



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MENDELEYEV GUERREIRO FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE UNIDADE DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADA POR UM
GERADOR EÓLICO DE PEQUENO PORTE**

**FORTALEZA
2009**

MENDELEYEV GUERREIRO FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE UNIDADE DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADA POR UM
GERADOR EÓLICO DE PEQUENO PORTE**

Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica de potência e acionamentos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

**FORTALEZA
2009**

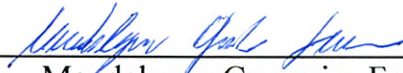
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- F442a Ferreira, Mendeleyev Guerreiro.
Avaliação do rendimento de unidade de bombeamento de água acionada por um gerador eólico de pequeno porte / Mendeleyev Guerreiro Ferreira. – 2009.
93 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2009.
Área de Concentração: Eletrônica de potência e acionamentos.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho
1. Engenharia Elétrica. 2. Força eólica. I. Título.

MENDELEYEV GUERREIRO FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE UNIDADE DE BOMBEAMENTO
DE ÁGUA ACIONADA POR UM GERADOR EÓLICO DE PEQUENO
PORTE**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamentos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.



Mendeleyev Guerreiro Ferreira

Orientador:


Prof. Paulo César Marques de Carvalho, DSc.

Banca Examinadora:


Prof. João Tavares Pinho, DSc.
Prof. Demercil de Souza Oliveira Júnior, Dr.
Prof^ª. Ruth Pastôra Saraiva Leão, PhD.

Fortaleza, 27 de março de 2009

*A Deus,
Aos meus pais,
Aos meus irmãos,
Aos meus Amigos
A minha querida namorada,
Eu dedico esse trabalho.*

*"No fim tudo dá certo, se
não deu certo é porque
ainda não chegou ao fim."*

Fernando Sabino

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me proporcionado mais uma oportunidade de crescimento, pessoal e profissional, além de possibilitado conviver com familiares e amigos maravilhosos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Carvalho, pela orientação e incentivo, o meu muito obrigado.

Aos professores do DEE/UFC, pelos ensinamentos no decorrer do mestrado.

À minha família pelo apoio e amor a mim dedicados.

À minha namorada Maria Cristina pelo incentivo, apoio e paciência.

A todos os amigos da pós-graduação: Mônica Reis, Nelber Ximenez, Rômulo Ramos, Tobias Rafael, Vanessa, Adson, Victor, Danilo Nobre, Rodrigo, Vandilberto, Hermínio. Em especial aos companheiros do Laboratório de Energia Eólica: Lucélia Alves, Beto, Rubens Guerra, Edward Lennon, Hamurabi Bezerra, Francis Mary, Ana Lúcia, Emanuel, Jean Davi, e Adonias pela agradável convivência.

Aos colegas Manuel Rangel, Naira Moro, Levy Costa e Rodolfo Coutinho, pelo apoio e contribuição.

Ao técnico da UFC, Francisco Gadelha e seu filho André pelo apoio e atenção dada à montagem do projeto.

Aos professores da Unifor, Marcus Peixoto e Graça Rufino por todo apoio.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pela bolsa de estudos concedida.

Ao CNPq pelo financiamento da presente pesquisa.

Ferreira, M.G. “Avaliação do rendimento de unidade de bombeamento de água acionada por um aerogerador de pequeno porte”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2009, 93p.

Esta dissertação de mestrado apresenta um sistema para bombeamento de água utilizando um gerador eólico autônomo de pequeno porte, instalado em frente ao açude do Campus da UFC. A potência do gerador é de 1 kW e o mesmo utiliza a tecnologia de ímã permanente garantindo vantagens como: menores perdas no rotor, menor aquecimento e o alcance de maiores rendimentos. Além do gerador eólico, o sistema é composto por um conjunto motor-bomba centrífuga de 0,5 cv de potência, um medidor de vazão, um medidor de pressão, um analisador de energia que registra valores de grandezas elétricas (corrente, tensão, potência), um *datalogger* para coleta de dados e um anemômetro de conchas para medição de vento. O projeto consiste em determinar o rendimento deste sistema para as condições de vento do local da instalação, a partir de dados coletados durante os meses de maio e julho de 2008. Os resultados demonstram que em apenas cerca de 10,97% do total de dias referentes ao mês de maio e cerca de 54,57% do total de dias do mês de julho, o conjunto motor-bomba foi acionado pelo gerador eólico e que os rendimentos globais variam entre 0,41 e 0,74%. Observando os valores de vazão encontrados, quando comparados com a curva característica da bomba utilizada, percebe-se uma sub-utilização da mesma, principalmente no mês de maio.

Palavras-chave: Aerogerador, Bombeamento de água, Sistemas autônomos.

Ferreira, M.G. “Performance evaluation of water pumping unit powered by a small wind turbine”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2009, 93p.

This work presents a system for water pumping using an independent small wind generator, installed in the UFC’s Campus. The generator’s power is 1 kW and uses a permanent magnet technology providing advantages such as: lower losses in the rotor, lower heating and achieving higher yields. Besides the wind generator, the system consists of centrifugal pump-motor assembly 0,5 cv of power, a flow meter, a pressure meter, an energy analyzer that records the electrical data (current, voltage, power), a datalogger for data collection and a shell anemometer for measuring of wind speed. The project consists in determining the performance of this system for the local wind conditions, from data collected during the months of May and July 2008. The results show that in only about 10,97% of total days for the month of May and about 54,57% of the total days of July, the pump-motor was triggered by the wind generator and the global yields ranging between 0,41 to 0,74%. Observing the flow values found when compared with the characteristic curve of the pump used, there is a perceived under-utilization of the same, especially in May.

Keywords: Wind generator, Water pumping, Independent systems.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvi
<i>CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</i>	01
1.1 INTRODUÇÃO.....	01
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	02
1.3 ESCOPO DO TRABALHO.....	03
<i>CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE DA GERAÇÃO EÓLIO-ELÉTRICA.....</i>	04
2.1 INTRODUÇÃO.....	04
2.2 MECANISMOS DE CONTROLE AERODINÂMICO.....	07
2.3 OPERAÇÃO EM VELOCIDADE FIXA E VARIÁVEL.....	10
2.4 AEROGERADORES CONECTADOS À REDE ELÉTRICA.....	12
2.5 PRINCIPAIS FABRICANTES DE TURBINAS EÓLICAS DE GRANDE PORTE.....	19
2.6 GERADORES EÓLICOS DE PEQUENO PORTE.....	20
<i>CAPÍTULO 3 – AEROGERADOR COM MÁQUINA DE ÍMÃ PERMANENTE.....</i>	28
3.1 INTRODUÇÃO.....	28
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	29
3.3 ESTABILIDADE TÉRMICA.....	39
3.4 TOPOLOGIAS EXISTENTES.....	39
<i>CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO POR AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE.....</i>	44
4.1 EXPERIÊNCIAS MUNDIAIS DE UNIDADES DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADAS POR ENERGIA EÓLICA.....	44
4.2 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO.....	44
4.2.1 BOMBA CENTRÍFUGA.....	50
4.2.2 GERADOR EÓLICO DE IMÃ PERMANENTE.....	53
4.2.3 ANALISADOR DE ENERGIA.....	57

4.2.4 DIAGRAMAS DE LIGAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS AO PAINEL TRASEIRO DO ANALISADOR.....	60
4.2.5 CONTROLADOR DE CARGA.....	60
4.2.6 TORRE UTILIZADA.....	61
4.2.7 MEDIDOR DE VAZÃO.....	63
4.2.8 MEDIDOR DE PRESSÃO.....	64
4.2.9 ANEMÔMETRO.....	66
4.2.10 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DATALOGGER).....	68
4.2.11 PROGRAMAÇÃO DOS SENSORES.....	70
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	73
5.1 CONDIÇÕES DE PROJETO.....	73
5.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	74
5.3 DADOS COLETADOS NO MÊS DE MAIO/2008.....	76
5.4 DADOS COLETADOS NO MÊS DE JULHO/2008.....	80
5.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS MESES DE MAIO E JULHO/2008.....	83
5.6 RENDIMENTO DO CONJUNTO MOTOR-BOMBA.....	85
5.7 RENDIMENTOS REFERENTES AO MÊS DE MAIO/2008.....	86
5.8 RENDIMENTOS REFERENTES AO MÊS DE JULHO/2008.....	86
5.9 COMENTÁRIOS SOBRE OS RENDIMENTOS.....	87
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	88
6.1 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxo aderente ao perfil.....	09
Figura 2.2 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle de passo.....	10
Figura 2.3 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil.....	10
Figura 2.4 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle estol.....	11
Figura 2.5 - Configurações de aerogeradores operando nas velocidades fixa e variável.....	13
Figura 2.6 - Configurações de aerogeradores operando no modo síncrono e assíncrono.....	15
Figura 2.7 - Configuração de gerador eólico com gerenciamento da carga.....	25
Figura 2.8 - Configuração de gerador eólico de indução no modo autônomo via banco de capacitores.....	26
Figura 3.1 - Divisão de pólos em pequenas parcelas.....	31
Figura 3.2 - Cristal de ferro magnetizado após aplicação de campo magnético externo.....	31
Figura 3.3 - Um condutor envolvido por uma corrente i	31
Figura 3.4 - Estrutura de grade cúbica do ferro.....	33
Figura 3.5 - Rotação de M_{sat} por um eixo preferencial devido aplicação de um campo H	34
Figura 3.6 - Característica intrínseca de magnetização para um volume elementar de ímã.....	36
Figura 3.7 - Característica da curva B versus H para o ímã.....	36
Figura 3.8 - Ciclo de histerese.....	37
Figura 3.9 - Ciclo de histerese para materiais duros e macios.....	37
Figura 3.10 - Curvas de magnetização.....	38
Figura 3.11 - Produto máximo de energia.....	38
Figura 3.12 - Máquina PM de fluxo-radial com rotor-interno.....	39
Figura 3.13 - Máquina PM de fluxo-radial com rotor-externo.....	40
Figura 3.14 - Máquina PM de fluxo-axial com duplo estator.....	41
Figura 3.15 - Máquina PM de fluxo-axial com estator de balanceamento.....	42
Figura 3.16 - Máquina PM de fluxo axial com enrolamento toroidal.....	43
Figura 4.1 - Conjunto motor-bomba.....	51
Figura 4.2 - Curva característica do conjunto motor-bomba.....	52
Figura 4.3 - Curva de potência do aerogerador utilizado.....	54
Figura 4.4 - Corte no rotor da máquina toroidal de ímã permanente.....	54
Figura 4.5 - Gerador eólico de ímã permanente utilizado no experimento.....	55

Figura 4.6 - Painel frontal do analisador de energia.....	57
Figura 4.7 - Botões do painel frontal.....	58
Figura 4.8 - Descrição do painel traseiro.....	59
Figura 4.9 - Diagrama de ligação entre o aerogerador e o conjunto motor-bomba.....	60
Figura 4.10 - Painel frontal do controlador de carga.....	61
Figura 4.11 - Sistema de roldanas para erguer o gerador ao topo da torre.....	62
Figura 4.12 - Torre de sustentação do gerador eólico.....	62
Figura 4.13 - Sensor de vazão.....	63
Figura 4.14 - Relações entre as pressões.....	65
Figura 4.15 - Transmissor de pressão.....	65
Figura 4.16 - Anemômetro de conchas.....	66
Figura 4.17 - Anemômetro de conchas utilizado.....	66
Figura 4.18 - Datalogger utilizado no projeto.....	67
Figura 4.19 - Painel de entradas do Datalogger.....	69
Figura 4.20 - Diagrama de ligação ao Datalogger.....	70
Figura 5.1 - Distribuição da velocidade do vento (maio/2008).....	76
Figura 5.2 - Distribuição da potência eólica (maio/2008).....	77
Figura 5.3 - Distribuição da potência elétrica (maio/2008).....	78
Figura 5.4 - Distribuição da vazão ao longo do período (maio/2008).....	79
Figura 5.5 - Curvas obtidas pelo datalogger (dados brutos em maio/2008).....	79
Figura 5.6 - Distribuição da velocidade dos ventos (julho/2008).....	80
Figura 5.7 - Distribuição da potência eólica (julho/2008).....	81
Figura 5.8 - Distribuição da potência elétrica gerada (julho/2008).....	82
Figura 5.9 - Distribuição da vazão ao longo do período (julho/2008).....	82
Figura 5.10 - Curvas obtidas pelo datalogger (dados brutos em julho/2008).....	83
Figura 5.11 - Distribuição da frequência da velocidade do vento (maio/2008).....	84
Figura 5.12 - Distribuição da frequência da velocidade do vento (julho/2008).....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Crescimento da utilização da energia eólica a nível mundial.....	05
Tabela 2.2 - Potência acumulada em vários países líderes no uso eólico.....	06
Tabela 2.3 - Parques eólicos no Brasil.....	07
Tabela 2.4 - Participação nacional dos estados.....	08
Tabela 2.5 - Principais fabricantes de turbinas eólicas de grande porte.....	20
Tabela 2.6 - Maiores participações em 2006.....	21
Tabela 2.7 - Principais fabricantes de aerogeradores de pequeno porte.....	23
Tabela 3.1 - Características magnéticas dos principais ímãs permanentes.....	29
Tabela 3.2 - Permeabilidade dos materiais magnéticos.....	30
Tabela 4.1 - Principais características da bomba.....	52
Tabela 4.2 - Características do aerogerador utilizado.....	53
Tabela 5.1 - Comparação dos resultados obtidos.....	84

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

AEEE: Associação Européia de Energia Eólica

AMT: Altura manométrica total

A: Ampére

AC: Corrente Alternada

cv: cavalo vapor

CBEE: Centro Brasileiro de Energia Eólica

CRESESB: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

DC: Corrente contínua

DFIG: *Doubly Fed Induction Generator*

GA: Geradores Assíncronos

GTZ:

GS: Geradores Síncronos

gpm: galões por minuto

gph: galões por hora

Hz: Hertz

IEA: *International Energy Agency*

IGBT: *Insulated Gate Bipolar Transistor*

kgf/cm²: quilograma-força por centímetro quadrado

kgf/m²: quilograma-força por metro quadrado

kW: Kilo Watts

l/h: litros por hora

l/min: litros por minuto

lb/pol²: libras por polegada quadrada

l/s: litros por segundo

MME: Ministério de Minas e Energia

MMF: Força Magnetomotriz

MW: Mega Watts

mca: metros de coluna de água

m³/h: metros cúbicos por hora

m/s: metros por segundo

mmHg: milímetros de coluna de mercúrio

NdFeB: Neodímio-Ferro-Boro

OSIG: *OptiSlip Induction Generator*

PM: *Permanent Magnet*

PMSG: *Permanent Magnet Synchronous Generator*

PROINFA: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia

rot/min: rotações por minuto

SCIG: *Squirrel Cage Induction Generator*

V: Volts

WRIG: *Wound Rotor Induction Generator*

WRSG: *Wound Rotor Synchronous Generator*

LISTA DE SÍMBOLOS

A : Área do condutor

B : Campo magnético externo

B_r : Densidade de fluxo remanescente

$BH_{m\acute{a}x}$: Densidade máxima de energia

$^{\circ}\text{C}$: Temperatura em Celcius

d : diâmetro do condutor

E : Trabalho realizado pelo momento de dipólo magnético

E_k : Energia requerida para a rotação dos dipolos

E_f : Energia do campo aplicada por unidade de volume

f : Frequência elétrica

g : Aceleração da gravidade

H : Força Magnetizante

H_{ci} : Coercitividade intrínseca do material

h : Altura em relação a um referencial

H_c : Coercitividade

i : Corrente percorrendo um condutor

kA/m: Kilo ampére por metro

K_1 : Constante cristalográfica

m : metros

M : Magnetização

M_{sat} : Saturação da magnetização

n : Velocidade de rotação mecânica

p : Número de pólos da máquina

μ : Permeabilidade do material

μ_m : Momento de dipolo magnético

μ_0 : Permeabilidade do vácuo

μ_r : Permeabilidade relativa

r : resistência elétrica

s : Escorregamento do gerador

T : Torque eletromecânico

v : velocidade do fluido ao longo do conduto

w : velocidade angular

ρ : Densidade do fluido

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O propósito deste capítulo é contextualizar a geração eólico-elétrica no cenário mundial, conhecer os principais países envolvidos, mostrar a importância da sua utilização dentro do setor energético nacional, informar suas vantagens e benefícios, apresentar o objetivo do trabalho e o escopo desta dissertação.

1.1 Introdução

A energia eólica vem se destacando cada vez mais no setor energético nacional e em vários outros países por ser uma fonte geradora de energia limpa e renovável. Sua participação no mercado mundial aumentou significativamente e vem sendo utilizada em larga escala no mundo. Na última década, sua evolução demonstra sua aceitação como fonte para geração de energia elétrica, com tendências de crescimento expressivo relativamente às matrizes energéticas dos países que a utilizam. A maioria dos projetos está localizada na Alemanha, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos e Índia. Os avanços tecnológicos dos últimos sete anos tem colocado a energia eólica em posição de competir, em um futuro próximo, com as tecnologias de geração de energia convencionais.

A produção de energia limpa será um grande impulsor da energia eólica, pois quando comparada à mesma quantidade de energia produzida por uma fonte que utiliza combustível fóssil, a redução da emissão de gás carbônico é total. Com a ratificação do Protocolo de Kyoto, a geração de energia por fonte eólica poderá se beneficiar fortemente com a emissão dos certificados de carbono, cujos valores poderão ser expressivos, contribuindo assim para melhorar o rendimento econômico dos projetos eólicos.

A grande maioria dos geradores eólicos em operação nacional são de médio e grande porte (potências acima 500 kW) e conectados à rede elétrica para atender um possível aumento de demanda nas grandes cidades. Uma opção que pode ser bastante utilizada é em relação à complementaridade entre a geração hidrelétrica e a eólica, visto que o melhor

período para um maior potencial eólico ocorre no período de menor disponibilidade hídrica. Isso deixaria a matriz energética nacional mais confiável e com redução de riscos de apagões.

Outro mercado promissor está ligado à utilização de geradores eólicos de pequeno porte autônomos para fornecimento de energia a pequenas residências. Esses tipos de geradores são praticamente todos importados, oriundos principalmente de países europeus, garantindo, por enquanto, o domínio desse tipo de aplicação, deixando o desafio para empresas brasileiras em competir neste mercado. O maior interesse no uso dos geradores eólicos de pequeno porte está ligado ao bombeamento de água, carregamento de baterias e o suprimento de pequenas cargas.

Entre os diversos tipos de geradores eólicos de pequeno porte existentes, destaca-se o de ímã permanente. Geradores eólicos de ímã permanente (PM - *Permanent Magnet*) têm a vantagem da alta eficiência e da confiabilidade, pois o rotor não necessita de excitação externa, garantindo a redução das perdas da máquina. Com a utilização dos materiais a ímã permanente a construção dos aerogeradores de pequeno porte foi simplificada, pois novos modelos de rotores foram desenvolvidos com características de baixa perda e fácil resfriamento devido a não existência de enrolamentos e excitação de campo.

Materiais ferromagnéticos como o Neodímio ou a liga Nd-Fe-B (Neodímio-Ferro-Boro) sustentam a magnetização da máquina após um campo magnético externo ser removido. Essa propriedade forma a base para as aplicações técnicas dos ímãs permanentes.

1.2 Objetivo do trabalho

Os aerogeradores de pequeno porte podem ser utilizados em diversas aplicações como, por exemplo, em bombeamento de água e carregamento de baterias. O presente trabalho mostra uma aplicação de um sistema de bombeamento de água alimentado por um aerogerador autônomo que utiliza uma máquina de ímã permanente de 1 kW. O sistema de bombeamento foi montado e instalado no campus da Universidade Federal do Ceará, próximo ao açude.

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Obter o percentual de operação do sistema no período de testes;
- Identificar o rendimento do sistema de bombeamento de água.

1.3 Escopo do trabalho

O capítulo 2 mostra um resumo sobre a utilização atual da energia eólica a nível mundial, descrevendo também as principais aplicações e características de geradores de pequeno e grande porte.

O capítulo 3 aborda as principais topologias de geradores eólicos de ímã permanente e seus aspectos construtivos, mostrando também os tipos de materiais magnéticos mais utilizados e um resumo sobre as propriedades magnéticas dos ímãs permanentes.

O capítulo 4 descreve os equipamentos utilizados no sistema de bombeamento de água a partir de um gerador eólico de ímã permanente no modo autônomo, assim como as ligações e instalações realizadas.

O capítulo 5 apresenta os dados coletados do experimento durante o período de dois meses, os resultados obtidos e um resumo sobre as dificuldades encontradas durante o projeto.

O capítulo 6 descreve as conclusões obtidas a partir dos dados coletados do experimento e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE DA GERAÇÃO EÓLIO-ELÉTRICA

O propósito deste capítulo é mostrar o crescimento da utilização da energia eólica em nível nacional e internacional, ver os principais fabricantes de geradores eólicos envolvidos, conhecer as principais topologias existentes, o modo de operação dos aerogeradores de pequeno e grande porte, como também suas aplicações.

2.1 Introdução

A energia dos ventos é uma fonte abundante de energia renovável, limpa e disponível. A utilização desta fonte energética para a geração de energia elétrica, em escala comercial, teve início há pouco mais de trinta anos, e na atualidade percebe-se o rápido crescimento de sua utilização nas matrizes energéticas de vários países.

Existem atualmente mais de 30.000 aerogeradores de grande porte em operação no mundo. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2002), em 1990, a capacidade instalada no mundo era inferior a 2.000 MW. Em 1994 ela subiu para 3.734 MW, divididos entre Europa (45,1%), América (48,4%), Ásia (6,4%) e outros países (1,1%). Quatro anos mais tarde, chegou a 10.000 MW e, no final de 2002, a capacidade instalada no mundo já era superior a 32.000 MW.

Até o final de 2008, a soma da energia gerada utilizando os ventos como fonte primária já atingiu cerca de 260 TWh, suprimindo praticamente de 1,5% da demanda de energia mundial (WWEA, 2009). A potência instalada mundial teve um aumento de aproximadamente 30% entre os anos de 2007 e 2008, já atingindo a marca de 121.188 MW no fim de 2008.

Nos últimos 12 anos, os ventos têm sido a fonte primária de energia elétrica de maior ritmo de expansão no mundo, apresentando incremento exponencial da potência instalada. Entre 1990 e 2008, a geração eólica cresceu à taxa média de 27% ao ano, alcançando 121.188 MW dos quais mais de 54% instalados na Europa e o restante concentrado na América do Norte e em alguns países da Ásia (EPE, 2009).

Também na Ásia, observa-se forte expansão da geração eólica, concentrada na Índia e na China, países que, rapidamente, por meio da aquisição de tecnologia ou de associações com fabricantes europeus e norte-americanos, desenvolveram a indústria de aerogeradores, enquanto que na América Latina e África o uso dessa fonte energética é ainda incipiente.

Esse crescimento fez com que a Associação Européia de Energia Eólica (AEEE) estabelecesse novas metas, indicando que até 2020 a energia eólica poderá suprir 10% de toda a energia elétrica requerida no mundo (PEREIRA, 2004). A tabela 2.1 mostra o crescimento da utilização de energia eólica em todo mundo, entre os anos 2000 e 2008. Podem-se destacar os anos de 2001 e 2005 onde obtiveram os maiores crescimentos percentuais em potência instalada.

Tabela 2.1 - Crescimento da utilização da energia eólica a nível mundial.

Ano	Potência Instalada (MW)	Crescimento (%)	Potência Acumulada (MW)	Crescimento (%)
2000	4.495	15	18.449	32
2001	6.824	52	24.927	35
2002	7.227	6	32.037	29
2003	8.344	15,5	40.301	25,8
2004	8.154	-2,3	48.000	19,1
2005	11.407	40	60.000	25
2006	15.016	31,6	74.300	23,8
2007	20.076	33,7	94.000	26,5
2008	27.261	35,8	121.188	30

Fonte: (CAMERON, 2007), (MILFORD, 2008) e (EPE, 2009).

De fato, em alguns países e regiões, a energia eólica já representa uma parcela considerável da eletricidade produzida. Na Dinamarca, por exemplo, a energia eólica representa 13% de toda a eletricidade gerada, no norte da Alemanha (região de Schleswig Holstein) a contribuição eólica já passou de 16% e a União Européia tem como meta gerar 10% de toda eletricidade a partir dos ventos até 2030 (CBEE, 2007).

A Alemanha, que até 2007 se destacava como o país detentor da maior potência instalada em centrais eólicas no mundo, com 22.227 MW, foi superada pelos Estados Unidos. A Dinamarca e a Espanha detêm os maiores índices de participação eólica no parque gerador, 22% e 12% respectivamente. Já os Estados Unidos, pelo quarto ano consecutivo, a China e a

Índia lideraram a expansão em 2008 (WWEA, 2009). A tabela 2.2 mostra a potência instalada até o final do ano de 2008 e o incremento de potência entre os anos de 2007 e 2008, para os principais países em relação ao uso da energia eólica.

Tabela 2.2 – Adições de potência e capacidade instalada em 2008

País	Potência (MW)	
	Incremento	Instalada
EUA	8.358	25.170
China	6.300	12.210
Índia	1.800	9.645
Alemanha	1.665	23.903
Espanha	1.609	16.754
Itália	1.010	3.736
França	950	3.404
Reino Unido	836	3.241
Portugal	712	2.862
Canadá	523	2.369
Restante do mundo	3.293	17.497

Fonte: (CAMERON, 2007) e (MILFORD, 2008)

A participação da energia eólica na geração de energia elétrica no Brasil ainda é muito pequena. Em 2003 havia apenas 6 centrais eólicas em operação no País, totalizando uma capacidade instalada de 22.075 kW. Entre essas centrais destacavam-se Taíba e Prainha localizadas no estado do Ceará, que representavam 68% do parque eólico nacional. No entanto, com os incentivos vigentes do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) para o setor elétrico brasileiro, houve um aumento do interesse de empreendedores, fazendo com que até o final de 2008 o sistema elétrico brasileiro já contasse com 31 usinas eólicas totalizando uma potência instalada de 359 MW. A tabela 2.3 mostra os principais parques eólicos no Brasil, como também, suas localizações, fabricantes, potência instalada.

Tabela 2.3 – Parques Eólicos no Brasil

Usina	Potência Outorgada (kW)	Proprietário	Município
Prainha	10.000	Wobben Wind Power	Aquiraz - CE
Taíba	6.200	Wobben Wind Power	São Gonçalo do Amarante - CE
Mucuripe	2.400	Wobben Wind Power	Fortaleza - CE
Praia da Morgado	28.800	Impsa Wind	Acaraú - CE
Volta do Rio	42.000	Impsa Wind	Acaraú - CE
Parajuru	28.800	Impsa Wind	Beberibe - CE
Beberibe	25.600	Eco Energy Beberibe Ltda	Beberibe - CE
Canoa Quebrada	57.000	Bons Ventos Geradora de Energia S.A	Aracati - CE
Taíba-Albatroz	31.500	Bons Ventos Geradora de Energia S.A	São Gonçalo do Amarante - CE
Enacel	50.000	Bons Ventos Geradora de Energia S.A	Aracati - CE
Bons Ventos	16.500	Bons Ventos Geradora de Energia S.A	Aracati - CE
Foz do Rio Choró	25.200	SIIF Énergies do Brasil Ltda	Beberibe - CE
Praia Formosa	104.400	SIIF Énergies do Brasil Ltda	Camocim - CE
Paracuru	23.400	SIIF Énergies do Brasil Ltda	Paracuru - CE
Icaraizinho	54.000	SIIF Énergies do Brasil Ltda	Amontada - CE
Lagoa do Mato	3.230	Rosa dos Ventos Geração de Energia S.A	Aracati - CE
Canoa Quebrada	10.500	Rosa dos Ventos Geração de Energia S.A	Aracati - CE
Pedra do Sal	18.000	Tractebel Energia	Parnaíba - PI
Morro do Camelinho	1.000	CEMIG	Gouveia - MG
Palmas	2.500	Centrais Eólicas do Paraná LTDA	Palmas - PR
Fernando de Noronha	225	Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/UFPE	Fernando de Noronha - PE
Rio do Fogo	49.300	Energias Renováveis do Brasil S/A	Rio do Fogo - RN
Bom Jardim	600	Parque Eólico de Santa Catarina LTDA	Bom Jardim da Serra - SC
Olinda	225	Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/UFPE	Olinda - PE
Horizonte	4.800	Central Nacional de Energia Eólica LTDA	Água Doce - SC
Macau	3000	Petróleo Brasileiro S/A	Macau - RN
Água Doce	9.000	Central Nacional de Energia Eólica LTDA	Água Doce - SC
Osório	50.000	Ventos do Sul Energias S/A	Osório - RS
Sangradouro	50.000	Ventos do Sul Energias S/A	Osório - RS
Índios	50.000	Ventos do Sul Energias S/A	Osório - RS
Millennium	10.200	SPE Millennium Central Geradora Eólica S/A	Mataraca - PB

Fonte: www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil e www.seinfra.ce.gov.br

Ressaltando na tabela 2.3 que os três parques da Impsa: Praia do Morgado, Volta do Rio, Parajuru, como também os três parques da Bons Ventos: Canoa Quebrada, Enacel, Bons

Ventos e os dois parques da SIIF Énergies: Praia Formosa e Icaraizinho, estão previstos para entrada em operação em 2009 e 2010. Além disso, cerca de 50 projetos, perfazendo da ordem de 2.400MW, mas que ainda não iniciaram sua construção, foram outorgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (EPE, 2009).

Apesar do custo médio da geração eólica ainda se mostrar elevado para viabilizar sua participação em bases concorrenciais no atendimento ao crescimento da demanda de energia elétrica no Brasil, o cadastramento de empreendimentos eólicos nos leilões LEN A-3 e A-5 de 2008 mostra que há efetivo interesse por parte dos investidores.

A tabela 2.4 mostra que o estado do Ceará teve a maior participação entre os estados em relação a projetos, assim como em potência instalada.

Tabela 2.4 – Participação nacional dos estados (PROINFA).

Estado	Número de Projetos Outorgados	Potência (MW)	Participação (%)
Ceará	14	500,53	36,24
Piauí	1	17,95	1,3
Pernambuco	5	21,25	1,54
Rio G. do Norte	3	165	11,95
Rio G. do Sul	5	227,562	16,48
Santa Catarina	11	226,73	16,42
Paraíba	13	59,15	4,28
Rio de Janeiro	2	163,05	11,8
TOTAL	54	1.381,22	100

Fonte: (SEINFRA, 2008)

A capacidade instalada no Brasil até o final de 2008 é de 359 MW, com aerogeradores de médio e grande porte conectados à rede elétrica. Além disso, existem dezenas de aerogeradores de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para diversas aplicações como bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural (CBEE, 2007). Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação dos aerogeradores, etc.) têm reduzido o custo e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. A seguir são abordadas algumas dessas características além de conhecer os tipos de aerogeradores.

2.2 Mecanismos de Controle Aerodinâmico

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração da potência nominal do aerogerador. Estes mecanismos são chamados de controle por estol (*stall*) e controle de passo (*pitch*). No passado, a maioria dos aerogeradores utilizava o controle estol simples. Atualmente, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão optando pelo sistema de controle de passo que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas. A seguir é mostrado o princípio de funcionamento de cada um.

a) Controle de passo (*pitch*)

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do controlador do sistema. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal; em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência. Para todas as velocidades do vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que a turbina produza apenas a potência nominal. Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície, produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto, como pode ser visto na figura 2.1 (CRESESB, 2007).

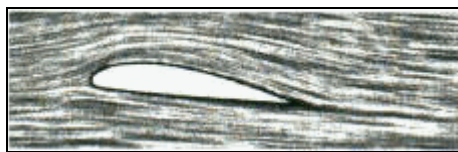


Figura 2.1- Fluxo aderente ao perfil.
Fonte: CRESESB

Aerogeradores que possuem controle de passo possuem as seguintes vantagens:

- Permitem controle de potência ativa sob todas as condições de vento e também sob potências parciais;
- Alcançam potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas);

- Maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá);
- Partida simples do rotor pela mudança do passo;
- Fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor.

A figura 2.2 mostra o comportamento da potência gerada com a variação da velocidade do vento utilizando o controle de passo (*pitch*).

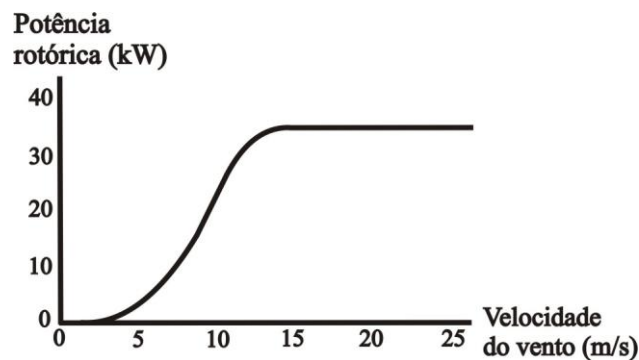


Figura 2.2 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle de passo.

b) Controle por Estol (*stall*)

O controle por estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá (estol), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto, como visto na figura 2.3. Menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito (CRESESB, 2007).



Figura 2.3 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil.

Fonte: (CRESESB, 2007)

Turbinas com controle por estol são mais simples do que as de controle de passo porque elas não necessitam de um sistema de mudança de passo. Os aerogeradores com controle estol, em comparação com os aerogeradores com controle de passo possuem, em princípio, as seguintes vantagens: inexistência de sistema de controle de passo, simples estrutura de sustentação do rotor da turbina, menor manutenção devido a um número menor de peças móveis (STEPHAN, 2003).

Em termos mundiais, o conceito de controle através de estol domina. A maioria dos fabricantes utiliza esta possibilidade simples de controle de potência, que sempre necessita de uma velocidade constante do rotor, geralmente dada pelo gerador de indução diretamente acoplado à rede. Mais recentemente surgiu uma concepção que mistura os mecanismos de controle por estol e de passo (denominada "estol ativo"). Neste caso, o passo da pá do rotor gira na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento (menor sustentação), como é feito em sistemas de passo normais. As vantagens deste sistema são: a necessidade reduzida nas mudanças do ângulo do passo, a possibilidade de controle da potência sob condições de potência parcial (baixas velocidades de vento), posição de embandeiramento das pás do rotor para pequenas cargas em situação de altas velocidades de vento (CRESESB, 2007).

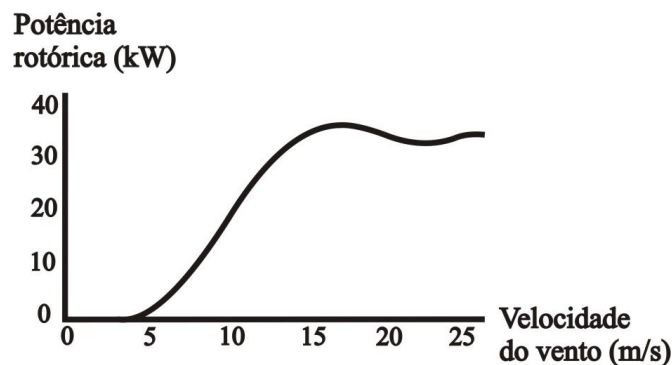


Figura 2.4 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle por estol.

A figura 2.4 mostra o comportamento da potência gerada com a variação da velocidade do vento utilizando o controle de estol (*stall*).

2.3 Operação com Velocidade Fixa e Variável

As turbinas eólicas podem operar com uma velocidade fixa ou variável. Na década de noventa praticamente todas as turbinas eólicas instaladas operavam com velocidade fixa, hoje a tecnologia de velocidade variável tem se tornado dominante entre as turbinas eólicas

instaladas. No sistema com a tecnologia de velocidade fixa são utilizados geradores assíncronos conectados diretamente à rede, utilizando um sistema de partida e um banco de capacitores, para reduzir a compensação de potência reativa (STEPHAN, 2003).

As turbinas eólicas que operam em velocidade fixa possuem vantagens como: simples construção, baixo custo e confiabilidade. O sistema também possui algumas desvantagens tais como: consumo de potência reativa não controlável, estresse mecânico e controle da qualidade de potência limitada.

Turbinas eólicas operando em velocidade variável são projetadas para alcançar uma eficiência máxima da aerodinâmica sobre uma larga faixa de velocidades do vento. Com esse tipo de operação tem se tornado possível adaptar (acelerar ou desacelerar) continuamente a velocidade rotacional ω da turbina eólica para determinadas velocidades de vento (STEPHAN, 2003). Ao contrário dos sistemas que operam com velocidade fixa, sistemas com velocidade variável mantêm o torque do gerador praticamente constante e as variações de velocidade do vento são absorvidas por mudanças na velocidade do gerador.

Turbinas de velocidade variável podem ser equipadas com geradores assíncronos ou síncronos conectados à rede através de um conversor de potência. As vantagens de operar no modo de velocidade variável são: aumento da energia capturada, a melhora da qualidade de potência e redução do estresse mecânico na turbina eólica. Suas desvantagens são: perdas nos conversores, aumento do uso e do custo dos equipamentos eletrônicos devido aos conversores de potência (STEPHAN, 2003).

A figura 2.5 mostra as principais configurações de aerogeradores que operam em velocidade fixa e variável ligados à rede elétrica. Pode-se observar que na operação de turbinas com velocidade fixa é utilizado apenas o gerador de indução de gaiola de esquilo (SCIG) devido a ele não possuir enrolamentos rotóricos que são utilizados principalmente no controle de velocidade, enquanto que na operação em velocidade variável podem ser utilizadas várias topologias de aerogeradores dependendo da aplicação. Essas topologias podem ser: WRIG (Geradores assíncronos de rotor bobinado), WRSG (Geradores síncronos de rotor bobinado), DFIG (Geradores assíncronos de dupla alimentação), PMSG (Geradores síncronos de ímã permanente). Pode-se destacar também na figura 2.5 que para a conexão à rede elétrica, utiliza-se tanto chaves de partida quanto conversores de frequência e que os conversores podem ser aplicados para potência gerada total ou potência parcial, sendo o custo da implantação o diferencial na escolha.

Para os diversos aerogeradores, existe uma clara tendência em direção aos conceitos de velocidade variável. Tudo depende dos dispositivos oriundos da eletrônica de potência, como

os conversores de frequência, que permitem aos geradores operarem com velocidades variáveis, e, portanto, produzir potência na frequência variável para ser conectado à frequência fixa da rede.

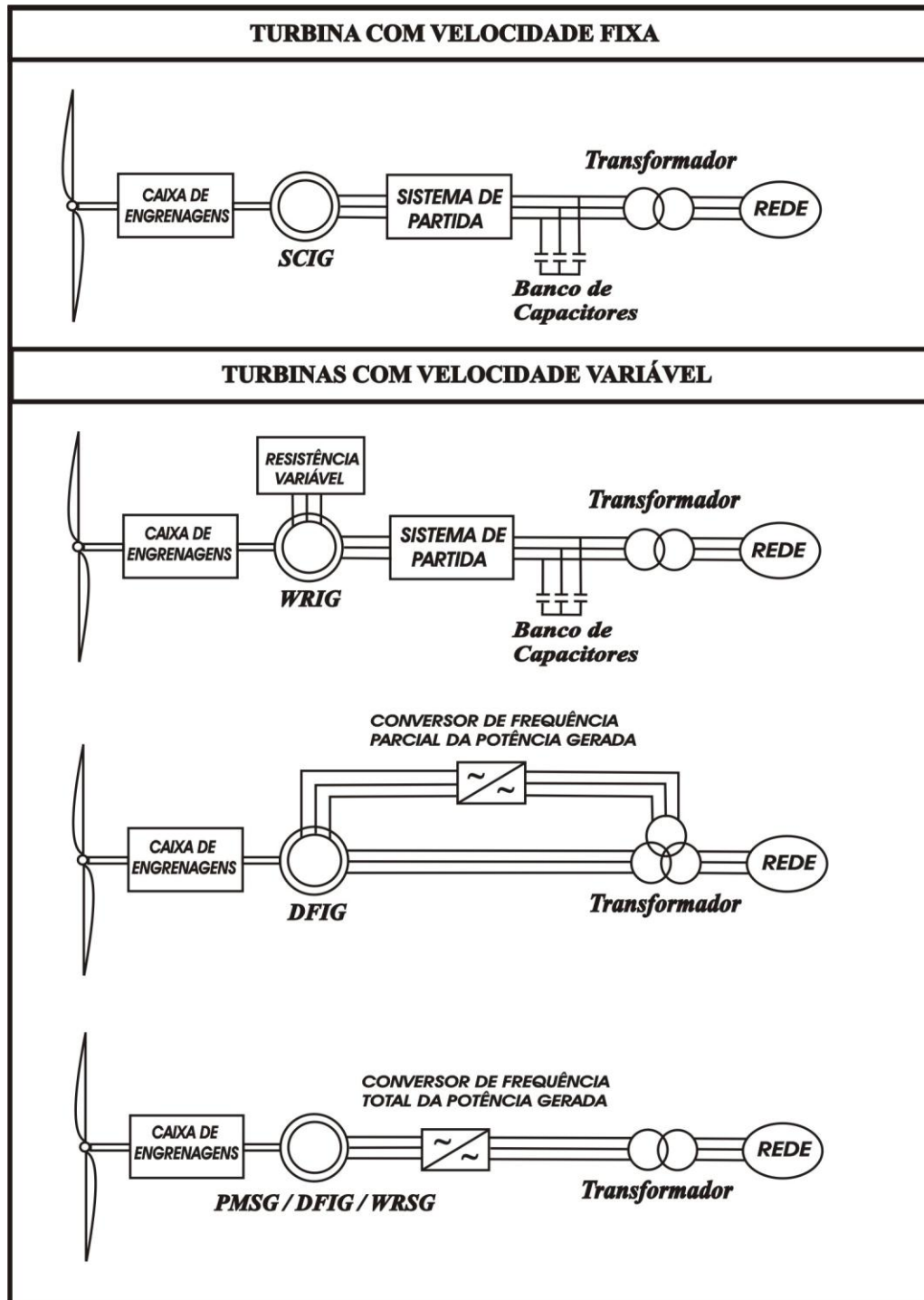


Figura 2.5 – Configurações de aerogeradores operando com velocidades fixa e variável.
FONTE: (HEIER, 2005)

2.4 Aero geradores Conectados à Rede Elétrica

Os aerogeradores de grande porte possuem diversas maneiras de transformar a energia dos ventos em energia elétrica. A maioria dos aerogeradores utiliza máquinas de indução e síncronas, sendo estas divididas em outras topologias específicas, como visto na figura 2.6. Os geradores de indução ou assíncronos podem ser divididos em:

- Gerador de Indução Gaiola de Esquilo (SCIG - *Squirrel Cage Induction Generator*);
- Gerador de Indução de Rotor Bobinado (WRIG - *Wound Rotor Induction Generator*).

Já os geradores síncronos são divididos em:

- Gerador Síncrono com Rotor Bobinado (WRSG - *Wound Rotor Synchronous Generator*);
- Geradores Síncronos com Excitação a Ímã Permanente (PMSG – *Permanent Magnet Synchronous Generator*).

Através da figura 2.5 percebe-se que nas configurações que utilizam geradores assíncronos com rotor curto-circuitado, há a predominância da utilização de caixas de engrenagens e de conversores de frequência ligadas ao estator da máquina para a conexão à rede elétrica. Já as configurações de geradores assíncronos com anéis de escorregamento, possuem controles para a potência reativa gerada ou consumida tornando-se esse tipo de configuração mais cara.

Nas configurações que utilizam geradores síncronos a excitação pode ser feita através de enrolamentos de campo ou utilizando-se ímãs permanentes. Nos sistemas que são excitados através de enrolamentos de campo podem ser realizados diversos tipos de controle de potência reativa e de velocidade, tornando-os mais complexos. A maioria de suas aplicações usam caixas de engrenagens. As topologias com excitação permanente não provêm de sistemas complexos de controle e nem de caixas de engrenagens, tornando-as mais simples, como também, possuem maior eficiência por não possuir enrolamentos de campo comparados às máquinas com excitação externa. Uma desvantagem deste tipo de máquina é seu custo, pois o valor dos ímãs ainda é relativamente alto. A seguir será feito um breve comentário sobre as diversas topologias.

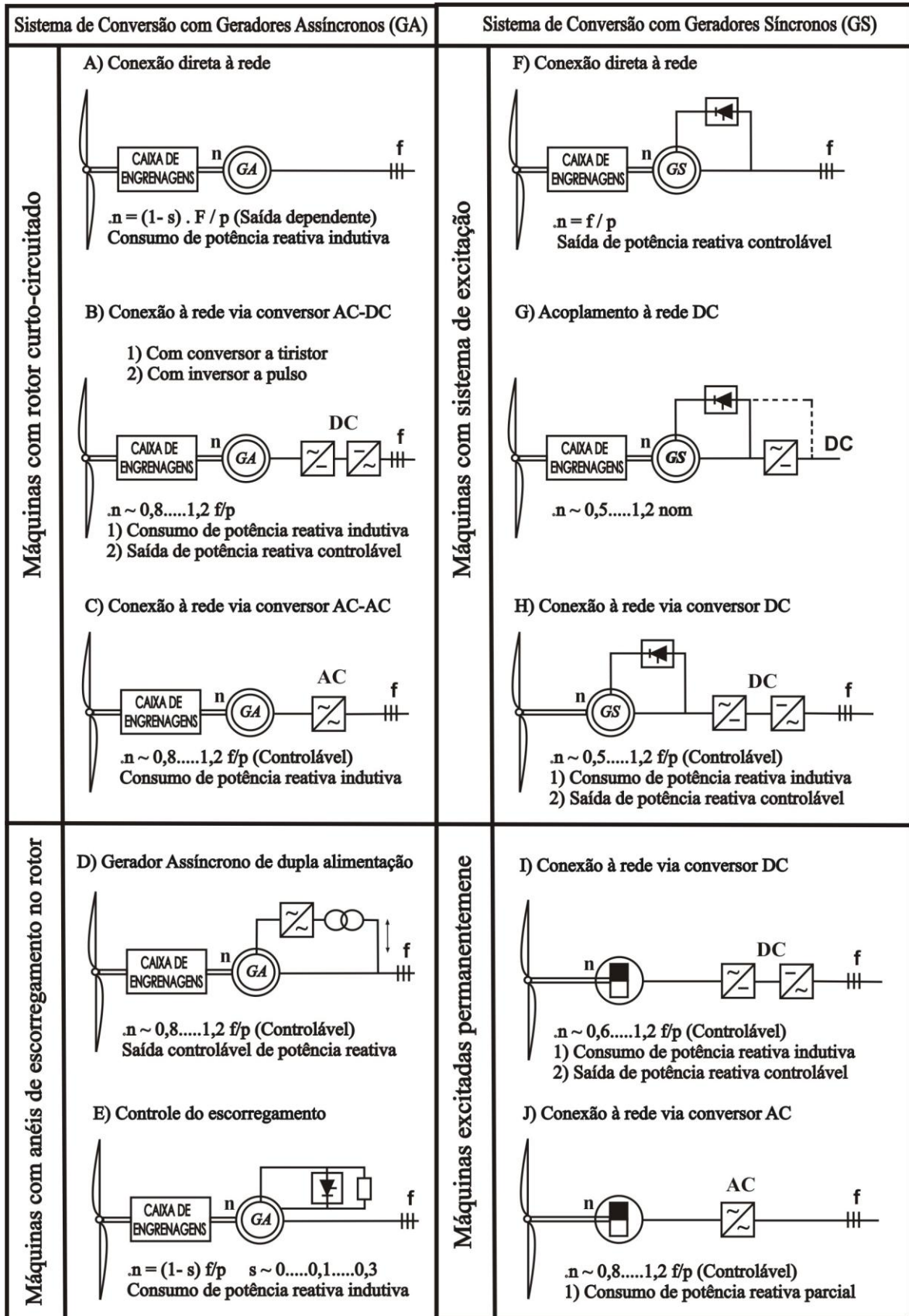


Figura 2.6 – Configurações de aerogeradores operando nos modos síncrono e assíncrono.

Fonte: (HEIER, 1998)

a) Geradores Assíncronos

O gerador mais utilizado em aerogeradores é o de indução ou assíncrono. Uma máquina assíncrona é simples e robusta sendo considerada a mais confiável máquina elétrica, é mais barata e tem larga história nessas aplicações. Referindo-se ao número de turbinas operando, o conceito da velocidade fixa, utilizando geradores assíncronos conectados diretamente à rede, é ainda muito usado. Em 1997, mais de 80% da potência eólica instalada no mundo pertencia a essa categoria (STEPHAN, 2003). Esse sistema de geração possui as seguintes desvantagens: engrenagem absolutamente necessária (manutenção, barulho e perdas), operação com velocidade fixa (dificilmente compatível com turbinas eólicas com controle de passo), flutuação de torque devido à velocidade fixa (altas cargas na unidade de engrenagens), flutuação na tensão de saída (*flicker* ou cintilação), máquinas de indução necessitam de potência reativa.

O rotor de um gerador de indução pode ser dividido em dois tipos: rotor de curto circuito ou gaiola de esquilo e o de rotor bobinado. A seguir será feito um comentário sobre a utilização desses dois rotores em aerogeradores.

a.1) Gerador de Indução Gaiola de Esquilo (SCIG - *Squirrel Cage Induction Generator*)

Este tipo de gerador tem sido o mais escolhido entre os geradores devido a sua simplicidade mecânica, alta eficiência e baixa necessidade de manutenção. A figura 2.5 ilustra esta configuração com acoplamento direto à rede. Mesmo para mudanças na velocidade do vento, a velocidade do gerador praticamente não se altera, sendo, portanto, utilizado para operar em velocidade fixa (HEIER, 2005). O gerador e o rotor dos aerogeradores são acoplados através de uma caixa de engrenagens, pois os mesmos trabalham em faixas de velocidades diferentes.

Aerogeradores que operam na configuração SCIG são tipicamente equipadas com um sistema de partida *soft-starter* e um mecanismo de compensação de potência reativa. Essa configuração possui uma característica de altos torques durante o funcionamento causando flutuações na energia gerada que são transmitidas diretamente à rede elétrica. Esses transientes são críticos geralmente durante a conexão da turbina com a rede, onde a corrente pode chegar a valores de 7 a 8 vezes a corrente nominal, podendo causar danos à rede (HEIER, 2005). Portanto, a conexão do SCIG com a rede deve ser feita gradualmente, para evitar essas correntes indesejadas.

Outra característica importante dessa configuração é a compensação de potência reativa. Sem um mecanismo para o SCIG suprir potência reativa, a mesma deve ser suprida diretamente da rede, mas essa solução causa perdas adicionais na transmissão e em certos casos pode levar a instabilidade na rede. Por isso, uma solução seria utilizar bancos de capacitores ou conversores eletrônicos de potência modernos para reduzir o consumo de potência reativa.

a.2) Gerador de Indução com Rotor Bobinado (WRIG - *Wound Rotor Induction Generator*)

Devido aos enrolamentos no rotor da máquina, a configuração WRIG possui a vantagem de controle externo da tensão. Esses enrolamentos podem ser conectados a anéis de escorregamento e escovas, ou por equipamentos eletrônicos (HEIER, 2005). Em relação ao SCIG, seu custo é maior e tem a desvantagem de ser menos robusto. As indústrias de aerogeradores utilizam com mais frequência duas ramificações de WRIG, são elas: o gerador de indução OptiSlip (OSIG – *OptiSlip Induction Generator*) e o gerador de indução de dupla alimentação (DFIG – *Doubly Fed Induction Generator*). A seguir é realizado um breve comentário sobre estes dois conceitos.

a.2.1) Gerador de Indução OptiSlip (OSIG - *OptiSlip Induction Generator*)

A característica OptiSlip foi introduzida pela empresa dinamarquesa Vestas com o objetivo de minimizar a carga nas aerogeradores durante rajadas de vento. Esse conceito permite que o gerador opere com um escorregamento variável, podendo escolher o melhor valor segundo a velocidade do vento, a fim de reduzir flutuações de torque nas engrenagens e na potência de saída (HEIER, 2005). A configuração OSIG é um WRIG com uma resistência rotórica externa variável, permitindo que o escorregamento do gerador seja modificado por alteração da resistência total do rotor através de um conversor acoplado ao mesmo. O conversor é opticamente controlado e, portanto, o uso de anéis de escorregamento torna-se facultativo. O estator deste tipo de máquina é conectado diretamente à rede.

As vantagens desta topologia são: a simplicidade de controle, a não necessidade de anéis de escorregamento e uma faixa de velocidade de operação melhorada se comparada com o conceito SCIG. As desvantagens desta topologia são: limitação na faixa de velocidade de 0 a 10%, pois depende da faixa de valores da resistência rotórica, fraco controle de potência ativa e reativa e o aumento de perdas devido ao escorregamento variável (HEIER, 2005).

a.2.2) Gerador de Indução de Dupla Alimentação (DFIG - *Doubly Fed Induction Generator*)

A característica DFIG consiste de um WRIG com os enrolamentos do estator diretamente conectados em uma rede trifásica de frequência constante e com os enrolamentos rotóricos conectados a um conversor de fonte de tensão (IGBT). O termo “dupla alimentação” refere-se ao fato de que a tensão no estator é aplicada à rede e a tensão no rotor é induzida por um conversor de potência como visto na figura 2.5. Esse sistema permite a operação com velocidade variável sobre uma larga, mas limitada faixa. O conversor compensa a diferença entre a frequência elétrica e mecânica, por injeção de corrente no rotor com uma frequência variável.

O DFIG possui algumas vantagens como: capacidade de controlar potência reativa e separar o controle de potência ativa e reativa por controle independente da corrente de excitação do rotor; a não necessidade de ser excitado pela rede elétrica; é capaz de gerar potência reativa que pode ser liberada do estator pelo conversor. O maior problema desta configuração é a inevitável necessidade de anéis de escorregamento (HEIER, 2005).

b) Geradores Síncronos

Os geradores síncronos são muito mais caros e mecanicamente mais complicados que os geradores de indução de mesma potência, porém possuem a vantagem da não necessidade de potência reativa para magnetização da máquina. O campo magnético do gerador síncrono pode ser criado por ímãs permanentes ou por enrolamento de campo convencional. Se o gerador possuir um apropriado número de pólos, este pode ser usado em aplicações de acoplamento direto, ou seja, não necessita de caixa de engrenagens. Essa tecnologia já conta com cerca de 12% do mercado mundial, abrangendo várias topologias (STEPHAN, 2003) . A seguir descrevem-se as configurações mais comuns.

b.1) Gerador Síncrono com Rotor Bobinado (WRSG - *Wound Rotor Synchronous Generator*)

Esse tipo de gerador tem sido o mais fabricado nos últimos cinco anos. Os enrolamentos do estator são conectados diretamente à rede e por isso a velocidade rotacional é estritamente fixada pela frequência da rede. O enrolamento do rotor é excitado por corrente direta, usando

anéis de escorregamento e escovas, assim como a velocidade do gerador síncrono é determinada pela frequência do campo girante e pelo número de pares de pólos do rotor.

b.2) Geradores Síncronos com Excitação a Ímã Permanente (PMSG – *Permanent Magnet Synchronous Generator*)

Muitas pesquisas têm sugerido a aplicação dessa topologia em aerogeradores devido sua propriedade de auto-excitação, que permite uma operação com alto fator de potência e alta eficiência. As máquinas de ímãs permanentes possuem uma eficiência maior que as máquinas de indução, porém os materiais para produzir os ímãs são muito caros e sua fabricação é bastante complexa. O estator dos PMSGs é enrolado e o rotor pode ser do tipo pólos salientes ou cilíndrico e são providos de ímãs permanentes nos pólos. Rotor de pólos salientes são mais comuns em máquinas de baixa velocidade e são muito utilizados em geradores eólicos. Existem diferentes topologias de máquinas PM (*Permanent Magnet*), sendo as mais comuns: as máquinas de fluxo radial, as de fluxo axial e as de fluxo transversal (HEIER, 2005).

Os materiais magnéticos, além de caros, são sensíveis a altas temperaturas; por exemplo, o ímã pode perder suas propriedades magnéticas em altas temperaturas como no caso de um curto-circuito. Portanto, a temperatura do rotor deve ser supervisionada periodicamente, assim como são necessários sistemas de resfriamento eficientes. Os ímãs permanentes terras raras com alta densidade de energia são a preferência dessa nova tecnologia, e o preço desses materiais tem caído bastante nos últimos dez anos, permitindo o projeto de muitas dessas máquinas sem perdas por excitação, além da possibilidade de compactá-las.

2.6 Principais Fabricantes de Aerogeradores de Grande Porte

A tabela 2.5 mostra os principais fornecedores de aerogeradores de grande porte com respeito à potência instalada. A tabela também indica o modelo dos aerogeradores, país do fornecedor, características de controle utilizado, faixas de velocidades operadas, tensão gerada e topologia empregada. Pode-se perceber que a maioria dos fabricantes está investindo em utilizar geradores de indução operando na velocidade variável e utilizando controle de passo.

Tabela 2.5 - Principais fabricantes de aerogeradores de grande porte.

Fabricante/País Aerogerador/ Potência	Características de controle e velocidade	Características dos Aerogeradores
Vestas/Dinamarca V80 - 2.0 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito DFIG, Tensão gerada: 690V Faixa de velocidade do Gerador: 905 - 1915 rpm Faixa de velocidade do rotor: 9 - 19 rpm
Vestas/Dinamarca V80 - 1.8 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito DFIG, Tensão gerada: 690V Faixa de velocidade do Gerador: 1800 - 1980 rpm Faixa de velocidade do rotor: 15.3 - 16.8 rpm
Enercon/Alemanha E112 - 4.5 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito WRSG, Tensão gerada: 440V Faixa de velocidade do Gerador: 8 - 13 rpm Faixa de velocidade do rotor: 8 - 13 rpm
Enercon/Alemanha E66 - 2.0 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito DFIG, Tensão gerada: 690V Faixa de velocidade do Gerador: 10 - 22 rpm Faixa de velocidade do rotor: 10 - 22 rpm
NEG Micon/Dinamarca NM80 - 2.75 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito DFIG, Tensão gerada: 690V Faixa de velocidade do Gerador: 753 - 1103 rpm Faixa de velocidade do rotor: 12 - 17.5 rpm
NEG Micon/Dinamarca NM72 - 2.0 MW	Geradores de velocidade fixa Controle Utilizado: Estol Ativo	Conceito SCIG, Tensão gerada: 690V Velocidades do Gerador: 1002.4 e 1506.3 rpm Velocidades do rotor: 12 e 18 rpm
Gamesa/Espanha G83 - 2.0 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito WRIG, Tensão gerada: 690V Faixa de velocidade do Gerador: 8 - 13 rpm Faixa de velocidade do rotor: 8 - 13 rpm
Gamesa/Espanha G80 - 1.8 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito WRIG, Tensão gerada: 690V Faixa de velocidade do Gerador: 1818 -1944 rpm Faixa de velocidade do rotor: 15.1 - 16.1 rpm
GE Wind/USA GE104 - 3.2 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito WRIG, Tensão gerada: 690V Faixa de velocidade do Gerador: 1000 - 1800 rpm Faixa de velocidade do rotor: 7.5 - 13.5 rpm
GE Wind/USA GE77 - 1.5 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito WRIG, Tensão gerada: 3.3kV Faixa de velocidade do Gerador: 1000 -1200 rpm Faixa de velocidade do rotor: 10.1 - 20.4 rpm
Bonus/Dinamarca Bonus 82 - 2.3 MW	Geradores de velocidade fixa Controle Utilizado: Estol Ativo	Conceito SCIG, Tensão gerada: 690V Velocidades do Gerador: 1000 e 1500rpm Velocidade do rotor: 11e 17 rpm
Bonus/Dinamarca Bonus 76 - 2.0 MW	Geradores de velocidade fixa Controle Utilizado: Estol Ativo	Conceito SCIG, Tensão gerada: 690V Velocidades do Gerador: 1000 e 1500 rpm Velocidades do rotor: 11e 17rpm
Nordex/Alemanha N80 - 2.5 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito DFIG, Tensão gerada: 660V Faixa de velocidade do Gerador: 700 - 1300 rpm Faixa de velocidade do rotor: 10.9 - 19.1 rpm
Nordex/Alemanha S77 - 1.5 MW	Geradores de velocidade variável Controle Utilizado: Passo	Conceito DFIG, Tensão gerada: 690V Faixa de velocidade do Gerador: 1000 -1800 rpm Faixa de velocidade do rotor: 9.9 - 17.3 rpm

Fonte: (HEIER, 2005)

A tabela 2.6 mostra o *ranking* dos 10 fabricantes com as maiores participações no mercado mundial de aerogeradores no ano de 2008. Destaca-se a empresa Dinamarquesa Vestas por liderar o fornecimento de aerogeradores de grande porte, seguida pela Americana GE Wind e em terceiro lugar pela Espanhola Gamesa.

Tabela 2.6 – Maiores participações em 2008.

Fabricante	Participação em 2008 (%)
Vestas	19,0
GE Wind	18,0
Gamesa	11,0
Enercon	9,0
Suzlon	7,0
Siemens	7,0
Sinovel	5,0
Goldwind	4,0
Acciona Windpower	4,0
Nordex	4,0

Fonte: (ECOSEED, 2009).

2.7 Geradores Eólicos de Pequeno Porte

Aerogeradores de grande porte alcançaram um expressivo grau de maturidade tecnológica. Eles operam seguramente sob as mais diversas condições de ventos e possuem tempo de vidas de mais de 20 anos. Essa situação é fruto de intensas pesquisas e investimentos no setor.

Por outro lado, aerogeradores de pequeno porte (até 50 kW) não têm recebido a mesma atenção principalmente porque a maioria das aerogeradores de pequeno porte são produzidas por pequenas empresas que são incapazes de financiar pesquisas e nem de influenciar agências governamentais para tal. Como consequência, seu desenvolvimento tecnológico está muito aquém daquele observado nas aerogeradores de grande porte.

No Brasil a maioria dos geradores eólicos de pequeno porte é fornecida por representantes de empresas estrangeiras. Este fato mostra a fragilidade do mercado brasileiro em relação à fabricação de geradores eólicos, assim como a carência por desenvolvimento na área. Com a diversificação da matriz energética brasileira, a geração elétrica a pequenos

níveis de potência deverá ocupar uma importância crescente, contribuindo de fato para a solução do problema dos atuais recursos hídricos esgotados, em especial na região Nordeste.

Aerogeradores de pequeno porte são usados principalmente para geração isolada (autônoma) ou em conjunto com outras fontes de energia, para bombeamento de água e carregamento de baterias. Na aplicação para bombeamento de água, os geradores eólicos de pequeno porte substituem com vantagens os cataventos, sendo a principal vantagem o deslocamento espacial entre o local de bombeamento de água e um ponto de melhor aproveitamento dos ventos (CARVALHO, 2003).

De acordo com CARVALHO (2003) nos geradores eólicos de pequeno porte operando no modo autônomo emprega-se normalmente os do tipo síncrono, em especial o síncrono de ímã permanente, em unidades de pequena potência (até 50 kW). Além da excitação permanente, a maioria dos conversores utilizados apresenta acionamento direto dispensando desta forma o uso de um sistema de transmissão via caixa de engrenagens.

A tabela 2.7 mostra os principais fornecedores de geradores eólicos de pequeno porte no mundo, assim como suas principais características operacionais.

Através da tabela 2.7 pode-se também perceber a grande utilização de geradores a ímã permanente, comprovando assim o crescimento do mercado mundial dessa tecnologia, e suas variações de potência que podem variar de 0,1 a 10 kW. Destaca-se também o número de pás utilizado nesses aerogeradores que na sua grande maioria, possui três pás acopladas ao gerador e têm diâmetro rotórico variando entre 0,9 a 12,8 m. Essas pás podem ser fabricadas utilizando principalmente fibra de vidro reforçada com plástico, fibra de carbono reforçada com plástico e epóxi.

Tabela 2.7 - Principais fabricantes de aerogeradores de pequeno porte.

Máquina, País	Tipo	Potência [kW]	Velocidade do vento [m/s]	Número de pás	Diâmetro do rotor [m]	Material das pás	Tipo de gerador
Ampair, Great Britain	Ampair 100 / 300 / 600	0,1 / 0,3 / 0,6	20 / 12,6 / 12,6	6 / 3 / 3	0,9 / 1,2 / 1,7	vidro-PP/ GRP / GRP	ímã permanente
Aventa AG, Switzerland	AV-7	6,8	6	3	12,8	GRP	ímã permanente
Bergey, USA	Bergey Excel-S / Excel-R/XL.1	10 / 7,5 / 1	13,8 / 13,8 / 11	3	6,7 / 6,7 / 2,5	fibra de vidro	ímã permanente
J. Bornay Aerogeneradores, Spain	Inclin 600 / 1500 neo / 3000 neo / 6000 neo	0,6 / 1,5 / 3 / 6	11 / 12 / 12 / 12	2	2 / 2,7 / 3,7 / 3,7	fibra de carbono	ímã permanente
Fortis, Netherlands	Espada / Passaat / Montana / Alizé	1,4 / 0,75 / 5 / 10	14 / 14 / 14 / 12	3 / 2 3 / 3	3,1 / 2,2 / 5 / 7	vidro / epóxi	ímã permanente
Landmark Alternative Energien & Consulting, Germany	BWC Excel	10	10	3	7	epóxi	ímã permanente
Solar-Wind-Team, Germany	Flip 150 / Lakota	0,2 / 10	14	3	1,1 / 2,1	GRP, carbono	ímã permanente
SuperWind, Germany	Superwind 350	0,35	12,5	3	1,2	GRP	ímã permanente

GRP: fibra de vidro reforçada com plástico

CFRP: fibra de carbono reforçada com plástico.

Máquina, País	Tipo	Potência [kW]	Velocidade do vento [m/s]	Número de pás	Diâmetro do rotor [m]	Material das pás	Tipo de gerador
Ebtegrity Wind System, Canada	EW15	50	11,3	3	15	epoxy, fibra de vidro	assíncrono
Firanko Techniek B. V., Netherlands	Flexmill 3 / 5 / 8 / 14 / 20	1 / 1,5 / 2 / 5 / 7,5	8	3 / 3 / 5 / 5 / 5	2 / 2,5 / 3 / 4 / 4,5	alumínio	assíncrono
SMA Technologie AG, Germany	Aerosmart5	5	13,5	3	5,1	GRP	assíncrono
Southwest Windpower Inc., USA	AirX / AirXmarine Whisper H40 / H80 / H175	0,4 0,9 / 1,0 / 3,2	16 / 12 12,5 / 11,6 / 12,5	3 3 / 3 / 2	1,14 2,1 / 3,0 / 4,5	fibra de carbono	ímã permanente
Marlec Windturbines, Great Britain	Rutland FM 1803 / WG503 Rutland 910-3; 913 Windch	0,34 / 0,025 0,09	10 10	2 / 6 6	1,8 / 0,51 0,91	fibra de vidro	ímã permanente
Fuhrländer AG, Germany	Fuhrländer FL30 / FL100	30 / 100	12 / 13	3	13 / 21	fibra de vidro	assíncrono
Energotech S.A., Greece	Butterfly	1,5	10	3	3	epoxy, fibra de carbono	ímã permanente
ENERSUD, Brasil	GERAR 246	1	13	3	2,46	Fibra de vidro	ímã permanente

Fonte: www.allsmallwindturbines.com

a) Geradores Síncronos Operando no Modo Autônomo

Como característica principal, os geradores síncronos podem fornecer potência ativa e reativa e permitem um bom controle de tensão. Estas qualidades dão vantagem no modo autônomo ao gerador síncrono em relação ao gerador assíncrono. As principais aplicações de geradores eólicos síncronos operando neste modo são: carregamento de baterias, acionamento de bombas de água e fornecimento de energia à pequenas redes elétricas.

- **Carregamento de baterias**

Neste tipo de aplicação, é necessário um circuito retificador para o acoplamento entre o banco de baterias e o aerogerador. Como a tensão induzida é proporcional à velocidade de rotação do eixo, tem-se que abaixo de um valor limite de rotação a tensão do gerador torna-se menor que a soma das tensões da bateria e do circuito retificador, não sendo possível o fornecimento de potência pelo gerador.

Ultrapassando este valor limite, tem-se que para baixas velocidades do vento a maior parte da potência solicitada pela carga é retirada da bateria. Caso a velocidade do vento atinja valores elevados, a potência fornecida supera a necessidade da carga e como consequência, a potência entregue deve ser limitada (CARVALHO, 2003).

- **Acionamento de bombas de água**

As principais vantagens do uso de geradores eólicos para bombeamento de água em relação ao uso de cata-ventos (acoplamento mecânico) são: a possibilidade da separação entre o local do poço e o do gerador, que pode ser instalado neste caso em um ponto elevado com um melhor potencial eólico e a transmissão de potência elétrica mais simples que a mecânica no caso de poços profundos.

Quanto à rotação, os sistemas de bombeamento podem ser classificados como: com rotação livre e com rotação mais ou menos fixa. Para estes últimos, devido ao fato da faixa de variação da rotação ser estreita, os motores e bombas acoplados trabalham próximos ao ponto de operação nominal. Com a ocorrência de variações na velocidade do vento, motores são ligados ou desligados visando ao casamento entre fornecimento e demanda de potência (CARVALHO, 2003).

- **Fornecimento de Energia a Pequenas Redes Elétricas**

Devido à necessidade do fornecimento com frequência constante, o controle desta grandeza é feito através do ligamento e desligamento de consumidores acoplados, segundo uma prioridade pré-estabelecida para as cargas, em combinação com um controle por estol, ou de passo para altas velocidades do vento. Ambos os conceitos (controle de carga e limitação de potência) são pouco usados devido aos elevados custos envolvidos. Além disso, no período de ventos fracos não há fornecimento de energia, sendo este problema resolvido através de um banco de baterias e/ou de um gerador a diesel em um sistema híbrido, elevando ainda mais o custo da energia produzida. A figura 2.7 mostra um exemplo de configuração de aerogeradores de pequeno porte utilizando um gerador síncrono no modo autônomo com gerenciamento de carga (CARVALHO, 2003).

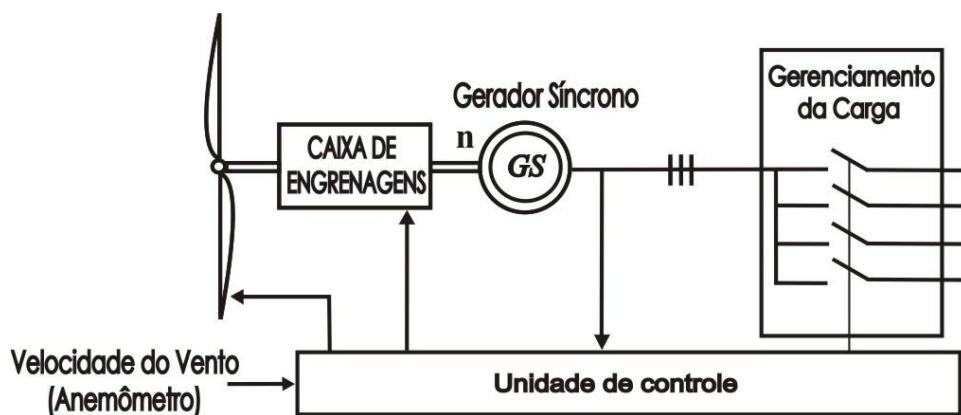


Figura 2.7: Configuração de gerador eólico com gerenciamento da carga.

b) Geradores Assíncronos Operando no Modo Autônomo

A máquina assíncrona necessita de potência reativa indutiva para excitação, que no modo autônomo não pode ser retirada de uma rede de suprimento. Neste caso, a potência reativa deve ser fornecida por unidade de potência reativa sendo dependente do estado da carga da máquina. De acordo com as exigências da carga no tocante a máxima faixa de variação de tensão, faz-se necessária uma maior ou menor precisão a compensação.

Para esta aplicação destaca-se o gerador de indução de gaiola-de-esquilo, pois apresenta vantagens como simples construção, robustez e baixo custo. No entanto, como citado, todas estas vantagens não conseguem superar a principal desvantagem da necessidade de uma fonte externa de potência reativa. No modo autônomo, esta potência reativa pode ser suprida por

bancos de capacitores ou por circuitos eletrônicos elevando ainda mais o custo final do projeto.

A configuração mais simples consiste de um banco de capacitores para a excitação do gerador de indução, com a carga ligada diretamente aos terminais do gerador, conforme visto na figura 2.8. Além dos custos desta configuração, outras desvantagens são: a variação da tensão e frequência, que depende da velocidade de rotação, da capacitância e da carga.

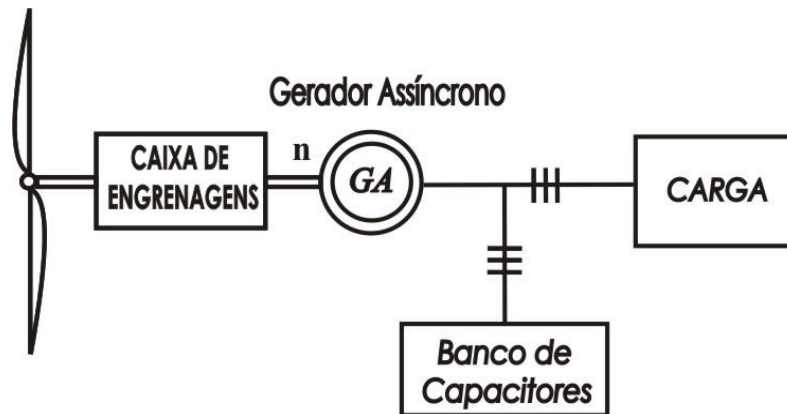


Figura 2.8: Configuração de gerador eólico de indução no modo autônomo via banco de capacitores.

CAPÍTULO 3 – AEROGERADOR COM MÁQUINA DE ÍMÃ PERMANENTE

Neste capítulo são descritas as principais topologias dos aerogeradores de ímã permanente usados, principalmente, em unidades eólicas operando no modo autônomo para bombeamento de água e carregamento de baterias. Está descrito também um resumo sobre as principais características dos materiais magnéticos utilizados nesses tipos de geradores.

3.1 Introdução

Por várias décadas, a tecnologia dos ímãs permanentes tem sido usada em projetos de pequena escala, por exemplo, em *hardwares* de computadores e relógios de pulso. O uso em grandes máquinas elétricas não vinha sendo verificado, devido ao alto preço dos materiais magnéticos junto com o alto custo dos produtos manufaturados. Este quadro está mudando.

A crescente demanda por novas soluções para aerogeradores tem criado novos mercados para as máquinas elétricas devido às pesquisas de novos materiais ferromagnéticos. Essa demanda tem atenção voltada para a alta potência e alta eficiência obtida com o uso de geradores a ímã permanente. Com a evolução das pesquisas a fim de obter geradores eólicos com maior eficiência, menor peso e redução nos custos de manutenção, a tecnologia de ímãs permanentes vem se destacando fortemente neste contexto.

Novos materiais de ímãs permanentes, como visto na tabela 3.1, de alta densidade de energia magnética como o Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) ou Samário-Cobalto (SmCo) de liga simples, estão sendo utilizados nos rotores das máquinas. Deste modo, não só os sistemas de excitação e anéis de escorregamento podem ser dispensados, como também, perdas por excitação, resultando em um considerável aumento da eficiência, quando comparado às máquinas convencionais.

Com relação aos custos dos ímãs, estes vêm decrescendo rapidamente especialmente o NdFeB, que em 1990 estava custando 100 Euros/kg comparado com os 500 Euros/kg do SmCo (STEPHAN, 2003), sendo portanto, a liga que está sendo mais utilizada na produção

dos ímãs em máquinas elétricas. Mas projetos com o propósito de diminuir a massa dos ímãs são as principais metas dos especialistas.

Tabela 3.1 – Características magnéticas dos principais ímãs permanentes.

Material	B (Tesla)	Hc (kA/m)	BH (máx)	Tmáx (°C)
Alnico V	1,280	51	44	>300
Ferrites	0,385	235	28	<100
Mn-Al-C	0,560	239	61	-
SmCo5	0,870	637	146	250
Nd₁₅Fe₇₇B₈	1,230	881	290	150

Fonte: (MERLUND, 1996)

Através da tabela 3.1 percebe-se que a liga de NeFeB possui os maiores valores de densidade de energia (BH_{máx}) e coercitividade intrínseca (Hc). Em relação à máxima temperatura suportada a fim de manter suas características magnéticas, a liga NeFeB fica atrás somente da liga de Sumário-Cobalto. A seguir será apresentado um breve resumo sobre essas características dos materiais magnéticos.

3.2 Características dos Materiais Magnéticos

Os campos magnéticos estão presentes em torno de um condutor, quando por ele flui uma corrente elétrica, ou estão presentes permanentemente em alguns materiais, como o ímã, que possui magnetização natural. Mas na natureza podem-se encontrar outros tipos de materiais com diferentes propriedades magnéticas, sendo classificados como: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Nos materiais diamagnéticos, a magnetização é oposta ao campo externo aplicado, enquanto nos materiais paramagnéticos ela se dá no mesmo sentido do campo. Nos materiais ferromagnéticos a magnetização se comporta da mesma forma dos materiais paramagnéticos, mas a diferença é que os efeitos magnéticos são mais fortes. No restante do capítulo será dado maior ênfase aos materiais ferromagnéticos, por serem de maior importância na aplicação em máquinas elétricas.

Como o campo magnético depende do meio onde se encontram os materiais, é de grande importância falar sobre permeabilidade relativa, definida como a permeabilidade do material dividida pela permeabilidade do vácuo:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.1)$$

A permeabilidade relativa em materiais ferromagnéticos é geralmente muito maior que 1 e em algumas ligas especiais pode chegar a 1 milhão (KRAUS, 1978). A tabela 3.2 lista as permeabilidades relativas de diversos materiais. Pode-se visualizar que a substância diamagnética Bismuto possui a menor permeabilidade relativa, enquanto que as superligas ferromagnéticas possuem maiores valores.

Tabela 3.2 - Permeabilidades dos materiais magnéticos.

Substância	Tipo de grupo	Permeabilidade relativa
Bismuto	Diamagnético	0,99983
Prata	Diamagnético	0,99998
Chumbo	Diamagnético	0,99983
Cobre	Diamagnético	0,999991
Água	Diamagnético	0,999991
Vácuo	Não-magnético	1
Ar	Paramagnético	1,000004
Alumínio	Paramagnético	1,00002
Paládio	Paramagnético	1,0008
Pó de permalloy 2-81	Ferromagnético	130
Cobalto	Ferromagnético	250
Níquel	Ferromagnético	600
Ferrocube 3	Ferromagnético	1.500
Aço doce	Ferromagnético	2.000
Ferro	Ferromagnético	5.000
Ferro-Silício	Ferromagnético	7.000
Permalloy 78	Ferromagnético	100.000
Mumetal	Ferromagnético	100.000
Ferro purificado	Ferromagnético	200.000
Supermalloy	Ferromagnético	1.000.000

Fonte: (KRAUS, 1978)

Todos os corpos magnetizados têm um pólo norte e um pólo sul que não podem ser separados. Por exemplo, consideremos uma barra de ferro magnetizada como indica a figura 3.1. Esta barra possui os pólos norte e sul, mas se cortamos a barra ao meio surgirão novos pólos. Se cada um destes materiais for cortado ao meio, obteremos quatro ímãs cada um com seus pólos norte e sul. A razão disto é que a fonte elementar do ferromagnetismo é um

circuito atômico de corrente que age como um minúsculo ímã com um pólo norte e um pólo sul.

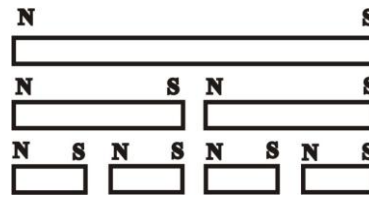


Figura 3.1 - Divisão de pólos em pequenas parcelas

Esses minúsculos ímãs presentes nos materiais ferromagnéticos são chamados de dipólos magnéticos. Dependendo do material, esses dipólos podem estar alinhados naturalmente ou podem ser alinhados através de um campo externo B , como visto na figura 3.2.

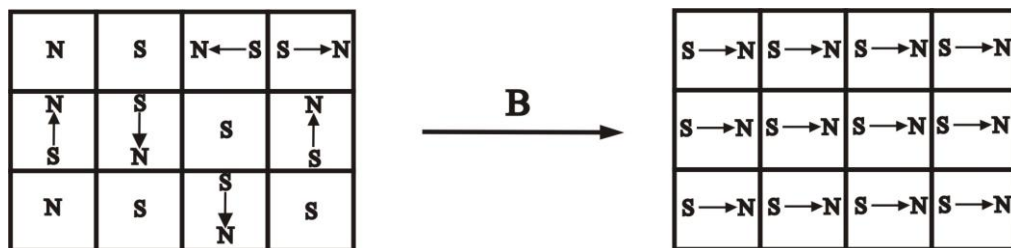


Figura 3.2 - Cristal de ferro magnetizado após aplicação de campo magnético externo.

Outro parâmetro importante para o estudo dos ímãs permanentes é o momento de dipolo magnético. Considere o percurso da corrente i do plano x - y mostrado na figura 3.3 e que a mesma circula ao redor de um condutor de área $A = abcd$.

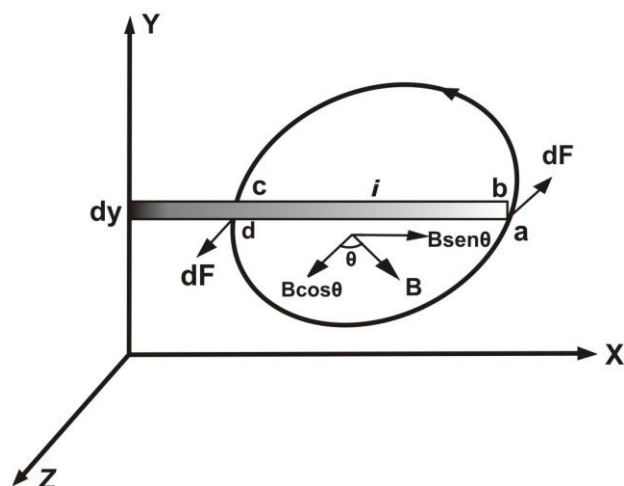


Figura 3.3 - Um condutor envolvido por uma corrente i .

O momento de dipólo magnético está associado à rotação da partícula em torno do centro de força, ou seja, uma corrente enlaçando o trecho **abcd** da figura 3.3, criará um campo magnético que pode ser representado por vetor perpendicular ao plano de rotação da corrente. Esse vetor é chamado de momento de dipólo magnético e seu módulo é definido pelo produto da corrente **i** pela área **A**.

$$\mu_m = iA \quad (3.2)$$

O percurso de corrente tem μ_m normal ao plano, e na presença de uma densidade de campo magnético externo **B**, causará um torque sobre esse eixo. O torque gerado no condutor é dado pela equação 3.3:

$$T = \mu_m B \text{sen}\theta \quad (3.3)$$

Quando um campo externo **B** é aplicado ao material, cada momento de dipolo forma um torque que tende a rotacionar em direção à densidade de campo magnético **B** aplicado. Existem forças atômicas nas órbitas dos elétrons as quais resistem a essa rotação, mas se aplicado um campo mais forte então surgirá um torque suficiente para alinhar todos os dipólos com **B**. O material tem atingido, portanto, sua saturação de campo (CAMPBELL, 1999).

Essa operação não é suficiente para a criação de um material de imã permanente, o qual deve sustentar o próprio fluxo magnético na ausência de um campo externo, ou seja, o imã permanente deve sustentar o próprio fluxo interno, no qual necessitará de espontâneo alinhamento dos dipolos magnéticos ou magnetização espontânea.

O trabalho realizado na rotação do momento no campo é encontrado pela integração do torque através do ângulo de rotação θ :

$$E = \int T d\theta = \mu_m B \int \text{sen}\theta d\theta = -\mu_m B \cos \theta \quad (3.4)$$

O valor mais baixo de energia ocorre quando μ_m e **B** estão alinhados, então existirá uma tendência natural para esse alinhamento acontecer e minimizar a energia. Em um volume elementar de material, o somatório dos momentos de dipolos magnéticos μ_m por unidade de volume é chamado de Magnetização (**M**) e é dada por:

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum \mu_m}{\Delta V} \quad (3.5)$$

A relação entre B e M é dada pela equação (3.6), onde μ_0 é a constante de proporcionalidade.

$$B = \mu_0 M \quad (3.6)$$

Dessa forma, a equação da energia para que o ímã mantenha seus dipólos magnéticos alinhados pode ser representada pela equação (3.7):

$$E = -\mu_0 \mu_m M \cos \theta \quad (3.7)$$

Determinados materiais possuem um sentido de preferência para o alinhamento dos dipólos. Tem-se como exemplo o ferro, o qual é o principal elemento de muitos ímãs permanentes, que tem uma estrutura de grade cúbica como mostrada na figura 3.4. Pode ser verificado que existem seis direções iguais de preferência para magnetização.

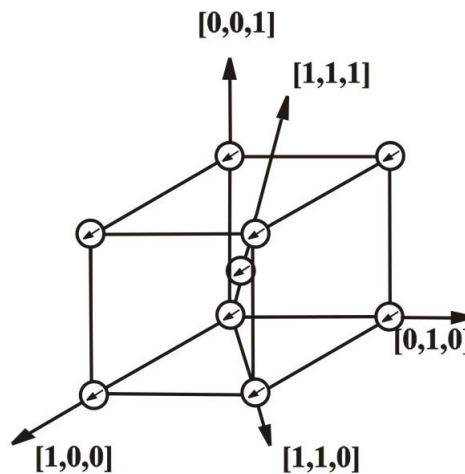


Figura 3.4 - Estrutura de grade cúbica do ferro.

Especificamente para este tipo de estrutura, a energia requerida para a rotação dos dipolos é definida pela equação (3.8).

$$E_k = 2\mu_0 \mu_m M (\sin^2 2\theta) \quad (3.8)$$

Quando uma força magnetizante \mathbf{H} é aplicada sob um ângulo θ_0 em relação ao eixo $[1,0,0]$ como mostrado na figura 3.5, de tal forma que seja suficiente para saturar o campo, então os momentos magnéticos devem rotacionar para se alinhar com \mathbf{H} .

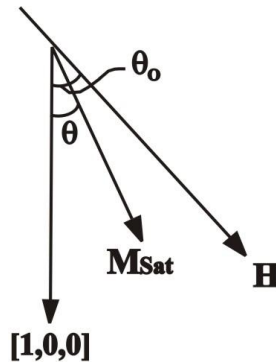


Figura 3.5 - Rotação de M_{sat} por um eixo preferencial devida à aplicação de um campo \mathbf{H} .

De acordo com CAMPBELL (1999), se \mathbf{H} for mais baixo que o nível de saturação, então o momento μ_m rotacionará numa direção intermediária que pode ser representada por M_{sat} , girando através do ângulo $\theta (< \theta_0)$. A componente de M_{sat} rotacionada na direção do campo aplicado \mathbf{H} é definida por:

$$M = M_{sat} \cos(\theta_0 - \theta) \quad (3.9)$$

Então a energia armazenada na estrutura cúbica do ferro devido a um campo externo \mathbf{H} é dada por:

$$E_f = -\mu_0 \mu_m H \cos \theta \quad (3.10)$$

Essa energia do campo aplicada por unidade de volume é dada por:

$$E_f = -\mu_0 M_{sat} H \cos(\theta_0 - \theta) \quad (3.11)$$

Logo a energia total armazenada é definida pela soma de E_k e E_f , fica:

$$E = \frac{K_1}{4} \text{sen}^2 2\theta - \mu_0 M_{sat} H \cos(\theta_0 - \theta) \quad (3.12)$$

Onde K_1 é definida como a constante cristalográfica (CAMPBELL, 1999) para um elemento magnético e está ligada ao grau de pureza dos ímãs. É definida por:

$$K_1 = 8\mu_0\mu_m M \quad (3.13)$$

Uma ótima propriedade do material é obtida com M_{sat} alinhado com o eixo preferencial na direção [1,0,0]. Para um material ser um ímã permanente, esse alinhamento deve ser capaz de suportar um campo de maior magnitude e direção oposta, tentando desmagnetizar o material. Então a mínima energia produzida (CAMPBELL, 1999) para suportar esse campo, é definida pela derivada da equação (3.14) em função do ângulo θ .

$$\frac{dE}{d\theta} = \frac{K_1}{2} \text{sen}4\theta - \mu_0 M_{sat} H \text{sen}\theta \quad (3.14)$$

Define-se coercitividade intrínseca do material (H_{ci}), o valor de \mathbf{H} aplicado para $\theta_0 = \pi$, que causa uma rápida inversão no valor de M_{sat} e é definida por:

$$H_{ci} = \frac{2K_1}{\mu_0 M_{sat}} \quad (3.15)$$

A equação (3.15) mostra a magnitude da força desmagnetizante externa que o ímã pode suportar. Quando um campo aplicado atinge $-H_{ci}$, a magnetização move-se de $+M_{sat}$ para $-M_{sat}$. Aumentando o campo, será mantido o nível de saturação em $-M_{sat}$. Se o campo aplicado é novamente invertido, até atingir $+H_{ci}$, a magnetização move-se de volta para $+M_{sat}$ mantendo-se nesse nível para qualquer aumento de campo. Esse ciclo da magnetização \mathbf{M} com a força magnetizante \mathbf{H} é chamado de característica intrínseca de magnetização, podendo ser visualizado pela figura 3.6.

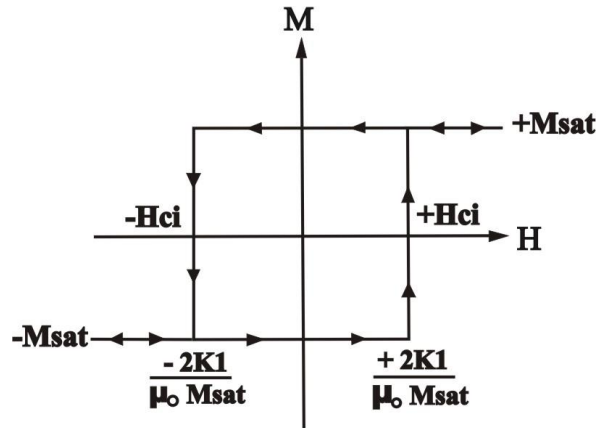


Figura 3.6 - Característica intrínseca de magnetização para um volume elementar de imã.

A curva **B** versus **H** mostra a forma mais comumente usada e mais precisa para representar a magnetização do imã, como mostra a figura 3.7.

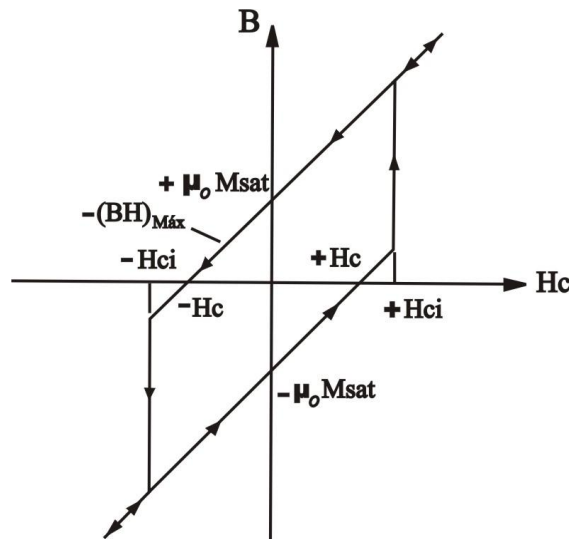


Figura 3.7 - Característica da curva B versus H para o imã.

O valor de **B** quando a força magnetizante **H** é zero é chamada de densidade de fluxo remanescente (B_r), ou mais comumente remanescência, e é dada por:

$$B_r = \mu_0 M_{sat} \quad (3.16)$$

O valor de **H** que é requerido para reduzir a densidade de fluxo **B** a zero é chamado de força coercitiva ou coercitividade (H_c), sendo esta geralmente menor que H_{ci} . O fenômeno que causa o atraso de **B** em relação a **H**, de modo que a curva de magnetização dos campos que

aumentam e diminuem não seja a mesma, é chamado de Histerese, e o ciclo traçado pela curva de magnetização é chamado de ciclo de histerese. A figura 3.8 mostra as principais características dessa curva.

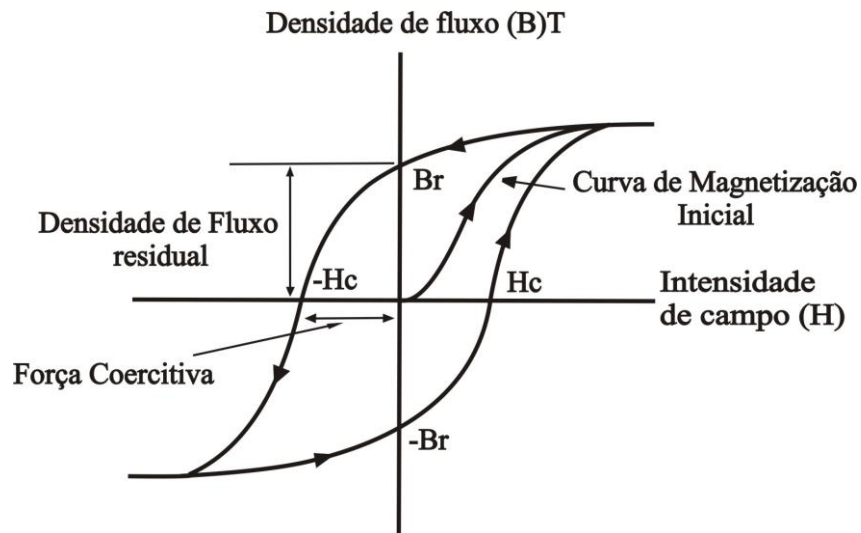


Figura 3.8 - Ciclo de histerese.

Em materiais macios, ou que são facilmente magnetizados, o ciclo de histerese é estreito como visto na figura 3.9. Ao contrário, os materiais duros possuem a característica da curva mais larga.

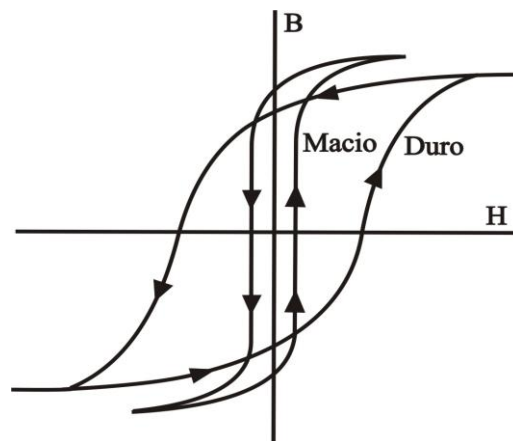


Figura 3.9 - Ciclo de histerese para materiais duros e macios.

No estudo dos ímãs permanentes é de grande importância a seção do ciclo de histerese vista pelo segundo quadrante do diagrama $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$, que é chamada curva de desmagnetização. A interseção da curva com o eixo \mathbf{B} é chamada de densidade de fluxo residual máxima \mathbf{B}_r , ou

retentividade do material, e a interseção com o eixo **H** é chamada de força coercitiva máxima, ou coercitividade (KRAUS, 1978).

Geralmente é desejável que os materiais de ímãs permanentes tenham uma alta retentividade, como também uma alta coercitividade para que o ímã não seja facilmente desmagnetizado. A figura 3.10 mostra três curvas de desmagnetização.

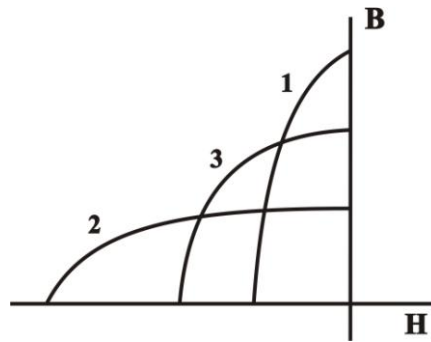


Figura 3.10 - Curvas de Magnetização.

A curva 1 representa um material de alta retentividade e baixa coercitividade, enquanto a curva 2 mostra o inverso, um material de alta coercitividade e baixa retentividade. A curva 3 representa um material que se acomoda entre os dois, tendo coercitividade e retentividade relativamente altas. O produto máximo $BH_{m\acute{a}x}$, como indica a figura 3.11, é também um dado muito importante em um ímã permanente. Na verdade é a melhor e única forma de valor para se julgar a qualidade de um material de ímã permanente.

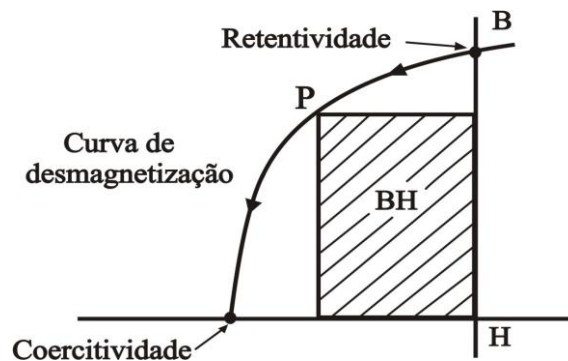


Figura 3.11 - Produto máximo de energia.

Este valor indica a densidade máxima de energia (em joules por metro cúbico) armazenada em um ímã. Um ímã com $BH_{m\acute{a}x}$ libera um fluxo com um mínimo de material magnético.

3.3 Estabilidade Térmica

Mudanças nas características do ímã depois de sua fabricação, quando está totalmente magnetizado, podem ser causadas por uma combinação de influências externas, tais como a temperatura, pressão e campo aplicado. Essas mudanças podem ser separadas em duas categorias.

A primeira é a mudança na curva de desmagnetização. Considere o caso do ímã Alnico, cujo tratamento fica entre 550 e 650°C. Se esses ímãs são subsequentemente expostos para operar a temperaturas acima dessa faixa, então sua composição será alterada, fazendo com que sua curva original de magnetização não possa ser recuperada, até mesmo por uma total remagnetização.

Outra categoria é a mudança reversível na curva de magnetização que persiste mesmo depois da causa ter sido removida. Uma dessas causas da mudança da curva de magnetização são as chamadas flutuações térmicas. Esse efeito simplesmente reduz a saturação da magnetização do ímã temporariamente, até a temperatura original ser recuperada (CAMPBELL, 1999).

3.4 Topologias Existentes

Aerogeradores de ímã permanente (PM - *Permanent Magnet*) têm a vantagem da alta eficiência e da confiabilidade, pois o rotor não necessita de excitação externa, assim como são reduzidas as perdas no mesmo. Basicamente, os geradores de PM podem ser divididos em máquinas de fluxo-radial e de fluxo-axial, de acordo com o sentido do fluxo na abertura do entreferro. A disponibilidade dos materiais modernos de ímãs de densidade de energia elevada, tais como NdFeB (Neodímio-Ferro-Boro), tornou possível projetar topologias especiais, tais como, a máquina toroidal de fluxo axial.

Segundo CHEN (2005), as topologias das máquinas consideradas incluem: a construção convencional de fluxo-radial de rotor-interno, a construção de fluxo-radial de rotor-externo, a construção de fluxo-axial de estator duplo, a construção duplo rotor de fluxo-axial, construções lado simples de fluxo-axial com o estator e rotor de contrapeso da força, e a construção toroidal sem dentes de fluxo-axial.

Todas as máquinas comparadas são construídas com ímãs (NdFeB) e agrupadas em duas categorias. Uma são os geradores com rotor acoplado diretamente ao gerador (*direct-driven*) que operam em velocidades baixas de 50 ou 100 rpm; a outra tem as máquinas que

giram em uma alta velocidade de 1.200 rpm, onde as caixas de engrenagens são necessárias. A seguir está descrito algumas características dessas topologias.

a) Máquina de Fluxo-Radial com Rotor-Interno

Este é um típico gerador de fluxo-radial, com os pólos de PM que giram dentro dos enrolamentos estacionários da armadura. Há dois ímãs que fornecem a força magnetomotriz (FMM) requerida em um par dos pólos, que podem resistir eficazmente à desmagnetização causada pela reação da armadura em um curto-circuito repentino (CHEN, 2005). A figura 3.12 mostra este tipo de configuração.

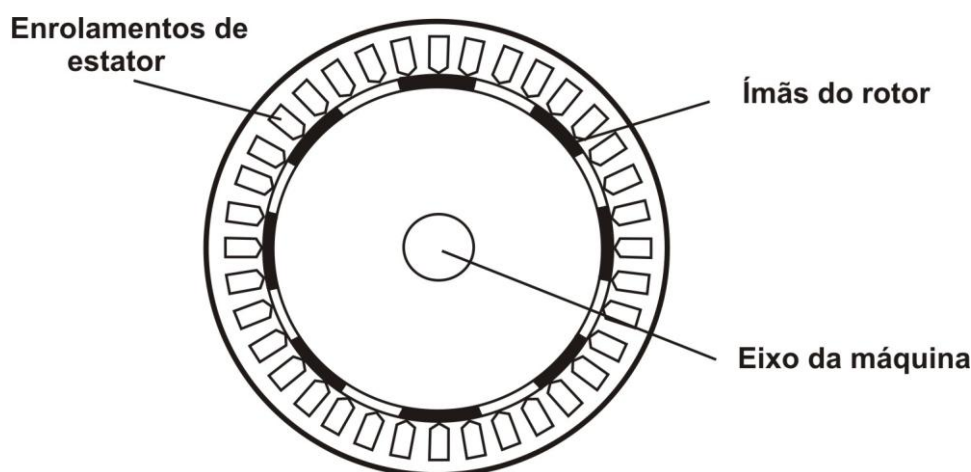


Figura 3.12 - Máquina PM de fluxo-radial com rotor-interno.

b) Máquina de Fluxo-Radial com Rotor-Externo

O estator nessa configuração é estacionário, localizado no centro da máquina, enquanto que os ímãs são montados uniformemente ao longo da circunferência interna do cilindro e suportados pelos rolamentos dianteiro e traseiro. Os circuitos magnéticos são os mesmos dos geradores convencionais de fluxo-radial de rotor-interno, sendo que, as pás da turbina eólica podem convenientemente ser parafusadas à face dianteira do cilindro para realizar o acoplamento direto entre a turbina eólica e o gerador de PM. Como o rotor fica exposto diretamente ao vento, a sua refrigeração é melhorada, de modo que a resistência à desmagnetização da armadura, para altas temperaturas, é aumentada (CHEN, 2005). A figura 3.13 mostra as principais partes desta máquina.

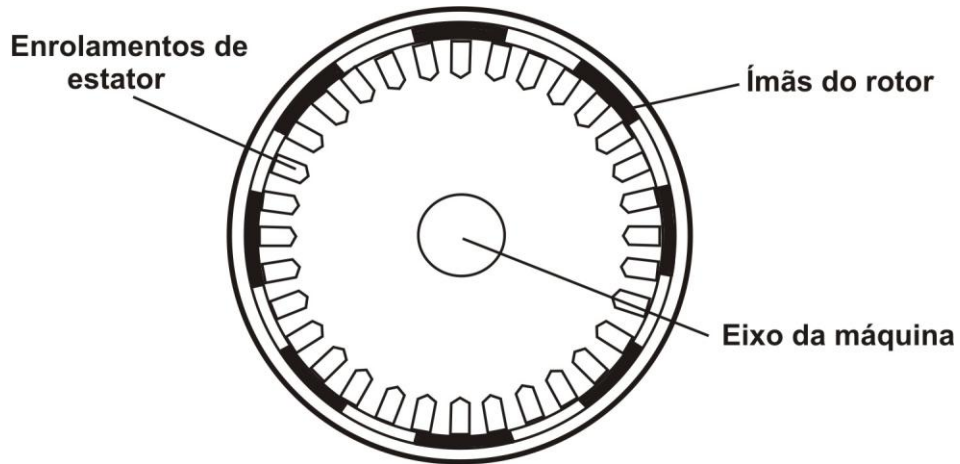


Figura 3.13 - Máquina PM de fluxo-radial com rotor-externo.

c) Máquina de Fluxo-Axial com Duplo Estator

A forma do estator, bem como a do rotor, assemelha-se a uma panqueca, e estas máquinas são geralmente conhecidas como máquinas panquecas, como visto na figura 3.14. A máquina consiste em dois estatores externos e em um rotor interno. Em todas as máquinas de fluxo axial, o rotor gira relativo ao estator com o fluxo que cruza o entreferro no sentido axial. O núcleo de ferro do estator é laminado no sentido radial e assemelha-se aos anéis concêntricos que têm uma ranhura de largura constante (CHEN, 2005).

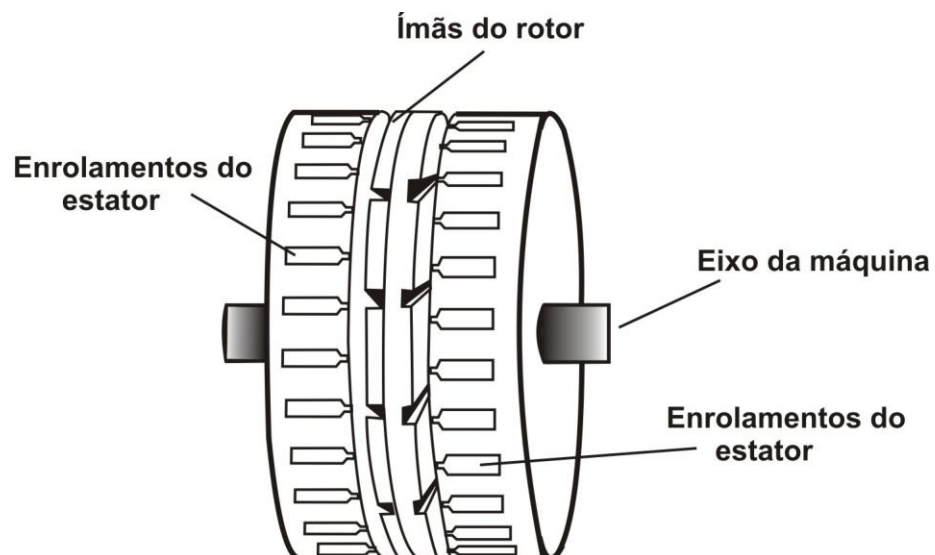


Figura 3.14 - Máquina PM de fluxo-axial com duplo estator.

d) Máquina de Fluxo-Axial com Duplo Rotor

Esta configuração é similar à máquina de fluxo-axial com duplo estator, exceto que agora a máquina possui dois rotores e apenas um estator. O estator é inserido entre os dois rotores que transportam os ímãs.

e) Máquina de Fluxo-Axial com Estator de Balanceamento

Esta configuração é simples, porque há somente um estator e um rotor; entretanto, uma grande força atrativa existe entre os dois. Para impedir que o rotor se mova no sentido axial, um rolamento de pressão especial deve ser usado, tornando a construção mais complicada. Uma maneira eficaz de resolver este problema é colocar um estator adicional à construção, para balançar a força atrativa, como visto na figura 3.15. No lado oposto do rotor, pólos de PM são inseridos para produzir o campo magnético necessário para induzir a força do contrapeso (CHEN, 2005).

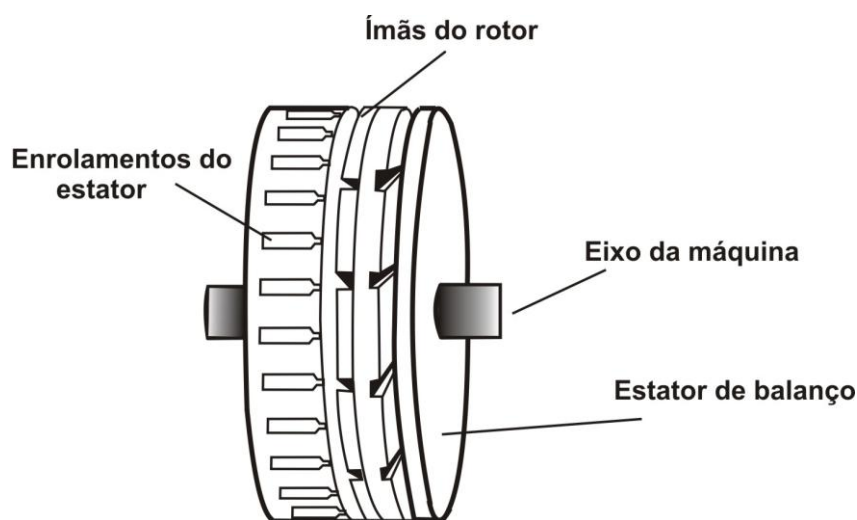


Figura 3.15 - Máquina PM de fluxo-axial com estator de balanceamento.

e) Máquina de Fluxo-Axial com Rotor de Balanceamento

Esta configuração é similar à da máquina de fluxo-axial com estator de balanceamento, exceto que um rotor adicional está adicionado à construção em vez de um contrapeso do estator. O comprimento dos enrolamentos do estator deve ser estendido para fornecer um trajeto para o campo magnético, através do qual a força do contrapeso será induzida. Assim, esta construção usa mais materiais do que a construção do contrapeso do estator (CHEN, 2005).

f) Máquina de Fluxo-Axial com Enrolamento Toroidal

Esta configuração possui dois discos de rotor que são feitos de aço e PMs, para produzir um campo magnético axialmente dirigido no entreferro da máquina. O estator da máquina compreende toroidalmente um núcleo sem ranhuras, que possui um enrolamento trifásico em uma forma toroidal por meio das bobinas concentradas. As bobinas têm uma forma retangular de acordo com a seção transversal do núcleo. Os comprimentos axialmente dirigidos da extremidade para o enrolamento são relativamente curtos, reduzindo a resistência e as perdas (CHEN, 2005). Na figura 3.16 pode-se visualizar tal configuração.

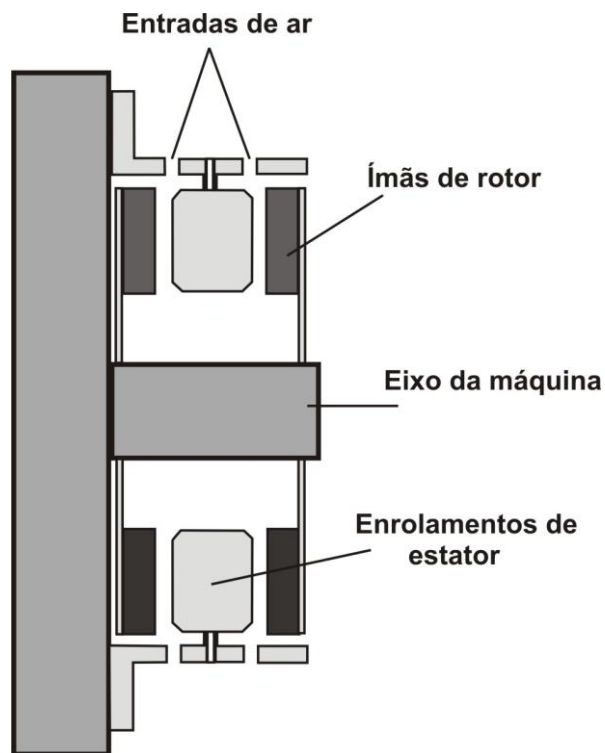


Figura 3.16 - Máquina PM de fluxo axial com enrolamento toroidal.

CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO POR AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE

Este capítulo aborda a descrição de cada equipamento utilizado no sistema de bombeamento de água através de um aerogerador de ímã permanente, como também um breve comentário sobre algumas experiências mundiais neste tipo de aplicação. Estão descritos também as características de cada equipamento dentro do sistema montado, como dimensões físicas, programação, fotos, funções e suas respectivas conexões.

4.1 Experiências mundiais de unidades de bombeamento de água acionadas por energia eólica de pequeno porte

As experiências mundiais existentes de bombeamento de água por energia eólica podem ser divididas em dois grupos, de acordo com o tipo de energia fornecida:

- Unidades de bombeamento acionadas por cata-ventos, visando fornecimento de energia mecânica;
- Unidades de bombeamento acionadas por aerogeradores, visando o fornecimento de energia elétrica.

4.1.1 Unidades de bombeamento acionadas por cata-ventos

Historicamente, cata-ventos ou moinhos de vento têm sido utilizados para fornecimento de energia mecânica necessária ao bombeamento de água desde o início das civilizações. As primeiras unidades de cata-ventos surgiram no Oriente com eixo vertical, visando principalmente a moagem de grãos e o bombeamento de água. Os primeiros registros de cata-ventos de eixo vertical datam de 1700 AC na Mesopotâmia, quando o imperador Hammurabi planejou o uso dos mesmos para irrigação. Desenvolvimentos posteriores foram realizados pelos persas e chineses (GOLDING, 1976).

As primeiras informações sobre o uso de cata-ventos chegaram na Europa provavelmente trazidas pelos soldados que combateram nas cruzadas; no entanto, a idéia do eixo vertical desenvolvida no Oriente foi abandonada a favor do eixo horizontal. Os primeiros cata-ventos de eixo horizontal foram construídos no Ocidente a partir do século XII, ocorrendo, portanto, vários séculos após o desenvolvimento dos de eixo vertical no Oriente.

A partir do uso inicial apenas para moagem de grãos, os moinhos de vento lentamente passaram a assumir outras importantes tarefas. Na região do Mediterrâneo a partir do século XIII foram desenvolvidos cata-ventos de oito ou mais velas para irrigação. A partir do século XV, na Holanda foram realizados os primeiros acionamentos de bombas de água visando à drenagem de terras cobertas pelas águas. Vale salientar que em nenhum outro país houve uma relação tão intensa entre os moinhos de vento e o desenvolvimento econômico como na Holanda, a ponto de se tornarem símbolos desse país.

Uma das últimas inovações no uso dos cata-ventos foi registrada no oeste do Estados Unidos em meados do século XIX, apresentando unidades com cerca de vinte pás de alumínio e diâmetro de 3 a 5 metros. Estas unidades visavam principalmente o bombeamento de água de poços em fazendas isoladas e se adaptaram muito bem às condições rurais; o bombeamento era feito por meio de bombas e pistões favorecidos pelo elevado conjugado fornecido pelo grande número de pás. Em 1899 foram contadas no país cerca de 77 fábricas de cata-ventos; em 1930 havia aproximadamente 100 firmas, empregando cerca de 2.300 trabalhadores (HAU, 1996). Desta forma, pela primeira vez na história, a energia eólica representou a base de uma produção industrial. Até os dias de hoje este tipo de cata-vento é largamente usado em várias partes do mundo, incluindo países como o Brasil e Kenia (HARRIES, 2002).

4.1.2 Unidades de bombeamento acionadas por turbinas eólicas

Com o desenvolvimento dos primeiros geradores elétricos no final do século XIX, se iniciou o estudo do uso da energia dos ventos como fonte de acionamento para estes geradores; numa segunda etapa, aerogeradores foram utilizadas para acionamento de motores acoplados a bombas de água. As experiências que têm sido acumuladas a nível mundial de unidades de bombeamento de água acionadas por aerogeradores têm se acumulado em dois campos principais: acionamento de conjuntos motor-bomba para bombeamento de água de poços e/ou açudes e para acionamento de conjuntos motor-bomba empregados em unidades de osmose reversa para dessalinização da água do mar e/ou salobra.

4.1.2.1 Acionamento de conjuntos motor-bomba em unidades de bombeamento de água

- Jordânia (MOHSEN, 1998)

Baseado em dados eólicos disponíveis, 11 locais na Jordânia foram considerados. Os resultados da avaliação dos locais foram divididos em 3 categorias: favorável (cerca de 64% do volume total bombeado), promissor (cerca de 28% do volume total bombeado) e pobre (menos de 8% do volume total). Os principais dados das turbinas eólicas utilizadas são:

- Potência nominal: 11 kW;
- Diâmetro do rotor: 11 m;
- Coeficiente de potência: 0,35;
- Velocidade de entrada: 3,5 m/s;
- Velocidade nominal: 8,5 m/s;
- Velocidade de saída: 24 m/s.

Outra experiência desta aplicação encontra-se também na Jordânia na cidade de Jurf-El Daraweesh, onde o sistema de bombeamento eólico utiliza bombas submersas instaladas em poço profundo. O sistema trabalha quando as condições de vento são favoráveis substituindo o sistema de bombeamento através de motor diesel. Este sistema é composto por um gerador síncrono trifásico, potência de 14kW, tensão entre fases de 400 V, corrente nominal de 25 A, que abastece dois tanques de 55 m³ para armazenamento de água. A torre onde foi instalado o aerogerador possui 15 m de altura e o diâmetro das pás do rotor tem 12,5 m. Resultados mostram que o custo anual da manutenção do sistema eólico é 25% menor que do sistema com motor diesel (BADRAN, 2003).

- Oman (SULEIMANI, 2000)

Dados eólicos locais foram utilizados para o dimensionamento do sistema de bombeamento. A velocidade média anual do vento no período de 1989 a 1993 foi de 5,7 m/s; velocidades máximas são verificadas de março a setembro, coincidindo com o período de máxima demanda de água para irrigação. Os critérios usados para o dimensionamento foram:

- Dados de velocidade do vento a 10 m de altura do solo;
- Altura da torre da turbina de 24 m;
- Altura manométrica total de 100 m;
- Demanda diária de água de 30 m³.

Usando os critérios acima, foi selecionado um sistema com potência nominal de 10 kW (gerador trifásico, 220 V e 60 Hz). O sistema foi projetado de modo a conectar o motor diretamente ao gerador eólico através de um controlador. A bomba opera na faixa de 30 a 80 Hz; no caso de baixas velocidades do vento, conseqüentemente baixas frequências, o sistema permite a opção de um abastecimento elétrico a partir de um gerador a diesel. A produção estimada de água pretende alcançar 75-80% da demanda. O balanço energético pode ser achado através do uso do gerador a diesel ou do uso de unidades de armazenamento de energia.

4.1.2.2 Acionamento de conjuntos motor-bomba em unidades de osmose reversa

A nível mundial já existem experiências de instalações de osmose reversa alimentadas por energia eólica ou sistemas híbridos, as mais importantes sendo registradas nos seguintes países:

- Espanha (CARTA, 2003)

Sistema de dessalinização de água do mar acionado por parque eólico nas Ilhas Canárias. Acoplado ao sistema, um volante de inércia é utilizado para garantir estabilidade à rede elétrica isolada onde os geradores eólicos são conectados. Esta rede é estabelecida a partir de um motor assíncrono que eleva a rotação do volante de inércia até a frequência de 41 Hz, quando através de uma máquina síncrona a rede é criada. Neste momento, o inversor do gerador tenta se sincronizar com a rede formada. Se conectado, inicia-se a transferência de energia até se alcançar a frequência de 52 Hz.

A partir da velocidade do vento medida por um anemômetro, o controle é capaz de estabelecer o número de unidades de osmose reversa que podem estar conectadas. O sistema consiste de dois geradores de 230 kW cada, um sistema de controle, oito unidades de osmose reversa providas de uma válvula solenóide motorizada, que pode variar a pressão durante a partida e ainda vários sensores.

O sistema é capaz de produzir 25 m³ de água potável por dia, com um consumo específico de 6,9 kWh por m³. Cada módulo foi estabelecido para ter uma taxa de conversão de 33 % a 62 bar.

- Espanha (EHMANN, 1996)

A planta piloto foi construída em 1996 nas ilhas Canárias. O objetivo principal é a viabilidade econômica de uma instalação de osmose reversa para dessalinização de água do mar acionada por gerador eólico, no modo autônomo, para o abastecimento de água potável de locais remotos. O aspecto inovador neste projeto é a não utilização de um sistema de armazenamento de energia para o funcionamento da instalação de osmose reversa. A filosofia de trabalho consiste em adaptar a instalação de osmose reversa ao fornecimento de energia do gerador eólico através de mudanças na pressão e vazão de água, dentro de determinados limites. A energia é fornecida por um gerador eólico ENERCON E30, com potência nominal de 200 kW e controle de potência via ângulo de passo da pá. Na tubulação que conduz o concentrado é usada uma turbina Pelton para recuperação de energia.

- Austrália (ROBINSON, 1992)

A planta piloto consiste em uma unidade de osmose reversa acionada por um catavento. O objetivo principal deste projeto é garantir um abastecimento seguro de água potável para uma comunidade de aborígenes no oeste australiano através da dessalinização de água subterrânea. A pesquisa foi assumida pelo *Remote Area Developments Group* em Perth. Devido ao fato da manutenção ter grande influência nos custos finais de instalações para locais remotos, foi procurado um conceito que minimizasse a manutenção. Isto trouxe, porém, a desvantagem da instalação apresentar uma taxa de conversão menor que a nominal. Após a entrada em funcionamento, em julho de 1988, os dados operacionais foram medidos e armazenados ao longo de 13 meses. Os dados relativos à produção de água potável oscilaram entre 150 e 300 litros por dia, enquanto a taxa de conversão variou entre 6,2 e 11,9 %.

- Alemanha (PETERSEN, 1985)

Este projeto foi realizado na ilha Hallig Süderoog no mar do Norte. Numa primeira etapa de operação, a água do mar é bombeada até um reservatório. Deste ponto, a água é conduzida a uma bomba de alta pressão. Esta bomba, por sua vez, alimenta dois módulos de osmose reversa em série. O concentrado é conduzido através de uma válvula de pressão a um sistema de esgoto, enquanto a água potável é acumulada em um segundo tanque. O gerador eólico é composto de um rotor de duas pás com controle de potência via ângulo de passo da pá e gerador síncrono.

- Grécia (TZEN, 2008)

O projeto trata de uma unidade autônoma de osmose reversa, acionada por sistema híbrido (eólica e fotovoltaica), no Centro de Fontes Renováveis de Energia – CRES, situado em Lavrio, Grécia, para dessalinização de água do mar. O sistema foi desenvolvido e instalado em 2001. No entanto, sofreu uma reestruturação em 2004, sendo denominado “*The New RO System*”.

Com relação às características técnicas, o projeto possui:

- Energia Solar: 3,96 kWp
 - ✓ 3 arranjos com 12 módulos FV cada (Siemens – 110 Wp);
 - ✓ Ajuste de inclinação conforme altitude solar durante o ano;
 - ✓ Carregadores solar / Controlador de carga.
- Energia Eólica: 900 W (Whisper H40)
 - ✓ Carregador individual: controle de tensão gerada e sobrecarga;
 - ✓ Banco de resistores: dissipação de carga;
 - ✓ Circuito de freio: parada do aerogerador.
- Banco de Baterias: 12 (1.850 Ah) em série
- 2 inversores (1,5 kW + 4 kW)
- 3 bombas + Soft Start
- bombas: 16,5 kW/ m³
- Instrumentação
 - ✓ Unidade OR: pressão, temperatura, condutividade e vazão;
 - ✓ Sistema Potência: radiação, velocidade vento, tensões, correntes, potências.

De acordo com MORRIS (2003), existem ainda mais sistemas que utilizam bombeamento através da energia eólica e também com a utilização conjunta de outras fontes de energia renováveis em dessalinização. Podem-se citar os seguintes sistemas:

- 900 W Eólica + 4 kWp FV – Tecnologia (Osmose reversa): Grécia
- 6 kW Eólica + 2,5 kWp FV – Tecnologia (Osmose reversa): Alemanha
- 2 kW Eólica + 4 kWp FV – Tecnologia (Osmose reversa e Eletrodialise): França
- 225 kW Eólica – Tecnologia (Osmose reversa): Espanha

4.2 Descrição dos componentes do sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento analisado é composto por um aerogerador com máquina síncrona de ímã permanente de fluxo axial de 1 kW, que utiliza uma turbina de três pás com 2,46 m de diâmetro conectado a um controlador de carga que funcionará como um regulador de tensão e frequência, garantindo que o motor funcione somente com uma frequência próxima de 60 Hz e uma tensão em torno de 220 V entre fases. O motor para acionamento da bomba centrífuga tem 0,5 cv de potência, trifásico com possibilidades de alimentação em 220 V/380 V, possui 2 pólos, frequência de 60 Hz, velocidade de 3.450 rpm, grau de proteção IP 21.

O sistema também possui um *datalogger* que tem a função de coleta, armazenagem e processamento de dados de outros instrumentos. Os instrumentos utilizados no sistema e que são conectados ao *datalogger* são: um medidor de pressão (para medir pressão da água na tubulação), um anemômetro de três conchas (para medir a velocidade do vento) e um medidor de vazão (para medir a vazão da água na tubulação).

A seguir é feito um breve comentário sobre cada equipamento utilizado neste projeto, mostrando suas principais características.

4.2.1 Bomba Centrífuga

As bombas são máquinas hidráulicas que conferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo por escoamento de um ponto para outro, obedecendo às condições do processo. As bombas transformam o trabalho mecânico que recebem para seu funcionamento em energia. Elas recebem a energia de uma fonte motora qualquer e cedem parte dessa energia ao fluido sob forma de energia de pressão, cinéticas ou ambas, isto é, elas aumentam a pressão do líquido, a velocidade ou ambas as grandezas. A energia cedida ao líquido pode ser medida através da equação de Bernoulli, que é dada pela equação 4.1.

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = 0 \quad (4.1)$$

em que ρ é a densidade do fluido, v é a velocidade do fluido ao longo do conduto, h é a altura em relação a um referencial, g é a aceleração da gravidade e p é a pressão ao longo do conduto.

A relação entre a energia cedida pela bomba ao líquido e a energia que foi recebida da fonte motora fornece o rendimento da bomba. As bombas centrífugas podem ser divididas quanto ao escoamento do líquido no interior das mesmas. Existem bombas centrífugas dos tipos radial, diagonal ou axial.

Na bomba radial ou centrífuga pura, o movimento do líquido é na direção normal ao eixo da bomba (empregadas para pequenas e médias descargas e para qualquer altura manométrica, porém caem de rendimento para grandes vazões e pequenas alturas além de serem de grandes dimensões nestas condições).

Já na bomba diagonal ou de fluxo misto, o movimento do líquido é na direção inclinada em relação ao eixo da bomba, sendo empregadas em grandes vazões e pequenas e médias alturas. Estruturalmente caracterizam-se por serem bombas de fabricação muito complexa. Na bomba axial ou helicoidal, o escoamento desenvolve-se de forma paralela ao eixo e são especificadas para grandes vazões (dezenas de m^3/s) e médias alturas, até 40 m (UFCG, 2008).

O conjunto motor-bomba utilizado neste projeto pode ser visto na figura 4.1. A bomba utilizada é do tipo radial, possuindo motor de indução trifásico, com alimentações de 220 V/380 V e possui 2 pólos, tem 0,5 cv de potência, frequência de 60 Hz e velocidade de 3.450 rpm.



Figura 4.1 - Conjunto motor-bomba.

Percebe-se também na figura 4.1 a válvula no recalque da bomba, para ajuste da pressão e a conexão do sensor de pressão na tubulação. Este conjunto motor-bomba pode bombear água para uma faixa de altura de 4 a 22 metros, operando com vazões que variam de 0,8 a 9 metros cúbicos por hora. A tabela 4.1 mostra as características de vazão e altura manométrica da bomba centrífuga.

Tabela 4.1 - Principais características da bomba.

TABELA DE SELEÇÃO													
Modelo		Pot (cv)	AMT (máx) mca	Altura Manométrica Total (mca) - Não estão inclusas as perdas por atrito									
				4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Monofásico	Trifásico			VAZÃO m ³ / h									
110 ou 220 V	220 / 380 V												
CP-4R	CP-4R	0,5	23	9	8,3	7,6	6,9	6,1	5,2	4,3	3,3	2	0,8

Fonte: Manual do fabricante (WEG)

Portanto, através dos valores apresentados na tabela 4.1, pode-se montar um gráfico mostrando a curva característica de trabalho do conjunto motor-bomba. Na curva mostrada na figura 4.2, pode-se verificar o comportamento de vazão desta bomba para diferentes alturas manométricas.

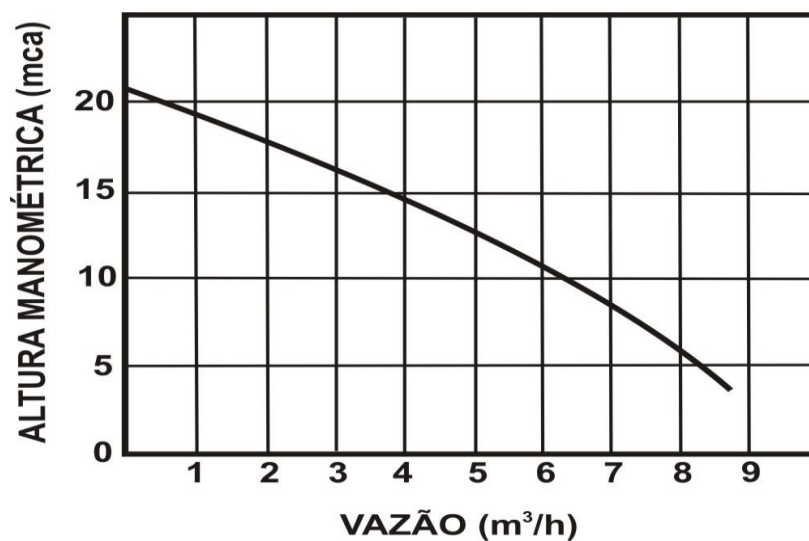


Figura 4.2 - Curva característica do conjunto motor-bomba. (Manual Weg)

4.2.2 Gerador Eólico de Ímã Permanente

Com a utilização dos materiais a imã permanente a construção dos aerogeradores foi simplificada, pois novos modelos de rotores foram desenvolvidos com características de baixa perda e fácil resfriamento, devido à não existência de enrolamentos e excitação de campo.

Materiais ferromagnéticos como o Neodímio ou Nd-Fe-B (Neodímio-Ferro-Boro) sustentam a magnetização da máquina após o campo magnético externo ser removido. Essa propriedade forma a base para as aplicações técnicas dos imãs permanentes. Os geradores eólicos a imã permanente podem ser construídos tanto para altas como para baixas velocidades, dependendo da necessidade da turbina eólica. Os geradores eólicos de pequeno porte encontrados no Brasil são praticamente todos importados.

Neste trabalho foi utilizada a máquina síncrona de imã permanente como gerador, pois possui algumas vantagens como: dimensões reduzidas, conseqüentemente menor peso, baixo custo de instalação e manutenção, e uma alta capacidade de gerar energia a baixas velocidades. Por estas características esta tecnologia vem sendo bastante aplicada em sistemas eólicos de pequeno porte. A tabela 4.2 mostra as principais características técnicas do aerogerador utilizado.

Tabela 4.2 - Características do aerogerador.

Fabricante	Enersud
Potência a 13 m/s	1.000 W
Velocidade de partida (cut-in)	2,0 m/s
Torque de partida	0,3 Nm
Diâmetro rotórico	2,46 m
Sistema magnético	Neodímio
Sistema elétrico	Trifásico
Tensão de saída	220 V
Topologia	Fluxo axial
Número de pás	3
Velocidade nominal	12,5 m/s

Fonte: (ENERSUD, 2007)

A figura 4.3 mostra de forma aproximada a curva de potência do aerogerador utilizada neste projeto, retirada do manual do fabricante. Percebe-se que a máquina começa a gerar energia elétrica com uma velocidade de vento a partir de 2 m/s e sofre queda de geração brusca (ativação do controle de proteção-passo) acima de 12 m/s.

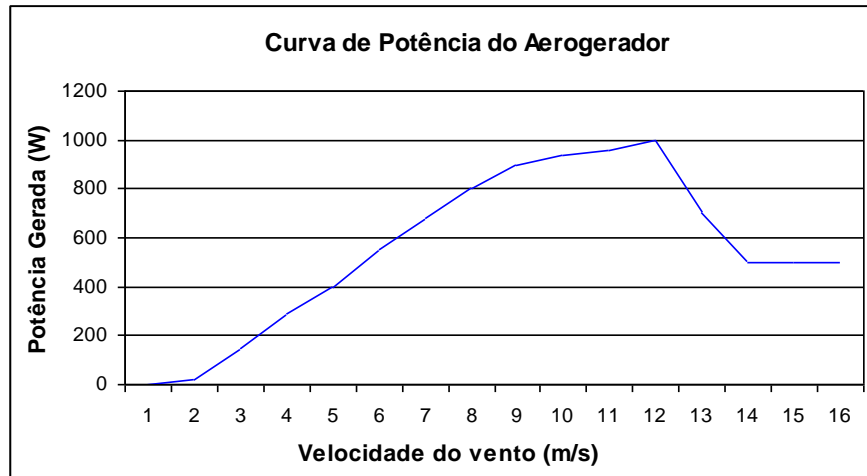


Figura 4.3 – Curva de potência do aerogerador utilizado.

A disponibilidade de um alto campo magnético produzido por ímãs permanentes possibilita uma topologia sem a presença de ranhuras e com enrolamentos fixos entre o entreferro. O material magnético utilizado é o Nd-Fe-B (Neodímio-Ferro-Boro), que é capaz de produzir uma densidade de fluxo na ordem de 0,5 a 0,6 T em máquinas elétricas com entreferros relativamente largos (MACHADO, 2006). O gerador não tem ranhuras, seu fluxo é axial e não possui escovas, devido a sua geometria mostrada na figura 4.4.

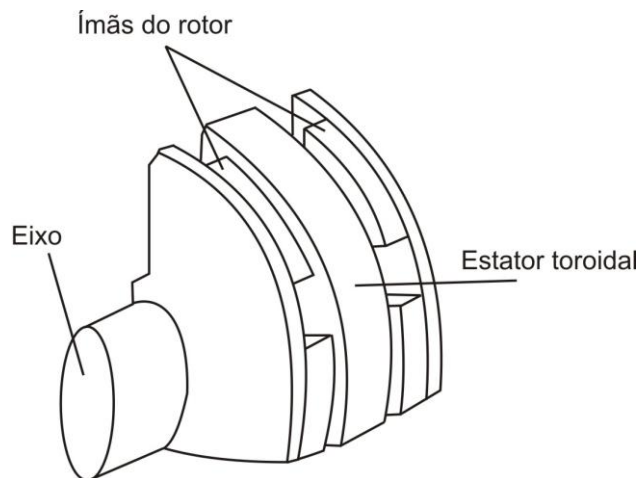


Figura 4.4 - Corte no rotor da máquina toroidal de ímã permanente.

O rotor é composto de dois discos de aço, um em cada lado do estator, carregando ímãs polarizados axialmente (CHALMERS, 1999). Máquinas desta natureza podem ser usadas como geradores, motores sem escovas, geradores de baixa tensão com saída retificada e motores de roda para motos e carros elétricos. A figura 4.5 mostra uma foto do aerogerador de ímã-permanente utilizado neste trabalho. Detalhe para o encaixe das pás e a mola de controle de velocidade.



Figura 4.5 – Aerogerador com máquina de ímã-permanente utilizado no experimento.

A máquina é simples, de construção barata e tem uma alta eficiência. O uso de ímãs de Nd-Fe-B proporciona um pequeno tamanho e peso, bem como um alto carregamento magnético. Seu disco do rotor atua naturalmente como um ventilador proporcionando uma boa ventilação para os enrolamentos do estator, que operam com um alto carregamento elétrico (CHALMERS, 1999). Também, com um alto carregamento magnético, é possível gerar a força eletromotriz requerida usando um pequeno número de voltas por enrolamento, fazendo com que as resistências e indutâncias sejam baixas (MACHADO, 2006).

A alta eficiência dos geradores eólicos a ímã permanente está baseada no princípio de operação com excitação provida a partir dos ímãs, pois nenhum enrolamento é necessário no rotor, fazendo com que as perdas por excitação sejam eliminadas. Isto resulta em um substancial aumento de eficiência, pois perdas por excitação correspondem a cerca de 20 a 30% de todas as perdas da máquina (GEPOWER, 2006).

Mesmo com todas estas vantagens, este tipo de máquina, assim como as outras, também possui perdas que afetam sua eficiência. De acordo com SPOONER (1992) as principais perdas encontradas nas máquinas de ímã permanente são: perdas joulicas, perdas por correntes parasitas, perdas no ferro do núcleo e perdas por atrito. A seguir descreve-se cada uma destas perdas.

a) Perdas Joulicas (ri^2): Esta é a principal perda da máquina, acima da maioria das outras perdas em várias faixas de operação, embora as perdas por correntes parasitas sejam também significativas e podendo ser até dominantes em altas velocidades. A configuração toroidal contribui para que ocorram menos perdas joulicas do que ocorreria em outro tipo de configuração, pois os condutores que envolvem o núcleo do estator formando os enrolamentos são mais curtos (MACHADO, 2006).

b) Perdas por Correntes Parasitas (*Eddy Currents*): O enrolamento é localizado no entreferro (entre os ímãs) e conseqüentemente no campo magnético principal. O movimento dos ímãs causa um campo através de cada condutor, variando periodicamente e induzindo correntes parasitas no condutor (MACHADO, 2006). As perdas de energia por correntes de Foucault por unidade de volume do condutor são dadas (MERLUND, 1996) pela equação 4.2:

$$P_E = \frac{B_p^2 \cdot \omega_g \cdot d^2}{32 \cdot \rho^2} \quad (4.2)$$

em que B_p é o valor de pico da densidade do fluxo magnético, ω_g é a frequência angular elétrica, d é o diâmetro de um único condutor e ρ é a resistividade do condutor.

c) Perdas no Ferro: O núcleo do estator é um disco circular de fina espessura perfurado no centro. O mecanismo possui uma alta densidade de fluxo na direção tangencial, mas razoável baixa densidade na direção axial. A quantidade de ferro usada é pequena. Tomando estes dois fatores, tem-se como resultado uma baixa perda no ferro (MACHADO, 2006).

d) Perdas por Ventilação: O usual desenvolvimento de fórmulas para o cálculo de perdas por ventilação em pequenas máquinas produz valores em torno de 0,2 W para máquinas experimentais. Os imãs colocados junto ao disco do rotor certamente não fazem uma operação a 100% de eficiência com laminas de ventilação, então uma perda nominal de 10 W é adotada para tomar cálculo de tais perdas (MACHADO, 2006).

4.2.3 Analisador de Energia

Para análise de potência, corrente e tensão gerada pelo aerogerador junto ao sistema de bombeamento, foi utilizado o analisador de energia RE6010 de fabricação Embrasul. A figura 4.6 mostra a foto do painel frontal do equipamento. Este analisador possui dois módulos:

- **MÓDULO BÁSICO**, denominado pela letra “B”, é composto pelas seguintes funções de medição e registro:
 1. Grandezas: Tensão - Corrente - Potências - Frequência - DHT de tensão e corrente.
 2. Intervalo de Integração: Entre um segundo e uma hora.
- **MÓDULO DE MEDIÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS**, denominado pela letra “H”. Com este módulo o RE6010 passa a registrar harmônicas até a 51ª ordem, por canal de tensão e corrente simultaneamente.



Figura 4.6 - Painel frontal do analisador de energia.

4.2.3.1 Descrição do Painel Frontal

O painel frontal do RE6010 é composto de display LCD alfanumérico e teclas conforme figura 4.7.

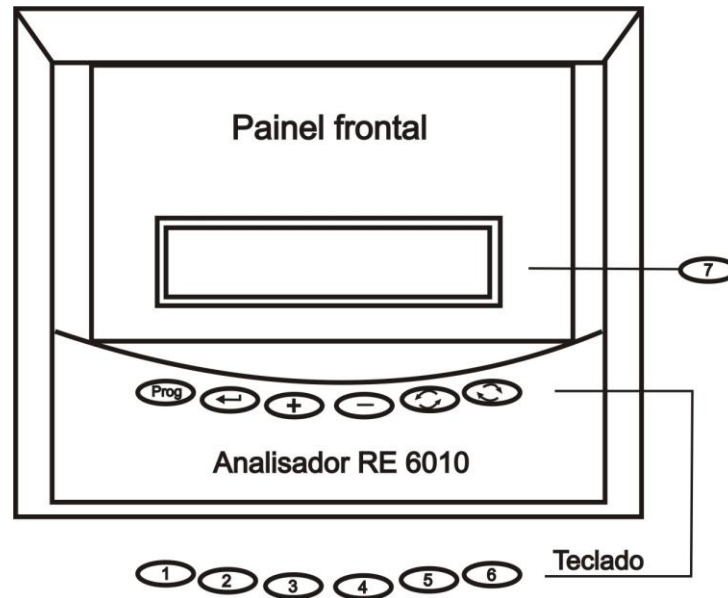


Figura 4.7 - Botões do Painel frontal

Através da figura 4.6 pode-se observar que as teclas estão numeradas de 1 a 7 e a partir desta numeração é possível explicar cada uma delas. A seguir observa-se a explicação detalhada de cada tecla do painel frontal.

1. **Tecla de programação:** Usada para acessar o estado de programação.
2. **Tecla ENTER:** Usada para navegar dentro das funções a fim de alterar os valores.
3. **Tecla de incremento:** Usada no estado de programação para alterar o valor da função no sentido crescente. Valores de função que podem ser capacitivos terão seu incremento na direção da faixa capacitiva.
4. **Tecla de decremento:** usada no estado de programação para alterar o valor da função no sentido decrescente. Valores de função que podem ser capacitivos terão sua alteração no sentido indutivo.
5. **Tecla de rotação anti-horária:** usada para rotacionar as telas.
6. **Tecla de rotação horária:** usada para rotacionar entre as telas.
7. **Display alfanumérico:** Indica as grandezas medidas e parâmetros acessados através das teclas.

4.2.3.2 Descrição do Painel Traseiro

O painel traseiro do RE6010 é formado por parafusos, hastes de fixação, conector de passagem de parafuso para ligação dos sinais de tensão e corrente, conforme a figura 4.8.

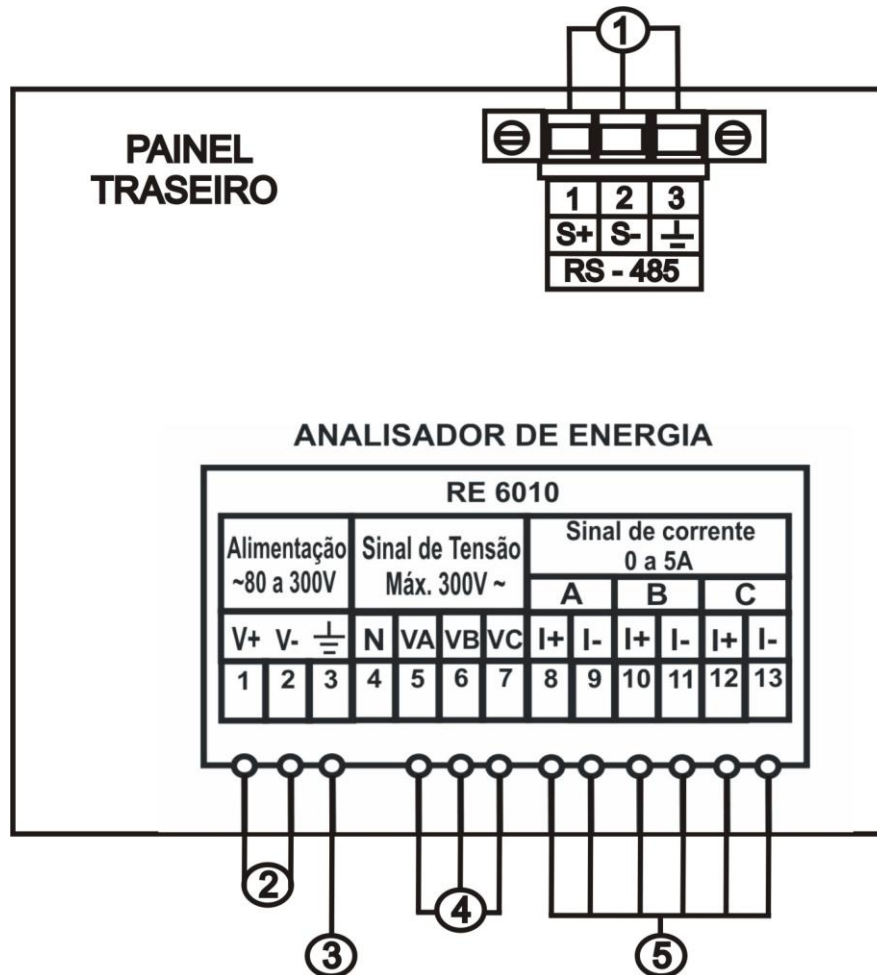


Figura 4.8 - Descrição do painel traseiro.

Como observado na figura 4.8, os pinos são numerados e suas funções estão descritas abaixo:

1. Conectores da porta serial RS485;
2. Conectores para entrada da alimentação;
3. Conector para conexão ao terra;
4. Conectores para a entrada de tensão das fases A,B,C e N;
5. Conectores para entrada do sinal de corrente das fases A,B e C.

4.2.4 Diagramas de ligação dos equipamentos ao painel traseiro do analisador

O analisador de energia pode ser utilizado tanto para circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos. Neste trabalho foi utilizado o diagrama trifásico. As fases VA, VB e VC de saída do aerogerador são conectadas aos conectores de tensão e as correntes das fases aos respectivos conectores de corrente. A figura 4.9 mostra tal configuração.

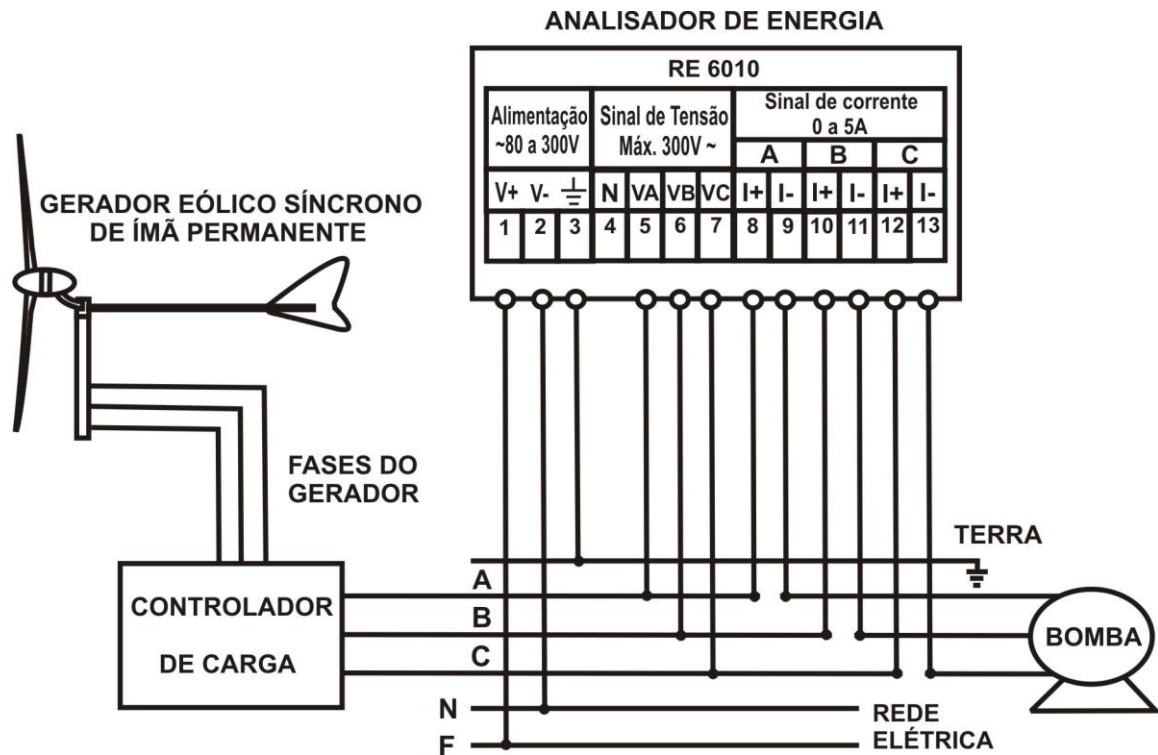


Figura 4.9 - Diagrama de ligação entre o aerogerador e o conjunto motor-bomba.

Pode-se perceber através da figura 4.8, que as três fases do aerogerador passam primeiro pelo controlador de carga e somente depois são conectados ao analisador. A partir destas conexões pode-se medir tensão, corrente, potência gerada, frequência, entre outras.

4.2.5 Controlador de Carga

O controlador de carga, de fabricação Enersud, tem a função de gerenciar o acoplamento automático do gerador ao conjunto motor-bomba. O motor quando acoplado ao aerogerador atua como carga, impossibilitando que haja a partida das hélices com ventos mais fracos e em função do grande esforço que é realizado para este acionamento, o controlador

atua no sentido de viabilizar esta partida utilizando a estratégia a seguir. A figura 4.10 mostra o painel frontal do equipamento.



Figura 4.10 - Painel frontal do controlador de carga (Enersud).

O aerogerador será acionado pelo vento sem que haja nenhuma carga acoplada a ele permitindo assim um início de operação mais rápido. Quando o alternador atinge a tensão próxima de 180 volts o controlador fará o acoplamento automático entre o alternador e o motor da bomba, e a partir deste ponto o motor estará girando em função da rotação do aerogerador.

Se o vento não estiver com velocidade adequada para sustentar este acoplamento o controlador de carga automaticamente fará este desacoplamento permitindo que o aerogerador ganhe mais velocidade para novamente acionar a bomba (ENERSUD, 2007).

4.2.6 Torre utilizada

Para a instalação do gerador eólico foi utilizada uma torre treliçada de 10 metros de altura, localizada em frente ao açude do campus do Pici da UFC. A escolha desse tipo de torre deve-se a algumas vantagens tais como: instalação rápida, fácil escalada para fins de manutenção e instalação. Para erguer o aerogerador até o topo da torre foi desenvolvido um sistema de roldana conectado a um braço para sustentação, como mostra a figura 4.11.

A torre é composta por 5 seções de 2 metros de comprimento, conectadas por parafusos galvanizados, totalizando uma altura de 10 metros. No topo da torre foi instalado um mastro

de 1,5 metros para a fixação do aerogerador, a fim de deixar uma distância entre as pás do aerogerador e a torre, garantindo que não haverá contato entre as mesmas. Complementando a fixação da torre, foram utilizado 3 estais e cabos para maior sustentação e equilíbrio.



Figura 4.11 – Sistema de roldana para erguer o gerador ao topo da torre.

Na figura 4.12 observa-se a torre para sustentação do aerogerador com seus cabos e estais para sustentação e ao lado um mastro que foi utilizado para fixação do anemômetro. Pode-se também perceber a facilidade de escalada na torre para instalação ou possível manutenção do gerador.



Figura 4.12 – Torre de sustentação do gerador eólico.

4.2.7 Medição de Vazão

Existe uma variedade de tipos de medidores de vazão, desde os simples aos mais sofisticados, para as mais diversas aplicações. A escolha sempre irá depender do fluido, do seu estado físico (líquido ou gás), das características de precisão e confiabilidade desejadas além de outros fatores.

A qualidade da medição da vazão depende das técnicas de medição, e os principais fatores intervenientes são: o conhecimento do comportamento do fluido que se deseja medir a vazão, as condições físicas deste fluido no ponto da medição, a forma construtiva do medidor e até mesmo a condição de instalação do medidor. As principais unidades para medição de vazão são: **m³/h** (metros cúbicos por hora), **l/h** (litros por hora), **l/min** (litros por minuto), **l/s** (litros por segundo), **gpm** (galões por minuto) e **gph** (galões por hora).

Neste trabalho foi utilizado o sensor de vazão modelo 2537 da *George Fischer Signet, Inc.*, como visto na figura 4.13. A medição de vazão baseia-se na medição da velocidade do fluido na tubulação, que é feita pelo rotor magnético. Um sinal senoidal, cuja frequência e amplitude são proporcionais à velocidade, é gerado à medida que as palhetas do rotor (que possuem em seu interior uma placa de metal magnetizada) passam por uma bobina localizada no interior do corpo do sensor. Este sinal é então processado pelo circuito eletrônico e transformado em um sinal de corrente 4-20 mA que será proporcional à vazão medida, sendo compatível com diversos dispositivos como CLPs, indicadores, *dataloggers*, etc.



Figura 4.13 - Sensor de vazão.

Este tipo de medidor de vazão é ideal, por apresentar fácil instalação e manuseio, além de boa relação custo-benefício. Tem a funcionalidade adicionada de várias opções da saída, é

de fácil instalação, fácil programação, baixa potência, alta resolução e pode ser configurado diretamente no local de sua instalação.

4.2.8 Medição de Pressão

É muito comum confundir-se pressão com força. A pressão, no entanto, leva em conta não só a força como também a área em que ela atua. Pressão é a força dividida pela área. Comparando-se a altura dos reservatórios com a pressão, pode-se observar que a pressão não depende da área, mas somente da altura do reservatório, ou seja, a pressão é proporcional aos metros de coluna de água (mca). Uma vez que as pressões dependem somente de altura da coluna de líquido, pode-se concluir facilmente que as pressões em qualquer ponto no interior do líquido não dependem do formato ou do volume do reservatório (ALOSOLAR, 2008).

Por isso, as unidades usuais de medida de pressão indicam ou força por unidade de área ou altura de coluna de líquido. As mais usuais são: **kgf/cm²** (quilograma-força por centímetro quadrado), **kgf/m²** (quilograma-força por metro quadrado), **lb/sq.in** ou PSI ou **lb/pol²** (libras por polegada quadrada), **mca** (metros de coluna de água), *feet head of water* (pés de coluna de água), **mmHg** (milímetros de coluna de mercúrio).

Vivemos cercados de ar. Como o ar tem peso, ele exerce uma pressão semelhante à exercida pela água. Entretanto o ar, diferentemente da água, se torna cada vez menos denso quanto mais afastado se encontra da superfície da Terra. Assim, a pressão por ele exercida não pode ser medida simplesmente em termos da altura da "coluna de ar" existente sobre um ponto. O valor dessa pressão, medida ao nível do mar, situa-se em torno de 1 kgf/cm². O valor de uma atmosfera física é de 1,0332 kgf/cm² ou 10,332 mca ou 760 mmHg.

Pode-se fazer agora uma distinção entre pressão absoluta e pressão efetiva no interior de um líquido. A pressão absoluta é a pressão total em um ponto qualquer no interior do líquido sendo, portanto, igual à pressão da altura da coluna de líquido somada à pressão atmosférica.

A pressão efetiva, manométrica ou relativa é simplesmente o valor da pressão causada pela altura da coluna de líquido, sendo uma indicação de quanto a pressão no ponto é maior do que a pressão atmosférica. É também chamada manométrica, pois é a indicada pelos manômetros. A figura 4.14 ilustra a relação entre as pressões atmosférica (barométrica), absoluta, manométrica e de vácuo. Têm-se vácuo quando a pressão é inferior à atmosférica, ou seja, pressões efetivas negativas.

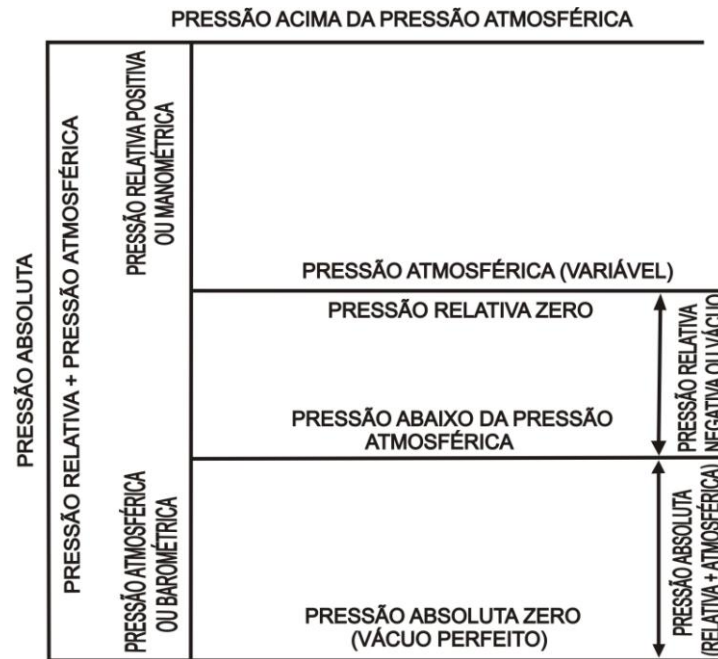


Figura 4.14 - Relações entre as pressões.

Em relação à medida da pressão na tubulação da bomba, foi escolhido para o projeto o transmissor de pressão modelo da série 790 da *Nivetec*, que pode ser visualizado através da figura 4.15. Este instrumento é utilizado no monitoramento contínuo da pressão em processos envolvendo líquidos ou gases, tanques ou reservatórios, tubulações, máquinas, entre outros.

O transmissor de pressão, do tipo piezo-resistivo, mede a pressão do processo ao qual está ligado através de um elemento chamado diafragma. Este encontra-se em contato direto com o meio medido e à medida que a pressão varia, o diafragma é pressionado proporcionalmente. Um pequeno sensor localizado na parte interna do diafragma converte a variação de pressão em uma variação proporcional de resistência elétrica.



Figura 4.15 - Transmissor de pressão.

Um pequeno circuito eletrônico converte este tipo de informação em um sinal proporcional de 4-20 mA, que pode ser ligado a praticamente qualquer tipo de dispositivo de automação, como CLPs, indicadores digitais, etc. Apresenta invólucro e diafragma em aço inox, garantindo sua aplicação com os mais diversos tipos de fluidos. O transmissor é calibrado de fábrica com saída de 4 a 20 mA, não necessitando de qualquer ajuste em campo.

4.2.9 Anemômetro

Uma característica importante do vento é seu comportamento variante ao longo do tempo. Cabe aos instrumentos de medição do vento a tarefa de fornecer, com maior ou menor precisão, as velocidades instantâneas. Isto é feito em geral através da geração de um sinal analógico ou digital, proporcional à velocidade do vento. O principal instrumento para medição de vento é chamado de anemômetro. Os anemômetros podem ser constituídos principalmente por conchas ou hélices.

O anemômetro de conchas pode ser entendido como um pequeno rotor eólico com eixo de rotação vertical. Ao eixo são fixados braços que sustentam as conchas, como visto na figura 4.16. Através da rotação do eixo pode ser gerada uma tensão proporcional à rotação via tacômetro, ou podem ser gerados impulsos por rotação que são contados em um determinado período de tempo. A principal vantagem do anemômetro de conchas é a robustez e o custo, fazendo deste equipamento o mais utilizado em nível mundial (CARVALHO, 2003).



Figura 4.16 - Anemômetro de conchas.

Já o anemômetro de hélice é constituído por um rotor eólico de eixo horizontal, no qual a rotação, quando superado o efeito do atrito do mancal, é linearmente proporcional à velocidade do vento. O anemômetro de hélice pode ser do tipo leme simples, duplo ou formado por um conjunto de três hélices posicionadas em eixos ortogonais. A principal vantagem deste instrumento é a possibilidade de medição da direção do vento via leme junto com a medição da velocidade do vento. A principal desvantagem do anemômetro de hélice com leme simples ou duplo é a instabilidade em situações de turbulência, para acompanhar as variações de velocidade do vento, levando a medições incorretas (CARVALHO, 2006). Nos anemômetros de três eixos ortogonais o problema principal está na correção do sombreamento dos braços de suporte.

Neste projeto foi utilizado um anemômetro de três conchas, modelo 014A *Met One da Campbell Scientific Inc.*, como visto na figura 4.17, instalado no topo de um mastro de 10 metros de construção cilíndrica.

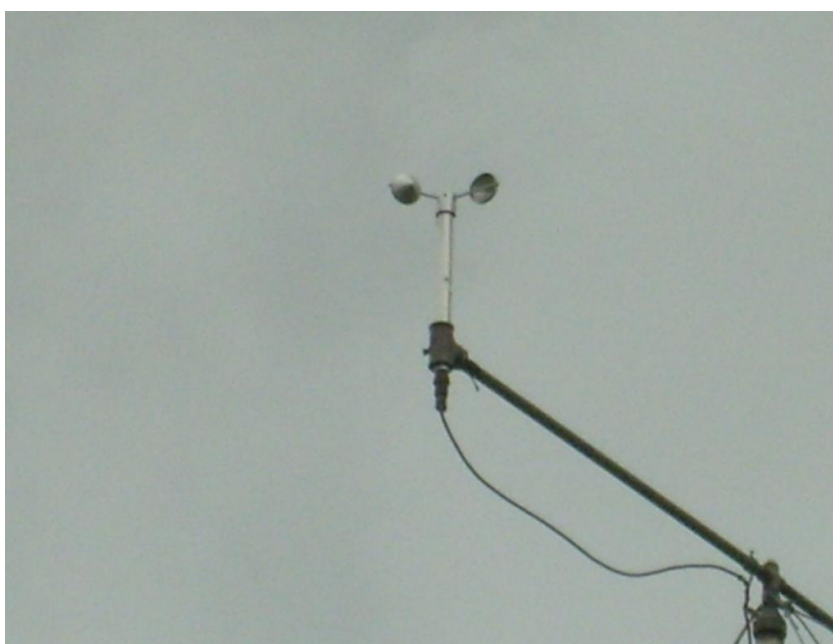


Figura 4.17 - Anemômetro de conchas utilizado.

O melhor local para instalação de um anemômetro é no topo de uma torre de medição, que pode ser de treliça ou de construção tubulares, de modo que o espaçamento necessário e a posição para a instalação dos anemômetros, no topo destas ou sobre travessas horizontais, dependerá do tipo de torre.

4.2.10 Sistema de aquisição de dados (*datalogger*)

Datalogger é um equipamento que contém um sistema programável microprocessado que coleta, armazena e processa dados de outros instrumentos. Através desse sistema, o *datalogger* pode realizar diversas funções, como por exemplo, a contagem de pulsos emitidos pelos instrumentos, sempre que um evento ou medição se repete.

O *datalogger* possui uma unidade de memória que permite reter essas informações e pode se comunicar com um computador através de programas adequados para este fim.

Na utilização deste equipamento encontram-se algumas vantagens, como: os processos de obtenção e armazenamento de dados são mais rápidos que os manuais; obtenção de dados com maior frequência, o que melhora a qualidade dos dados obtidos; possibilidade de transferência dos dados para um computador; resposta em tempo real.

A fim de se adquirir um *datalogger*, alguns fatores devem ser levados em consideração, são eles: facilidade de programação para monitoramento; capacidade de memória; vida da bateria; exatidão do sensor; tamanho do equipamento; tipo de *display* (exibição); capacidade de alarme e custo. O *datalogger* utilizado neste projeto foi o modelo CR10X da *Campbell Scientific Inc.*, como visto na figura 4.18.

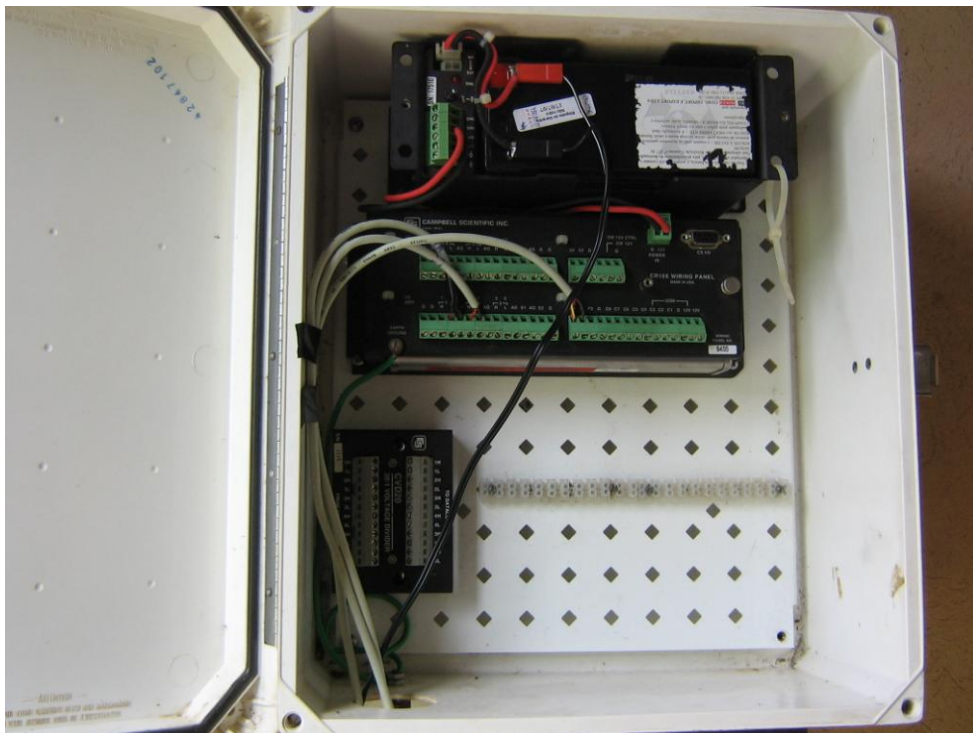


Figura 4.18 - *Datalogger* utilizado no projeto.

Este equipamento possui entradas para diversos tipos de sensores, que podem ser: analógicos, digitais e de pulsos. Para a utilização em sensores analógicos, como por exemplo, os sensores de vazão e pressão utilizados neste projeto, a excitação do *datalogger* é feita através de uma tensão que é convertida em corrente para realizar a leitura da informação. Para entradas digitais o processo é idêntico, a excitação é feita através de sinais digitais (binários). Já nos sensores que emitem pulsos conectados ao *datalogger*, por exemplo, o anemômetro 014 A, a excitação se dá através de pulsos elétricos a cada volta realizada pelas conchas. A figura 4.19 mostra todas as entradas disponíveis no *datalogger* utilizado.

A alimentação do *datalogger* é feita através de uma bateria de 12 V conectada diretamente aos terminais G e 12 V, como visto na figura 4.19. Outra entrada importante encontrada na figura 4.19 é a porta serial. Na verdade esta porta pode se comportar como entrada e saída de dados. Através desta porta, o *datalogger* pode se comunicar com um computador através do programa específico fornecido pelo fabricante.

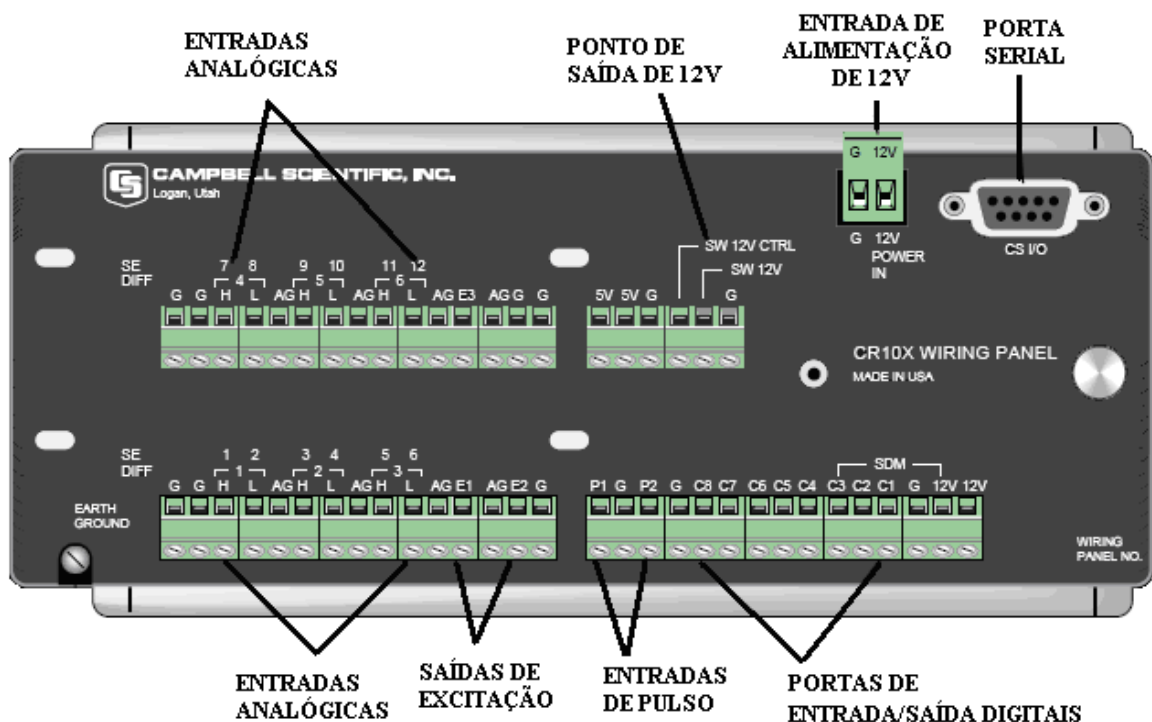


Figura 4.19 - Painel de entradas do *Datalogger*.

O sistema completo das ligações dos sensores ao *datalogger* pode ser observado na figura 4.20.

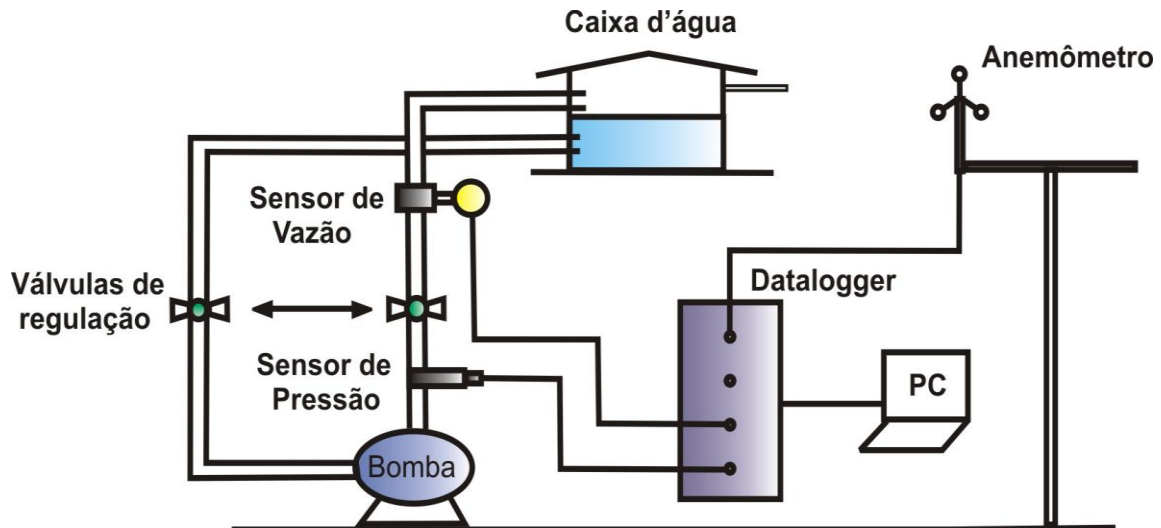


Figura 4.20 - Diagrama de ligação ao *Datalogger*.

O *software* fornecido pelo fabricante possui janelas de fácil manipulação para o operador. O mesmo *software* possui um campo que permite escrever os programas para os respectivos sensores. Na presente pesquisa foram utilizados os sensores de pressão, vazão e o anemômetro e para cada um deles foram desenvolvidas linhas de programa através de códigos específicos fornecidos no manual do equipamento. A seguir são mostradas as linhas dos programas utilizados para cada sensor.

4.2.11 Programação dos Sensores

As linhas de programa descritas logo abaixo foram utilizadas no *datalogger* CR-10X para coletar os valores medidos a partir dos sensores de pressão, vazão e anemômetro. As saídas dos sensores de pressão e vazão são do tipo analógicas, devendo ser conectadas às entradas analógicas do *datalogger*, enquanto que no anemômetro a saída do sinal é do tipo pulsada, sendo sua conexão ligada às entradas de pulso do *datalogger*.

Linhas do programa utilizado para as coletas de informações de velocidade do vento, pressão e vazão.

```
};{CR10X}
```

*Table 1 Program

1: 3 Execution Interval (Seconds)

1: Volt (diff) (P2)

1: 1 Repts

2: 5 2500mV Slow range

3: 2 Diff Channel

Primeira linha: Intervalo de execução das leituras.

- 4: 3 *Loc [Tensao_Va]*
 5: 1 *Multiplier*
 6: 0 *Offset*
- 2: *Volt (diff) (P2)*
 1: 1 *Reps*
 2: 5 *2500mV Slow range*
 3: 1 *Diff Channel*
 4: 28 *Loc [Tensao_Pr]*
 5: 1 *Multiplier*
 6: 0 *Offset*

Código (P2): Responsável pelo processamento de entradas analógicas. Fornece como saída uma tensão. Neste código pode-se configurar alguns parâmetros como: canal receptor do *datalogger*, faixa de tensão fornecida.

3: *Batt Voltage (P10)*

- 1: 1 *Loc [Batt_Volt]*

4: *Pulse (P3)*

- 1: 1 *Reps*
 2: 1 *Pulse Channel 1*
 3: 22 *Switch Closure, Output Hz*
 4: 2 *Loc [Anem]*
 5: 0,8 *Multiplier*
 6: 0,447 *Offset*

O código (P-10) indica a tensão instantânea da bateria.

5: *End (P95)*

6: *If Time is (P92)*

- 1: 0 *Minutes (Seconds) into a*
 2: 60 *Interval (Same units as above)*
 3: 10 *Set Output Flag High*

O código (P3) é utilizado para ler sinais pulsados, como por exemplo, os sinais emitidos pelo anemômetro. Este código permite selecionar o canal desejado e através dos comandos *Multiplier* e *Offset*, pode-se definir a unidade de medição desejada. Neste caso o *datalogger* fornece valores em metros por segundo (m/s)

7: *Real Time (P77)*

- 1: 1220 *Year, Day, Hour/Minute (midnight = 2400)*

8: *Average (P71)*

- 1: 1 *Reps*
 2: 2 *Loc [Anem]*

O código (P77) define o ano, dia e hora local.

9: *Average (P71)*

- 1: 1 *Reps*
 2: 3 *Loc [Tensao_Va]*

10: *Average (P71)*

- 1: 1 *Reps*
 2: 28 *Loc [Tensão_Pr]*

O código (P71) é responsável por calcular a média no intervalo de 1 minuto das informações oriundas do anemômetro, medidor de vazão e pressão.

Pode-se verificar que as linhas de programa são numeradas de 1 a 10 e divididas em códigos. Por exemplo, o código (P3) na linha 4 é responsável pela leitura de pulsos emitidos por sensores tipo o anemômetro, enquanto que o código (P2) nas linhas 1 e 2, é responsável por receber dados de tensões analógicas transmitidas pelos sensores de pressão e vazão. Através deste programa podem-se obter também informações sobre a tensão momentânea da bateria do *datalogger*, assim como, definir os intervalos de coleta de dados armazenados.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo mostra os dados obtidos do experimento durante o período de dois meses no ano 2008, referentes ao sistema de bombeamento de água a partir de um aerogerador síncrono de ímã permanente, localizado em frente ao açude do campus do Pici da UFC. Este capítulo também trata das análises das informações obtidas e das condições de projeto do sistema de bombeamento.

5.1 Condições de projeto

O objetivo do projeto é analisar o rendimento de um sistema de bombeamento de água acionado por um aerogerador de pequeno porte, com as condições de vento encontradas em frente ao açude do campus da UFC. Para a escolha do aerogerador levou-se em consideração a potência gerada, a tecnologia empregada (ímãs permanentes) e a por ser fabricada no Brasil. Com isso o aerogerador escolhido é de fabricação da empresa brasileira Enersud, modelo GERAR 246, e de acordo com o fabricante, este tipo de aerogerador é muito utilizado em aplicações de bombeamento de água, reforçando ainda mais o motivo da escolha.

O aerogerador possui um motor síncrono de ímã permanente de fluxo axial de 1 kW, que utiliza uma turbina de três pás de fibra de vidro com 2,46 m de diâmetro. Este gerador está conectado a um controlador de carga, também de fabricação Enersud, que funciona como um regulador de tensão e frequência, garantindo que o conjunto motor-bomba funcione somente com uma frequência próxima de 60 Hz e tensões a partir de 180 V. O experimento está situado em frente ao açude do campus do Pici da UFC em terreno cedido pelo Departamento de Engenharia de Pesca, onde as condições de vento são favoráveis durante a maior parte do ano.

O motor-bomba utilizado possui bomba centrífuga e motor de 0,5 cv de potência capaz de bombear água para uma faixa de altura de 4 a 22 metros, operando com vazões que variam de 0,8 a 9 metros cúbicos por hora. A escolha por esse motor-bomba se deu principalmente pelo preço e facilidade de manutenção.

5.2 Considerações iniciais

O projeto do sistema de bombeamento passou por duas etapas. A primeira etapa e idéia inicial foi obter uma parceria com Departamento de Agronomia da UFC para doar parte do terreno localizado próximo ao prédio principal do curso de Agronomia, para ser instalado o sistema de bombeamento. Em troca o sistema de bombeamento montado seria usado para irrigação das plantações que envolviam pesquisas dos alunos do curso de Agronomia.

Com parte do terreno acertado começaram as obras de alvenaria para montagem do laboratório onde seriam colocados os equipamentos de medição e o conjunto motor-bomba. Acima do laboratório foi colocada uma caixa d'água de 750 litros para armazenagem da água bombeada. Terminada as obras seguiu-se para a instalação do aerogerador no topo de uma torre treliçada de 10 m de altura, próxima a uma cacimba que existe no local, de onde o conjunto motor-bomba retiraria a água para a irrigação. A água seria bombeada a uma altura manométrica de aproximadamente 8 m e seria armazenada na caixa d'água, de onde sairia por gravidade para as plantações. Toda essa instalação demorou cerca de dois meses para ficar concluída.

Após dois meses de experimento, foi percebido que os resultados não estavam sendo satisfatórios, pois a frequência do acionamento do conjunto motor-bomba estava muito baixa, não sendo suficiente para atender a vazão da irrigação. Com isso foi tomada a decisão para transportar todo o sistema para outro local dentro do campus da UFC, iniciando assim a segunda etapa do projeto.

Após dois meses parado conseguiu-se um novo local agora cedido pelo Departamento de Engenharia de Pesca da UFC, para dar continuidade ao experimento. A área possui melhores condições de vento em comparação com o primeiro local, principalmente por estar localizado em frente ao açude do campus do Pici. Depois de aproximadamente dois meses, montou-se novamente todo o sistema de bombeamento com todos os equipamentos mostrados no capítulo 4, mas desta vez com algumas mudanças. A maior mudança foi a não disponibilização de um poço ou cacimba no local para a sucção da água, interrompendo a idéia principal de bombeamento de água.

Com isso, devido aos prazos para a entrega do trabalho não foi possível a perfuração de um poço no local, e com isso decidiu-se obter os dados experimentais através do sistema de circulação da água como mostrado a figura 4.19. Isso acarretou em uma perda considerável de rendimento do conjunto motor-bomba, pois o mesmo operou com altura manométrica abaixo da mínima indicada pelo fabricante que é de 4 metros. Considerando a perda de carga

localizada nas curvas do encanamento, calcula-se o valor aproximado de 2 metros para a altura manométrica utilizada neste experimento. Logo os dados coletados do experimento foram retirados somente dos meses de maio e julho de 2008, para não ultrapassar o prazo de entrega do trabalho estipulado pelo departamento, mesmo sabendo que o tempo ideal para estudos do comportamento dos ventos no local e para a obtenção do rendimento do sistema de bombeamento através de um aerogerador de pequeno porte, é de pelo menos um ano.

Outros problemas que também foram encontrados durante o período de medição e que atrasaram ainda mais a conclusão do experimento foram: a substituição das pás do aerogerador por outras novas devido ao choque das mesmas com a torre treliçada. Isso ocorreu devido as rajadas de vento no local. E o reparo do analisador de energia que deixou de funcionar e teve que ser transportado de volta para o fabricante em Porto Alegre, para manutenção. O problema mais grave encontrado foi a queda da torre treliçada que sustentava o aerogerador no mês de agosto de 2008, interrompendo de vez a coleta dos dados. A queda provocou vários prejuízos como: danificações das pás e leme do aerogerador, e a quebra das conchas do anemômetro.

Essas informações devem ser levadas em consideração nos gráficos dos dados coletados, na forma como o sistema foi montado e nos resultados obtidos que estão apresentados neste capítulo.

As informações coletadas foram realizadas no período de aproximadamente 60 dias correspondentes aos meses de maio e julho de 2008, que correspondem respectivamente ao final do período úmido e início do período seco no estado do Ceará. No período úmido são encontradas baixas velocidades médias de vento, enquanto que no início do período seco encontram-se altas velocidades médias de vento. O objetivo é comparar os dados coletados e os rendimentos nos meses citados.

Os principais dados coletados para análise são referentes a velocidade do vento, vazão de bombeamento, potência disponível pelo vento e potência fornecida pelo conjunto turbina eólica- gerador elétrico e pelo conjunto motor-bomba. São mostrados inicialmente os dados obtidos em um intervalo de tempo entre 35 e 45 minutos dentro dos meses considerados, assim como os rendimentos encontrados. Este foi um período de tempo escolhido dentro dos dados brutos obtidos no analisador de energia no período de dois meses de coleta, por ser um período encontrado de maior estabilidade dos valores de velocidade do vento, permitindo uma operação do conjunto motor-bomba sem interrupções.

5.3 Dados coletados no mês de Maio/2008

O mês de maio está representando no experimento o período onde se encontram baixas velocidades de vento no estado do Ceará. Para análise do sistema de bombeamento de água neste mês foram coletadas as seguintes informações no intervalo de tempo de 35 minutos:

5.3.1 Velocidade do vento

As velocidades máxima e mínima de vento registradas no período escolhido foram de 7,02 e 3,02 m/s, tendo uma média aritmética de 4,78 m/s. A figura 5.1 mostra um gráfico da velocidade média do vento de cada minuto no intervalo de 35 minutos.

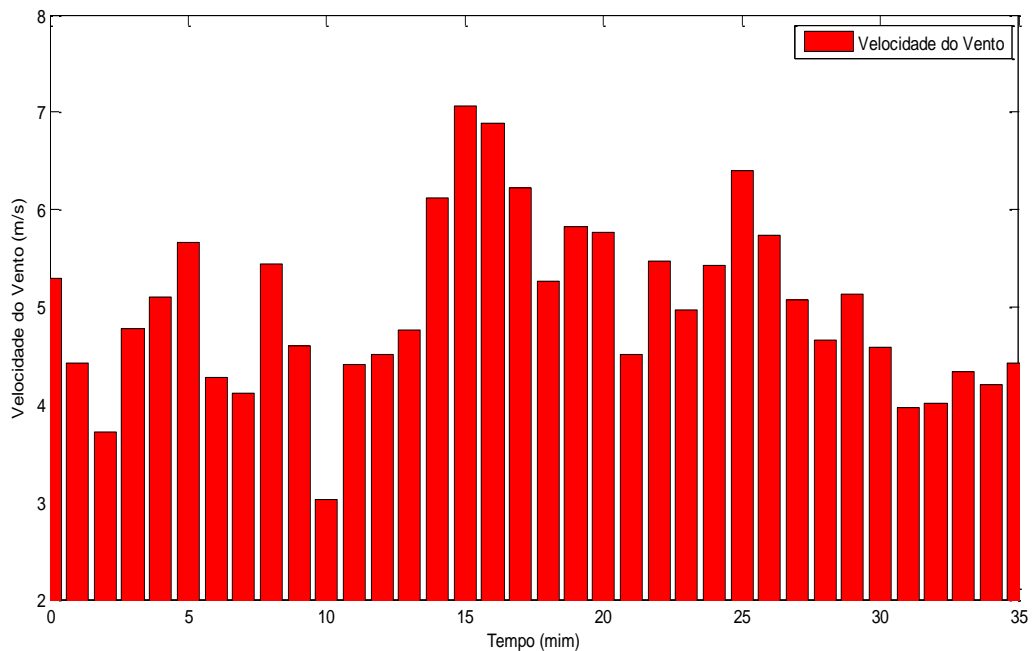


Figura 5.1: Distribuição da velocidade do vento (maio/2008).

Nota-se através do gráfico da figura 5.1, o comportamento intermitente da velocidade do vento ao longo do período (altura de dez metros).

5.3.2 Potência eólica

A potencia disponível no vento, também chamada de potência eólica, é calculada pela seguinte equação:

$$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5.1)$$

em que ρ representa a densidade do ar, A é a área da seção transversal formada pelo giro das pás do aerogerador e v a velocidade do vento que atinge as pás. Para a densidade do ar foi considerado o valor de $1,15 \text{ kg/m}^3$, que está dentro da faixa de valores (1,05 a 1,16) encontrados no estado do Ceará (CARVALHO, 2003), sendo maior o valor encontrado ao nível do mar. Em relação à área da seção transversal, foi utilizado o diâmetro fornecido pelo fabricante de 2,46 m. A figura 5.2 mostra o gráfico da distribuição da potência eólica no intervalo de 35 minutos.

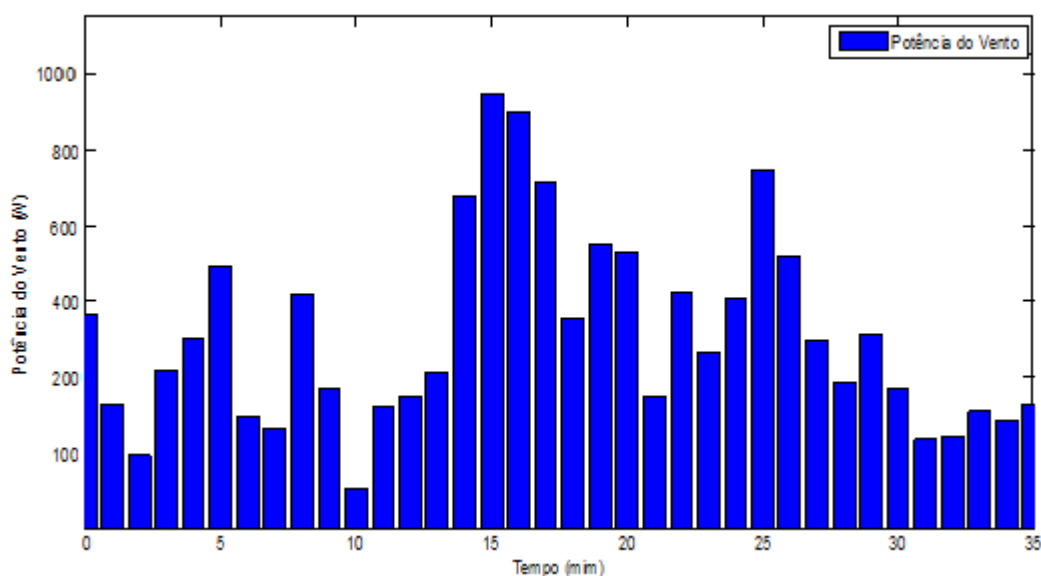


Figura 5.2: Distribuição da potência eólica (maio/2008).

Analisando a figura 5.2 observa-se que a potência eólica máxima calculada foi de 945 W e a mínima de 75,23 W, tendo uma média aritmética no período de 263,3 W. Nota-se que há uma variação muito elevada nos valores de potência no período, devido à grande variação da velocidade do vento e a dependência ao cubo da potência com a velocidade do vento.

5.3.3 Potência elétrica

Estes dados mostram a potência elétrica fornecida pelo gerador ao conjunto motor-bomba, no mês considerado, os quais foram coletados pelo analisador de energia. A figura 5.3 mostra os valores obtidos no período de 35 minutos.

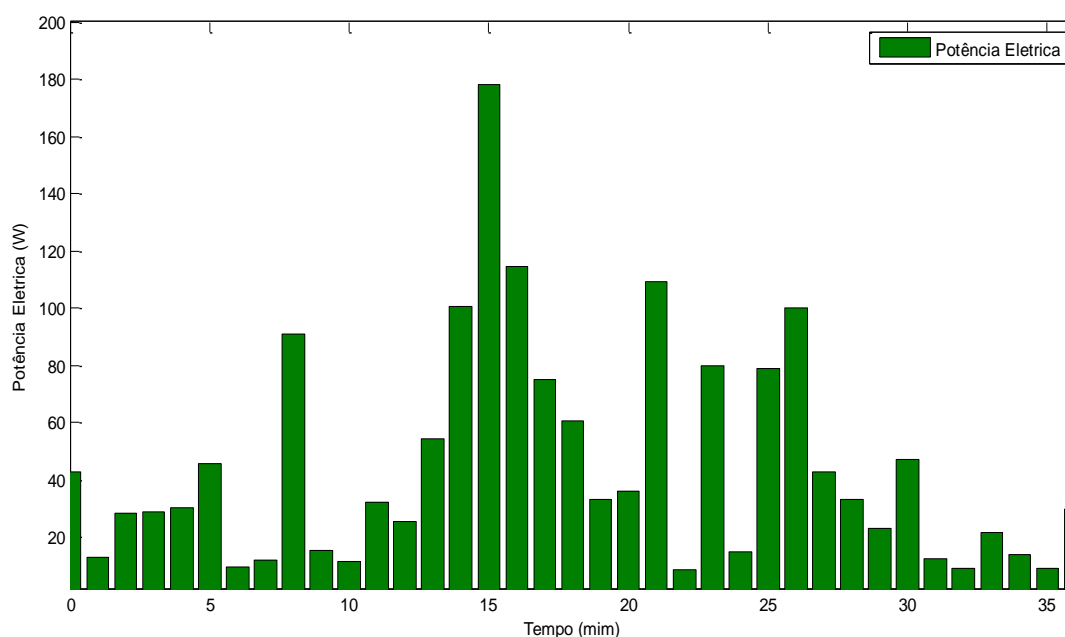


Figura 5.3: Distribuição da potência elétrica fornecida (maio/2008).

Observa-se no gráfico que a potência máxima gerada registrada no período foi de 178,2 W e a mínima de 8,3 W, tendo uma média aritmética no período de 32,17 W. A redução verificada entre os valores de potência eólica e os de potência elétrica entregue pelo gerador é explicada pelos mecanismos de perdas verificados ao longo dos processos de conversão de energia, tais como:

- Perdas aerodinâmicas a nível das pás, traduzidas através do chamado coeficiente de potência (c_p);
- Perdas elétricas no gerador e na fiação.

5.3.4 Vazão

Em relação à vazão, foram registrados valores em litros por hora (l/h) que podem ser visualizados na figura 5.4. Observa-se que a vazão máxima obtida foi aproximadamente de 800 l/h e a mínima de 25 l/h, fazendo uma média aritmética no mês de 358 l/h. O intervalo de tempo de 35 minutos foi o maior tempo de operação do conjunto motor-bomba sem interrupção, encontrado nos dados brutos coletados neste mês, devido às condições de vento encontradas.

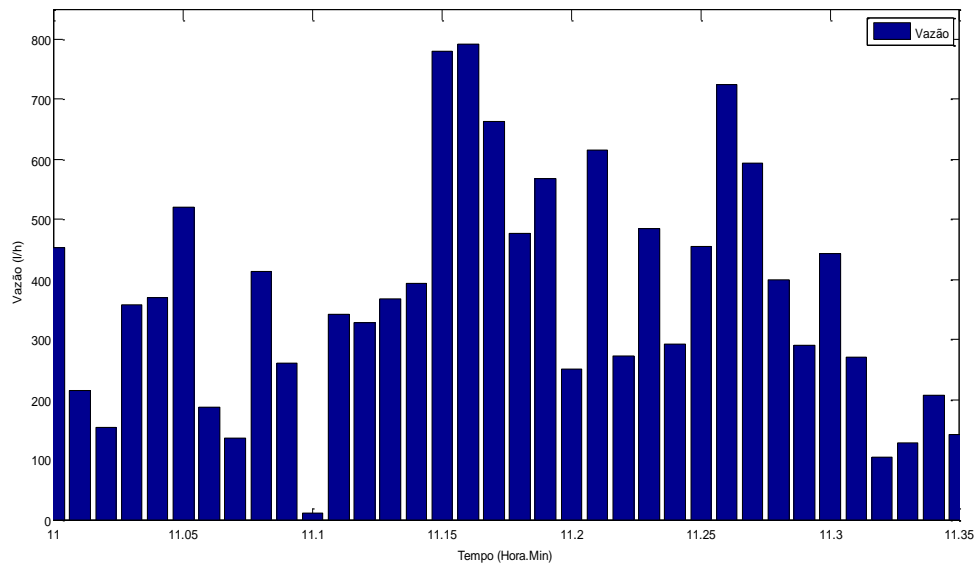


Figura 5.4: Distribuição da vazão ao longo do período (maio/2008).

Na figura 5.4 pode-se perceber que foi de 11:00h as 11:35h o maior período de operação do conjunto motor-bomba sem interrupção; na figura 5.5 pode-se visualizar conjuntamente a variação dos parâmetros da forma como foram coletados pelos sensores (dados brutos) citados no mesmo intervalo de tempo, facilitando a comparação.

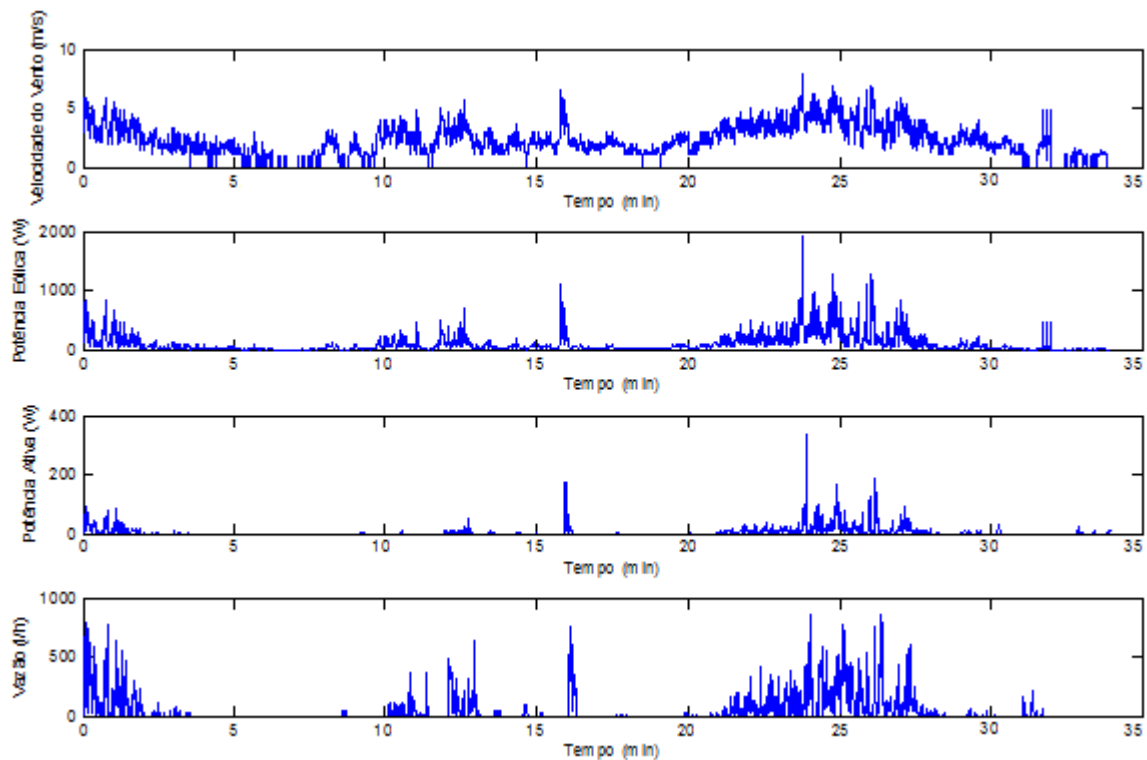


Figura 5.5: Curvas obtidas pelo datalogger e analisador de energia – dados brutos (maio/2008)

Como já observado nos gráficos anteriores, nota-se na fig. 5.5 que houve uma operação descontínua do conjunto motor-bomba, devido às baixas velocidades de vento encontradas. Foi percebido que o conjunto motor-bomba só começa a entrar em operação com velocidades de vento próximas de 5 m/s, e que a vazão máxima obtida nos momentos de operação não ultrapassa os 800 l/h.

5.4 Dados coletados no mês de Julho/2008

Este mês está representando o período de ventos fortes no estado do Ceará. Para análise do sistema de bombeamento de água neste mês foram coletadas informações em um intervalo de tempo de 45 minutos, pois foi o maior período de tempo encontrado onde houve bombeamento sem interrupções. Para análise de comparação foram coletados os mesmos dados referentes ao mês de maio, mostrados em seguida.

5.4.1 Velocidade de vento

As velocidades máxima e mínima de vento registradas no período escolhido foram de 10,2 e 4,2 m/s, tendo uma média aritmética no período de 7,2 m/s. A figura 5.6 mostra o gráfico da velocidade média do vento de cada minuto no intervalo de 45 minutos. Através deste gráfico pode-se visualizar um aumento considerável da velocidade do vento comparada a maio/2008, mantendo o comportamento variável ao longo do tempo.

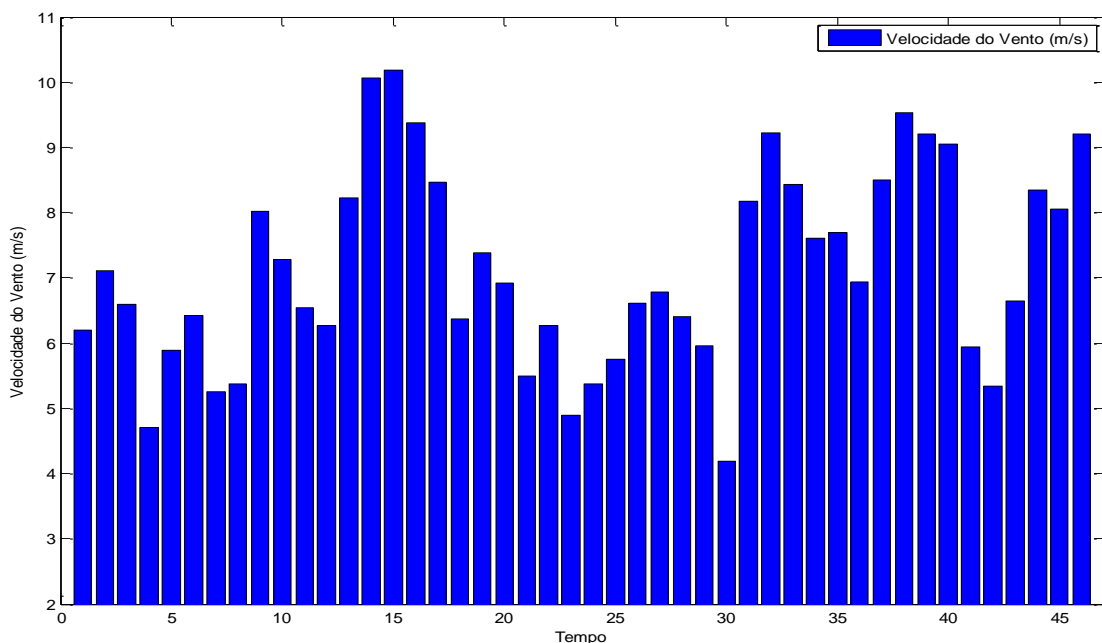


Figura 5.6: Distribuição da velocidade do vento (julho/2008).

5.4.2 Potência eólica

Para o cálculo da potência eólica foi utilizada a equação indicada no item 5.2.2, que calcula a potência disponível contida no vento. A figura 5.7 mostra o gráfico da distribuição da potência eólica no intervalo de 45 minutos.

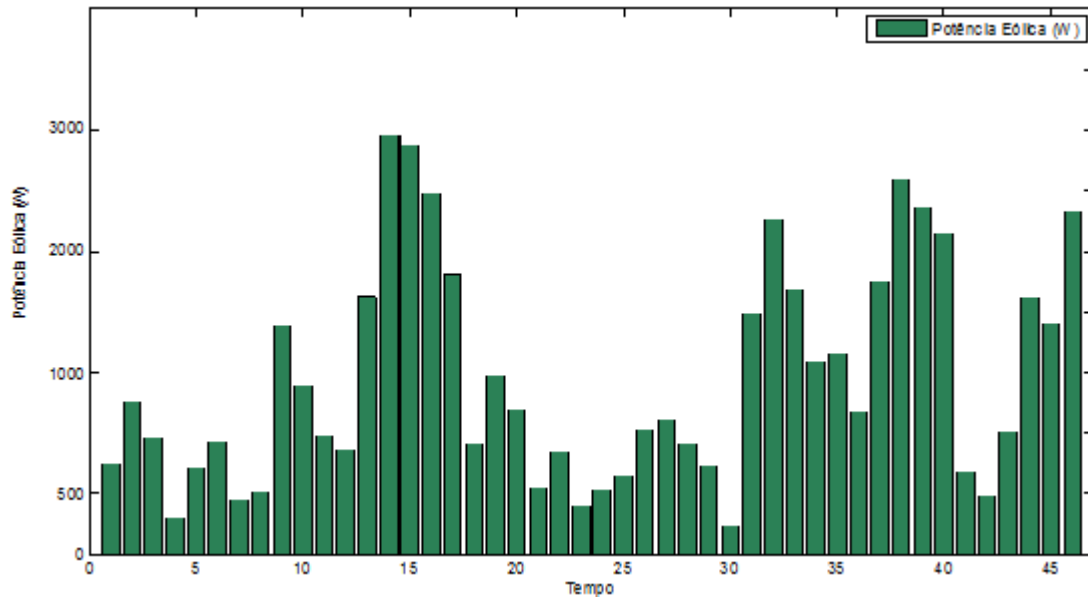


Figura 5.7: Distribuição da potência eólica (julho/2008).

Analisando a figura 5.7 observa-se que a potência eólica máxima calculada foi de 2898 W e a mínima de 202,37 W, tendo uma média aritmética de 727,2 W neste mês. Nota-se que há também uma variação muito elevada nos valores de potência no período e um aumento visível na potência, comparada a maio/2008.

5.4.3 Potência elétrica

Estes dados, coletados pelo analisador de energia, mostram a potência elétrica fornecida pelo gerador ao conjunto motor-bomba, no período mencionado. A figura 5.8 mostra os valores obtidos no período de 45 minutos. Observa-se no gráfico que a potência máxima gerada registrada no período foi de 533,4 W e a mínima de 25 W, tendo uma média aritmética aproximada de 156 W. Em relação ao mês de maio/2008 houve um aumento na potência média de aproximadamente 124 W.

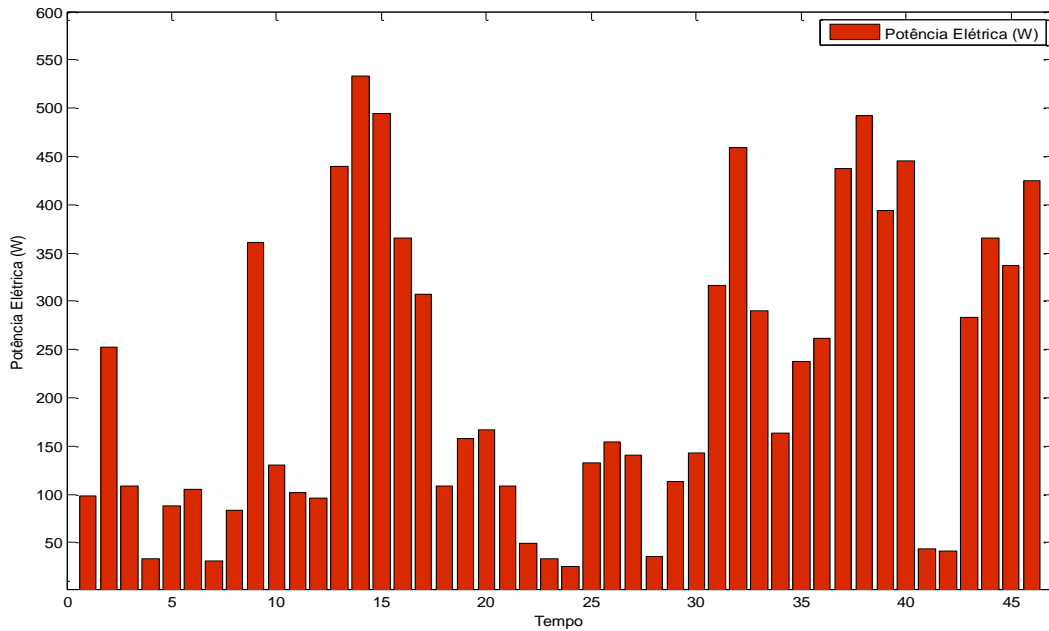


Figura 5.8: Distribuição da potência elétrica gerada (julho/2008).

5.4.4 Vazão

Em relação à vazão, foram registrados valores em litros por hora (l/h) que podem ser visualizados na figura 5.9. Observa-se que a vazão máxima obtida foi de 874 l/h e a mínima de 223 l/h, tendo uma média aritmética aproximada de 540 l/h no período.

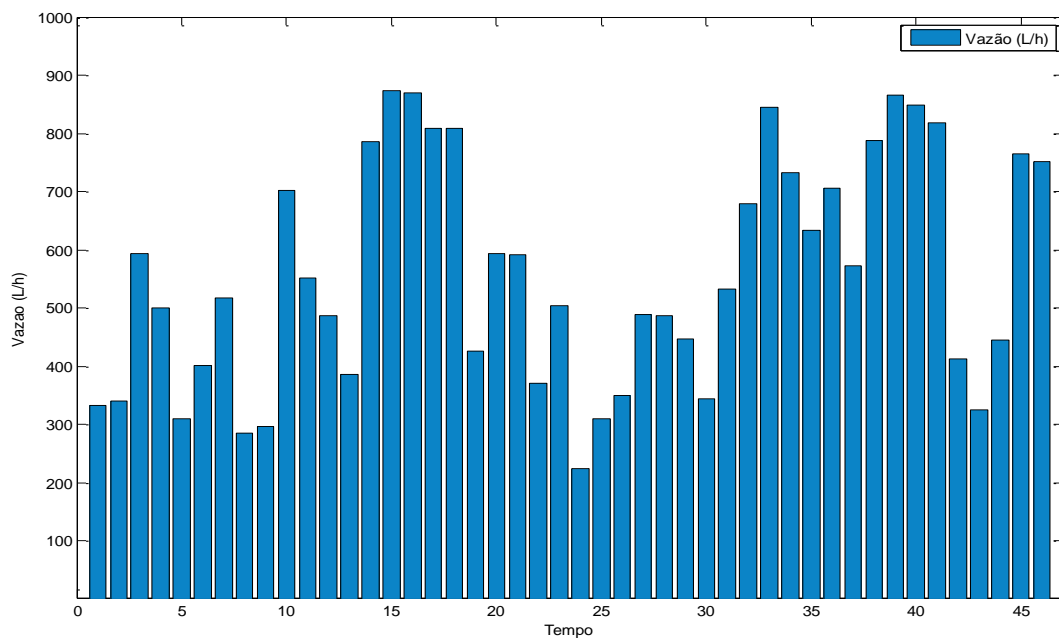


Figura 5.9: Distribuição da vazão ao longo do período (julho/2008).

Para efeito de comparação e visualização, os dados brutos de velocidade do vento, potências e vazão no mês de julho/2008, são apresentados conjuntamente na figura 5.10. Nota-se maiores velocidades de vento em relação ao mês de maio/2008, conseqüentemente houve um maior tempo de operação do conjunto motor-bomba.

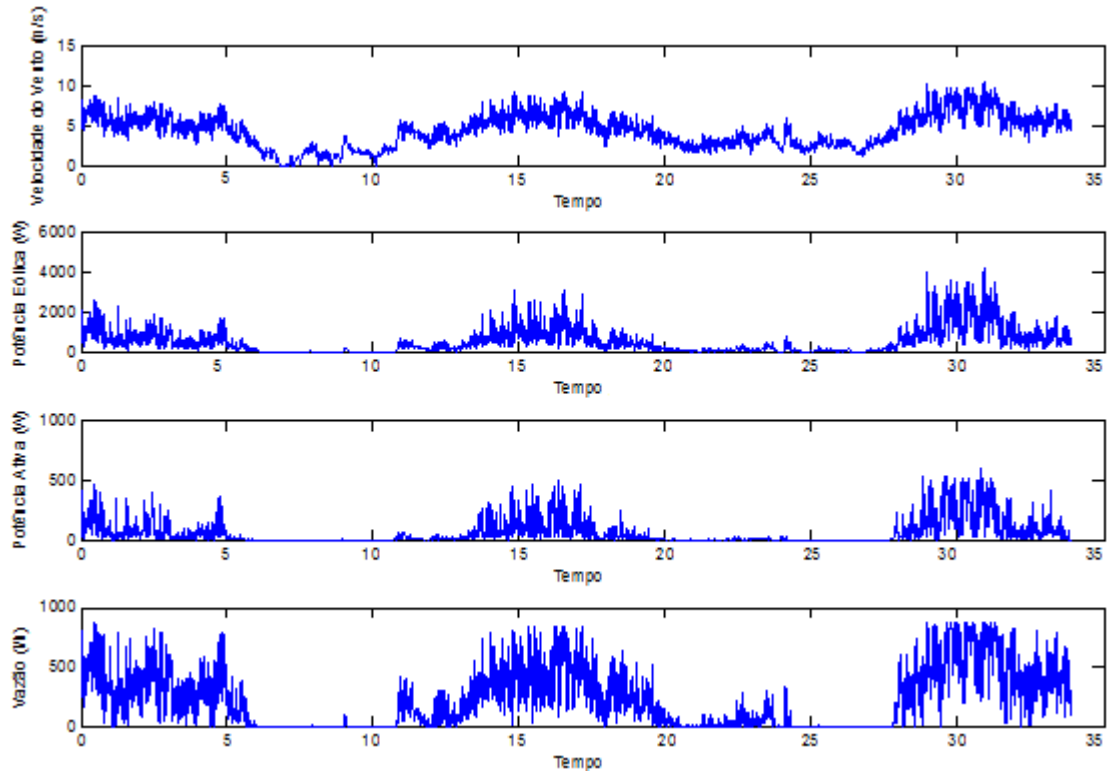


Figura 5.10: Curvas obtidas pelo *datalogger* e analisador de energia – dados brutos (julho/2008).

Percebe-se que para velocidades do vento em torno de 10 m/s e uma potência ativa gerada de aproximadamente 500 W, pode ser bombeado água a uma vazão em torno de 800 litros por hora.

5.5 Comparação dos resultados obtidos nos meses de Maio/2008 e Julho/2008

A tabela 5.1 mostra de forma resumida uma comparação entre os dados obtidos de velocidades do vento, potência eólica, potência elétrica e vazão nos meses de maio e julho de 2008. Nota-se no mês de julho os seguintes aumentos comparado ao mês de maio: um aumento de 2,42 m/s em relação à velocidade média do vento; 464 W em relação à potência eólica; 123,83 W em relação à potência elétrica gerada e 182 l/h em relação à vazão.

Tabela 5.1 – Comparação dos resultados obtidos (maio e julho/2008)

<i>DADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO</i>			
<i>MAIO DE 2008</i>			
Parâmetro	Máxima	Mínima	Média
Velocidade do vento (m/s)	7,02	3,02	4,78
Potência Eólica (W)	945	75,23	263,3
Potência Elétrica (W)	178,2	8,3	32,17
Vazão (l/h)	800	25	358
<i>JULHO DE 2008</i>			
Parâmetro	Máxima	Mínima	Média
Velocidade do vento (m/s)	10,2	4,2	7,2
Potência Eólica (W)	2898	202,37	727,2
Potência Elétrica (W)	533,4	25	156
Vazão (l/h)	874	223	540

5.5.1 Comparação da distribuição de frequência de velocidade do vento

Através das figuras 5.11 e 5.12 pode-se visualizar a distribuição de frequência da velocidade do vento no mês de maio e julho de 2008, respectivamente.

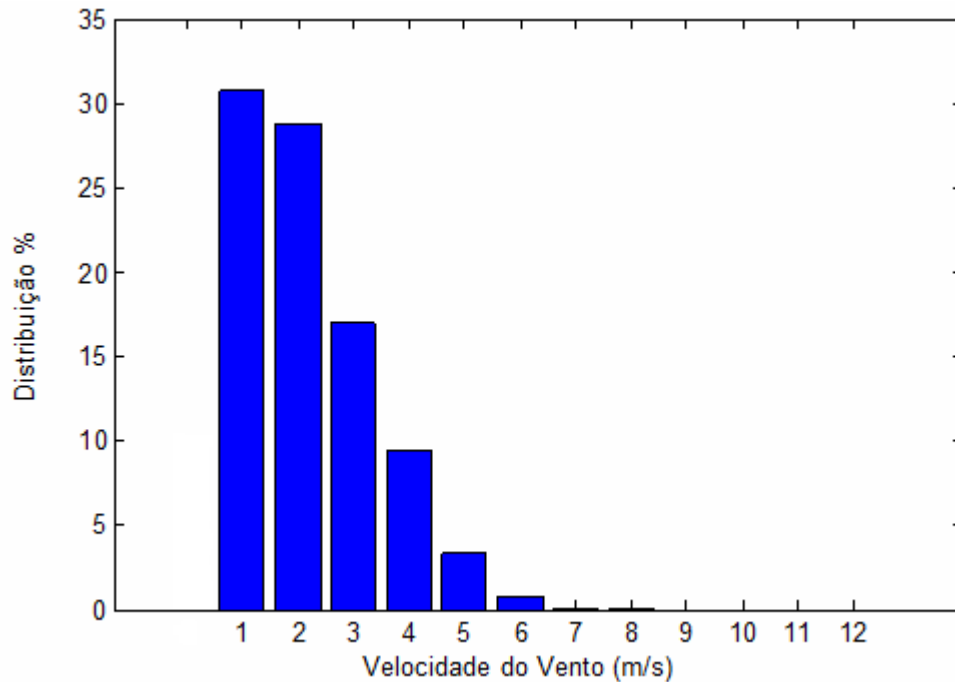


Figura 5.11: Distribuição de frequência da velocidade do vento (maio/2008)

Observa-se na figura 5.11 que as velocidades de 1 m/s e 2 m/s foram as que obtiveram as maiores participações em todo o período de 30 dias, correspondente ao mês de maio de 2008. A velocidade média do vento de 1 m/s atingiu a marca de 31% do período, seguida da velocidade de 2 m/s com 28% e da velocidade de 3m/s com 16% do período.

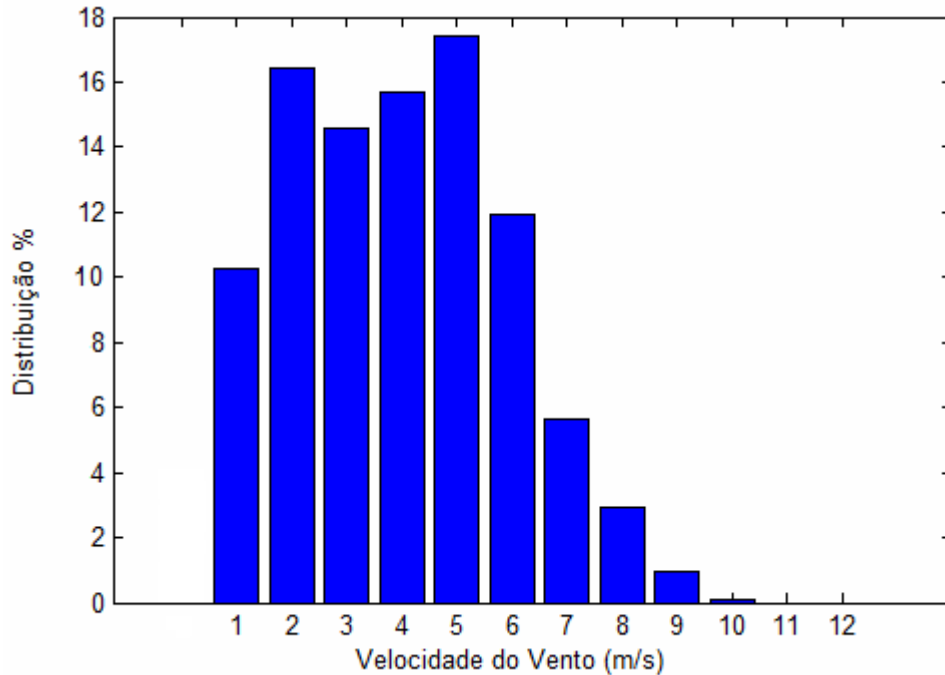


Figura 5.12: Distribuição de frequência da velocidade do vento (julho/2008)

Na figura 5.12 tem-se o gráfico da distribuição da frequência da velocidade do vento referente ao período de 30 dias correspondente ao mês de julho de 2008. Observa-se que existe uma faixa de velocidades bem mais distribuída que a da figura 5.11, com destaque para quatro velocidades. A que obteve a maior participação percentual foi a velocidade média do vento de 5 m/s, com 17,7% do período, seguida de 2 m/s com 16,6%, depois a de 4 m/s com 15,8% e a de 3 m/s com 14,8%.

5.6 Rendimento do conjunto motor-bomba

O rendimento de uma bomba é a relação entre a potência fornecida pela bomba ao líquido (potência útil) e a cedida à bomba pelo eixo girante do motor (potência motriz). A equação 5.2 mostra o rendimento do conjunto motor-bomba através do acionamento por um gerador eólico síncrono de ímã permanente.

$$\eta = \frac{\gamma Q H}{3600 P_m} \quad (5.2)$$

Em que γ é o peso específico do líquido em kgf/m^3 , η é o rendimento do conjunto motor-bomba, Q é a vazão em m^3/h , H é a altura manométrica em metros de coluna de água (mca) e P_m é a potência fornecida pelo motor à bomba em cv (LABEFEA, 2008). O peso específico da água utilizado nos cálculos vale 1.000 kgf/m^3 e a altura manométrica utilizada foi de 2 metros.

5.7 Rendimentos referentes ao mês de Maio/2008

Para o cálculo do rendimento do conjunto motor-bomba no período mencionado, foi considerada a altura manométrica de 2 metros utilizada, potência média fornecida ao motor de 32,17 W e vazão média de 358 l/h. O rendimento encontrado foi de 6,17%.

Em relação ao rendimento da conversão eólico-elétrica, foram considerados os valores de 32,17 W e 263,3 W correspondentes aos valores médios da potência gerada e potência eólica, respectivamente. O valor calculado foi de 12,2%.

Em cerca de 10,7% do período total considerado o conjunto motor-bomba foi acionado pelo gerador eólico.

O rendimento do sistema (global) é dado pela relação entre a média da potência fornecida ao fluido, chamada aqui de potência hidráulica, e a média da potência eólica. A equação 5.3 mostra esta relação.

$$\eta_{global} = \frac{P_{hidra(média)} = \gamma Q H}{P_{eólica(média)}} \quad (5.3)$$

Onde γ é o peso específico do líquido em kgf/m^3 , Q é a vazão em m^3/s , H é a altura manométrica em metros de coluna de água (mca). Sabendo que o peso específico da água é 1000 kgf/m^3 , a vazão média do mês de maio de 358 l/h, a altura manométrica de 2 metros e a potência média eólica de 263,3 W, calcula-se que o rendimento global é de 0,74%.

5.8 Rendimentos referentes ao mês de Julho/2008

O rendimento encontrado do conjunto motor-bomba no período mencionado, considerando a mesma altura manométrica do mês anterior, com potência média fornecida à

bomba de 156 W e vazão média de 540 l/h, foi de 2%. Nota-se que mesmo com o aumento da potência gerada e da vazão neste mês, houve uma redução do rendimento em relação ao mês de maio, devido a vazão não aumentar consideravelmente para velocidades médias de vento a partir de aproximadamente 5 m/s e a manutenção da altura manométrica de 2 metros.

Em relação ao rendimento da conversão eólio-elétrica, foram considerados os valores de 156 W e 727 W correspondentes aos valores médios da potência gerada e potência eólica, respectivamente. O valor calculado para este rendimento foi de 21,44%.

Considerando o tempo de funcionamento, cerca de 54,57% do período considerado o conjunto motor-bomba foi acionado pelo gerador eólico.

Aplicando-se novamente os valores dos parâmetros correspondentes ao mês de julho, na equação 5.3, encontra-se o rendimento global. Então o valor calculado foi de 0,41%.

5.9 Comentários sobre os rendimentos

Nota-se um rendimento muito baixo em relação à operação do conjunto motor bomba, nos dois meses em questão, devido principalmente, ao funcionamento fora da região de operação nominal e do baixo valor da altura manométrica.

Em relação à conversão eólio-elétrica, tem-se que o valor máximo da conversão aerodinâmica por pás comerciais (coeficiente de potência – c_p) é de 50% para turbinas de grande porte conectadas à rede (CARVALHO, 2003). Sendo que para a turbina eólica deste projeto, podem-se obter valores máximos na faixa de 40 a 50%, de acordo com (MACHADO, 2007), estando, portanto ainda baixos os rendimentos encontrados neste experimento. No presente projeto deve-se adicionar à conversão de energia feita pelas pás, o rendimento interno do gerador elétrico.

Consequentemente o rendimento global do sistema de bombeamento de água, torna-se também muito baixo. Desta forma, estudos devem ser realizados no sentido de aumentar a eficiência de conversão efetuada pelas pás e pelo gerador síncrono de ímãs permanentes.

Este capítulo mostra as conclusões obtidas a partir dos dados coletados do experimento durante o período de dois meses no ano 2008, referentes ao sistema de bombeamento de água a partir de um aerogerador síncrono de ímã permanente, localizado em frente ao açude do campus do Pici da UFC. Este capítulo também aborda também algumas sugestões para futuros trabalhos.

6.1 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O uso da energia eólica para geração de eletricidade tem crescido em todas as regiões do mundo. Em 2008, a geração eólica alcançou a marca histórica de 260 TWh, ou 1,5% da geração global de eletricidade, segundo dados da IEA (*International Energy Agency*). Para efeito de comparação, em 1997 a geração eólica foi responsável por 15 TWh, ou 0,1% da geração global de 13.949 TWh; desta forma, foi verificado para o setor eólico um fator 17 de crescimento em 1 década. A potência instalada até o final de 2008 foi de 27.188 MW o que levou a potência acumulada ao nível de 121.188 MW.

Estes dados se referem à geração de eletricidade a partir de turbinas de grande porte, com potência de cerca de 1 MW, como as que estão sendo instaladas no Brasil através do incentivo dado pelo PROINFA. Outro setor de grande importância é o representado pelos geradores eólicos de pequeno porte, com potência de alguns kW. Este setor tem participação significativa na eletrificação de cargas remotas, não conectadas à rede elétrica, notadamente na zona rural dos EUA. Entre os usos, podem ser citados carregamento de baterias e acionamento de conjuntos motor-bomba.

No Brasil, o uso de geradores eólicos de pequeno porte para geração de eletricidade se encontra na fase inicial. São poucas as empresas com linhas de produção no país, sendo encontrados alguns pontos de venda que são meros representantes de produtos produzidos no

exterior. Desta forma, considerando o grande potencial eólico brasileiro localizado principalmente na região Nordeste, se justifica a necessidade de estudos e pesquisas sobre esta forma de geração de eletricidade. Os estudos são necessários tanto no campo do projeto da unidade eólica (projeto de máquinas de ímãs permanentes e de pás) como no campo da aplicação (bombeamento de água e carregamento de baterias).

Partindo desta motivação, a presente dissertação teve como objetivo central levantar o rendimento energético de uma unidade de bombeamento de água acionada por um gerador eólico de pequeno porte. Os principais dados obtidos foram: rendimento do conjunto motor-bomba no mês de maio/2008 de 6,17% e no mês de julho/2008 de 2%. O rendimento da conversão eólio-elétrica referente ao mês de maio/2008 foi de 12,2% e no mês de julho/2008 de 21,44%. E o rendimento global para o mês de maio foi de 0,74% e para o mês de julho de 0,41%.

Os dados mostram que mesmo para um local de bons ventos, como a jusante do açude do Campus do Pici, a unidade de bombeamento permanece sem operação na maior parte do tempo (89,3% do período no mês de maio/2008 e 45,43% no mês de julho/2008). Cabe aqui destacar que outros locais com maiores velocidades médias de vento levam inevitavelmente a melhores tempos de operação. A escolha do local de instalação do gerador eólico, desta forma, exerce um papel decisivo no rendimento futuro da unidade. A literatura especializada recomenda no mínimo 1 ano de medições de vento para se poder realizar uma avaliação inicial do potencial eólico de um local. No presente estudo, devido aos prazos impostos para a realização de uma defesa de mestrado, não foi possível a realização destas medições preliminares, sendo a escolha do local (jusante do açude do Campus do Pici) feita em critérios meramente fruto de observações subjetivas.

Estudos posteriores devem realizar a comparação desta opção de bombeamento com outras que utilizem fontes alternativas de energia, como painéis fotovoltaicos (FV) e biomassa. Para efeito de comparação com a tecnologia FV, o relatório COELCE – GTZ sobre sistemas de bombeamento de água acionadas por painéis FV no interior do Ceará no início da década de 1990, revela que “a eficiência global de diversos sistemas instalados variou entre os limites de 0,96 a 3,54%, considerando-se, neste caso, dias com nebulosidade variável”. Desta forma, a eficiência apresentada pela unidade estudada na presente dissertação, variou entre os limites de 0,41 a 0,74%. Nota-se que a eficiência encontrada é baixa, mas próxima dos valores apresentados pelos sistemas de bombeamento solares.

Outra linha de interesse futuro para pesquisas é o acoplamento de painéis FV à unidade eólica, configurando as chamadas unidades híbridas; desta forma, a geração solar pode

auxiliar no abastecimento elétrico da carga, principalmente em momento de calma. Também nesta área praticamente não existem experiências acumuladas no Brasil.

Desta forma considerando os resultados obtidos, as dificuldades encontradas e comentadas no capítulo 5 durante a fase de experimentos, assim como as considerações descritas neste capítulo, a aplicação do modelo apresentado nesta dissertação de um sistema de bombeamento acionado por um aerogerador de pequeno porte torna-se inviável para fins comerciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ALOSOLAR, 2008). Disponível em <<http://www.alosolar.com.br/Livro/hidra1.html>>. Acessado em 20 de janeiro de 2008.

ANEEL- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, "Energia Eólica". Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 1^oed., capítulo 5, Brasília, Brasil, 2002.

BADRAN, O. Wind turbine utilization for water pumping in Jordan.. Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering Technology, Al-Balqa Applied University, P.O. Box 331006, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 1203–1214. Amman 11133, Jordan, 2003.

CAMERON, A. Growth on all fronts. Renewable Energy World. Julho – Agosto de 2007.

CAMPBELL, P., Magnets Materials and Their Application. Cambridge University, USA. pp: 25 a 116. 1999. ISBN: 0 521 56688 6.

CARTA, J.; GONZÁLEZ, J.; SUBIELA, V.: Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands; Solar Energy in Press, 2003.

CARVALHO, P. Geração Eólica. Imprensa Universitária. Fortaleza. 2003.

CHALMERS, B.J., SPOONER, E. An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for a Gearless Wind Energy System. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999.

CHEN, Y., PRAGASEN, P and AZEEM, K. Student Member, IEEE, " PM Wind Generator Topologies", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, nº. 6, November/December 2005.

(CRESESB, 2008). Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial_eólica.htm>. Acessado em 10 de set. 2007.

CRICK, F. J, COWLEY, P. D. Wind Power for pumping: the development of windpump. Renewable Energy 16 916-921, 1999.

(CBEE, 2007). Disponível em <<http://www.eólica.org.br/cbee>>. Acessado em 26 de junho de 2007.

(ECOSEED, 2009). Disponível em <<http://www.ecoseed.org/renewables/wind/14343-global-market-share-in-wind-turbine-manufacturers-unveiled>>. Acessado em 07 de março de 2009.

EHMANN, H.; WOBLEN, A.; CENDAGORTA, M.: PRODESAL - The development and pilot operation of the first wind powered reverse osmosis sea water desalination plant; 1996 european union wind energy conference, Göteborg, 1996.

ENERSUD Indústria e Soluções Energéticas. Manual de instalação. São Gonçalo. Rio de janeiro. 2007.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Expansão da Energia Eólica no Brasil. Nota Técnica PRE 01/2009-r0. Disponível em <<http://www.epe.gov.br>>. Acessado em 02 de abril de 2009.

(GEPOWER, 2006). Disponível em:<<http://www.gepower.com/business/geindenergy.htm>> Acessado em 25 de março de 2006.

GOLDING, E., The generation of electricity by wind power; John Wiley, 1976.

HARRIES, M., Disseminating wind pumps in rural Kenya – meeting rural water needs using locally manufactured wind pumps; Energy Policy, 30, 2002.

HAU, ERICH: Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit; Springer, 1996.

HEIER, S., Grid Generation of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons. Kassel University, Alemanha. Janeiro. 1998. ISBN: 0 471 97143 X.

HEIER, S., Wind Power in Power Systems. John Wiley & Sons. USA. pp: 54 a 65. 2005. ISBN: 0 470 85508 8.

KRAUS, J., CARVER, K. Eletromagnetismo. 2ª Edição. Guanabara Dois. Rio de Janeiro. pp: 187-224. 1978.

(LABEFEA, 2008). Disponível em: <<http://www.labefea.eng.ufba.br/sistema/upload/filemo/1275056162.PDF>>. Acessado em 23 de Agosto de 2008.

MACHADO, I. R., OLIVEIRA, D.S. Avaliação do Aproveitamento da Energia Elétrica Gerada por um Sistema Eólico para Carregamento de Baterias. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2006, Campina Grande. Simpósio Brasileiro de sistemas elétricos. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. v. 1. p. 1-6.

MACHADO, I.R. Sistema Eólico para Carregamento de Baterias. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. v . 1. p. 43-45. 2007.

MERLUND, L.S, ERIKSSON, J.T, SALONEN, H., PEDDA, R.J. A Permanent-Magnet Generator for Wind Power Applications. IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 32, No. 4, July 1996.

MILFORD, E. Renewable Energy World Magazine. Julho-Agosto de 2008. Volume 11. Número 4.

MOHSEN, M.; AKASH, B.: Potentials of wind energy development for water pumping in Jordan; Renewable Energy, vol. 14, 1-4, 1998.

PEREIRA, M.,M., Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante. Dissertação de mestrado. Juiz de Fora, MG. Outubro. 2004.

PETERSEN, G.; FRIES, S.: Die windkraftbetriebene Wasserentsalzungsanlage auf der Hallig Süderoog; Einsatz kleiner Windenergieanlagen in Entwicklungsländern, 1985.

(PUCRS, 2008). Disponível em: <[http:// www.em.pucrs.br/lsvm/alunos](http://www.em.pucrs.br/lsvm/alunos)>. Acessado em 10 de janeiro de 2008.

ROBINSON, R.; HO, G.; Mathew, K.: Development of a reliable low-cost reverse osmosis desalination unit for remote communities; *Desalination*, 86, 1992.

SEINFRA - Balanço Energético do Estado do Ceará. Governo do Estado do Ceará. Abril de 2009. Disponível em <<http://www.seinfra.ce.gov.br>>. Acessado em 30 de março de 2009.

SPOONER, E., CHALMERS, B.J. “Torus”: A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator. *IEE Proceedings-B*, Vol. 139, NO. 6, November 1992.

STEPHAN, J., Calculation of Different Generator Systems for Wind Turbines with Particular Reference to Low-Speed Permanent-Magnet Machines. *Dissertação*. Shaker Verlag. pp: 24-46. 2003. ISBN: 3 8322 1512 3.

SULEIMANI, Z.; RAO, N.: Wind-powered electric water-pumping system installed in a remote location; *Applied Energy*, 65, 2000.

(UFCG, 2008). Disponível em: <[http:// www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Bomb01.html](http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Bomb01.html)>. Acessado em 07 de fevereiro de 2008.

WWEA - World Wind Energy Association. *World Wind Energy Report 2008*. Publicado em Fevereiro de 2009.