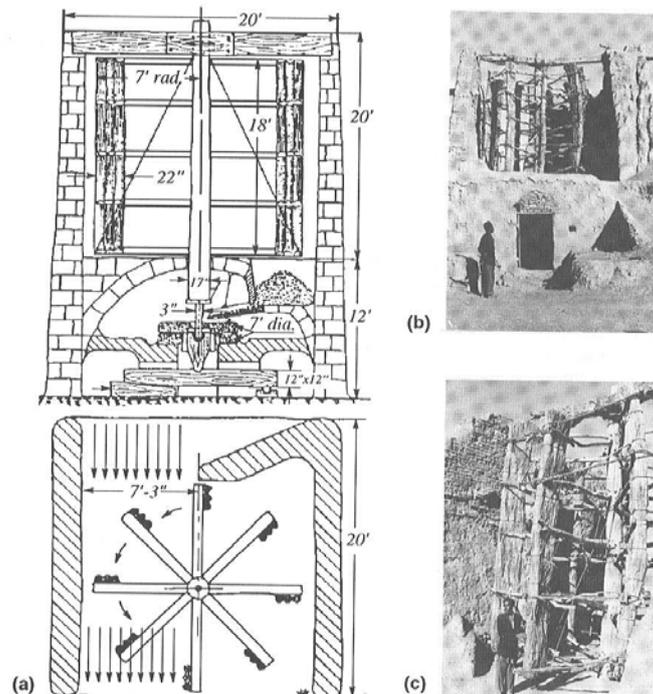


Figura 2.1 - Um moinho de vento persa ainda em funcionamento na cidade de Neh

(a) a pedra do moinho está abaixo do rotor e as velas estão fixadas nas palhetas, (b) vista geral da parede sul do moinho, (c) vista ampliada das velas da palheta (Fonte: SHEPHERD, 1994)

Apesar da baixa eficiência devido a suas características, os cata-ventos primitivos apresentavam vantagens importantes para o desenvolvimento das necessidades básicas de bombeamento d'água ou moagem de grãos, substituindo a força motriz humana e animal. É pouco conhecido o desenvolvimento e uso dos cata-ventos primitivos da China e Oriente Médio como também dos cata-ventos surgidos no Mediterrâneo, porém um importante desenvolvimento da tecnologia primitiva foram os primeiros modelos a utilizarem velas de sustentação em eixo horizontal encontrados nas ilhas gregas do Mediterrâneo.

Como o mais importante mecanismo gerador de força motriz, além das rodas d'água, moinhos de vento de eixo horizontal movidos por forças de sustentação (o tipo "Post-Mill" é o mais antigo) se espalharam pela Europa, principalmente, no retorno das Cruzadas há 900 anos. Os cata-ventos foram largamente utilizados e seu desenvolvimento bem documentado. (GASCH; TWELE, 2002) As máquinas primitivas persistiram até o século XII quando começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda, entre outros países. Os moinhos de vento de eixo horizontal do tipo "holandês"

foram rapidamente disseminados em vários países da Europa. Durante a Idade Média, na Europa, a maioria das leis feudais incluía o direito de recusar a permissão à construção de moinhos de vento pelos camponeses, o que os obrigava a usar os moinhos dos senhores feudais para a moagem dos seus grãos. Dentro das leis de concessão de moinhos também se estabeleceram leis que proibiam o plantio de árvores próximas ao moinho assegurando, assim, o “direito ao vento”. Os moinhos de vento na Europa tiveram, sem dúvida, uma forte e decisiva influência na economia agrícola por vários séculos. Com o desenvolvimento tecnológico das pás, sistema de controle, eixos etc., o uso dos moinhos de vento propiciou a otimização de várias atividades utilizando-se a força motriz do vento. (DUTRA, 2001)

Na Holanda, no início do XV, havia um forte interesse econômico no aumento de seu território com a drenagem terras cobertas pelas águas (os chamados “polders”), desenvolvendo uma nova aplicação para os cata-ventos, além da tradicional moagem de grãos. Durante os séculos XVII a XIX, o uso de moinhos de vento em grande escala esteve relacionado amplamente com a drenagem de terras cobertas pelas águas. (GASCH; TWELE, 2002) A área de Beemster Polder, que ficava três metros abaixo do nível do mar, foi drenada por 26 moinhos de vento de até 50 HP cada, entre os anos de 1608 e 1612. Mais tarde, a região de Schermer Polder também foi drenada por 36 moinhos de vento durante quatro anos, a uma vazão total de 1000 m³/min. (SHEPHERD, 1994) O primeiro moinho de vento utilizado para a produção de óleos vegetais foi construído em 1582. Com o surgimento da imprensa e o rápido crescimento da demanda por papel, foi construído, em 1586, o primeiro moinho de vento para fabricação de papel. Ao fim do século XVI, surgiram moinhos de vento para acionar serrarias para processar madeiras provenientes do Mar Báltico. Em meados do século XIX, aproximadamente 9000 moinhos de vento existiam em pleno funcionamento na Holanda. (CHESF-BRASCEP, 1987) O número de moinhos de vento na Europa nesse período mostra a importância do seu uso em diversos países como a Bélgica (3000 moinhos de vento), Inglaterra (10000 moinhos de vento) e França (650 moinhos de vento na região de Anjou). (CHESF-BRASCEP, 1987)



Figura 2.2 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do Século XI ao Século XIX (fonte: DUTRA, 2001)

Um marco importante para a energia eólica na Europa, principalmente na Holanda, foi a Revolução Industrial do final do Século XIX. Com o surgimento da máquina a vapor, iniciou-se o declínio da energia eólica na Holanda. Já no início do século XX, existiam apenas 2500 moinhos de ventos em operação, caindo para menos de 1000 no ano de 1960. (CHESF-BRASCEP, 1987) Preocupados com a extinção dos moinhos de vento pelo novo conceito imposto pela Revolução Industrial, foi criada, em 1923, uma sociedade holandesa para conservação, melhoria de desempenho e utilização mais efetiva dos moinhos holandeses.

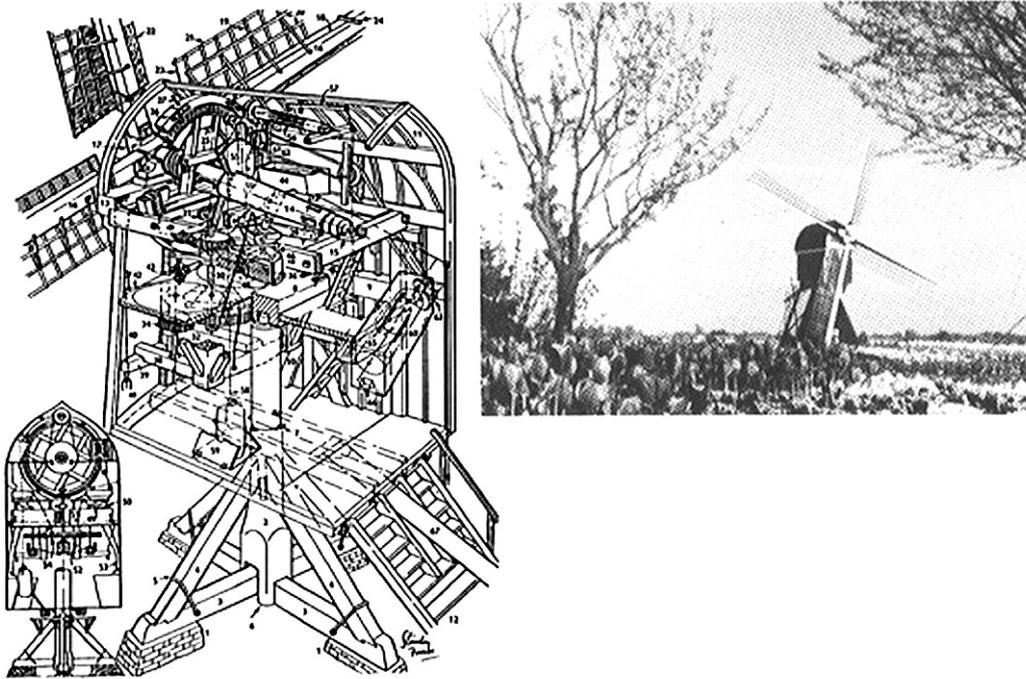


Figura 2.3 - Detalhes da complexidade de um moinho de vento holandês

(Fonte: DIVONE,1994 e NREL,1996)

A utilização de cata-ventos de múltiplas pás destinados ao bombeamento d'água desenvolveu-se de forma efetiva, em diversos países, principalmente nas suas áreas rurais. Acredita-se que desde a segunda metade do século XIX mais de 6 milhões de cata-ventos já teriam sido fabricados e instalados somente nos Estados Unidos para o bombeamento d'água em sedes de fazendas isoladas e para abastecimento de bebedouros para o gado em pastagens extensas (CHESF-BRASCEP, 1987). Os cata-ventos de múltiplas pás foram usados também em outras regiões como a Austrália, Rússia, África e América Latina. O sistema se adaptou muito bem às condições rurais tendo em vista suas características de fácil operação e manutenção. Toda a estrutura era feita de metal e o sistema de bombeamento era feito por meio de bombas e pistões favorecidos pelo alto torque fornecido pela grande número de pás. Até hoje esse sistema é largamente usado em várias partes do mundo para bombeamento d'água.

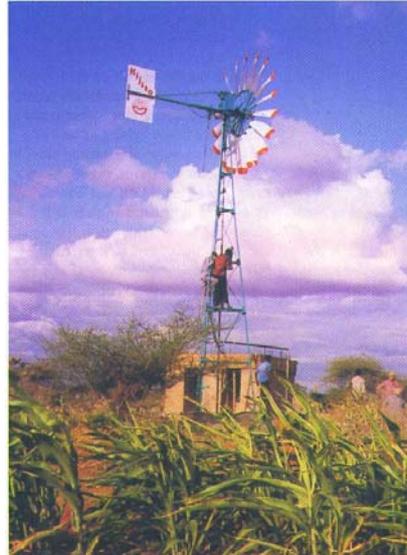


Figura 2.4 - Exemplo de um cata-vento de múltiplas pás instalado no Kenia. (fonte: NEW ENERGY, 1999)

2.1.1 Desenvolvimento de Aerogeradores no Século XX

O início do Século XX foi marcado por profundas transformações tecnológicas. A eletricidade como forma de transformação, transporte e utilização de energia alterou os padrões de consumo e a demanda de energia das populações por ela atingidas, principalmente nos meios urbanos. Com o avanço da rede elétrica, foram feitas, também no início do século XX, diversas pesquisas para o aproveitamento da energia eólica em geração de grandes blocos de energia. Enquanto os Estados Unidos difundiam o uso de aerogeradores de pequeno porte nas fazendas e residências rurais isoladas, a Rússia investia na conexão de aerogeradores de médio e grande porte diretamente na rede. (DUTRA, 2001)

A adaptação dos cata-ventos para a geração de energia elétrica teve início no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Brunch, um industrial voltado para eletrificação rural, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro cata-vento destinado a geração de energia elétrica. O sistema era composto por um cata-vento que fornecia 12 kW em corrente contínua para o carregamento de baterias que eram destinadas, sobretudo, ao fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes (SHEPHERD, 1994). Bruch utilizou-se da configuração de um moinho para seu invento. A roda principal, com 144 pás, tinha 17 m de diâmetro em uma torre de 18 m de altura. O sistema todo era sustentado por um tubo metálico central de 36 cm que permitia o giro de todo o sistema acompanhando, assim, o vento predominante. Esse sistema operou por 20 anos sendo desativado em 1908. O cata-vento de Brunch foi sem dúvida um marco na utilização dos cata-ventos para geração de energia elétrica.

O invento de Bruch trazia três inovações importantes para o desenvolvimento do uso da energia eólica para geração de energia elétrica. A primeira inovação era a altura utilizada pelo invento estar dentro das categorias dos moinhos de ventos utilizados para a moagem de grãos e o bombeamento d'água. Em

segundo lugar, foi introduzido um mecanismo de grande fator de multiplicação da rotação das pás (50:1) que funcionava em dois estágios possibilitando um máximo aproveitamento do dínamo cujo funcionamento estava em 500 rpm. Por último, esse invento foi a primeira e mais ambiciosa tentativa de se combinar a aerodinâmica e a estrutura dos moinhos de vento com as recentes inovações tecnológicas na produção de energia elétrica. (DUTRA, 2001)

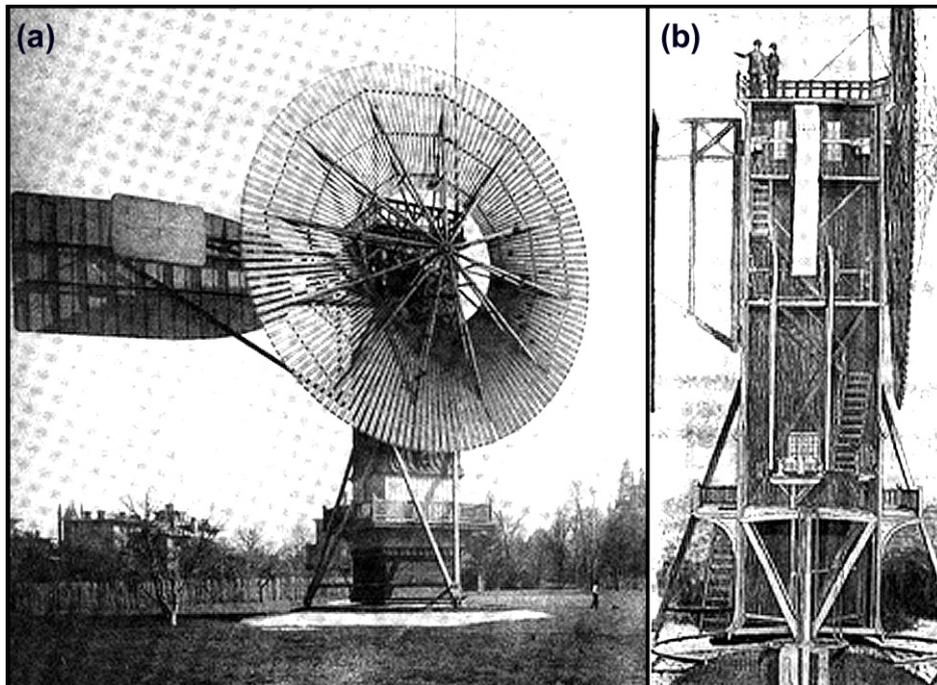


Figura 2.5 - Vista frontal (a) e vista interna (a) da turbina eólica de Brush. Primeira planta de geração eólica operada entre 1888 a 1908 na cidade de Cleveland – Ohio. (Fonte: SPERA,1994)

A Rússia dava início em 1931 ao desenvolvimento de turbinas eólicas de grande porte para aplicações elétricas. O aerogerador *Balaclava* (assim chamado) era um modelo avançado de 100 kW conectado por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km a uma usina termelétrica de 20 MW. Essa foi a primeira tentativa bem sucedida de se conectar um aerogerador de corrente alternada com uma usina termelétrica (SHEPHERD, 1994). A energia medida foi de 280.000 kWh.ano, o que significa um fator médio de utilização de 32%. O gerador e o sistema de controle ficavam no alto da torre de 30 m de altura, e a rotação era controlada pela variação do ângulo de passo das pás. O controle da posição era feito através de uma estrutura apoiada sobre um vagão em uma pista circular de trilhos. (CHESF-BRASCEP, 1987) (SHEPHERD, 1994)



Figura 2.6 - Turbina Eólica Balaclava 1931 (Fonte: SHEPHERD, 1994)

Outros modelos mais ambiciosos de 1 MW e 5 MW foram projetados posteriormente ao *Balaclava*. Aparentemente tais projetos não foram concluídos devido à forte concorrência de outras tecnologias. As grandes reservas de petróleo e a economia de escala do processamento de combustíveis e da fabricação dos motores de combustão interna (ciclo Otto e Diesel) tornaram o petróleo a força motriz mais poderosa com custos acessíveis. O uso da energia elétrica, de certa forma, também se propagou em direção aos grandes centros consumidores. Através de sistemas de distribuição centralizada, aproveitaram-se diversas formas de geração como a energia hidráulica de grandes cursos d'água, máquina a vapor ou grandes motores a combustão interna na geração de energia elétrica. Com o surgimento de novas reservas, as tecnologias de combustíveis fósseis tornavam-se mais competitivas economicamente contribuindo para o abandono de projetos ambiciosos de aerogeradores de grande porte. (DUTRA, 2001)

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte com empenho de vários países em economizar combustíveis fósseis. Os Estados Unidos desenvolveram um projeto de construção do maior até então projetado. O modelo de aerogerador *Smith-Putnam* apresentava 53,3 m de diâmetro, uma torre de 33,5 m de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. A geração elétrica era feita com um gerador síncrono de 1250 kW com rotação constante de 28 rpm, que funcionava em corrente alternada, conectado diretamente à rede elétrica local. (SHEPHERD, 1994) Esse aerogerador operou continuamente de outubro de 1941 até março de 1945, em uma colina em Vermont chamada Grandpa's Knob, quando uma de suas pás metálicas quebrou por fadiga (SHEPHERD, 1994) (EWEA, 1998a).

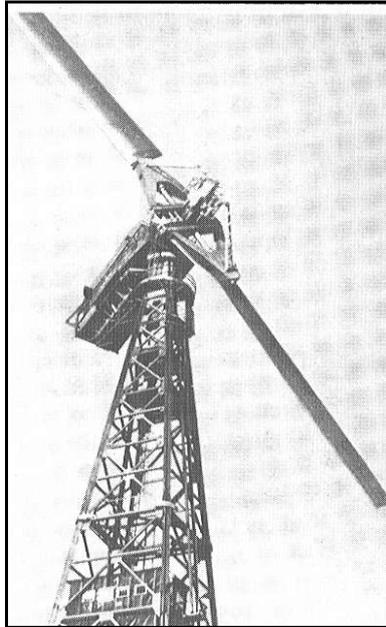


Figura 2.7 - Turbina eólica *Smith-Putnam* (1941): Primeira planta eólica de classe MW (Fonte: SHEPHERD, 1994)

No final da Segunda Guerra, o fornecimento de combustíveis fósseis se regularizou novamente com abundância de recursos em todo o mundo. Um estudo econômico na época veio a mostrar que aquele aerogerador não era mais competitivo, levando ao abandono do projeto. Esse projeto pioneiro na organização de uma parceria entre a indústria e a universidade com objetivo de pesquisar e desenvolver novas tecnologias para a geração de energia elétrica através dos ventos trouxe o maior número de inovações tecnológicas até então posto em operação (DUTRA, 2001).

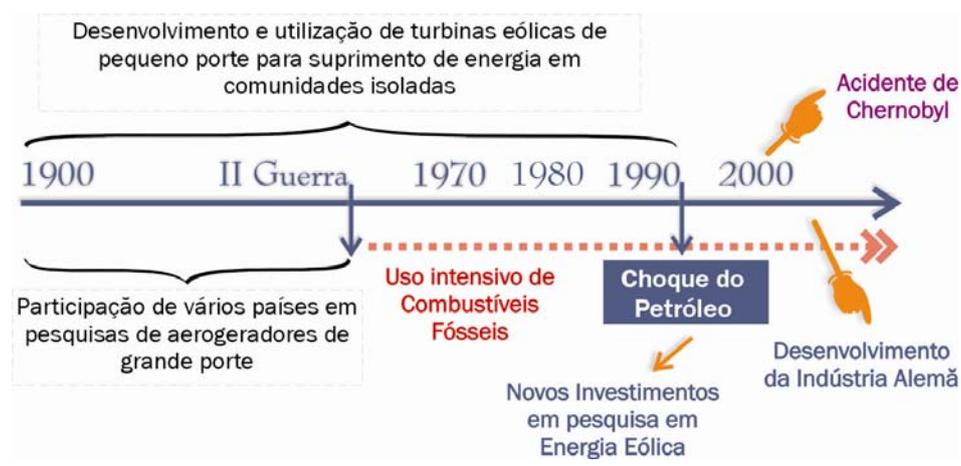


Figura 2.8 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX (Fonte: Dutra, 2001)

Nesse cenário pós Segunda Guerra Mundial, a geração de energia elétrica a partir do petróleo e grandes usinas hidrelétricas tornaram-se muito mais competitivas economicamente, e os aerogeradores ficaram restritos somente a projetos de pesquisa, utilizando e aprimorando técnicas aeronáuticas na operação e desenvolvimento de pás e aperfeiçoamento além de aperfeiçoamentos no sistema de geração. A Inglaterra, durante a década de 50, promoveu um grande estudo anemométrico em 100 localidades das Ilhas Britânicas culminando, em 1955, com a instalação de um aerogerador experimental de 100 kW em Cape Cost, Ilhas Orkney (CHESF BRASCEP, 1987) (DIVONE, 1994). Nesse mesmo período, desenvolveu-se um raro modelo de aerogerador de 100 kW com as pás ocas e com a turbina e gerador na base da torre. Ambos os modelos desenvolvidos na Inglaterra foram abandonados por problemas operacionais e principalmente por desinteresse econômico (DUTRA, 2001).

No início da Segunda Guerra Mundial, a Dinamarca se destacava como um dos mais significativos crescimentos em energia eólica de toda Europa. Um grupo de cientistas dinamarqueses sob a direção de Poul LaCour e Johannes Jull liderava esses avanços (DIVONE, 1994). Motivada pela pobreza em fontes energéticas naturais, a Dinamarca apostava na utilização da energia eólica no período entre guerras mundiais quando o consumo de óleos combustíveis era racionado. A companhia F.L Smidth (F.L.S.) foi pioneira no desenvolvimento de uma série de aerogeradores de pequeno porte na faixa de 45 kW durante a Segunda Guerra Mundial. Nesse período, a energia eólica produzida na Dinamarca era cerca de 4 milhões de kWh anuais demonstrando a grande utilização dessas turbinas em todo país. A consolidação da tecnologia de aerogeradores de pequeno porte da F.L.S., que ainda operavam em corrente contínua, possibilitou um projeto de grande porte ainda mais ambicioso. Projetado por Johannes Jull, um aerogerador de 200 kW com 24 m de diâmetro de rotor foi instalado nos anos de 1956 e 1957 na Ilha de Gedser. O aerogerador apresentava três pás e era sustentado por uma torre de concreto. O sistema forneceu energia em corrente alternada para a companhia elétrica Sydøstsjælland's Elektricitets Aktieselskab (SEAS), no período entre 1958 até 1967, quando o fator de capacidade atingiu a meta de 20% em alguns anos de operação. (DIVONE, 1994) (EWEA, 1998a)

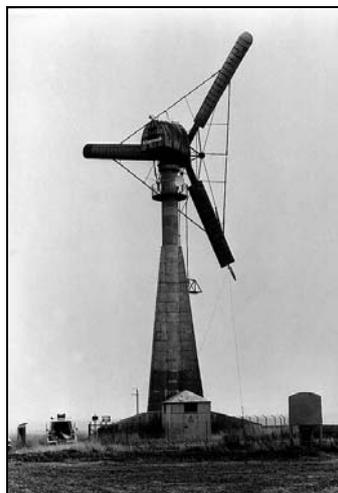


Figura 2.9 - Turbina eólica da Ilha de Gedser com 200 kW e 34 m de diâmetro após sua reforma em 1977 (Fonte: www.windpower.dk)

Na França houve também diversas iniciativas em pesquisas de aerogeradores conectados à rede elétrica. Entre 1958 e 1966 foram construídos diversos aerogeradores de grande porte. Entre os principais estavam três aerogeradores de eixo horizontal e três pás. Um dos modelos apresentava 30 metros de diâmetro de pá com potência de 800 kW a vento de 16,5 m/s. Esse modelo esteve em operação, conectado a rede Eletricité de France (EDF), nos anos de 1958 e 1963 (CHESF-BRASCEP, 1987) (DIVONE, 1994). O sistema elétrico funcionou em estado satisfatório, porém houve defeitos em diversos componentes mecânicos. O mais importante desse projeto foi, sem dúvida, o bom funcionamento interligado à rede elétrica de corrente contínua. O segundo aerogerador apresentava 21 metros de diâmetro e operava com uma potência de 132 kW a vento de 13,5 m/s. Esse aerogerador foi instalado próximo ao canal inglês de Saint-Remy-des-Landes, onde operou com sucesso durante três anos, com um total 60 dias em manutenção por problemas diversos (CHESF-BRASCEP, 1987) (DIVONE, 1994). O terceiro aerogerador operou por apenas sete meses entre 1963 e 1964. O aerogerador operava com potência de 1085 kW a vento de 16,5 m/s, apresentava três pás com um rotor de 35 m. Esses três protótipos demonstram claramente a possibilidade de se interconectar aerogeradores na rede de distribuição de energia elétrica. (DIVONE, 1994)

Durante o período entre 1955 e 1968, a Alemanha construiu e operou um aerogerador com o maior número de inovações tecnológicas na época. Os avanços tecnológicos desse modelo persistem até hoje na concepção dos modelos atuais mostrando o seu sucesso de operação. Tratava-se de um aerogerador de 34 metros de diâmetro operando com potência de 100 kW, a vento de 8 m/s (DIVONE, 1994). O aerogerador possuía rotor leve em materiais compostos, duas pás a jusante da torre, sistema de orientação amortecida por rotores laterais e torre de tubos estaiada; operou por mais de 4.000 horas entre 1957 e 1968. As pás, por serem feitas de materiais compostos, aliviaram os esforços em rolamentos diminuindo assim os problemas de fadiga. Essa inovação mostrou ser muito mais eficiente comparada aos modelos até então feitos de metais. Em 1968, quando o modelo foi desmontado e o projeto encerrado por falta de verba, as pás do aerogerador apresentavam perfeitas condições de uso (CHESF-BRASCEP, 1987) (DIVONE, 1994).

A crise do petróleo na década de setenta foi o fator culminante para retomada de investimentos em energia eólica. Todos os projetos anteriores haviam sido desativados devido aos baixos preços do petróleo e à expansão da rede de energia elétrica gerada em usinas hidrelétricas e termelétricas. Dentre as novas tecnologias, destacava-se a energia nuclear com a promessa de vir se tornar uma fonte segura e barata de geração de energia elétrica. Nesse cenário, o projeto de aerogeradores ficava restrito somente a estudos acadêmicos sem nenhum grande interesse comercial. (DUTRA, 2001)

Em outubro de 1973, a economia mundial é fortemente abalada pelo choque das altas sucessivas do preço do petróleo. O primeiro aumento do petróleo eleva o preço do barril de US\$ 1,77 em 1972, para US\$ 11,65 em novembro de 1973. Depois de cinco anos de relativa estabilidade, um novo choque eleva o preço de referência do barril de petróleo para valores superiores a US\$ 35,00/bl no decorrer do quarto trimestre de 1979. Todos os países importadores pertencentes à OCDE reagiram com rapidez à elevação dos preços. A Agência Internacional de Energia (AIE), criada em 1974, diante desse problema, propõe para os países

membros da OCDE diretivas para a redução da parte do petróleo da OPEP em seus abastecimentos energéticos. Nas diretivas propostas, três são os objetivos gerais: (MARTIN, 1992)

- Diversificar as fontes de importação de petróleo;
- Substituir o petróleo por outras fontes de energia;
- Utilizar a energia com mais racionalidade.

Os sucessivos choques do preço do petróleo propiciaram a retomada de investimentos em energia eólica. As pesquisas e investimentos estavam direcionados ao uso de aerogeradores conectados a redes operadas por usinas termelétricas. Com o aumento do preço do combustível, o custo da energia gerada em usinas termelétricas justificava economicamente a retomada de investimentos no setor eólico de grande porte. Países como Estados Unidos, Alemanha e Suécia iniciaram seus investimentos na pesquisa de novos modelos. (DUTRA, 2001)

Na década de setenta, os Estados Unidos iniciaram suas pesquisas com modelos de eixo horizontal e também com modelos de eixo vertical. Com o mercado de aerogeradores de pequeno porte já crescente, o governo americano, através de seus órgãos de pesquisa, iniciou projetos com modelos de grande porte testando e aprimorando várias configurações. O modelo de pás-curvas para aerogeradores de eixo vertical foi patenteado por G.J.M. Darrieus, na França, em 1925 e, nos Estados Unidos, em 1931 e foi aperfeiçoado na década de sessenta por Peter South e Raj Rangi, membros *do National Research Council* do Canadá (SPERA, 1994).

Pesquisas em turbinas eólicas de eixo vertical utilizando o modelo Darrieus foram iniciadas no Centro de Pesquisas Langley, da NASA, já no início da década de setenta. Entretanto, o *Sandia National Laboratories*, instalado na cidade de Albuquerque (Novo México) tornou-se o centro de pesquisas e desenvolvimento de turbinas eólicas de eixo vertical nos Estados Unidos. Entre 1984 e 1987, um modelo de 34 m de 625 kW foi projetado e instalado pela SANDIA no campo de testes do Departamento de Agricultura Americano em Bushland, Texas (figura 2.10). Essa turbina de eixo vertical trouxe consigo um grande número de avanços tecnológicos para operação em grandes potências. Entretanto, foi no modelo de 17 m de 100 kW que o uso comercial das turbinas de eixo vertical mostrou-se mais convidativo ao mercado gerador. No início dos anos 80, foram instalados, no Estado da Califórnia, aproximadamente 600 modelos Darrieus com potência total instalada superior a 90 MW (DIVONE 1994).



Figura 2.10 - Turbina eólica de eixo vertical de 34m de diâmetro projetada e instalada pelo SANDIA para testes na cidade Bushland, Texas (Fonte: SANDIA, 2000)

O Programa Federal de Energia Eólica de 1975 iniciou o projeto de construção de um modelo experimental de média escala e de eixo horizontal denominado de Mod-0, através da cooperação da Agência Americana de Energia (DOE) e da NASA. O aerogerador de 100 kW de potência nominal (com ventos, no eixo do rotor, a 8 m/s), uma torre com 30,5 m e um rotor de 38,1 m de diâmetro (DIVONE, 1994). O primeiro modelo foi instalado em 1975 e, durante dez anos de pesquisas, várias outras configurações foram estudadas. Foram utilizados diversos materiais e implementadas novas concepções de forma a obter os melhores resultados de aproveitamento do vento e de geração de energia. Dentro desse projeto, já em 1979, também foi construído o modelo Mod-0A de 200 kW e 38.1m de diâmetro. (DIVONE, 1994)

A continuação do Programa Federal de Energia Eólica possibilitou o estudo de turbinas na faixa de MW de potência. O projeto Mod-1 foi instalado em 1979, em uma pequena montanha perto da cidade de Boone, Carolina do Norte. Tratava-se de um aerogerador de eixo horizontal de 2.0 MW e rotor de duas pás com 61 m de diâmetro. Outros projetos foram implementados através da cooperação NASA-DOE, tais como o projeto Mod-2 (2.5 MW de potência e diâmetro de 91.4 m) e o Mod-5B (3.5 MW de potência e diâmetro de 100 m) implementado na Ilha de Oahu – Hawaii em 1987. (DUTRA, 2001)



Figura 2.11 - Turbina eólica Mod-5B instalada na Ilha de Oahu – Hawaii em 1987 no projeto de cooperação DOE/NASA (Fonte: NREL, 1996)

Os alemães também desenvolveram modelos para fins de pesquisa no período dos choques de alta dos preços do petróleo. Em 1982, construíram a maior turbina eólica até então instalada: o GROWIAN (*Grosse windenergie Anlage*). Tratava-se de um modelo que representava as mais altas tecnologias disponíveis até o momento. Uma turbina era fixada em uma torre tubular flexível com 100 m de altura e 100 m de diâmetro de rotor, com duas pás e capacidade de gerar 3.000 kW a ventos de 11.8 m/s. Mesmo sendo um projeto de grande relevância para o aprendizado de grandes turbinas eólicas, o funcionamento da turbina nunca foi satisfatório o que levou ao encerramento do projeto após o período de testes (CHESF-BRASCEP, 1987).

2.1.2 A evolução comercial de turbinas eólicas de grande porte

O rápido desenvolvimento da tecnologia e aumento capacidade de geração das turbinas eólicas comerciais no mundo durante os últimos 20 anos foi impressionante. A figura 2.12 mostra o desenvolvimento do tamanho e da potência de turbinas eólicas desde 1985. A grande variedade de tipos e modelos disponíveis no mercado ainda não parou de crescer. Atualmente, a grande maioria das turbinas comerciais da classe de MW está instalada na Alemanha, fato esse que mostra a importância do mercado alemão no desenvolvimento técnico mundial. Segundo Dutra (2001) em termos gerais, os aerogeradores ainda não alcançaram seus limites de tamanho tanto *onshore* quanto *offshore*.

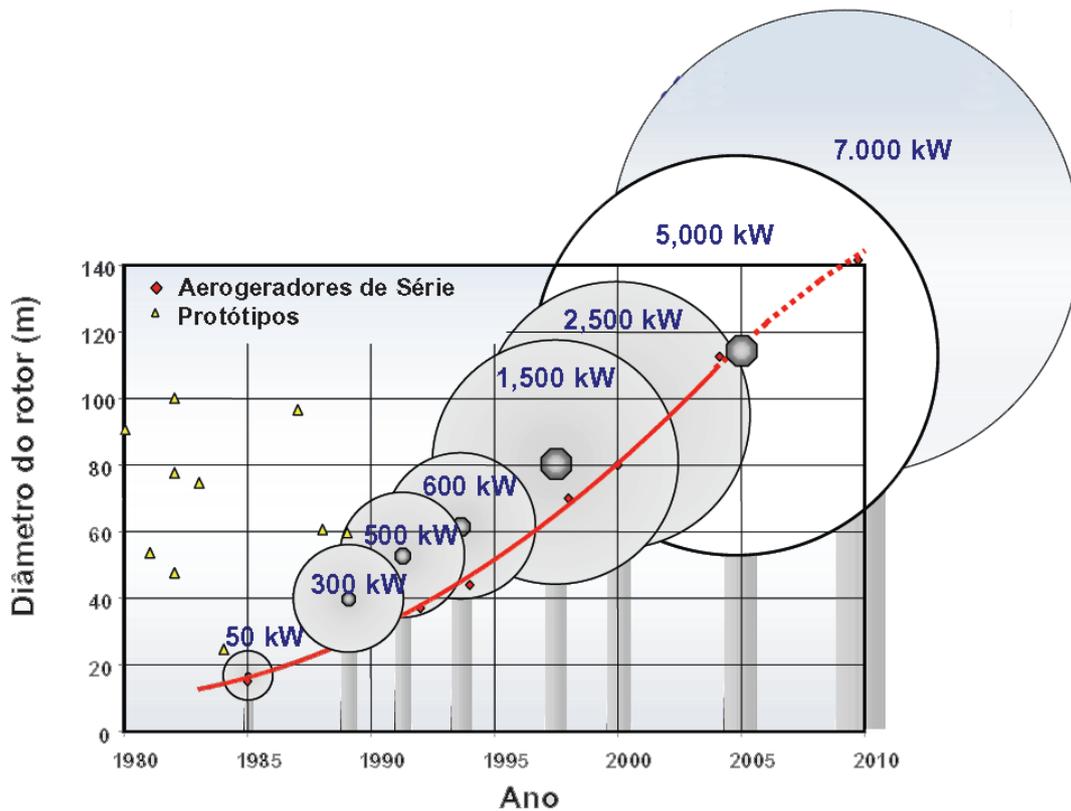


Figura 2.12 - Evolução do tamanho dos aerogeradores comerciais. (Fonte: DEWI, 2006)

2.1.3 A potência eólica instalada no mundo

O crescimento da potência eólica instalada de 2005 para 2006 indica perspectivas promissoras para o crescimento da indústria eólica mundial para as próximas décadas. A tabela 2.1 mostra a potência eólica instalada em diversos países desde 1998.

Tabela 2.1 - Utilização internacional da energia eólica.

PAÍS	Potência acumulada ao final de cada ano									
	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997
Alemanha	20622	18428	16628	14609	12400	8754	6095	4443	2875	2081
Espanha	11615	10027	8263	6202	4830	3337	2535	1542	834	512
Estados Unidos	11603	9149	6752	6352	4685	4258	2564	2534	1820	1673
Índia	6270	4430	2983	2120	1702	1500	1260	1035	992	940
Dinamarca	3136	3128	3118	3115	2880	2534	2415	1771	1383	1148
China	2604	1260	764	566	468	404	352	262	500	166
Itália	2123	1717	1265	891	785	697	427	183	178	103
Reino Unido	1963	1353	897	704	552	483	409	347	333	319
Portugal	1716	1022	523	299	194	153	111	61	51	38
França	1567	757	390	240	131	116	63	25	21	10
Canadá	1459	683	444	326	221	198	137	125	82	25
Japão	1394	1040	940	644	415	316	142	68	30	18
Holanda	1219	1219	1078	912	686	497	442	411	361	319
Áustria	965	819	607	415	139	95	77	42	30	20
Austrália	817	572	380	198	104	71	30	9	9	11
Grécia	746	573	466	398	276	299	274	158	55	29
Irlanda	745	496	353	225	137	125	119	73	73	53
Suécia	572	510	442	399	328	290	241	215	174	122
Noruega	314	270	160	112	97	17	13	9	9	4
Brasil	237	29	29	29	24	24	22	17	17	3
Egito	230	145	145	69	69	69	69	36	6	5
Bélgica	193	167	97	68	44	31	13	6	6	4
Coréia do Sul	173	120	8	8	nd	nd	nd	nd	nd	2
Nova Zelândia	171	170	170	38	35	35	35	24	24	4
Marrocos	124	64	54	54	54	54	54	14	0	0
Polônia	83	73	58	58	27	51	5	5	5	2
Finlândia	82	82	82	47	41	39	39	18	18	12
Costa Rica	74	71	71	71	71	71	51	51	27	20
Ucrânia	73	73	57	51	nd	nd	nd	nd	nd	5
Irã	48	32	11	11	11	11	11	11	11	11
Luxemburgo	35	35	35	16	16	15	15	9	9	2
Argentina	26	26	26	26	27	27	16	14	14	9
Turquia	20	20	20	20	19	19	19	9	9	0
Tunísia	20	20	20	20	11	11	11	0	0	0
Outros Países	1146	254	219	121	558	326	383	405	197	22
Total	74185	58835	47555	39434	32037	24927	18449	13932	10153	7693

(Fonte: WWEA, 2006, WINDPOWER MONTHLY, 2004, 2006, NEW ENERGY, 2003, 2002, 2000, BTM CONSULT, 2000 *apud* DUTRA, 2006)

2.1.4 Potencial eólico Brasileiro

Apesar de existir divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores bastante expressivos. Estas divergências decorrem, principalmente, da falta de informações e das diferentes metodologias empregadas. Há poucos anos atrás, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje, estimativas superiores a 60.000 MW são indicadas na maioria dos estudos. (FERREIRA, 2005).

Segundo cálculos apresentados pelo *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*, o potencial bruto de potência instalável está estimado em 143,47 GW em áreas onde a velocidade média anual do vento seja maior que 7,0 m/s. A tabela 2.2 mostra a integração cumulativa do potencial instalável de energia eólica e a energia anual gerada para todo o território brasileiro e a figura 2.13 mostra a distribuição da velocidade média anual do Brasil.

Tabela 2.2 – Integração Cumulativa – BRASIL

Vento [m/s]	Área (Cumulativa) [km ²]	Potencial Instalável [GW]	Energia Anual [TWh/ano]
> 6,0	667391	1334	1711,6
> 6,5	231746	463	739,2
> 7,0	71735	143	272,2
> 7,5	21676	43	100,3
> 8,0	6679	13	35,9
> 8,5	1775	3	10,7

(Fonte: CEPEL, 2001 *apud* DUTRA, 2007)

A *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* destaca dois aspectos importantes do potencial eólico: (CEPEL, 2001)

- A complementaridade geográfica entre os potenciais eólico e hidráulico, de modo que, em geral, as melhores áreas de aproveitamento eólico situam-se nas extremidades do sistema elétrico, distantes da geração hidrelétrica. Nessa situação, a inserção de energia eólica no sistema elétrico melhora seu desempenho.
- A existência de complementaridade sazonal entre os regimes naturais de vento e as vazões naturais hídricas na parcela hidrelétrica predominante do sistema elétrico brasileiro atual. Nesse sistema, a inserção de energia eólica potencializa uma maior estabilidade sazonal na oferta de energia.

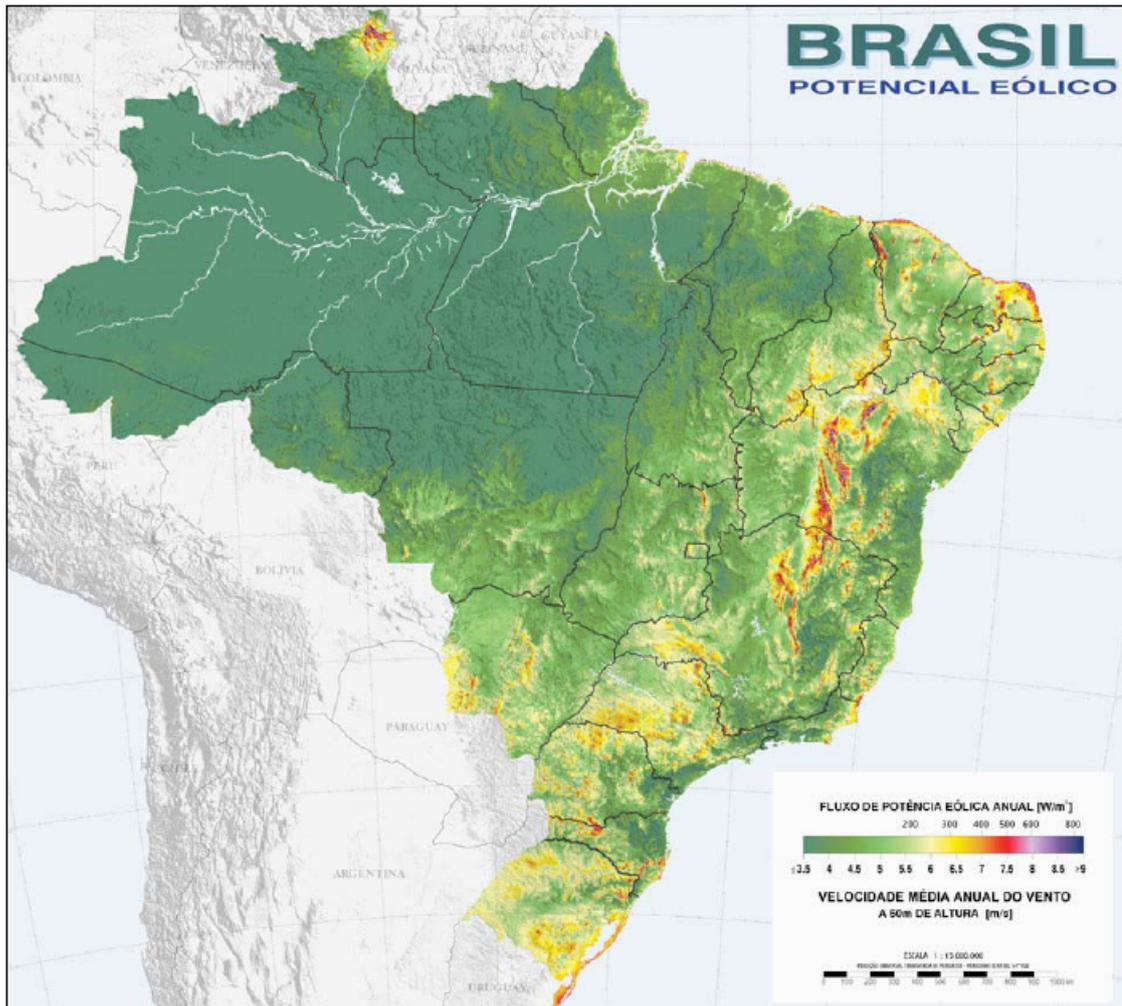


Figura 2.13 - Distribuição da Velocidade Média Anual no Território Brasileiro. (Fonte: CEPEL, 2001)

2.2 O Vento

O vento pode ser caracterizado como o movimento de massas de ar resultante do aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Logo, a energia eólica é proveniente da radiação solar. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra são convertidas em energia cinética dos ventos. Esse percentual representa centena de vezes à potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo. (DUTRA, 2001)

Todos os planetas em nosso sistema solar envolvidos por camadas gasosas demonstram a existência de distintas formas de circulação atmosférica e apresentam ventos em sua superfície. Como se trata de um mecanismo solar-planetário permanente, com duração mensurável na escala de bilhões de anos, o vento é considerado uma fonte renovável de energia. (CEPEL, 2001)

Os regimes dos ventos, tanto globais como regionais, são influenciados por diferentes aspectos entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo.

A seguir serão descritos os mecanismos de geração dos ventos e os principais fatores de influência no regime dos ventos de uma região.

2.2.1 Mecanismos de Geração dos Ventos

A energia eólica tem sua origem na associação entre a energia proveniente do Sol e rotação planetária, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. A não uniformidade no aquecimento da atmosfera é causada pela orientação dos raios solares e os movimentos da Terra, entre outros fatores.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos (DUTRA, 2001). A Figura 2.13 apresenta esse mecanismo.

Há locais no globo terrestre onde os ventos são permanentes, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São conhecidos como ventos planetários ou constantes e podem ser classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

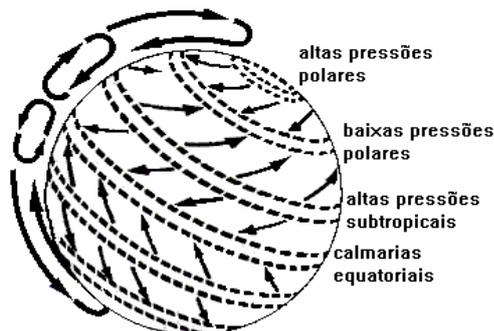


Figura 2.14 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.

(Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998)

A inclinação do eixo da Terra de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, causa variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra que resultam em variações

sazonais na intensidade e duração dos ventos em toda superfície terrestre. Como resultado, são formados os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas.

As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

Em função das características das diferentes superfícies (tais como mares e continentes) de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol surgem as brisas que se caracterizam por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. No período diurno, devido à maior capacidade da terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar. Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno. (DUTRA, 2001)

Somam-se ao sistema de geração dos ventos descrito acima os *ventos locais*, originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos com características regionais e resultantes de condições locais, que os tornam bastante peculiares. A manifestação local dos ventos mais conhecida é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. No período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales.

2.2.2 Fatores que influenciam o regime dos ventos

O comportamento estatístico do vento ao longo do dia é influenciado pela variação de velocidade do vento ao longo do tempo. As características topográficas de uma região também influenciam o comportamento dos ventos uma vez que, em uma determinada área, podem ocorrer diferenças de velocidade ocasionando a redução ou aceleração na velocidade vento. Além das variações topográficas e também de rugosidade do solo, a velocidade também varia seu comportamento com a altura.

Observando o fato de que a velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias (algumas centenas de metros), os procedimentos de avaliação do sítio para instalação de aerogeradores devem considerar todos os parâmetros regionais que influenciam as condições do vento. Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos destacam-se: (DUTRA, 2001)

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

A partir de mapas topográficos podem-se obter informações relevantes para o levantamento das condições de uma região, porém uma visita ao sítio de interesse para avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos é indispensável. O uso de imagens aéreas e dados de satélite também contribui para uma análise mais precisa. (DUTRA, 2001) A Figura 2.14 mostra, de uma forma genérica, como os ventos se comportam quando estão sob a influência das características da superfície do solo.

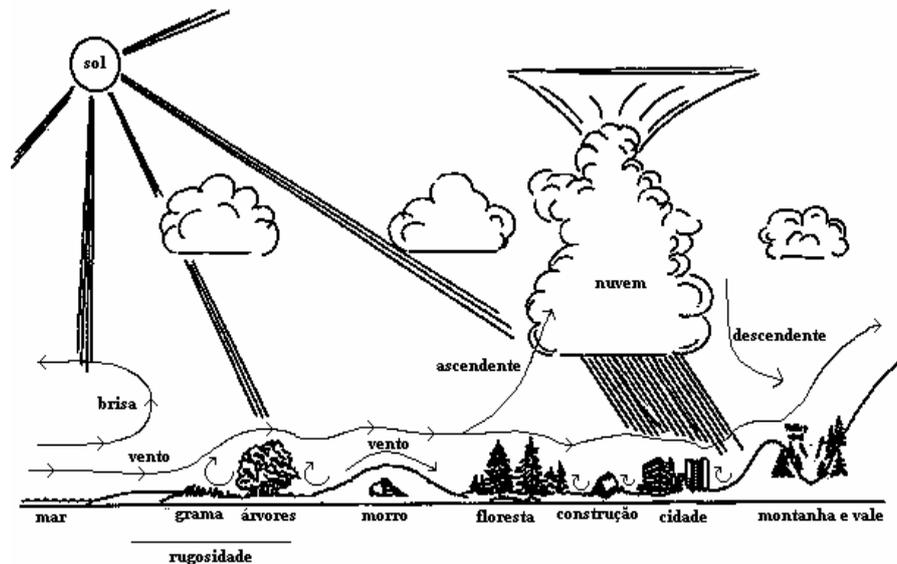


Figura 2.15 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno

(Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998).

O *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* permite a pré-identificação das melhores áreas para projetos de aproveitamento eólico, mas não descarta uma análise mais minuciosa das condições locais para obtenção de dados com a precisão exigida pelos projetos de aproveitamento eólicos. (CEPEL, 2001)

2.3 O meio ambiente e a energia eólica

As questões ambientais impulsionam o mundo na busca de soluções eficientes e tecnologicamente corretas para o fornecimento de energia. Nesse cenário a energia eólica tem ganhado cada vez mais destaque como uma alternativa tecnologicamente viável e principalmente limpa.

O uso da energia nuclear tem sido uma questão polêmica desde os acidentes nos reatores de Three Mile Island em 1979, nos Estados Unidos e, mais tarde, em 1986 na cidade de Chernobyl, na ex-União Soviética. As fortes pressões ambientais sobre o futuro do uso dessa energia forçaram a comunidade internacional a procurar fontes mais seguras e confiáveis para o fornecimento de energia elétrica. Nas décadas de 80 e 90, os novos paradigmas por fontes limpas criaram um cenário favorável e altamente promissor para desenvolvimento de fontes renováveis de energia, em particular a energia eólica. (DUTRA, 2001)

Vários países como Alemanha, Dinamarca e Estados Unidos, entre outros, engajaram-se no desenvolvimento de tecnologia e expansão do parque industrial. Com incentivos e subsídios ao setor, a indústria da energia eólica alavancou recursos a ponto de se fixar no mercado mundial com tecnologia, qualidade e confiabilidade. O crescimento de mercado e o desenvolvimento tecnológico nos últimos anos têm erguido a eólica como uma opção imprescindível para o fornecimento de energia limpa em grandes potências (DUTRA, 2001).

Além da matriz energética não renovável baseada em combustíveis fósseis apresentar perspectivas futuras bem desfavoráveis com recursos cada vez mais escassos no mundo, o preço do barril de petróleo chegando a US\$ 92 (Folha On-line, 26/10/2007), existe um cenário ambiental crítico. O aquecimento global é uma realidade incontestável e tem como principal causador concentração de gases de efeito estufa como óxidos de enxofre e de nitrogênio, e principalmente o dióxido de carbono na atmosfera. A queima de combustíveis fósseis responde por 95% das emissões desses gases geradas pelo homem (LORA; TEIXEIRA, 2006).

O aproveitamento dos ventos para geração de energia elétrica apresenta, como toda tecnologia energética, algumas características ambientais desfavoráveis como: impacto visual, ruído, interferência eletromagnética, ofuscamento e danos à fauna. Mas através do planejamento adequado e também do uso de inovações tecnológicas esses aspectos aparentemente negativos podem ser reduzidos significativamente ou até mesmo eliminados. Uma das características ambientais favoráveis da energia eólica está na não necessidade do uso da água como elemento motriz ou mesmo como fluido de refrigeração e também em não produzir resíduos radioativos ou gasosos. Além disso, 99% de uma área usada em um parque eólico podem ser utilizados para outros fins, como a pecuária e atividades agrícolas (DUTRA, 2001).

2.3.1 Emissão de gases

O benefício mais importante que a energia eólica oferece ao meio ambiente está no fato de que ela não polui durante sua operação. Dessa forma, podemos fazer um comparativo entre cada unidade (kWh) de energia elétrica gerada por turbinas eólicas e a mesma energia que seria gerada por uma planta convencional de geração de energia elétrica. Ao fazer essa análise chegamos à conclusão de que a energia eólica apresenta grandes vantagens na redução de emissão de gases de efeito estufa e na redução da concentração de CO₂ durante a sua operação. Com o avanço de programas de eficiência energética, com o propósito de tornar mais eficiente o parque gerador de energia, as emissões de CO₂ e de gases de efeito estufa têm-se reduzido ao longo dos anos, mas ainda permanecem em uma faixa muito alta. (DUTRA, 2001) A Tabela 2.3 a seguir mostra o nível de emissões de CO₂ das tecnologias de geração elétrica.

Tabela 2.3 - Emissão de CO₂ em diferentes tecnologias de geração de energia elétrica

Tecnologias	Emissões de CO ₂ nos estágios de produção de energia (ton/GWh)			
	Extração	Construção	Operação	Total
Planta convencional de queima de carvão	1	1	962	964
Planta de queima de óleo combustível	-	-	726	726
Planta de queima de gás	-	-	484	484
Energia térmica dos oceanos	Na	4	300	304
Plantas geotérmicas	<1	1	56	57
Pequenas hidrelétricas	Na	10	Na	10
Reatores nucleares	~2	1	5	8
Energia eólica	Na	7	Na	7
Solar fotovoltaico	Na	5	Na	5
Grandes hidrelétricas	Na	4	Na	4
Solar térmico	Na	3	Na	3
Lenha (Extração programável)	-1.509	3	1.346	-160

(Fonte: “Renewable energy resources: opportunities and constraints 1990-2020”
World Energy Council’s – 1993)

2.3.2 Emissão de ruído

Um dos temas mais discutidos relativo a sistemas eólicos é o impacto ambiental do ruído gerado pelo giro das pás dos aerogeradores. Durante a década de oitenta e início da década de noventa, o problema foi um obstáculo à disseminação da energia eólica. O desenvolvimento tecnológico nos últimos anos, juntamente com as novas exigências de um mercado crescente e promissor, promoveram um avanço significativo na diminuição dos níveis de ruído produzido pelas turbinas eólicas. O problema do ruído produzido pelas turbinas eólicas está relacionado com fatores como a aleatoriedade do seu funcionamento¹ e a variação da frequência do ruído uma vez que este se relaciona diretamente com a velocidade de vento incidente. (DUTRA, 2001)

O ruído proveniente das turbinas eólicas tem duas origens: mecânica e aerodinâmica. O ruído mecânico é proveniente, principalmente, da caixa de engrenagens que multiplica a rotação das pás para o gerador. A tecnologia convencional emprega geradores convencionais que necessitam de alta rotação para funcionarem. Com a baixa rotação da hélice comparada à rotação do gerador, o sistema precisa de um sistema de engrenagens para multiplicar a rotação necessária no gerador. Uma tecnologia que vem sendo utilizada em turbinas eólicas é o uso de um gerador elétrico multipolo conectado diretamente ao eixo das pás. Esse sistema de geração dispensa o sistema de engrenagens para multiplicação de velocidade, pois esse gerador funciona mesmo em baixas rotações. Sem a principal fonte de ruído presente nos sistemas

¹ Mesmo em locais onde o período de medição dos ventos represente uma série histórica de vários anos, a previsão de ventos é um fator dependente de várias condições climáticas globais, tornando seu comportamento aleatório ao longo do dia. As medições e séries históricas representam um importantíssimo fator de viabilidade técnica e econômica. No caso em que citamos a aleatoriedade do seu funcionamento, queremos deixar claro que a aleatoriedade está na velocidade instantânea que pode mudar a qualquer momento seja para o aumento ou a redução da velocidade (DUTRA, 2001)

convencionais, as turbinas que empregam o sistema multipolo de geração de energia elétrica são significativamente mais silenciosas. (DUTRA, 2001) (GASCH; TWELE, 2002)

O ruído aerodinâmico é um fator influenciado diretamente pela velocidade do vento incidente sobre a turbina eólica. Ainda existem vários aspectos a serem pesquisados e testados tanto nas formas das pás quanto na própria torre para a sua redução. Pesquisas em novos modelos de pás, procurando um máximo aproveitamento aerodinâmico com redução de ruído, são muitas vezes realizadas de modo semi-empírico, proporcionando o surgimento de diversos modelos e novas concepções em formatos aerodinâmicos das pás. (GASCH; TWELE, 2002)

O desenvolvimento de tecnologias, ao longo dos últimos vinte anos, na aerodinâmica das pás e nas partes mecânicas críticas, principalmente a caixa de engrenagem (parte responsável pela alta rotação do gerador na turbina) tornou possível uma significativa redução dos níveis de ruído nas turbinas modernas (DUTRA, 2001).

2.3.3 Impacto visual

O impacto visual de um parque eólico na paisagem é muito subjetivo. Alguns vêem a turbina eólica como um símbolo de energia limpa e bem recebida, outras reagem negativamente à nova paisagem.

Os efeitos do impacto visual têm sido minimizados, principalmente, com a conscientização da população local sobre a geração eólica. Através de audiências públicas e seminários, a população local passa a conhecer melhor toda a tecnologia e, uma vez conhecendo os efeitos positivos da energia eólica, os índices de aceitação melhoram consideravelmente. (DUTRA, 2001)

2.3.4 Impacto sobre a fauna

Existem algumas considerações sobre os impactos na fauna. No início da utilização da aerogeradores não havia se considerado o comportamento migratório de aves, o que resultou em acidente e morte de alguns pássaros. Mas devemos observar que muitas vezes, pássaros colidem com estruturas com as quais têm dificuldade de visualização tais como torres de alta voltagem, mastros e janelas de edifícios. Os pássaros também morrem por vários outros motivos entre eles o tráfego de veículos em auto-estradas e as caçadas. O comportamento dos pássaros e as taxas de mortalidade tendem a ser específicos para cada espécie e também para cada lugar. Estimativas de mortes de pássaros nos Países Baixos (figura 2.15), causadas por várias ações diretas e indiretas do homem, mostram que o tráfego de veículos apresenta uma taxa que, em comparação às estimativas de mortes por parque eólico de 1 GW, é cem vezes maior. (EWEA, 1998c)

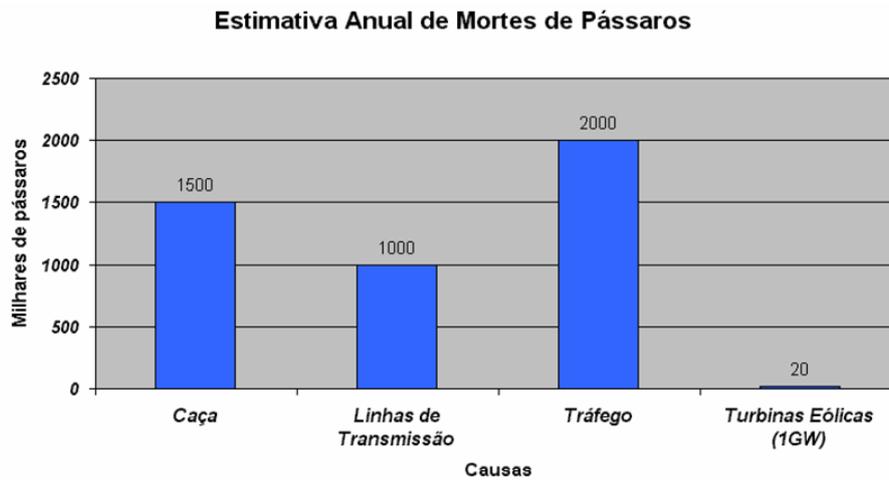


Figura 2.16 - Estimativa de mortes anuais de pássaros nos Países Baixos
(Fonte: EWEA, 1998c)

2.4 Energia e Potência extraída do vento

A energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma velocidade v é dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Considerando a mesma massa de ar m em movimento a uma velocidade v , perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário (Figura 2.15), pode-se demonstrar que a potência disponível do vento que passa pela seção A, transversal ao fluxo de ar é dada por:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.2)$$

Onde:

P = potência do vento [W]

ρ = massa específica do ar [kg/m³]

A = área da seção transversal [m²]

v = velocidade do vento [m/s]

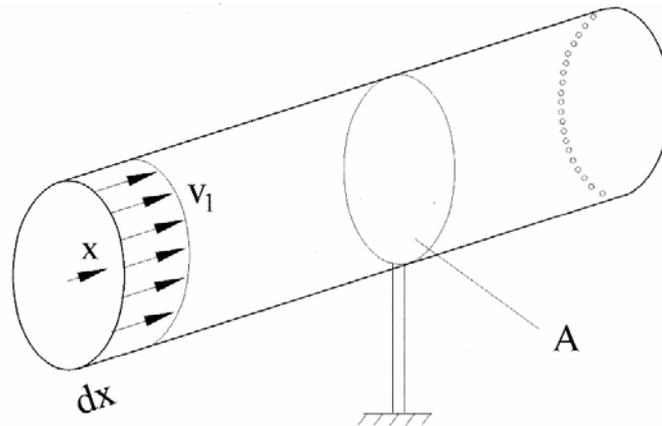


Figura 2.17 - Fluxo de ar através de uma área transversal A
(Fonte: GASCH; TWELE, 2002)

A expressão 3.2 também pode ser escrita por unidade de área definindo, desta forma, a densidade de potência DP, ou fluxo de potência:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.3)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível pelo vento não pode ser totalmente aproveitada pela turbina eólica na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência C_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor.

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento (C_p máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde v_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na Figura 2.16.

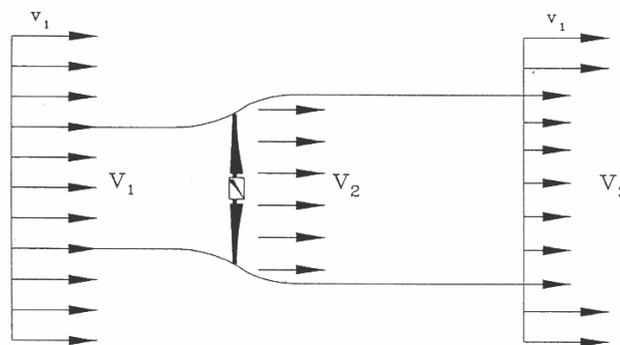


Figura 2.18 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.
(Fonte: GASCH; TWELE, 2002)

Na figura 2.18, Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade v_1 que é retardada pelo conjunto de pás assumindo uma velocidade v_3 a jusante das pás. Pela lei da continuidade temos que:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3 \quad (2.4)$$

Como a redução da pressão do ar é mínima, a densidade do ar pode ser considerada constante. A energia cinética extraída pela turbina eólica é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás:

$$E_{ex} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.5)$$

A potência extraída do vento por sua vez é dada por:

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.6)$$

Neste ponto é necessário fazer duas considerações extremas sobre a relação entre as velocidades v_1 e v_3

- A velocidade do vento não é alterada ($v_1 = v_3$) – Neste caso nenhuma potência é extraída;
- A velocidade do vento é reduzida a valor zero ($v_3 = 0$) – Neste caso o fluxo de massa de ar é zero, o que significa também que nenhuma potência é retirada.

A partir dessas duas considerações extremas, a velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre v_1 e v_3 . Este valor pode ser calculado se a velocidade no rotor v_2 é conhecida. A massa de ar é dada por:

$$\dot{m} = \rho A v_2 \quad (2.7)$$

Pelo teorema de Rankine-Froude pode-se assumir que a relação entre as velocidades v_1 , v_2 e v_3 é dada por:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (2.8)$$

Se a massa de ar apresentada na equação 2.7 e a velocidade v_2 apresentada na equação 2.8 forem inseridas na mesma equação 2.6, tem-se:

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.9)$$

Onde:

$$\text{Potência do Vento} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$\text{Coeficiente de Potência } C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

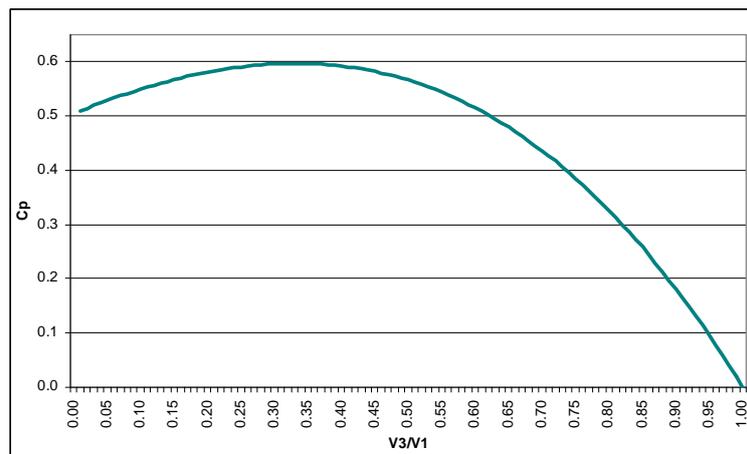


Figura 2.19 - Distribuição de C_p em função de v_3/v_1

(Fonte: Dutra, 2007)

Ao considerar o coeficiente de potência C_p em função de v_3/v_1 temos que:

$$C_{p_{Betz}} = \frac{16}{27} = 0.59, \text{ onde } v_3/v_1 = 1/3 \quad (2.10)$$

A figura 2.19 mostra as principais forças atuantes em uma pá da turbina eólica, assim como os ângulos de ataque (α) e de passo (β). A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante

visto pela pá (V_{res}), resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente (V_w) com a velocidade tangencial da pá da turbina eólica (V_{tan}), conforme a equação (2.11).

$$\vec{V}_{res} = \vec{V}_w - \vec{V}_{tan} \quad (2.11)$$

A força de arrasto é produzida na mesma direção de V_{res} . A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção V_{tan} , produz o torque da turbina eólica.

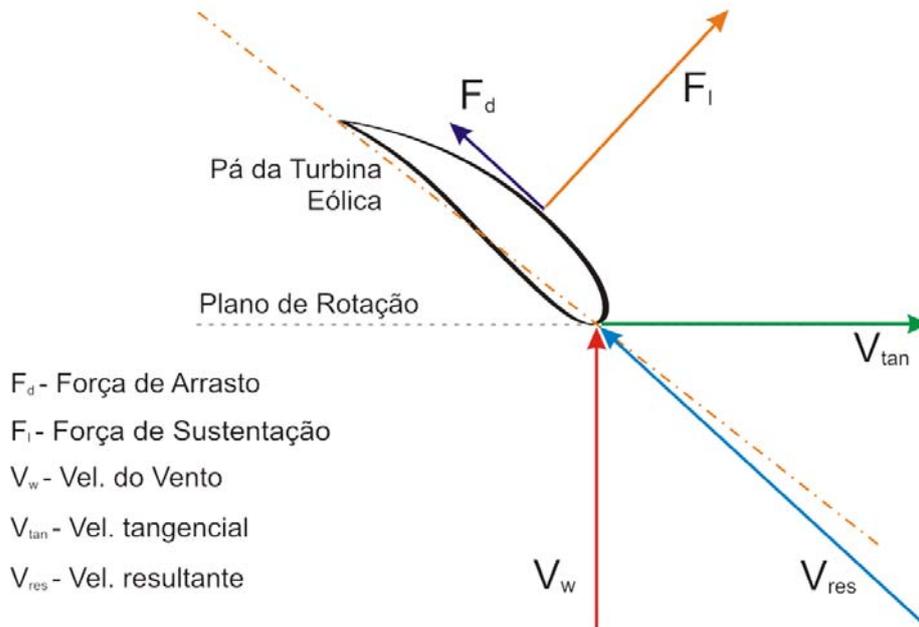


Figura 2.20 - Principais forças atuantes em uma pá de turbina elétrica.

A potência mecânica extraída do vento pela turbina eólica depende de vários fatores. Mas tratando-se de estudos elétricos o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações (2.12) e (2.13). (PAVINATTO, 2005)

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (2.12)$$

Com:

$$\lambda = \left(\frac{R \omega_{wt}}{v_w} \right) \quad (2.13)$$

Onde:

- c_p – coeficiente de potência da turbina eólica;
- λ – razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*);
- ω_{wt} – velocidade angular da turbina eólica (rad/s);
- R – raio da turbina eólica (m);
- ρ – densidade do ar (Kg/m^3);
- A – área varrida pelo rotor da turbina eólica (m^2);
- v_w – velocidade do vento incidente na turbina eólica (m/s);

Na equação (2.11), o coeficiente de potência $c_p(\lambda, \beta)$ depende das características da turbina eólica, sendo função de razão de velocidades λ e do ângulo de passo das pás da turbina eólica (pitch) β . O $c_p(\lambda, \beta)$ é expresso como uma característica bidimensional.

Aproximações numéricas normalmente são desenvolvidas para o cálculo de c_p para valores dados de λ e β (RAIAMBAL e CHELLAMUTH, 2002 *apud* PAVINATTO, 2005), resultando nas equações a seguir:

$$c_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{98}{\lambda i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{-16,5}{\lambda i}} \quad (2.14)$$

Com:

$$\lambda i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,089} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.15)$$

A figura 2.21 mostra a característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçada a partir das equações (2.14) e (2.15), para vários valores de β .

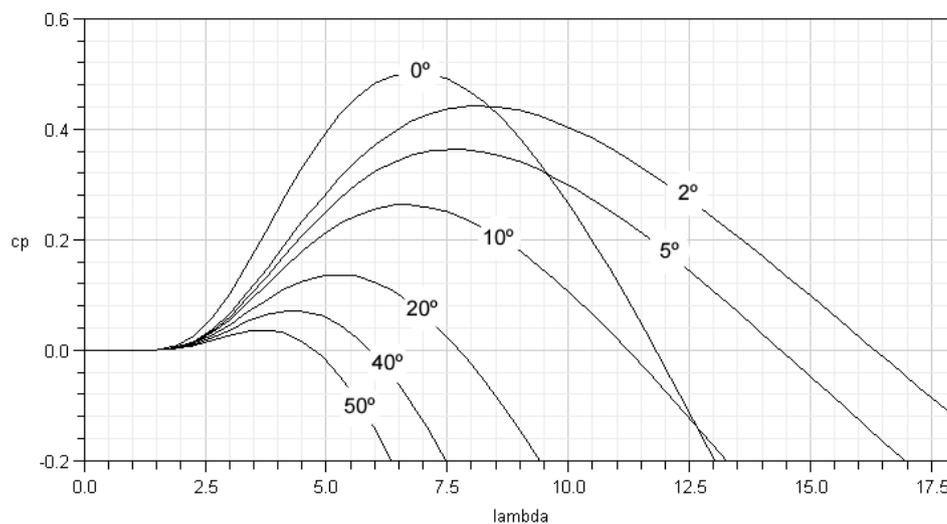


Figura 2.21 - Característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função das equações (2.14) e (2.15).

2.5 Tipos de Turbinas Eólicas para Geração de Energia Elétrica

2.5.1 Rotores de Eixo Vertical

A grande vantagem, em geral, dos rotores de eixo vertical é não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, reduzindo a complexidade do projeto e os esforços devidos às forças de *Coriolis*. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são *Darrieus*, *Savonius* e turbinas com torre de vórtices. Os rotores do tipo *Darrieus* são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical. (DUTRA, 2001) (GASCH; TWELE, 2002)



Figura 2.22 - Turbina experimental de eixo vertical (Fonte: SANDIA, 2006)

2.5.2 Rotores de Eixo Horizontal

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*). Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo). (DUTRA, 2001) (GASCH; TWELE, 2002)

Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento (DUTRA, 2001) (GASCH; TWELE, 2002).

Os rotores de eixo horizontal ao longo do vento (aerogeradores convencionais) são predominantemente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás (*multivane fans*). Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada. (DUTRA, 2001)



Figura 2.23 - Turbina de eixo horizontal

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar à jusante do vento (*down wind*) ou a montante do vento (*up wind*). No primeiro caso, a “sombra” da torre provoca vibrações nas pás. No segundo caso, a “sombra” das pás provoca esforços vibratórios na torre. Sistemas a montante do vento necessitam de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento, enquanto nos sistemas a jusante do vento, a orientação realiza-se automaticamente. (DUTRA, 2001) (GASCH; TWELE, 2002)

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) 1 ou 2 pás. (DUTRA, 2001)

2.5.3 Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal

As principais configurações de uma turbina eólica de eixo horizontal podem ser vistas na Figura 2.24. Estas turbinas são diferenciadas pelo tamanho e formato da nacele, a presença ou não de uma caixa multiplicadora e o tipo de gerador utilizado (convencional ou multipolos). A seguir são apresentados os principais componentes da turbina que, de uma forma geral, podem ser agrupados em torre, nacele e rotor.

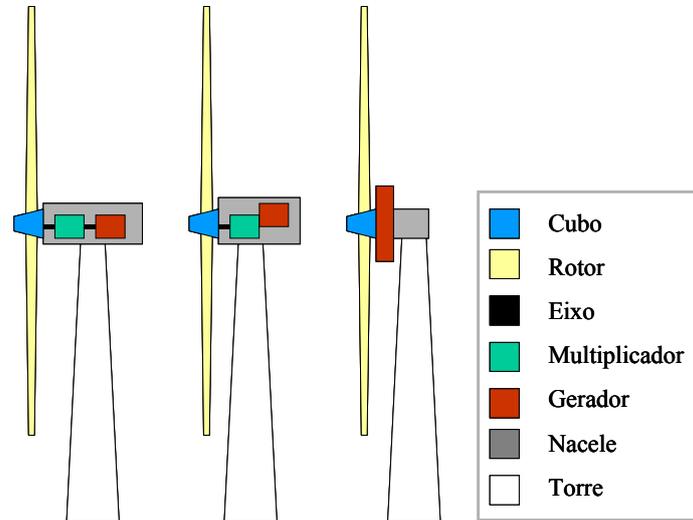


Figura 2.24 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal (Fonte: DUTRA, 2007)

2.5.3.1 Nacele

É a carcaça montada sobre a torre, onde se situa o gerador, a caixa de engrenagens (quando utilizada) e todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para melhor posicionamento do vento. As Figuras 2.25 e 2.26 mostram os principais componentes instalados em dois tipos de naceles, uma delas utilizando um gerador convencional e outra utilizando um gerador multipolos. (DUTRA, 2007)

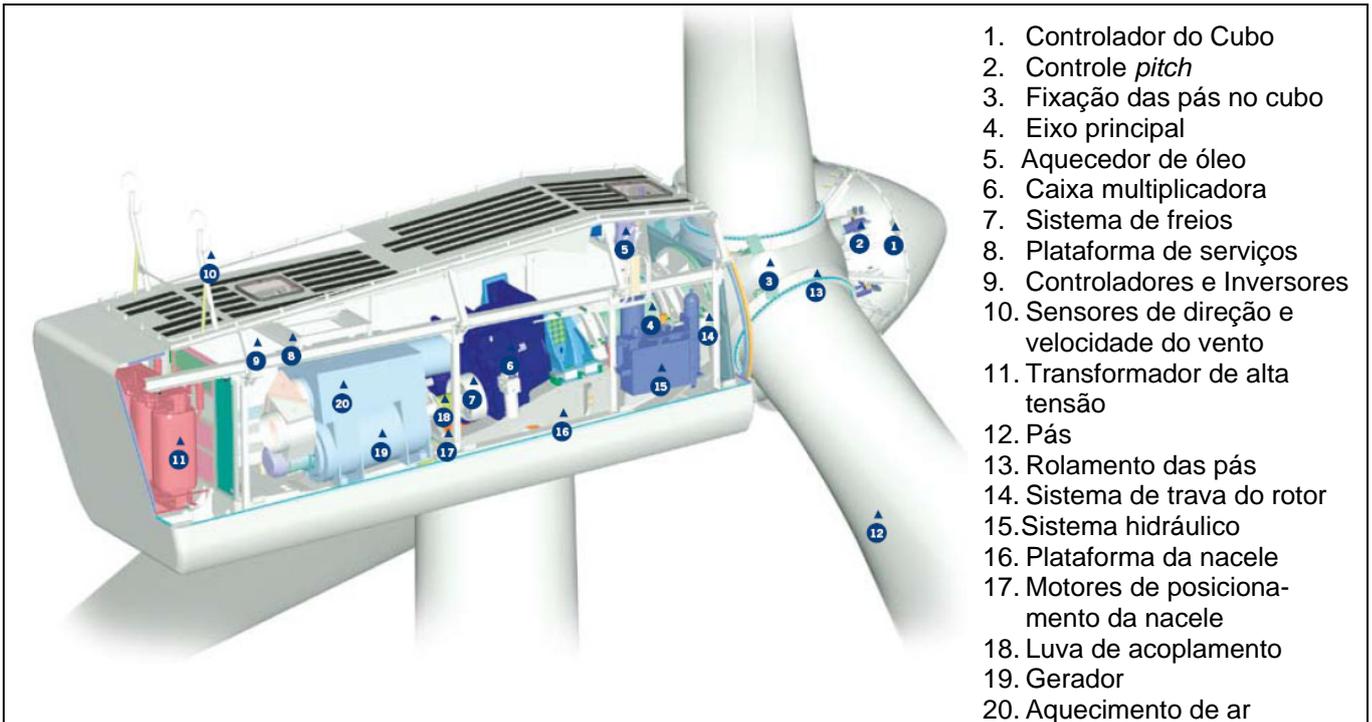


Figura 2.25 - Vista do interior da nacele de uma turbina eólica utilizando um gerador convencional

(Fonte: VESTAS, 2006)

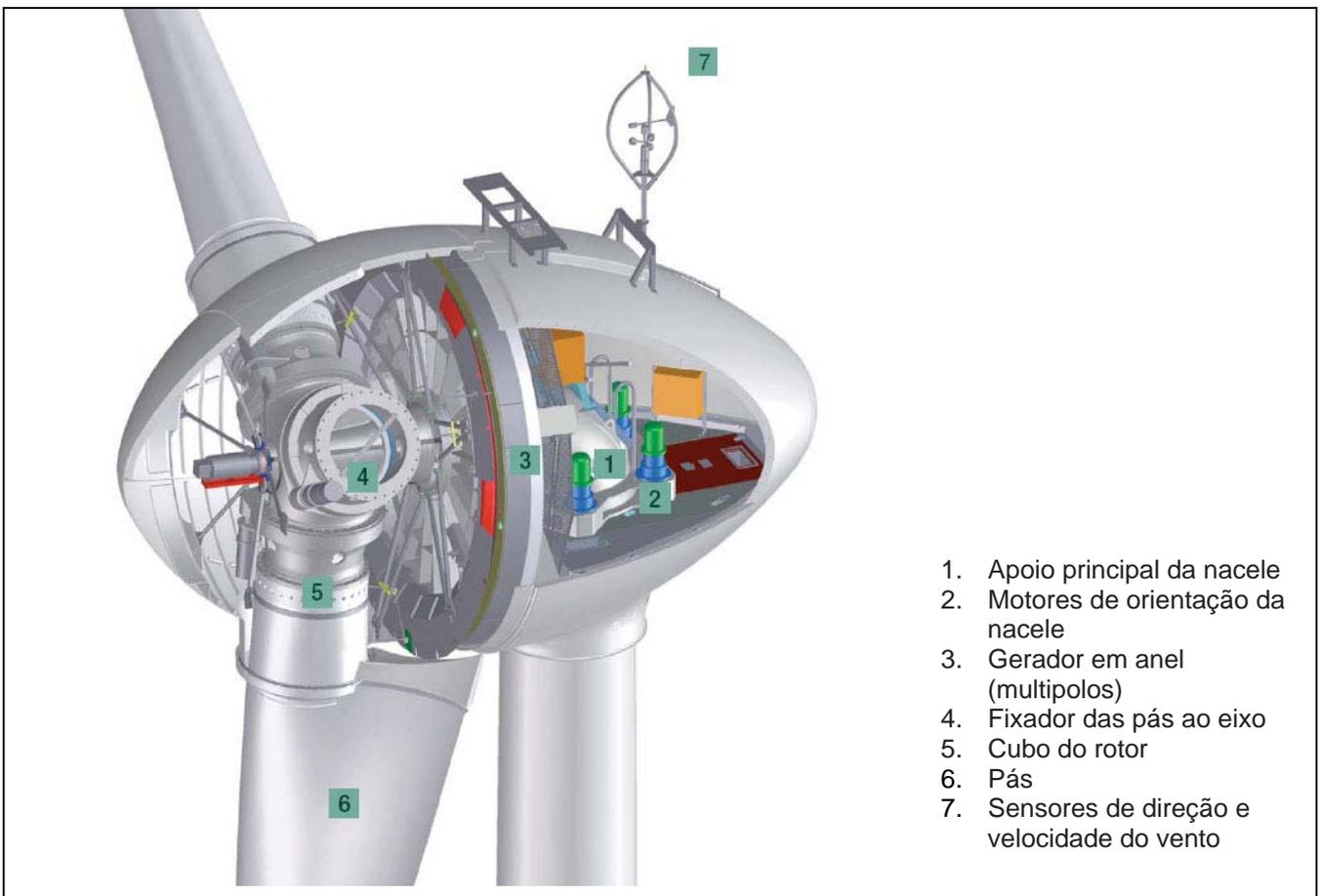


Figura 2.26 - Vista do interior da nacele de uma turbina eólica utilizando um gerador multi-polos
(Fonte: ENERCON, 2006)

2.5.3.2 Pás, cubo e eixo

As pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Inicialmente fabricadas com alumínio, atualmente são fabricadas em fibras de vidro reforçadas com epoxi. Nas turbinas que usam controle de velocidade por passo, a pá dispõe de rolamentos em sua base para que possa girar modificando assim seu ângulo de ataque. (DUTRA, 2007)

As pás são fixadas através de flanges em uma estrutura metálica a frente da turbina denominada cubo. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência. Para as turbinas que utilizem o controle de velocidade por passo, o cubo além de apresentar os rolamentos para fixação das pás também acomoda os mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de ataque de todas as pás. É importante citar que por se tratar de uma peça mecânica de alta resistência, o cubo é montado de tal forma que ao sair da fábrica este se apresenta como peça única e compacta viabilizando que, mesmos para os grandes aerogeradores, seu transporte seja feito sem a necessidade de montagens no local da instalação. (DUTRA, 2007)

O eixo é o responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador fazendo a transferência da energia mecânica da turbina. É construído em aço ou liga metálica de alta resistência. (DUTRA, 2007)



Figura 2.27 - Um pátio com diversos modelos de pás e detalhe de um cubo

2.5.3.3 Transmissão e Caixa Multiplicadora

A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. É composta por eixos, mancais, engrenagens de

transmissão e acoplamentos. A Figura 2.24 apresenta a localização da caixa multiplicadora dentro do sistema de geração eólica.

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

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 RPM, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (*tip speed*). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham a rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1200 a 1800 RPM), tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construir turbinas eólicas. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores utiliza-se geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões.

Os dois tipos de projetos possuem suas vantagens e desvantagens e a decisão em usar o multiplicador ou fabricar um aerogerador sem caixa de transmissão é antes de tudo uma questão de filosofia do fabricante.



Figura 2.28 - Gerador conectado a caixa de engrenagens (vista a direita)

2.5.3.4 Gerador

A transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica através de equipamentos de conversão eletromecânica é um problema tecnologicamente dominado, portanto vários fabricantes de geradores estão disponíveis no mercado.

Entretanto, a integração de geradores nos sistemas de conversão eólica constitui-se em um grande problema, que envolve principalmente: (DUTRA, 2007)

- variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- variações do torque de entrada (uma vez que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo);

- exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida;
- facilidade de instalação, operação e manutenção devido ao isolamento geográfico de tais sistemas, sobretudo em caso de pequena escala de produção (isto é, necessitam ter alta confiabilidade).

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação a sistemas de conversão de energia eólica. (DUTRA, 2007)

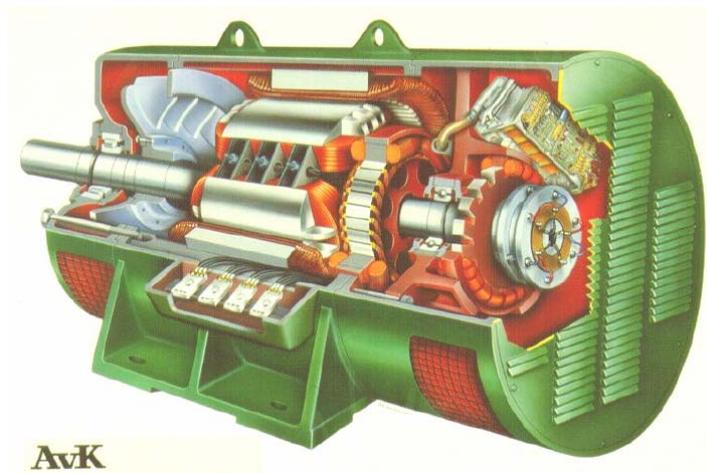


Figura 2.29 - Gerador convencional (Fonte: ENERCON, 2007)



Figura 2.30 - Gerador multipolos (Fonte: ENERCON, 2007)

2.5.3.5 Torre

As torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. Inicialmente, as turbinas utilizavam torres de metal treliçado. Com o uso de geradores com potências cada vez maiores, as nacelles passaram a sustentar um peso muito elevado tanto do gerador quanto das pás. Desta forma, para dar maior mobilidade e segurança para sustentar a nacelle em alturas cada vez maiores, tem-se utilizado torres de metal tubular ou de concreto que podem ser sustentadas ou não por cabos tensores. (DUTRA, 2007)

2.5.4 Mecanismo de Controle

Os mecanismos de controle destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga, etc. Existe uma enorme variedade de topologias de controle que dependem principalmente da filosofia de projeto do fabricante. Os mecanismos de controle podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência a potência nominal do aerogerador. São chamados de controle estol (*Stall*) e controle de passo (*Pitch*). No passado, a maioria dos aerogeradores usava o controle estol simples; atualmente, entretanto, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão optando pelo sistema de controle de passo que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas. (DUTRA, 2007)

2.5.4.1 Controle Estol

O controle de estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem ser giradas em torno de seu eixo longitudinal. O seu ângulo de passo é escolhido de tal maneira que para velocidades de ventos maiores que a nominal o fluxo em torno do perfil de pá do rotor descola da superfície da pá (estol) (Figura 2.31). Isto reduz as forças atuantes de sustentação e aumenta a de arrasto. Menores sustentações e maiores arrastos rotacionais atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, uma situação que drasticamente reduziria a potência do rotor, as pás possuem certa torção longitudinal que a leva a um suave desenvolvimento do estol. (DUTRA, 2007)



Figura 2.31 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil (Fonte: CRESESB, 2007)

Sob condições de ventos superiores à velocidade nominal o fluxo em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos, parcialmente descolado da superfície (Figura 2.31), produzindo, portanto sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas. Turbinas com controle estol são mais simples do que as de controle de passo porque elas não necessitam de um sistema de mudança de passo. Em comparação com os aerogeradores com controle de passo, eles possuem, em princípio, as seguintes vantagens: (DUTRA, 2001)

- inexistência de sistema de controle de passo
- estrutura de cubo do rotor simples
- menor manutenção devido a um número menor de peças móveis
- auto-confiabilidade do controle de potência

Em termos mundiais, o conceito de controle através de estol domina. A maioria dos fabricantes utiliza esta possibilidade simples de controle de potência, que sempre necessita uma velocidade constante do rotor, geralmente dada pelo gerador de indução diretamente acoplado à rede.

Recentemente uma mistura de controle por estol e de passo apareceu, o conhecido “estol ativo”. Neste caso, o passo da pá do rotor é girado na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento² (menor sustentação) como é feito em sistemas de passo normais. As vantagens deste sistema são: (DUTRA, 2007)

- são necessárias pequeníssimas mudanças no ângulo do passo
- possibilidade de controle da potência sob condições de potência parcial (ventos baixos)
- a posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em situação de ventos extremos.

² Posição na qual o ângulo de passo atinge seu valor máximo (90°) reduzindo as forças de sustentação e a carga mecânica no aerogerador.

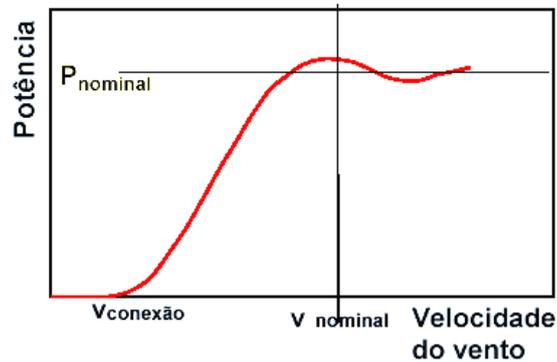


Figura 2.32 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle tipo estol

(Fonte: DEWI, 2007)

2.5.4.2 Controle de Passo

O controle de passo é um sistema de controle ativo, que normalmente necessita de um sinal do gerador de potência. Sempre quando a potência nominal do gerador for ultrapassada, devido ao aumento das velocidades do vento, as pás do rotor serão giradas em torno de seu eixo longitudinal, ou em outras palavras, mudam seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque do fluxo de ar. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento pela turbina. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, que é a mínima que se necessita para gerar a potência nominal, o ângulo é escolhido de tal maneira que a turbina produza apenas a potência nominal. (DUTRA, 2007)



Figura 2.33 - Fluxo aderente ao perfil (Fonte: CRESESB, 2007)

Sob todas as condições de vento, o fluxo em torno dos perfis da pá do rotor é bem aderente à superfície (Figura 2.33), produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto. Turbinas com controle de passo são mais sofisticadas do que as de passo fixo controladas por estol, porque estas necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, elas possuem certas vantagens: (DUTRA, 2007)

- permitem controle de potência ativa sob todas as condições de vento, também sob potências parciais;

- alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas);
- maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá);
- partida simples do rotor pela mudança do passo;
- fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor;
- cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal;
- posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em ventos extremos;
- massas das pás do rotor menores levam a massas menores dos aerogeradores.

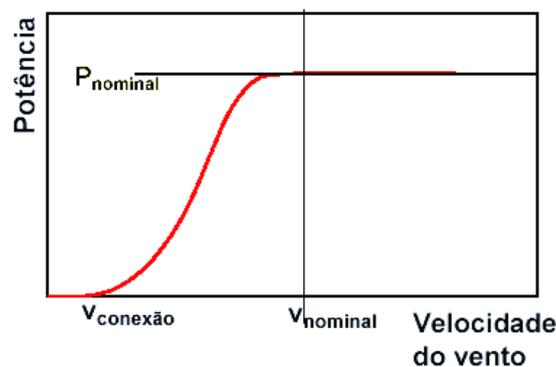


Figura 2.34 - Forma típica de uma curva de potência de um aerogerador com controle de passo
(Fonte: DEWI, 2007)

2.6 Sistema Elétrico de um aerogerador e qualidade de energia

2.6.1 Aerogeradores com velocidade constante

Os aerogeradores com velocidade constante têm o gerador diretamente conectado à rede elétrica. A frequência da rede determina a rotação do gerador e, conseqüentemente, a da turbina. A baixa rotação da turbina n_t é transmitida ao gerador, de rotação n_g por um multiplicador com relação de transmissão r . A velocidade do gerador depende do número de pólos p e da frequência do sistema elétrico f dados por:

$$n_t = \frac{n_g}{r} \quad n_g = \frac{f}{p} \quad n_t = \frac{f}{r.p} \quad (2.10)$$

A Figura 2.35 mostra um esquema elétrico de um aerogerador com velocidade constante. Estas máquinas usam geradores elétricos assíncronos, ou de indução, cuja maior vantagem é sua construção

simples e barata, além de dispensarem dispositivos de sincronismo. As desvantagens destes geradores são as altas correntes de partida e sua demanda por potência reativa. As altas correntes de partida são suavizadas por um tiristor de partida. (DUTRA, 2001)

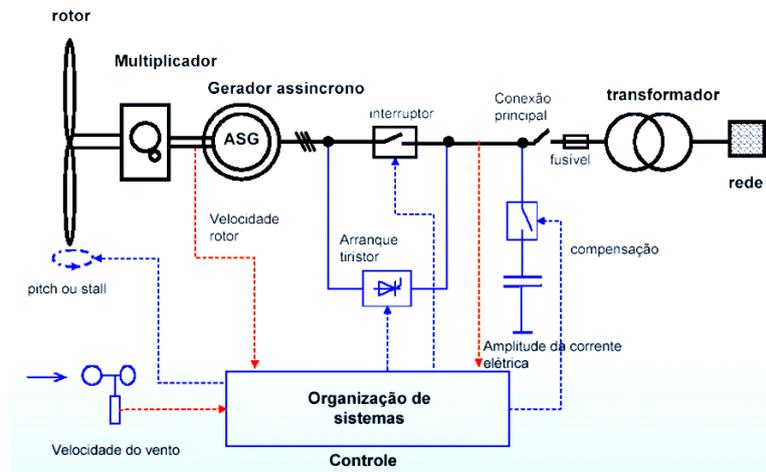


Figura 2.35 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante (DEWI, 2005)

2.6.2 Aero geradores com velocidade variável

Os aerogeradores com velocidade variável podem usar geradores síncronos ou assíncronos como mostra a Figura 2.36.

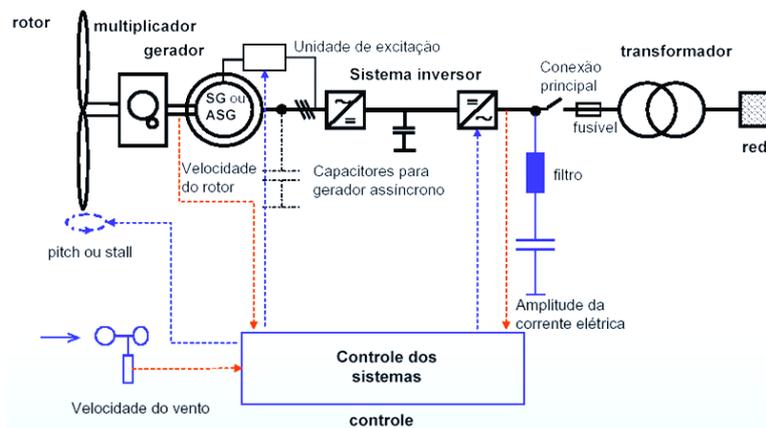


Figura 2.36 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável que usa uma conversora de frequência para o controle da frequência da geração elétrica (DEWI, 2005)

A conexão ao sistema elétrico é feita por meio de um conversor de frequência eletrônico, formado por um conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é invertida, com o controle da frequência de saída sendo feito eletronicamente. Como a frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação, esta será variável em função da variação da

rotação da turbina eólica. Entretanto, por meio do inversor, a frequência da energia elétrica fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico.

Quando são usados geradores assíncronos, ou de indução, é necessário prover energia reativa para a excitação do gerador, que pode ser feita por auto-excitação usando-se capacitores adequadamente dimensionados, de forma similar ao caso do aerogerador com velocidade constante. Neste caso, deve-se observar que os capacitores sejam conectados antes do retificador, uma vez que o conversor de frequência faz isolamento galvânico no sistema, não permitindo a absorção de energia reativa externa, seja do sistema elétrico ou de capacitores. (CUSTODIO, 2002)

Uma alternativa é o uso de geradores assíncronos duplamente alimentados. O uso de enrolamento rotórico associado a uma resistência variável, em série, permite o controle da velocidade do gerador pela variação do escorregamento, mantendo a frequência elétrica do gerador no valor definido pelo sistema elétrico ao qual o aerogerador está conectado. (DUTRA, 2007)

A idéia básica do aerogerador com velocidade variável é o desacoplamento da velocidade de rotação e, conseqüentemente, do rotor da turbina, da frequência elétrica da rede. O rotor pode funcionar com velocidade variável ajustada à situação real da velocidade do vento, garantindo um desempenho aerodinâmico maximizado. Uma vantagem é a redução das flutuações de carga mecânica. As desvantagens são: a complexidade de construção e a geração de harmônicos (associados ao conversor de frequência), que podem ser reduzidos significativamente com o uso de filtros que, por sua vez, aumentam os custos. (CUSTODIO, 2002)

2.6.3 Qualidade da energia

A qualidade de energia no contexto da geração eólica descreve o desempenho elétrico do sistema de geração elétrica da turbina eólica onde quaisquer perturbações sobre a rede elétrica devem ser mantidas dentro de limites técnicos considerando o nível de exigência imposto pelo gerente de operações da rede.

Para a maior parte das aplicações de unidades eólicas, a rede pode ser considerada como um componente capaz de absorver toda a potência gerada por estas unidades com tensão e frequência constantes. No caso, por exemplo, de sistemas isolados de pequeno porte, podem ser encontradas situações onde a potência elétrica fornecida pela turbina eólica alcance valores compatíveis com a capacidade da rede. Problemas também podem ocorrer onde a rede é fraca³, onde, neste caso a qualidade da energia deve ser uma das principais questões a serem observadas sobre a utilização de turbinas eólicas (tamanho, tipo de controle, etc.) (DUTRA, 2007)

³ O conceito de rede “fraca” ou “forte” está intimamente ligado a potência de curto circuito da rede. Uma rede é dita “fraca” quando no ponto de interligação a relação entre a potência de curto circuito da rede e a potência eólico-elétrica injetada na rede é pequena. Se a relação é grande, a rede é dita ser forte ou robusta, sendo capaz de absorver as perturbações elétricas; a rede comporta-se semelhante a um barramento infinito (CARVALHO,2003)

A Tabela 2.3 descreve os principais distúrbios causados por turbinas eólicas na rede elétrica e as respectivas causas que podem ser resumidas em condições meteorológicas, do terreno, e especificamente sobre as características elétricas, aerodinâmicas, mecânicas e de controle presentes na turbina eólica (GERDES,1997)

Tabela 2.3 – Distúrbios causados por turbinas eólicas à rede elétrica

<i>Distúrbios</i>	<i>Causa</i>
Elevação / queda de tensão	Valor médio da potência entregue
Flutuações de tensão e cintilação	Operações de chaveamento Efeito de sombreamento da torre Erro de passo da pá Erro de mudança de direção Distribuição vertical do vento, Flutuações a velocidade do vento Intensidade de turbulências
Harmônicos	Conversores de frequência Controladores tiristorizados Capacitores
Consumo de potência reativa	Componentes indutivos ou sistemas de geração

(Fonte: CARVALHO, 2003)

A conexão à rede elétrica deve ser observada e avaliada ainda na fase de planejamento com cautela. Quando um determinado número de máquinas eólicas é conectado em um parque, o nível de potência entregue por unidade pode variar devido à localização das máquinas no parque e o efeito de “sombra” causado pelas turbinas a montante daquelas que se encontram em fileiras mais afastadas em relação à direção do vento predominante (DUTRA, 2007).

O tipo de gerador utilizado (síncrono ou assíncrono) produz diferentes níveis de flutuação nas variáveis elétricas de saída. Isto pode ser verificado particularmente para as unidades de grande porte, com potência superior a 1 MW, visto que as de pequeno e médio porte podem influenciar a rede apenas quando estão conectadas em grande número. Devido aos baixos valores de escorregamento, geradores assíncronos conectados diretamente na rede elétrica operando com velocidade quase constante geram flutuações mais significativas do que geradores síncronos em velocidade variável, conectados à rede via unidade retificadora/inversora. (CARVALHO, 2003)

2.7 Aplicações dos Sistemas Eólicos

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, de uma unidade de armazenamento.



Figura 2.37 - Considerações sobre o tamanho das turbinas eólicas e suas principais aplicações
(Fonte: NREL, 2006)

2.7.1 Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos ou na forma de energia gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida.

Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O *controlador de carga* tem como principal objetivo não deixar que haja danos à bateria por sobrecarga ou descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas de pequeno porte nos quais os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC). Em turbinas eólicas com geradores assíncronos, a tensão precisa ser retificada antes de alimentar o controlador de carga. (DUTRA, 2007)

Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessária a utilização de um *inversor*. Este dispositivo geralmente incorpora um *seguidor do ponto de máxima potência* necessário

para otimização da potência produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto com a utilização de eletrodomésticos convencionais. (DUTRA, 2007)

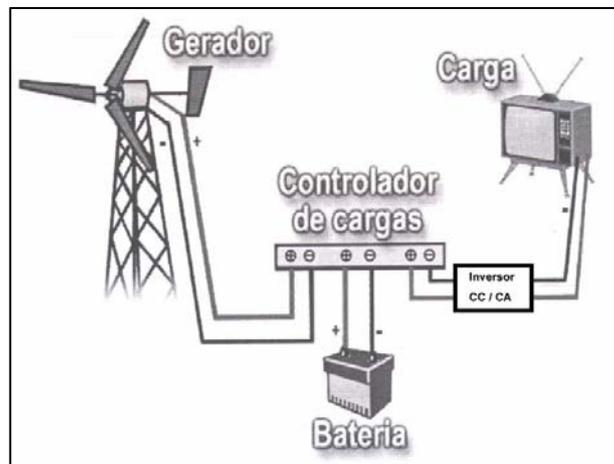


Figura 2.38 - Configuração de um sistema eólico isolado (Fonte: CRESESB, 2000)

2.7.2 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário. (DUTRA, 2007)

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio a grande porte, destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso. (DUTRA, 2007)



Figura 2.39 - Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel (Fonte: CRESESB, 2000)

2.7.3 Sistemas Interligados à Rede

Os sistemas interligados à rede utilizam um grande número de aerogeradores e não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. O total de potência instalada no mundo de sistemas eólicos interligados à rede soma aproximadamente 60 GW (WWEA, 2006) dos quais 75% estão instalados na Europa.



Figura 2.40 - Parque eólico conectado à rede – Parque Eólico da Prainha - CE

2.7.4 Sistemas Off-Shore

As instalações off-shore representam a nova fronteira da geração eólica. Embora representem instalações de maior custo de transporte, instalação e manutenção, as instalações off-shore tem crescido a cada ano principalmente com o esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra. Essa situação é resultado da grande concentração de parques eólicos nestas áreas e das restrições ambientais rigorosas sobre a utilização do solo. (DUTRA, 2007)

A indústria eólica tem investido no desenvolvimento tecnológico da adaptação das turbinas eólicas convencionais para uso no mar. Além do desenvolvimento tecnológico, os projetos off-shore necessitam de estratégias especiais quanto ao tipo de transporte das máquinas, sua instalação e operação. Todo o projeto deve ser coordenado de forma a utilizarem os períodos onde as condições marítimas propiciem um deslocamento e uma instalação com segurança. (DUTRA, 2007)



Figura 2.41 - Parque eólico instalado no mar do norte (Fonte: BRITSC, 2005)

2.8 Considerações finais

O amadurecimento da tecnologia eólica durante as últimas décadas tem favorecido a expansão da potência instalada no mundo, estabelecendo a energia eólica como uma forma de geração complementar de energia elétrica.

As preocupações ambientais e a busca por soluções viáveis para redução da emissão de gases de efeito estufa são outros fatores favoráveis ao desenvolvimento de sistemas eólicos.

No Brasil a complementaridade geográfica, com os melhores sítios coincidindo com as extremidades do Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), e sazonal, maiores médias de vento durante as menores vazões, favorecem estrategicamente o uso da energia eólica aumentando o desempenho e a estabilidade do SIN.

Um dos grandes obstáculos à introdução de uma nova tecnologia é a falta de informação. A utilização de meios de comunicação para divulgação de informações sobre essas tecnologias é uma forma de propiciar a aceitação pela sociedade.

A característica multidisciplinar da energia eólica, que aborda conceitos de mecânica dos fluidos, conversão eletromecânica e eletrônica de potência, torna o tema complexo. Então, a proposta desse trabalho é utilizar sistemas multimídias pela internet para auxiliar a difusão de tecnologias de geração eólica.

No próximo capítulo serão discutidos os paradigmas da educação e o uso de ambientes multimídias interativos como ferramentas de auxílio ao aprendizado. Depois serão apresentadas as perspectivas do uso da realidade virtual na educação e plataformas para o desenvolvimento de ambientes virtuais interativos.

CAPÍTULO 3

3 REALIDADE VIRTUAL E EDUCAÇÃO

3.1 Interação na Educação

3.1.1 Educação a Distância e Educação Presencial

O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de uma nova modalidade de ensino que ultrapassa os limites físicos da sala de aula, denominada Educação a Distância (EAD). Recursos como redes de trabalho, videoconferência, computação colaborativa, Internet, e outros, estão sendo utilizados para uma maior interação do aluno com o professor, melhorando a qualidade do ensino e difundindo educação em diferentes locais e regiões do país e do mundo (SANCHES e PADRO, 2000 *apud* CARDOSO e TORI, 2002).

A Educação a Distância (EAD) tem-se mostrado como um instrumento de qualificação de processo pedagógico e do sistema educacional como um todo, ao contribuir, de forma significativa, para o resgate de valores pedagógicos e propiciar o exercício pleno da cidadania. (CARDOSO e TORI, 2002)

A Tabela 3.1 compara os sistemas de ensino presencial e a distância.

Tabela 3.1 - Comparação entre Ensino Presencial e a Distância

PRESENCIAL	A DISTÂNCIA
ALUNOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Homogêneos quanto à idade • Homogêneos quanto à qualificação • Homogêneos quanto ao nível de escolaridade • Lugar único de encontro • Residência local • Situação controlada / Aprendizagem dependente • A maioria não trabalha. Habitualmente crianças / adolescentes / jovens • Realiza-se maior interação social. • A educação é atividade primária. Tempo integral. • Seguem, geralmente, um currículo obrigatório. 	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogêneos quanto à idade • Heterogêneos quanto à qualificação • Heterogêneos quanto ao nível de escolaridade • Estudam em casa, local de trabalho, etc... • População dispersa • Situação livre / Aprendizagem independente • A maioria é adulta e trabalha. • Realiza-se menor interação social. • A educação é atividade secundária. Tempo parcial. • O próprio estudante determina o currículo a ser seguido.

DOCENTES	
<ul style="list-style-type: none"> • Um só tipo de docente • Fonte de conhecimento • Recurso insubstituível • Juiz supremo da atuação do aluno • Basicamente: educador • Suas habilidades e competências são muito difundidas • Problemas normais em design, desenvolvimento e avaliação curricular • Os problemas anteriores dependem do professor 	<ul style="list-style-type: none"> • Vários tipos de docente • Suporte e orientação da aprendizagem • Recurso substituível parcialmente • Guia de atualização do aluno • Basicamente: produtor de material ou tutor • Suas habilidades e competências são menos conhecidas • Problemas para o design, o desenvolvimento e a avaliação curricular relativos à formação especializada do professor • Os problemas anteriores dependem do sistema
COMUNICAÇÃO / RECURSOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Ensino face a face • Comunicação direta • Oficinas e laboratórios próprios 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensino multimídia • Comunicação diferenciada em espaço e tempo • Oficinas e laboratórios de outras instituições

(Fonte: ARETIO, 1994 *apud* CARDOSO e TORI, 2002)

A partir da análise da tabela identifica-se que EAD permite o aluno ter maior controle sobre o seu roteiro de estudo (aprendizado assíncrono) e dispensa o formalismo e a necessidade de encontros frequentes com professor. Tal característica é especialmente importante em um país da dimensão do Brasil. Mas nesse mesmo aspecto situam-se as principais críticas ao ensino a distância, a fraca interação da comunidade envolvida (CARDOSO e TORI, 2002).

Ao contrário do padrão presencial, o professor passa a ser um guia para o aluno, orientando o mesmo na construção do seu próprio conhecimento.

Do ponto de vista dos recursos e da comunicação, a análise da Tabela 3.1 permite constatar que a comunicação utilizada para EAD está fortemente centrada em utilização de multimídia, podendo ser efetuada com separação em espaço e tempo entre professor e aprendiz. O desenvolvimento de pacotes multimídias envolve conhecimentos de naturezas diversas, existindo a possibilidade de vários professores participarem da produção do material a ser utilizado em EAD, já que não é necessário ao professor detentor do conhecimento relativo ao assunto, o conhecimento de tecnologias relativas à concepção de tais lições com uso de computadores (CARDOSO e TORI, 2002).

Nota-se ainda que a EAD é muito dependente do sistema, fator crucial para a obtenção de bons resultados. Assim, o investimento na concepção do sistema é fator de preocupação e geralmente envolve equipes multidisciplinares (CARDOSO e TORI, 2002).

A aplicação prática dos conhecimentos adquiridos é um dos grandes desafios da EAD, visto a ausência de estrutura laboratorial acessível. Uma alternativa para atenuar essa situação pode ser concebida a

partir do uso de laboratórios virtuais de modo que o aluno possa utilizar recursos de outras instituições disponibilizados remotamente, de forma interativa, como se estivesse em um laboratório real.

A EAD na fase atual é caracterizada pelo auto-aprendizado com o suporte de recursos tecnológicos altamente diferenciados, como a integração das redes de computadores e computadores pessoais e provê formas de comunicação assíncrona e síncrona⁴ (SABA, 1999 *apud* CARDOSO e TORI, 2002). Essa ferramenta de ensino gera um grande diferencial no que se refere às possibilidades de estabelecimento da comunicação síncrona, tida como capaz de prover maiores condições de reflexão e de elaboração de novos saberes pelos alunos (ARAGÃO *et al.*, 2000 *apud* CARDOSO e TORI, 2002).

Nessa perspectiva, o uso de tecnologias interativas (como Multimídia, Hiperídia e Realidade Virtual) dá uma nova dimensão ao ensino e aprendizado na Educação a Distância (EAD), via Internet. Apoiada por tecnologias capazes de prover alta interatividade retornando respostas em tempo real, que, aliadas a redes de computadores podem ser ainda mais extensíveis. Diante disto, é proposta uma adequação da terminologia, associada ao conceito de Educação Virtual Interativa – EVI (TORI e FERREIRA, 1999 *apud* CARDOSO e TORI, 2002). EVI é aplicada de forma a representar meios de aprendizagem que eliminam distâncias (não apenas espaciais, mas também temporais e operacionais) e possibilitam catalisar eficiência na aprendizagem, usando tecnologias interativas (CARDOSO e TORI, 2002).

3.1.2 Educação Virtual Interativa – EVI

Dos meios relativos à EVI, a comunicação mediada por computador suportada pela Internet é capaz de habilitar pessoas com interesses comuns, separadas por distâncias físicas, a estabelecerem e manterem convenientes relações, definindo verdadeiras comunidades virtuais (HILTZ e WELLMAN, 1997 *apud* CARDOSO; TORI, 2002).

Porém existem problemas vivenciados por tais comunidades, relacionados com algumas barreiras significativas com relação à colaboração na WEB. A característica não homogênea de tais comunidades

⁴ **Comunicação assíncrona:** Termo utilizado em educação à distância para caracterizar a comunicação que não ocorre exatamente ao mesmo tempo, não-simultânea. Dessa forma, a mensagem emitida por uma pessoa é recebida e respondida mais tarde pelas outras. Exemplos: curso por correspondência, correio eletrônico e algumas teleconferências computadorizadas. É o oposto de comunicação síncrona.

Comunicação síncrona: Termo utilizado em educação à distância para caracterizar a comunicação que ocorre exatamente ao mesmo tempo, simultânea. Dessa forma, as mensagens emitidas por uma pessoa são imediatamente recebidas e respondidas por outras pessoas. Exemplos: ensino presencial, conferências telefônicas e videoconferências. É o oposto de comunicação assíncrona. (MENEZES e SANTOS, 2002)

levanta questões relacionadas ao meio e à forma de aplicá-la, principalmente, como ferramenta educacional (RAPOSO *et al.*, 1999 *apud* CARDOSO e TORI, 2002).

Lawhead *et al.* (1997) *apud* Cardoso e Tori (2002) apresentam as razões que tornaram a Internet uma ferramenta atrativa para EVI:

- a) Acessibilidade: ela está acessível a diferentes usuários (professores e alunos), propiciando cursos em áreas remotas, instrução em qualquer horário e pesquisa computacional;
- b) Independência de plataformas, associada à grande diversidade de sistemas operacionais e hardware existente;
- c) Transparente "mudança em modalidade": podem-se usar diversas modalidades, sem a mudança do equipamento;
- d) Globalização dos cursos: possibilidade de internacionalização de cursos, difundindo rapidamente novos conceitos;
- e) Ênfase em criação de aprendizes como produtores: os aprendizes podem participar de forma ativa do processo, tornando-se desenvolvedores.

Baseados na utilização da Internet e de forma a estabelecer parâmetros de diferenciação, Tori e Ferreira (1999) *apud* Cardoso e Tori (2002) distinguem três formas básicas de EVI:

- I) EVI presencial: caracterizada pelo deslocamento dos estudantes até um centro - "Centro de EVI", onde participam de aulas presenciais, nesta modalidade, a tecnologia se presta a diminuir apenas a distância operacional;
- II) EVI remota: o estudante define o local de seu aprendizado e pode participar de uma EVI síncrona, em que as informações são trocadas simultaneamente entre professores e alunos, como uma videoconferência ou assíncrona, em que a troca de informações se dá, por exemplo, por e-mail;
- III) EVI mista: compreende uma união das duas formas anteriores, com reuniões periódicas dos grupos e o estudo remoto.

Um caso de aplicação de EVI mista pode ser visto na Universidade de São Paulo para disciplina de cursos de pós-graduação *Hipermídia e Multimídia*, que tem utilizado recursos de lista de discussão, chat e auto-aprendizagem no processo de ensino desde 1995 (TORI e FERREIRA, 1999 *apud* CARDOSO e TORI, 2002). Nesta proposta, parte das aulas é realizada em laboratórios com terminais conectados a Internet e a pesquisa de seminários e monografias, como parte da avaliação da disciplina, vêm sendo desenvolvidas via Internet. Os resultados são divulgados continuamente nas páginas da disciplina, como forma de motivar os alunos. Essa experiência tem sido avaliada positivamente, com casos de alunos que colaboram com a página da disciplina mesmo após a conclusão do curso.

Segundo os autores, observa-se que o estudante, motivado, acaba por adotar uma postura mais ativa, independente e responsável, desenvolvendo competências de comunicação oral e escrita, capacidade de pesquisa e comportamento ético, dentro de seu próprio estilo. Já o professor, por sua vez, deixa de ter um papel de autoridade e se tornar um conselheiro, guia do grupo, orientador, facilitador, mediador e é também exigido em termos de participação na busca da melhor solução (CARDOSO e TORI, 2002).

Conclui-se que EVI favorece a criação de um ambiente de ensino mais participativo permitindo a troca de grande quantidade de informações e enriquecimento do conteúdo, aprimora professores e alunos e torna a experiência mais motivadora para todos os usuários.

Mas como toda nova tecnologia, o uso da Internet e de programas computacionais como aliados ao processo educacional, cria uma diversidade de problemas e falsas soluções. Alguns autores como Bork; Britton (1998), Aragão *et al.* (2000) e Maçada; Basso (2000), visando à análise de tais problemas e soluções apontam algumas decepções, uma vez que grande parte de cursos de EVI não provê (ou provê muito pouca) interação e identificam que há grande risco (na avaliação de resultados), sobretudo quando a Internet é usada como fator principal de ensino (CARDOSO e TORI, 2002).

Assim, segundo Bork e Britton (1998) e Lawhead (1997) *apud* Cardoso e Tori (2002) são desvantagens do uso inadequado dos meios:

- (a) uma fraca interação, sem a qual qualquer esforço de aprendizado pode ser perdido. Enquanto a linguagem natural, presente no ensino face a face envolve séculos de refinamento no sentido de melhoria da comunicação, a interação na rede é limitada;
- (b) falta de tratamento particular para cada estudante, sendo que um grande número de pessoas diferentes e com diferentes graus de dificuldades são tratadas de forma similar;
- (c) problemas relacionados com a rede em si, envolvendo dificuldade de tráfego; inacessibilidade para alguns e tempo excessivo de carga, além da impossibilidade da comunicação bidirecional para alguns sítios;
- (d) custos de equipamento elevado;
- (e) gerenciamento de problemas relacionados a montagens de sítios, tais como violações de direitos autorais;
- (f) incerteza do livre acesso a Web ser continuado: será que o livre acesso a Web não tem prazo para terminar?

Segundo Lawhead (1997) *apud* Cardoso e Tori (2002), o uso dos meios (Internet, ferramentas de desenvolvimento, projetos de concepção, propostas do que pode ser disponibilizado de forma virtual interativa etc.) de forma a propiciar uma melhoria da aprendizagem, quer seja exclusivamente presencial, quer seja virtual interativa deve ser baseado em análise da necessidade e em projeto direcionado a soluções específicas, sob pena de expectativas frustradas por más soluções.

3.2 Realidade Virtual

A Realidade Virtual (RV) possui diversas definições, devido à natureza interdisciplinar da área e da sua evolução. Em geral, a RV refere-se a uma experiência imersiva e interativa baseada em imagens gráficas em 3D geradas em tempo real por computador, podendo simular um mundo real ou imaginário.

Pimentel (1995) *apud* Braga (2001) define RV como o uso de alta tecnologia para convencer o usuário de que ele está em outra realidade, promovendo completamente seu envolvimento.

Segundo Kirner (1997) *apud* Cardoso e Tori (2002), pode-se definir Realidade Virtual como uma forma das pessoas visualizarem, manipularem e interagirem com computadores e dados extremamente complexos, na qual idéias como imersão, interação e envolvimento com o ambiente virtual são consideradas básicas e fundamentais. Uma das principais vantagens desta tecnologia é o envolvimento amplo de sentidos do ser humano na interação homem-máquina.

Considerando todos os conceitos relativos à Realidade Virtual (RV), pode-se concluir que a mesma é uma técnica avançada de interface, na qual o usuário realiza imersão (estar dentro do ambiente), navegação e interação em um ambiente resumidamente tridimensional gerado pelo computador por intermédio de vias multi-sensoriais. (BRAGA, 2001)

A RV tem sido aplicada em diversas áreas tais, como: entretenimento, treinamento, apresentação de protótipos e educação.

Existem três idéias básicas que caracterizam um sistema de RV (BRAGA, 2001). São elas:

- Imersão: Todos os dispositivos sensoriais são importantes para o sentimento de imersão. Normalmente, usam-se objetos como capacetes de visualização e salas de projeções das visões para auxiliar na imersão.
- Interação: Esta idéia está relacionada com a capacidade do computador em detectar as entradas do usuário e modificar instantaneamente o mundo virtual e as ações sobre ele (capacidade reativa).
- Envolvimento: está relacionada com o grau de motivação para o engajamento de uma pessoa com determinada atividade, podendo ser passivo ou ativo.

A partir de sons e imagens geradas dinamicamente e com o uso de equipamentos especiais (que podem verificar vários movimentos do corpo do usuário), a RV pode criar um ambiente envolvente e propiciar experiências mais realísticas ao usuário.

Com o uso de Ambientes Virtuais (AV) é possível permitir a exploração pelo usuário de forma particular e que atenda suas expectativas com respeito à investigação. Assim, RV pode possibilitar visitas a lugares imaginários, modificando tamanhos, tais como a exploração de um universo imaginário ou da estrutura de um átomo, levando o usuário a forte inserção no contexto de um dado tópico ou assunto, sem

riscos, como os presentes no manuseio de equipamentos físicos ou componentes químicos perigosos (PINHO, 1996 apud CARDOSO e TORI, 2002).

O uso de ambientes virtuais compartilhados traz a possibilidade de reuniões virtuais e encontro temporal entre pessoas separadas no espaço. Esses ambientes podem ser utilizados em aplicações corporativas, proporcionar encontros inesperados e a formação de comunidades virtuais com forte comunicação síncrona e abstração de ambientes reais. Um exemplo de ambiente virtual compartilhado é o *Second Life*⁵ que permite ao usuário interagir com outros usuários em tempo real através do seu *avatar* (representação gráfica do usuário no mundo virtual visto pelos outros usuários).

Visando a aplicação em educação, o alto potencial de desenvolvimento de visualizações pode ser destacado como uma das principais importâncias de Realidade Virtual.

Ferramentas de RV, destinadas à educação, favorecem a fixação de conteúdos a curto e longo prazo e criam uma nova forma individualizada de representação de conhecimentos, propiciando melhor tratamento das informações (PINHO, 2000 apud CARDOSO e TORI, 2002). Esta nova forma de pensamento e processamento de informações possibilita um melhor estabelecimento de conexões, relações, soluções de problemas e efetiva memorização (CARDOSO e TORI, 2002).

3.2.1 Justificativas ao uso de Realidade Virtual na Educação

O uso de RV na educação tem sido avaliado de forma intensiva nos últimos anos (PANTELIDIS, 1996 apud CARDOSO e TORI, 2002). Os resultados destas avaliações têm sido positivos, com ganhos em termos de aprendizagem superiores a outras formas de interação visando educação mediada por computador.

Segundo Pinho (1996) apud Cardoso e Tori (2002), a interação do aluno com o AV pode influenciar positivamente o processo de aprendizado, sendo que uma das principais justificativas, a esta influência, está na forma de aprendizado, que pode ser baseada em experiências de 1ª pessoa.

Podemos dizer que:

“Experiências de 1ª pessoa são aquelas na qual o indivíduo conhece o mundo através de sua interação com ele, sendo caracterizado como um conhecimento direto, subjetivo e frequentemente inconsciente (o aprendiz não tem a clara definição que está aprendendo). Tais experiências são naturais e, geralmente, privadas. Por outro lado, experiências de 3ª pessoa são aquelas na qual o aprendiz ouve o relato de uma experiência ou aprende a partir da descrição

⁵ O Second Life (também abreviado por SL) é um ambiente virtual e tridimensional que simula em alguns aspectos a vida real e social do ser humano. Dependendo do tipo de uso pode ser encarado como um jogo, um mero simulador, um comércio virtual ou uma rede social.

feita por outra pessoa. Esta forma de aprendizado é objetiva, consciente e implícita. Como RV permite a imersão e a exploração individual, o aprendiz vive experiências de 1ª pessoa e explora a informação como uma experiência diária. (CARDOSO e TORI, 2002, p. 16-17)”

Vários autores concordam ao relatar que existem diversas razões para se usar a Realidade Virtual na educação. Dentre elas destacamos: (CARDOSO e TORI, 2002)

- (a) motivação de estudantes e usuários de forma geral, baseada na experiência de 1ª pessoa vivenciada pelos mesmos;
- (b) grande poderio de ilustrar características e processos, em relação a outros meios multimídia;
- (c) permite visualizações de detalhes de objetos;
- (d) permite visualizações de objetos que estão a grandes distâncias, como um planeta ou um satélite;
- (e) permite experimentos virtuais, na falta de recursos, ou para fins de educação virtual interativa;
- (f) permite ao aprendiz refazer experimentos de forma atemporal, fora do âmbito de uma aula clássica;
- (g) porque requer interação, exige que cada participante se torne ativo dentro de um processo de visualização;
- (h) encoraja a criatividade, catalisando a experimentação;
- (i) provê igual oportunidade de comunicação para estudantes de culturas diferentes, a partir de representações;
- (j) ensina habilidades computacionais e de domínio de periféricos.

3.2.2 Modalidades de Interação em RV

As modalidades de interação em ambientes virtuais podem ser divididas nos seguintes grupos distintos (COSTA, 2000 *apud* CARDOSO e TORI, 2002), (PINHO, 2000 *apud* (CARDOSO e TORI, 2002):

- I) Imersão subjetiva (ou RV não-imersiva): obtida com o uso de monitores e programas que simulam e exploram as projeções perspectivas e transformações geométricas, dando ao usuário a impressão de estar imerso em um ambiente virtual. Periféricos comumente usados: monitor de vídeo, teclado, mouse, joystick;
- II) Imersão subjetiva com projeção do usuário: o usuário se vê dentro do ambiente virtual que está projetado em um monitor de vídeo através de sua imagem, que é incluída no AV, também qualificada como RV projetada;
- III) Imersão espacial: onde o usuário parece estar dentro do ambiente através do uso de dispositivos de imagens e sensores de posição/movimento acoplados ao corpo e capazes de possibilitar a

interação direta com o ambiente. Neste caso, eventos ocorrem em todas as direções e consideram os movimentos do usuário. Periféricos comumente usados: capacetes, luvas de dados, sensores de movimento, salas de projeção;

- IV) Imersão espacial em CAVE: extensão da anterior permite a um grupo de usuários participarem simultaneamente de um ambiente virtual, através de projeções de imagens em superfícies que envolvem o(s) usuário(s);
- V) Telepresença: o usuário atua, através de instrumentos, em outros locais por meio de operações realizadas no mundo real. Neste caso, a visualização geralmente se dá através de câmeras de vídeo.

Nesse trabalho será desenvolvida uma interface em RV para a utilização em monitores de vídeo (imersão subjetiva). Alguns fatores que justificam o desenvolvimento deste tipo de interface baseiam-se no custo de equipamentos e na facilidade de concepção de aplicativos. A linguagem utilizada para o desenvolvimento do ambiente virtual será o VRML (Virtual Reality Modeling Language).

Um aspecto crucial na concepção de AVs que é em muitos casos esquecido ou subestimado é a caracterização de usuários potenciais. Desse modo, usuários com perfis diferenciados (como idade, prévio acesso a computadores, estilo de aprendizado, qualificação) acabam por serem considerados de forma única. Como solução a estes problemas, o desenvolvimento direcionado a domínios de aplicação, com forte caracterização do cliente pode limitar o que se deseja do sistema, ao mesmo tempo em que amplia a condição de utilização por usuários do domínio - facilitando a análise de tarefas do sistema e envolvendo o usuário no ciclo de desenvolvimento. (CARDOSO e TORI, 2002)

Conclui-se que o desenvolvimento de ambientes virtuais como ferramentas educacionais com a prévia análise de domínio e de usuários pode amenizar o risco da concepção de ambientes restritos em tarefas e que possam ser desmotivadores. Com isso, a participação dos clientes potenciais nos processos de concepção e validação de protótipos do sistema a ser desenvolvido é importante, através da coleta de opiniões para o aprimoramento das interfaces e das formas de interação do AV.

3.3 Laboratórios Virtuais

O conceito de Laboratórios Virtuais pode ser agrupado em duas classes distintas: Laboratórios Remotos e Laboratórios com Conteúdo Exclusivamente Virtual. Componentes das duas classes podem ser acessados remotamente, via rede de computadores. (Souza e Oliveira, 2001 *apud* CARDOSO e TORI, 2002)

3.3.1 Laboratórios Remotos

Um conjunto de instrumentos de simulação de experimentos está conectado a um computador ligado à internet que possibilita o acesso remoto a outros computadores. Desse modo o experimentador pode acessar o laboratório remoto e realizar simulações, testes e coleta de dados de um experimento. Imagens de câmaras de vídeo permitem ao experimentar observar o que acontece durante as simulações, podendo orientar um técnico que estivesse presente fisicamente no laboratório a alterar ou montar novos experimentos.

A utilização desta tecnologia permite inclusive a conexão de diversos laboratórios simultaneamente, além de permitir que instituições remotas e sem acesso a um dado equipamento (de elevado custo, por exemplo) possam partilhar informações e resultados de experimentos. (CARDOSO e TORI, 2002)

3.3.2 Laboratórios com Conteúdo Exclusivamente Virtual

Um laboratório com conteúdo exclusivamente virtual é baseado programas computacionais capazes de simularem um dado experimento e permitir a coleta dos dados experimentais por usuários da Internet. O laboratório não dispõe de equipamentos e experimentos reais, citados no item anterior. As simulações, modelagens e visualizações são de conteúdo virtual.

Segundo Cardoso e Tori (2002), destacam-se como vantagens dos laboratórios com conteúdo exclusivamente virtual:

- i) redução da necessidade de equipamentos para as simulações;
- ii) possibilidade de complementar o aprendizado e ser utilizado para experimentar da mesma forma que ocorreria em um laboratório real;
- iii) capacidade de simular experiências de grande complexidade;
- iv) capacidade de permitir que um experimentador desmonte, visualize e associe peças de difícil (ou impossível) manuseio prático, seja por questões de custo, risco ou de ordem prática de elaboração;
- v) possibilidade de uso em atividades onde o tempo ou o custo de produção de um experimento tornariam a montagem real da mesma inviável.

A Realidade Virtual possibilita a criação de ambientes virtuais similares aos laboratórios reais permitindo ao usuário a experiência intuitiva em um ambiente mais amigável e familiar. Neste caso, tais laboratórios podem se utilizados na forma de preparação para uma aula presencial, como complemento ao conteúdo ministrado pelo professor ou simplesmente como um recurso que permita ao aprendiz interagir com um dado experimento e colher informações úteis ao seu aprendizado (CARDOSO e TORI, 2002).

3.3.3 Exemplos de Laboratórios Virtuais

3.3.3.1 Interactive Power Electronics Seminar (IPES)

O Projeto IPES disponibiliza programas em applets Java, desenvolvidos pela ETH Zurich, que são usados como parte do Curso Introdutório em Eletrônica ensinado pelo Prof. Kolar na mesma instituição. Os applet animados e interativos são usados com apoio ao aluno em sala de aula usando computadores ou projetores. Esses aplicativos são disponibilizados na internet permitindo ao aluno a oportunidade de experimentar e aprender em casa de forma eficiente (KOLAR, 2007).

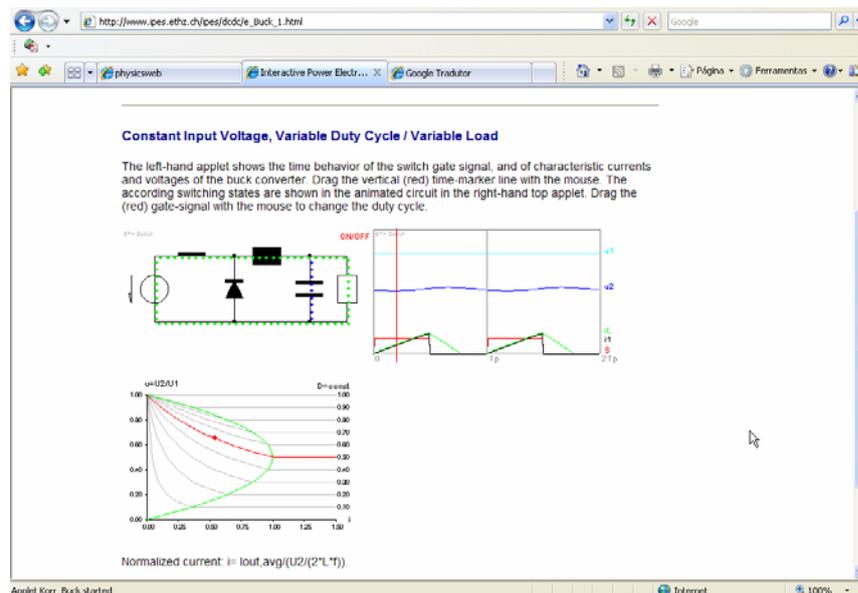


Figura 3.1 - Simulação do funcionamento de um conversor do tipo Buck (Fonte: KOLAR, 2007)

3.3.3.2 VRML Gallery of Electromagnetism

Trata-se de um sítio da Internet (SALGADO, 2007) que disponibiliza um conjunto de mundos estáticos desenvolvidos em VRML relacionados ao conteúdo de Física, principalmente com Eletromagnetismo. A galeria de experimentos apresenta diversas simulações, tais como: adição de vetores, produtos vetoriais, campos elétricos de cargas puntiformes, dipolos elétricos e esferas condutoras, campos

magnéticos gerados por correntes elétricas (Lei de Ampere) e outros relacionados a fundamentos da eletricidade.

As animações em VRML permitem aos usuários navegar por espaços 3D onde se encontram cargas elétricas, correntes elétricas e vetores relacionados com Campos Elétricos e Magnéticos. A Figura 3.2 apresenta a visualização disponível para a Lei de Faraday, onde vetores de Campo Magnético induzidos por uma corrente elétrica passando em um condutor cilíndrico são apresentados.

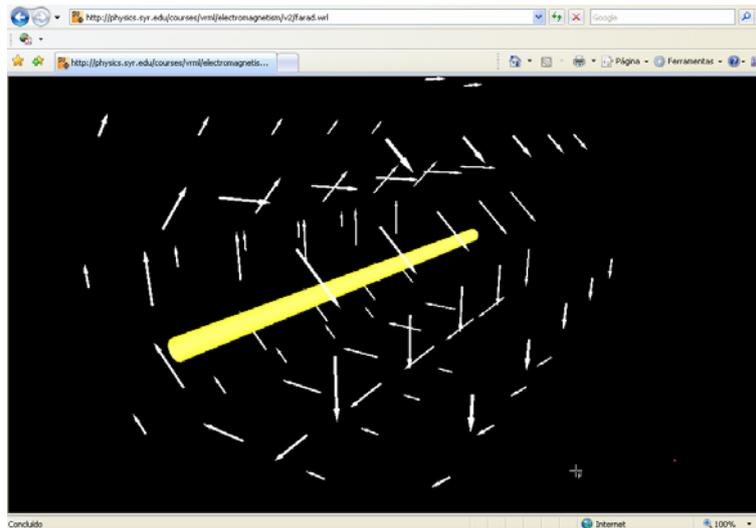


Figura 3.2 - Lei de Faraday por VRML Gallery of Eletromagnetism (Fonte: SALGADO, 2007).

3.3.3.3 AVIT - Ambiente Virtual Interativo

Pesquisadores da Universidade Federal de São Carlos trabalharam na criação de um ambiente virtual interativo, utilizando Java e VRML para concepção de uma plataforma para desenvolvimento de aplicações interativas de Realidade Virtual, o AVIT – Ambiente Virtual Interativo (IPOLITO e KIRNER, 2000 *apud* CARDOSO e TORI, 2002). Mas aparentemente o projeto foi encerrado e nenhum protótipo está disponível na Web.

AVIT é um sistema centralizado de RV multi-usuário que, através da combinação VRML/Java possui dois módulos: o módulo servidor (construído em Java) e o módulo cliente (construído em VRML e Java). Com o uso de um navegador de WEB compatível e o módulo cliente, um usuário pode escolher um avatar, entrar com seus dados e interagir com outros usuários conectados simultaneamente. O usuário, quando entra no sistema, adentra num mundo virtual 3D que pode ou não ser uma representação de um cenário real, como um museu virtual.



Figura 3.3 - Página WEB do Programa AVIT - Página Inicial (Fonte: CARDOSO e TORI, 2002)

A implementação foi desenvolvida com utilização de VRML e Java: VRML para simulações do ambiente 3D e do avatar e Java contribui com applets que coordenam a conexão com o servidor, interação entre usuários e entre usuário/mundo virtual, além de ser fundamental no módulo servidor.

O projeto demonstra a viabilidade de união Java/VRML para elaboração de ambientes virtuais colaborativos na Internet, que possibilitem diversos usuários trocarem informações e interagirem mediante um mundo virtual, sem, no entanto permitir que usuários modifiquem o que está sendo visto ou que criem seus próprios mundos virtuais (CARDOSO e TORI, 2002).

3.3.3.4 Visita Virtual a Casa Solar Eficiente do CEPEL

A Casa Solar Eficiente do CEPEL é um agente multiplicador de tecnologias de utilização de energia solar térmica e fotovoltaica, bem como técnicas de combate ao desperdício energético. Localizada nas instalações do CEPEL é parte do segmento residencial do CATE e do CRESESB na sua estratégia de formação de Centros de Demonstração. A Casa Solar já recebeu mais de 10.000 visitantes nos últimos 10 anos. A Visita Virtual a Casa Solar permite a usuários da rede, conhecer um pouco mais sobre tecnologias limpas e eficientes aplicadas em uma casa real, de qualquer lugar e a qualquer hora.

O ambiente virtual disponibilizado on-line, inteiramente desenvolvido em VRML e Javascript, permite ao usuário obter informações a partir de objetos vistos em cena ou de um menu de navegação. Esse sistema permite ao usuário diferentes formas de navegação na cena. O AV, entretanto, possui limitações sobre a interação com os objetos em cena, ficando restrito a apenas obter informações sobre os mesmo. Somente alguns objetos possuem certo tipo de interação, como modificar a posição ou tornar paredes invisíveis para poder observar o seu interior.



Figura 3.4 - Interface da Visita Virtual a Casa Solar Eficiente do CEPEL. (Fonte: CRESESB, 2007)

3.4 Tecnologias e Interfaces para desenvolvimento de conteúdo de EVI através da internet

3.4.1 HTML

O HTML é o acrônimo para Hyper Text Markup Language. É uma linguagem de marcação utilizada para produzir páginas na Web. As *tags* (etiquetas marcadas) dizem ao *browser* (navegador) da internet como uma página deve ser exibida. Um arquivo HTML deve ter a extensão *.htm* ou *.html* e pode ser criado usando um simples editor de texto.

Um documento HTML é formado por elementos de HTML que tem a seguintes características:

- *tags* HTML são usadas para marcar elementos de HTML
- *tags* HTML são envolvidas por dois sinais < e >
- *tags* normalmente vem em pares como e e
- a primeira *tag* em um par é a *tag* de início, a segunda é *tag* final
- o texto entre as *tag* de início e fim é conteúdo do elemento
- *tags* não são *case sensitive*, isto é, é igual a

As especificações e recomendações do HTML 4.01 podem ser encontradas no site da *World Wide Web Consortium* (W3C).

3.4.2 HTML DOM

O HTML Document Object Model (HTML DOM) define um padrão para acessar e manipular documentos HTML.

Com JavaScript um document HTML pode ser inteiramente reestruturado. Para alterar qualquer coisa em uma página, o JavaScript precisa acessar todos os elementos em um documento HTML. Esse acesso, junto com métodos e propriedades para adicionar, mudar, ou remover elementos HTML, é feito através do Document Object Model (DOM). (REFSNES, 2007)

De acordo com o DOM, tudo em um documento HTML é um nó. O DOM define que: (REFSNES, 2007)

- Todo o documento é um nó *document*
- Toda tag HTML é um nó *element*
- O texto contido no elemento HTML é um nó *text*
- Todo atributo HTML é um nó *attribute*
- Comentários são nós *comment*

Para encontrar e acessar o elemento que se deseja manipular existem algumas formas: (REFSNES, 2007)

- Usando os métodos *getElementById()* e *getElementsByTagName()*
- Usando as propriedades *parentNode*, *firstChild*, e *lastChild* de um nó *element*

A sintaxe do método *getElementById()* é:

```
document.getElementById("ID");
```

3.4.3 VRML

O Anexo I trata com mais detalhes a linguagem VRML (Virtual Reality Modeling Language) e discute seus tipos de nós. No Anexo II existe uma lista com todos os nós primitivos do VRML.

VRML é uma linguagem independente de plataforma que permite a criação de ambientes virtuais. Nestes ambientes pode-se navegar, visualizar objetos por ângulos diferentes e interagir com eles. (SILVA, 2001)

A linguagem VRML surgiu da necessidade de prover um formato gráfico 3D para a Web seguindo um modelo similar à HTML, ou seja, uma linguagem textual independente de plataforma para a descrição de cenas. A linguagem escolhida como referência foi a Open Inventor da SGI. Em 1995 foi lançada a VRML 1.0, que era basicamente um formato para a descrição de cenas estáticas 3D. Em 1997 foi lançada a VRML

2.0 (ou VRML 97), que adicionou à linguagem conceitos, tais como possibilidade de mover objetos na cena e criação de sensores para detectar e gerar eventos. (SILVA, 2001)

Segundo Silva (2001), o objetivo da VRML é levar conceitos da realidade virtual ao usuário comum, através da internet. Com rápido avanço das tecnologias, são oferecidos computadores pessoais com maior velocidade de processamento e placas de vídeo cada vez mais poderosas. Isso faz com que a realidade virtual seja mais acessível a usuários comuns, não se restringindo aos grandes centros de pesquisa.

Arquivos que simulam mundos 3D em VRML, são na verdade uma descrição textual, na forma de textos ASCII, de forma que, por meio de qualquer processador de textos, um desenvolvedor possa conceber tais arquivos. Tais códigos definem como estão as formas geométricas, as cores, as associações, os movimentos, enfim, todos os aspectos relacionados com a idéia do autor. Quando um dado navegador lê um arquivo com a extensão ".wrl" isento de erros, o mesmo constrói o modelo descrito, por ativação de um programa auxiliar específico (plug-in). (CARDOSO e TORI, 2002)

Um arquivo VRML é caracterizado por quatro elementos principais: (i) o cabeçalho (obrigatório); (ii) os protótipos; (iii) a descrição da cena: as formas, interpoladores, sensores, scripts e (iv) as rotas. O cabeçalho é composto pela instrução `#VRML V2.0 utf8` e sua omissão impossibilita o plug-in do navegador de ler o arquivo em questão. (CARDOSO e TORI, 2002)

Segundo Cardoso e Tori (2002), podemos destacar algumas características de VRML:

- (a) Usando VRML, a concepção de cenários tridimensionais se baseia na elaboração de um grafo direcionado acíclico, contendo diferentes ramos (ou nós), que, associados de forma correta podem ser agrupados. A grande diversidade destes nós (cinquenta e quatro pré-definidos), incluindo primitivas geométricas, propriedades de aparência, sons (e propriedades) e vários tipos de nós de agrupamentos, é uma das principais características, e qualidades, da linguagem.
- (b) VRML permite reutilização de código através da prototipação, baseada na definição de novos nós, denominados protos, que podem ser definidos em um arquivo, na forma de objetos e posteriormente, serem utilizados por outros arquivos ou ativados dentro de um arquivo como um nó externo, evitando a duplicação de códigos.
- (c) Do ponto de vista de construção de cenários 3D, VRML provê *nós* para criação e modificação de fundos de cenários, com o uso de nós específicos - backgrounds, - que simulam ambientes diferenciados assemelhados a condições que variam de um dia ensolarado, para nublado, com neblina ou mesmo noites.
- (d) VRML possibilita controle de aparência de elementos do cenário e a inserção de diferentes formas de fontes de luz (pontuais, direcionais, ambiente), o que permite dar mais realismo ao cenário concebido. Recursos de acrescentar sons e filmes também estão disponíveis por utilização de nós específicos e são compatíveis com os principais formatos de áudio e vídeo: .mpeg, .mpg, .mid., .wav (Allison, 1997).

- (e) Associada a Java ou JavaScript, podem ser elaborados scripts, de forma a complementar a troca de informações entre os elementos do mundo virtual e destes com os usuários. Esta propriedade prevê possibilidade de animações e de dinamismo às formas concebidas e inseridas no cenário.

3.4.4 JavaScript

JavaScript é a linguagem de script mais popular da internet, e funciona na maioria dos principais navegadores como: Internet Explorer, Mozilla, Firefox, Netscape, e Opera. É voltada ao desenvolvimento de programas pequenos (*scripts*). O código JavaScript é lido pelo navegador como código-fonte (Winters et al., 1997 *apud* CARDOSO e TORI, 2002).

Apesar da semelhança de nomes, Java e JavaScript são duas linguagens diferentes tanto na concepção como no projeto. JavaScript é normalmente mais fácil de aprender e usar do que o Java, porque é mais simples e não necessita de compilação do código. Scripts simples escritos em JavaScript são geralmente menores do que o script equivalente escrito em Java (o tamanho mínimo de um arquivo Java .class é entorno de 200 bytes), e inserindo o código do script dentro do arquivo VRML significa que o VRML browser tem que fazer menos pedidos de busca de HTTP. Entretanto, Java é mais poderoso do que JavaScript e executará scripts longos muito mais rápido. (CAREY e BELL, 1997)

As principais características do Javascript são descritas abaixo: (REFSNES, 2007)

- JavaScript foi projetado para adicionar interatividade às páginas HTML
- JavaScript é uma linguagem de script
- Uma linguagem de script é uma linguagem de programação mais simples
- Um JavaScript consiste de comandos executáveis
- Um JavaScript é normalmente *embedded*⁶ diretamente dentro de páginas HTML
- JavaScript é uma linguagem interpretada (significa que comandos são executados sem compilação prévia)
- Qualquer um pode usar JavaScript sem adquirir uma licença

Scripts podem ser associados ao código HTML de uma página Web, propiciando uma forma acessível de aumento de interatividade e funcionalidade, ou inseridos junto ao código ASCII correspondente a um arquivo VRML (AMES *et al.*, 1997 *apud* CARDOSO e TORI, 2002), permitindo alterações dinâmicas dos objetos do mundo virtual modelado, como o controle de transformação e alteração da estrutura da cena.

⁶ Em termos digitais, *embedded* refere-se ao processo de anexar um arquivo ou item de mídia dentro do contexto de outro arquivo para reprodução ou uso. (GOOGLE, 2007)

O JavaScript pode ser ceado ao VRML através do nó *Script* permitindo ações mais complexas, como: resultados de saída de animações computacionais; trocas de informações entre computadores da rede ou a definição de comportamentos baseados nas ações dos usuários e dos demais objetos do mundo modelado.

O nó *Script* do VRML é composto por:

- dados comuns (*Fields*): relativos a valores de variáveis manuseados pelas funções;
- interfaces de entrada de dados (*EventIn*): associadas ao recebimento de mensagens de objetos do mundo virtual;
- interfaces de saída de dados (*EventOut*): relativas ao envio de dado a objetos ou scripts do mundo virtual;
- corpo de funções (*url*): contém as funções responsáveis pelo manuseio dos dados recebidos como eventos externos e pelo envio de dados.

Através desta associação, é possível a concepção de objetos VRML capazes de respostas a solicitações externas e alteração de atributos dinamicamente.

O Anexo II apresenta a API (Interface de Programação de Aplicativos) de Javascript do VRML.

3.4.5 External Authoring Interface (EAI)

A EAI é uma interface para permitir que ambientes externos acessem os nós de uma cena VRML.

Embora a EAI tenha objetivos similares aos do nó *Script* do VRML (processamento de eventos definindo o comportamento dos objetos do mundo virtual) ela funciona de maneira diferente. A EAI opera na forma aplicativo independente (Applet Java ou código JavaScript *embedded*), enquanto o nó *Script* opera dentro do browser VRML. Dentre as vantagens da EAI em relação ao nó *Script* estão incluídas uma maior modularidade e simplicidade dos programas, além de maior liberdade para a construção de interfaces complexas para a interação com o mundo VRML (RAPOSO, 2000 *apud* SILVA, 2001).

De uma maneira geral, pode-se dizer que o nó *Script* é adequado quando se deseja adicionar um determinado comportamento a objetos da cena. A EAI, por sua vez, é mais adequada para a criação de sistemas complexos (SILVA, 2001).

Nesse trabalho será utilizado o plug-in BlaxxunContact⁷ que permite a utilização da EAI com JavaScript. Para utilizar os recursos da EAI, é necessário criar uma página HTML incluindo a cena VRML e um script em JavaScript que realiza a interação com a cena.

⁷ BlaxxunContact é um “*web browser plugin*” capaz exibir conteúdo 3D interativo no formato VRML assim como animações em *Macromedia Flash* e multimídia *Real*. (BLAXXUN, 2007a)

3.4.5.1 Incluindo a cena VRML em uma página HTML

Como o *BlaxxunContact* serve como um *browser* plug-in, ele é inserido (*embedded*) no HTML usando a seguinte estrutura: (BLAXXUN, 2007b)

```
<OBJECT CLASSID="CLSID:4B6E3013-6E45-11D0-9309-0020AFE05CC8"
ID=Contact3D WIDTH=100% HEIGHT=85%>
<PARAM NAME="SRC" VALUE="yourVrmlFile.wrl">
<EMBED NAME="Contact3D" SRC="yourVrmlFile.wrl"
TYPE="application/x-cc3d" WIDTH=100% HEIGHT=85%>
</EMBED>
</OBJECT>
```

Note que duas tags diferentes são usadas para solucionar o problema de compatibilidade dos diferentes tipos de navegadores Web mais comuns, *Netscape* ('*embed*') e *Internet Explorer* ('*object*'). Para isso, ambas as tags precisam estar aninhadas ('*nested together*'). O valor da CLASSID é o mesmo para qualquer implementação de cenas VRML no *Blaxxun Contact 3D*. (BLAXXUN, 2007b)

Agora o objeto *embedded* pode ser acessado pelo seu ID (ou Nome) "Contact3D" usando JavaScript e HTML DOM.

3.4.5.2 JavaScript-EAI

O *Blaxxun Contact 3D* suporta uma interface externa fácil de usar baseada em linguagens de script como *JavaScript* e *VBScript*. Ela permite que valores de campos (Fields, exposedFields, eventIn e eventOut) possam lidos e alterados para nós nomeados (definidos pelo termo DEF no código VRML). Valores de entradas do tipo *String* são convertidos automaticamente para o tipo de campo apropriado. Adicionalmente, métodos em *VBScript* e *JavaScript* podem ser chamados a partir de scripts internos ao VRML usando o nó *Script*. (BLAXXUN, 2007b)

Com o objetivo de manipular a cena 3D é preciso obter uma referencia para *VRML browser*. Pode-se acessar o plug-in usando o nome especificado no tag *embed*, respectivamente o ID especificado na tag *object*.

Os seguintes métodos estão disponíveis para acessar o *Blaxxun Contact 3D* via *JavaScript*:

Tabela 3.2 – Tipos de chamada para JavaScript-EAI

setNodeEventIn(<i>String</i> nodeName, <i>String</i> eventInName, <i>String</i> value)	Define o valor para o determinado <i>eventIn</i> do nó nomeado convertendo o valor para o tipo do <i>eventIn</i>
getNodeEventOut(<i>String</i> nodeName, <i>String</i> eventOutName)	Retorna o valor do <i>eventOut</i> convertido para uma <i>string</i>

(Fonte: BLAXXUN, 2007b)

3.4.5.3 Acessando JavaScript a partir do VRML

É possível acessar qualquer função JavaScript no HTML a partir de um arquivo VRML. Usando a seguinte chamada em um nó *Anchor* ou em um comando `Browser.loadURL` em um script acessa a função especificada (BLAXXUN, 2007b):

```
"javascript:myJSFunction();"
```

Se a função especificada é declarada em documento HTML em outro *frame*, o parâmetro *target* precisa ser especificado usando o campo *parameter* do nó *Anchor* ou o segundo parâmetro em um comando `Browser.loadURL`. A seguir temos dois códigos de exemplo para mais detalhes (BLAXXUN, 2007b):

Exemplo 1) Chamando uma Função Javascript por um nó *Anchor*

```
DEF anchor1 Anchor{
  url"javascript:externalFunction();"
  parameter["target=_self"]
  children[
    #some geometry
  ]
}
```

Exemplo 2) Chamando uma Função Javascript a partir de um nó *Script*

```
Script{
  field MFString param ["target=someFrame", ""]
  eventIn SFTIME touch
  url"vrmlscript:
  function touch()
  {
    Browser.loadURL('javascript:externalFunction()', param);
  }
  "
```

3.5 Considerações Finais

A Educação Virtual Interativa (EVI) é uma poderosa ferramenta de ensino, capaz de auxiliar o processo ensino-aprendizagem e permitir ao aluno uma maior flexibilidade no aprendizado. O uso de ambientes interativos na educação rompe com o paradigma do ensino presencial, indo além dos limites físicos da sala de aula. A possibilidade de eliminar distâncias (não apenas espaciais, mas também temporais e operacionais), com o uso de tecnologias interativas, torna a EVI muito atraente em um país com dimensões como a do Brasil.

Entretanto o uso de ambientes interativos como ferramenta educacional levanta certas questões como: a menor interação social, o desenvolvimento de sistemas multimídias normalmente requer conhecimentos multidisciplinares, dependência do sistema e a concepção de sistemas para públicos não homogêneos.

Atualmente, a Realidade Virtual vem sendo levada para a internet. Isso se deve ao VRML que define de forma eficiente, um conjunto de objetos para modelagem 3D. É uma linguagem para descrever ambientes virtuais e simulações que possam ser utilizadas na internet, sem custo, e ainda é suportada em qualquer sistema. É importante ressaltar que VRML é independente de plataforma. Através da linguagem VRML, todos os aspectos do ambiente virtual, a interação e a interconexão podem ser especificados.

A Realidade Virtual possibilita a criação de ambientes virtuais similares aos laboratórios reais permitindo ao usuário a experiência intuitiva em um ambiente mais amigável e familiar. Neste caso, tais laboratórios podem se utilizados na forma de preparação para uma aula presencial, como complemento ao conteúdo ministrado pelo professor ou simplesmente como um recurso que permita ao aprendiz interagir com um dado experimento e colher informações úteis ao seu aprendizado. Além disso, a RV permite levar ao usuário temas de difícil aprendizagem e às vezes com impossibilidade de demonstração.

Existem muitos programas gratuitos para o desenvolvimento de páginas de internet e modelagem de ambientes 3D, que possibilitam o desenvolvimento de sistemas de EVI.

CAPÍTULO 4

4 MODELO DINÂMICO DO AEROGERADOR

Este capítulo apresenta a tecnologia do aerogerador utilizada e os modelos matemáticos para a simulação do comportamento dinâmico do aerogerador operando conectado a rede elétrica.

4.1 Configuração do aerogerador

A configuração do aerogerador escolhido utiliza um gerador síncrono multipolar, com grande número de pólos (60 a 70), de modo que possa operar em baixa rotação (ex: 10-22 ou 18-36 rpm), dispensando assim o multiplicador mecânico entre a turbina eólica e o gerador. O enrolamento do estator é conectado à rede elétrica através de um conversor eletrônico de frequência, normalmente dimensionado para 120% da potência nominal do gerador. A etapa do conversor que é conectada ao estator do gerador controla o torque eletromagnético, enquanto que a etapa do conversor conectada à rede elétrica controla as potências ativa e reativa entregues pelo sistema à rede. O campo do gerador síncrono é alimentado por um retificador que controla a excitação do gerador (HANSEN *et al.*, 2001 *apud* PAVINATTO, 2005). A figura 4.1 apresenta o esquema do aerogerador escolhido.

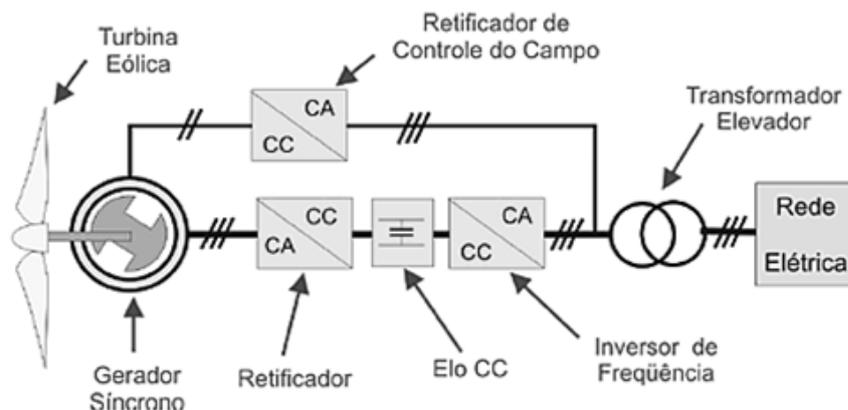


Figura 4.1 - Esquema do aerogerador escolhido (Fonte: PAVINATTO, 2005)

Esta tecnologia de aerogerador opera com velocidade de rotação variável e possui controle de extração de potência mecânica tipo passo.

A escolha desse tipo de tecnologia para este trabalho se deve a sua aceitação pelo mercado mundial de aerogeradores, ao fato de ser a única tecnologia de aerogerador fabricada no Brasil e a informações disponíveis em diversos trabalhos sobre o tema.

4.2 Especificações do aerogerador

O aerogerador escolhido foi o modelo E-70 da ENERCON. As especificações do modelo estão no Anexo III. As principais características de interesse para o modelo são descritas abaixo:

Tabela 3.1 – Características do aerogerador modelo E-70 da ENERCON

Característica – Modelo E-70	
Potência nominal	2300 kW
Diâmetro do Rotor	71 m
Altura do eixo do Rotor	113 m
Número de pás	3
Área varrida pelas pás	3959 m ²
Velocidade do rotor	variável, 6-21,5 rpm
Velocidade do vento - início de produção	2,5 m/s
Velocidade do vento - potência nominal	13,5 m/s
Velocidade do vento - corte de produção	28-34 m/s

(Fonte: WOBEN, 2007; ENERCON, 2007)

A curva característica de potência (figura 4.2) foi retirada do catálogo de aerogeradores da ENERCON.

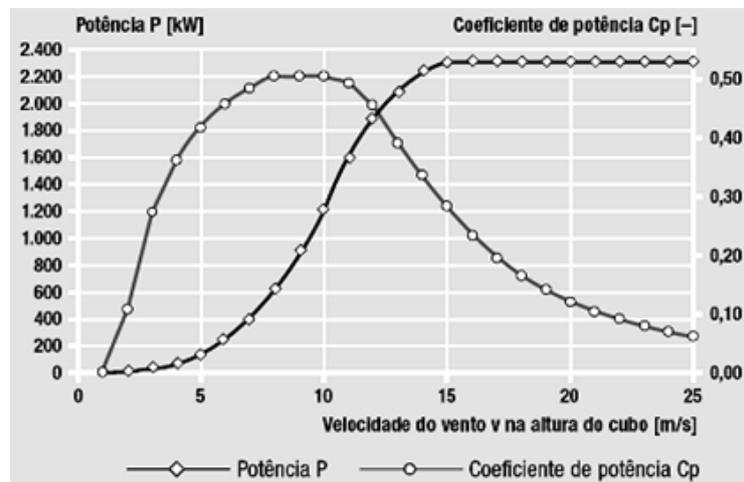


Figura 4.2 - Curva característica de potência (Fonte: ENERCON, 2007)

4.3 Modelagem do aerogerador

O modelo o objetivo de simular o funcionamento de um aerogerador com velocidade de rotação variável e controle de extração de potência mecânica conectado à rede. É considerada a premissa de que a rede elétrica de conexão é equilibrada e balanceada.

Para isso o aerogerador será dividido em quatro subsistemas:

- modelo dinâmico da turbina eólica;

- modelo do conjunto rotor;
- modelo do sistema de controle do aerogerador

4.3.1 Modelo dinâmico da turbina eólica

O rotor da turbina eólica, composto basicamente pelas três pás e o cubo do rotor, é o componente responsável pela conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica. Trata-se de um processo aerodinâmico complexo, dependente de vários fatores. Mas considerando-se o escopo desse trabalho, o modelo simplificado baseado nas equações (2.12) e (2.13) vistas anteriormente é proposto. A seguir as equações são apresentadas novamente:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (2.12)$$

Com:

$$\lambda = \left(\frac{R \omega_{wt}}{v_w} \right) \quad (2.13)$$

Aproximações numéricas desenvolvidas para o cálculo de $c_p(\lambda, \beta)$, são feitas a partir das equações (2.14) e (2.15), são mostradas novamente a seguir:

$$c_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{98}{\lambda i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{-16,5}{\lambda i}} \quad (2.14)$$

Com:

$$\lambda i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,089} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.15)$$

Como o aerogerador E-70 utilizado na modelagem possui um valor máximo de $c_p \times \eta$ igual a 0,506 (vide figura 4.2), foi feita uma correção na curva (2.14). Considerou-se esse valor como o ponto máximo da curva $c_p(\lambda, \beta)$ para β igual à zero. A partir da equação (4.1) e (2.15) pôde-se obter o $\lambda i_{\text{máximo}}$ e, para que o valor máximo de c_p fosse atingido, alterou-se o coeficiente da equação (2.14) de 98 para 101,8, resultando na equação (4.1). A equação (2.15) manteve-se inalterada.

$$\left. \frac{dc_p(\lambda, \beta)}{d\lambda} \right|_{\beta=0} = 0 \quad (4.1)$$

$$c_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{101,8}{\lambda i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{-16,5}{\lambda i}} \quad (4.2)$$

Desprezando-se oscilações mecânicas e o efeito de sombreamento da torre do aerogerador, obtém a equação (4.3) de torque:

$$T_{mec} = 0.5\rho \times \pi \times R^3 \times \frac{c_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \times v_w^2 \quad (4.3)$$

4.3.2 Modelo do conjunto rotor

O conjunto rotor representa o comportamento dinâmico do acoplamento mecânico entre a turbina eólica e o rotor do gerador síncrono, fazendo o balanço entre o torque mecânico entregue pela turbina eólica e o torque eletromagnético produzido pelo gerador síncrono, determinando a velocidade do conjunto rotor. (PAVINATTO, 2005)

O modelo simplificado tradicionalmente utilizado para representar o comportamento dinâmico do conjunto rotor utiliza um sistema composto por duas massas e seus respectivos momentos de inércia, sendo que uma massa representa a turbina eólica completa e a outra o rotor do gerador. Estas massas são conectadas por um eixo que tem a sua rigidez e amortecimento modelados (figura 4.3) (MARQUES *et al.*, 2002 *apud* PAVINATTO, 2005).

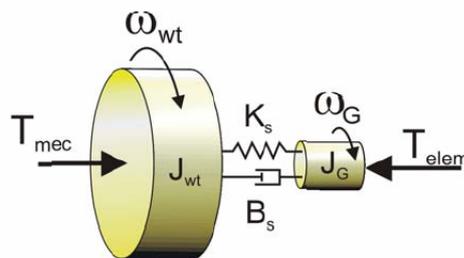


Figura 4.3 - Modelo de duas massas equivalentes, usado na modelagem do conjunto rotor do aerogerador (Fonte: PAVINATTO, 2005)

Caso se esteja utilizando aerogeradores que operam com rotação variável, devido ao efeito de desacoplamento entre o gerador e a rede elétrica, realizado pela presença de conversores eletrônicos de potência, outra abordagem pode ser feita. Neste caso, a dinâmica do eixo é desprezada e utiliza-se um modelo de apenas uma massa e inércia equivalentes (figura 4.4) (SLOOTWEG *et al.*, 2003 *apud* PAVINATTO, 2005).

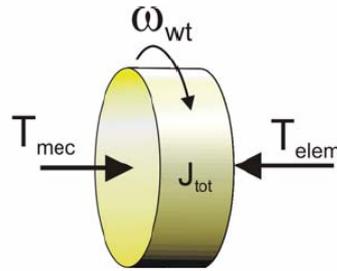


Figura 4.4 - Modelo equivalente mecânico simplificado do conjunto rotor
(Fonte: PAVINATTO, 2005)

O modelo de uma massa pode ser representado pela equação (4.4):

$$\varpi_{wt} = \int \frac{1}{I_{tot}} (T_{mec} - T_{elem}) dt \quad (4.4)$$

Onde:

- ω_{wt} – Rotação da turbina eólica [rad/s];
- I_{tot} – Momento de inércia equivalente do conjunto rotativo (turbina eólica e gerador elétrico) [kg.m²];
- T_{mec} – Torque mecânico produzido pela turbina eólica, [N.m];
- T_{elem} – Torque eletromagnético produzido pelo gerador elétrico, refletido no eixo da turbina eólica, caso o aerogerador possua caixa multiplicadora mecânica de velocidade, [N.m].

No caso do aerogerador utilizado, com rotação variável e acoplamento direto da turbina eólica com o gerador foi adotado o modelo de uma massa para a modelagem do conjunto rotor. Portanto a rotação da turbina eólica é a mesma do gerador elétrico.

4.3.3 Modelo do sistema de controle do aerogerador

Em geral, o sistema controle do aerogerador consiste de sensores, atuadores, e de um sistema de hardware e software que processa os sinais de entrada dos sensores e gera um sinal de saída para os atuadores. Esse sistema de controle tem como objetivo monitorar, otimizar e proteger o gerador de operações, indevidas.

Para a modelagem do aerogerador neste trabalho, o sistema de controle geral do aerogerador foi subdividido em quatro módulos principais (PAVINATTO, 2005):

- Controle de despacho da potência gerada pelo aerogerador;
- Controle de rotação da turbina eólica;
- Controle de passo da turbina eólica;

- Sistema de proteção.

A apresentação de cada módulo do controle é feita de forma detalhada.

4.3.3.1 Controle de despacho da potência

O controle de despacho do aerogerador gera um sinal de referência de potência (ativa e reativa) para o inversor de frequência que sintetiza a corrente que deve ser injetada na rede. O sinal de referência da potência ativa é utilizado para regular a tensão do elo CC do aerogerador. Em situação de regime permanente, a potência ativa que o inversor injeta na rede é igual à potência em corrente contínua que chega ao elo CC através do retificador. Nesse caso não existe alteração na tensão do elo CC. Já em períodos transitórios, a energia é armazenada ou retirada do banco de capacitores do elo CC, fazendo com que a tensão sofra pequenas variações. O controlador de despacho para controlar a tensão do elo CC, atua aumentando ou diminuindo o valor de referência de potência ativa que o inversor de tensão de injetar na rede elétrica. (PAVINATTO, 2005)

Com o objetivo de manter a tensão do elo CC em seu valor de referência, o controlador de despacho gera um sinal de redução ΔP_{ref} correspondente à diferença do sinal de potência, proporcional à diferença do valor da tensão do elo CC medido e o valor de referência, e a potência máxima de saída desejada pelo aerogerador. Este sinal é então enviado ao controlador de rotação do aerogerador, e fará com que a potência em corrente contínua injetada no elo CC pelo conjunto retificador e *chopper* seja reduzida.

Considerando um sistema sem perdas, onde toda a potência mecânica injetada pelo conjunto rotor seja convertida em potência elétrica tem-se a equação (4.5):

$$\Delta P_{ref} = P_{mec} - P_{ele_ref} \quad (4.5)$$

Onde:

- P_{mec} – Potência mecânica transmitida pelo conjunto rotor (turbina eólica e rotor do gerador) ao gerador síncrono;
- P_{ele_ref} – Potência elétrica de referência para um dado ponto de operação do aerogerador.

4.3.3.2 Modelo de controle de velocidade da turbina eólica

Segundo Pavinatto (2005), a função do controlador de rotação da turbina eólica é o de permitir que a turbina eólica opere na rotação mais adequada, aumentando a produção energética do aerogerador e minimizando esforços mecânicos no conjunto rotor.

O controle de velocidade da turbina eólica é feito através de um circuito retificador controlado por um conversor CC-CC tipo *chopper*.

O estator do gerador síncrono é conectado a um retificador a diodo, que por sua vez é controlado pelo circuito *chopper*. A potência elétrica em corrente contínua é então entregue ao elo CC do aerogerador. O inversor tipo VSI (*Voltage Source Inverter*), por sua vez, retira potência elétrica do elo CC e a injeta na rede elétrica em frequência industrial (PAVINATTO, 2005). O esquema elétrico simplificado do aerogerador pode ser visto na figura 4.5.

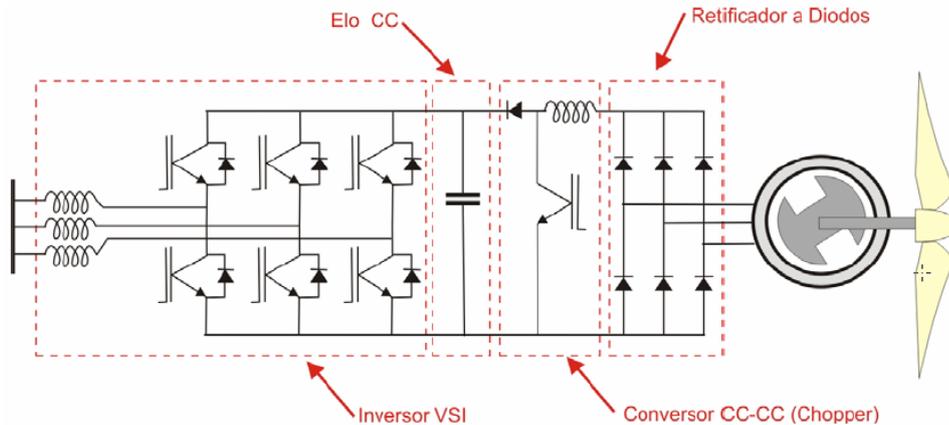


Figura 4.5 - Esquema elétrico simplificado do aerogerador (Fonte: PAVINATTO, 2005)

Como pode ser observado na figura 4.5, a frequência do gerador síncrono é variável e é convertida em corrente contínua através de um conversor não controlado a diodo. Um conversor CC-CC ou *Chopper* faz a interface entre o retificador e o capacitor do elo CC.

O controle de torque do gerador síncrono neste caso é realizado pelo *Chopper*, que regula a corrente do retificador, e conseqüentemente a do gerador, através de uma malha de controle por histerese. O valor da corrente contínua de referência (I_{dref}) é determinado pelo sistema de controle de velocidade através de um valor de torque de referência. (PAVINATTO, 2005)

Considerando que os controladores de corrente nos conversores eletrônicos de potência atuam rapidamente, uma nova corrente pode ser atingida em função de uma mudança no valor de referência em tempos da ordem de 10 ms ou menor (SLOOTWEG *et al.*, 2003). Para fins demonstrativos do comportamento mecânico da turbina, pode-se então considerar que a corrente atingirá seu novo valor quase que instantaneamente.

A partir da equação (4.6) o torque eletromagnético pode ser achado em função da potência no gerador.

$$T_{elem} = \frac{P_{ele} + P_{perdas}}{\omega_r} \quad (4.6)$$

Desprezando-se as perdas elétricas no gerador, tem-se:

$$T_{elem} = \frac{P_{ele}}{\omega_r} \quad (4.7)$$

Considerando que toda a potência ativa do gerador é fornecida ao retificador a diodos e desprezando-se as perdas no retificador, tem-se:

$$P_{ele} = P_{dcret} = V_{dcret} I_{dcret} \quad (4.8)$$

Onde:

V_{dcret} – Valor da tensão contínua nos terminais de saída do retificador;

I_{dcret} – Valor da corrente contínua nos terminais de saída do retificador.

Logo:

$$T_{elem} = \frac{V_{dcret} I_{dcret}}{\omega_r} \quad (4.9)$$

A tensão V_{dcret} no caso de um retificador não controlado a diodos é diretamente proporcional à tensão alternada nos terminais de entrada do retificador que, neste caso, é a mesma tensão dos terminais de saída do gerador síncrono (PAVINATTO, 2005).

E considerando-se que o regulador de tensão do gerador síncrono é capaz de manter a tensão nos terminais do gerador constante, em seu valor nominal, através do controle da corrente de campo do gerador.

Dessa forma pode-se modelar o gerador como uma fonte de torque para o conjunto rotor do aerogerador, atingindo imediatamente o valor de torque determinado pelo valor da corrente retificada (T_{dcret}), controlada pelo circuito *Chopper*.

O funcionamento básico do controlador de rotação é descrito a seguir: (PAVINATTO, 2005)

- A rotação do conjunto rotor (turbina eólica e rotor do gerador síncrono) é medida, com uma frequência amostragem variando entre 20 e 30 Hz. Nesse trabalho foi utilizada a frequência de amostragem de 20 Hz.
- Com a curva de referência de torque, um valor de torque eletromagnético é obtido.
- Caso o sinal de redução de potência ΔP_{ret} proveniente do controlador de despacho do aerogerador seja diferente de zero, uma redução no valor do torque eletromagnético de referência é calculada dividindo-se o valor de potência que deve ser reduzida pela rotação atual do conjunto rotor.

$$T_{elem_res} = T_{elem_ref} + \frac{\Delta P_{ref}}{\omega_r} \quad (4.10)$$

Onde:

T_{elem_ref} – Torque eletromagnético de referência (característica do gerador síncrono).

T_{elem_res} – Torque eletromagnético de referência, com a redução de torque devido à restrição do despacho de potência.

ω_r – rotação do conjunto rotor [rad/s].

- O valor de torque de referência é convertido em um valor de corrente de referência para o circuito chopper através da equação (4.11).

$$I_{dc_ref} = \frac{\omega_r T_{elem_res}}{V_{dcret}} \quad (4.11)$$

Onde:

I_{dc_ref} – Valor da corrente de referência para o circuito *chopper*;

V_{dcret} – Valor da tensão contínua nos terminais de saída do retificador;

A equação dinâmica de controle de velocidade da turbina eólica pode ser obtida através substituição das equações (4.6) e (4.9) na equação (4.4).

$$\omega_r = \int \frac{1}{I_{tot}} \left(T_{mec} - \left(T_{elem_ref} + \frac{P_{mec} - P_{ele_ref}}{\omega_r} \right) \right) dt$$

Considerando que:

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_r}$$

Tem-se a equação (4.12).

$$\omega_r = \int \frac{1}{I_{tot}} \left(\frac{P_{ele_ref}}{\omega_r} - T_{elem_ref} \right) dt \quad (4.12)$$

Onde:

ω_r – Rotação da turbina eólica [rad/s];

I_{tot} – Momento de inércia equivalente do conjunto rotativo (turbina eólica e gerador elétrico) [kg.m²];

P_{ele_ref} – Potência elétrica de referência para um dado ponto de operação do aerogerador, [W];

T_{elem_ref} – Torque eletromagnético de referência (característica do gerador síncrono), [N.m].

4.3.3.3 Modelo de controle de passo da turbina eólica (pitch)

Conforme visto anteriormente no Capítulo 2, o controle de passo é um sistema de controle ativo, que normalmente necessita de um sinal do gerador de potência. Sempre quando a potência nominal do gerador for ultrapassada, devido ao aumento das velocidades do vento, as pás do rotor serão giradas em torno de seu

eixo longitudinal, mudando seu ângulo de passo. Isso resulta na redução do ângulo de ataque o que diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento pela turbina. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, que é a mínima que se necessita para gerar a potência nominal, o ângulo é escolhido de tal maneira que a turbina produza apenas a potência nominal.

Quando a velocidade do vento incidente na turbina é superior ao valor nominal, a rotação do rotor não pode ser mais controlada somente através do aumento do carregamento do gerador eólico. Como forma de prevenir que a rotação do rotor ultrapasse os limites normais de operação, podendo resultar em risco de falha mecânica em algum componente, o controle de passo é acionado. (PAVINATTO, 2005)

A partir das equações (4.2) e (2.15), o valor de ângulo de passo necessário para limitar a potência extraída do vento até o valor nominal do aerogerador pode ser calculado para cada velocidade do vento incidente.

Deve-se levar em consideração no modelo que o ângulo de passo não pode mudar imediatamente, mas apenas em uma velocidade limitada. A velocidade máxima de operação de atuadores que controlam o ângulo de passo das turbinas eólicas atuais varia entre 3 a 10 °/s, dependendo do tipo de mecanismo de acionamento (SLOOTWEG *et al.*, 2003 *apud* PAVINATTO, 2005). Nesse trabalho foram consideradas diferentes velocidades de variação de passo para os seguintes tipos de situação:

- 3 °/s, para velocidade acima da nominal;
- 6 °/s, para velocidade acima de 5% da nominal;
- 10 °/s, para velocidade acima de 10% da nominal e situações de vento acima de 25 m/s (velocidade de corte).

4.3.3.4 Sistema de proteção

Segundo Pavinatto (2005), o sistema de proteção monitora as principais grandezas elétricas e mecânicas do aerogerador, gerando um sinal de parada (*shutdown*) quando alguma dessas grandezas ultrapassa por certo período de tempo os limites considerados seguros para a operação normal do aerogerador.

No caso desse trabalho as condições da conexão a rede elétrica são consideradas ideais, com tensões equilibradas e valor nominal. Diante disso serão monitoradas as seguintes grandezas:

- Velocidade do Vento;
- Rotação da turbina eólica;
- Potência elétrica entregue ao conversor eletrônico, com objetivo de simular comportamento da tensão do Elo CC que gera um sinal ao controle de velocidade apresentado anteriormente.

Na verdade a potência elétrica P_{ele} aqui considerada será implementada no modelo como a potência mecânica P_{mec} produzida pela turbina eólica, considerando o sistema sem perdas mecânicas ou elétricas.

$$P_{ele} = P_{mec} \quad (4.13)$$

4.4 Considerações Finais

A modelagem proposta acima é idealizada e direcionada ao desenvolvimento de ambiente virtual interativo para fins didáticos, com o objetivo de simular o comportamento dinâmico de um aerogerador de velocidade variável e controle de passo.

No próximo capítulo será discutida a implementação do modelo proposta acima e as ferramentas utilizadas.

CAPÍTULO 5

5 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DO AEROGERADOR EM VRML

Diante da dificuldade de se obter parâmetros e informações detalhadas sobre o funcionamento dos aerogeradores disponíveis no mercado e do modelo escolhido em questão, procurou-se desenvolver o mecanismo de controle de passo baseado em conceitos apresentados em trabalhos e livros.

O modelo em VRML se propõe a simular o funcionamento de um aerogerador em tempo real. Utilizando os *nós VRML* do tipo *Script* e *TimeSensor* pode-se simular o comportamento dinâmico do aerogerador.

Este capítulo apresenta ao ajuste dos dados do modelo do aerogerador fornecido pelo fabricante as técnicas básicas de controle extração de potência tipo *pitch* (passo), mostrada na figura (5.1).

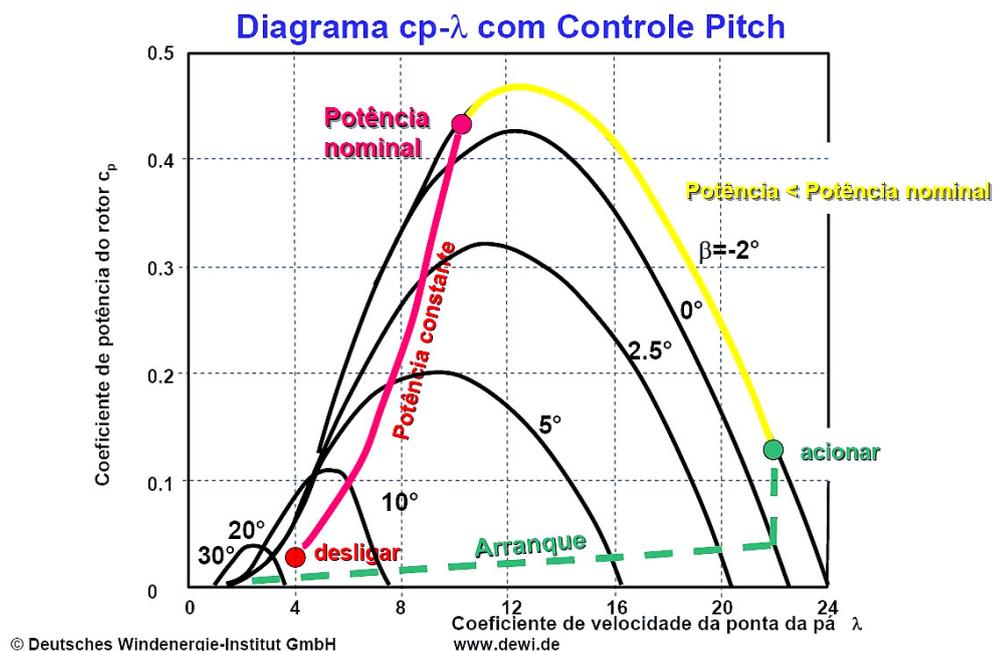


Figura 5.1 - Técnica básica de controle de passo (Fonte: DEWI, 2004)

5.1 Controle de passo do modelo

Ao observar a figura (5.1) notam-se claramente três intervalos distintos:

- Arranque;
- Potências parciais, com passo constante, no caso $\beta = 0^\circ$;
- Potência nominal, com variação de passo.

Com base na curva característica de potência em função da velocidade do vento do aerogerador fornecida (vide Anexo III) e a partir das equações (2.12), (2.15) e (4.2), pode-se obter as razões de velocidade λ e os ângulos de passo β para cada velocidade. A curva característica de potência (figura 4.2) e as equações serão mostradas novamente a seguir:

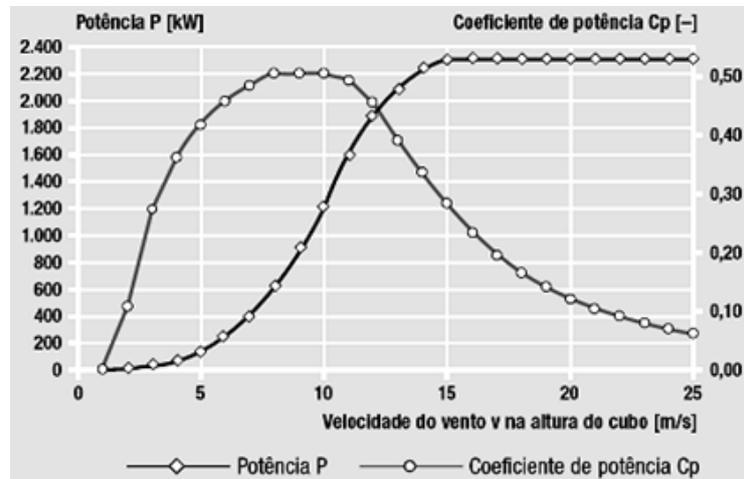


Figura 5.2 - Curva característica de potência (Fonte: ENERCON, 2007)

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (2.12)$$

$$c_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{101,8}{\lambda i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{16,5}{\lambda i}} \quad (4.2)$$

$$\lambda i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,089} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.15)$$

Calculando-se o $c_p(\lambda, \beta)$ na equação (2.12) para cada velocidade substituindo na equação (4.2), observando os três intervalos bem definidos pelo controle de passo, pode-se obter utilizando o programa de modelagem matemática MAPLE uma curva (figura 5.2) semelhante à figura 5.1.

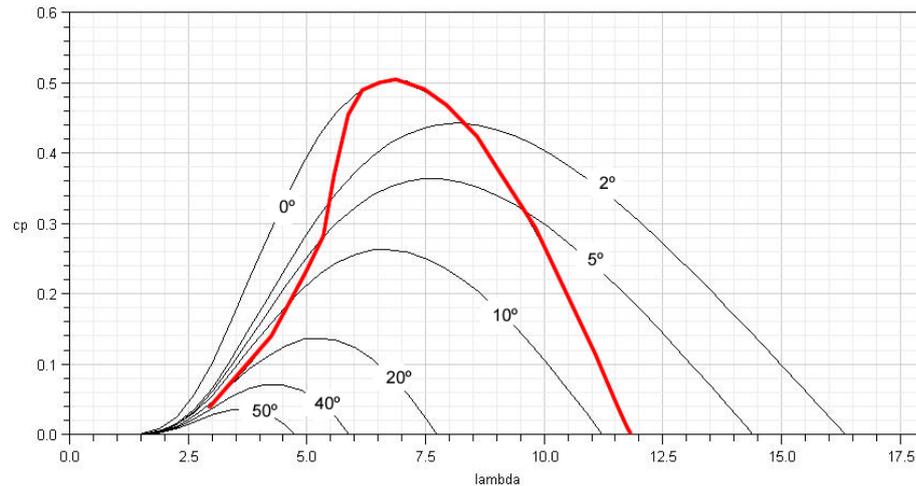


Figura 5.3 - Curva $c_p(\lambda, \beta)$ de controle de passo obtida a partir de dados do aerogerador e das equações (2.12), (4.2) e (2.15).

O intervalo de arranque não foi desenvolvido visto à dificuldade de se estimar a dinâmica de partida do aerogerador, que envolve certo conhecimento do comportamento mecânico de aerofólios, e não ser o foco principal de interesse desse trabalho. Na implementação no modelo VRML esse mecanismo foi implementado somente para fins visuais não sendo inteiramente correspondente ao real.

A função utilizada no MAPLE será apresentada e explicada por partes. A primeira parte calcula o c_p para o intervalo com velocidades parciais e passo constante. Já a segunda parte o ângulo de passo é variado para manter a potência nominal constante.

```

B:=0:
for i from 1 by 1 to 9 do
assign(solve({cp = cpo[i], lambda > 6.8}));
Vxlambdafull[i, 1]:=i:
Vxlambdafull[i, 2]:=lambda;
Vxbetafull[i, 1]:=i;
Vxbetafull[i, 2]:=B;
unassign('lambda');
end do:
for i from 10 by 1 to 11 do
assign(solve({cp = cpo[i], lambda < 6.8}));
Vxlambdafull[i, 1]:=i:
Vxlambdafull[i, 2]:=lambda;
Vxbetafull[i, 1]:=i;
Vxbetafull[i, 2]:=B;
unassign('lambda');
end do:
unassign('B'):

```

Figura 5.4 - Primeira parte da função utilizada no MAPLE

Na figura 5.4 a variável cp corresponde à função resultante da substituição da equação (2.15) na (4.2) e cpo corresponde a um vetor com os valores dos coeficientes de potência referentes a cada valor de velocidade do vento calculado a partir de dados do modelo do aerogerador (E-70) pela equação (2.12). A variável i corresponde às velocidades do vento.

A limitação de λ nos trechos de $i = [1..9]$ e $i = [10, 11]$ se deve ao fato de duas soluções serem obtidas. Considerando o valor 6,8 correspondente ao valor máximo da curva $c_p(\lambda, \beta)$ para $\beta = 0^\circ$ e fato de que a razão de velocidades tende a cair com o aumento da velocidade do vento encontra-se o λ desejado.

```

for i from 12 by 1 to 15 do

$$\lambda := \text{evalf}\left(\frac{\left(\omega_n + \frac{(\omega_{n2} - \omega_n) \cdot (i - 12)}{15 - 12}\right) \cdot R}{i}\right);$$

B := solve(cp = cpo[i]);
cp;
Vvxbfull[i, 1] := i;
Vvxbfull[i, 2] := B;
Vvxlambdafull[i, 1] := i;
Vvxlambdafull[i, 2] :=  $\lambda$ ;
unassign('B');
unassign('lambda');
end do:
for i from 16 by 1 to 23 do

$$\lambda := \text{evalf}\left(\frac{\omega_{n2} \cdot R}{i}\right);$$

B := solve(cp = cpo[i]);
cp;
Vvxbfull[i, 1] := i;
Vvxbfull[i, 2] := B;
Vvxlambdafull[i, 1] := i;
Vvxlambdafull[i, 2] :=  $\lambda$ ;
unassign('B');
unassign('lambda');
end do:
for i from 24 by 1 to 29 do

$$\lambda := \text{evalf}\left(\frac{\omega_{n2} \cdot \left(1 + \frac{0.05 \cdot (i - 24)}{29 - 24}\right) \cdot R}{i}\right);$$

B := solve(cp = cpo[i]);
cp;
Vvxbfull[i, 1] := i;
Vvxbfull[i, 2] := B;
Vvxlambdafull[i, 1] := i;
Vvxlambdafull[i, 2] :=  $\lambda$ ;
unassign('B');
unassign('lambda');
end do:

```

Figura 5.5 - Segunda parte da função utilizada no MAPLE

Na figura 5.5 considerou-se o β variando a partir da velocidade de vento de 12 m/s, mas deveria variar somente a partir da velocidade nominal, no caso 13,5 m/s. Anteriormente havia sido dito que para a velocidade nominal é a mínima que se necessita para gerar a potência nominal, porém isso não seria coerente com a curva característica de potência do aerogerador (figura 5.2) e a mudança de controle seria brusca. Então, optou-se convencionar o acionamento do controle de passo com uma margem de 2 m/s, no caso para fins de facilidade de implementação em VRML, a partir de 11 m/s.

Para calcular o valor de β nesse trecho fez-se uma estimativa dos valores de λ . Para obter um controle suave a variação de passo começa com uma de rotação menor que a nominal, onde a velocidade angular ω_n se refere à rotação de 18,9 rpm, aumentando linearmente até chegar à velocidade de rotação nominal de 21,5 (ω_{n2}) no trecho $i = [12..15]$. De $i = [16..23]$ a velocidade de rotação permanece a nominal e a partir de $i = [24..29]$ observa-se uma variação linear de 5% da nominal.

Vale destacar que a curva de potência foi estendida até a velocidade de 29 m/s com a potência permanecendo a nominal.

De posse do λ podem-se obter da equação (2.13) as velocidades de rotação do rotor para cada velocidade.

$$\lambda = \left(\frac{R\omega_r}{v_w} \right) \quad (2.13)$$

Onde:

ω_r – Velocidade de rotação do conjunto rotor;

v_w – Velocidade do vento incidente.

Da equação (5.1) encontra-se o torque eletromagnético de referência que será utilizado no controle de velocidade do aerogerador.

$$T_{elem_ref} = \frac{P_{ele_ref}}{\omega_r} \quad (5.1)$$

Onde:

P_{ele_ref} – Potência elétrica referente cada velocidade de operação;

T_{elem_ref} – Torque eletromagnético de referência para cada velocidade de rotação.

A as figuras (5.6) e (5.7) apresentam respectivamente as curvas de potência elétrica em função da velocidade do vento e de torque eletromagnético em função da velocidade de rotação do rotor.

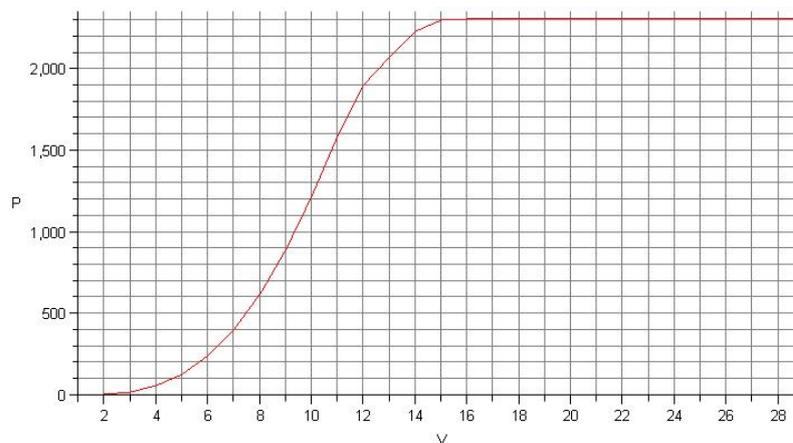


Figura 5.6 - Curva de potência elétrica [KW] em função da velocidade do vento [m/s]

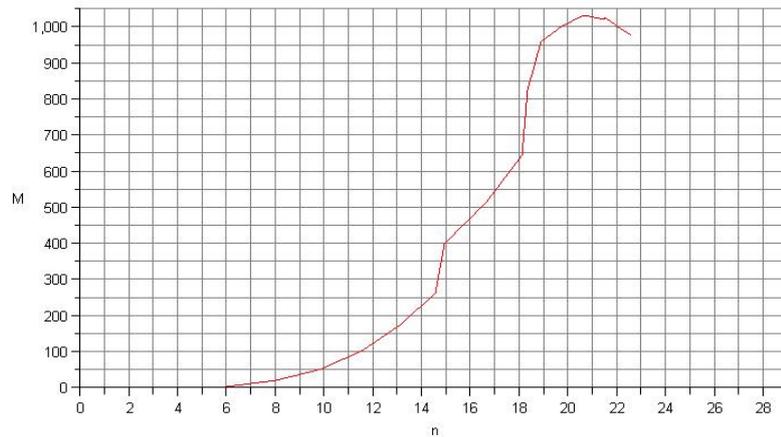


Figura 5.7 - Curva de torque eletromagnético [kN.m] em função da velocidade de rotação do rotor [rpm]

5.2 Implementação do modelo em VRML

Utilizando os nós VRML do tipo *Script* e *TimeSensor* pode-se simular o comportamento dinâmico de um aerogerador em tempo real.

O modelo matemático do aerogerador apresentado no capítulo 4 é implementado através do nó *Script* utilizando *JavaScript* e o controle da simulação é feito pelo nó *Timesensor*.

A implementação do modelo em VRML será explicada por partes divididas em:

- Modelagem da estrutura do aerogerador
- Controle de tempo de animação
- Gerador de sinais
- Dinâmica e controle de velocidade de rotação
- Controle de passo
- Sistema de proteção

A figura 5.8 apresenta o diagrama de blocos do modelo de aerogerador implementado em VRML.

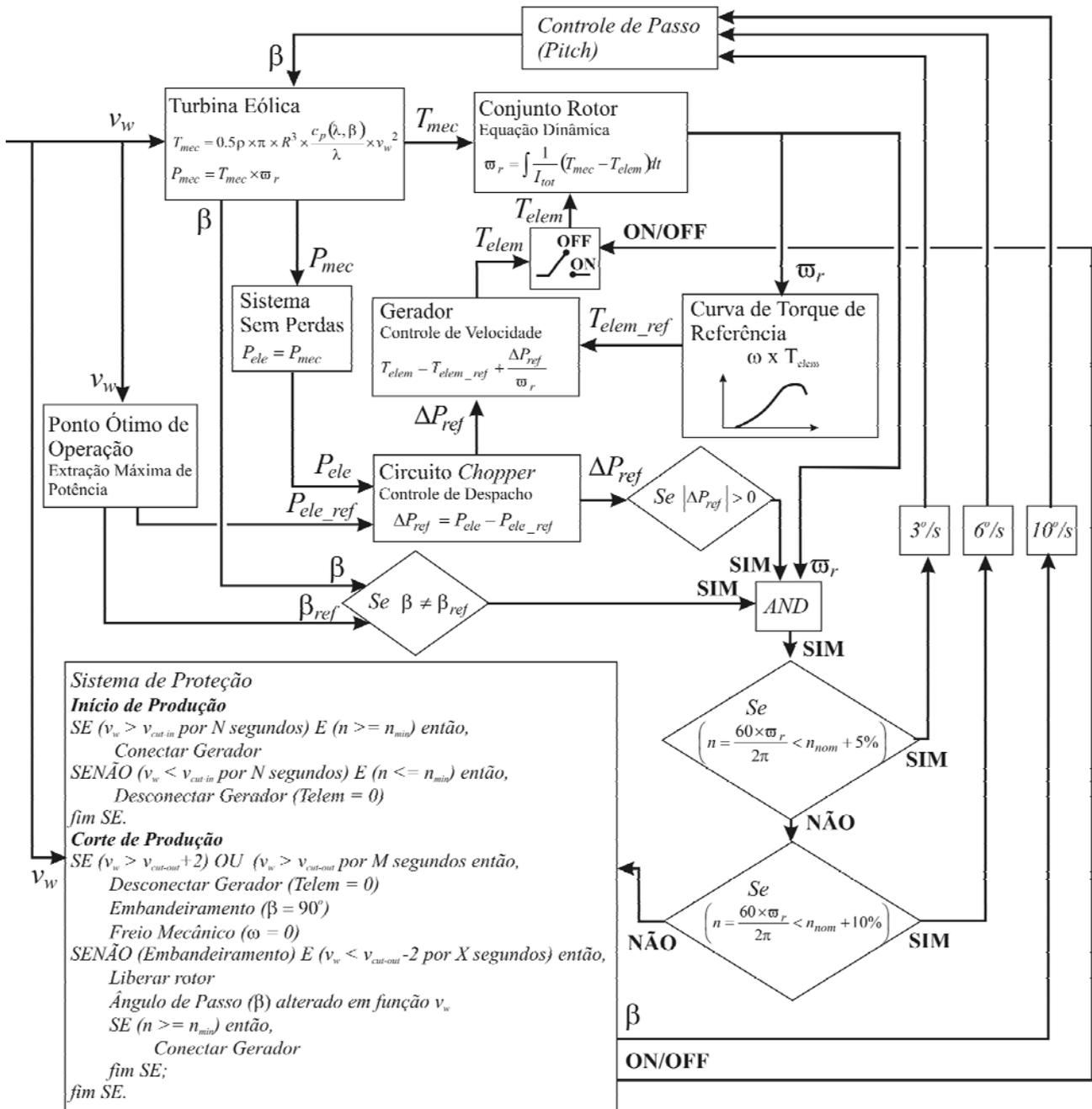


Figura 5.8 - Diagrama de Blocos do controle do aerogerador implementado em VRML

5.2.1 Modelagem da estrutura do aerogerador

Existem várias técnicas para a modelagem de formas complexas, mas uma das mais simples inserir no ambiente do programa de modelagem 3D duas vistas ortogonais do objeto, uma de frente e outra de perfil (mais vistas podem ser usadas para maiores detalhes). Pode-se usar qualquer programa de modelagem em 3D que tenha a função de exportar para o formato VRML. Um programa de computação gráfica bastante conhecido, que além de exportar para o formato VRML possui objetos referentes aos nós do VRML, é 3D

Max Studio. Na figura 5.9 serão apresentados alguns passos tirados de um tutorial on-line de sobre modelagem usando a objeto *editPoly*.

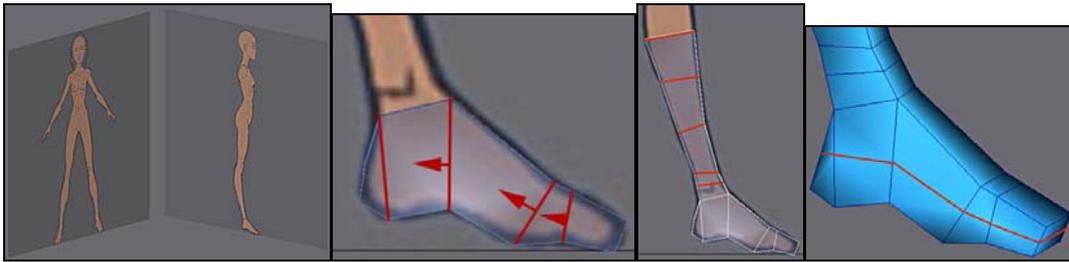


Figura 5.9 - Passos para modelagem de objetos complexos no *3D Max Studio* usando a função *editPoly* (Fonte: ROGER, 2007)

Como pode ser observado no primeiro quadro da figura 5.8, duas imagens planas são inseridas na cena 3D postadas perpendicular uma a outra e de preferência alinhadas às vistas ortogonais. Essas imagens são inseridas como texturas em objetos planos. Em seguida, mas não demonstrado aqui, utiliza-se um objeto primitivo, no caso um cubo, que é convertido em um *editPoly*. O *editPoly* é uma estrutura maleável que permite o acesso e transformação de cada vértice ou face independentemente.

Alinhando esse *editPoly* em uma das vistas ortogonais, vão sendo feitas extrusões de um dos lados de modo que vá se ajustando a vista de referência, como no segundo quadro da figura 5.8. Isso deve ser feito alinhando-se *editPoly* em relação às duas vistas. Após terminar esse procedimento de extrusão, objeto relativamente simples gerado, dando a forma mestra ao objeto. A partir daí as faces devem ser subdivididas e melhor ajustadas aos contornos das vistas até que se tenha o nível de detalhamento desejado.

Esse método tem grandes vantagens quando se trata de ambientes virtuais interativos disponibilizados na internet (um dos objetivos desse trabalho), pois permite o controle do número de polígonos do objeto, pesando o realismo e o desempenho da cena 3D.

Esse método foi demonstrado para programa *3D Max Studio* por ser bastante popular e poderoso, mas pode-ser usado em qualquer programa de modelagem 3D com o objeto nativo equivalente ao *editPoly* no Max. Entretanto ele é um programa pago, mas existe também o *Blender* um programa gratuito na internet que tem funcionalidades semelhantes ao *3D Max Studio*.

Nesse projeto usou-se para a modelagem o programa *CosmoWorlds* que trabalha diretamente com o formato VRML. No caso do VRML o objeto maleável equivalente ao *editPoly* do *3D Max* é o nó *IndexedFaceSet*. A figura 5.10 mostra as imagens utilizadas para a modelagem da pá.

Foram apresentados outros programas além do *CosmoWorlds*, pois o seu desenvolvimento foi interrompido na versão 2.0, não estando mais disponível para compra ou aquisição.



Figura 5.10 - Efeito de torção (Fonte: DEWI, 2004), perfil de pá (Fonte: ENERCON, 2007) e vista da nacele do modelo E-70 da ENERCON (Fonte: DEWI, 2004)

Foram modelados no *CosmoWorlds*: uma pá, o cubo, a nacele e a torre. Para as outras pás foram usadas instâncias a partir do comando `DEF Name`, que declara o nó, e do comando `USE Name`, que faz referência ao nó declarado. Agrupando três instâncias com as respectivas transformações, rotacionadas de 0° , $+120^\circ$ e -120° , e transladadas para as posições adequadas, e o cubo centralizado, tem a o rotor da turbina. A figura 4.1 mostra o aerogerador modelado.



Figura 5.11 - Aerogerador modelo no *CosmoWorlds*

Deve-se observar que os nós que serão acessados na cena devem ser nomeados pelo comando DEF. No caso do aerogerador somente dois nós serão acessados: a pá, que será alterada em todas suas instâncias, e o rotor. Para a rotação adequada deve se certificar de que a posição do centro do nó, que por *default*, se encontra centralizado em relação a uma caixa ortogonal invisível que engloba todo o objeto (Bounding boxes).

As partes de implementação do modelo do aerogerador em VRML mostradas a seguir foram desenvolvidas utilizando-se um editor de texto próprio para VRML o *VRMLPad* da *ParallelGraphics*, mas poderia ser desenvolvido usando outros editores de texto como o *NotePad*.

5.2.2 Controle de tempo de animação

O controle do tempo de animação é feito através do nó *TimeSensor* do VRML. A declaração do nó é vista em seguida.

```

TimeSensor {
  exposedField STime   cycleInterval 1      # (0, ∞)
  exposedField SBool   enabled        TRUE
  exposedField SBool   loop          FALSE
  exposedField STime   startTime      0      # (-∞, ∞)
  exposedField STime   stopTime       0      # (-∞, ∞)
  eventOut    STime    cycleTime
  eventOut    SFloat   fraction_changed
  eventOut    SBool    isActive
  eventOut    STime    time
}

```

Algumas observações devem ser feitas para permitir o entendimento do funcionamento do *TimeSensor*. O campo *exposedField* representa um parâmetro do nó que possui um evento de entrada (*eventIn*) e gera um evento de saída (*eventOut*), podendo ser alterado a partir de declarações de rotas (*Routes*).

O campo *cycleInterval* será usado para determinar as frequências de amostragem: da medição de velocidade de rotação e medição de velocidade do vento para o sistema de proteção. O *enabled* diz se o sensor está ativo e gerando e recebendo eventos. O campo *loop* reinicia a contagem do *TimeSensor* a cada ciclo. A saída *cycleTime* corresponde a um sinal de saída discreto, sendo responsável por gerar um evento no instante de início de funcionamento do *TimeSensor* e ao final de cada ciclo, e corresponderá ao instante de amostragem. Por último a saída *fraction_changed* corresponde a um sinal de saída contínuo, sendo uma fração do período do *TimeSensor* (*cycleInterval*) variando de 0 a 1 e será usado para realizar a rotação do rotor.

Foram utilizados quatro *TimeSensors* para a cena VRML: controle da frequência de amostragem de medidas para proteção com o período de 1 s (1 Hz), controle da frequência de amostragem da velocidade de rotação do rotor de 0,05 s (20 Hz), controle do gerador de sinais de vento e para controlar a variação contínua linear da velocidade do vento com um período de 0,3 s.

Para o funcionamento adequado da simulação a visualização é realizada com 50 ms de atraso em relação ao cálculo dos parâmetros, sendo estimado previamente o que deve acontecer na simulação e feito uma interpolação linear para dar a sensação de continuidade no caso da rotação do rotor.

5.2.3 Gerador de sinais

O gerador de sinais é uma tentativa de simular uma variação do vento. Baseado em uma função aleatória variando entorno de um valor médio de uma faixa percentual desse valor, implementada a função *Math.random()* do *Javascript*. A partir de uma interface em HTML os valores do valor médio e da faixa percentual podem ser alterados. O código em VRML é apresentado a seguir:

```

DEF gerador_sinais Script {
  eventIn SFFloat clock
  eventIn SFFloat set_Vmedio
  eventIn SFFloat set_desvio
  field SFFloat Vmedio 10
  field SFFloat desvio 5
  eventOut SFFloat Vvento
  eventOut SFFloat out_Vmedio
  eventOut SFFloat out_desvio
  url"javascript:
  function V_limites(){
  var V;
    V = Vmedio*(100 - desvio*(0.5 - Math.random()))/100;
    if(V < 0) {V = 0;}
    return V;
  }
  function initialize(){
    Vvento = Vmedio;
    out_Vmedio = Vmedio;
    out_desvio = desvio;
  }
  function set_Vmedio(v, ts){
    Vmedio = v;
  }
  function set_desvio(v, ts){
    desvio = v;
  }
  function clock(v, ts){
    out_Vmedio = Vmedio;
    out_desvio = desvio;
    Vvento = V_limites();
  }
  // Browser.print(Vvento);
}
"
}

```

5.2.4 Dinâmica e controle de velocidade de rotação

Baseado nas equações (4.4) do modelo do conjunto rotor e (4.12) do controle de velocidade vistas anteriormente, a função controle de rotação foi desenvolvida.

$$\omega_r = \int \frac{1}{I_{tot}} (T_{mec} - T_{elem}) dt \quad (4.4)$$

$$\omega_r = \int \frac{1}{I_{tot}} \left(\frac{P_{ele_ref}}{\omega_r} - T_{elem_ref} \right) dt \quad (4.12)$$

Onde:

ω_r – Rotação da turbina eólica [rad/s];

I_{tot} – Momento de inércia equivalente do conjunto rotativo (turbina eólica e gerador elétrico) [kg.m²];

P_{ele_ref} – Potência elétrica de referência para um dado ponto de operação do aerogerador, [W];

T_{elem_ref} – Torque eletromagnético de referência (característica do gerador síncrono), [N.m].

Para a faixa de operação normal dentro de limites estabelecido a equação 4.12 é utilizada, mas adicionando um termo proporcional B à aceleração do rotor como uma estratégia para tornar o controle mais rápido tem-se uma pequena alteração resultando na equação 5.1. O objetivo dessa alteração era possibilitar estudos futuros permitindo a alteração controle de velocidade durante a simulação.

$$\omega_r = \int \frac{1}{I_{tot} - B} \left(\frac{P_{ele_ref}}{\omega_r} - T_{elem_ref} \right) dt \quad (5.2)$$

O torque eletromagnético de referência T_{elem_ref} é calculado em função da velocidade rotação do rotor ω_r . Isso é feito a partir de duas tabelas indexadas, sendo o índice referente ao ω_r utilizado na busca do T_{elem_ref} .

A função utilizada em VRML é:

```
function acha_torque_ele(wt){
var l = tb_w_w.length;
var j, delta_j;
if(wt > 0){
for (var i = 0; i < l; i++){
if (wt < tb_w_w[i]) {
j = i;
delta_j = Math.abs((wt - tb_w_w[i-1])/(tb_w_w[i] - tb_w_w[i-1]));
break;
}
}
torque_ele = (tb_torque_w[j]-tb_torque_w[j-1])*delta_j + tb_torque_w[j-1];
torque_ele = round3(torque_ele);
}
else {torque_ele = 0;}
// Browser.print('w_temp:\t' + wt + '\t j:\t' + j + '\t torque_ele:\t' +
torque_ele);
}
```

Já a potência de referência P_{ele_ref} é calcula em função da velocidade do vento v_w , que no caso seu comportamento é conhecido previamente em cada instante fugindo um pouco da natureza imprevisível do vento. A função foi implementada de forma semelhante à anterior, mas como as velocidades do vento apresentadas em intervalos de um em um usou um método diferente. Essa função calcula todos os pontos ótimos de operação para a velocidade do vento v_w .

```

function acha_ponto_otimo(V){
var i, delta_i;
i = Math.floor(V);
delta_i = V - i;
if(V < 29){
lambda_otimo = (tb_lambda[i+1]-tb_lambda[i])*delta_i + tb_lambda[i];
lambda_otimo = round3(lambda_otimo);
w_otimo = lambda_otimo*V/raio;
w_otimo      = round4(w_otimo);
passo_otimo = (tb_passo[i+1]-tb_passo[i])*delta_i + tb_passo[i];
passo_otimo = round3(passo_otimo);
torque_ele_ref = (tb_torque[i+1]-tb_torque[i])*delta_i + tb_torque[i];
torque_ele_ref      = round2(torque_ele_ref);
pot_ele_ref = (tb_pot[i+1]-tb_pot[i])*delta_i + tb_pot[i];
pot_ele_ref  = round2(pot_ele_ref);}
else {lambda_otimo = 0;
      w_otimo = 0;
      passo_otimo = 90;
      torque_ele_ref = 0;
      pot_ele_ref = 0;
      }
}

```

O controle de velocidade para condições normais de operação fica então como:

```

acha_torque_ele(w_temp);
acha_ponto_otimo(V_temp);
if (Math.abs(pot_ele_ref - pot_mec)/pot_ele_ref > 0.001) {
      w_temp += ((pot_ele_ref/w_temp) - torque_ele)*delta_t/(inerxia - B);
}

```

O trecho marcado em **negrito** é a implementação da equação (4.12) de controle de velocidade em *JavaScript*. A variável w_temp representa a velocidade de rotação e é proporcional a integração no tempo da diferença entre a potência elétrica de referência (pot_ele_ref) calculada em função da velocidade do vento instantânea (V_temp) dividido pela velocidade de rotação instantânea (w_temp) e o torque elétrico ($torque_ele$), calculado em função de w_temp . A constante $delta_t$ representa o intervalo de integração (no caso 50 ms), a constante $inerxia$ é o momento de inércia de conjunto rotor e a constante B corresponde a um termo proporcional a aceleração. A método de integração é implementado através de um somatório utilizando o operador $+=$, que atribui à w_temp a soma de w_temp mais o termo de incremento $((pot_ele_ref/w_temp) - torque_ele)*delta_t/(inerxia - B)$, correspondente a uma aceleração constante do conjunto rotor durante o intervalo de integração $delta_t$.

A potência elétrica P_{ele} de saída, como considerado o sistema sem perdas é igual à potência mecânica

P_{mec} .

```

pot_mec = torque_mec*w_temp;
pot_ele = pot_mec;

```

O torque mecânico é calculado em função da equação (2.13), (4.2), (4.3) e (2.15), com os valores de ângulo de passo, velocidade do vento e velocidade de rotação do rotor. A implementação em VRML é vista em seguida.

$$\lambda = \left(\frac{R\omega_{wt}}{v_w} \right) \quad (2.13)$$

$$c_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{101,8}{\lambda i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{-16,5}{\lambda i}} \quad (4.2)$$

$$T_{mec} = 0.5\rho \times \pi \times R^3 \times \frac{c_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \times v_w^2 \quad (4.3)$$

$$\lambda i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,089} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.15)$$

```

function calcula_lambda(){
    lambda_temp = w_temp*raio/V_temp;
}

function calcula_cp(){
var lambdai;
    lambda_temp = round4(lambda_temp);
    lambdai = 1/(1/(lambda_temp + 0.089) - 0.035/(Math.pow(passo_temp,3) + 1));
    lambdai = round4(lambdai);
    cp = 0.5*(101.8/lambdai - 0.4*passo_temp - 5)*Math.exp(-16.5/lambdai);
}

function calcula_torque_mec(){
    if(w_temp > 0) {
        calcula_cp();
        torque_mec = round3((Math.pow(V_temp,2))*kp*raio*cp/lambda_temp);
        // torque_mec = 0.5*ro*area*raio*cp*(V_temp^2)/lambda_temp;
        torque_mec = round3(torque_mec);
    }
    else {
        torque_mec = V_temp;
    }
}

```

Para operações abaixo da velocidade de vento de início de produção (cut-in) e acima da velocidade de corte de produção (cut-out), quando o gerador é desconectado da rede e o torque eletromagnético $T_{elem} = 0$ usa-se a equação (5.3). Nesta equação é inserido um fator de perda Kp proporcional à velocidade de rotação para torna a dinâmica mais realista.

$$\omega_r = \int \frac{1}{I_{tot}} (T_{mec} - Kp \times \omega_r) dt \quad (5.3)$$

```

calcula_torque_mec();
if(embandeiramento){
    w_temp += (torque_mec - perda*w_temp)*delta_t/inercia;
    pot_ele = 0;
    if(passo_temp == 90) {
        if ((Math.abs(torque_mec) < 5) || (amostra_freio > 15)) {
            w_aux = w_temp;
            freio = true;
        }
    }
}

```

```

    }
    Browser.print('torque_mec:\t' + torque_mec);
}
else if((amostra_cutin > 5) && (w_temp < 0.6276)){
    w_temp += (torque_mec - perda*w_temp)*delta_t/inercia;
    pot_ele = 0;
}
else if(amostra_r_cutin > 5 ){
    w_temp += (torque_mec - perda*w_temp)*delta_t/inercia;
    pot_ele = 0;
    if(w_temp > 0.6276) {
        amostra_r_cutin = 0;
    }
}
else if(reconecta){
    w_temp += (torque_mec + V_temp)*delta_t/inercia;
    pot_ele = 0;
    if(w_temp > 0.6276) {
        reconecta = false;
    }
}
}
}

```

5.2.5 Controle de passo

O controle de passo é calculado em função da diferença entre a potência mecânica P_{mec} gerada pela turbina e potência de referência P_{ele_ref} para a velocidade do vento incidente atuando quando essa diferença diferente de zero. O ângulo de passo β ótimo para dada velocidade de vento deve ser calculado e será o valor a ser rastreado pelo controle. O valor de P_{ele_ref} e de β são calculado a partir de tabelas de referência pela função `acha_ponto_otimo(v)` mostrada acima. A implementação em VRML está a seguir.

```

function controle_passo(delta_t){
    if(embandeiramento) {
        passo_otimo = 90;
        v_passo = 10; //Velocidade de passo em caso de tempestades
        if (passo_temp < 90) {calcula_passo(delta_t);}
    }
    else if(reconecta){
        passo_otimo = 0;
        v_passo = 6; //Velocidade de passo em caso de tempestades
        if (passo_temp > 0) {calcula_passo(delta_t);}
    }
    else {
        if (Math.abs(pot_ele_ref - pot_ele)/pot_ele_ref > 0.001) {
            if(Math.abs(w_temp - w_nominal)/w_nominal < 0.05) {
                v_passo = 3;//Velocidade de passo normal
            }
            else {
                v_passo = 6; //Velocidade de passo em caso do percentual
de ultrapassagem ser > 5%
            }
            calcula_passo(delta_t);
        }
    }
}

function calcula_passo(delta_t) {
    if (passo_otimo > passo_temp) {

```

```

        passo_temp += v_passo*ci_w;
        if (passo_temp > passo_otimo) { passo_temp = passo_otimo;}
    }
    else {
        passo_temp -= v_passo*ci_w;
        if (passo_temp < passo_otimo) { passo_temp = passo_otimo;}
    }
    if(passo_temp < 0) {passo_temp = 0;}
    if(passo_temp > 90) {passo_temp = 90;}
}

```

5.2.6 Sistema de proteção

O sistema de proteção implementado é acionado somente em operações abaixo da velocidade de vento de início de produção (cut-in) e acima da velocidade de corte de produção (cut-out). A frequência de amostragem das grandezas monitoradas é estabelecida em 1 Hz.

Para o modelo do *cut-in* utilizou-se um contador que registra as velocidades do vento abaixo de 2,5 m/s seguidas. Quando esse contador atinge um número de registros maior que 5 e a velocidade de rotação do rotor é menor que a velocidade mínima o aerogerador é desconectado ($P_{ele} = 0$) e o controle de velocidade é desligado, alternando-se para o modelo dinâmico do rotor. Para reconexão do aerogerador a rede, outro contador que registra as velocidades do vento acima de 2,5 m/s seguidas é utilizado, atingindo a valor de 5. Com isso o rotor acelera e só deve ser conectado quando a velocidade de rotação for próxima do valor mínimo de 6 rpm.

O *cut-out* segue o mesmo modelo. Mas nesse caso, quando a velocidade de *cut-out* de 25 m/s é ultrapassada pela primeira vez, começa-se a se registrar valores de velocidade do vento durante o período de 20 s. Após esse intervalo calcula-se a média dos valores de vento medidas, se esta for maior que 25 m/s então o aerogerador é desconectado e um comando de *embandeiramento* (ângulo de passo = 90°) é enviado ao sistema. Depois de atingido o ângulo de passo de 90° e se a condição de vento acima do limite se manter, após certo tempo aplica-se o freio mecânico. No modelo foi implementado duas condições para o acionamento do freio: torque mecânico menor que 5 kN.m ou tempo passado depois de atingida a posição de *embandeiramento* de 15 s. Caso a velocidade seja superior a 27 m/s o comando é de *embandeiramento* é mandado imediatamente ao controle. Para restaurar a conexão a rede novamente a velocidade do vento deve se manter em um valor um pouco abaixo da velocidade de *cut-out*, no caso 23,5 m/s, durante certo tempo (5 s).

O código em VRML para registrar estes acontecimentos segue abaixo.

```

function clock_ci(t){
    tempo += 1;
    if(Vvento > 27){
        embandeiramento = true;
    }
    else {
        if(Vvento > 25){
            maior25 = true;
        }
        if(maior25) {
            amostras_V[tempo_amostra] = Vvento;
        }
    }
}

```

```

tempo_amostra += 1;

if (tempo_amostra == amostra_cutout) {
    tempo_amostra -= amostra_cutout;
    Vmed = calcula_media(amostras_V);
    if(Vmed > 25) {embandeiramento = true;}
    amostras_V = new MFInt32();
}
}
if(embandeiramento){
    amostra_freio += 1;
}

if(embandeiramento && Vvento < 23.5) {
    amostra_r_cutout += 1;
    if(amostra_r_cutout > 5){
        Vmed = 0;
        embandeiramento = false;
        maior25 = false;
        freio = false;
        reconecta = true;
        amostra_freio = 0;
        amostra_r_cutout = 0;
    }
}
if(Vvento < 2.5) {
    menor2emeio = true;
    amostra_cutin += 1;
    amostra_r_cutin = 0;
}
else if (amostra_cutin > 5 && Vvento > 2.5){
    menor2emeio = false;
    amostra_r_cutin += 1;
    amostra_cutin = 0;
}
}
}

```

5.3 Interface do Modelo

A interface do modelo dinâmico de visualização do aerogerador permite que usuário envie valores velocidade de vento na cena VRML e como resposta visualize as alterações no comportamento do aerogerador, além dos valores de algumas grandezas como velocidade de rotação do rotor, ângulo de passo e potência de saída.

Para isso implementou-se na cena, eventos de entrada, para alterar o comportamento da cena, e eventos de saída com valores das grandezas de interesse como pode ser visto a seguir:

```

#Gerador de Sinais
eventIn SFFloat set_Vmedio
eventIn SFFloat set_desvio

#Saida parametros para animacao
eventOut SFRotation passo
eventOut SFRotation rotacao

#Saida de dados
eventOut SFFloat lambda #razão de ponta de pá
eventOut SFFloat angulo_passo #ângulo de passo
eventOut SFFloat omega #frequência angular

```

```

eventOut SFFloat velocidade_rotor #velocidade de rotação
eventOut SFFloat registro
eventOut SFFloat potencia_mec
eventOut SFFloat potencia
eventOut SFFloat Vvento_out

```

Utilizando a JavaScript-EAI e HTML DOM é possível enviar e receber dados da cena VRML. Foram desenvolvidas três funções:

- Alterar parâmetros na cena VRML do aerogerador
- Receber sinais de saída da cena VRML do aerogerador
- Comunicar as cenas VRML do aerogerador e do diagrama de velocidade vista pela pá do aerogerador.

A função utilizada para alterar os parâmetros na cena VRML do aerogerador será explicada em seguida.

```

function SetValue() {
var vrml = document.getElementById("aero");
var set_vento = document.getElementById("velocidade").value;
var set_desvio = document.getElementById("desvio").value;
window.status = set_vento;
//setNodeEventIn(String nodeName, String eventName, String value)
/*      Script Gerador_sinais

ENTRADAS -      eventIn      SFFloat      set_Vmedio
                eventIn      SFFloat      set_desvio

SAIDAS -        eventOut SFFloat out_Vmedio
                eventOut SFFloat out_desvio

*/
vrml.setNodeEventIn("gerador_sinais","set_Vmedio", set_vento);
document.getElementById("velocidade").defaultValue = set_vento;
document.getElementById("velocidade").value = set_vento;
vrml.setNodeEventIn("gerador_sinais","set_desvio", set_desvio);
document.getElementById("desvio").defaultValue = set_desvio;
document.getElementById("desvio").value = set_desvio;
}

```

Usando a função HTML DOM:

```

var vrml = document.getElementById("aero");
var set_vento = document.getElementById("velocidade").value;

```

Onde “aero” é a ID do objeto *embedded* da cena VRML do aerogerador e “velocidade” é a ID da caixa de texto para entrada do parâmetro da velocidade de vento média que será enviado a cena VRML através do JavaScript-EAI.

A declaração de JavaScript-EAI para eventos de entrada é:

```
setNodeEventIn(String nodeName, String eventName, String value)
```

O nó script “gerador_sinais” recebe o valor da variável “set_vento” através do evento de entrada (eventIn) “set_Vmedio”, conforme a declaração abaixo.

```
vrml.setNodeEventIn("gerador_sinais","set_Vmedio", set_vento);
```

A interface do modelo dinâmico de visualização do aerogerador pode ser vista na figura 5.12.

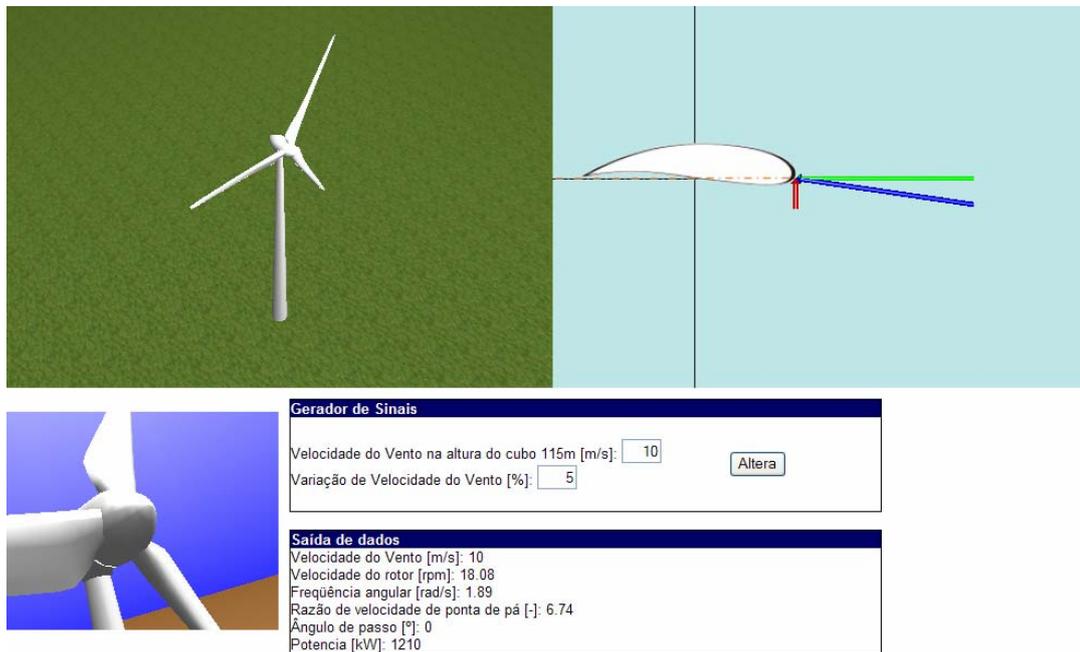


Figura 5.12 - Interface do modelo dinâmico de visualização do aerogerador

5.4 Considerações finais

O VRML é uma poderosa ferramenta para o desenvolvimento de ambientes virtuais interativos. Pode ser desenvolvido em qualquer plataforma e utilizado livremente. Além do que, a estrutura do VRML permite gerar arquivos relativamente pequenos capazes de ser disponibilizados em rede.

Junto com a EAI, o VRML é capaz de desenvolver sistemas multimídias complexos aplicáveis nas mais diversas áreas, no caso desse trabalho o foco é na educação.

A interface do modelo se restringiu a visualizar o comportamento imediato de um aerogerador em curtos períodos alterando a velocidade de vento incidente. Para um trabalho futuro sugere-se que exista uma forma de entrar com uma serie de dados de vento e registrar os dados de saída gerados pelo modelo do aerogerador para futuras análises do modelo e aplicações didáticas.

Outro ponto que deve ser desenvolvido é em relação à plataforma utilizada. A interface do Javascript-EAI só funciona com o plug-in de VRML *Blaxxun Contact 3D* e fica restrita a plataforma do *Internet Explorer*.

No Capítulo 6 será realizado o fechamento desse trabalho, apresentando as conclusões e recomendações.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES

A energia eólica se apresenta como umas das grandes promessas para futuro da geração elétrica. Alguns dos principais motivos são: o fato de ser uma fonte renovável de energia e os baixos impactos ambientais gerados, principalmente no que diz respeito à não emissão de gases de efeito estufa durante sua operação. Além disso, o amadurecimento da tecnologia eólica e sua aceitação no mercado mundial tem tornado a geração eólica mais competitiva economicamente, indicando sinais positivos o futuro.

No Brasil a energia eólica apresenta vantagens estratégicas como forma de geração complementar de energia elétrica, devido as complementaridade geográfica e sazonal.

Um dos obstáculos à introdução de uma nova tecnologia é a falta de informação. A utilização de meios de comunicação para divulgação de informações sobre essas tecnologias é uma forma de propiciar a aceitação pela sociedade, além de estimular a formação de recursos humanos, indispensáveis ao desenvolvimento.

O uso de ambientes multimídias interativos apoiados em tecnologias capazes de prover alta interatividade retornando respostas em tempo real, aliado a redes de computadores é um ferramenta acessível que pode ser usado para a difusão de novas tecnologias. Aplicado à educação esse conjunto de ferramentas é conceituado como Educação Virtual Interativa (EVI).

A EVI é uma poderosa ferramenta de ensino, capaz de auxiliar o processo ensino-aprendizagem e permitir ao aluno uma maior flexibilidade no aprendizado. O uso de ambientes interativos na educação rompe com o paradigma do ensino presencial, indo além dos limites físicos da sala de aula. Essa perspectiva permite o alcance de uma audiência muito mais ampla. Dentro dessas ferramentas destaca-se Realidade Virtual (RV).

A simulação em RV permite apresentar temas complexos como a geração eólica de uma forma sintética, permitindo visualizar o funcionamento de um aerogerador em tempo real. E o referencial tridimensional se identifica bastante com a experiência vivenciada em um ambiente real, tornando o ambiente mais intuitivo e familiar.

O VRML é uma poderosa ferramenta para o desenvolvimento de EVI, que pode ser desenvolvido em qualquer plataforma e utilizado livremente. Além do que, a estrutura do VRML permite criar cenas complexas, gerando arquivos relativamente pequenos capazes de ser disponibilizados em rede.

Junto com a EAI, o VRML é capaz de desenvolver sistemas multimídias complexos aplicáveis nas mais diversas áreas do conhecimento.

O modelo visualização de um aerogerador de velocidade variável com controle de passo proposto nesse trabalho é considerado uma ferramenta de EVI. Considerando o número limitado de situações de teste

realizadas, o modelo funciona adequadamente. Entretanto, sugere-se uma avaliação mais minuciosa sobre o funcionamento desse sistema junto a especialistas na área de eólica para o desenvolvimento do modelo.

6.1 Recomendações

Um dos aspectos que deixa a desejar é a interface de entrada de dados restrita do sistema, que só permite a visualização do comportamento em curtos períodos, sendo só permitido alterar a velocidade de vento incidente em tempo real. A fim de melhorar a interface de entrada de dados do sistema, sugere-se que se desenvolva uma forma de entrar com uma série de dados de vento e registrar os dados de saída gerados pelo modelo do aerogerador para futuras análises do modelo e aplicações didáticas. Isso pode ser implementado com o auxílio da plataforma AJAX (Assynchronous Javascript and Xml).

Uma questão que deve ser desenvolvido é em relação ao sistema utilizado. A interface do Javascript-EAI só funciona com o plug-in de VRML da *Blaxxun Contact 3D* e fica restrita a plataforma do *Internet Explorer*. A futura implementação de EAI em JAVA pode mudar essa condição permitindo a utilização do plug-in de VRML da *Cortona VRML Client* da *ParallelGraphics* que funciona também com navegador *FireFox* baseado na plataforma *Mozilla*.

Uma alternativa é desenvolver o sistema em X3D, que é considerado a evolução do VRML. A estrutura e os objetos do X3D são similares ao do VRML com algumas diferenças. Mas o grande diferencial é que o X3D é baseado no formato de linguagem marcada XML, o que permite o acesso e manipulação da estrutura da cena 3D de forma mais eficiente através do SAI (Scene Access Interface).

Uma avaliação deve ser feita com grupos de aluno e professores de faculdades para verificar a funcionalidade da interface e a eficácia do sistema, observando pontos fortes e fracos do uso dessa ferramenta na educação.

Outras variáveis podem ser implementadas no futuro como: direção do vento, perfil de velocidades do vento, rugosidade e efeitos de vórtices.

Dando continuidade a esse trabalho, apresenta-se a proposta de desenvolvimento do modelo dinâmico do aerogerador de velocidade do rotor variável com controle de passo, utilizando um gerador de indução duplamente alimentado. Essa configuração apresenta vantagens como o fato de usar um conversor eletrônico de menor potência que a nominal (algo em torno de 40% do potencia nominal) e utilizar uma máquina de indução simples que pode ser encontrado facilmente no mercado.

Incluir no modelo o comportamento elétrico da conexão do aerogerador à rede, detalhes como sincronização à rede, controle do fator de potência e tensão no barramento e comportamento da carga.

Outra proposta interessante seria o desenvolvimento do modelo de um controle de extração de potência tipo estol ativo, e comparar com o modelo controle de passo.

Por último, pode-se vislumbrar o uso do VRML para supervisão e controle da operação de aerogerados e o treinamento de operadores de usinas eólicas.

7 BIBLIOGRAFIAS

Bibliografia – Capítulo 2

FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA

- BEURSKENS, J., 2000. “Going to sea – Wind goes offshore”. *Renewable Energy World*, v. 3, n. 1 p. 19-29.
- CARVALHO, P., 2003. *Geração Eólica*. ISBN 85-7485-039-X. Imprensa Universitária, Fortaleza, CE
- CHESF-BRASCEP, 1987. Fontes Energéticas Brasileiras, Inventário/Tecnologia. Energia Eólica. V.1 De cata-ventos a aerogeradores: o uso do vento, Rio de Janeiro.
- CUSTÓDIO, R.S., 2002. *Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas e Aplicação Específica no Rio Grande do Sul*. Tese de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS Fac. de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.
- DIVONE, L.V., 1994, “Evolution of Modern Wind Turbines”. In: *Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, SPERA, S.A, (ed), 1 ed. New York, ASME Press, p. 73-138.
- DUTRA, R.M., 2001. *Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro*. Dissertação de M.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 309 p.
- DUTRA, R.M., 2007. *Propostas de Políticas Específicas para Energia Eólica no Brasil após a Primeira Fase do PROINFA*. Tese de D.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 415 p.
- ELETRÓBRÁS-SCIENTIA, 1977, *Sistemas de Conversão de Energia Eólica*, Rio de Janeiro.
- EWEA, EUROPEAN COMMISSION, 1998a, “Technology”. In: *Wind Energy – The Facts*, Vol 1.
- FERREIRA, Leonardo Santos, 2005. *Efeito de Distúrbios na Malha Principal Sobre o Desempenho Dinâmico à Frequência Fundamental de Aerogeradores de Indução Simples e Aerogeradores de Indução de Dupla Alimentação*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 123 p..
- GERDES, G., SANTJER, F., KLOSSE, R., 1997. *Overview and Development of Procedures on Power Quality Measurements of Wind Turbine*. 1997 European Wind Energy Conference, 1997.
- LORA, E. E. S., TEIXEIRA, F. N., 2006, “Energia e Meio Ambiente”. In: *Conservação de Energia: Eficiência de Equipamentos e Instalações*. Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO, Universidade Federal de Itajubá, FUPAI, 3 ed. Itajubá, MG, p. 43-123.

PAVINATTO, Eduardo Fiorini, 2005. *Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SANDIA, 2006, Vertical Axis Wind Turbine: The History of the DOE Program. Disponível na INTERNET via http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/topical.htm. Arquivo consultado em Junho, 2006

SHEPHERD, D.G., 1994, “Historical Development of the Windmill”. In: *Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, SPERA, S.A, (ed), 1 ed. New York, ASME Press, p. 1-46.

TWELE, J., GASCH, R., 2002. *Wind Power Plants – Fundamentals, Design, Construction and Operation*. ISBN 1-902916-38-7, James & James London.

Wind Power Monthly, 2004/2006. Wind Statistic.

World Wind Energy Association – WWEA, 2006. *Wind Energy International 2005-2006*. ISBN 81-7525-641-9 ed. WWEA, New Delhi, India

RAIAMBAL, K., CHELLAMUTH, C., 2002. “Modeling and Simulation of Grid Connected Wind Electric Generating System”, In: *Proceedings of IEEE TENCON’02*, pp. 1847-1952.

Bibliografia – Capítulo 3

REALIDADE VIRTUAL E EDUCAÇÃO

BLAXXUN, 2007a. Blaxxun Interactive. Blaxxun Contact 5.3. Disponível em: <http://www.blaxxun.com/home/index.php?option=com_content&task=view&id=42&Itemid=85>. Acesso em: 19/11/2007.

BLAXXUN, 2007b. Blaxxun Interactive. Blaxxun Contact 5.3. Disponível em: <<http://developer.blaxxun.com/doc/wwhelp/js/html/frames.htm>>. Acesso em: 18/11/2007.

BRAGA, Mariluci, 2001. Realidade Virtual e Educação. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 1, n. 1, 1996. Rio de Janeiro - RJ.

CARDOSO, A. Alexandre Cardoso - Página do Pesquisador. Contém informações sobre aplicações de Realidade Virtual, pesquisa e publicações do pesquisador, tutoriais sobre VRML e artigos indicados para leitura. Disponível em: <<http://www.compgraf.ufu.br/alexandre/alexandre.html>>. Acesso em: 10/11/2007.

- CARDOSO, A.; TORI, R., 2002. *Uma arquitetura para elaboração de experimentos virtuais interativos suportados por uma realidade virtual não-imersiva*. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 175 p.
- CAREY, Rikk; BELL, Gavin, 1997. *The annotated VRML 2.0 reference manual*. ISBN 0-201-41974-2, A-W Developers Press, United States of America.
- GOOGLE. Site de busca da internet. Busca da definição do termo "Embedded". Disponível em: <<http://www.google.com.br/search?hl=pt-BR&q=define%3A+embedded&meta=>>>. Acesso em: 14/11/2007.
- KOLAR, Johann W. Interactive Power Electronics Seminar (iPES). Sítio da Internet que contém aplicativos em Java direcionadas a apresentação de conceitos de Eletronica de Potência. Disponível em: <<http://www.ipes.ethz.ch/>>. Acesso em: 14/11/2007.
- MENEZES, Ebenezer Takuno de; SANTOS, Thais Helena dos, 2002."Comunicação síncrona" (verbetes). Dicionário Interativo da Educação Brasileira - EducaBrasil. São Paulo: Midiamix Editora, <<http://www.educabrasil.com.br/eb/dic/dicionario.asp?id=202>>, visitado em 12/11/2007.
- REFSNES *et al.*. W3Schools. Sítio da Internet de e-learning com conteúdo didático direcionado para o desenvolvimentos de aplicativos Web. Disponível em: < <http://www.w3schools.com/>>. Acesso em: 14/11/2007.
- CRESESB. Sítio da Internet com informações sobre fontes de energia alternativas, principalmente solar e eólica. Com tutoriais disponíveis e ambientes interativos em VRML. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br> >. Acesso em: 11/12/2007.
- SALGADO, R. VRML Gallery of Eletromagnetism (by Rob Salgado). Sítio da Internet que contém animações em VRML relacionadas com Física, tais como a Lei de Ámpere, campos elétricos de cargas puntiformes, dipolos elétricos etc. Disponível em: <<http://www.physics.syr.edu/courses/vrml/electromagnetism/>>. Acesso em: 14/11/2007.
- SILVA, Isla Carla Felix da, 2001. *Desenvolvimento de um ambiente para criação de animações de cenas VRML para WEB*. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP: [s.n.], 57 p.
- WIKIPÉDIA. Desenvolvido pela Wikimedia Foundation. Apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Second_life&oldid=6974068>. Acesso em: 13/11/2007.

Bibliografia – Capítulo 4

MODELO DINÂMICO DO AEROGERADOR

ENERCON, ENERCON GmbH. *AEROGERADORES ENERCON – Vista geral de produtos*. Catálogo do Fabricante, Lisboa, Portugal, ed. 03/2007. Disponível em: < <http://www.enercon.de> >. Acesso em; 14/11/2007.

MARQUES, J., *et al.*, 2002. “A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System”. In: *6º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP’02*, v. 1, pp. 732-738.

PAVINATTO, Eduardo Fiorini, 2005. *Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

WOBLEN, WOBLEN Windpower/ENERCON GmbH. Sítio da Internet do fabricante de aerogeradores WOBLEN, subsidiária da ENERCON no Brasil. Disponível em: < http://www.wobben.com.br/produtos_Servicos_e70.htm >. Acesso em: 12/12/2007.

SLOOTWEG, J. G., *et al.*, 2003. “General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 1, pp. 144-151.

Bibliografia – Capítulo 5

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DO AEROGERADOR EM VRML

DEWI, 2004. “Energia Eólica: Técnicas Básicas”. Material de curso, Deutsches Windenergie – Institut GmbH (Instituto Alemão de Energia Eólica Ltda). Site de referência: < <http://www.dewi.de> >.

ENERCON, ENERCON GmbH. *AEROGERADORES ENERCON – Vista geral de produtos*. Catálogo do Fabricante, Lisboa, Portugal, ed. 03/2007. Disponível em: < <http://www.enercon.de> >. Acesso em; 14/11/2007.

ROGER, Michel. “Modeling Joan of Arc by Michel Roger”. Tutorial on-line. Sítio da internet com informações sobre computação gráfica e técnicas de modelagem com tutoriais. Disponível no site: < mr2k.3dvm.com >, acessado em: 14/12/2007.

ANEXO – I

Virtual Reality Modeling Language – VRML

Baseado em:

Isla Carla Felix da Silva, 2001. *Desenvolvimento de um ambiente para criação de animações de cenas VRML para WEB*. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Fac. Eng. Elétrica e de Computação, Campinas, SP: [s.n.], 57 p.

Introdução

VRML é uma linguagem independente de plataforma que permite a criação de ambientes virtuais. Nestes ambientes pode-se navegar, visualizar objetos por ângulos diferentes e interagir com eles.

A linguagem *VRML* surgiu da necessidade de prover um formato gráfico 3D para a *Web* seguindo um modelo similar à *HTML*, ou seja, uma linguagem textual independente de plataforma para a descrição de cenas. A linguagem escolhida como referência foi a *Open Inventor* da *SGI*. Em 1995 foi lançada a *VRML 1.0*, que era basicamente um formato para a descrição de cenas estáticas 3D. Em 1997 foi lançada a *VRML 2.0* (ou *VRML 97*) (RAPOSO *et al.*, 2000a) (TAMIOSSO, 1997a) (TAMIOSSO *et al.*, 1997b) (WEB, 1997), que adicionou à linguagem conceitos, tais como possibilidade de mover objetos na cena e criação de sensores para detectar e gerar eventos.

A linguagem *VRML* foi projetada pelo consórcio das companhias *Silicon Graphics*, *Sony Research e Mitra* com a finalidade de obter uma padronização na descrição de cenas *Web* (TAMIOSSO, 1998). Até 1999, este consórcio se chamava *VRML Consortium*, e depois passou a se chamar *Web 3D Consortium* (WEB, 1999).

O objetivo da *VRML* é levar conceitos da realidade virtual ao usuário comum, através da *Internet*. Com o rápido avanço das tecnologias, os computadores pessoais estão cada vez mais rápidos e poderosos e isto faz com que a realidade virtual deixe de ser objeto de estudo dos grandes centros de pesquisa e possa ser utilizada também por usuários comuns.

A linguagem *VRML* acrescenta percepção à navegação na *Web* através de descrições completas da cena em que o usuário se encontra, montando verdadeiros "mundos virtuais" (razão pela qual os arquivos *VRML* apresentam a extensão ".wrl", de *word reality language*).

Para se escrever um código *VRML* apenas um editor de textos é necessário. Uma vez editados, os arquivos são gravados em formato *ASCII*. Na verdade, a linguagem apenas descreve como os ambientes tridimensionais devem ser representados. O código *VRML* é interpretado.

Pode-se, por exemplo, criar um cubo e gravá-lo em um arquivo chamado *cubo.wrl*. O código *VRML* para este cubo descreverá as características do ambiente, como coordenadas, luz e cores.

Objetos localizados remotamente (em outros lugares na *Internet*) e *links* para outras *homepages* também podem ser colocados no mundo *VRML*.

É conveniente comentar que as primitivas geométricas de *VRML* (caixa, cone, cilindro e esfera) são, por definição, sólidas e não permitem a sua visualização interna, a não ser que algumas partes sejam removidas (por exemplo, a base de um cilindro).

Para completar as possibilidades criativas básicas em *VRML* precisa-se deslocar, modificar a escala e rotacionar os objetos previamente definidos. A linguagem *VRML* permite realizar as chamadas transformações geométricas, que dão uma enorme flexibilidade e aumentam notadamente o poder criativo do construtor. De posse deste conhecimento pode-se construir o mundo idealizado.

Para fins de identificação, um arquivo *VRML 2.0* apresenta o seguinte cabeçalho:

```
#VRML V2.0 utf8
```

VRML é baseada no sistema cartesiano *3D*, sendo as unidades de medida de distância e ângulos (eixos X, Y e Z) metros e radianos respectivamente. Usando uma página na frente do leitor como referência, o eixo-X positivo está para a direita, o eixo-Y positivo está para cima e o eixo-Z positivo está perpendicular aos dois anteriores, saindo da página em direção ao leitor. O sentido de rotação para ângulos positivos é o anti-horário, quando a seta vai em direção ao observador.

Estrutura hierárquica da cena

O paradigma para a criação de mundos *VRML* é baseado em nós. Estes nós são conjuntos de abstrações de objetos e de certas entidades do mundo real, tais como formas geométricas, luz e som. Nós são os componentes fundamentais de uma cena *VRML* porque esta é constituída a partir da disposição e combinação entre os nós.

Um mundo *VRML* é um grafo hierárquico em forma de árvore. As hierarquias são criadas através de nós de agrupamento, os quais contêm um campo chamado *children* que engloba uma lista de nós filhos. Há vários tipos de nós em *VRML* (HARTMAN e WERNECKE, 1996) (VRML, 1997) (WEB, 1997):

1- **Agrupamento** – como já comentado, nós de agrupamento criam a estrutura hierárquica da cena e permitem que operações sejam aplicadas a um conjunto de nós simultaneamente. Alguns exemplos desse tipo de nó são:

- **Anchor** - É um nó de agrupamento que recupera o conteúdo de uma *URL* quando o usuário ativa alguma geometria contida em algum de seus nós filhos (clica com o mouse sobre eles, por

exemplo). É o nó que cria *links* com outros mundos *VRML*, páginas *HTML*, ou qualquer outro tipo de documento presente no referido *URL*.

- **Transform** - É um nó de agrupamento que define um sistema de coordenadas para seus filhos que está relacionado com o sistema de coordenadas de seus pais. Sobre este sistema de coordenadas podem ser realizadas operações de translação, rotação e escalonamento.
- **Group** - É um nó de agrupamento que contém um número qualquer de filhos. Ele é equivalente ao nó *Transform* sem os campos de transformação. A diferença básica entre o *Group* e o *Transform* é que o primeiro é usado quando se deseja criar um novo objeto constituído da combinação de outros. Quando se deseja agrupar espacialmente os objetos, ou seja, posicioná-los em uma certa região da cena, usa-se o nó *Transform*.

2- **Geométrico** – Define a forma e a aparência de um objeto do mundo. O nó *Shape*, em particular, possui dois parâmetros: *geometry*, que define a forma do objeto e *appearance*, que define as propriedades visuais dos objetos. Alguns exemplos de nós geométricos são:

- **Box** – Este nó geométrico representa um sólido retangular (uma “caixa”) centrado na origem (0, 0, 0) do sistema de coordenadas local e alinhado com os eixos cartesianos. O campo *size* representa as dimensões do sólido nos eixos *x*, *y* e *z*.

```
Box { size 2 2 2 }
```

- **Cone** – Representa um cone centrado na origem do sistema local de coordenadas cujo eixo central está alinhado com o eixo *y*.
- **Cylinder** – Define um cilindro centrado na origem do sistema de coordenadas e com o eixo central ao longo do eixo *y*.
- **Sphere** – Especifica uma esfera centrada na origem.

3- **Appearance** - Este nó aparece apenas no campo *appearance* de um nó *Shape* e é responsável pela definição das propriedades visuais das figuras geométricas (material e textura).

4- **Câmera** - O nó *Viewport* define, entre outros parâmetros, a posição e orientação da câmera (ponto de vista do usuário). Este tipo de nó é chamado *blindable* porque apenas um pode estar ativo na cena.

5- **Iluminação** - Luzes em *VRML* não são como luzes no mundo real. No mundo real, luzes são objetos físicos que emitem luz e que podem ser vistos, assim como a luz por eles emitida. Em *VRML*, um nó de iluminação é descrito como parte do mundo mas, não cria automaticamente uma geometria para representá-lo. Para que uma fonte de luz em uma cena seja um objeto visível é necessário criar uma geometria e colocá-la em um determinado local na cena. Existem três tipos de nós de iluminação em *VRML*:

- ***DirectionalLight*** - Nó que define uma fonte de luz direcional com raios paralelos.
- ***PointLight*** - Nó que define uma fonte de luz pontual em um local 3D fixo. Este tipo de fonte ilumina igualmente em todas as direções.
- ***SpotLight*** - Nó que define uma fonte de luz que projeta um cone de iluminação.

Além desses tipos básicos, existem ainda os nós sensores, os interpoladores e o nó *Script*, que serão vistos mais adiante.

Prototipação e reutilização

Os mecanismos de prototipação em *VRML* permitem definir um novo tipo de nó baseado na combinação de nós já existentes. Permitem também, a criação de cenas distribuídas pois um subgrafo (protótipo) pode ser definido em um arquivo remoto cujo *URL* é conhecido.

Atribuindo-se um nome a um nó através da palavra *DEF*, pode-se futuramente referenciá-lo através da palavra *USE*. Sendo assim, caso seja necessária a reutilização de um mesmo nó várias vezes em uma cena, é mais eficiente atribuir-lhe um nome na primeira vez que ele é descrito e posteriormente referenciá-lo por este nome. Essa técnica torna o arquivo menor, mais fácil de ser lido, e diminui o tempo necessário para carregar a cena.

Tipos de parâmetros e roteamento de eventos

Cada nó *VRML* define um nome, um tipo e um valor *default* para seus parâmetros. Estes parâmetros diferenciam um nó de outros de mesmo tipo (por exemplo, o raio de uma esfera a diferencia de outra). Há dois tipos de parâmetros possíveis: campos e eventos. Os campos podem ser de dois tipos: modificáveis (*exposedFields*) ou não (*fields*).

Os eventos podem ser enviados para outros nós por um parâmetro do tipo *eventOut* (um terminal lógico anexado a um nó do qual eventos são enviados) e recebidos por um *eventIn* (um receptor lógico anexado a um nó que recebe eventos).

Estes eventos sinalizam mudanças causadas por “estímulos externos” e podem ser propagados entre os nós da cena por meio de roteamentos (*Routes*) que conectam um *eventOut* de um nó a um *eventIn* de outro nó, desde que sejam eventos do mesmo tipo.

Sensores e interpoladores

Os nós sensores e interpoladores são especialmente importantes porque são os responsáveis pela interatividade e dinamismo dos mundos *VRML*.

Os sensores são responsáveis pela interação com o usuário, mas não estão restritos a gerar eventos a partir de ações dos mesmos. O *TimeSensor*, por exemplo, gera automaticamente um evento a cada pulso do relógio. Os *eventOuts* gerados pelos sensores podem ser ligados a outros *eventIns* da cena, iniciando uma animação.

A seguir alguns sensores serão descritos:

- ***TimeSensor*** - O nó *TimeSensor* gera eventos como passos de tempo e em conjunto com interpoladores pode produzir animações.
- ***TouchSensor*** - O nó *TouchSensor* detecta quando um objeto do grupo do seu pai é ativado (clique do *mouse*, por exemplo). Esse sensor gera um evento de saída chamado *touchTime* que pode disparar o *TimeSensor* iniciando uma animação.
- ***ProximitySensor*** - O nó *ProximitySensor* gera eventos quando o usuário entra, sai e/ou se move em uma região do espaço. O sensor de proximidade é habilitado ou desabilitado pelo envio de um evento *enabled* com o valor *TRUE* ou *FALSE*.
- ***VisibilitySensor*** - O nó *VisibilitySensor* detecta quando certa parte do mundo (área ou objeto específico) torna-se visível ao usuário. Quando a área está visível, o sensor pode ativar um procedimento ou animação.

A forma mais comum de se criar animações é usando *keyframes* (quadros-chave), especificando os momentos-chave na seqüência da animação. Os quadros intermediários são obtidos através da interpolação dos quadros-chave. Nós interpoladores servem para definir este tipo de animação, associando valores-chave (de posição, cor, etc.) que serão linearmente interpolados. Alguns exemplos de interpoladores são:

- ***PositionInterpolator*** - O nó *PositionInterpolator* permite realizar uma animação *keyframe* no espaço 3D. Exemplo:

```

PositionInterpolator {
Key [0, 0.5, 1]
KeyValue [ 0 0 0, 0 10 0, 0 0 0 ]
}

```

- ***CoordinateInterpolator, ColorInterpolator e OrientationInterpolator*** - De forma similar interpolam, respectivamente, uma lista de coordenadas, valores de cor e valores de rotação.

Nó Script

Apesar de ser um recurso poderoso, o roteamento de eventos entre os nós não é suficiente para o tratamento de várias classes de comportamento. Por exemplo, não é possível escolher entre duas trajetórias pré-definidas (lógica de decisão). Para superar esta limitação, a *VRML* define um nó especial chamado *Script*, que permite conectar o mundo *VRML* a programas externos, onde os eventos podem ser processados. Este programa externo, teoricamente, pode ser escrito em qualquer linguagem de programação, desde que o *browser* a suporte. Na prática, apenas *Java* (JAWORSKI, 1999) (LEMAY e CADENHEAD, 1999) (SUN, 1998) e *JavaScript* (SHELLY e CASHMAN, 2000) são usadas.

O nó *Script* é ativado pelo recebimento de um evento. Quando isso ocorre, o *browser* inicia a execução do programa definido no campo *URL* do nó *Script*. Este programa é capaz de receber, processar e gerar eventos que controlam o comportamento do mundo virtual.

Por meio do nó *Script* é possível usar técnicas bem mais sofisticadas que a interpolação linear para a geração de animações.

Referência Bibliografica

- HARTMAN, J.; WERNECKE, J., 1996. *The VRML 2.0 Handbook – Building Moving Worlds on the Web*. Addison Wesley.
- JAWORSKI, J.; 1999. *Java 2 Platform Unleashed*. Sams.
- LEMAY, L.; CADENHEAD, R., 1999. *Aprenda em 21 dias Java 1.2*. Editora Campus.
- RAPOSO, A. B. et al., 2000a. *Software Livre para Computação Gráfica e Animação por Computador*. SIBGRAPI'2000. Gramado. Outubro 2000.

- SHELLY, Gary B.; CASHMAN, Thomas J., 2000. *Java Script: Introductory Concepts and Techniques*. 2000. [SUN, 1998] Sun Microsystems. *Linguagem Java*. 1998. <http://java.sun.com>
- TAMIOSSO, F. S., 1998. *Desenvolvimento de um ambiente para construção de animações interativas: combinando VRML e Java*. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Dissertação de mestrado. Campinas. Novembro de 1998.
- TAMIOSSO, F. S., 1997a. *VRML 2.0 - Resumo baseado em exemplos*. 1997. <http://www.dca.fee.unicamp.br/~fabiana/vrml/tutorial.html>
- TAMIOSSO, F. S. *et al.*, 1997b. *Building interactive animations using VRML and Java*. X Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens. SIBGRAPI'97. pp.42-48. Campos do Jordão, SP. 1997.
- VRML, 1997. VRML Consortium. *The Virtual Reality Modeling Language Specification ISO/IEC DIS 14772-1*. Abril, 1997. <http://www.vrml.org/Specifications/VRML97/DIS/>
- WEB, 1997. Web 3D Consortium. *The Virtual Reality Modeling Language. International Standard ISO/IEC DIS 14772-1*. <http://www.web3d.org/technicalinfo/specifications/vrml97/index.htm>
- WEB, 1999. Web 3D Consortium. <http://www.web3d.org>

ANEXO – II

*Referência de Nós VRML**e**Sumário de JavaScript Scripting API*

Baseado em:

CAREY, Rikk; BELL, Gavin, 1997. *The annotated VRML 2.0 reference manual*. ISBN 0-201-41974-2, A-W
 Developers Press, United States of America.

Referência de Nós

```

Anchor {
  eventIn      MFNode   addChildren
  eventIn      MFNode   removeChildren
  exposedField MFNode   children      []
  exposedField SFString description   ""
  exposedField MFString parameter     []
  exposedField MFString url           []
  field        SFVec3f  bboxCenter    0 0 0      # (-∞, ∞)
  field        SFVec3f  bboxSize      -1 -1 -1   # (0, ∞) or -1, -1, -1
}
Appearance {
  exposedField SFNode material        NULL
  exposedField SFNode texture         NULL
  exposedField SFNode textureTransform NULL
}
AudioClip {
  exposedField SFString description    ""
  exposedField SFBool   loop           FALSE
  exposedField SFFloat  pitch         1.0        # (0, ∞)
  exposedField SFTime   startTime     0          # (-∞, ∞)
  exposedField SFTime   stopTime      0          # (-∞, ∞)
  exposedField MFString url           []
  eventOut    SFTime   duration_changed
  eventOut    SFBool   isActive
}

```

```

Background {
    eventIn      SFBool    set_bind
    exposedField MFFloat   groundAngle  []          # [0,π/2]
    exposedField MFColor   groundColor []          # [0,1]
    exposedField MFString  backUrl      []
    exposedField MFString  bottomUrl    []
    exposedField MFString  frontUrl     []
    exposedField MFString  leftUrl      []
    exposedField MFString  rightUrl     []
    exposedField MFString  topUrl       []
    exposedField MFFloat   skyAngle     []          # [0,π]
    exposedField MFColor   skyColor     [ 0 0 0 ]    # [0,1]
    eventOut      SFBool    isBound
}
Billboard {
    eventIn      MFNode    addChildren
    eventIn      MFNode    removeChildren
    exposedField SFVec3f   axisOfRotation 0 1 0        # (-∞, ∞)
    exposedField MFNode    children        []
    field        SFVec3f   bboxCenter     0 0 0        # (-∞, ∞)
    field        SFVec3f   bboxSize       -1 -1 -1     # (0, ∞) or -1,-1,-1
}
Box {
    field        SFVec3f   size          2 2 2        # (0, ∞)
}
Collision {
    eventIn      MFNode    addChildren
    eventIn      MFNode    removeChildren
    exposedField MFNode    children        []
    exposedField SFBool    collide        TRUE
    field        SFVec3f   bboxCenter     0 0 0        # (-∞, ∞)
    field        SFVec3f   bboxSize       -1 -1 -1     # (0, ∞) or -1,-1,-1
    field        SFNode    proxy          NULL
    eventOut     SFTIME    collideTime
}
Color {
    exposedField MFColor   color        []          # [0,1]
}
ColorInterpolator {
    eventIn      SFFloat   set_fraction    # (-∞, ∞)
    exposedField MFFloat   key           []          # (-∞, ∞)
    exposedField MFColor   keyValue      []          # [0,1]
    eventOut     SFColor   value_changed
}
Cone {
    field        SFFloat   bottomRadius 1          # (0, ∞)
    field        SFFloat   height        2          # (0, ∞)
    field        SFBool    side          TRUE
    field        SFBool    bottom       TRUE
}
Coordinate {
    exposedField MFVec3f   point        []          # (-∞, ∞)
}
CoordinateInterpolator {
    eventIn      SFFloat   set_fraction    # (-∞, ∞)
    exposedField MFFloat   key           []          # (-∞, ∞)
}

```

```

    exposedField MFVec3f keyValue      []      # (-∞, ∞)
    eventOut      MFVec3f value_changed
}
Cylinder {
    field      SFBool      bottom      TRUE
    field      SFFloat     height      2          # (0, ∞)
    field      SFFloat     radius      1          # (0, ∞)
    field      SFBool      side        TRUE
    field      SFBool      top         TRUE
}
CylinderSensor {
    exposedField SFBool      autoOffset TRUE
    exposedField SFFloat     diskAngle 0.262      # (0, π/2)
    exposedField SFBool      enabled     TRUE
    exposedField SFFloat     maxAngle   -1          # [-2π, 2π]
    exposedField SFFloat     minAngle   0          # [-2π, 2π]
    exposedField SFFloat     offset      0          # (-∞, ∞)
    eventOut      SFBool      isActive
    eventOut      SFRotation rotation_changed
    eventOut      SFVec3f     trackPoint_changed
}
DirectionalLight {
    exposedField SFFloat     ambientIntensity 0          # [0, 1]
    exposedField SFColor     color          1 1 1      # [0, 1]
    exposedField SFVec3f     direction      0 0 -1     # (-∞, ∞)
    exposedField SFFloat     intensity      1          # [0, 1]
    exposedField SFBool      on             TRUE
}
ElevationGrid {
    eventIn      MFFloat     set_height
    exposedField SFNode      color          NULL
    exposedField SFNode      normal         NULL
    exposedField SFNode      texCoord       NULL
    field        MFFloat     height        []          # (-∞, ∞)
    field        SFBool      ccw           TRUE
    field        SFBool      colorPerVertex TRUE
    field        SFFloat     creaseAngle   0          # [0, ∞]
    field        SFBool      normalPerVertex TRUE
    field        SFBool      solid         TRUE
    field        SFInt32     xDimension    0          # [0, ∞)
    field        SFFloat     xSpacing      1.0        # (0, ∞)
    field        SFInt32     zDimension    0          # [0, ∞)
    field        SFFloat     zSpacing      1.0        # (0, ∞)
}
Extrusion {
    eventIn      MFVec2f     set_crossSection
    eventIn      MFRotation  set_orientation
    eventIn      MFVec2f     set_scale
    eventIn      MFVec3f     set_spine
    field        SFBool      beginCap      TRUE
    field        SFBool      ccw           TRUE
    field        SFBool      convex        TRUE
    field        SFFloat     creaseAngle   0          # [0, ∞)
    field        MFVec2f     crossSection   [ 1 1, 1 -1, -1 -1,
    -1 1, 1 1 ]          # (-∞, ∞)
    field        SFBool      endCap        TRUE
}

```

```

    field    MFRotation orientation    0 0 1 0          # [-1,1],(-∞,∞)
    field    MFVec2f    scale           1 1              # (0,∞)
    field    SFBool     solid           TRUE
    field    MFVec3f    spine           [ 0 0 0, 0 1 0 ] # (-∞,∞)
}
Fog {
    exposedField SFColor  color         1 1 1           # [0,1]
    exposedField SFString fogType       "LINEAR"
    exposedField SFFloat  visibilityRange 0              # [0,∞)
    eventIn      SFBool   set_bind
    eventOut     SFBool   isBound
}
FontStyle {
    field MFString family      ["SERIF"]
    field SFBool   horizontal   TRUE
    field MFString justify     "BEGIN"
    field SFString language    ""
    field SFBool   leftToRight TRUE
    field SFFloat  size         1.0             # (0,∞)
    field SFFloat  spacing      1.0             # [0,∞)
    field SFString style       "PLAIN"
    field SFBool   topToBottom TRUE
}
Group {
    eventIn      MFNode  addChildren
    eventIn      MFNode  removeChildren
    exposedField MFNode  children      []
    field        SFVec3f bboxCenter    0 0 0           # (-∞,∞)
    field        SFVec3f bboxSize      -1 -1 -1        # (0,∞) or -1,-1,-1
}
ImageTexture {
    exposedField MFString url          []
    field        SFBool   repeats      TRUE
    field        SFBool   repeatT     TRUE
}
IndexedFaceSet {
    eventIn      MFInt32 set_colorIndex
    eventIn      MFInt32 set_coordIndex
    eventIn      MFInt32 set_normalIndex
    eventIn      MFInt32 set_texCoordIndex
    exposedField SFNode  color         NULL
    exposedField SFNode  coord         NULL
    exposedField SFNode  normal        NULL
    exposedField SFNode  texCoord     NULL
    field        SFBool   ccw          TRUE
    field        MFInt32  colorIndex    []              # [-1,∞)
    field        SFBool   colorPerVertex TRUE
    field        SFBool   convex       TRUE
    field        MFInt32  coordIndex    []              # [-1,∞)
    field        SFFloat  creaseAngle  0              # [0,∞)
    field        MFInt32  normalIndex   []              # [-1,∞)
    field        SFBool   normalPerVertex TRUE
    field        SFBool   solid         TRUE
    field        MFInt32  texCoordIndex []              # [-1,∞)
}
IndexedLineSet {

```

```

    eventIn      MFInt32  set_colorIndex
    eventIn      MFInt32  set_coordIndex
    exposedField SFNode   color          NULL
    exposedField SFNode   coord          NULL
    field        MFInt32  colorIndex     []      # [-1, ∞)
    field        SFBool   colorPerVertex TRUE
    field        MFInt32  coordIndex     []      # [-1, ∞)
}
Inline {
    exposedField MFString url          []
    field        SFVec3f  bboxCenter  0 0 0      # (-∞, ∞)
    field        SFVec3f  bboxSize    -1 -1 -1    # (0, ∞) or -1, -1, -1
}
LOD {
    exposedField MFNode   level        []
    field        SFVec3f  center       0 0 0      # (-∞, ∞)
    field        MFFloat  range        []      # (0, ∞)
}
Material {
    exposedField SFFloat  ambientIntensity 0.2      # [0, 1]
    exposedField SFColor  diffuseColor     0.8 0.8 0.8 # [0, 1]
    exposedField SFColor  emissiveColor    0 0 0      # [0, 1]
    exposedField SFFloat  shininess        0.2      # [0, 1]
    exposedField SFColor  specularColor    0 0 0      # [0, 1]
    exposedField SFFloat  transparency     0        # [0, 1]
}
MovieTexture {
    exposedField SFBool   loop            FALSE
    exposedField SFFloat  speed           1.0      # (-∞, ∞)
    exposedField SFTime   startTime       0        # (-∞, ∞)
    exposedField SFTime   stopTime       0        # (-∞, ∞)
    exposedField MFString url            []
    field        SFBool   repeats         TRUE
    field        SFBool   repeatT        TRUE
    eventOut     SFTime   duration_changed
    eventOut     SFBool   isActive
}
NavigationInfo {
    eventIn      SFBool   set_bind
    exposedField MFFloat  avatarSize      [0.25, 1.6, 0.75] # [0, ∞)
    exposedField SFBool   headlight       TRUE
    exposedField SFFloat  speed           1.0      # [0, ∞)
    exposedField MFString type            ["WALK", "ANY"]
    exposedField SFFloat  visibilityLimit 0.0      # [0, ∞)
    eventOut     SFBool   isBound
}
Normal {
    exposedField MFVec3f  vector          []      # (-∞, ∞)
}
NormalInterpolator {
    eventIn      SFFloat  set_fraction    # (-∞, ∞)
    exposedField MFFloat  key             []      # (-∞, ∞)
    exposedField MFVec3f  keyValue        []      # (-∞, ∞)
    eventOut     MFVec3f  value_changed
}
OrientationInterpolator {

```

```

eventIn      SFFloat    set_fraction    # (-∞, ∞)
exposedField MFFloat    key           [] # (-∞, ∞)
exposedField MFRotation keyValue      [] # [-1,1], (-∞, ∞)
eventOut     SFRotation value_changed
}
PixelTexture {
  exposedField SFImage  image      0 0 0 # see "4.5 SFImage"
  field        SFBool   repeats    TRUE
  field        SFBool   repeatT    TRUE
}
PlaneSensor {
  exposedField SFBool   autoOffset    TRUE
  exposedField SFBool   enabled       TRUE
  exposedField SFVec2f  maxPosition   -1 -1 # (-∞, ∞)
  exposedField SFVec2f  minPosition   0 0 # (-∞, ∞)
  exposedField SFVec3f  offset       0 0 0 # (-∞, ∞)
  eventOut     SFBool   isActive
  eventOut     SFVec3f  trackPoint_changed
  eventOut     SFVec3f  translation_changed
}
PointLight {
  exposedField SFFloat  ambientIntensity 0 # [0,1]
  exposedField SFVec3f  attenuation      1 0 0 # [0, ∞)
  exposedField SFColor  color           1 1 1 # [0,1]
  exposedField SFFloat  intensity       1 # [0,1]
  exposedField SFVec3f  location       0 0 0 # (-∞, ∞)
  exposedField SFBool   on             TRUE
  exposedField SFFloat  radius        100 # [0, ∞)
}
PointSet {
  exposedField SFNode   color          NULL
  exposedField SFNode   coord         NULL
}
PositionInterpolator {
  eventIn      SFFloat    set_fraction    # (-∞, ∞)
  exposedField MFFloat    key           [] # (-∞, ∞)
  exposedField MFVec3f    keyValue      [] # (-∞, ∞)
  eventOut     SFVec3f    value_changed
}
ProximitySensor {
  exposedField SFVec3f    center       0 0 0 # (-∞, ∞)
  exposedField SFVec3f    size        0 0 0 # [0, ∞)
  exposedField SFBool     enabled      TRUE
  eventOut     SFBool     isActive
  eventOut     SFVec3f    position_changed
  eventOut     SFRotation orientation_changed
  eventOut     SFTime     enterTime
  eventOut     SFTime     exitTime
}
ScalarInterpolator {
  eventIn      SFFloat    set_fraction    # (-∞, ∞)
  exposedField MFFloat    key           [] # (-∞, ∞)
  exposedField MFFloat    keyValue      [] # (-∞, ∞)
  eventOut     SFFloat    value_changed
}
Script {

```

```

exposedField MFString url []
field SFBool directOutput FALSE
field SFBool mustEvaluate FALSE
# And any number of:
eventIn eventType eventName
field fieldType fieldName initialValue
eventOut eventType eventName
}
Shape {
  exposedField SFNode appearance NULL
  exposedField SFNode geometry NULL
}
Sound {
  exposedField SFVec3f direction 0 0 1 # (-∞, ∞)
  exposedField SFFloat intensity 1 # [0,1]
  exposedField SFVec3f location 0 0 0 # (-∞, ∞)
  exposedField SFFloat maxBack 10 # [0, ∞)
  exposedField SFFloat maxFront 10 # [0, ∞)
  exposedField SFFloat minBack 1 # [0, ∞)
  exposedField SFFloat minFront 1 # [0, ∞)
  exposedField SFFloat priority 0 # [0,1]
  exposedField SFNode source NULL
  field SFBool spatialize TRUE
}
Sphere {
  field SFFloat radius 1 # (0, ∞)
}
SphereSensor {
  exposedField SFBool autoOffset TRUE
  exposedField SFBool enabled TRUE
  exposedField SFRotation offset 0 1 0 0 # [-1,1], (-∞, ∞)
  eventOut SFBool isActive
  eventOut SFRotation rotation_changed
  eventOut SFVec3f trackPoint_changed
}
SpotLight {
  exposedField SFFloat ambientIntensity 0 # [0,1]
  exposedField SFVec3f attenuation 1 0 0 # [0, ∞)
  exposedField SFFloat beamWidth 1.570796 # (0, π/2)
  exposedField SFColor color 1 1 1 # [0,1]
  exposedField SFFloat cutOffAngle 0.785398 # (0, π/2)
  exposedField SFVec3f direction 0 0 -1 # (-∞, ∞)
  exposedField SFFloat intensity 1 # [0,1]
  exposedField SFVec3f location 0 0 0 # (-∞, ∞)
  exposedField SFBool on TRUE
  exposedField SFFloat radius 100 # [0, ∞)
}
Switch {
  exposedField MFNode choice []
  exposedField SFInt32 whichChoice -1 # [-1, ∞)
}
Text {
  exposedField MFString string []
  exposedField SFNode fontStyle NULL
  exposedField MFFloat length [] # [0, ∞)
  exposedField SFFloat maxExtent 0.0 # [0, ∞)
}

```

```

}
TextureCoordinate {
  exposedField MFVec2f point [] # (-∞,∞)
}
TextureTransform {
  exposedField SFVec2f center 0 0 # (-∞,∞)
  exposedField SFFloat rotation 0 # (-∞,∞)
  exposedField SFVec2f scale 1 1 # (-∞,∞)
  exposedField SFVec2f translation 0 0 # (-∞,∞)
}
TimeSensor {
  exposedField SFTime cycleInterval 1 # (0,∞)
  exposedField SFBool enabled TRUE
  exposedField SFBool loop FALSE
  exposedField SFTime startTime 0 # (-∞,∞)
  exposedField SFTime stopTime 0 # (-∞,∞)
  eventOut SFTime cycleTime
  eventOut SFFloat fraction_changed
  eventOut SFBool isActive
  eventOut SFTime time
}
TouchSensor {
  exposedField SFBool enabled TRUE
  eventOut SFVec3f hitNormal_changed
  eventOut SFVec3f hitPoint_changed
  eventOut SFVec2f hitTexCoord_changed
  eventOut SFBool isActive
  eventOut SFBool isOver
  eventOut SFTime touchTime
}
Transform {
  eventIn MFNode addChildren
  eventIn MFNode removeChildren
  exposedField SFVec3f center 0 0 0 # (-∞,∞)
  exposedField MFNode children []
  exposedField SFRotation rotation 0 0 1 0 # [-1,1],(-∞,∞)
  exposedField SFVec3f scale 1 1 1 # (0,∞)
  exposedField SFRotation scaleOrientation 0 0 1 0 # [-1,1],(-∞,∞)
  exposedField SFVec3f translation 0 0 0 # (-∞,∞)
  field SFVec3f bboxCenter 0 0 0 # (-∞,∞)
  field SFVec3f bboxSize -1 -1 -1 # (0,∞) or -1,-1,-
1
}
Viewpoint {
  eventIn SFBool set_bind
  exposedField SFFloat fieldOfView 0.785398 # (0,π)
  exposedField SFBool jump TRUE
  exposedField SFRotation orientation 0 0 1 0 # [-1,1],(-∞,∞)
  exposedField SFVec3f position 0 0 10 # (-∞,∞)
  field SFString description ""
  eventOut SFTime bindTime
  eventOut SFBool isBound
}
VisibilitySensor {
  exposedField SFVec3f center 0 0 0 # (-∞,∞)
  exposedField SFBool enabled TRUE

```

```

    exposedField SFVec3f size      0 0 0      # [0,∞)
    eventOut      SFTime  enterTime
    eventOut      SFTime  exitTime
    eventOut      SFBool  isActive
}
WorldInfo {
    field MFString info  []
    field SFString title ""
}

```

Sumário de JavaScript Scripting API

Functions

```

void      eventsProcessed( )
void      initialize( )
void      shutdown( )
numeric   parseInt( String string, [radix] )
numeric   parseFloat( String string )

```

Browser Object

<pre> Methods: String browser.getName() String browser.getVersion() numeric browser.getCurrentSpeed() numeric browser.getCurrentFrameRate() String browser.getWorldURL() void browser.replaceWorld(MFNode nodes) MFNode browser.createVrmlFromString(String vrmlSyntax) void browser.createVrmlFromURL(MFString url, Node node, String event) void browser.addRoute(SFNode fromNode, String fromEventOut, SFNode toNode, String toEventIn) void browser.deleteRoute(SFNode fromNode, String fromEventOut, SFNode toNode, String toEventIn) void browser.loadURL(MFString url, MFString parameter) void browser.setDescription(String description) </pre>

SF Objects

<pre> color = new SFColor(float r, float g, float b) Properties: numeric color.r or color[0] numeric color.g or color[1] numeric color.b or color[2] Methods: void color.setHSV(float h, float s, float v) numeric[3] color.getHSV() String color.toString() </pre>
<pre> image = new SFImage(numeric x, numeric y, numeric comp, MFInt32 array) Properties: MFInt32 image.array numeric image.comp numeric image.x numeric image.y numeric image.z Methods: String image.toString() </pre>
<pre> node = new SFNode(String vrmlstring) Properties: node.eventName (eventIns and eventOuts of the node) Methods: String node.toString() </pre>
<pre> rotation = new SFRotation(numeric x, numeric y, numeric z, numeric angle) rotation = new SFRotation(SFVec3f axis, numeric angle) rotation = new SFRotation(SFVec3f fromVector, SFVec3f toVector) Properties: numeric rotation.x or rotation[0] numeric rotation.y or rotation[1] numeric rotation.z or rotation[2] numeric rotation.angle or rotation[3] Methods: SFVec3f rotation.GetAxis() SFRotation rotation.inverse() SFRotation rotation.multiply(SFRotation rot) SFVec3f rotation.multVec(SFVec3f vec) void rotation.setAxis(SFVec3f vec) SFRotation rotation.slerp(SFRotation dest, numeric t) String rotation.toString() </pre>
<pre> vec2f = new SFVec2f(numeric x, numeric y) Properties: numeric vec2f.x or vec2f[0] numeric vec2f.y or vec2f[1] Methods: SFVec2f vec2f.add(SFVec2f vec) SFVec2f vec2f.divide(numeric n) numeric vec2f.dot(SFVec2f vec) numeric vec2f.length() SFVec2f vec2f.multiply(numeric n) SFVec2f vec2f.normalize() SFVec2f vec2f.subtract(SFVec2f vec) </pre>

```
String vec2f.toString( )
```

```
vec3f = new SFVec3f( numeric x, numeric y, numeric z )
```

```
Properties: numeric vec3f.x or vec3f[0]  
             numeric vec3f.y or vec3f[1]  
             numeric vec3f.z or vec3f[2]
```

```
Methods: SFVec3f vec3f.add( SFVec3f vec )  
           SFVec3f vec3f.cross( SFVec3f vec )  
           SFVec3f vec3f.divide( numeric n )  
           numeric vec3f.dot( SFVec3f vec )  
           numeric vec3f.length( )  
           SFVec3f vec3f.multiply( numeric n )  
           SFVec3f vec3f.negate( )  
           SFVec3f vec3f.normalize( )  
           SFVec3f vec3f.subtract( SFVec3f vec )  
           String vec3f.toString( )
```

MF Objects

```
colorArray = new MFColor( SFColor c1, SFColor c2, ... )
```

```
Properties: numeric colorArray.length
```

```
Methods: SFColor colorArray[i]  
           String colorArray.toString( )
```

```
floatArray = new MFFloat( numeric n1, numeric n2, ... )
```

```
Properties: SFFloat floatArray[i]  
             numeric floatArray.length
```

```
Methods: String floatArray.toString( )
```

```
intArray = new MFInt32( numeric n1, numeric n2, ... )
```

```
Properties: SFInt32 intArray[i]  
             numeric intArray.length
```

```
Methods: String intArray.toString( )
```

```
nodeArray = new MFNode( SFNode n1, SFNode n2, ... )
```

```
Properties: SFNode nodeArray[i]  
             numeric nodeArray.length
```

```
Methods: String nodeArray.toString( )  
rotArray = new MFRotation( SFRotation r1, SFRotation r2,...)
```

```
Properties: SFRotation rotArray[i]  
             numeric rotArray.length
```

```
Methods: String rotArray.toString( )
```

```
stringArray = new MFString( SFString n1, SFString n2, ... )
```

```
Properties: SFFloat stringArray[i]  
             numeric stringArray.length
```

Methods: String stringArray.toString()
<pre>vecArray = new MFVec2f(SFVec2f v1, SFVec2f v2, ...)</pre> Properties: SFFloat vecArray[i] numeric vecArray.length Methods: String vecArray.toString()
<pre>vecArray = new MFVec3f(SFVec3f v1, SFVec3f v2, ...)</pre> Properties: SFFloat vecArray[i] numeric vecArray.length Methods: String vecArray.toString()

Miscellaneous

<pre>mx = new VrmlMatrix(numeric f11, numeric f12, numeric f13, numeric f14, numeric f21, numeric f22, numeric f23, numeric f24, numeric f31, numeric f32, numeric f33, numeric f34, numeric f41, numeric f42, numeric f43, numeric f44)</pre> <pre>mx = new VrmlMatrix()</pre> Properties: mx[i][j] (e.g. mx[2][1] = f21) Methods: void mx.setTransform(SFVec3f translation, SFRotation rotation, SFVec3f scale, SFRotation scaleOrientation, SFVec3f center) void mx.getTransform(SFVec3f translation, SFRotation rotation, SFVec3f scale) VrmlMatrix mx.inverse() VrmlMatrix mx.transpose() VrmlMatrix mx.multLeft(VrmlMatrix matrix) VrmlMatrix mx.multRight(VrmlMatrix matrix) SFVec3f mx.multVecMatrix(SFVec3f vec) SFVec3f mx.multMatrixVec(SFVec3f vec) String mx.toString()
--

ANEXO – III

Especificação do Aerogerador Modelado

O aerogerador escolhido foi o modelo E-70 da ENERCON. As especificações do modelo são apresentadas na Tabela 1 a seguir, com alteração da potência de 2000 kW para 2300 kW:

Tabela 1 – Especificação do aerogerador modelo E-70 da WOB BEN

Fabricante	WOB BEN Windpower / ENERCON GmbH
Família	E-70
Potência nominal	2300 kW
Diâmetro do Rotor	71 m
Altura do eixo do Rotor	64-113 m (torre tubular em concreto ou aço e diferentes fundações)
Rotor com controle ativo de ângulo de passo das pás	
Tipo	Na frente da torre
Sentido de rotação	Horário
Número de pás	3
Área varrida pelas pás	3959 m ²
Material das pás	Epoxy (reforçado com fibra de vidro), com proteção total contra descargas atmosféricas
Velocidade do rotor	variável, 6-21,5 rpm
Velocidade de Ponta de Pá	22-80 m/s
Controle de potência	3 sistemas elétricos de acionamento sincronizado do ângulo de passo das pás, com suprimento reserva de energia para emergências
Gerador	
Eixo	Rígido
Mancais	Com dois rolamentos cônicos
Gerador	Gerador de anel ENERCON com acionamento direto rotor/gerador
Alimentação da rede elétrica	Conversor ENERCON
Sistemas de frenagem	<ul style="list-style-type: none"> • 3 sistemas independentes de controle do ângulo de passo das pás • freio de rotor • trava de rotor para serviço e manutenção
Controle de orientação	Ativo por engrenagens, amortecimento dependente do esforço
Velocidade do vento - início de produção	2,5 m/s
Velocidade do vento - potência nominal	13,5 m/s
Velocidade do vento - corte de produção	28-34 m/s
Sistema de monitoramento remoto	ENERCON SCADA

(Fonte: WOB BEN, 2007)

A curva característica de potência (Figura 1) e tabela de dados (Tabela 2) foram retiradas do catálogo de aerogeradores da ENERCON.

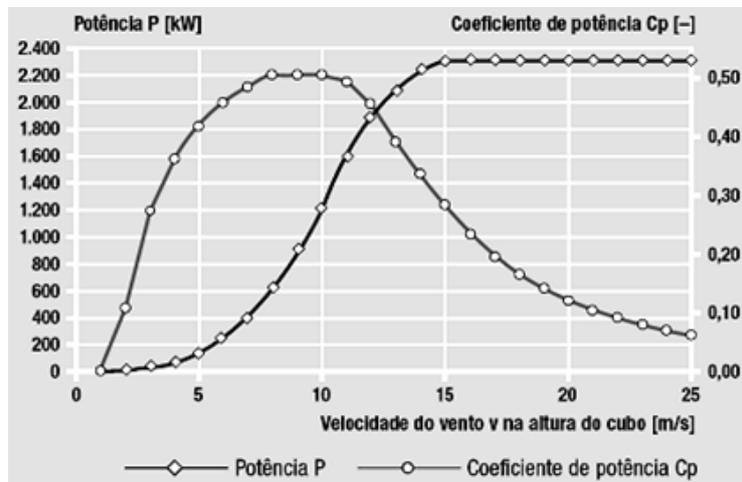


Figura 4.6 - Curva característica de potência (Fonte: ENERCON, 2007)

Tabela 2 - Curva característica de potência

Velocidade do vento [m/s]	Potência P [kW]	Coeficiente de potência Cp [-]
1	0	0
2	2	0,1
3	18	0,27
4	56	0,36
5	127	0,42
6	240	0,46
7	400	0,48
8	626	0,5
9	892	0,5
10	1223	0,5
11	1590	0,49
12	1900	0,45
13	2080	0,39
14	2230	0,34
15	2300	0,28
16	2310	0,23
17	2310	0,19
18	2310	0,16

19	2310	0,14
20	2310	0,12
21	2310	0,1
22	2310	0,09
23	2310	0,08
24	2310	0,07
25	2310	0,06

(Fonte: ENERCON, 2007)

Referencia Bibliográfica

WOBHEN, WOBHEN Windpower/ENERCON GmbH. Sítio da Internet do fabricante de aerogeradores WOBHEN, subsidiária da ENERCON no Brasil. Disponível em: < http://www.wobhen.com.br/produtos_Servicos_e70.htm >. Acesso em: 12/12/2007.

ENERCON, ENERCON GmbH. *AEROGERADORES ENERCON – Vista geral de produtos*. Catálogo do Fabricante, Lisboa, Portugal, ed. 03/2007. Disponível em: < <http://www.enercon.de> >. Acesso em; 14/11/2007.