



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA.**

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE BOMBEAMENTO COM ENERGIA
EÓLICA**

SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE SÃO GABRIEL-BA

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS D'ALEXANDRIA BRUNI

LUIZ GUILHERME MEIRA DE SOUZA

Natal, Janeiro de 2007

Divisão de Serviços Técnicos
Catalogação da publicação na fonte. UFRN/Biblioteca Central Zila Mamede

Bruni, Carlos D´Alexandria.

Otimização de sistema de bombeamento com energia eólica: sistema de bombeamento de São Gabriel-BA / Carlos D´Alexandria Bruni. – Natal, RN, 2007.

96 f.

Orientador: Luiz Guilherme Meira de Souza.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

1. Energia renovável – Dissertação. 2. Energia eólica – Dissertação. 3. Aerogeradores – Dissertação. 4. Bombeamento de água – Dissertação. I Souza, Luiz Guilherme Meira de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.472(043.3)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE BOMBEAMENTO COM ENERGIA
EÓLICA**

SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE SÃO GABRIEL-BA

CARLOS D’ALEXANDRIA BRUNI

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza, UFRN
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza, UFRN
Orientador

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes, UFRN
Examinador interno

Profª Drª Heloisa Lúcia Castellar Pinheiro, CEFET-BA
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

À Deus,

Por também acreditar em mim;

Aos meus Pais,

Pela criação voltada ao respeito à natureza e ao que é verdadeiro;

À Família,

Pela compreensão da ausência nas infundáveis horas de estudos e revisões.

Aos queridos Colegas,

Pela dedicação em nos socorrer nos momentos de aperto;
Prof. Henrique Caribé (nos Cálculos)
Profa. Núbia (no Inglês Instrumental)
Prof. José Mário (no Matlab)
Prof. Dan Santana (nas Revisões)

À Profa. Djane (Coordenadora pelo CEFET-BA),

Por ter acreditado neste Projeto desde o seu início.

Ao Prof. Rubens Marimbondo (Coordenador do PPGM –UFRN),

Pela paciência, tolerância e respeito por todos nós mestrandos.

Aos Docentes do PPGEM – UFRN,

Pela compreensão e competência demonstradas nas aulas intensivas.

Ao Prof. Luiz Guilherme (Orientador),

Pelo exemplo de simplicidade, pela compreensão e paciência.

À Equipe de Profissionais da CERB, pela oportunidade de aprendizagem.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste Trabalho.

O Vento

Vamos chamar o vento
Vamos chamar o vento

Vento que dá na vela
Vela que leva o barco
Barco que leva a gente
Gente que leva o peixe
Peixe que dá dinheiro
Curiman ...

Dorival Caymmi

RESUMO

A partir do Protocolo de Kyoto e da ECO 92- Rio de Janeiro, as atenções do mundo estão voltadas para a preservação do meio ambiente e do uso sustentável dos recursos naturais, preservando-os para as gerações futuras. Desde então, buscam-se soluções para o suprimento de energia nas suas mais conhecidas formas e a substituição do uso de combustíveis fósseis pelas formas alternativas tais como solar fotovoltaica, termo-solar, eólica, bio-diesel, etc. e neste contexto a Companhia de Engenharia do Estado da Bahia (Cerb) substituiu um sistema de bombeamento com moto-bomba a óleo diesel por um sistema de bombeamento com energia eólica, primeiro sistema coletivo desta natureza. Diante dos problemas surgidos, partiu-se para a solução envolvendo o segmento acadêmico do Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia – Cefet-BA. Este trabalho pretende demonstrar as possibilidades de otimização do sistema de bombeamento comunitário que atende aproximadamente 50 pessoas na localidade de Romão, município de São Gabriel-Ba, tendo seus relatórios técnicos publicados no AGRENERGD2004-Unicamp SP e Revista Científica ETC, Cefet-BA, 005. É apresentada uma simulação da disponibilidade energética para alturas de 15m e 20m, considerando o balanço eletromecânico desde o bombeamento até o conversor eólico. Da revisão bibliográfica realizada, optou-se pela ênfase aos aspectos mecânicos da engenharia uma vez que na UFRN, esses estudos se concentram no Departamento de Engenharia Mecânica enquanto que, em outras, os aspectos eletro-eletrônicos são mais enfatizados. Finalmente, foram anexados documentos considerados importantes para a perfeita compreensão deste trabalho.

PALAVRAS CHAVES: ENERGIAS RENOVÁVEIS, ENERGIA EÓLICA, BOMBEAMENTO DE ÁGUA, AEROGERADES.

ABSTRACT

After the Protocol of Kyoto and of the ECHO 92 - Rio de Janeiro, the attentions of the world focus to the preservation of the environment and of the maintainable use of the natural resources. People were looking for preserving environment for the future generations.

Ever since, solutions are looked for the supply of energy in its more acquaintances forms and the substitution of the use of fossil fuels for the such alternative forms as: Photovoltaics, solar heat systems for water, wind, bio-diesel, etc. and in this context the Company of Engineering of the State of Bahia - Cerb changed a diesel pumping system by an wind one. It's the first community system of this nature in Bahia. Facing problems with the model, a Cerb involved the academic segment of the Federal Center of Technological Education of Bahia – Cefetba looking for a solution.

This work intends to demonstrate the possibilities of optimization of the pumping communit system that supply water to approximately 50 people in the place of Romão, municipal district of São Gabriel-Ba. Technical reports were published in AGRENERGD2004-Unicamp SP and Scientific Magazine ETC,Cefetba, 2005.

A simulation of the increase of energy is presented for heights of 15 and 20m, considering the eletromecanical balance from the pumping energy to the wind turbine. From the accomplished bibliographical revision, we emphasized the mechanical aspects of the engineering once in UFRN, those studies concentrate on the Department of Mechanical Engineering while, in others eletroelectronic are more emphasized.

Finally, documents that we judged important were enclosed for the perfect understanding of this work.

KEY WORDS: RENEWABLE ENERGY, WIND ENERGY, WATER PUMPING, WIND GENERATOR.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	DESCRIÇÃO	PÁGINA
Figura 1	Aquecimento da superfície da terra produz os ventos	21
Figura 2	Estatística de Velocidade de Vento	22
Figura 3	Disponibilidade de Energia Eólica	27
Figura 4	Teorema de Betz	36
Figura 5	Gráfico potência extraída em função das velocidades	39
Figura 6	Visão Explodida da Turbina Eólica	42
Figura 7	Turbinas Eólicas	47
Figura 8	Catavento Savônius na UFRN	51
Figura 9	Conversão Eólica/Elétrica	56
Figura 10	Foto Sistema São Gabriel	61
Figura 11	Mapas de Localização São Gabriel	64
Figura 12	Planilha da potência disponível	67
Figura 13	Dimensionamento do rotor em função do gerador	67
Figura 14	Ganho de energia com altura da torre	68
Figura 15	Balanço eletromecânico do bombeamento	69

LISTA DE TABELAS

TABELA	DESCRIÇÃO	PÁGINA
Tabela 1	Maiores Produtores de Energia Eólica	24
Tabela 2	Maiores Empresas Eólicas	28
Tabela 3	Potencial de Geração Eólico-Elétrica na Bahia	29
Tabela 4	Velocidade Média Anual a 50m	32
Tabela 5	Fator de Rugosidade do Terreno	35
Tabela 6	Energia Eólica em Função da Velocidade	39
Tabela 7	Influencia da altura no ganho de potência	62
Tabela 8	Balanço Eletromecânico do Sistema	65
Tabela 9	Fator de Rugosidade	68

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DESCRIÇÃO	PÁGINA
ONU	Organização das Nações Unidas	15
AWEA	American Wind Energy Association	16
CERB	Companhia de Energia Rural da Bahia	17
CBTTE	Centro Brasileiro de Testes de Turbinas Eólicas	25
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica	26
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	26
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia	26
WANEB	Wind Atlas for the Northeast of Brazil	26
EFPE	Universidade Federal de Pernambuco	27
CRESESB/CEPEL	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica	30
COPEL	Companhia Paranaense de Energia	30
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia Banco	31
BNDES	Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul	31
NACA	Padrão Perfil de Aerofólio	38
GATDACE	Gerador Assíncrono Trifásico Duplamente Alimentado com Escovas	58
GATDASE	Gerador Assíncrono Trifásico Duplamente Alimentado sem Escovas	60
AGRENERGD	Encontro de energia no meio rural - Unicamp	62
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica	80

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	PÁGINA
Watt	Unidade de Potência 1 Watt= Joule/segundo	20
KW	Unidade de Potência - Múltiplo do Watt 1kW=1.000 W	20
MW	Unidade de Potência - Múltiplo do Watt 1 MW=1.000.000 W	20
GW	Unidade de Potência - Múltiplo do Watt 1GW=1000000000 W	25
V	Velocidade do Vento m/s	25
h	Horas	25
US\$	Dólar Americano	23
MWh	Energia Gerada por Hora	23
Mw/Km ²	Densidade Energética do Local	24
m	Massa do Ar kg/m ³	28
E	Energia	28
p	Densidade do Ar 1.225 kg/m ³ a 15°C e nível do mar	28
P(v)	Probabilidade de Ocorrência Weibull	29
K	Parâmetro de Forma Adimensional (relevo)	29
Pd	Potência Desenvolvida em Watts	33
H	Altura Desejada em metros	33
Ho	Altura Conhecida em metros	33
Vo	Velocidade na Altura Conhecida m/s	34
Cp	Coefficiente de Potência	35
η	Eficiência, Rendimento	35
η _A	Rendimento das Pás	35
η _B	Eficiência Teórica de Betz	35
η _m	Rendimento do Multiplicador	35
η _G	Rendimento do Gerador	35
E _G	Energia Gerada Anual	36
A	Área de Varredura das Pás (m ²)	37

D	Diâmetro das Pás (m)	37
λ	Relação de Áreas de Solidez também C_q	37
RV	Relação de Velocidade (também λ)	37
N	Rotações por Minuto	37
π	3,1416	37
λ_o	Velocidade de Projeto rpm	40
\emptyset	Ângulo de Incidências Vento Pá graus	40
C	Corda da Pá cm ou m	40
Z	Número de Aerofólios	40
Ce	Coefficiente de Sustentação (LIFT)	40
β	Ângulo de Inclinação do Aerofólio	40
α	Ângulo de Ataque do Aerofólio	40

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
ESTADO DA ARTE	20
2.1 O Vento	20
2.2 Energia Eólica no Mundo	24
2.3 Energia Eólica no Brasil	25
2.4 Potencial Eólico-Elétrico Estimado	27
2.4.1 Disponibilidade da Energia Eólica	30
2.5 Potenciais Eólicos do Estado da Bahia	31
2.5.1 Potencial Eólico Estimado para o Estado da Bahia	33
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	34
3.1 Teorema de Betz	36
3.2 Eficiência da Conversão	39
3.3 Equações Simplificadas para Pequenas Instalações com Aeroogeradores	39
3.4 Características Aerodinâmicas relativas ao Rotor	40
3.5 Projeto de Engenharia Turbina Eólica	41
3.5.1 Cálculo do Diâmetro do Rotor	42
3.5.2 Cálculo da Secção do Aerofólio e Seleção do Perfil	43
3.5.3 Exemplos de Dimensionamento de Turbina Eólica	44
3.5.3.1 Turbina de 2MVA	45
3.6 Usos da Energia Eólica em Função da Velocidade do Vento	47
3.7 Engenharia Aplicada nas Turbinas Eólicas	47
3.8 Rotor	49
3.8.1 Rotor de Eixo Horizontal	49
3.8.2 Rotor de Eixo Vertical	50
3.8.3 Pás ou Aerofólios	51
3.8.4 Torres	53
3.8.5 Características, Vantagens e Desvantagens das Atuais Tecnologias	54
3.9 Tecnologias Aplicadas na conversão Eólica/Elétrica	55
3.9.1 Grupos Eólico-Elétricos Assíncronos	57
3.9.2 Grupos Eólico-Elétricos Síncronos	57

3.9.3	Gerador Conectado à Rede Através de Conversor	57
3.9.4	Gerador Assíncrono do Rotor Bobinado	58
3.9.5	Gerador Síncrono sem multiplicador de Velocidade	59
3.9.6	Gerador Assíncrono Trifásico Duplamente Alimentado	59
	METODOLOGIA E RESULTADOS	61
4.1	Análise e proposições para otimização do sistema de São Gabriel-Ba	61
4.2	Metodologia do Estudo de Otimização	62
4.3	Dados e Especificações Técnicas	63
4.4	Instrumentos de Medição	64
4.5	Diagnóstico da Origem do Problema	64
4.6	Premissa de Análise	65
4.7	Manuseio e Usos das Planilhas Desenvolvidas Para As Simulações	66
44.7.1	4.7.1 Planilha dos Aerogeradores	66
7.2	4.7.2 Planilha das Turbinas	67
	4.7.3 Planilha da simulação de Elevação da Torre	68
	4.7.4 Planilha do Balanço Eletromecânico	68
	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICES E ANEXOS	
	Apêndice A – Relatório de Campo em 15/12/2003	74
	Apêndice B - Relatório de Campo em 23/10/2004	77
	Apêndice C – Relatório de Campo em 11/04/2005	80
	Apêndice D – Relatório de Campo em 28/10/2005	81
	Apêndice E – Relatório AGRENERGD 2004	83
	Anexo I – Dados do Poço de São Gabriel	89
	Anexo II – Potencial Eólico por Região	91
	Anexo III - Centrais Eólicas Outorgadas	92
	Anexo IV – Legislação, Fornecedores e Informações	94
	Anexo V – Comportamento dos Ventos em Irecê-Ba (outubro)	96

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais características que se utiliza para analisar o desenvolvimento socioeconômico de um país é o aumento observado na demanda por abastecimento energético. Considerando a população mundial, hoje estimada em mais de cinco bilhões de pessoas com a maior parte delas vivendo em países em processo de desenvolvimento como o Brasil, a China e a Índia entre outros, há uma previsão de um aumento vertiginoso no consumo de energia.

Com a crise energética mundial desencadeada na década de 70 do século passado associada à crise política no Oriente Médio, os governos têm-se voltado para a natureza, buscando alternativas energéticas renováveis que sejam capazes de suprir as suas necessidades.

É pertinente lembrar que, nos primórdios da civilização, o homem se valeu da energia muscular do seu próprio corpo e também dos animais. Mais adiante ele utilizou as forças do vento e da água corrente, descobriu a combustão da madeira e, posteriormente, o carvão mineral. Surgiram as máquinas a vapor e, a partir delas, deu-se início à revolução industrial. Além disso, o homem aprendeu a represar os rios, transformando a energia potencial da água em energia cinética e com essa transformação ele pôs em movimento os rotores das turbinas cujos eixos acoplados a geradores elétricos produziam a hidroeletricidade.

Com a descoberta e a exploração do petróleo e do gás natural o mundo industrializado passou a depender destes insumos para movimentar as suas máquinas como uma nova forma de energia, que aliada à hidroeletricidade e à energia nuclear, esta com uma ameaça constante de vazamento e de armazenamento dos seus resíduos tóxicos, constituiu-se no carro-chefe do mundo energético atual.

Após todo o trajeto percorrido pela humanidade até os dias atuais em busca de fontes de energia para o seu desenvolvimento, provocando acidentes, devastações,

escassez, desastres naturais, mudanças no clima e crises energéticas, o homem começa a se conscientizar da deterioração dos recursos naturais e da influência perversa de suas intervenções no ciclo natural da Terra.

Essa tomada de consciência aliada às suas necessidades levou o ser humano a retomar e a reformular as alternativas energéticas oriundas dos recursos naturais renováveis tais como o Sol e o vento que, no passado, já haviam desempenhado papéis de importância significativa na história da humanidade, apresentando-se, agora, com nova roupagem e com novas tecnologias.

Com as previsões, até certo ponto alarmantes, referentes à exaustão dos recursos petrolíferos mundiais, os países do Primeiro Mundo, principalmente, aceleram as suas pesquisas para obtenção de novas tecnologias alternativas.

A posição assumida pelos países do Primeiro Mundo não significa dizer, necessariamente, que a manutenção dos seus padrões energéticos esteja na dependência dessas novas tecnologias. O que os motiva, na verdade, é o reconhecimento de que no Terceiro Mundo se encontra um verdadeiro mercado em potencial para essas novas tecnologias, capaz de assegurar um vantajoso comércio internacional além de, com isso, estabelecer no futuro uma outra forma de dependência configurada pela dominação tecnológica no campo das energias alternativas.

Na última década foram construídas grandes estações solares e eólicas nos países do Primeiro Mundo, principalmente na Alemanha, Estados Unidos e Japão. O objetivo primordial a ser alcançado com essas instalações, além de testar a respectiva viabilidade técnica, é o de dominar a tecnologia alternativa pertinente, prevendo uma utilização futura na qual os países do Terceiro Mundo, detentores da matéria-prima em abundância representada pelo Sol e pelo vento, serão, obviamente os alvos de seus pacotes tecnológicos de energia alternativa.

Informações recentes obtidas junto à Organização das Nações Unidas (ONU) apontam para um incremento das emissões de gases do efeito estufa até 2010 e que, por outro lado, a energia eólica terá preços mais em conta do que o gás natural em 2009, além do que o mercado de energia eólica irá faturar 8 bilhões. Até 2012, de acordo com os dados da ONU, estes números devem chegar a 80 bilhões por ano (EXAME, 2005).

Dessa forma, fica evidente que os países do Terceiro Mundo não podem rejeitar a tecnologia alienígena dos países ricos, mas nem por isto eles devem se colocar na cômoda posição de simples espectadores, pois esta é uma opção que poderá, no futuro, se tornar bastante incômoda para as suas respectivas economias.

O Brasil, como nação ainda em vias de desenvolvimento precisa, urgentemente, partir para uma ação integrada no sentido de desenvolver as suas próprias tecnologias energéticas alternativas, baseadas nas vocações energéticas do país, pois é exatamente nos países do Terceiro Mundo, similares ao Brasil, que se encontra o maior potencial dessas fontes alternativas.

Nos informes da *American Wind Energy Association* (AWEA) verifica-se que o custo por quilowatt/hora da eletricidade eólica caiu de 38 centavos de dólar, no início da década de 1980, para valores entre 3 e 6 centavos no ano de 2005, dependendo principalmente da velocidade do vento no local. Já sendo bastante competitivo, o custo da eletricidade eólica deverá continuar a cair. Esses custos declinantes, facilitados pelos avanços no desenho de turbinas eólicas, ajudam a explicar a expansão rápida da energia eólica para além dos seus domínios originais, na Califórnia.

À medida que as fazendas eólicas entraram em atividade nos Estados de potencial agrícola e de pecuária como, por exemplo, Minnesota, Iowa, Texas e Wyoming, a geração da energia eólica subiu vertiginosamente, elevando a capacidade de geração dos Estados Unidos de 1 928MW em 1998, para 2 490MW em 1999, contabilizando um acréscimo de 29% (AWEA, 2005).

Contrariamente ao que se pensa e se divulga, o potencial da energia eólica é gigantesco. Um inventário realizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos constatou que apenas três Estados – Dakota do Norte, Kansas e Texas – possuem energia eólica controlável suficiente para atender às necessidades energéticas de toda aquela nação.

O rápido crescimento da produção de energia eólica não está limitado aos Estados Unidos. Em todo o mundo, a geração da eletricidade eólica em 1999 aumentou num nível surpreendente de 39%. O vento já fornece 10% da eletricidade da Dinamarca. No Estado mais ao norte da Alemanha, Schleswing-Holstein, gera-se 14% de toda a energia elétrica a partir do vento. A província de Navarra, no norte da Espanha, obtém 23% de sua energia elétrica do vento, comparado com zero há apenas quatro anos. Na China, que recentemente deu início às atividades da sua primeira fazenda eólica, no interior da Mongólia, os analistas calculam que o potencial eólico do país seja suficiente para duplicar a geração nacional de eletricidade (AWEA, 2005).

O mundo está começando a reconhecer o vento pelo que ele é uma fonte inesgotável de energia que pode suprir tanto a eletricidade como o combustível. Nos Estados Unidos, os agricultores estão aprendendo que duas lavouras são melhores do

que uma, enquanto o governo está percebendo que o controle do vento pode contribuir tanto para a segurança energética quanto para a estabilidade climática. Esta é uma combinação vencedora – uma combinação que ajudará a transformar a energia eólica numa pedra angular da nova economia energética (AWEA, 2005).

Dentro desse contexto, surge o interesse de vários pesquisadores em aprofundar os conhecimentos na área da energia eólica, focalizando na sua utilização para o atendimento da necessidade de abastecimento de comunidades isoladas no nordeste brasileiro. Com isso pretende-se disponibilizar para estas populações a mais moderna tecnologia, justificativa mais do que suficiente para entender o porquê da escolha do Sistema de Bombeamento Eólico de São Gabriel, um sistema coletivo pioneiro no Estado da Bahia, instalado pela Companhia de Energia Rural do Estado da Bahia (Cerb).

Na busca de soluções para os problemas ainda não documentados na literatura técnica especializada, fato este que estimulou o aprofundamento dos estudos aqui relatados, tomou-se, como ponto de partida, a análise do circuito eletro-eletrônico. Na tentativa de encontrar soluções para os problemas encontrados, o trabalho de investigação deparou-se com situações as mais diversas, variando em graus de dificuldades, desde a identificação de erro de montagem elétrica dos cabos de força do gerador, os quais foram trocados pelos cabos da bomba, passando por um caso inusitado de invasão de pequenas rãs, as quais penetraram na caixa do painel eletrônico do anemômetro estatístico através dos orifícios dos cabos de conexão do sensor. Ali, os anfíbios anuros se reproduziram e danificaram todo o circuito eletrônico do aparelho, o que obrigou a adotar os dados anemométricos da estação nº 0028 da Coelba em Irecê, em substituição à medição local, validados pela estação nº 32.546 CPTEC/INPE. Além disso tudo, a altura da torre, medindo 10 metros e em meio à vegetação, também criou algumas dificuldades.

Assim, esse trabalho de investigação desenvolveu-se com vistas a atender aos seguintes **objetivos gerais**:

- a) estudar o comportamento do sistema de bombeamento de São Gabriel-BA através de levantamento de parâmetros que espelhem a atual situação;
- b) buscar a otimização do sistema de bombeamento de São Gabriel-BA através da análise dos parâmetros levantados.

Como recurso auxiliar na fixação das tarefas necessárias para que a pesquisa atingisse os seus objetivos foram formulados os seguintes **objetivos específicos**:

- a) analisar o sistema de bombeamento eólico instalado que estava desativado;
- b) analisar os componentes eletro-eletrônicos e mecânicos do sistema em estudo;
- c) buscar soluções para reativar o funcionamento do sistema, utilizando os mesmos componentes do sistema anteriormente desativado;
- d) ensaiar o sistema eólico de bombeamento após o processo de otimização implementado;
- e) determinar a faixa ótima de funcionamento do sistema;
- f) desenvolver um modelo de simulação para estudar o comportamento do sistema para várias alturas;
- g) diagnosticar a melhor altura para proporcionar um melhor desempenho do sistema estudado.

Os estudos se iniciaram na parte eletro-eletrônica, com substituições sucessivas da bateria de 12V que supria os circuitos eletrônicos do controlador da bomba e a rebobinagem do transformador do carregador, adaptando-o ao trabalho do gerador em uma região da sua curva eletromecânica. Houve, também, o acréscimo de um circuito de uma fonte chaveada para auxiliar a bateria e manter a sua carga, entretanto acredita-se que uma solução efetiva para o sistema de São Gabriel passa por uma correção na altura da torre, e neste caso foram feitas simulações para as alturas de 15 e 20 metros, em substituição à torre atual de altura igual a 10 metros.

A dissertação aqui apresentada é composta de quatro seções, incluída essa introdução. A segunda seção, intitulada ***O ESTADO DA ARTE***, faz uma abordagem da importância do vento e do aproveitamento da energia eólica e do potencial eólico em diversas partes do mundo, fechando com uma estimativa desse mesmo potencial no Estado da Bahia.

A descrição dos ***materiais e métodos*** utilizados na melhoria da eficiência do sistema de bombeamento de água através da energia eólica é feita na seção de número 3, na qual são apresentadas, e comentadas, as grandezas físicas envolvidas na conversão da energia eólica em energia elétrica. É descrita, também, nessa seção, a base de cálculo

que ajuda na consolidação dos resultados obtidos, validando-os de forma coerente com os objetivos da pesquisa.

Na seção 4 são apresentados o estudo de caso e a otimização dos resultados que se constituem no experimento propriamente dito. Descrevem-se, também, nessa seção as planilhas que foram utilizadas na simulação e os resultados daí decorrentes. A metodologia utilizada e os dados e as especificações técnicas dos equipamentos elétrico-eletrônicos e mecânicos instalados na estação de bombeamento de São Gabriel são descritas nessa seção. Por último, a seção 5, trata das **considerações finais** e nela se discute a importância da pesquisa realizada e o retorno socioeconômico para aquela comunidade de São Gabriel. É feito o destaque da melhoria da eficiência do sistema de bombeamento, à luz dos resultados obtidos, e é reafirmada a importância das parcerias interinstitucionais, além de sugerir a divulgação dos resultados obtidos e a retomada de novas investigações relacionadas à energia eólica e ao seu aproveitamento.

2 O ESTADO DA ARTE

Denomina-se energia eólica à energia que se obtém do movimento das massas de ar, também denominada energia cinética ou, simplesmente, energia do vento. Seu aproveitamento se dá através da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação de determinadas peças móveis, denominadas turbinas eólicas ou aerogeradores, para a geração de energia elétrica. Para a realização de tarefas mecânicas, como o bombeamento de água, utilizam-se dispositivos denominados cata-ventos e os moinhos.

2.1 O VENTO

Com base no que foi descrito anteriormente, o vento nada mais é do que uma determinada massa de ar em movimento. O ar, por ser uma mistura de gases, está sujeito a todas as características físicas destes fluídos. O ar quente se expande mais que o frio, torna-se menos denso e tende a subir, sendo substituído por ar mais frio e mais denso.

Por outro lado, a quantidade de energia que os raios solares transferem para a superfície da Terra é diretamente proporcional ao ângulo de ataque do raio, sendo o melhor aproveitamento proporcionado por ataque perpendicular (HULSCHER, 1994; ALDABÓ, 2002).

Quando se leva em conta que os raios solares incidem sobre a Terra a 90° no equador e que este ângulo diminui à medida que se caminha em direção aos pólos fica claro porque a temperatura do equador é tão mais alta que a temperatura dos pólos. Um efeito direto deste fenômeno é o aquecimento do ar sobre o equador que sobe e se

movimenta em direção aos pólos, que por sua vez sopram ar frio e baixo em direção às regiões situadas no equador.

Se a esses fatores for adicionado o movimento de rotação da Terra, que leva a superfície sobre o equador a desenvolver uma velocidade tangencial de cerca de 1 600 km/h nos pólos, e as estações do ano provocadas pelo movimento de translação, que aquecem de maneira desigual os hemisférios norte e sul, explicam-se as mutantes fontes de ventos.

As brisas marinhas também são localmente formadas por diferenças de temperaturas, não mais decorrentes do ângulo de incidência dos raios solares, mas das diferentes capacidades de armazenamento de calor pela água e pelos corpos sólidos. A parcela continental da Terra é aquecida durante o dia e resfriada durante a noite de forma muito mais rápida que a parcela aquática. Por esta razão, o ar que é aquecido pela terra durante o dia sobe, sendo repostado por ar “frio” vindo do mar. Durante a noite, o processo se inverte. Os ventos de vales e montanhas também sofrem processo semelhante (HULSCHER,1994; ALDABÓ, 2002).

A FIGURA 1 vista a seguir ilustra como se comportam as altas pressões nos pólos e subtropicais, as calmarias equatoriais terrestres e o movimento dos ventos nas proximidades da superfície da Terra.

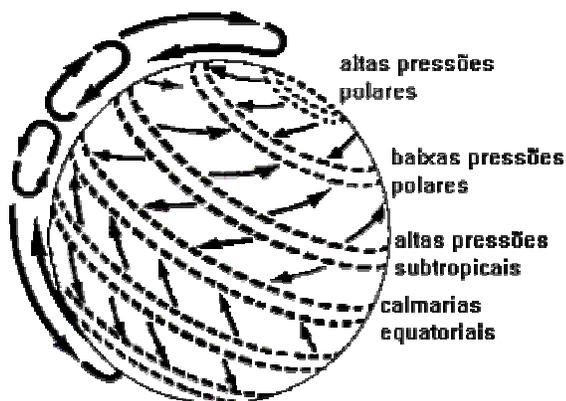


Figura 1 – Correntes de ar próximas à Terra.

Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB)

Resumindo, pode-se dizer que o vento é o resultado do desigual aquecimento da superfície da Terra pelos raios do Sol e dos movimentos de rotação e translação que ela executa. Esta característica justifica a variedade dos ventos em sítio dependendo de sua

latitude, altitude, de sua proximidade do mar ou de montanhas, da estação do ano, entre outros fatores.

Normalmente, em razão da ação do Sol, os ventos são mais fortes durante o dia, que é justamente quando a demanda de energia é maior. Além disso, os ventos são mais fortes nas épocas de menor chuva, tornando-se, assim, um dos principais atrativos do uso de energia eólica, concorrente para a diversificação da matriz energética brasileira excessivamente dependente de geração hidráulica.

Quando se cogita na conversão de energia eólica há que se levar em conta que nem todo local é apropriado. Segundo os fabricantes de turbinas eólicas, para que o sistema seja economicamente viável, a velocidade média anual mínima deve ser de 5,5 a 7,0 m/s (ALDABÓ, 2002).

Assim, a obtenção de dados através de medições que, via de regra, são dispendiosas, das velocidades e freqüências dos ventos é parte obrigatória de qualquer projeto de instalação de um sistema eólico de geração de energia elétrica.

Esses dados locais permitem determinar a “curva de freqüência de distribuição de velocidades dos ventos” para o sítio, que mostra o número de horas, por um período de tempo (normalmente um ano ou 8 760 horas) em que o vento sopra a cada diferente velocidade.

O gráfico da FIGURA 2 mostra uma distribuição hipotética de freqüências de velocidade de vento, através da relação entre o número de horas anuais e a velocidade do vento. Outras formas de representação são encontradas no ANEXO A.

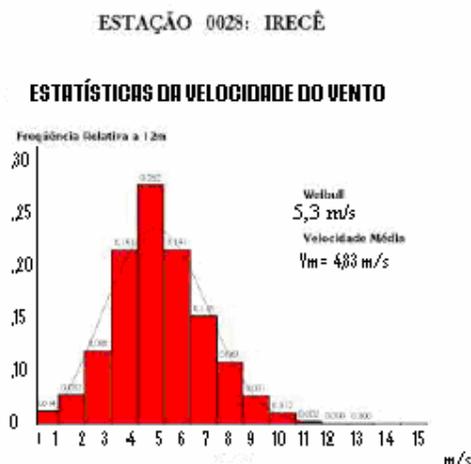


Figura 2 – Estatística da velocidade do vento

Fonte: Atlas eólico da Coelba

Assim como a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada pelo homem há milhares de anos, com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica. Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo na década de 1970, é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e a aplicação de equipamentos em escala comercial (ALDABÓ, 2002)

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca. Atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo. Em 1991, a Associação Européia de Energia Eólica estabeleceu como metas a instalação de 4000MW de energia eólica na Europa até o ano 2000 e 1 1500 MW até o ano 2005. Ressalte-se que essas e outras metas estão sendo cumpridas muito antes do esperado (4 000MW em 1996, 11 500MW em 2001).

As metas atuais são de 40 000MW na Europa até 2010. Nos Estados Unidos, o parque eólico existente é da ordem de 2 500MW e prevê-se uma instalação anual em torno de 1500 MW para os próximos anos (EC, 1999) (WINDPOWER, 2000).

O custo dos equipamentos, que era um dos principais entraves ao aproveitamento comercial da energia eólica, caiu muito entre os anos 1980 e 1990. Estimativas conservadoras indicam que o custo de uma turbina eólica moderna está em torno de US\$ 1000,00 por kW instalado. Os custos de operação e manutenção variam de US\$ 0,006 a US\$ 0,01 por kWh de energia gerada, nos dez primeiros anos, e de US\$ 0,015 a US\$ 0,02 por kWh, após dez anos de operação (BTM, 2000).

Os recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas, etc.), têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. No que tange ao balanço energético, atualmente, uma turbina de 600kW converte em 7 meses, toda a energia gasta na sua fabricação (WOBEN, 2005). No atual estado da arte das turbinas eólicas, encontram-se rotores com diâmetro de 61 a 90m se comparados com os limites de 37 a 44m da década de 1990 e dos 600kW (WOBEN) da turbina mais vendida no mundo aos modelos de 4,5MW – Enercon E-112 – em montagem nas usinas off-shore (no mar) na Irlanda e Dinamarca, e os projetos de turbinas gigantes de 12MW.

Espera-se, portanto, que a energia eólica venha a ser muito mais economicamente competitiva nas próximas décadas com a redução dos custos do US\$/kW e o incremento da eficiência dos geradores e conversores estáticos (RENEWBLE ENERGY WORD, 2005).

2.2 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

A TABELA 1 mostra os principais países em capacidade instalada de produção de energia eólica (acima de 100MW), em valores atualizados. Nela, vê-se, por exemplo, que a Europa detém 73% do mercado de energia eólica e aguarda-se a entrada da China com investimentos da ordem de 40 bilhões de dólares.

Tabela 1– Maiores produtores de energia eólica em 1998

PAÍS	CAPACIDADE DE PRODUÇÃO (MW)
Alemanha	6.200
Estados Unidos	2.570
Espanha	2.405
Dinamarca	2.300
Índia	1.220
Holanda	460
Itália	430
Reino Unido	410
China	340
Suécia	235
Grécia	190
Japão	150
Canadá	140
Irlanda	120
Portugal	100
TOTAL Europa	12.980
TOTAL mundo	17.710

Fonte: BTM Consult.

Na Alemanha, país que lidera a produção mundial, a prioridade energética envolve a utilização de fontes renováveis, com destaque para a eólica. Com capacidade de geração eólica instalada de 12 000 MW em 2003 é, disparado, o país líder no uso deste tipo de fonte de energia.

A Espanha é o terceiro país do mundo que mais utiliza energia elétrica eólica, atrás da Alemanha e dos Estados Unidos. As perspectivas governamentais apontam para que em 2010 haja 8 000MW em potência instalada em solo espanhol.

A Dinamarca, pioneira na utilização da energia elétrica eólica, já conta com cerca de 10% de sua matriz de geração elétrica baseada nessa forma de produção, devendo chegar a 50% até 2030, com pelo menos 4 000MW *off shore*. Hoje, ela se constitui no principal exportador mundial de equipamentos e tecnologia em turbinas eólicas.

Também o Japão tem como uma de suas prioridades energéticas, o uso da energia eólica. Na região de Hokkaido e Tohoku, a potência instalada passou a 28MW para 140MW entre 1998 e 2000. Um comunicado emitido em 2002 pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria daquele país, divulgou a necessidade de incrementar a capacidade instalada em energia eólica para 3 000MW até o ano de 2010.

A evolução de mercado para os próximos anos mostra que países como Dinamarca, Holanda e Alemanha projetam suas futuras instalações eólicas no mar, devido à falta de espaço em terra. Como exemplo, a Dinamarca projeta instalar 4 500MW de sistemas eólicos no mar até 2005, e a entrada da gigantesca Siemens nessa área promete novidades (RENEWBLE ENERGY WORD, 2005).

Na Dinamarca, as campanhas de eletricidade são obrigadas por lei a conectar na rede elétrica qualquer aerogerador, incluindo os custos da interconexão, a linha elétrica e a subestação, se for o caso. Na Holanda, o governo tem um compromisso com as companhias de eletricidade de atingir, em 2010, 3,2% de produção de energia eólica em relação ao consumo total de eletricidade do país. Também é originário da Dinamarca o melhor site de informações da área de energia eólica que é o www.windpower.dk o qual inclui atividades acadêmicas para docentes e uma seção especial para crianças, sendo disponível ao público e gratuito.

2.3 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Em termos de planejamento, verifica-se que o Brasil viabiliza a construção de um parque com 160 turbinas eólicas, com capacidade média individual de 600kW, para geração de energia elétrica no Rio Grande do Sul, tendo inaugurado na cidade de Osório-RS a primeira etapa. Medições realizadas indicam que, no nordeste brasileiro, os ventos têm velocidade média de 8m/s, o que é considerado muito bom para geração

eólica com investimentos maciços, principalmente nos estados do Ceará, do Rio Grande do Norte e Maranhão.

As pesquisas sobre o comportamento dos ventos e a adaptação das turbinas às condições do país estão sendo realizadas pelo Centro Brasileiro de Testes de Turbinas Eólicas (CBTTE), ligado à Universidade Federal de Pernambuco. O CBTTE possui duas turbinas instaladas em Olinda-PE, com capacidade total de 580MWh por ano.

Reconhecidamente, o Brasil possui um grande potencial eólico, confirmado pelas medições realizadas até o momento, e é possível produzir eletricidade a custos competitivos quando comparados com os custos de produção das centrais termelétricas, nucleares e hidrelétricas. A capacidade de geração de energia elétrica em território brasileiro é estimada em 6 000MW, atingindo 10 000MW segundo opiniões manifestadas em alguns artigos técnicos. As análises dos recursos eólicos medidos em vários locais do país mostram a possibilidade de geração elétrica com custos em torno de US\$ 0,70 por MWh (CBTE, 2002).

Os órgãos responsáveis pela energia elétrica no país trabalhavam com a expectativa de uma produção por fontes alternativas de 5645 MW até o final de 2004. Como forma de acelerar o aproveitamento dessas fontes foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), entretanto defende-se que as políticas nacionais deveriam ser mais arrojadas e mais empreendedoras na busca de soluções alternativas, tornando as metas de médio prazo mais ambiciosas.

O Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE), por exemplo, com o apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), lançou em 1998 a primeira versão do Atlas Eólico do Nordeste do Brasil (WANEB – *Wind Atlas for the Northeast of Brazil*) com o objetivo principal de desenvolver modelos atmosféricos, analisar dados de ventos e elaborar mapas eólicos confiáveis para a região.

Além disso, um mapa preliminar de ventos nas diferentes regiões do Brasil, foi gerado a partir de simulações computacionais com modelos atmosféricos. Ele é mostrado na FIGURA 3, vista abaixo.

Alguns pré-requisitos técnicos e econômicos devem ser observados para a implantação de parques eólicos da classe de MW no setor elétrico brasileiro. Entre eles destacam-se:

2.4 POTENCIAL EÓLICO-ELÉTRICO ESTIMADO

O Atlas Eólico Brasileiro, concluído pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2002, apresenta as condições médias anuais de vento para todo o território brasileiro na resolução de 1km x 1km (CBEE, 2002).

Por meio da integração dos mapas digitais, utilizando-se recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia elétrica a partir de curvas de potência de turbinas eólicas existentes no mercado, chegou-se aos valores listados na TABELA 3.

Tabela 2 – Empresas construtoras de turbinas eólicas

EMPRESA	COTA DE MERCADO	MW VENDIDOS
NEG Micon A/S	23,40%	608
ENRON Wind Corp.	16,30%	424
Vestas A/S	14,80%	385
Enercon	12,80%	334
Gamesa	6,60%	171
Bônus Energy A/S	5,70%	149
Nordex	5,00%	131
MADE	4,00%	105
Ecotécnia	1,80%	47
Mitsubishi	1,50%	27

Fonte: BTM Consult

Esse processo indicativo foi realizado considerando-se as seguintes premissas:

- a) foram integradas todas as áreas que apresentaram velocidades médias anuais iguais ou superiores a 6 m/s;
- b) foram consideradas curvas médias de desempenho de turbinas eólicas no estado da arte mundial, instaladas em torres de 50m de altura, existindo uma limitação normalizada na Alemanha, em 85m para não comprometer a aviação comercial;
- c) para essa estimativa, foi utilizada uma densidade média de ocupação de terreno de apenas 2 MW/km², sendo esse valor considerado conservativo,

uma vez que representa cerca de 20% do realizável por usinas eólicas em terrenos planos;

d) foram adotados intervalos com incrementos de 0,5 m/s para as velocidades médias anuais de vento de tal forma que o desempenho de turbinas eólicas foi calculado para os limites inferiores de cada intervalo;

e) foi adotado um fator de disponibilidade de 0,98, considerado típico para usinas eólicas comerciais;

f) foram descartadas da integração as áreas cobertas por água (lagos e lagoas, açudes, rios e mar).

Os resultados da integração, por faixas de velocidade, são apresentados na TABELA do ANEXO II, por regiões.

A partir desses resultados, estimou-se um potencial disponível, segundo as premissas anteriores, da ordem de 143 GW, conforme se mostra na coluna Integração Cumulativa da TABELA 3, abaixo.

Tabela 3- Estimativa do potencial de geração eólico-elétrica no Estado da Bahia

INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE						INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
ALTURA	VE NT O [m/s]	ÁREA [km ²]	POT. INSTALÁVE L [GW]	FATOR DE CAPACID ADE	ENERGI A ANUAL [TWH/ano]	VEN TO [m/s]	ÁREA CUMULAT IVA [KM ²]	POT. INSTAL ÁVEL [GW]	ENERGI A ANUAL [TWH/an o]
50m	6-	77184	154.37	0.18	238.54	>6	92875	185.75	297.35
	6.5-								
	7	12893	25.79	0.21	46.49	>6.5	15691	31.38	58.81
	7-	2373	4.75	0.25	10.19	>7m/ s	2798	5.60	12.32
	7.5-	391	0.78	0.29	1.95	>7.5	425	0.85	2.14
	8-	32	0.06	0.32	0.18	>8	34	0.07	0.19
	8.5- >8.5	2	0.00	0.36	0.01	>8.5	2	0.00	0.01
70m	6-	156481	312.96	0.18	483.61	>6	191195	382.39	614.60
	6.5-								
	7	27483	54.97	0.21	99.09	>6.5	34714	69.43	131.00
	7-	6067	12.13	0.25	26.04	>7m/ s	7231	14.46	31.90
	7.5-	1062	2.12	0.29	5.29	>7.5	1164	2.33	5.86
	8-	84	0.17	0.32	0.46	>8	102	0.20	0.57
	8.5- >8.5	18	0.04	0.36	0.11	>8.5	18	0.04	0.11

Fonte: Coelba

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos atrás, as estimativas eram da ordem de 20 000MW. Hoje, a maioria dos estudos indica valores maiores que 60 000MW. A razão dessas divergências decorre principalmente da falta de informações (dados de superfície) e às diferentes metodologias empregadas para fazer essas estimativas.

De qualquer forma, os diversos levantamentos e estudos que já foram realizados e aqueles em andamento, sejam no nível local, regional e nacional, têm dado suporte e motivado a exploração comercial da energia eólica no país. Os primeiros estudos foram feitos na Região Nordeste, principalmente nos Estados do Ceará e de Pernambuco. Com o apoio da ANEEL e do MCT, o CBEE, da UFPE, publicou em 1998 a primeira versão do Atlas Eólico da Região Nordeste. Com o auxílio de modelos atmosféricos e simulações computacionais, foram feitas estimativas para todo o país, dando origem a uma versão preliminar do Atlas Eólico Brasileiro, que foi concluído pelo CBEE em 2002.

Segundo esses resultados, os melhores potenciais estão localizados no litoral das Regiões Norte e Nordeste, onde a velocidade média do vento, a uma altura de 50m do solo, é superior a 8m/s. Entre outras regiões com grande potencial eólico, destaca-se o Vale do São Francisco, o Sudoeste do Paraná e o Litoral Sul do Rio Grande do Sul (ANEXO III).

Também o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB/CEPEL) elaborou recentemente um Atlas Eólico Nacional, cujos resultados estão disponíveis no seguinte endereço eletrônico: <http://www.cresesb.cepel.br/abertura.htm>. Segundo esses dados, o potencial eólico brasileiro é da ordem de 140 000MW.

Em termos de unidade da federação, já existem vários trabalhos desenvolvidos, entre eles o Atlas Eólico do Ceará, elaborado pela Secretaria Estadual de Infra-Estrutura, com a colaboração de outras instituições (<http://www.seinfra.ce.gov.br/downloads.php>) e o Mapa Eólico do Estado do Paraná, elaborado pela Companhia Paranaense de Energia (Copel), também em parceria com outras instituições.

2.4.1 DISPONIBILIDADE DA ENERGIA EÓLICA

A disponibilidade de energia eólica está diretamente ligada a fatores físicos e geológicos. Como foi visto no capítulo anterior, a energia eólica se forma devido à diferença de aquecimento nas diferentes partes da superfície terrestre. Isso acontece por vários motivos, entre os quais a inclinação do eixo terrestre sob a incidência dos raios solares. Portanto, a disponibilidade de energia eólica depende da hora, do dia, da estação do ano e de outros aspectos climáticos.

As diferenças de aquecimento na superfície terrestre modificam a densidade do ar (relação entre a massa e o volume ocupado). O ar mais quente é menos denso e descreve um movimento ascendente na atmosfera. O vazio deixado por ele é ocupado por uma massa de ar mais frio, que possui maior densidade. Essa diferença proporciona um deslocamento de massas segundo o princípio das correntes de convecção. Ao movimento das massas está associada uma parcela de energia mecânica denominada de energia cinética (E_c), expressa pela equação:

$$E = 1/2 \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

onde: m é a massa de ar que passa por uma área A , de varredura das pás em rotação e v é a velocidade do vento.

A massa pode ser obtida pela equação:

$$m = A \cdot \rho \cdot V \quad (2)$$

Onde: ρ é a densidade do ar,
 V é a velocidade do vento e
 A é a área de varredura das pás.

Esta equação da energia é obtida a partir das leis de Newton, estudadas na mecânica clássica. Entretanto, como em qualquer processo de conversão de energia, a energia eólica não pode ser totalmente convertida em energia aproveitável. Betz (1919) definiu o percentual de 59,26% como limite máximo para o aproveitamento dessa forma de energia.

2.5 POTENCIAIS EÓLICOS DO ESTADO DA BAHIA

As curvas de potência fornecidas pelos fabricantes de turbinas e medidas por órgãos independentes de homologação, se referem a velocidades de vento quase

instantâneas (médias num intervalo de tempo de 10 minutos) e de densidade $\rho = 1,225\text{kg/m}^3$ (ISA, nível do mar). Correções devem ser feitas para a densidade do ar de cada local, com base em altitude e temperatura, sendo recomendadas pela Coelba (2002).

A energia gerada – anual ou mensal – é calculada através da multiplicação da potência pelo tempo de duração de ocorrência, associado a intervalos de velocidades de vento. A duração de ocorrência de uma velocidade v é obtida de forma aproximada pela distribuição estatística de Weibull (1951):

$$p(v) = \frac{k}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} \quad (3)$$

$p(v)$ – probabilidade – ou duração – de ocorrência da velocidade v , dada por valor entre 0 e 1;

C – parâmetro de escala, em m/s

K – parâmetro de forma, adimensional.

Uma distribuição estatística alternativa é a de Rayleigh (1904), que equivale à de Weibull quando $k = 2$. Catálogos de turbinas eólicas usualmente apresentam curvas de produção de energia em função da velocidade média anual do vento, calculados pela distribuição de Rayleigh. Porém, como o parâmetro k pode assumir valores muito superiores a 2 no Estado da Bahia, o cálculo utilizando a equação de Weibull, mostrada acima, será mais representativo (ATLAS COELBA, 2002).

As usinas eólico-elétricas requerem áreas com regimes adequados de vento, tanto na frequência com que ocorrem como na sua intensidade. Sabe-se, porém, que os regimes de vento são bastante específicos de cada micro-região, sendo sensíveis, principalmente, a parâmetros meteorológicos e a condições locais de relevo e rugosidade. O Atlas do Potencial Eólico do Estado da Bahia apresenta os regimes de vento medidos/calculados com detalhamento da ordem de 1 km x 1 km, para todo o território do Estado como pode ser visto na TABELA 4.

Tabela 4 - Velocidade média anual dos ventos no Estado da Bahia

LOCALIDADES	VALORES		
	Medido (m/s)	Calculado (m/s)	Erro (%)
Camamu	5.47	6.14	12.2
Capão Redondo	6.57	6.01	-8.5
Conde	6.86	6.59	-3.9
Costa Dourada	6.83	6.80	-0.4
Fátima	5.69	5.80	1.9
Monte Alto	6.06	6.33	4.5
Morro do Chapéu	6.02	6.23	3.5
Placas II	5.74*	6.10	6.3
Rio de Contas	6.71	6.50	-3.1
Sauipe	6.54	6.53	-0.2
Sobradinho	6.35	6.04	-4.9
Teofilândia	5.79	5.71	-1.4
Vitória da Conquista	6.51	6.35	-2.5
Cascavel	5.18*	5.65	9.1
Correntina	5.79*	5.88	1.6
Nova Itarana	5.70*	6.02	5.6
Irecê	6.44*	6.54	1.6
Porto Seguro	5.02	5.48	9.2
Placas I	-	-	-
Ourolândia	-	-	-
Uma	5.18	5.34	3.1
Serra Grande	5.39	5.74	6.5
Curundundum	6.18	6.11	-1.1
Belmonte	6.22	6.40	2.9
Rio de Contas II	7.21*	7.57	5.0
Caetité	8.49*	8.42	-0.8

Notas: 1 (*) Média anual estimada por estudos de correlação na altura de 50m.

2 Em Placas I e Ourolândia houve insuficiência de dados medidos

3 Local das medições realizadas: município de Irecê

Fonte: Coelba

O Atlas do Estado da Bahia apresenta, assim, os regimes de ventos de interesse para a geração de energia elétrica, calculada para toda a extensão do território da Bahia, a partir de medições realizadas pela Coelba e outras já existentes, considerando os parâmetros fundamentais de influência, ou seja, o relevo, a rugosidade, a altura de camada-limite e a estabilidade térmica da atmosfera. O resultado obtido é apresentado em mapas temáticos, com as variáveis apresentadas em 255 níveis de cor, na resolução 1km x 1km.

2.5.1 POTENCIAL EÓLICO ESTIMADO PARA O ESTADO DA BAHIA

Uma estimativa do potencial de geração eólico-elétrica no território da Bahia é possível ser feita a partir da integração dos mapas de velocidade média anual, calculados na resolução de 1km x 1km. Este cálculo leva em consideração as áreas disponíveis por faixas de velocidades de vento, taxas de ocupação de terreno por usinas eólicas, e desempenho de usinas eólicas típicas. Neste trabalho de pesquisa foram adotadas premissas conservativas dentro das margens de incerteza, conforme especificadas abaixo:

- a) em terreno plano e sem obstáculos, pode-se instalar adequadamente pelo menos 10 MW/km^2 , mas na prática podem existir restrições técnicas que reduzam, na média, essa taxa de ocupação de terreno: topografia desfavorável, áreas habitadas, de difícil acesso, áreas alagáveis ou outras restrições de uso do solo e, sendo assim, considerou-se como suficientemente conservativa a premissa de ocupação média de 2 MW/km^2 ;
- b) apesar de já existir a tecnologia de usinas eólicas *off shore*, foram descartadas áreas cobertas por água: lagos e represas, açudes, rios e mar;
- c) para faixas de velocidades médias anuais típicas de aproveitamento, superiores a 6m/s, foram integradas as áreas correspondentes nos respectivos mapas, com resolução de 1km x 1km;
- d) foram adotadas faixas de 0,5 m/s para as velocidades médias anuais de vento, e o desempenho de turbinas eólicas no estado da arte (600kW para 50m de altura, e 1.800kW para 70m de altura) foi calculado para os limites inferiores de cada faixa;
- e) como significativa parte do potencial eólico se encontra nas áreas elevadas das Chapadas, foi considerada uma densidade de ar correspondente a 1 200m de altitude e 20°C de temperatura anual;
- f) um fator de disponibilidade de 95% também foi considerado.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nessa seção é feita a descrição dos materiais e dos equipamentos que são utilizados na conversão da energia eólica em energia elétrica. Antes, porém, são retomadas algumas grandezas físicas relacionadas com as especificações desses equipamentos e com a massa de ar em movimento, que se constitui na fonte de energia aqui estudada.

Uma das grandezas relevantes neste estudo é a potência total de uma massa de ar m , deslocando-se com velocidade v e atravessando uma área A . Ela pode ser calculada por meio da expressão:

$$Pd = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (4)$$

Onde: ρ é a densidade do ar no local,
 A é a área da superfície das pás do rotor, e
 V é a velocidade do vento.

Para os aerogeradores, considera-se a área A como sendo a superfície traçada pelas pás do rotor de raio $D/2$, onde D é o diâmetro do rotor. Como a potência do vento é proporcional ao cubo de sua velocidade, pequenas variações de velocidade do vento proporcionam grandes variações de potência. Foram utilizadas planilhas eletrônicas do Excel para simular esta equação, buscando verificar a sua maior sensibilidade (V), bem como analisar o funcionamento de um mesmo conversor eólico em diversas localidades.

O fluxo de potência eólica, perpendicular e proporcional à área das pás do rotor, é definida como sendo a potência por unidade de área (Pd/A). Este fluxo é uma forma prática de comparar a potência eólica a diferentes velocidades e em diversos locais. Faz-se importante lembrar que os obstáculos situados à montante ou à jusante da turbina eólica, interferem no ângulo (α) formado entre o vetor do vento com o plano de rotação

da turbina, reduzindo a quantidade de energia convertida, e diminuindo a eficiência energética do conjunto.

Em termos práticos, para sistemas com altura de até 150 metros, a potência eólica aumenta conforme aumenta a altura acima do nível do terreno. Acima de 150 metros tal aumento é anulado pela redução na densidade do ar. Observa-se, assim, que a velocidade do vento muda conforme a equação abaixo:

$$V = V_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^n \quad (5)$$

Onde: V: velocidade do vento na altura desejada.

V_0 : velocidade do vento disponível na altura conhecida.

H: altura desejada.

H_0 : altura conhecida.

n: fator de rugosidade do terreno, cujos valores são apresentados na TABELA 5.

Tabela 5 – Fator de rugosidade do terreno

DESCRIÇÃO DO TERRENO	FATOR DE RUGOSIDADE (n)
Terreno sem vegetação	0.10
Terreno gramado	0.12
Terreno cultivado	0.19
Terreno com poucas árvores	0.23
Terreno com muitas árvores ou poucas edificações	0.26
Florestas	0.28
Zonas urbanas sem edifícios altos	0.32

Fonte: Aldabó (2002)

Para aqueles terrenos que satisfazem os requisitos de uniformidade de aspereza, a seguinte lei logarítmica, oriunda da fórmula de Prandtl, é válida com alto grau de aproximação em condições adiabáticas:

$$\frac{V(z)}{V(h)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \quad (6)$$

Onde Z_0 é a chamado de “altura da aspereza”.

Segundo Betz (1919) apenas uma parte da energia do vento é aproveitada, uma vez que o vento atinge a turbina com velocidade “ V ”, mas ainda possui alguma velocidade após passar por ela. Esse dado experimental indica que apenas parte da energia cinética do vento pode ser aproveitada pela turbina. Para quantificar este índice de aproveitamento, **Betz** determinou através de seus estudos um “coeficiente de potência” eólico C_p , cujo valor máximo teórico é $16/27 = 0,5926$. Esse coeficiente relaciona a energia efetivamente captada pela turbina com a energia cinética total do ar que passa pela área do círculo de raio R .

3.1 DEMONSTRAÇÃO DO TEOREMA DE BETZ

O físico alemão Albert Betz definiu, no ano de 1919, o que hoje é denominada de Lei de Betz, que somente foi publicada no seu livro *Wind Energie*, em 1926. Para o estudo da energia eólica, o seu aproveitamento e as suas aplicações é indispensável o perfeito conhecimento dos limites impostos pela Lei de Betz, conforme se discute a seguir:

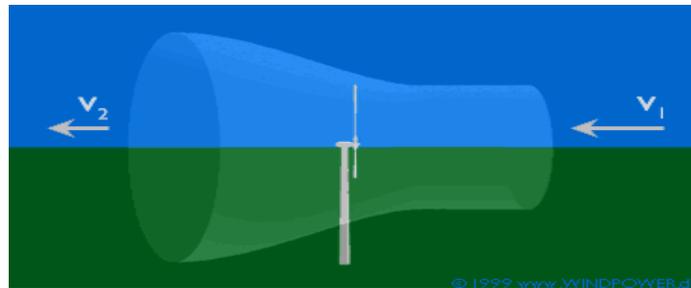


Figura 4 -Teorema de Betz
Fonte: Windpower , 2005

Com base na FIGURA 4, acima, assume-se que a velocidade média do vento através da área de varredura do rotor é a média aritmética entre as velocidades médias do vento em dois estágios distintos: (V_1) ao penetrar na turbina e (V_2), após atravessá-la totalmente, isto é, $(V_1+V_2)/2$.

Segue-se a demonstração do teorema a partir da proposição que Betz formulou, considerando que a massa do fluxo de ar (vazão mássica) através do rotor durante um segundo é:

$$\mathbf{m}^* = \rho \cdot \mathbf{A} (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2) / 2 \quad (7)$$

Onde: \mathbf{m}^* é a vazão mássica ou fluxo (kg*/s),
 ρ é a densidade do ar (kg/m³),
 \mathbf{A} é a área de varredura do rotor (m²) e
 $[(\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2) / 2]$ é a velocidade média do vento através da área do rotor (m/s).

A energia extraída do vento pelo rotor de acordo com a Segunda Lei de Newton é igual à massa vezes a queda de velocidade do vento.

$$\mathbf{E} = (1/2) \mathbf{m}^* \cdot (\mathbf{v}_1^2 - \mathbf{v}_2^2) \cdot \mathbf{A} \quad (8)$$

Substituindo-se \mathbf{m}^* nesta expressão a partir da primeira equação obtém-se a seguinte expressão para a energia extraída do vento:

$$\mathbf{E} = (\rho / 4) (\mathbf{v}_1^2 - \mathbf{v}_2^2) \cdot (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2) \quad (9)$$

Comparando-se os resultados anteriores com a energia contida no fluxo de ar através da mesma área \mathbf{A} , com o rotor bloqueando, encontra-se essa energia através da expressão:

$$\mathbf{E}_0 = (\rho / 2) \mathbf{v}_1^3 \cdot \mathbf{A} \quad (\text{energia contida no vento}) \quad (10)$$

A relação entre a energia extraída do vento e a energia contida no vento é dada por:

$$(\mathbf{E} / \mathbf{E}_0) = (1/2) (1 - (\mathbf{v}_2 / \mathbf{v}_1)^2) (1 + (\mathbf{v}_2 / \mathbf{v}_1)) \quad (11)$$

Determinando-se a velocidade \mathbf{V}_2 para a qual a potência extraída é máxima.

Na expressão $\mathbf{P} = \rho \mathbf{S} \mathbf{V}^2 (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2)$ substitui-se $\mathbf{V} = \frac{\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2}{2}$ o que conduz a:

$$\mathbf{P} = \rho \mathbf{S} \frac{(\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2)^2}{4} (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2) = \rho \mathbf{S} \frac{(\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2)}{4} (\mathbf{V}_1^2 - \mathbf{V}_2^2) \quad (12)$$

A velocidade \mathbf{V}_2 para a qual a potência extraída é máxima, corresponde a \mathbf{V}_2 obtida através de

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \quad (13)$$

ou seja:

$$\frac{d(\rho S (-V_2^3 - V_1 V_2^2 + V_1^2 V_2 + V_1^3))}{dV_2} = 0$$

o que equivale a $-V_2^3 - V_1 V_2^2 + V_1^2 V_2 + V_1^3 = 0$. A resolução desta equação de terceiro grau em ordem a V_2 conduz a :

$$\Delta = (-2V_1)^2 - 4(-3)V_1^2 = 16V_1^2 = (\pm 4V_1)^2 \quad (14)$$

Então será $V_2 = \frac{2V_1 + 4V_1}{-6} < 0$ o que é impossível

Ou $V_2 = \frac{(2V_1 - 4V_1)}{-6} = \frac{V_1}{3}$ (15)

Logo, a potência extraída será máxima para

$$V_2 = \frac{V_1}{3}$$

Calculando-se então, a potência máxima P_{max} a partir dos resultados anteriores, obtém-se:

$$(1) V_2 = \frac{V_1}{3} \rightarrow (3) \quad V = \frac{2V_1}{3}$$

$$(2) V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Substituindo (1) e (3) na expressão $P = \rho S V_2 (V_1 - V_2)$:

$$P = \rho S \left(\frac{2V_1}{3}\right)^2 \left(V_1 - \frac{V_1}{3}\right)$$

Então:

$$P_{max} = \rho S V_1^3 \left(\frac{8}{27}\right) \quad (16)$$

Deduzindo-se o coeficiente de potência máximo $C_{P_{max}}$ para um aerogerador, obtém-se:

De acordo com o exposto na teoria acima, a potência recuperável do vento é:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2}\right) \rho S V^3$$

$$P_{\max} = \rho S V_1^3 \left(\frac{8}{27}\right) = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (17)$$

Chega-se, finalmente, à fração máxima de aproveitamento, segundo Betz (1919):

$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} \approx 0,59 \quad (18)$$

Ao plotar-se E/E_0 ou P_{\max}/P como uma função de V_2/V_1 , tal como é feito no gráfico da FIGURA 5, a seguir, verifica-se que a função encontra seu valor máximo para $V_2/V_1=1/3$, e que o valor máximo de energia extraída do vento é $16/27$ ou $E_{\max}=0,59E$ da energia total contida no vento.

Esses valores confirmam a formulação de Betz para o “coeficiente de potência” eólico.

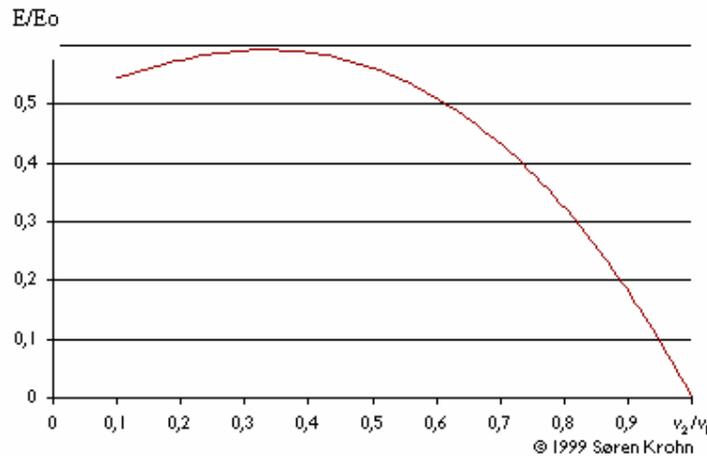


Figura 5 – Gráfico que relaciona a potência do vento com a razão das suas velocidades na turbina.

Fonte: Windpower, 2005

3.2 EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO

Pelo que foi estudado até aqui, a potência eólica convertida em eletricidade depende da área do rotor e do rendimento do aerogerador, que é formado pela multiplicação dos seguintes rendimentos:

$$\eta = \eta_B \cdot \eta_A \cdot \eta_m \cdot \eta_G \quad (19)$$

η_B : eficiência teórica (BETZ).

η_A : rendimento aerodinâmico das pás.

η_m : rendimento do multiplicador de velocidade (se utilizado).

η_G : rendimento do gerador elétrico.

3.3 EQUAÇÕES SIMPLIFICADAS PARA PEQUENAS INSTALAÇÕES COM AEROGERADORES

Verificou-se que as simplificações físicas e matemáticas adotadas produzem resultados bem aproximados, não justificando cálculos aprimorados nesta faixa de potência e seus correspondentes investimentos (SÁNCHEZ, 2002, TAHUI, 2002).

Por exemplo:

Potência elétrica = 0,3 x Potência média bruta (equação corrigida na planilha)

Potência CA na saída = Potência elétrica x η_i , onde η_i é o rendimento do inversor.

Esse inversor adotado no exemplo é capaz de converter a energia armazenada em bancos de baterias CC em corrente alternada CA na frequência de 50 ou 60Hz e tensões de 127 ou 220V.

Para o caso específico do Sistema de Bombeamento de São Gabriel-BA, tomado como estudo de caso nesta pesquisa, observou-se que a acumulação direta em água, sem conversões de energia tem sua eficiência energética fundamentada no fato que, nos sistemas de bombeamento acumula-se em água para evitar as perdas de conversão da energia elétrica para química nos acumuladores (perda de 20%) e inversores de frequência nas retificações e conversões elétrica (perdas de 10%).

A produção anual de energia é calculada por:

$$EG = P_I \times FC \times 8760 \text{ h/ano} \quad (20)$$

Onde: P_I é a potência instalada e
 FC é o Fator de Capacidade.

O Fator de Capacidade, se não houver armazenamento, é uma variável intrinsecamente ligada às condições climáticas (velocidade do vento) e seu valor situa-

se no intervalo entre 0,25 a 0,60. A título de comparação, uma usina hidroelétrica com barragem de acumulação, possui um FC igual a 1, que corresponde a 100%.

Os tipos de rotores e dos geradores ideais para serem utilizados são determinados pela configuração geral do sistema eólico em função do tipo de aplicação e potência. Os rendimentos, ou curvas eletromecânicas, são fornecidos pelos fabricantes dos aerogeradores.

3.4 CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS RELATIVAS AO ROTOR

Entre as características aerodinâmicas de um rotor destacam-se as seguintes:

- a) área frontal A (m^2), corresponde à área da superfície, normal à direção do vento, ocupada pelo rotor em movimento, sendo também conhecida como área do disco e, no caso de rotores de eixo horizontal de diâmetro D (m), a área frontal é calculada por:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (21)$$

- b) razão entre as áreas (ou solidez) λ é a razão entre a área das pás (um lado) pela área frontal e quando λ é alto, o rotor tem muitas pás ou pás largas e, conseqüentemente, baixa velocidade;

- c) razão entre velocidades RV , é a razão entre a velocidade tangencial na ponta da pá e a velocidade do vento, podendo-se formular que, se RV for alta, ela indica um rotor de alta velocidade, além do que, na literatura pesquisada, a letra grega lâmbda λ é utilizada e o cálculo dessa razão é feito por:

$$RV = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{V} \quad (22)$$

$\pi = 3,1416$

N: número de rotações do rotor por segundos.

D: diâmetro do rotor em metros.

V: velocidade do vento em metros por segundo;

- d) Potência no eixo do rotor P_R (W) é a parcela da potência disponível no vento captada pelo rotor eólico.

$$P_R = \eta_B \cdot \eta_A \cdot P_d; \quad (23)$$

e) coeficiente de potência C_p exprime a percentagem da P_d que é realmente aproveitada no eixo do rotor.

$$C_p = \eta_A \times \eta_B \quad (24)$$

A eficiência da conversão da energia cinética eólica em energia elétrica é de aproximadamente 30% ($\eta_B = 0,5926$; $\eta_r = 0.64$; $\eta_G = 0.8$). O estado da arte atual para grandes aerogeradores assegura uma eficiência da ordem de 45%.

3.5 PROJETO DE ENGENHARIA DA TURBINA EÓLICA

O projeto desta máquina foi desenvolvido utilizando as equações aerodinâmicas correspondentes, utilizando perfis padronizados para a secção as pás e a necessária compatibilidade entre os parâmetros da turbina com os do gerador (CAMPOS, 2001).

A FIGURA 6, a seguir, mostra os elementos de uma turbina eólica.



Figura 6 - visão explodida de uma turbina eólica
Fonte: CEEE

3.5.1 CÁLCULO DO DIÂMETRO DO ROTOR

Para este cálculo foi utilizada a equação de potência desenvolvida nas turbinas eólicas.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot \eta \cdot C_p \quad (25)$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (26)$$

$$D = \sqrt{\frac{8 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta}} \quad (27)$$

Onde: D: diâmetro do rotor da turbina eólica (m)

P: potência de projeto de aerogerador (W)

ρ : densidade do ar, variável com altitude e temperatura local (1 230 kg/m³ ao nível do mar)

V: velocidade do vento (m/s)

A: área varrida pela turbina (m²)

C_p: Coeficiente de potência (adimensional)

η : Eficiência do gerador

$$\lambda = \frac{U}{V_p} = \frac{\pi \cdot N \cdot D}{60 \cdot V_D} \quad (28)$$

$$N = \left(\frac{60 \cdot \lambda \cdot D}{\pi \cdot D} \right) \quad (29)$$

Onde: N: velocidade de rotação da turbina eólica (r.p.m.)

U: velocidade tangencial no extremo da pá (m/s)

V_p: velocidade de projeto (m/s)

λ : rapidez é a relação entre a velocidade do rotor e a do vento, utiliza-se também (C_q)

Utilizando a equação que permite fazer o cálculo do diâmetro, com um C_p = 0,35, velocidade do vento igual à velocidade de projeto de 6,5m/s, densidade do ar de 1 230 kg/m³, potência de 100W na saída do gerador e uma eficiência de 75% para o

gerador (valor aceitável em pequenos geradores de imã permanente), se obtém em diâmetro de 1,7m.

Prosseguindo nos cálculos e atribuindo-se o valor 5 (λ_0) para múltiplo da rotação de projeto, obtendo-se a rotação de 365rpm.

3.5.2 CÁLCULO DA SECÇÃO DO AEROFÓLIO E SELEÇÃO DO PERFIL

Para o cálculo da secção do aerofólio são utilizadas as seguintes equações (SÁNCHEZ, 2001; ATAHUI, 2001):

$$\lambda = \frac{\lambda_0 \cdot r}{R} \quad (30)$$

$$\phi = \frac{2}{3} \cdot \arctan(1/\lambda r) \quad (31)$$

$$C = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot (1 - \cos \phi)}{Z \cdot C_l} \quad (32)$$

$$\beta = \phi - \alpha \quad (33)$$

Onde:

λr : velocidade local para o raio r

λ_0 : velocidade de projeto

r: distância do centro do rotor à secção avaliada (m)

R: raio da turbina (m)

ϕ : ângulo formado pela velocidade relativa com o plano de rotação do rotor

C: corda da secção do aerofólio

Z: número de aerofólios ou pás

C_l : coeficiente de sustentação (lift) do aerofólio

β : ângulo formado pelo aerofólio com o plano de rotação

α : ângulo de ataque dependente do perfil selecionado.

Utilizando as quatro equações listadas acima, para uma turbina tripás e $C_l = 0,8$, este valor do coeficiente de sustentação se obtém do gráfico C_l versus C do perfil selecionado previamente que, para o presente caso, é o NACA 4212. Para diferentes

valores de raio “r”, se obtém os valores do ângulo de posição e a largura da corda correspondente.

Os resultados dos cálculos antes indicados fornecem valores variáveis não lineares, tanto para a corda como para o ângulo de posição, o que torna ampliado o processo de fabricação dos aerofólios. Para simplificar esta tarefa adota-se o conceito de linearização do aerofólio.

3.5.3 EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO DE TURBINA EÓLICA

Na literatura especializada que foi consultada são encontradas diferentes abordagens sobre a construção de turbinas para aerogeradores. Alguns autores, como Galizia (2004), enfatizam que alguns exemplos ilustrativos do dimensionamento básico da turbina eólica facilitam a compreensão do efeito das principais grandezas nele envolvidas.

3.5.3.1 TURBINA DE 2MVA

Com o objetivo de avaliar o impacto da velocidade nominal do vento no dimensionamento da turbina, adota-se um caso hipotético, e superdimensionado, de uma turbina de 2MVA, para a qual os valores que seguem já foram estabelecidos, seguindo os critérios adequados:

Velocidade média do vento no sítio: $V_{\text{média}} = 7 \text{ m/s}$.

Velocidade nominal do vento de geração: $V_{\text{Nom}} = 12 \text{ m/s}$.

Densidade do ar no sítio, para 25°C e altitude de 1 000m acima do nível do mar: $\rho = 1,074 \text{ kg/m}^3$.

Rendimento da turbina: $\eta_{\text{Turbina}} = 0,6$.

Rendimento do redutor: $\eta_{\text{Redutor}} = 0,85$.

Rendimento elétrico, para máquina e conversor: $\eta_{\text{Elétrico}} = 0,8$.

Esses valores permitem a determinação do valor de $C_{p\text{Max}}$ e, em seguida, do rendimento total do sistema eólico.

$$C_{p\text{Max}} = C_{p\text{Betz}} \times \eta_{\text{Turbina}} = 16/27 \times 0,6 = 0,355$$

$$\eta_{\text{Total}} = C_{p\text{Max}} \times \eta_{\text{Redutor}} \times \eta_{\text{Elétrico}}$$

$$\eta_{\text{Total}} = 0,241$$

Com base nestes valores e empregando a equação (25), vem:

$$2\,000\,000 = \frac{1}{2} \times 0,241 \times \pi \times R^2 \times 1\,074 \times 12^3$$

Assim, após a realização dos cálculos chega-se ao seguinte resultado:

$R = 53\text{m}$. Portanto, o diâmetro da hélice será $D = 106\text{m}$.

Adotando-se, agora, para a velocidade nominal (do vento) de geração o valor $V_{\text{Nom}} = 12\text{ m/s}$ e empregando a mesma metodologia, chega-se a valores para uma outra turbina, cujo raio e diâmetro da hélice devem medir, respectivamente, $R = 38\text{m}$ e $D = 76\text{ m}$.

É fácil perceber a grande influência da escolha da velocidade nominal (do vento) de geração. Para uma turbina de potência nominal de 2MVA, com os demais equipamentos dimensionados para a extração dessa potência, é necessário instalar uma hélice de diâmetro 106m quando a velocidade nominal de geração é 12 m/s. Mudando a velocidade nominal de geração para 15 m/s, é possível obter a mesma potência com uma hélice de diâmetro igual a 76m, portanto, 30m menor (GALIZIA, 2004).

No dimensionamento, deve ser tomado o cuidado de atrelar a escolha da velocidade nominal de geração à velocidade média do vento do sítio eólico (neste exemplo 7,0 m/s) e principalmente à sua curva de frequências de velocidades. À primeira vista, parece ser mais vantajoso a escolha da velocidade de 15m/s que resulta em hélice e torre de menores tamanhos na turbina. Mas, com ventos médios de 7,0m/s, qual seria a porcentagem de tempo que permitiria geração nominal de energia? Certamente a escolha da velocidade nominal de 12m/s permite porcentagem de tempo maior de geração de potência nominal. Esse compromisso deve ser adotado em fase de projeto.

3.5.4.2 TURBINA 0,16MVA

Este exemplo permite observar, através de análise de sensibilidade, o impacto da velocidade nominal do vento adotada sobre a potência extraível da turbina.

Com esse objetivo, aproveitou-se um caso hipotético de vento com $V = 0\text{ m/s}$ durante metade do tempo e $V = 20\text{m/s}$ durante a outra metade. Neste caso, para obter

um melhor rendimento, o valor adotado para a velocidade nominal do vento deve ser $V_{\text{Nom}} = 20$ m/s. Escolhendo uma turbina com raio de 20m e considerando os mesmos valores já adotados no exemplo anterior para as demais grandezas, tem-se:

$$P = \frac{1}{2} \times 0,241 \times \pi \times 20^2 \times 1\,074 \times 20^3$$

$$P = 1,30 \text{ MVA.}$$

Admitindo agora que a velocidade do vento no sítio seja constante em $V=10$ m/s, o valor $V_{\text{Nom}} = 10$ m/s deve ser adotado.

Para o mesmo raio de hélice da turbina ($R = 20$ m), resulta, empregando a mesma metodologia, a potência extraível de:

$$P = 0,16 \text{ MVA.}$$

Isso demonstra que, para turbina de mesmo raio de hélice, é possível extrair apenas 1/8 da potência elétrica da turbina anteriormente dimensionada, embora seja possível, neste exemplo, extrair a mesma quantidade de energia durante o dobro do tempo.

Esses exemplos refletem a importância da definição da velocidade nominal do vento e do raio das hélices da turbina na especificação da potência nominal dos demais equipamentos do tipo: torre, turbina, redutor, gerador elétrico e conversores.

Assim, na especificação do gerador, devem ser adotados compromissos entre variáveis como velocidade média anual, curva de frequências de distribuição de velocidades do vento, fator de capacidade esperado, potência nominal total pretendida na fazenda eólica e potência nominal de cada unidade geradora.

3.6 USOS DA ENERGIA EÓLICA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO

A TABELA 7 resume as possíveis aplicações da energia eólica de acordo com a sua magnitude, lembrando que os valores de velocidade são os valores de média anual e não fruto de simples medições.

Tabela 7 - Utilização da energia eólica

VELOCIDADE MÉDIA ANUAL 10M ACIMA DO NÍVEL DO SOLO	POSSIBILIDADES DE USO PARA A ENERGIA EÓLICA
Abaixo de 3 m/s	Usualmente não viável, ao menos em ocasiões especiais
3-4 m/s	Podem ser uma opção para bombas eólicas, sendo improvável para geradores elétricos
4-5 m/s	Bombas eólicas podem ser competitivas com bombas a Diesel. Pode ser viável para geradores eólicos isolados
Mais que 5 m/s	Viável tanto para bombas eólicas quanto para geradores eólicos isolados
Mais que 7 m/s	Viável para bombas eólicas, geradores eólicos isolados ou conectados à rede

Fonte: Krauter (UFRJ)

3.7 ENGENHARIA APLICADA NAS TURBINAS EÓLICAS

No início da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos – de eixo horizontal, de eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, com gerador de indução, com gerador síncrono, etc. Com o passar do tempo, viu-se consolidar o projeto de turbinas eólicas com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução, estrutura não-flexível, como ilustrado na FIGURA 7.



Fotos: CBEE, 2001.

Figura 7 – Turbinas com eixo horizontal

Fonte: CBEE (2002)

Entretanto, algumas características de projeto ainda geram polêmica, como a utilização ou não do controle do ângulo de passo (*pitch*) e das pás para limitar a potência máxima gerada. A tendência atual é a combinação das duas técnicas de controle de potência (*stall e pitch*) em pás que podem variar o ângulo de passo para

ajustar a potência gerada sem, contudo, utilizar esse mecanismo continuamente (WIND DIRECTIONS, 2000).

No processo de desenvolvimento das turbinas eólicas, a sua capacidade de geração elétrica atravessou alguns estágios. As primeiras delas, desenvolvidas em escala comercial, tinham potências nominais entre 10kW e 50kW. No início da década de 1990, a potência das máquinas aumentou para a faixa de 100kW a 300kW. Em 1995, a maioria dos fabricantes das grandes turbinas ofereciam modelos de 300kW a 750kW. Em 1997, foram introduzidas comercialmente as turbinas eólicas de 1MW e 1,5 MW, iniciando a geração de máquinas de grande porte. Atualmente, existem mais de 3 000 turbinas eólicas com potência nominal superior a 1MW em funcionamento no mundo (BOYLE, 1996; BTM, 2000; WINDPOWER, 2006).

Quanto ao seu porte, as turbinas eólicas podem ser classificadas da seguinte forma:

- a) pequenas – potência nominal menor que 500kW;
- b) médias – potência nominal entre 500 kW a 1000 kW;
- c) grandes – potência nominal maior que 1 MW.

Nos últimos anos, as maiores inovações tecnológicas foram a utilização de acionamento direto (sem multiplicador de velocidades), com geradores síncronos e novos sistemas de controle, que permitem o funcionamento das turbinas em velocidade variável, com qualquer tipo de gerador. A tecnologia atual oferece uma variedade de máquinas, atendendo a especificidades que vão desde a sua aplicação até as próprias características do local de instalação.

No que diz respeito à aplicação, as turbinas podem ser conectadas à rede elétrica ou destinadas ao suprimento de eletricidade de comunidades ou sistemas isolados. Em relação ao local, a instalação pode ser feita em terra firme ou *off shore* e em locais de ventos fortes ou moderados.

3.8 ROTOR

Os rotores são componentes destinados a captar a energia cinética dos ventos e convertê-la em energia mecânica no seu eixo. Se o eixo do rotor for posicionado horizontal ou verticalmente, tem-se um rotor de eixo horizontal dos tipos: rotor hélice,

rotor multipás (multivane, fans), rotor holandês, etc. Se o seu funcionamento se basear num eixo vertical, a sua denominação pode ser: rotor Savônius, rotor Darrieus, rotor helicoidal, etc.

3.8.1 ROTOR DE EIXO HORIZONTAL

Os rotores de eixo horizontal são movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*). Um corpo que obstrui a passagem do vento, em movimento, sofre a ação de forças perpendiculares ao fluxo de vento relativo (forças de *lift*) e de forças paralelas ao fluxo de vento relativo (forças de *drag* ou de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente, forças de sustentação dependem fortemente da geometria do corpo e do ângulo entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo, denominado “ângulo de ataque” (SÁNCHEZ, 2001).

Rotores que giram predominantemente sob forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob o efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade do vento.

Os sistemas com eixos horizontais, perpendiculares ao fluxo do vento, por um lado são movidos predominantemente por forças de sustentação e devem ser montados sobre uma gávea giratória (nacele) provida de movimento em torno de um eixo vertical (translação ou *yaw*) para que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento.

Quanto à sua posição relativa à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (*downwind*) ou a montante do vento (*upwind*).

Uma razão justificável para localizar o rotor a jusante do vento é que esse arranjo facilita a conicidade do rotor. O ângulo de conicidade torna-se vantajoso porque alivia as tensões na raiz da pá, equilibrando parcialmente os momentos, ou os torques, devidos às forças centrífugas. A desvantagem de localizar o rotor a jusante do vento é que as pás sofrem carregamento cíclico (causadores de fadiga) quando elas passam pela “sombra aerodinâmica”, apesar desse efeito poder ser minimizado com o emprego de torres mais esbeltas, ou mesmo afastando as pás da torre, com ângulo de conicidade.

A localização do rotor a montante da torre reduz o efeito de interferência cíclica da esteira (sombra) da torre nas pás para um nível mínimo de altitude. Entretanto, o

rotor assim localizado deve estar sem articulações e posicionado bem adiante da torre, mesmo sob condições extremas de velocidade de vento.

Não existe nenhuma evidência nítida quanto à escolha da localização do rotor em relação à nacele, quer a montante, quer a jusante, que o torne mais vantajoso, pelo menos no que concerne aos aspectos relacionados ao custo total de máquinas eólicas. Na dimensão dos aerogeradores das usinas eólicas (*wind farms*) americanas e européias, a maioria dos aerogeradores é do tipo que posiciona o rotor a montante do vento em relação à nacele.

3.8.2 ROTOR DE EIXO VERTICAL

De uma maneira geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não precisarem de mecanismos de acompanhamento para variações de direção do vento. Isto reduz a complexidade do projeto, como também os esforços, devido às forças de “Coriolis”. Essas forças, assim denominadas numa referência ao engenheiro francês, seu descobridor, são devidas à rotação terrestre e desempenham papel importante, alterando as características do movimento do vento e das correntes marítimas, características que seriam muito diferentes se a Terra estivesse em repouso. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de arrasto ou por forças de sustentação. Os principais tipos de rotores de eixo vertical são:

- a) Savônius;
- b) Darrieus;
- c) Turbina com torre de vórtices.

Os rotores do tipo Savônius são movidos predominantemente por forças de arrasto embora desenvolvam alguma força de sustentação. Eles têm torque de partida relativamente alto, embora em baixa velocidade. Sua eficiência é baixa e o seu rendimento mecânico máximo pode atingir 31%. Os rotores Savônius são amplamente utilizados no bombeamento de água em instalações rurais de baixo custo. (SOUZA, 2004). Na FIGURA 8, mostrada a seguir, vê-se um rotor desse tipo.

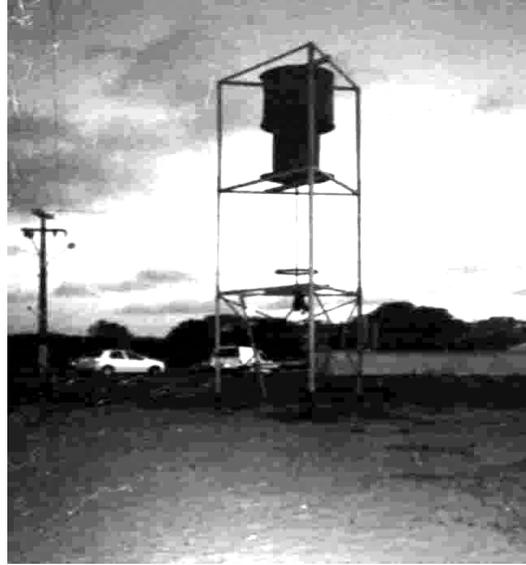


Figura 8 – Catavento Savônus
Fonte: Em funcionamento na UFRN-DEM (2005)

Os rotores tipo Darrieus desenvolvidos em 1927 pelo francês G.J.M Darrieus são os mais fortes concorrentes dos cata-ventos convencionais de hélices. São movidos por forças de sustentação *lift* e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico atadas pelas duas pontas ao eixo vertical. Em rotação, suas lâminas são curvadas por força centrífuga até um diâmetro aproximadamente igual à distância entre as pontas, assumindo a forma de uma catenária. Esses rotores podem atingir alta velocidade, mas o torque de partida é aproximadamente nulo.

Várias configurações podem ser concebidas. Esses tipos de rotores podem ser combinados a outros rotores para aumentar o torque de partida. Sua eficiência é alta, quase comparável aos tipos convencionais de cata-ventos.

As turbinas com torre de vórtice são unidades mais compactas do que outros cata-ventos, para uma potência de saída. Encontram-se, ainda, em estágio de desenvolvimento.

3.8.3 PÁS OU AEROFÓLIOS

Construtivamente, as pás ou aerofólios podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em particular, as pás rígidas são feitas de madeira,

alumínio, aço, fibra de vidro, fibra de carbono e/ou Kevlar. Estas últimas são as mais promissoras do ponto de vista tecnológico.

- a) fibras de vidro: são materiais compostos reforçados com fibra de vidro e oferecem boa resistência específica e resistência à fadiga, bem como os custos competitivos para as pás, sendo o material utilizado em quase todas as pás dos aerogeradores dos parques eólicos da Califórnia (EUA) e na Europa, e já foi utilizado em rotores de até 112m de diâmetro, as pás em materiais compostos possibilitam uma geometria aerodinâmica lisa, contínua e precisa e as fibras são colocadas estruturalmente nas principais direções de propagação das tensões quando em operação;
- b) aço: os aços estruturais são disponíveis a custo relativamente baixo no mercado interno de alguns países, e há bastante experiência na sua utilização em estruturas aeronáuticas de todos os tamanhos, no entanto, uma desvantagem do aço é que as pás fabricadas com esse material tendem a ser pesadas, o que acarreta aumentos de peso e custo de toda a estrutura suporte, além do que elas necessitam de proteção contra a corrosão, para a qual existem diversas alternativas possíveis;
- c) madeira: essa fibra natural, que também constitui um material composto, evoluiu ao longo de milhões de anos para suportar cargas de fadiga induzidas pelo vento, que tem muito em comum com aquelas a que são submetidos os rotores de aerogeradores e ela é amplamente utilizada no mundo para pás de rotores pequenos (até 10m de diâmetro), sendo que o baixo peso da madeira é uma vantagem, mas deve-se cuidar para evitar variações do teor de umidade interna, o que pode causar degradação das propriedades mecânicas e variações dimensionais, que enfraquecem a estrutura das pás e podem causar rompimento na estrutura;
- d) alumínio: a maior parte dos aerogeradores do tipo Darrieus usa pás feitas de ligas de alumínio, extrudadas na forma de perfil aerodinâmico, entretanto as ligas de alumínio não têm limite inferior de tensão de fadiga, à medida que os ciclos de carregamento são aumentados, e este comportamento sempre tem levantado dúvidas quanto à possibilidade de se atingir a longa vida de 20 anos ou mais para um rotor de alumínio;
- e) fibra de carbono e/ou Kevlar: são materiais compostos mais avançados, que podem ser utilizados em áreas críticas (longarina da pá ou vane, por

exemplo), para melhorar a rigidez da estrutura e têm sido utilizados experimentalmente, mas esses materiais têm preços altos demais para serem utilizados nos aerogeradores economicamente mais competitivos, cabendo o registro de que o conhecido aerogerador AIR MARINE 403, utiliza esse tipo de material, outorgando-lhe uma performance ímpar na sua faixa de potência (CAMPOS, 2001)

A maioria dos rotores modernos tem duas ou três pás. Os projetistas americanos têm escolhido geralmente duas pás com base no argumento de que o custo de duas pás é menor que o de três. Outros, especialmente os dinamarqueses, argumentam que o custo extra da terceira pá é compensado pelo comportamento dinâmico mais suave do rotor de três pás, e que o custo total do aerogerador é virtualmente idêntico quer se usem duas ou três pás. Um rotor de três pás fornece oscilações menores de torque no eixo, o que simplifica a transmissão mecânica (CAMPOS, 2001).

3.8.4 AS TORRES

As torres são mecanismos que elevam os rotores a altura desejada, e estão sujeitas a inúmeros esforços. Primeiramente, as forças horizontais devem ser levadas em conta: resistência do rotor ao arrasto (*drag*) e da própria torre à força do vento. Em seguida, as forças tensionais, impostas pelo mecanismo de controle de rotação da gávea giratória – casa de máquinas ou “nacele” – e esforços verticais (peso do próprio equipamento), que não devem ser desprezados.

Quanto ao material, as torres podem ser de aço (em treliças ou tubulares), ou tubulares de concreto. Para aerogeradores menores, é possível a utilização de torres de madeira sobre um poste de eucalipto com estais de aço.

A torre suporta a massa da gávea giratória e das pás. As pás, por sua vez, em rotação, excitam cargas cíclicas no conjunto, com a frequência da rotação e seus múltiplos, e assim uma questão fundamental, a ser levada em conta no projeto da torre, é a sua frequência natural, que deve ser desacoplada das excitações para evitar o fenômeno de ressonância, o qual aumenta a amplitude das vibrações e tensões resultantes e reduz a vida em fadiga dos componentes, entre outros efeitos desagradáveis. Logo após 1973, a primeira geração de aerogeradores ditos modernos foi projetada com torres rígidas e com frequências naturais bem acima das forças de rotação

do rotor. Entretanto, esse enfoque conduziu a torres desnecessariamente pesadas e caras (CAMPOS, 2001).

À medida que a compreensão dos problemas dinâmicos de aerogeradores foi aumentando, durante a última década, tornaram-se possível a construção de aerogeradores mais leves, que são conseqüentemente menos rígidos, mas também significativamente mais baratos que seus antecessores.

Desde que tenham as suas freqüências naturais desacopladas das freqüências de excitação do rotor, as torres podem ser estaiadas ou não. De modo geral, as freqüências naturais de uma torre estaiada podem ser mais bem reguladas, variando-se a tensão de estaiamento. Interessante notar que um estaiamento por barras de aço é preferível ao uso de cabos, pois estes são mais elásticos e necessitam de pré-tensões muito maiores do que as que seriam necessárias em barras para atingir a mesma freqüência natural, numa mesma configuração.

Um aerogerador moderno constitui uma estrutura esbelta, com a massa das pás em rotação sobre uma torre, excitando cargas cíclicas sobre todo o sistema. Um problema básico do projeto é determinar todos os modos e freqüências naturais de vibração dos componentes, em especial pás e torre, para evitar ressonância com as freqüências de excitação do rotor em operação. A ressonância, conforme já foi descrito, causa aumento das amplitudes de carregamento cíclico no sistema, comprometendo a resistência à fadiga e reduzindo a vida útil prevista para o aerogerador, que é de aproximadamente 20 anos.

3.8.5 AS TURBINAS EÓLICAS E O MEIO AMBIENTE

A geração eólica de energia é considerada “limpa” uma vez que não emite gases ou qualquer outro tipo de poluente ao meio ambiente.

Entretanto, as grandes “fazendas eólicas”, como são chamadas as instalações que recebem vários geradores, um ao lado do outro, causam alguns tipos de impacto ambiental. Os principais são:

- a) ruído: toda turbina eólica produz barulho, que provém tanto dos equipamentos elétricos e mecânicos (gerador, caixa de redução, etc), como do silvo aerodinâmico propriamente dito e o primeiro deles predomina em turbinas com pás de até 20m de comprimento, além do que o ruído aerodinâmico, por sua vez, depende também do tipo e controle da turbina

(horizontal ou vertical, controle por estol ou passo, controle de velocidade, conexão direta do gerador à rede), do tipo de material das pás, entre outros, sendo que este ruído tende a ser mais evidente quando o vento é mais fraco, uma vez que o barulho natural de ventos fortes acaba mascarando o ruído produzido na turbina e, com ventos fracos, o ruído diminui muito quando se diminui a rotação da turbina, já que as turbinas mais modernas, com sofisticados controles de velocidade e passo (“pitch”), conseguem reduzir significativamente o ruído, mas mesmo assim, dependendo da quantidade de turbinas na fazenda eólica, o barulho produzido pode ser um problema e os países que utilizam mais comumente a geração eólica já têm legislações que tratam do assunto, limitando o ruído máximo próximo a áreas residenciais, sendo que, na Europa, a distância mínima entre uma turbina eólica e uma área residencial é de cerca de 200m (CAMPOS, 2001);

b) poluição visual: grandes turbinas possuem hélices com dezenas de metros e podem ser vistas a dezenas de quilômetros de distância e, fica claro que qualquer instalação de geração de energia (térmica, nuclear, hidrelétrica) é, de qualquer forma, vista a quilômetros, além do que, dependendo da região, a instalação de uma fazenda eólica pode ser indesejável;

c) reflexos: como as pás das turbinas normalmente são feitas de metal, a luz do Sol causa reflexos móveis indesejados caso haja região habitada próxima da fazenda eólica e este problema é maior em locais de maiores latitude, onde o ângulo de incidência dos raios solares é menor;

d) morte de aves: existem relatos de grande mortalidade de aves em Tarifa, próximo ao estreito de Gibraltar, na Espanha, quando ocorre o impacto delas, em rota migratória, com turbinas de uma fazenda eólica, sendo recomendável que se observe o cuidado de não se instalar fazendas eólicas em rotas migratórias de aves (CAMPOS, 2001).

3.9 TECNOLOGIAS APLICADAS NA CONVERSÃO EÓLICA / ELÉTRICA

A turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor, e a transforma em energia mecânica de rotação. O eixo do rotor, acionando o gerador elétrico, transforma uma parte dessa energia mecânica de rotação em energia elétrica.

As baixas rotações atuais tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em vôo migratório. As turbinas eólicas construídas aerodinamicamente satisfazem as exigências de ruído, mesmo quando instaladas a distâncias da ordem de 300m de áreas residenciais. A tecnologia eólico-elétrica é, portanto, ecologicamente correta e constitui uma fonte alternativa e limpa de energia, com capacidade de geração da ordem de Megawatts (MW).

A geração de energia elétrica se inicia com velocidades de ventos da ordem de $v_0 = 2,5$ m/s, e o gráfico mostrado na FIGURA 9, a seguir, ilustra esse processo, em quatro regiões distintas.

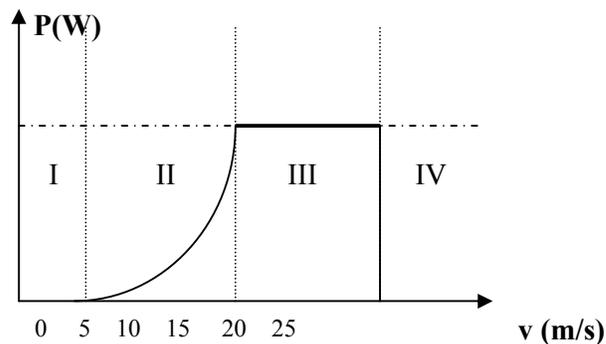


Figura 9 – Regiões de funcionamento das turbinas eólicas
Fonte: Eletricidade Moderna, 2006

Abaixo desse valor de velocidade (2,5 m/s) o conteúdo energético do vento não justifica o seu aproveitamento. Essa faixa de velocidade corresponde à região I na FIGURA 9.

Já na região II, a velocidade do vento varia de $v_0 = 2,5$ m/s até $v_n = 12$ m/s. Aqui, a potência disponível no eixo do gerador varia com o cubo da velocidade do vento e corresponde à região onde se inicia o processo de conversão eletromecânica da energia do vento. Para velocidades de vento superiores a $v_n = 12$ m/s e menores que $v_m = 25$ m/s, região III, é ativado o sistema de limitação automático de potência da turbina, que pode ser por controle do ângulo de passo das pás (*pitch*) ou por estolamento aerodinâmico (*stall*), dependendo do modelo da turbina. Nessa região, a potência disponível no eixo do gerador é constante.

Para ventos muito fortes, com velocidade superior a $v_m = 25$ m/s, região IV, atua o sistema automático de proteção, reduzindo a rotação das pás, e o gerador elétrico é desconectado da rede elétrica (RÚNCOS, 2006).

A turbina eólica, devido à característica de velocidade variável do vento, não consegue transformar a energia do vento em energia mecânica, mantendo a rotação do eixo constante. Em função desta característica, é necessário construir um grupo gerador eólico-elétrico que seja capaz de gerar energia elétrica e de entregá-la à rede com frequência constante. Outra característica importante do grupo gerador eólico-elétrico é a baixa rotação desenvolvida pela turbina eólica. Essas características fazem com que a tecnologia de projeto e de fabricação do grupo eólico-elétrico apresente particularidades diferentes daquelas que são encontradas nos grupos convencionais de geração de energia elétrica.

Existem, basicamente, duas filosofias tecnológicas aplicadas atualmente aos grupos eólico-elétricos, que serão descritas nas subseções seguintes.

3.9.1 GRUPOS EÓLICO-ELÉTRICOS ASSÍNCRONOS

Nesses grupos, o eixo da turbina eólica está acoplado ao eixo de um gerador assíncrono trifásico, que pode ser com rotor de gaiola ou rotor bobinado. Como os geradores assíncronos são máquinas elétricas que apresentam velocidade de operação bem superior à velocidade da turbina, eles exigem que, entre a turbina eólica e o gerador, seja acoplado um amplificador de velocidade. O grupo eólico-elétrico assíncrono, quando conectado à rede através de um conversor de frequência, ou quando duplamente alimentado, torna-se bastante flexível, atendendo perfeitamente às duas características da conversão eólico-elétrica da energia cinética dos ventos, ou seja, opera perfeitamente nas regiões II e III do gráfico mostrado na Figura 9 (RUNCÓS, 2006).

3.9.2 GRUPOS EÓLICO-ELÉTRICOS SÍNCRONOS

Já nestes grupos, o eixo da turbina eólica está acoplada ao eixo de um gerador síncrono trifásico, que pode ter, no rotor, um circuito de excitação independente ou ímãs permanentes. Nessa tecnologia, nos grupos de menor potência (menos de 1MW), o gerador síncrono apresenta velocidade de operação bem superior à da turbina, exigindo um amplificador de velocidade acoplado entre a turbina e o gerador. Porém, nos grupos de maior potência (acima de 1MW), normalmente o gerador síncrono é fabricado com um número muito grande de pólos e para uma frequência nominal baixa, fazendo com que sua velocidade de operação seja da mesma ordem da turbina, não necessitando do

multiplicador de velocidade, mas, sim, de um acoplamento planetário entre a turbina e o gerador (RUNCÓS, 2006).

3.9.3 GERADOR CONECTADO À REDE ATRAVÉS DE UM CONVERSOR

Nesta configuração, também, o grupo eólico-elétrico pode ser constituído de um gerador assíncrono ou um gerador síncrono. Ambos também operam com velocidades acima da turbina, exigindo um multiplicador de velocidades. Mas aqui a malha de controle CC (*link DC*) do conversor desacopla o gerador da rede, permitindo uma grande flexibilidade na regulação de velocidade. Essa filosofia de grupo eólico-elétrico apresenta uma boa eficiência na transformação de energia, quando comparada com a do grupo descrito anteriormente. Aqui, também o uso do gerador assíncrono apresenta as vantagens de maior robustez e menor custo.

Como no caso anterior, o gerador síncrono compensa os reativos através da excitação independente. Já os reativos necessários para excitar o gerador assíncrono provêm do conversor, não exigindo um banco adicional de capacitores. Nas duas soluções, o conversor CA/CA tem grande impacto no custo, já que toda a potência do grupo eólico-elétrico passa para a rede através desse conversor.

Essa solução não apresenta limite de potência, podendo ser empregada em geradores de qualquer porte, respeitando apenas os critérios técnico-econômicos (RUNCÓS, 2006).

3.9.4 GERADOR ASSÍNCRONO TRIFÁSICO DE ROTOR BOBINADO DUPLAMENTE ALIMENTADO COM ESCOVAS

Na configuração que se encontra descrita aqui,, o enrolamento estatórico do gerador é ligado diretamente à rede elétrica, e o enrolamento do rotor é ligado à rede através do conversor que é responsável pelo controle da máquina. O GATDACE permite uma ampla faixa de regulação de velocidade, da ordem de $\pm 30\%$ em torno de sua rotação síncrona. O controle da velocidade é feito através do conversor conectado ao circuito rotórico. Devido a essa característica de regulação de velocidade, a solução é utilizada nas regiões onde a velocidade dos ventos é bastante variável. Aqui também, como nas soluções anteriormente descritas, o gerador trabalha em rotação superior à da turbina, exigindo um multiplicador de velocidade, que normalmente é de vários

estágios. Projetando-se o circuito rotórico adequadamente, o conversor de frequência desse grupo eólico-elétrico necessita ser dimensionado para, no máximo, 30% da potência do grupo, devendo ser bidirecional para permitir o fluxo de potência nos dois sentidos, isto é, do gerador para a rede e da rede para o gerador, dependendo do ponto de operação. Isso representa uma grande vantagem em termos de custos, fazendo com que a solução seja bastante competitiva.

Essa filosofia apresenta grande eficiência na transformação eletromecânica da energia dos ventos devido a sua característica de regulação de velocidade, que permite o aproveitamento energético em toda a faixa de velocidade dos ventos, ou seja, nas regiões II e III da Figura 9. A outra grande vantagem decorre do fato de o estator estar ligado diretamente à rede, gerando uma onda senoidal pura. Dessa forma, não introduz no sistema elétrico a poluição harmônica e, conseqüentemente, não exige o uso de filtros harmônicos.

Essa configuração é largamente utilizada pela maioria dos fabricantes de grupos eólico-elétricos para potências de até 5MW, por apresentar custo inicial baixo, robustez e grande eficiência na transformação eletromecânica da energia dos ventos. Porém, apresenta dois pontos fracos, que são o uso do multiplicador de velocidades e o uso de escovas, os quais, principalmente as escovas, aumentam a necessidade e, por conseguinte, os custos de manutenção do grupo (RUNCÓS, 2006).

3.9.5 GERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO CONECTADO À REDE POR CONVERSOR SEM MULTIPLICADOR DE VELOCIDADE

Nesta configuração, o grupo eólico-elétrico é constituído de um gerador síncrono trifásico com excitação independente ou com rotor de ímãs permanentes. Tanto uma configuração como a outra requerem um gerador de grande número de pólos, gerando uma frequência baixa e variável de acordo com a velocidade da turbina. O conversor desacopla o gerador da rede, permitindo a conversão eletromecânica da energia numa ampla faixa de velocidade dos ventos. Como os geradores apresentam um grande número de pólos, trabalham em rotação mais baixa, não exigindo um multiplicador de velocidade, mas apenas um planetário de um único estágio, com custo e manutenção menores.

Numa configuração, a regulação da tensão gerada é feita pela excitação independente, enquanto que na outra não é permitida a regulação da tensão gerada

devido ao rotor ser de ímãs permanentes. Porém, a solução com ímãs permanentes apresenta um rendimento maior porque praticamente não tem perdas no rotor.

Essa filosofia é utilizada por alguns fabricantes de grupos eólico-elétricos para potências até 5MW, por apresentar uma grande eficiência na transformação eletromecânica da energia dos ventos e por não necessitar do multiplicador de vários estágios de velocidade. Porém, apresenta um custo inicial elevado e necessita de filtros para evitar a poluição da rede pelos harmônicos provenientes do conversor (RUNCÓS, 2006).

3.9.6 GERADOR ASSÍNCRONO TRIFÁSICO DUPLAMENTE ALIMENTADO

Como foi visto anteriormente, um dos geradores que melhor atendem à necessidade de gerar energia elétrica com frequência constante em velocidades variáveis é o tipo assíncrono trifásico duplamente alimentado com escovas (GATDACE). Este, no entanto, tem a desvantagem da maior necessidade de manutenção, devido ao desgaste das escovas. Uma vez que, na geração eólica, o baixo índice de manutenção e a confiabilidade são pontos importantes para torná-la competitiva, muito se tem pesquisado para desenvolver o gerador assíncrono trifásico duplamente alimentado **sem** escovas (GATDASE), que apresentaria o mesmo desempenho do primeiro, mas, justamente por não ter escovas seria mais confiável e demandaria menores custos de manutenção.

Atualmente estão em curso outras pesquisas nesta área pela WEG e UFSC no sentido de desenvolver o GATDASE. Mais adiante, neste trabalho, serão mostrados o princípio de funcionamento, o controle e os resultados de desempenho de um protótipo construído para esse objetivo (RÚNCOS, 2006).

Com base no que foi aqui conceituado e caracterizando o **Sistema de São Gabriel**, classificamos da seguinte forma: é composto por um aerogerador Bergey 1500W, 220V, instalado em torre metálica estaiada de 10 metros de altura, uma bomba centrífuga multi-estágio, da marca Grudfos SP, em aço inox de 4", série 9428, situada a 60 metros de profundidade, cujo motor é do tipo Franklin Eletric de 1,1 Kw, 230V, 5 A, acionada pelo Controlador Bergey 1500W, microprocessado, com saída a contactor marca ABB modelo 3010.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS

4.1 ANÁLISE E PROPOSIÇÕES PARA A OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE SÃO GABRIEL – BAHIA

Para realizar a pesquisa, o autor, juntamente com a equipe de profissionais da Companhia de Engenharia Rural do Estado da Bahia (Cerb) iniciou, a convite desta última, em dezembro de 2003, as análises e alguns reparos devidamente documentados nos Relatórios de Campo constantes nos APÊNDICES A, B, C e D. Desde então, vêm desenvolvendo, conjuntamente, um aprendizado mútuo em prol das instituições envolvidas. Como resultado do sucesso do sistema pioneiro, a Cerb decidiu investir em mais 10 sistemas eólicos para seus poços, sendo 5 deles eletro-eletrônicos da ENERSUD e os demais sistemas mecânicos da Cataventos do Nordeste (Cataventos Kênia), fabricados na cidade de Juazeiro-Bahia.

Na FIGURA 10, mostrada a seguir, vê-se a estação de bombeamento que se constituiu no objeto da pesquisa aqui relatada.



Figura 10 – Estação de bombeamento de São Gabriel
Fonte: Carlos Bruni

Algumas análises e diagnósticos já foram publicados nos Anais do AGRENERGD 2004, da Universidade Estadual de Campinas-SP (Unicamp) e na Revista Científica e Tecnológica do Cefet-Ba, ETC–2005, que constitui o APÊNDICES E e F Predominantemente, os defeitos apresentados no sistema estudado tinham o aspecto eletro-eletrônico, entretanto, pretendeu-se demonstrar que as causas tinham origem mecânica, sobretudo no que diz respeito à altura da torre.

4.2 METODOLOGIA UTILIZADA NO ESTUDO DE CASO

Caracterizando-se como uma pesquisa aplicada, este trabalho desenvolveu-se com os materiais, equipamentos e informações disponíveis sobras as partes constituintes, sendo que o escopo da análise desenvolvida foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

- a) coleta e análise de dados relativos à velocidade média dos ventos no local, das suas instalações elétricas e hidráulicas;
- b) elaboração de planilhas eletrônicas Excel para modelagem e simulação de ambiência do sítio, da potência gerada aerogerador nas condições ambientais, da turbina eólica, de balanço eletro-mecânico do bombeamento e simulação do ganho de energia com a elevação da torre para 15 e 20 metros;
- c) estudos físicos de re-potenciação e aumento do reservatório.

Os resultados obtidos com as medições realizadas nas etapas acima descritas constam da TABELA 7, vista a seguir, e confirmam a hipótese originalmente formulada.

Tabela 7 – Influência da altura no ganho de potência

ALTURA DA TORRE (m)	VEL. MÉDIA (m/s)	POTÊNCIA DA TURBINA (W)	POTÊNCIA DO GERADOR (W)	GANHO DE POTÊNCIA (%)
10	6,44	1140	205	0,00
15	7,07	1509	272	32,28
20	7,55	1840	331	61,33

Fonte: elaboração própria

4.3 DADOS E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

O sistema de bombeamento de água para o consumo humano e de pequenos animais, que se encontra em funcionamento na comunidade da Fazenda Diamantina, Romão, São Gabriel, na micro-região de Irecê, Estado da Bahia, Brasil, é a unidade pioneira no uso da energia eólica no Estado sob a responsabilidade da Cerb, atendendo a uma população de 43 pessoas e suprindo a demanda para a criação de 30 caprinos e outros pequenos animais domésticos. Esta comunidade era atendida anteriormente por uma moto-bomba injetora INAPI modelo INB 11 de 7,5CV acionada por motor Agrale M-93, movido a óleo diesel. Isso acarretava alguns problemas de suprimento do óleo combustível, que na maioria das vezes era custeado pelos próprios moradores daquela comunidade.

O município de Irecê encontra-se a 700 metros de altitude, possuindo ventos com velocidade média de 6,44 m/s (COELBA, ano 2002) e uma temperatura ambiente de 25° C. É nesse ambiente, e no convívio com as características ambientais descritas, que se encontra instalado o sistema de bombeamento de água, objeto central deste trabalho de investigação.

O poço de água tem profundidade de 83 metros e vazão de 2,467 m³/h, nível estático 7,74m e nível dinâmico 56 metros. O reservatório de 5 mil litros de capacidade, em fibra de vidro, está localizado a 100 metros de afastamento do poço, com altura manométrica de 75 m.

Na Figura 11, mostrada abaixo, vê-se o mapa rodoviário que localiza a região de São Gabriel, município de Irecê, onde se encontra instalado o sistema de bombeamento analisado. Vê-se, também, uma fotografia, obtida por meio de satélite, que ajuda a localizar a região em que se desenvolveu o estudo.

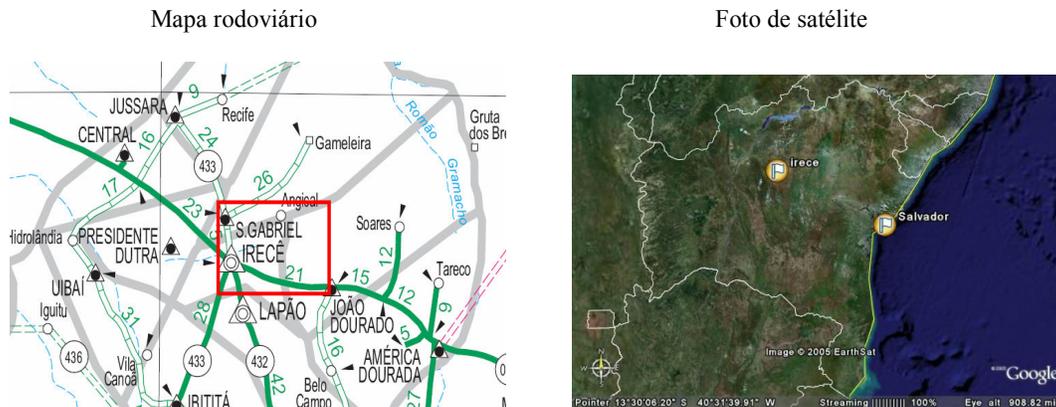


Figura 11 – Mapa e foto aérea da região de São Gabriel-BA
 Fonte: Ministério dos Transportes e Google Earth.

4.4 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS

Foram utilizados os seguintes instrumentos para a obtenção dos dados:

- a) Anemômetro digital – Marca Minipa, com sensor e cabo elástico;
- b) Multímetro digital - Marca Fluke True RMS;
- c) Amperímetro Alicata digital – Minipa – Mod. 3050 – DC/AC

4.5 DIAGNÓSTICO DA ORIGEM DO PROBLEMA

Tratando-se de um sistema pioneiro no Estado da Bahia convive-se com um quadro em que as soluções para os problemas ainda não se encontram documentadas na literatura técnica especializada. Esse foi um dos aspectos que serviu de estímulo e de motivação para a equipe se aprofundar nos estudos e na análise do circuito eletro-eletrônico do controlador da bomba, da sua fiação elétrica e dos seus componentes vitais.

Como já foi descrito em outra parte deste trabalho, deparou-se inicialmente com situações as mais diversas e em diferentes graus de dificuldades, desde identificação de erro de montagem elétrica dos cabos de força do gerador, os quais foram trocados pelos cabos da bomba, passando pelo caso da invasão da caixa do painel eletrônico do anemômetro estatístico, por pequenos animais que danificaram o seu circuito eletrônico. Adotou-se, assim e a partir do ano de 2005, os dados anemométricos da Estação n° **0028**

da **Coelba** em Irecê, substituindo a medição local, validados pela estação nº **32546** do **INPE**, ambas instaladas a uma altura de 10m.

4.6 A PREMISSA DA ANÁLISE

Uma das características logo observada na equipe de montagem foi a falta de uma cultura relacionada com a atuação profissional em torres, já que todos os membros eram especialistas em poços e bombeamento com energia convencional e fotovoltaica, todavia o sistema foi montado numa torre de 10 metros de altura, considerada à época uma altura suficiente para fazer a montagem. No entanto, neste trabalho conseguiu-se demonstrar que esta altura é insuficiente para o funcionamento perfeito do sistema e como outras opções elevou-se o aerogerador para alturas de 15 ou de 20 metros. Os resultados obtidos estão apresentados na TABELA 8, com ganhos de potência de 32,28% e 61,33% respectivamente para as alturas analisadas.

No que se refere à análise da altura da torre, foram feitas simulações para um Fator de Rugosidade arbitrado em 0,23, conforme está apresentado na TABELA 5, sob uma velocidade média dos ventos de 6,44m/s (Irecê-BA) e a altura atual de 10m. Tudo isso permitiu que fossem obtidos os resultados vistos na TABELA 8, com o uso da Planilha Eletrônica Excel.

O Balanço Eletromecânico do Sistema, cujos resultados também foram obtidos com a planilha eletrônica Excel, a partir da análise dos aspectos relativos ao bombeamento, via simulações matemáticas, para as alturas de 10m, 15m e 20m se encontra resumido abaixo, na TABELA 8.

Tabela 8 – Balanço eletromecânico do sistema

ALTURA (m)	VOLUME (m³)	POTÊNCIA DO MOTOR (W)	POTÊNCIA DO GERADOR (W)	TEMPO DO RECALQUE (h)
10	5	205	205	8
15	5	273	272	6
20	5	328	331	5

Fonte: elaboração própria

Com base nas simulações vistas na TABELA 8 pode-se concluir que a altura de 20 metros é aquela que assegura um funcionamento com folga do sistema de bombeamento e, ainda mais, que se pode propor o aumento do reservatório para 10m³,

assegurando o suprimento de água por períodos maiores de calmaria e também tornar disponível o excedente de energia para a carga de baterias de um sistema de iluminação da comunidade.

Ainda com base nas simulações, percebe-se que na altura atual de 10m, o sistema está trabalhando de forma crítica e problemática devido ao fato da energia gerada ser exatamente aquela que o motor necessita, sem margens para perdas dissipativas nos cabos e nas conexões, sendo o tempo de enchimento do reservatório igual a oito horas de vento na velocidade média local.

Para a altura de 15m, por sua vez, ocorre um fato que cabe ser registrado e está relacionado às curvas de carga da bomba com o aumento da sua velocidade. Em outras palavras, ao entregar maior quantidade de energia e sob maior frequência (rotação) a bomba solicita da turbina eólica uma potência maior, mesmo que esta diferença seja pequena, que a fornecida, persistindo, ainda, o funcionamento crítico.

Na simulação para uma altura de 20m, percebe-se que a potência solicitada ou demandada é menor do que aquela que fica disponível na turbina eólica, permitindo um funcionamento eficaz do sistema, sendo esta, a altura mínima proposta como resultado do trabalho de pesquisa.

4.7 MANUSEIO E USOS DAS PLANILHAS DESENVOLVIDAS

As planilhas são protegidas para evitar danos nas equações definidas no corpo do Trabalho de Revisão Bibliográfica documentado no capítulo Matérias e Métodos, permitindo a Introdução dos dados solicitados em vermelho, sendo o resultado das equações visualizado em preto.

4.7.1 PLANILHA DOS AEROGERADORES

Para esse caso, introduz-se a temperatura e a altitude do sítio do aerogerador, o diâmetro da turbina, a velocidade média do vento, ou de catálogo. Visualiza-se a potência desenvolvida, ou convertida do vento também, na curva $W \times m/s$ do aerogerador mostrada na FIGURA 12. Utilizando os dados de catálogo pode-se estimar o coeficiente de potência C_p , a eficiência do conjunto e efetuar a comparação entre os diversos fabricantes.

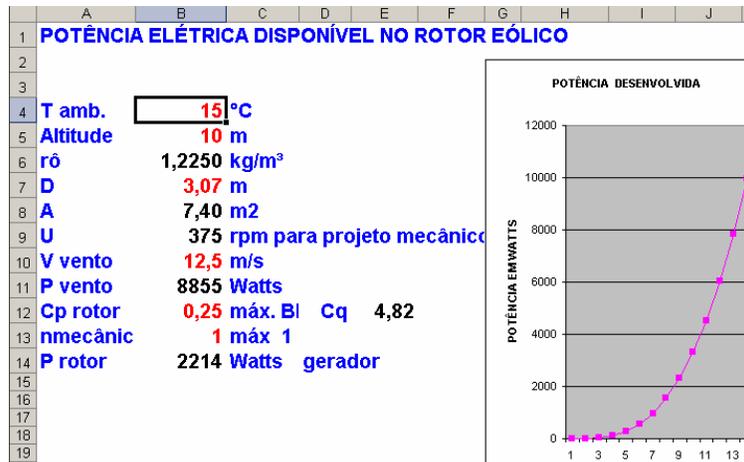


Figura 12 – Planilha da potência disponível
Fonte: Elaboração própria

4.7.2 Planilha das turbinas

No caso presente introduz-se a temperatura e a altitude do sítio, a potência do gerador elétrico disponível, o seu rendimento, e a velocidade do vento. Visualizam-se as especificações da turbina eólica necessária para acionar o gerador, tais como: diâmetro, rotação de projeto, TSR (relação entre velocidade angular da turbina e do vento), torque, etc., permitindo-se estimar o C_p e a eficiência do conjunto e ainda comparar turbinas de diversos fabricantes. Todos esses parâmetros são mostrados na FIGURA 13.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ROTOR PARA UM DETERMINADO ALTERNADOR									
2										
3	T amb.	15	°C							
4	Altitude	10	m							
5	ρ	1,2250	kg/m ³							
6	V vento	12,5	m/s							
7	P. Alter.	1594	Watts							
8	nGerador	1	máx. 1							
9	Cp	0,18	1							Nota: Este parâmetro foi estimado, para fim de demonstração da planilha.
10	nT	1	máx. 1							
11	P. rotor	8856	Watts							
12	Torque	24	Joules							
13	Área	7,40	m ²							
14	Diâmetro	3,07	m							
15	Raio	1,5	m							
16	U estim.	373	rpm							
17	TSR	4,8	vezes							

Figura 13 – Dimensionamento do rotor em função do gerador
Fonte: Elaboração própria

4.7.3 Planilha simulação da elevação da torre

Esta é uma planilha dedicada ao gerador Bergey 1500W que foi analisado, entretanto, ela pode ser facilmente modificada para permitir a visualização do índice de re-potenciação de outros aerogeradores. Introduzem-se as condições ambientais do sítio de instalação após o que são visualizadas as potências de saída dos geradores, das turbinas e dos percentuais de ganho de potência elétrica resultante da elevação da torre para 15m e para 20m respectivamente. Esta planilha, apresentada na FIGURA 14, permite ainda corrigir a velocidade média conhecida de estações anemométricas da região nas alturas citadas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	SIMULAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA TORRE DE 10 PARA 15 E 20 METROS										
2	AEROGERADOR BERGEY 1500W										
3	n	0,23									
4	Vo	6,54	Po	1194 Watts				P Gerador	215 Wa		
5	Ho	10									
6	V15	7,18	P15	1580 Watts	32,28 %			P Gerador	284 Wa		
7	V20	7,67	P20	1927 Watts	61,33 %			P Gerador	347 Wa		
8											
9											
10											
11			Descrição do terreno		Fator de Rugosidade (n)						
12			Sem vegetação		0,1						
13			Gramado		0,12						
14			Cultivado		0,19						
15			Com poucas árvores		0,23						
16			Com muitas árvores		0,26						
17			Florestas ou c/edific.		0,28						
18			Zona urbana		0,32						

Figura 14 - Ganho de energia com altura da torre
Fonte: Elaboração própria

4.7.4 Planilha do balanço eletromecânico

Para esse caso introduziu-se os dados relativos às instalações hidráulicas do poço, o reservatório e a bomba. Visualizam-se, desse modo, a vazão de recalque, a altura manométrica, a potência elétrica necessária ao acionamento do motor e a tubulação mínima da instalação. Esta planilha faz uma crítica aos dados digitados, informando com mensagens “OK!” ou “impossível”, segundo a análise. De posse do valor da potência elétrica necessária para acionar o motor, compara-se com aqueles valores de potência obtidos na planilha anterior. A FIGURA 15, vista a seguir, traz os dados desse tipo de balanço.

As planilhas se constituíram em ferramentas valiosas para o desenvolvimento da pesquisa. As informações obtidas com o seu uso permitem uma tomada de decisão com relação ao sistema, no sentido de:

- a) elevar o aerogerador para a altura de 20m ou qualquer outra acima;
- b) determinar o tempo de recalque necessário para encher o reservatório atual;
- c) propor o aumento da capacidade do reservatório de 5m³ para 10m³;
- d) propor novos usos para o excedente de energia, por exemplo, na iluminação das residências ou de espaços coletivos.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	BALANÇO ELETROMECÂNICO DO BOMBEAMENTO							
2								
3	Volume do Reservatório				5	m³		
4	Vazão do Poço				2,47	m³/h		
5	Tempo do Bombeamento				8	h		
6	Vazão do Bombeamento				0,63	m³/h	ok!	
7	Altura Geométrica				75	m		
8	Altura Manométrica *				97,5	m		
9	Eficiência Mot/Bomba				81	%		
10	Potência Elétrica				205	Watts		
11	Velocidade Econômica (.5 a 2m/s)				0,5	m/s		
12	Tubulação Existente				32	mm		
13	Diâmetro da Tubulação Calculada				12,6	mm	ok!	
14								
15								
16	<small>*Nota Técnica: Segundo Prof. Olivar de Souza, a título de simplificação dos cálculos foram atribuídos 30%</small>							
17	<small>a mais na altura geométrica, para a determinação da altura manométrica visando compensar perdas</small>							
18	<small>nas tubulações, conexões, válvulas, etc.</small>							

Figura 15 - Balanço eletromecânico do bombeamento
Fonte: Elaboração própria

A opção pelo ambiente EXCEL, permitiu uma precisão matemática nos cálculos realizados e uma facilidade de modelagem inúmeros sistemas eletromecânicos com uma linguagem própria da engenharia.

5 CONCLUSÕES

O aproveitamento da energia eólica, como já vem sendo feito em diversas partes do mundo, tem desafiado o homem na busca de uma eficiência cada vez maior das instalações físicas e no aprimoramento dos equipamentos que são fabricados e utilizados com esse fim.

Após minuciosas análises físicas e simulações matemáticas feitas com o objetivo de estudar o processo de bombeamento de água em São Gabriel-BA, aproveitando a energia eólica, chegou-se a um estágio em que se pode afirmar que houve a comprovação da hipótese originalmente formulada por meio dos questionamentos iniciais.

O fator que pode ser considerado decisivo na proposta de otimização do sistema de bombeamento com energia eólica de São Gabriel foi a confiança na tecnologia de utilização de uma energia alternativa, renovável, limpa e, principalmente, destinada a uma comunidade isolada e carente.

A otimização do sistema de bombeamento de água, que busca, acima de tudo, torná-lo mais eficiente, legitima-se, e passa a ter um maior grau de credibilidade, a partir dos resultados que foram trazidos pela pesquisa. Tomando os parâmetros considerados relevantes na pesquisa – ganho de potência com a elevação da altura, potência do gerador e potência desenvolvida da turbina – é fácil perceber, a partir dos dados constantes na TABELA 8, que eles cresceram em torno de 61% quando se comparam com aqueles outros obtidos com o gerador posicionado a uma altura de 20m com o posicionamento a uma altura original de 10m, correspondente ao aumento da velocidade média do vento, que passaria dos atuais 6,44m/s, para 7,55m/s, representando um aumento em torno de 17%.

Além do mais, as simulação que foram feitas conduzem à conclusão de que a altura da torre fixada em 20 metros é aquela que assegura um funcionamento com folga do sistema de bombeamento e ainda, que se pode aumentar a capacidade de

armazenamento de água do reservatório comunitário, passando dos atuais 5m³ para 10m³, fator que assegura o suprimento de água por períodos mais longos de calmaria ou possibilitar o suprimento da água para a produção de hortifrutigranjeiros, assegurando uma melhoria da qualidade de alimentação e de vida da população assistida.

Pode-se, também, a partir da proposta aqui comprovada, tornar disponível o excedente de energia produzida para a carga de baterias de um sistema de iluminação. Esses sistemas de iluminação tanto podem ser de iluminação domiciliar ou comunitária e, o que é mais importante, passa-se a dispor de um referencial científico e tecnológico para subsidiar a instalação dos outros cinco aerogeradores, já adquiridos pela Cerb, nas próximas cinco comunidades a serem assistidas pelo Programa de Uso de Energias Renováveis. Os dados que sustentam essas constatações estão apresentados na TABELA 8.

Hoje, depois de todo este estudo, é gratificante constatar que não foram em vão as inúmeras idas a São Gabriel para a substituição de baterias e das chaves contadoras. Essa rotina, traço marcante dos trabalhos de investigação científica, foi fundamental para alcançar os objetivos propostos, como também foi importante a re-bobinagem do transformador do carregador eletrônico da bateria, literalmente no meio do mato e em condições inóspitas.

Ao considerar a dimensão social, trazida pelos resultados alcançados na pesquisa, tem-se, comprovadamente, a melhoria da qualidade de vida da população atendida por aquele sistema de bombeamento porque, afinal de contas, a comunidade precisa da água para a sua sobrevivência.

Podem-se constatar, também, que os componentes do sistema de bombeamento de São Gabriel não estavam se danificando à toa, mas, sim, devido à sobrecarga das funções e ao excessivo número de operações para os quais foram submetidos.

Registre-se, ainda, a importância demonstrada pela pesquisa acerca da parceria entre as instituições públicas envolvidas neste trabalho: a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), através do PPGEM, o Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia (Cefet-BA), o Curso de Eletrotécnica do Cefet-BA e a Companhia de Engenharia Rural do Estado da Bahia (Cerb).

Essas parcerias, e outras mais que possam surgir, vêm a se constituir, certamente, em vetores impulsionadores da aplicação científico-tecnológica dos recursos de captação da energia eólica nas regiões e nas comunidades que ainda

convivem com as dificuldades de acesso à energia elétrica de matriz predominantemente hidroelétrica.

É oportuno registrar a importância desse trabalho de investigação como uma etapa inicial para outras investigações que venham a se suceder e que se preocupem, prioritariamente, com o bem-estar social e com a preservação ambiental. Por outro lado, vislumbra-se a ampliação e a divulgação em revistas especializadas da produção teórica relacionada ao aproveitamento da energia eólica no Brasil.

Os estudos aqui realizados são como uma ponta de um “iceberg”, ou seja, se faz necessário a continuidade das pesquisas e a divulgação dos seus resultados para que os usuários das energias renováveis, possam no futuro bem próximo, se orgulharem de terem dado “um empurrãozinho” para a melhoria das condições ambientais do planeta e um “grande salto” para um desenvolvimento sustentável das comunidades.

REFERÊNCIAS

COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF) **Fontes energéticas brasileiras**, Energia Eólica Vol III , Recife,1987.

SCIENTIA, **Sistemas de conversão eólica**, Relatório elaborado para a Eletrobrás, Rio de Janeiro, 1977.

HIRATA, Migue, **Uma introdução energia eólica**, COPPE, UFRJ, 1985.

HULSCHER, Wim and FRANKEL, Peter, **The power guide**, University of Twente, 2ª ed. – 1994.

HUNTER & ELLIOT, **Wind diesel dystems**, Cambridge University Press, 1994.

ALDABÓ, Ricardo – **Energia Eólica** , Editora Artliber Ltda, São Paulo, Brasil,2002.

KRAUTER, Stefan –**Usos da energia eólica**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

RUNCOS, Fredemar, at al, **Características e vantagens e desvantagens das atuais tecnologias**, WEG Máquinas, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina (Grucad-EEL), Eletricidade moderna, Saõoi paulo, ano XXXIII, nº 373,210-223, abr. 2005.

CAMPOS, Teodoro Sánchez, – ATAHUI, Saul Ramirez - **Desarrollo tecnologico de microgeneradores eólicos**.

Principais sítios pesquisados:

< www.windpower.dk>

< <http://www.copel.com/copel/port/negocios.ger-energieolica.html>>.

<<http://www.seinfra.ce.gov.br/downloads.php>>

<<http://www.cresesb.cepel.br/abertura.htm>>

<[ww://dem.ufrn.br](http://www.dem.ufrn.br)>

<<http://www.wwiuma.org.br/artigos/011.thml>>

< <http://tempo.cptec.inpe.br>>

< www.ufpe.br/naper>

<www.ufpa.br/gedae>

APÊNDICE A

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAHIA - CEFET-BA NÚCLEO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS PROJETOS E PESQUISAS - NUCAPP

RELATÓRIO TÉCNICO

TEMA: SISTEMA DE BOMBEAMENTO COM AEROGERADOR BWG E BOMBA GRUNDFOS

LOCAL: DISTRITO DE SÃO GABRIEL – IRECÊ – BAHIA
DIAS: 14 E 15/12/2003

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE:

A visita técnica à unidade de Bombeamento de São Gabriel – Irecê-Ba, a convite do Sr. Luiz Camelier da CERB/SEINFRA Governo de Estado da Bahia, teve como objetivo restabelecer o suprimento de água para a comunidade local, uma vez que o sistema estava sem funcionar devido a problemas eletro-eletrônicos no Controlador BWG que aciona uma bomba submersa marca Grundfos a partir de um aerogerador BWG de 1,5kW, 220V e ainda, que as orientações técnicas por meio eletrônico ou telefônico, não estavam solucionando o problema. O interesse do Pesquisador pela difusão do uso das energias renováveis soma-se aos esforços do Governo do Estado da Bahia no sentido de universalizar a oferta de água e energia elétrica à população rural, não importando, tal visita, em ônus para as partes.

DIAGNÓSTICO DO PROBLEMA:

Foram detectados os seguintes problemas:

1. Erro de montagem do painel do Controlador, com inversão dos bornes relativos à Bomba com os respectivos bornes do aerogerador;
2. Constatado que a bateria do sistema eletrônico 12V, 7Ah estava descarregada;

3. Acréscimo de um contator com bobina de 110V para substituir todo o Controlador Eletrônico. Solução prática para tentar resolver o problema, criativa porém ineficaz;
4. Retirada do resistor série do contactor da bomba, cuja bobina trabalha com corrente contínua de 12V e exige o citado componente para reduzir a dissipação de calor da mesma;
5. Que a falta do resistor anteriormente citado, drenava uma corrente de aproximadamente 0,5 ampére da carga da bateria e que, os fracos ventos do dia 15/12/2003, não estava permitindo a reposição da mesma, pelo carregador da bateria, incorporado à placa do Controlador Eletrônico;
6. Falta sistema de aterramento da estrutura da torre metálica de 20m de altura.

SERVIÇOS REALIZADOS:

Visando resolver o problema, foram realizados os seguintes serviços:

1. Desfeita a alteração realizada no circuito original, com a retirada do contactor de 110V;
2. Recarga da Bateria do Controlador, duas vezes no carro do Sr. Luiz Camelier e uma em loja especializada no centro de da cidade de Irecê-Ba;
3. Substituição da Bateria do Controlador pela do citado veículo;
4. Inversão das conexões elétricas do Aerogerador pelas da Bomba respectivamente. Tendo em vista que não havia sobras no painel do Controlador, foram transferidos os cabos que alimentam o Controlador Eletrônico (fios flexíveis de cores branco/preto e laranja/preto) e os que alimentavam o transformador do carregador da bateria (fios flexíveis de cor preto e vermelho);

FIOS CORES	ORIGINAL	MODIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO
PT	16	13	ALIMENTA TRANSFORMADOR
VM/PT	17	14	ALIMENTA TRANSFORMADOR
BC/PT	16	13	CONTROLADOR
LR/PT	17	14	CONTROLADOR

1. Diante da solução do problema e o perfeito funcionamento do Controlador, passou-se à Programação para que o mesmo ligasse e desligasse a bomba automaticamente. Sendo as seguintes funções e respectivos valores:

FUNÇÃO	PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
LOW CUT OUT	30 Hz	FREQUENCIA PARA LIGAR
LOW CUT IN	25Hz	FREQUENCIA MINIMA /DESLIGA
HIGH CUT OUT	90 Hz	FREQUENCIA MÁXIMA/ DESLIGA
HIGH CUT IN	60 Hz	FREQUENCIA RELIGAR
RESET TIME	10 SEG	POE CONTROLADOR EM STAND- BY PARA ECONOMIZAR BATERIA.

1. Após novas medições, verificou-se que a corrente do contactor estava alta porém não foi possível instalar o resistor série pois o mesmo não se encontrava em Irecê e sim em Feira de Santana com o técnico que o retirou;
2. O abastecimento de água foi normalizado, para satisfação da comunidade local porém, o sistema ainda estará em observação quanto a substituição do resistor série e a recarga automática da bateria de 12V, 7Ah do Controlador o que ficou a cargo do Sr. Luiz Camelier.

PENDENCIAS E SUGESTÕES:

Para o perfeito funcionamento do sistema recomenda-se:

1. Recolocação do resistor série no contactor de corrente contínua (12V) da Bomba evitando-se a queima da bobina do mesmo e principalmente, diminuir a corrente de consumo do sistema eletro-eletrônico drenada da bateria de 7Ah;
2. Instalar uma haste de aterramento para a torre;
3. Treinar mais de uma pessoa da comunidade para que possam travar o aerogerador quando o tanque estiver cheio, evitando-se o desperdício de água, e nos dias em que os ventos estiverem fracos, evitando-se assim o desgaste desnecessário do sistema que

- fica ligando e desligando sucessivamente a bomba do aerogerador até encher o reservatório ;
4. Se possível. Aumentar a capacidade do reservatório (5.000 litros) de maneira que a comunidade possa acumular água para pelo menos 3 dias sem ventos ou ventos fracos;

Na certeza de ter contribuído para o sucesso da instalação do primeiro Sistema de Bombeamento com Aerogerador e Bomba, desde já me coloco à disposição para as orientações que se fizerem necessárias e estiverem ao nosso alcance..

Salvador, dezembro de 2003.

Prof. Carlos d'Alexandria Bruni
NUCAPP / CEFET-BA

APÊNDICE B**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAHIA –
CEFETBA
DEPARTAMENTO DE ELETRO-ELETRÔNICA
CURSO ELETROTÉCNICA**

Do: Prof. Carlos d'Alexandria Bruni

À: Companhia de Engenharia Rural do Estado da Bahia - CERB

Att.Sr. Almir Brito de São Paulo

Assunto: Relatório Técnico da visita ao Sistema Eólico de São Miguel

Período: 22 a 23/10/2004

Salvador, 27 de outubro de 2004.

Dia: 22/10/2004

1. Verificação da tensão da bateria. Tensão medida 0 Volt;
2. Foi detectado um componente novo no contactor da bomba, porém pela falta de iluminação no local, ficou para o dia seguinte a identificação do mesmo;
3. Retirada da bateria e providenciada a carga em Irecê. Foi efetuada uma carga parcial, ligando a bateria em paralelo com uma automotiva, uma vez que o carregador disponível não permitia um ajuste de corrente tecnicamente recomendável, por volta de 0,36 A.

Dia: 23/10/2004

1. Restauração do circuito original, mediante a retirada do componente adicionado, que se tratava de um bloco aditivo de contatos. Percebemos a falta de dois parafusos na abraçadeira de fixação da bateria e um na fixação do contactor;
2. Retirada de um calço de “palito de fósforos” que estava travando o contactor. Fato este que permitia a operação do sistema no que chamavam de “manual”;
3. Na tentativa de anotar os valores registrados do anemômetro da UFBA, verificamos que o circuito estava repleto de pequenas gias (rãs) que penetraram no equipamento pelo orifício do cabo do anemômetro. Foram

substituídas as 4 pilhas de 1,5 volts porém o mesmo não funcionou durante todo o tempo em que permanecemos no local;

4. Pelos valores totalizados no anemômetro, verificou-se que os ventos locais estão, na faixa de 4 a 6 m/s o que na curva de potência do aerogerador Bergey 1500W significa uma potência de 300W;
5. Avaliou-se que, nestas condições de ventos, o sistema do carregador da bateria, incorporado à placa do Controlador não estava funcionando e desta maneira a tensão da bateria, recém carregada até 12,27 Volts, já apresentava uma tensão por volta de 11,91 Volts o que exigiu uma modificação no transformador toroidal que alimenta o carregador. Em resumo, como o gerador não atinge a potência total a sua tensão de saída só atingia valores em torno de 150 Volts;
6. Foi providenciado o fio esmaltado na bitola 18 AWG e, o enrolamento secundário teve seu número de espiras adicionado de modo a fornecer uma tensão suficiente para que o carregador automático funcionasse nestas condições. O fio original foi preservado podendo ser restabelecido a qualquer momento bastando que o fio esmaltado seja cortado e o condutor de cor vermelha conectado;
7. Ajuste da tensão de carga em 13,3 Volts por volta de 45 Hz , 50% da faixa de operação do sistema, que vai de 30 a 90 Hz.;
8. Para testar o carregador após as modificações, a bomba foi desconectada do sistema e aguardamos que a bateria tivesse sua tensão elevada para 12,47 Volts;
9. Verificamos que o tanque de 5.000 litros já estava transbordando e todas as casas abastecidas . Sugerimos que o mesmo seja substituído por um outro de 10.000 litros, desta maneira o sistema somente seria ligado nos momentos de ventos bons minimizando o desgaste do sistema com comutações sucessivas.

Na certeza de ter contribuído para a difusão do uso de tecnologias de geração e utilização de energias renováveis no suprimento de água potável para a população rural do Estado da Bahia, desde já, me coloco à disposição para os esclarecimentos que se fizerem necessários.

Atenciosamente, Prof. Carlos d'Alexandria Bruni

APÊNDICE C

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA
BAHIA****DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA ELETRO-ELETRÔNICA
CURSO DE ELETROTÉCNICA**

Salvador, 11 de abril de 2005.

Relatório de Visita Técnica à Estação de Bombeamento de Água com Energia Eólica - CERB

Local: Romão - São Gabriel – Bahia (micro-região de Irecê)

Período: 1] d 2 de abril de 2005.

Participantes: Bruni / CEFETBA e Lindemberg/ CERB

INTRODUÇÃO

Atendendo ao chamado da Regional de Irecê que informou do não funcionamento do sistema de São Gabriel e que a bateria estava descarregada e não aceitava mais carga normal. Neste sentido a Cerb – Salvador providenciou a aquisição da bateria selada de 12V , 7.2Ah para reposição.

DESENVOLVIMENTO

Ao chegarmos no dia 1º de abril, nos dirigimos ao local de instalação do sistema e constatamos que;

1 – A área externa do sistema estava tomado por vegetação local e que haviam se instalado em várias “casas de marimbondo vermelho” na parte interna do mesmo, o que necessitou da ajuda dos moradores para a limpeza do local para que pudéssemos iniciar os trabalhos técnicos, propriamente dito;

2 – Verificado que a região está com poucos ventos neste período, segundo moradores do local, informação não comprovada no sistema de aquisição de dados do Anemômetro de UFBA, uma vez que o mesmo estava totalmente danificado pelas pequenas rãs que entraram no sistema eletrônico;

3 – Verificamos as conexões eletroeletrônicas do Painel de Controle da Bomba e refizemos as conexões que pertenciam ao circuito do carregador da bateria acima citada, com conectores aparafusáveis tipo Sindal;

4 – Verificada a tensão inicial da bateria 12,47V e corrente de repouso de 0,024 A ou 24mA. Situação de normalidade indica também que o sistema do microprocessador está funcionando e deixando o circuito eletroeletrônico em modo de “standby” para economia de energia nos dias sem ventos;

5 – Providenciamos a retirada do totalizador do anemômetro da UFBA, para possível reparo. Verificamos ainda que o sensor do sistema anemométrico também estava danificado, faltando uma das conchas de plástico;

6 – No dia seguinte, 2 de abril, verificamos que estava havendo carga da bateria apenas nos momentos de ventos mais significativos o que demonstrava que todo o circuito carregador estava funcionando registrando picos de até 1,5 A .Neste sentido, concluímos nossos trabalhos e ficamos na dependência dos ventos nesta estação que se inicia;

Sendo só o que se apresenta, recomendamos uma limpeza geral tanto na área interna como externa da estação.///

APÊNDICE D

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAHIA DEPARTAMENTO DE ELETROELETRÔNICA

Salvador, 4 de novembro de 2005.

Relatório de Visita Técnica

Local: São Gabriel, 500 km de Salvador, micro-região de Irecê-Bahia

Dias: 27 e 28 de outubro de 2005-11-04

Objeto: Sistema de Bombeamento com Energia Eólica da Cerb

Participantes: Eng. Lindemberg P. Mello (Cerb), Mestrando Carlos Bruni, César Rogério e Ilder Santos e o Sr. Lourival Barreto.

APRESENTAÇÃO

O presente relatório, visa documentar a visita técnica realizada pelos participantes, ao sistema de bombeamento de água para consumo humano do vilarejo de Romão, suprido com energia eólica, nos dias 27 e 28 de outubro do corrente ano.

DIAGNÓSTICO

O sistema se encontrava inativo, e com o reservatório de 5.000 litros vazio, tendo sido detectado, na oportunidade, os seguintes problemas ou avarias; bateria selada de 12 V, 7.2 AH completamente descarregada (0.01V); contactor de acionamento da bomba (ABB 30-10 com bobina de 12V) com dois contatos carbonizados.

PROCEDIMENTOS

- Substituição da bateria selada por outra de mesma especificação (Cerb);
- Substituição do contactor ABB 30-10 por um semelhante da Telemecanique (CEFET-BA). Recomendamos a compra do contactor original pois sua corrente de bobina é menor do que a do substituto;
- Substituição de três conectores das fases no Painel Padronizado da Bomba por outros de maior capacidade, mais apropriados para a secção dos cabos elétricos utilizados;
- Verificação do funcionamento do relé-térmico da bomba;

- Instalação de um circuito auxiliar de carga da bateria tipo chaveado, para manter a tensão da bateria em valores maiores que 11.4V para tensões de geração entre 40 e 240V sendo que, a partir deste ponto, o circuito original começa a funcionar e completar a carga da bateria;
- Foram realizados testes no sistema original de carga da bateria, tendo sido comprovado o seu funcionamento. Registrou-se a tensão de 12.5 V antes da nossa saída do local;
- Foram realizadas medições da velocidade do vento, com auxílio de anemômetro portátil, digital, na altura de 3 metros, tendo sido constatadas velocidades do vento de 3 a 5.7 m/s. Após correção dos valores medidos para a altura do aerogerador (10m) e rugosidade estimada em 0.2, temos 3.81 a 7.5 m/s, valores que atendem ao funcionamento do sistema;
- Verificamos ainda que o cano de alimentação da casa da Sra. Veneranda, encontra-se quebrado embaixo da árvore “dormitório das galinhas” e tamponado com uma rolha. Recomendamos o reparo do mesmo para evitar que se rompa quando o tanque de 5000 litros estiver cheio.
- Em diálogo com a comunidade observamos que eles estavam travando o gerador, pois o reservatório de água enchia e transbordava. Desta forma a bateria não estaria recebendo a recarga necessária e ainda, mesmo não estando com a sua carga restabelecida, esta tem a função de alimentar o sistema eletrônico inclusive a bobina do contactor da bomba, fato este que tem motivado uma frequência maior nas visitas técnicas e reparos.

CONCLUSÕES

O sistema foi alvo de debate pelos participantes, propondo-se algumas sugestões:

- Que a altura da torre deva ser aumentada para 15 ou 20m devido ao crescimento das árvores na proximidade do sistema reduzindo-se a rugosidade atribuída, distanciando o aerogerador da turbulência causada pela vegetação;
- Caso persista o problema de carga da bateria, deve-se utilizar um pequeno painel fotovoltaico (10 a 15W), no telhado, para manter a carga da bateria;

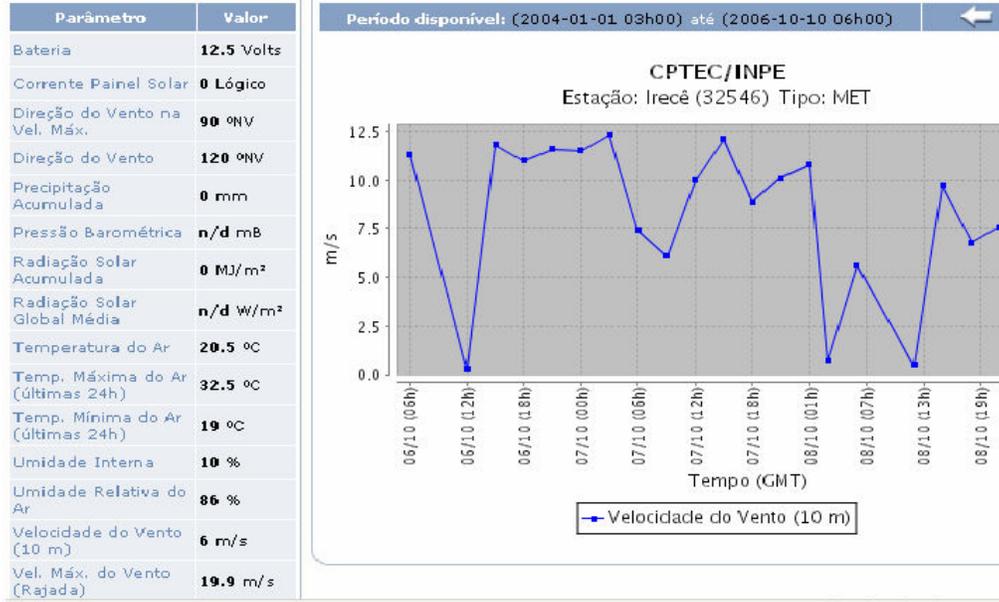
- Que neste período de ventos fracos, que o aerogerador permaneça funcionando e que os moradores utilizem o excedente de água na produção de alimentos, melhorando a qualidade de vida dos mesmos;
- Que o controlador eletrônico precisa ser aperfeiçoado para evitar as freqüentes visitas pelos mesmos motivos.
- Recomendamos ainda que a Cerb substitua o reservatório de 5000 litros por um maior de 10000 litros. Dessa forma o sistema terá maior capacidade de armazenamento, evitando que os moradores desliguem o sistema com freqüência.

Este é o Relatório.

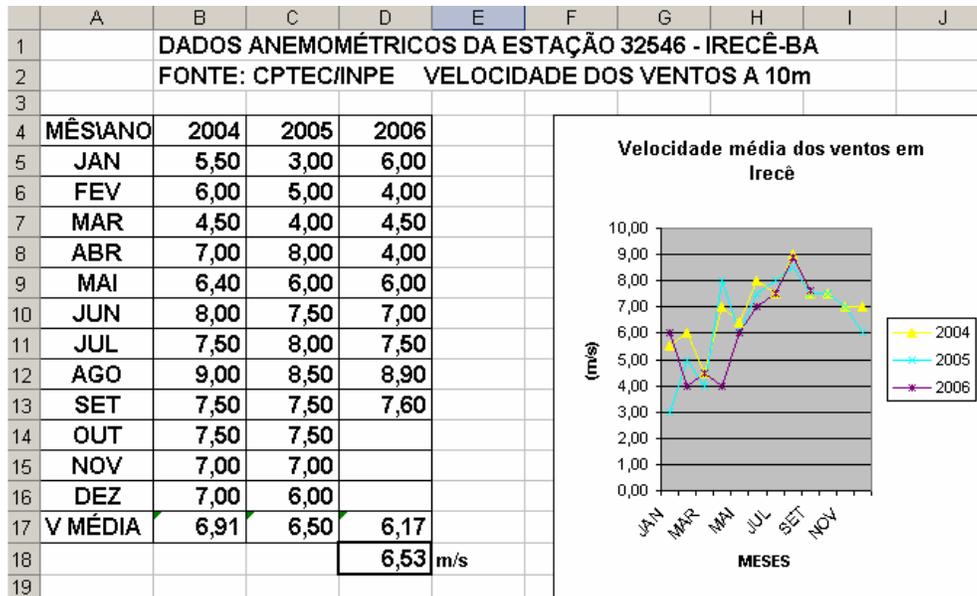
ANEXO I																				
ENERGIAS RENOVÁVEIS - EÓLICA -		DIVISÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - DIVEN FICHA DE INSTALAÇÃO / SIST. DE BOMBEAMENTO EOLICA						Cerb												
MUN: São Gabriel			LOC: Fazenda Diamantina - Romão			HR	IR	RE	DATA	29.11.2003										
POP:	43	hab	Bovinos	30	Caprinos	30	PROG:	Governo Estado	EMPRESA	CERB										
COORDENADAS GEOGRÁFICAS						TIPO DE CAPTAÇÃO														
Latitude: (UTM)	11° 09' 30"		Longitude (UTM)	41° 51' 11"		Altitude:	m				Subterrânea									
DADOS DA ANÁLISE DA ÁGUA																				
PH:			Dureza Total:	mg/l		Sódio (Na)	mg/l		Cloretos (Cl)	mg/l										
Cond. Elétrico:			Cálcio (Ca):	mg/l		Potássio (K)	mg/l		Sulfatos (SO4)	mg/l										
R. Seco:	mg/l		Magnésio (Mg):	mg/l		Ferro (Fe)	mg/l		Carbonatos (CO3)	mg/l										
DADOS DA CAPTAÇÃO					DADOS DA INSTALAÇÃO															
Ano de Cons:			Diâm.:	6		Pol	Tipo Equip:		Bomba centrífuga		Prof. Bomba:	60		m						
Empresa Exe:	Matheus e Machado		Prof.:	83,00		m	Demanda:		m3/dia		Medição:	H								
Rocha:	Calcáreo		NE:	7,74		m	Desnível da Cx.		5		m	Vel. do Vento:		8		m/s				
Sabor da Água	Boa		ND:	56,00		m	Distância da Cx.		190		m	Q Captação.:		2,300		m3/h				
Serv. Especia			Vazão:	2,467		m3/h	Alt. Manométrica:		75		m	Q / dia:		m3/dia						
SISTEMA EÓLICO / EQUIPAMENTOS																				
TURBINA			GERADOR			ROTOR			SUSTENTAÇÃO											
Marca:	BERGEY		Síncrono:			Diâmetro:			3		m	Tipo:			Torre					
Modelo:	EMWG-1500		Assíncrono:			Material:			Fibra		Mat:			Aço						
Potência:	1500		Wp	Rotação:			500		rpm	Nº de Pás:		3		Altura:			10		m	
Tamanho:	0,8		m			Tensão Saída:			220		V	Veloc.:		12,5		rpm				
Peso:	78		Kg																	
DIJUNTOR			FUSIVEL			CONTROLADOR			INVERSOR											
Marca:	AAB		Tipo:			Marca:			Bergey - Windpower		Tensão:			V						
Fase:	3		Corrente:			A			Modelo:			Corrente:			A					
Corrente:	7,5 a 10		A			Quant.:			m			Potência:		1500		W	Série:			
BOMBA				MOTOR																
Tipo:	Centrífuga		Diâm:	4"		Saída:	1.1/2"		Pol	Marca:		Franklin Electric		Tensão:			230		V	
Marca:	GRUNDFOS		Mat:			Aço inox			Modelo:		2345149204		Corrente:			5		A		
Modelo:	SP		Série:			9428			Potência:		1,1		W	1.1/2		Hp	Série:		338306902	
EQUIP. BOMBEIO	Substituído: Conjunto Moto Bomba Injetora Diesel - Motor Agrale M- 93 Bomba INAPI mod. INB 11 de 7,5 CV																			
	Situação: Semi - novo																			
ACESSÓRIOS PRINCIPAIS (tipo / diâm. / Qt)																				
Lig. Gerador-Controlador:						Lig. Aterram.:														
Lig. Controlador-Inversor:						Haste Aterram.														
Lig. Controlador-Bateria(s)						Cabo de Aço:														
Lig. Circuito Interno:																				
Lig. Sensor de Nível:																				
FOTOS					OBSERVAÇÕES															
					Poço cadastrado pela UFBA nº RAA- 6 O aerogerador foi cedido pelo CEPEL à SEINFRA que solicitou a sua instalação à CERB															
RESP. CERB:			MONTADOR			RESP. EMPRESA														
Nome: Luiz Camelier			Nome: Ivan			Nome: CERB														
Ass.			Ass.			Ass.														

ANEXO II

COMPORTAMENTO DOS VENTOS EM IRECÊ-BA



Fonte: CPTEC/INPE



Fonte : CPTEC/INPE (dados enemométricos)

Tabela: Elaboração própria