



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONTROLADOR DE CARREGAMENTO DE BATERIAS PARA TURBINAS**  
**EÓLICAS DE PEQUENO PORTE**

**DANIEL FERREIRA NIPO**

**Orientador: Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS**

**Co-orientador: Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO**

**RECIFE – PE – 2007**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONTROLADOR DE CARREGAMENTO DE BATERIAS PARA TURBINAS**  
**EÓLICAS DE PEQUENO PORTE**

**DANIEL FERREIRA NIPO**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica no Curso de Pós Graduação em Energia Eólica da UFPE para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

N719c

Nipo, Daniel Ferreira.

Controlador de carregamento de baterias para turbinas eólicas de pequeno porte / Daniel Ferreira Nipo. - Recife: O Autor, 2007. xi, 110 folhas, il: figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2007.

Inclui bibliografia e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Energia Eólica. 3. Controlador de Carga. 4. Turbinas Eólicas de Pequeno Porte. Título.

UFPE

621

CDD (22. ed.)

BCTG/2007-158

“CONTROLADOR DE POTÊNCIA PARA TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE”.

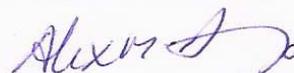
DANIEL FERREIRA NIPO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

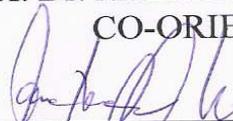
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA EÓLICA  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE



Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

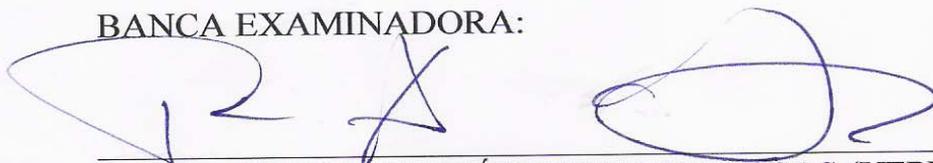


Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO  
CO-ORIENTADOR

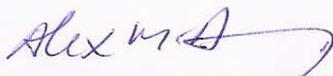


Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO  
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:



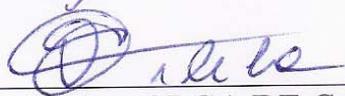
Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS (UFPE)



Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)



Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO (UFPE)



Profa. Dra. OLGA DE CASTRO VILELA (UFPE)

**DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Luiz Ferreira Nipo e Dalvina Gonçalves Nipo (in memorian), à Minha Esposa Rosa Maria, aos Meus filhos Daniel, Danilo e aos meus Irmãos.

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, o Mestre incondicional das nossas vidas por me permitir realizar tamanho feito.

Ao Professor Pedro André Carvalho Rosas, Orientador deste Trabalho, pela concepção e direcionamento deste trabalho, pela transparência, pela compreensão, pelo espírito jovem e empreendedor, pelo seu interesse e fascínio pela ciência e pela sua habilidade nata de construir conhecimentos de modo objetivo e eficaz. Por tudo, meu muito obrigado Professor.

Aos Professores Alex Maurício Araújo, Co-orientador deste trabalho, e Alexandre de Lemos Pereira, pelas sugestões e contribuições bastante oportunas.

Aos meus pais, hoje no plano espiritual, que sempre foram para mim exemplo de coragem, determinação e honradez para enfrentar os desafios que a vida nos impõe.

A minha esposa Rosa e aos meus filhos Daniel e Danilo que me ajudaram a não dar atenção aos percalços, às barreiras e às dificuldades encontradas por mim nesta caminhada. Pela alegria, pela descontração e pelo carinho com que sempre fui recebido no retorno ao meu lar, que renovavam minhas forças e pelo estímulo recebido para enfrentar novas etapas.

À minha sogra Edna da Cunha Teixeira, à minha comadre Córdula Buarque de Macêdo e aos meus irmãos pelo apoio e incentivos constantes para que eu seguisse nesta grande empreitada.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e a todos os seus professores e funcionários.

Aos amigos do CEFET/PE e a todos que mesmo não sendo nominalmente citados contribuíram de uma forma ou de outra para a realização deste Trabalho.

Aos amigos Alair Walter Vieira Barbosa, Cândido Requião Ferreira, Claudemiro Lima, Fernando Bertino de Figueiredo, Fernando Luiz da Silva, Gilberto Martins de Melo, Marcos Antônio Lopes dos Santos e Wellington Lemos pelo apoio e contribuições técnicas decisivas para a realização deste Trabalho.

Às Sr<sup>a</sup> Eliane e Sr<sup>a</sup> Tarciana da Secretaria do Mestrado e do CBEE, respectivamente.

Ao CBEE pelo apoio para realização deste Mestrado e deste Trabalho de Dissertação.

Aos meus diletos amigos de infância que nunca hesitaram em ajudar.

Sou grato.

## RESUMO

A energia elétrica é considerada a mais nobre das formas de energias secundárias atualmente disponíveis. Torna-se difícil imaginar a sociedade moderna sem o advento da energia elétrica, das facilidades e do conforto que ela proporciona. O avanço tecnológico que a humanidade experimentou ao longo do tempo tem expressiva contribuição do controle e do uso da energia elétrica. Na eletrificação de locais remotos onde o acesso à rede elétrica convencional é difícil e onde os custos de instalação e manutenção são proibitivos ou inviáveis, as soluções a partir de fontes renováveis de energia e particularmente por energia eólica tem-se mostrado técnica e economicamente viáveis. Para tais aplicações a utilização de pequenas turbinas eólicas é uma solução para atender às comunidades mais afastadas dos grandes centros urbanos e dos centros de geração de eletricidade. A proposta desta Dissertação é projetar e implementar o protótipo de um Controlador de Carregamento de Baterias para Turbinas Eólicas de Pequeno Porte. Esse Controlador deverá viabilizar a recarga de um banco de baterias inserido no sistema, de modo garantir a estabilidade de tensão de forma confiável e economicamente viável, e que possa também, alimentar cargas CC ou inversores CC/CA. O presente Trabalho foi desenvolvido para uma Turbina Eólica WG910 com potência nominal de 100Watts, de fabricação da Marlec Co, cuja caracterização elétrica foi realizada a partir de experimentos em bancada de testes. O foco principal deste Trabalho foi a concepção de um Circuito Controlador de Carregamento de Baterias que viabilizasse o carregamento de baterias em baixas velocidades de vento e que além de controlar o fluxo de carga para a bateria efetuasse também a supervisão das condições de carga/descarga dela. Os resultados obtidos revelaram que com o advento do circuito Dobrador de Tensão a partir de uma velocidade de vento de 5m/s já havia aproveitamento de energia suficiente para promover o carregamento de bateria enquanto que sem o citado Circuito a energia somente seria aproveitada para a mesma finalidade, a partir de velocidades de vento de 8m/s. O estudo da viabilidade econômica da implementação do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias mostrou que ao ser usado na cidade de Olinda-PE, com uma Turbina Eólica WG910, obtém-se no ano, o mesmo aproveitamento de energia que três Turbinas iguais juntas, ao custo de 30% do preço de uma delas.

Palavras chave: Energia Eólica, Controlador de Carga, Turbinas Eólicas de Pequeno porte.

## ABSTRACT

Electric energy is considered noblest of the forms of currently available secondary energy. It is difficult to imagine modern society without the advent of the electric energy and the ease and comfort it has brought. The technological advances that humanity has made throughout time have greatly contributed to the control and use of electric energy. In the electrification of remote places where the access to the conventional electric grid is difficult and where installation and maintenance costs are prohibitive or impracticable, the solutions from renewable energy sources and in particular from wind energy techniques have proved to be economically viable. For such applications, the use of small wind turbines had been a solution for taking care of the communities that are distant from the great urban concentrations and centers for generation of electricity. The proposal of this work is to project and implement a prototype of a Charge Controller for Small Wind Turbines. This Controller will have to make possible the recharging of a battery bank that is inserted in the system, in such a way as to guarantee the stability of voltage in a reliable and economically viable form, and one that can feed DC or DC/AC charges. The present Work was developed for a WG910 Wind Turbine with nominal power rating of 100Watts, manufactured by the Marlec Company, whose electric characterization was carried out in groups of battery bank test experiments. The main focus of this work was on the conception of a Battery Circuit Charger Controller that would control the load flow to the battery and also carry out the supervision of load charge/discharge conditions. The results obtained showed, with the advent of the Voltage Double Circuit, that starting from a wind speed of 5m/s there would be enough energy for promoting battery charge, whereas, without the cited Circuit, the electric energy would only be available starting from of 8m/s. The economic viability study, of the Battery Charge Controller Circuit implementation, showed that the one being used in the city Olinda-PE, with a WG910 Wind Turbine, produced the same amount of energy, in one year, as three normal Turbines, at 30% of the cost of one.

Key words: wind energy, charge controller, small wind Turbines.

## SUMÁRIO

SIMBOLOGIA.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 O HOMEM E A ENERGIA.....	1
1.2 O HOMEM E O MEIO AMBIENTE.....	1
1.3 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA.....	2
1.4 PANORAMA DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	3
1.5 PROGRAMA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL.....	4
1.5.1 Panorama Nacional da Exclusão Elétrica.....	5
1.5.2 Programa LUZ PARA TODOS.....	6
1.6 CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES DE SISTEMAS DE ENERGIA EÓLICA.....	7
1.6.1 Referencial histórico.....	7
1.6.2 Formas de Aproveitamento da Energia Eólica.....	7
1.7 OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO.....	8
1.8 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	9
CAPÍTULO 2 .....	12
2.1 SISTEMAS HÍBRIDOS.....	12
2.2 A TURBINA EÓLICA.....	13
2.2.1 Cálculo da Potência Elétrica Captada pela Turbina Eólica.....	15
2.2.2 Curva Típica de Potência da Turbina Eólica.....	17
2.3 TURBINAS EÓLICAS EXISTENTES NO MERCADO PARA APLICAÇÕES EM LOCAIS REMOTOS.....	18
2.3.1 A Turbina Eólica Rutland Windcharger WG 910.....	19
2.3.1.1 Especificações Técnicas da Turbina Eólica WG 910.....	20
2.3.1.2 Características Básicas da Turbina Eólica WG 910.....	24
2.3.1.3 O Gerador Elétrico da Turbina Eólica.....	25
2.3.1.4 A Nacele e os Dispositivos Eletroeletrônicos.....	27
2.3.1.5 Representação Esquemática da Turbina Eólica WG910.....	29
2.3.1.6 Circuito Elétrico Equivalente da Turbina Eólica WG 910.....	30
2.3.1.7 Análise do Funcionamento do Circuito Eletroeletrônico da Turbina Eólica.....	31
2.3.1.8 O Regulador de Carga da Turbina Eólica WG 910.....	32
2.3.1.9 Princípio de Operação do Regulador HRS 503.....	33
CAPÍTULO 3 .....	34
3.1 CIRCUITOS CONTROLADORES DE CARREGAMENTO DE BATERIAS: O ESTADO DA ARTE.....	34
3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES.....	34
3.3 O CIRCUITO CONTROLADOR DE CARREGAMENTO DE BATERIAS OBJETO DESTA DISSERTAÇÃO.....	36
3.3.1 Resultados Esperados.....	36
3.3.2 Projeto do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria.....	36
3.4 PROJETO E EXECUÇÃO DO CIRCUITO CONTROLADOR DE CARREGAMENTO DE BATERIAS.....	38
3.4.1 Diagrama em Blocos do Sistema.....	38
3.5 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO CONTROLADOR DE CARREGAMENTO DE BATERIAS.....	40
3.5.1 Dimensionamento da Autonomia do Sistema Isolado.....	41
3.5.2 Controle de Carga com Regulador de Tensão Integrado.....	41
3.5.3 Diagrama do Circuito de Controle de Carregamento e Supervisão da Tensão da Bateria.....	45
3.5.4 Uso do Circuito Dobrador de Tensão.....	46
3.5.4.1 Projeto do Circuito Dobrador de Tensão.....	46
3.6 METODOLOGIA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	50
3.6.1 Introdução.....	50
3.6.2 Necessidade das Medições.....	51
3.6.3 Princípio Metodológico.....	52

3.6.4 Bancada de Testes .....	53
3.6.5 Equipamentos Usados nos Experimentos .....	54
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>56</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>56</b>
4.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO CIRCUITO DOBRADOR DE TENSÃO .....	56
4.1.1 Funcionamento com Alimentação por Tensão da Rede Elétrica .....	56
4.1.2 Funcionamento do Circuito Dobrador e Tensão em Vazio e com Alimentação a partir da Turbina Eólica .....	57
4.1.3 Efeito de Histerese no Circuito Dobrador de Tensão .....	58
4.1.4 Funcionamento com Alimentação pela Turbina Eólica na Condição de Carga .....	62
4.1.5 Dados Fornecidos pelo Fabricante da Turbina Eólica (em vazio) .....	63
4.1.6 Dados Obtidos a partir dos Experimentos em Bancada .....	65
4.1.7 Análise do Desempenho da Turbina Eólica em Carga .....	68
4.2 CÁLCULO DA ENERGIA ELÉTRICA GERADA PELA TURBINA EÓLICA .....	75
4.2.1 Comparação do Desempenho do Sistema Com e Sem o Uso do Circuito Dobrador de Tensão .....	76
4.3 SIMULAÇÃO USANDO AS CONDIÇÕES DE VENTO DE OLINDA (PE) .....	80
4.3.1 Dados Eólicos Usados .....	80
4.3.2 Cálculo da Energia Elétrica Gerada Pela Turbina Eólica .....	82
4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO A SER USADO EM OLINDA - PE .....	84
 <b>CAPÍTULO 5</b> .....	 <b>87</b>
5.1 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	87
5.1.1 Simulação Usando o Vento de Olinda- PE .....	89
5.1.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	90
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	 <b>91</b>
 <b>APÊNDICE A</b> .....	 <b>94</b>
A.1 Bateria Eletroquímica .....	94
A.2 Recarga das Baterias .....	96
A.3 Auto-descarga das Baterias .....	96
A.4 Capacidade Nominal de Corrente das Baterias .....	96
A.5 Estado de Carga de uma Bateria .....	97
A.6 Modelo Cinético de Bateria ( <i>KibaM – Kinetic Battery Model</i> ) .....	98
A.6.1 Tipos de Cargas .....	99
A.7 Simulações de Fluxo de Descarga .....	101
A.8 Conceitos Básicos sobre a Vida Útil das Baterias: .....	103
A.8.1 Vida Útil Nominal ( $U_N$ ) (ou <i>battery float life</i> ) .....	103
A.8.2 Vida Útil ( $U_{ciclo}$ ) (em ciclos completos de carga/descarga (ou <i>battery cycle life</i> )) .....	103
 <b>APÊNDICE B</b> .....	 <b>106</b>
MANUTENÇÃO REALIZADA NA TURBINA EÓLICA RUTLAND WINDCHARGER WG 910 .....	106
B.1 Condições em que foi Encontrada a Turbina Objeto deste Trabalho .....	106
B.2 Resultados da Manutenção Efetuada .....	109

## SIMBOLOGIA

<u>Símbolo</u>	<u>Unidade</u>	<u>Denominação</u>
E	Joule (J)	Energia Cinética
M	Kg	Massa
V	m/s	Velocidade de vento
$P_d$	Watts (W)	potência Eólica disponível
P	$g/m^3$	massa específica do ar
A	$m^2$	Área varrida pelo rotor da turbina eólica
$P_a$	Watts(W)	Potência aproveitável
$C_p$	Adimensional	Coefficiente de potência
$\Lambda$	Adimensional	Razão de velocidade específica da ponta da pá
$\Omega, \omega$	rad/s	Velocidade angular do rotor
R	metro (m)	Raio do rotor da turbina eólica
$V_{part}$	m/s	Velocidade de partida do rotor
$V_n$	m/s	Velocidade nominal do rotor
$V_{parada}$	m/s	Velocidade de parada do rotor
$P_{m\acute{a}x}$	Watts(W)	Potência máxima
$P_{nom}, P_N$	Watts(W)	Potência nominal
$V_G, V_{ger}$	Volts(V)	Tensão nos terminais do gerador
L	Henry (H)	Indutância da bobina
$d\Phi/dt$	Weber/s Wb/s	Taxa de variação do fluxo magnético
At	Ampere.hora A.h	Autonomia
I	Ampere (A)	Corrente elétrica
$X_L$	Ohms ( $\Omega$ )	Reatância indutiva
Vcc	Volts(V)	Tensão contínua
$V_B$	Volts(V)	Tensão nos terminais da bateria
DC	(A)	Corrente contínua
AC	(A)	Corrente alternada
$I_N$	(A)	Corrente nominal
$V_N$	(A)	Tensão nominal
$C_B$	(Ah)	Capacidade de corrente da bateria
$V_E$	(V)	Tensão no emissor do transistor
$V_B$	(V)	Tensão na base do transistor
$V_{Turb}$	(V)	Tensão gerada pela turbina eólica
F	Hertz(Hz)	Frequência

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapeamento dos empreendimentos em operação na área de geração de energia elétrica atualmente no Brasil por fontes distintas em MW – FONTE: ANEEL[04] Adaptado.....	3
Figura 1.1 – Déficit de ligações elétricas no meio rural do Brasil - Fonte:[05] - Adaptado .....	5
Figura 1.2 – Índices percentuais de não atendimento à eletrificação rural por Estados da Federação – Fonte:[05] – Adaptado .....	6
Figura 1.4a e 1.4b – Mostram turbinas eólicas de eixo vertical e de eixo horizontal [09].....	8
Figura 2.1 – Sistema híbrido eólico-solar-bateria típico. ....	12
Figura 2.2 – Turbina eólica de pequeno porte típica para aplicações remotas. ....	14
Figura 2.3 – Potência eólica aproveitável como função da velocidade angular do rotor, para distintas velocidades de vento. ....	17
Figura 2.4 – Curva típica de potência de uma turbina eólica. ....	18
Figura 2.5 – Dimensões da Turbina WG910 - Cortesia: MARLEC [15] - adaptado. ....	20
Figura 2.6 – Curva de Potência da Turbina WG-910 - Cortesia: MARLEC [15] -Adaptado. ....	21
Figura 2.7 – Curva de tensão em circuito aberto (Volts) x velocidade de rotação (RPM). Cortesia: MARLEC [15] - adaptado.....	23
Figura 2.8 – Turbina Eólica Rutland Wincharger WG 910 - Cortesia: MARLEC [15].....	25
Figuras 2.9 – a) Mostra o Gerador da Turbina WG 910 montado; b) Mostra as peças polares do Gerador desmontado, formadas por ímãs permanentes Norte (N) e Sul (S). ....	26
Figuras 2.10 – a) Mostra a vista frontal do estator do Gerador da Turbina Eólica; b) Mostra a vista lateral do estator. ....	27
Figura 2.11 – Interior da nacela: o indutor, a ponte retificadora, os anéis coletores e as escovas. ....	28
Figura 2.12 – Mostra o posicionamento dos componentes do gerador e dos dispositivos eletroeletrônicos - Cortesia : MARLEC [15] - adaptado. ....	30
Figura 2.13 – Diagrama do circuito elétrico equivalente da Turbina incluindo a ponte retificadora e alimentação da carga (bateria) – .....	30
Figura 2.14 – Reguladores SR 200 e HRS 913 respectivamente – Cortesia: Marlec [15] - adaptado. ....	32
Figura 3.1 – Mostra as configurações de sistemas de carregamento de baterias.....	35
Figura 3.2 – Fluxograma do funcionamento do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria .....	37
Figura 3.3 – Diagrama em blocos do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias.....	38
Figura 3.4 – Diagrama elétrico do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias .....	42
Figura 3.5 – Diagrama elétrico do Circuito Controlador de Descarga do banco de baterias. ....	43
Figura 3.6 – Curva de histerese das condições de carga da bateria.....	44
Figura 3.7 – Diagrama elétrico do Circuito de Controle de Carga e de Supervisão de Descarga da Bateria. ....	45
Figura 3.8a e Figura 3.8b – Mostram o Protótipo do Circuito de Controle de Carregamento e de Supervisão de Descarga da Bateria, fabricado para efetivação dos experimentos.....	46
Figura 3.9 – Circuito Dobrador de Tensão.....	47
Figura 3.10a e Figura 3.10b – Mostram o Protótipo dos Circuitos Dobrador de Tensão e de Supervisão de descarga da bateria fabricados para efetivação dos experimentos. ....	49
Figuras 3.11a e 3.11b – Bancada de testes projetada e construída para efetivação dos ensaios experimentais. ....	53
Figuras 3.12a e 3.12b – Tacômetro usado para medição das rotações da Turbina. ....	54
Figura 3.13 – Multímetros digitais usados nas medições de tensão corrente e frequência por ocasião dos experimentos. ....	55
Figura 4.1 – Desempenho do Circuito Dobrador de Tensão. ....	57
Figura 4.2 – Desempenho do Circuito Dobrador de Tensão com alimentação pela Turbina Eólica (em vazio). ....	58
Figura 4.3 – Curva de histerese de operação do Circuito Dobrador de Tensão. ....	60
Figura 4.4 – Tensão gerada pela Turbina Eólica em função da rotação do Rotor.....	61
Figura 4.5 – Desempenho do Circuito Dobrador de Tensão com alimentação pela Turbina Eólica. ....	62
Figura 4.6 – Curva de potência da Turbina Eólica – Cortesia: Marlec Co [15] – Adaptado. ....	64
Figura 4.7 – Curva de tensão gerada (volts) x velocidade de rotação do Rotor (RPM) – Cortesia: Marlec Co [15] - Adaptado .....	64

Figura 4.8 – Comparação entre os dados medidos da tensão gerada pela Turbina com os dados apresentados pelo Fabricante. ....	67
Figura 4.9 – Potência gerada pela Turbina Eólica em função da velocidade de rotação do Rotor. ....	71
Figura 4.10 – Mostra a curva da velocidade de rotação do Rotor em função da velocidade de vento...	74
Figura 4.11 – Curva de potência experimental da Turbina Eólica .....	75
Figura 4.12 – Distribuição de Weibull para: $k = 3$ e $c = 8$ m/s. ....	76
Figura 4.13 – Curva de Duração Anual da Turbina Eólica com os dados de Weibull Considerados ( $k = 3$ e $c = 8$ m/s).....	77
Figura 4.14 – Ordem de atendimento das cargas de acordo com a demanda de energia .....	79
Figura 4.15 – Mostra a distribuição de Weibull para: $k = 3,49$ e $c = 6,29$ m/s [34].....	81
Figura 4.16 – Curva de duração da Turbina WG910 com restrição da potência gerada para carregamento de bateria. ....	82

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Autonomia e corrente de carga fornecida pela WG 910 para 12Vdc e para 24Vdc em função da velocidade média do vento .....	23
Tabela 4.1 – Tensões e Freqüências Geradas pela Turbina.....	65
Tabela 4.2 – Tensões, Potências e Freqüências Geradas pela Turbina Eólica. ....	70
Tabela 4.3 – Dados estimados da caracterização da Turbina a partir do TSR considerado.....	72

# **CAPÍTULO 1**

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 O HOMEM E A ENERGIA**

A existência da energia, de um modo geral, define a sobrevivência de todos os seres vivos. Ao se alimentar e metabolizar os alimentos em seu organismo, o ser vivo está na verdade provendo-se da energia que o manterá vivo desempenhando suas funções. Fato similar acontece com as plantas ao realizar a fotossíntese extraindo energia do sol para se alimentar.

Indubitavelmente o avanço da humanidade está intimamente ligado ao descobrimento e aprendizado do uso da energia nas mais diferentes formas em que ela se apresenta na natureza. Desta forma, desde os primórdios da humanidade, o homem aprendeu a queimar lenha para se aquecer, para iluminar ambientes e para cozer os alimentos.

Em um momento posterior com o avanço do aprendizado do uso da energia o homem aprendeu a forjar os metais, promover aquecimento, iluminação, processamento de alimentos, chegando a viabilizar o transporte e acionamento de máquinas que proporcionassem conforto, comodidade, enfim, qualidade de vida [01] e [02].

### **1.2 O HOMEM E O MEIO AMBIENTE**

Desde os primórdios da história da civilização, o ser humano interfere no meio

ambiente, destruindo florestas, ocupando espaços, e na busca incansável do seu desenvolvimento, prossegue devastando a natureza, provocando grandes desequilíbrios no ecossistema do planeta em que vive.

Com a revolução industrial a partir do início do século XVIII, o consumo de energia aumentou de forma bastante expressiva e com ele aumentou também, o processo de destruição da natureza.

A fumaça preta, que no passado ao sair das chaminés das fábricas causava orgulho aos moradores das cidades próximas, pois aquele evento significava o progresso que havia chegado, hoje torna o ar insuportável trazendo sérios problemas de saúde para a comunidade.

Possuir e utilizar energia são sinônimos de poderio político e econômico. Reservas de petróleo e outros combustíveis sempre representaram motivo de tensão, cobiça e guerra entre os países. No mundo atual a energia é imprescindível para o ser humano e a destruição da natureza não era vista como obstáculo para se conseguir este objetivo.

Atualmente têm sido pautas de congressos, simpósios, e estudos dos mais diversos segmentos da ciência, da política, dos ambientalistas e da sociedade em geral, conceitos como: chuva ácida, aquecimento global, poluição marinha, lixo atômico, riscos de acidentes com usinas nucleares e com combustíveis fósseis que afetam a flora e a fauna, causando sérios impactos ambientais.

A conscientização da necessidade do uso mais racional da energia, do combate ao desperdício e da opção do uso de fontes “limpas e renováveis” têm provocado o surgimento de diversos fóruns de debate e o incremento da produção científica.

### **1.3 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA**

A natureza apresenta a energia de formas bastante distintas dentre as quais destacam-se as energias renováveis, sendo assim definidas aquelas que apresentam uma taxa de reposição mais rápida que o ritmo de sua utilização pelo homem. Em última análise, elas estão

disponíveis na natureza e possuem reposição contínua. Estão incluídas nesta classificação as formas de energia: solar, eólica, hidráulica, entre outras [03].

Já as fontes de energia não renováveis são aquelas cujo aproveitamento é finito ou que, não são repostas na mesma velocidade de sua utilização e tendo como exemplos clássicos, entre outros, o petróleo, os gases combustíveis e o carvão mineral.

#### 1.4 PANORAMA DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

No Brasil, conforme informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL [04]) ilustradas na Figura 1.1 em MW, a energia elétrica obtida a partir dos mananciais hidráulicos disponíveis na natureza (UHE) ou simplesmente energia hidrelétrica, é a principal fonte de geração de eletricidade representando 72,8% da energia elétrica total gerada no Brasil.

Adicionalmente, a Figura 1.1 mostra que as fontes renováveis de origem eólica (EOL) e solar (SOL) têm uma contribuição bastante inexpressiva em particular a solar.

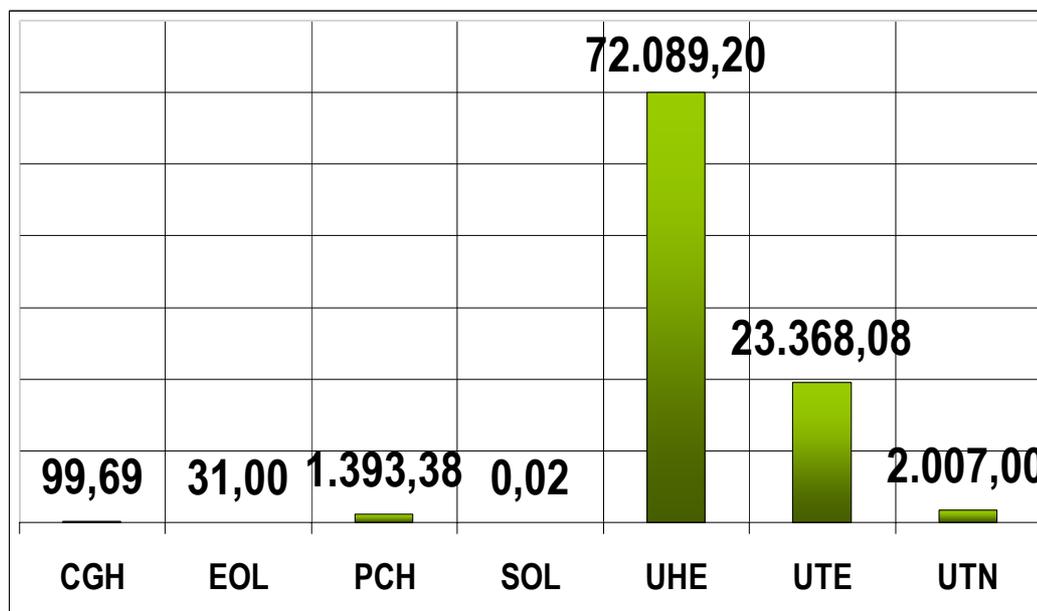


Figura 1.1 – Mapeamento dos empreendimentos em operação na área de geração de energia elétrica atualmente no Brasil por fontes distintas em MW – FONTE: ANEEL[04] Adaptado.

Onde:

CGH – Centrais Geradoras a Hidro (gás, petróleo e biomassa);  
EOL – Fonte Geradora de Origem Eólica;  
PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas;  
SOL – Fontes de Origem Solar;  
UHE – Usinas Hidrelétricas de Energia;  
UTE – Usinas Termelétricas de Energia;  
UTN – Usinas Termonucleares.

Deve-se ressaltar que os valores apresentados na Figura 1.1 referem-se a sistemas ligados à rede elétrica e não incluem os sistemas isolados.

A grande utilização da energia hidrelétrica tem várias vantagens, dentre as quais pode-se destacar: a alta eficiência e o baixo custo operacional. E como desvantagens dos meios convencionais de obtenção de energia elétrica podem ser citados: a produção de energia elétrica quase sempre em locais afastados dos grandes centros consumidores, o que gera grandes custos de instalação de extensas linhas de transmissão, grandes perdas de energia, custo de implantação elevado e altíssimo custo ambiental com a formação de micro-climas nos locais onde as represas de armazenamento da água são implantadas.

Normalmente para maximizar o aproveitamento econômico do recurso natural, são construídas barragens para armazenamento da água de forma a que a usina gere energia de modo regular ao longo do ano. Nos períodos de cheia acontece o enchimento e armazenamento d'água no reservatório e nos períodos de estiagem, quando a água então armazenada é usada para manter a regularidade da geração e do fluxo no rio como é o caso da Barragem da usina de Sobradinho no Rio São Francisco. Estes reservatórios habitualmente inundam áreas extensas, em regiões às vezes cobertas por florestas, destruindo belezas naturais, comunidades e plantações.

## **1.5 PROGRAMA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL**

O Decreto nº 4.873 de 11 de novembro de 2003, instituiu o Programa LUZ PARA TODOS, destinado a propiciar até o ano 2008, o atendimento em energia elétrica à parcela da

população do meio rural brasileiro que ainda não tem acesso a esse serviço público [05]. O Programa é coordenado pelo Ministério das Minas e Energia – MME e operacionalizado com a participação das Centrais Elétricas Brasileiras SA – Eletrobrás e das empresas que compõem o sistema Eletrobrás.

Os recursos previstos no Programa são destinados exclusivamente para promover a eletrificação em domicílios e estabelecimentos localizados no meio rural conforme dispõe o decreto que o instituiu.

### 1.5.1 Panorama Nacional da Exclusão Elétrica

O desafio no atendimento em energia elétrica no Brasil é proporcional ao combate à desigualdade social e regional do País. Existem atualmente cerca de dois milhões de domicílios rurais não atendidos, correspondendo a 80% do total nacional da exclusão elétrica, ou seja, 10 milhões de brasileiros vivem no meio rural sem acesso a esse serviço público e cerca de 90% dessas famílias possuem renda inferior a três salários mínimos.

A Figura 1.2 exibe uma estimativa do déficit de ligações rurais por estados no Brasil.

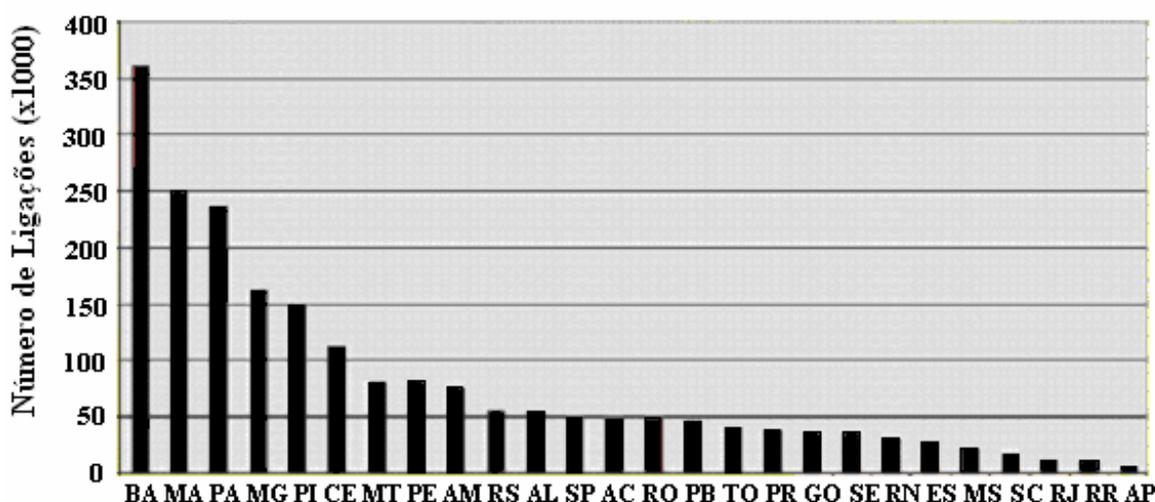


Figura 1.1 – Déficit de ligações elétricas no meio rural do Brasil - Fonte:[05] - Adaptado

Pela Figura 1.2 vê-se como é expressiva a exclusão do acesso à energia elétrica nas regiões norte e nordeste do País e o quanto ainda se tem por fazer em termos de sistemas de

eletrificação rural.

A Figura 1.3 mostra em termos percentuais a situação de não atendimento ao fornecimento de energia elétrica por estados no meio rural.

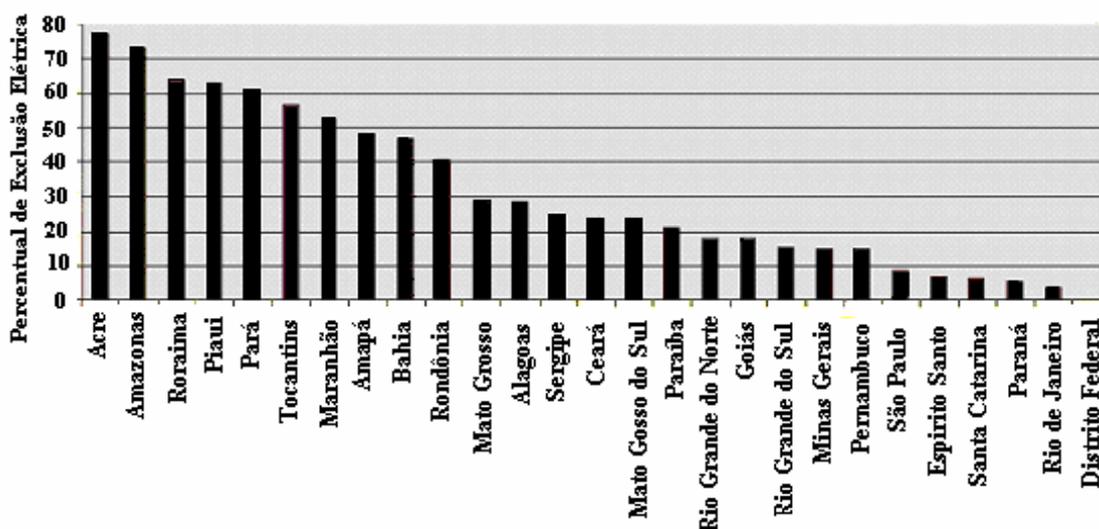


Figura 1.2 – Índices percentuais de não atendimento à eletrificação rural por Estados da Federação – Fonte:[05] – Adaptado

Pela análise da Figura 1.3 observa-se que os estados da região Norte do Brasil apresentam os menores índices percentuais de eletrificação rural. O índice de exclusão aproxima-se de 80%, no Estado do Acre, enquanto que os estados mais desenvolvidos como São Paulo, Espírito Santo, Santa Catarina, Paraná e Rio de Janeiro apresentam índices de exclusão inferiores a 10%.

### 1.5.2 Programa LUZ PARA TODOS

O Programa LUZ PARA TODOS tem como agentes executores as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica e as cooperativas de eletrificação rural autorizadas pela ANEEL [04], sendo que, em condições excepcionais, quando os agentes executores estiverem impedidos de operacionalizar a implementação do Programa fica a Eletrobrás, na condição de interveniente, autorizada a delegar a operacionalização do Programa a uma das empresas coordenadoras regionais.

Para alcançar seus objetivos e otimizar a utilização dos recursos públicos, o Programa prioriza o atendimento com tecnologias de baixo custo e de forma complementar, com sistemas de geração descentralizada com redes isoladas e sistemas individuais.

O Projeto LUZ PARA TODOS propõe-se também a empreender ações para capacitar, entre outros, os agentes executores e os técnicos de desenvolvimento para estimular o uso eficiente e produtivo da energia elétrica.

Os sistemas de geração descentralizada de energia elétrica com redes isoladas e os sistemas individuais de fornecimento de energia elétrica podem ser contemplados por soluções usando a energia eólica disponível nos mais diversos recantos do Brasil.

## **1.6 CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES DE SISTEMAS DE ENERGIA EÓLICA**

### **1.6.1 Referencial histórico**

A energia eólica tem sido utilizada há milhares de anos, nas aplicações mais diversas. A história da navegação registra o acionamento dos barcos usando a energia dos ventos desde os primórdios da humanidade.

A história traz registros do uso de moinhos de vento no Japão e na China em 2000 a.C. e na Babilônia em 1700 a.C. [06]. Em torno do ano 200 a.C., na Pérsia (atual Iraque), usava-se a força da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos [07]. Na Dinamarca o uso da energia eólica para produção de energia elétrica já completou seu primeiro centenário [08].

Desde então, muito já se pesquisou para que a geração de energia elétrica obtida a partir de turbinas eólicas seja cada vez mais atrativa tanto do ponto de vista técnico como econômico.

### **1.6.2 Formas de Aproveitamento da Energia Eólica**

A energia eólica é “limpa” de baixo custo operacional e de manutenção e, assim como

a hidrelétrica, seu “combustível” é fornecido gratuitamente pela natureza. A energia eólica compete diretamente com a energia solar e a hidráulica, perdendo apenas, atualmente, para esta última em termos de custos e consecutivamente de potência instalada.

Para aproveitamento da energia eólica em eletricidade, existem hoje em dia no mundo, duas opções: turbinas eólicas de eixo vertical e turbinas eólicas de eixo horizontal. As turbinas eólicas de eixo vertical derivam a sua força a partir de princípios aerodinâmicos com base no arrasto, uma força considerada atualmente ineficiente [09]. As turbinas eólicas de eixo horizontal, apresentam-se atualmente como as mais eficientes e tem o seu princípio também baseado em aerodinâmica, porém nas forças de sustentação.

A Figura 1.4a e 1.4b exibem exemplares de turbinas eólicas de eixo vertical e de eixo horizontal.

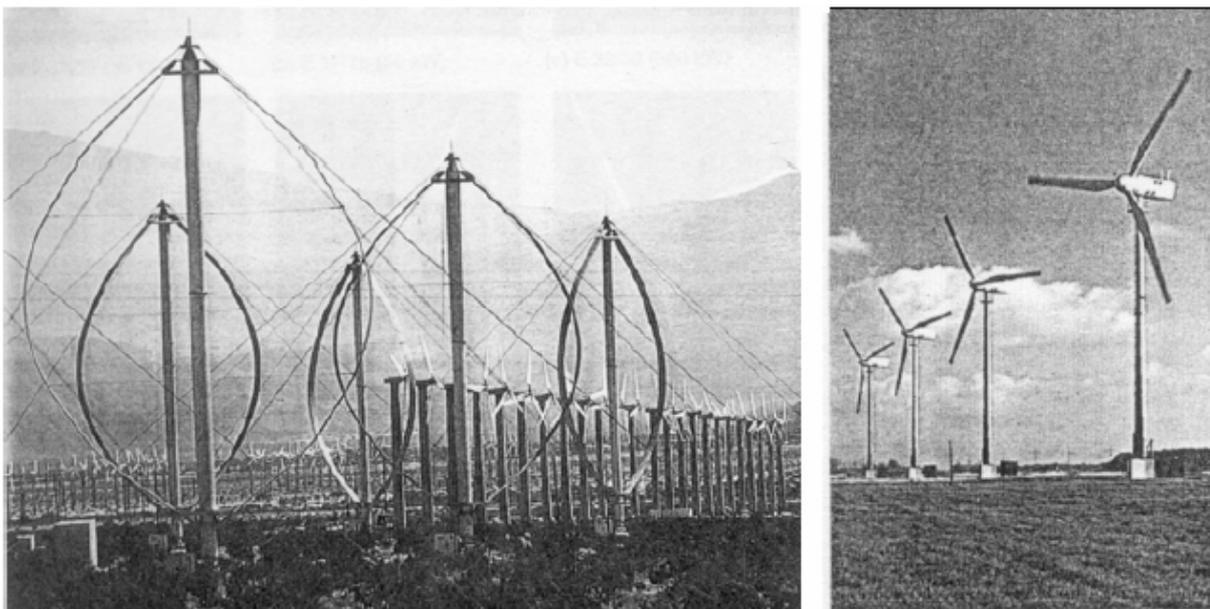


Figura 1.4a e 1.4b – Mostram turbinas eólicas de eixo vertical e de eixo horizontal [09].

## 1.7 OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO

O objetivo principal deste Trabalho é elaborar o projeto e a execução de um Circuito Controlador de Carregamento de Baterias para Turbinas Eólicas de Pequeno Porte. Esse Circuito deverá desempenhar três funções fundamentais:

- garantir a estabilidade da tensão a ser fornecida para o carregamento da bateria de modo a otimizar sua vida útil
- supervisionar a tensão da bateria evitando que ela se descarregue em demasia quando da falta de vento ou falha da turbina eólica;
- dobrar a tensão gerada pela turbina eólica de modo a potencializar o aproveitamento da energia elétrica gerada em baixas velocidades de vento.

A bateria a ser usada no projeto deverá ser adequadamente dimensionada e especificada conforme abordado no APÊNDICE A, de modo que ao ser aplicada nos sistemas autônomos de fornecimento de energia. Ela deverá ser o elemento fundamental no armazenamento de energia para prover a alimentação das cargas elétricas quando da falha momentânea da turbina eólica, ou mesmo da falta de vento.

Na eletrificação em locais remotos onde não existe facilidade de acesso à rede elétrica convencional e onde os custos de instalação e manutenção de sistemas de distribuição são proibitivos ou são inviáveis as soluções a partir de fontes alternativas e particularmente por energia eólica tem-se mostrado uma grande realidade.

Em tais situações surge a utilização de pequenas turbinas eólicas como solução para atender as comunidades mais afastadas dos grandes centros urbanos e dos centros de geração.

Devido às características estocásticas do vento incidente no rotor de uma turbina eólica, a energia elétrica na saída do gerador acoplado a ela apresenta flutuações em tensão e em frequências geradas, causando grandes instabilidades. Ditas flutuações também chamadas de “flickers” são extremamente desaconselháveis para alimentação dos mais diversos tipos de cargas elétricas que exijam boa qualidade da energia gerada com a qual são alimentadas [09].

## **1.8 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta Dissertação está estruturada em cinco capítulos subdivididos de acordo com a

evolução do assunto abordado e traz ao final uma Bibliografia e os Apêndices.

O Capítulo 1 traz uma breve introdução sobre o panorama da geração da energia elétrica no Brasil, a problemática da exclusão elétrica e os objetivos desta Dissertação.

O Capítulo 2 traz uma abordagem sobre turbinas eólicas para locais remotos com destaque para uma Turbina Eólica de ímã permanente, baixa potência, monofásica. Neste capítulo, serão apresentadas as principais características e informações técnicas de Turbinas Eólicas de pequeno porte.

O Capítulo 3 apresenta o estado da arte de circuitos controladores de carregamento de baterias, o projeto e desenvolvimento do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias proposto neste Trabalho com a respectiva implementação de protótipo prático, efetuado com recursos tecnológicos locais. Neste capítulo são analisadas as características técnicas do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias, uma análise do seu desempenho quando aplicado em uma Turbina Eólica específica, WG 910, além da metodologia dos trabalhos experimentais e os equipamentos usados nos ensaios.

O Capítulo 4 traz uma análise e discussão dos resultados dos ensaios obtidos com os Circuitos implementados do Controlador de Carregamento de Baterias objeto deste Trabalho, em comparação com os dados do Fabricante da Turbina Eólica WG910 e com o Controlador de Carga de Baterias utilizado por aquela Empresa.

O Capítulo 5 traz uma análise da viabilidade econômica da implementação do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias a partir da aquisição de componentes eletrônicos no mercado nacional. São apresentadas ainda as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Após o Capítulo 5 são apresentadas as Referências Bibliográficas que serviram de apoio ao desenvolvimento da presente Dissertação.

No APÊNDICE A é apresentado um estudo das baterias eletroquímicas, características de carga e descarga, tempo de vida e utilização como elemento de armazenamento de energia

para quando da falha da Turbina Eólica ou falta de vento, proporcionando assim uma autonomia de funcionamento para o sistema isolado, garantindo sua confiabilidade.

O APÊNDICE A traz também um exemplo de dimensionamento e especificação de um banco de baterias para uma aplicação pertinente a este Trabalho.

No APÊNDICE B é apresentada a rotina de manutenção que foi efetuada para recuperar a Turbina Eólica Rutland Windcharger - WG 910, usada como exemplo de aplicação do Circuito objeto desta Dissertação.

## CAPÍTULO 2

### 2.1 SISTEMAS HÍBRIDOS

Em um sistema híbrido eólico-solar-bateria típico, as turbinas eólicas geram energia elétrica em tensão alternada (CA), os painéis fotovoltaicos geram energia elétrica em tensão contínua (CC) e as baterias são usadas como acumuladores de energia elétrica em corrente contínua. A Figura 2.1 exibe um sistema híbrido típico eólico-solar-bateria.

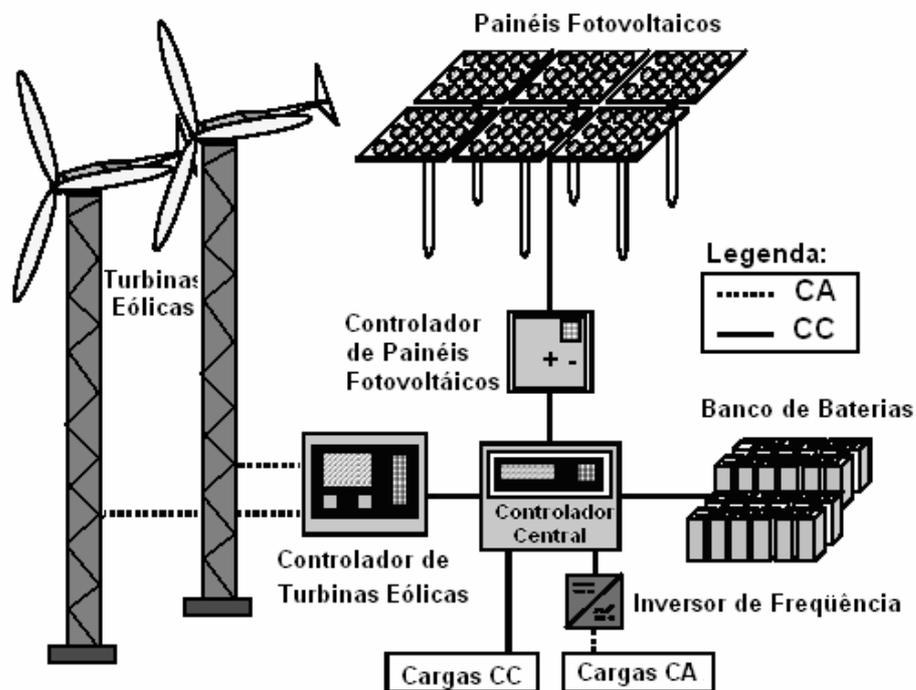


Figura 2.1 – Sistema híbrido eólico-solar-bateria típico.

Um sistema híbrido como o apresentado na Figura 2.1 contempla o aproveitamento de energia renovável oriunda de duas fontes distintas: o sol e o vento.

A Figura 2.1 ilustra que as tensões de tais geradores são reguladas a um nível CC nominal de projeto (por ação do controlador da turbina eólica e do controlador do painel fotovoltaico) e, após, as produções já terem sido previamente reguladas, a energia então obtida é entregue ao controlador central.

O modelo aqui abordado refere-se a um sistema mais completo, usado apenas como ilustração, pois, a esse controlador encontram-se também conectados o banco de baterias, o painel fotovoltaico, a turbina eólica, as cargas CC e o inversor de frequência para a alimentação das prováveis cargas CA, sendo que o objetivo principal de tal controlador é a execução das seguintes ações:

- a. otimização da operação do sistema híbrido;
- b. gerenciamento do fluxo de energia, segundo as prioridades de atendimento de carga;
- c. preservação da integridade física dos componentes.

## **2.2 A TURBINA EÓLICA**

A turbina eólica é uma máquina de conversão de energia que transforma a energia cinética contida nos ventos em eletricidade. Vale salientar que, diferente do conceito de turbina hidráulica, que diz respeito unicamente ao conjunto de pás que giram sob a ação da água, o conceito de turbina eólica é algo mais amplo, englobando não apenas o rotor aerodinâmico, como também o gerador elétrico e todas as peças necessárias à conexão entre tal rotor e gerador, além do que, não se pode falar em aproveitar a energia do vento sem lembrar que diferentemente da energia hidráulica, o vento não pode ser armazenado e tem características estocásticas.

A turbina eólica possui os mesmos princípios físicos que os dos tradicionais cataventos multipás conectados a alternadores, diferindo desses quanto aos aspectos tecnológicos [10].

A turbina eólica é o resultado de intensas pesquisas aerodinâmicas e aeroelásticas que lhe conferiram um desempenho superior, vida útil mais longa e capacidade de geração de energia superior à dos cata-ventos.

Os estudos aerodinâmicos têm mostrado que como diferenças principais entre as turbinas eólicas e os tradicionais cata-ventos tem-se que:

- As turbinas eólicas normalmente são apresentadas com até três pás e operam com baixo torque e altas velocidades;
- Os cata-ventos são habitualmente multipás e operam com alto torque e baixas velocidades.

A Figura 2.2 exibe o desenho esquemático de uma turbina eólica de pequeno porte com seus principais componentes como: rotor aerodinâmico, gerador elétrico, leme e suporte vertical.

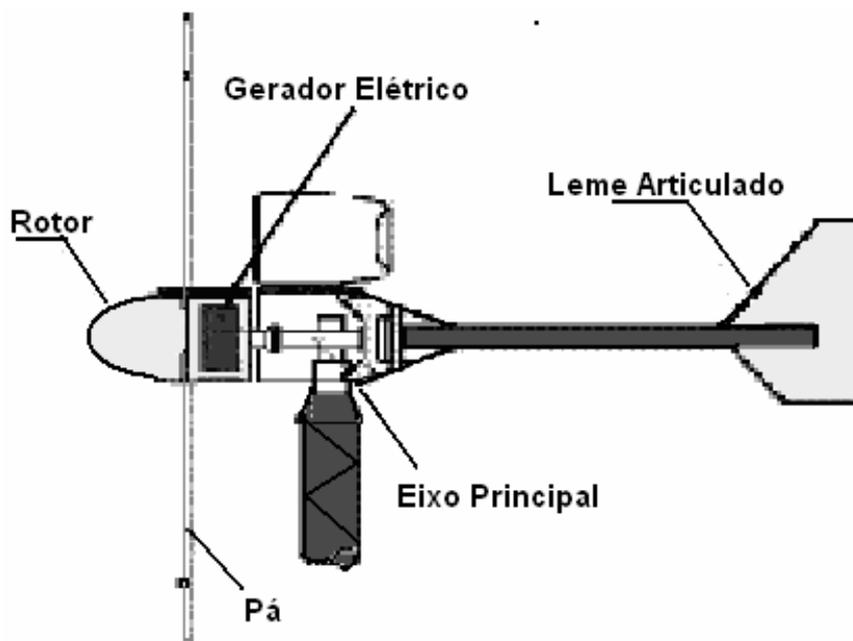


Figura 2.2 – Turbina eólica de pequeno porte típica para aplicações remotas.

O modelo de turbina eólica exibida na Figura 2.2 é de eixo horizontal e possui gerador de imã permanente acoplado ao rotor aerodinâmico que em composição com o estator bobinado formam o gerador elétrico.

Próximo à extremidade de cada uma das pás há uma massa adequadamente localizada que funciona como dispositivo de controle mecânico da potência gerada. Sob a ação da força centrífuga de acordo com a rotação do rotor o citado dispositivo atua mudando o ângulo de ataque e daí a potência gerada.

O funcionamento da turbina eólica é automático e todos os controles são mecânicos, como o controle passivo do ângulo de passo e o direcionamento ou orientação da turbina com relação ao vento que é efetuado pelo leme articulado localizado na região posterior da turbina.

### 2.2.1 Cálculo da Potência Elétrica Captada pela Turbina Eólica

Avalia-se a potência elétrica de saída " $P_e$ " da turbina eólica em apreço, partindo-se da energia " $E$ " contida no vento que flui laminarmente com velocidade " $v$ ", perpendicular ao plano do rotor de tal turbina [11]:

$$E = \frac{1}{2} m \times v^2 \quad (2.1)$$

Onde:

$E$  - energia cinética (J)

$m$  - massa de ar (kg)

$v$  - velocidade do vento (m/s)

Diferenciando-se no tempo ambos os lados da Eq. (2.1), de um lado " $dE/dt$ " e de outro, sabendo que:  $m = \rho \cdot V$  e que  $V = A \cdot v$ , vem: " $dm/dt = \rho \cdot A \cdot dx/dt$ ", em que " $x(t)$ " é o espaço percorrido por uma partícula de ar até o encontro com o rotor da turbina, chega-se a:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho \times A \times v^3 \quad (2.2)$$

Onde:

$P_d$  - potência eólica disponível (W)

$\rho$  - massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$  - área do rotor ( $\text{m}^2$ )

$v$  - velocidade do vento (m/s)

Considerando-se o coeficiente de potência " $C_P$ " (rendimento aerodinâmico), que indica a fração da potência eólica disponível " $P_d$ " convertida em potência mecânica no eixo

do rotor, tem-se:

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

Onde:

$P_a$  - potência eólica aproveitável (W)

$C_p$  - coeficiente de potência (adimensional)

$v$  - velocidade do vento (m/s)

O coeficiente " $C_p$ " é característica intrínseca de desenho da turbina eólica, tendo como máximo valor teórico  $16/27$  ( $\sim 0,593$ , valor conhecido como "Limite de Betz").

Tipicamente, as mais modernas turbinas eólicas apresentam máximo valor para " $C_p$ " entre 0,4 e 0,5. Para que se compreenda a relação desse coeficiente com a velocidade de vento " $v$ ", o que muitas vezes altera a característica cúbica da função potência eólica aproveitável " $P_a$ ", deve-se tomar a razão entre a velocidade linear da ponta da pá e a velocidade de vento " $v$ " (razão definida como a "velocidade específica da ponta (*tip speed ratio*)") [11]:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v} \quad (2.4)$$

Onde:

$\lambda$  - razão de velocidade específica da ponta da pá (*adimensional*)

$\Omega$  - Velocidade angular do rotor (*rad / s*)

$R$  - raio do rotor (*m*)

$V$  - Velocidade do vento (*m / s*)

A Figura 2.3 exhibe uma relação entre a potência eólica aproveitável e a velocidade de rotação do rotor para diferentes velocidades de vento.

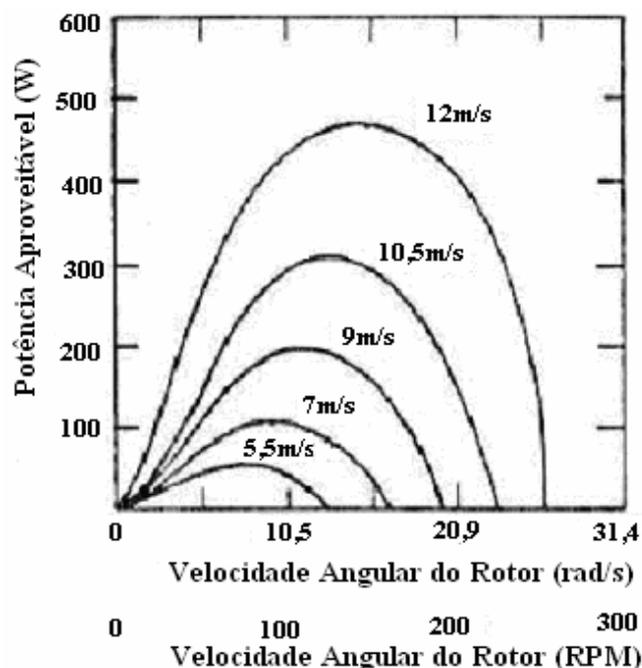


Figura 2.3 – Potência eólica aproveitável como função da velocidade angular do rotor, para distintas velocidades de vento.

A forma geral que estabelece a importante relação entre a potência eólica aproveitável " $P_a$ " e a velocidade angular do rotor " $\Omega$ " é apresentada na Figura 2.3, para um rotor lento (6 a 8 pás tipicamente). Salienta-se que, no tocante a essa relação, cada curva " $P_a \times \Omega$ " se dá para uma distinta velocidade de vento e o valor máximo de potência (para cada velocidade de vento) ocorre para a velocidade ótima de rotação [11].

Pela análise da Figura 2.3, vê-se que para uma velocidade de vento de 9m/s a velocidade ótima de rotação do rotor situa-se em torno de 100RPM, onde há uma potência eólica aproveitável de 200Watts.

### 2.2.2 Curva Típica de Potência da Turbina Eólica

A grande maioria dos modelos comerciais de turbinas eólicas apresenta, em sua curva de potência, característica quadrática para velocidades de vento entre a velocidade de partida " $v_{part}$ " e a velocidade nominal " $v_n$ ". No entanto, a curva completa (para velocidades de vento entre a velocidade de partida " $v_{part}$ " e a "velocidade de parada (*cut-out*)"  $v_{parada}$ ) não pode ser inteiramente descrita por uma única função. Um esboço da curva típica de uma turbina eólica

comercial com controle de potência passivo por estol é apresentado na Figura 2.4.

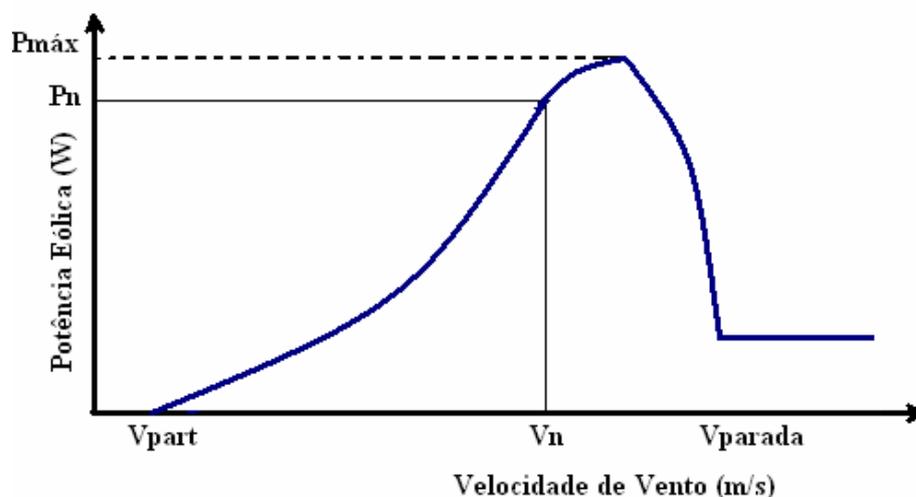


Figura 2.4 – Curva típica de potência de uma turbina eólica.

Nessa Figura 2.4, observa-se que, com o aumento da velocidade de vento após a velocidade nominal " $V_n$ ", a potência atinge um valor máximo " $P_{máx}$ " e a partir daí passa a decrescer. Esse comportamento que se apresenta no "cume" da curva é regido pelo fenômeno estol e tem como principal objetivo a limitação da potência extraída pelo rotor para evitar uma sobrecarga no gerador elétrico. Ainda, a velocidade de parada " $V_{parada}$ " é definida para que se delimite a faixa de velocidades de vento para a operação da turbina eólica que garanta a integridade física de seus componentes. A quase totalidade das turbinas eólicas para aplicações remotas tem o controle em relação à " $V_{parada}$ " realizado por um dos seguintes mecanismos passivos: leme articulado para o embandeiramento do rotor (*horizontal furling*); conjunto de molas para a inclinação vertical do rotor (*vertical furling*) [12] a [14].

### 2.3 TURBINAS EÓLICAS EXISTENTES NO MERCADO PARA APLICAÇÕES EM LOCAIS REMOTOS

São vários os fabricantes de turbinas eólicas para aplicações em locais remotos dentre as quais destacam-se a Enersud, a Bergey, a Whisper e a Marlec Co, as quais possuem características bastante distintas de princípio de operação, potência de saída e sistemas de controle da energia elétrica gerada.

### 2.3.1 A Turbina Eólica Rutland Windcharger WG 910

O controlador de carga, objeto desta dissertação, foi projetado, desenvolvido e testado para aplicações com turbinas eólicas de pequeno porte e foi testado em laboratório com uma Turbina Eólica Rutland Windcharger - WG 910, fabricada pela Marlec Engineering Co Ltd [15]. Para viabilizar o trabalho com a turbina WG 910, disponível no CBEE e que foi usada neste trabalho foi efetuada uma manutenção geral nela cuja descrição está contida no Apêndice B deste trabalho.

Neste capítulo, serão apresentadas as principais características e informações técnicas sobre esta Turbina Eólica de pequeno porte.

A tensão gerada pela Turbina é, em princípio, alternada senoidal e a Marlec[15] já provê um retificador em ponte de diodos inserido na nacele da Turbina de modo que na saída obtém-se uma tensão contínua pulsante, por retificação em onda completa.

A nacele da Turbina uma vez acionada pelo leme, quando o vento incidir sobre ela, terá livre movimentação em 360°, no plano horizontal, à procura do vento incidente. Devido a este fato, a Turbina dispõe de um conjunto de dois anéis coletores fabricados em liga de cobre e montados sobre material isolante solidários ao eixo de sustentação da mesma. Desta forma a tensão contínua pulsante é aplicada aos anéis coletores através de escovas de carbono e destes, descem internamente, ao longo do eixo vertical de sustentação da turbina, é aplicado por condutores de seção reta de 2,5 mm<sup>2</sup> ao meio exterior.

A Marlec [15] adverte do risco que é advindo do acionamento da Turbina Eólica sem qualquer carga acoplada aos seus terminais devido às altas tensões geradas, o que se fundamenta tecnicamente pelo que estabelece o princípio da indução eletromagnética, Lei de Faraday [16] e [17], que calcula a tensão nos terminais de um gerador eletromagnético:

$$V_G = \frac{L.d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

Onde:

$V_G \rightarrow$  tensão induzida nos terminais do gerador (em Volts),

$L \rightarrow$  indutância da bobina (em Henry),

$\frac{d\phi}{dt} \rightarrow$  taxa de variação do fluxo magnético (em Weber/s).

Assim, para uma determinada indutância da bobina, dependendo da magnitude da taxa de variação do fluxo magnético, pode-se obter um valor de tensão gerada bastante elevado.

A Marlec [15] recomenda que a condição de ensaio em circuito aberto seja usada apenas para testes de laboratório, devendo ser usada com cautela e até, sempre que possível, ser evitada.

### 2.3.1.1 Especificações Técnicas da Turbina Eólica WG 910

A Rutland Windcharger – WG 910 é uma Turbina Eólica de pequeno porte desenvolvida para aplicações de carregamento de bancos de baterias. Estas aplicações são atrativas, particularmente, para instalações em locais remotos, não supridos pela rede elétrica convencional, como exemplo, estações meteorológicas ou estações de telecomunicações providas de alimentação elétrica a partir dos ditos dispositivos acumuladores[15].

As dimensões do Rotor e demais componentes da Turbina Eólica WG-910, são apresentadas na Figura 2.5.

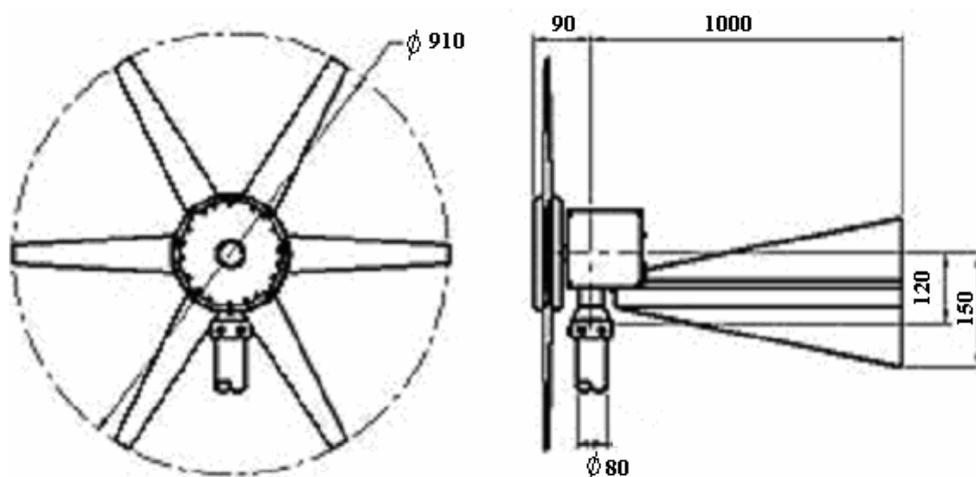


Figura 2.5 – Dimensões da Turbina WG910 - Cortesia: MARLEC [15] - adaptado.

A Figura 2.5 ilustra que o Rotor aerodinâmico da Turbina Eólica é composto por um

conjunto de seis pequenas pás que, acopladas ao gerador, perfazem um diâmetro total de 910mm, dado este que será usado no Capítulo 4 quando do cálculo da razão de velocidade específica na ponta da pá, *tip speed ratio* ( $\lambda$ ), da Turbina Eólica para fins de caracterização dela.

A relativa facilidade de instalação constitui bastante versatilidade para este Modelo de Turbina Eólica, o qual pode ser usado até mesmo em embarcações que necessitem de um suprimento de energia elétrica por bateria.

A Figura 2.6 Exibe a curva de potência da Turbina Eólica conforme dados do Fabricante.

As características de potência da Turbina são fornecidas pelo Fabricante através de sua curva de potência conforme exibido na Figura 2.6, a qual apresenta a variação da potência em função da velocidade do vento.

Na curva de potência apresentada na Figura 2.6, pode-se notar que a Turbina começa a fornecer energia aproveitável para a carga a partir de velocidades de vento maiores que 2 m/s e que a potência máxima da Turbina é de 180 W, mas, como pode ser observado na referida curva, ela é alcançada apenas para velocidades de vento entre 18 e 20 m/s, que são consideradas velocidades bastante altas para a maioria das aplicações.

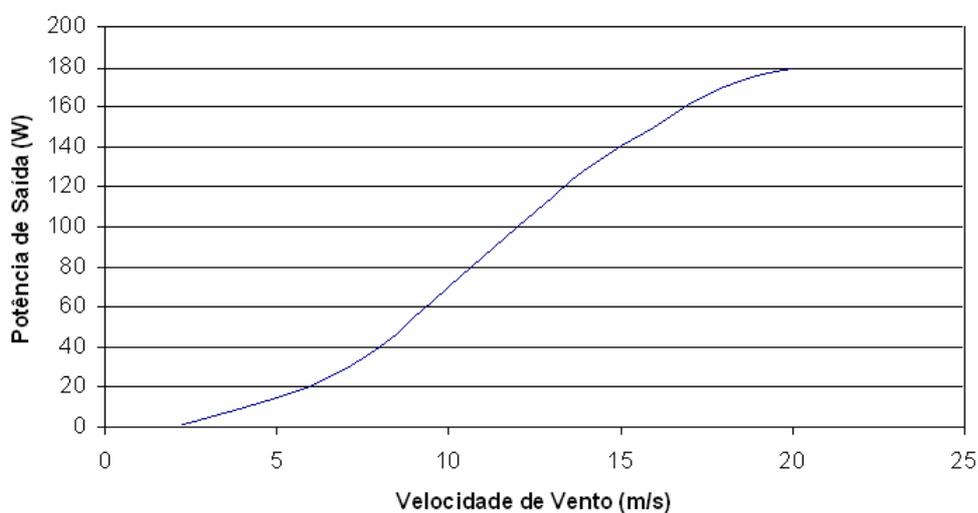


Figura 2.6 – Curva de Potência da Turbina WG-910 - Cortesia: MARLEC [15] - Adaptado.

Em termos de tensão nominal entregue à carga, o modelo WG 910 é especificado para 12 V<sub>cc</sub> ou para 24 V<sub>cc</sub> sendo que, o exemplar utilizado neste Trabalho fornece tensão nominal de 12 V<sub>cc</sub> e potência de 100Watts.

Geralmente, considerando a tensão de saída sob carga praticamente constante para a aplicação em carregamento de banco de baterias, é bastante comum neste campo de aplicações, referir-se à característica de corrente fornecida à carga e autonomia das baterias, em detrimento do termo potência produzida pela Turbina, já que neste caso, a proposta é fornecer energia elétrica aos acumuladores chumbo-ácido.

No APÊNDICE A desta Dissertação, é apresentado um exemplo de dimensionamento e especificação de bateria eletroquímica para uma determinada aplicação.

A potência nominal de 100 W é obtida da Turbina WG 910 para uma velocidade de vento em torno de 12m/s. Entretanto pode-se conseguir uma potência máxima de 180 W para velocidades de vento da ordem de 20m/s, conforme citado acima.

A Tabela 2.1 apresenta a corrente de carga da Turbina Eólica Rutland Wind Charger WG 910 e as autonomias distintas para diferentes velocidades de vento, tanto para a turbina com especificação de 12 V<sub>cc</sub> quanto para de 24V<sub>cc</sub>. A tabela traz a capacidade de corrente para um regime de funcionamento de 24h, com fornecimento de uma tensão nominal de 12 V ou 24 V.

Considerando uma Turbina da série WG 910, de 12 V, objeto deste Trabalho, observa-se que a potência fornecida e conseqüentemente a autonomia do sistema varia diretamente com a velocidade do vento.

Tabela 2.1 – Autonomia e corrente de carga fornecida pela WG 910 para 12Vdc e para 24Vdc em função da velocidade média do vento

Velocidade média do vento (m/s)	Série 910 - 12V Saída (A)	Série 910 - 12V Autonomia (Ah)	Série 910 - 24V Saída (A)	Série 910 - 24V Autonomia (Ah)
6	1,6	38,1	0,8	19,2
8	3,75	90	1,86	45
10	6	144	3,0	72
12	8,75	210	4,38	105
14	10,8	259,2	5,4	129,6

Cortesia: MARLEC [15] - adaptado.

Para 6m/s, por exemplo, se a Turbina Eólica estiver fornecendo uma corrente de 1,6 A, durante um período aproximado de 24 h tem-se uma autonomia (A) de:

$A = 1,6A \times 24h = 38,4 \text{ Ah}$ , similar ao dado fornecido pela Marlec [15].

O Fabricante da Turbina Eólica WG910 também fornece a característica da tensão gerada com relação à velocidade de rotação do gerador, através da curva de tensão em circuito aberto (sem carga) da Turbina. Ditas características estão ilustradas na Figura 2.7.

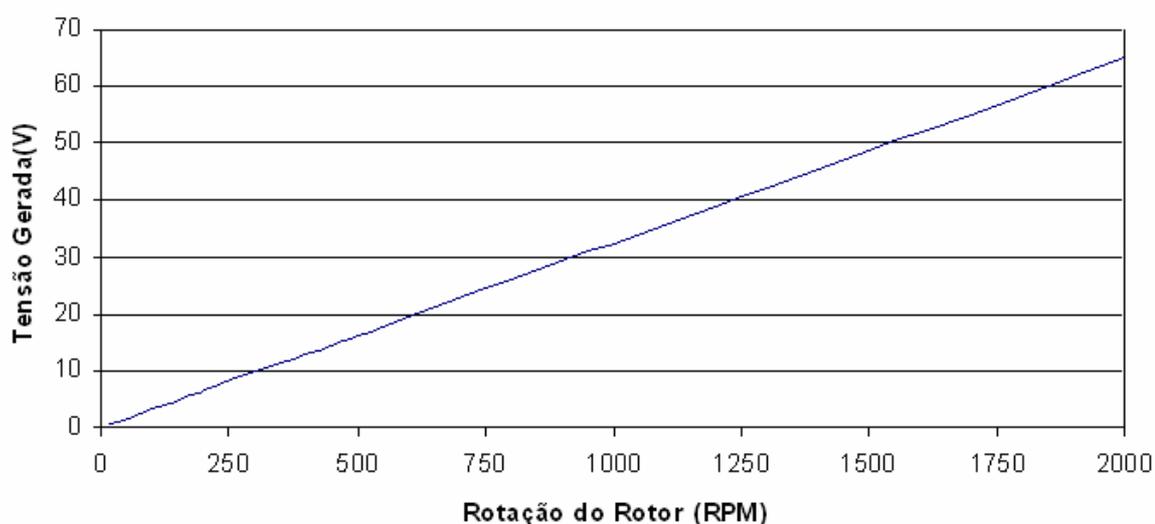


Figura 2.7 – Curva de tensão em circuito aberto (Volts) x velocidade de rotação (RPM). Cortesia: MARLEC [15] - adaptado.

A condição de ensaio em circuito aberto exibido na Figura 2.7 é usada apenas para testes de laboratório, e o Fabricante da Turbina Eólica adverte pra o cuidado na realização do teste, o qual sempre que possível deve ser evitado, em função dos altos transientes de tensão que podem ser gerados nesta ocasião.

A Figura 2.7 estabelece uma relação linear da tensão gerada em função da velocidade de rotação do Rotor da Turbina Eólica e apresenta uma tensão nominal de 12V para uma velocidade maior que 250RPM e que a tensão máxima de saída em torno de 65 V, ocorre para uma velocidade de 2000 RPM.

### ***2.3.1.2 Características Básicas da Turbina Eólica WG 910***

Neste capítulo serão apresentadas as características básicas construtivas desta Turbina Eólica de pequeno porte, características de projeto e funcionamento dela e serão descritas as especificações e o funcionamento do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria para a Turbina em tela fornecido pelo Fabricante dela.

A Rutland Windcharger – WG 910 é uma Turbina Eólica de pequeno porte, monofásica fabricada pela Marlec [15] que fornece uma tensão contínua (após retificada por uma ponte de diodos) para aplicações remotas incluindo suporte na área de telecomunicações e navegação marítima, com alimentação de cargas elétricas por bancos de baterias com recarga destas pela Turbina.

A Figura 2.8 mostra um exemplar da Turbina Eólica WG 910 instalada, com destaque para as dimensões reduzidas do Aerogerador e para as condições de instalação em campo.



Figura 2.8 – Turbina Eólica Rutland Wincharger WG 910 - Cortesia: MARLEC [15].

A Turbina Eólica é composta pelo conjunto: rotor aerodinâmico, gerador elétrico, nacele e leme de orientação.

O conjunto rotor aerodinâmico ou “*hub*” é formado por seis pás acopladas à carcaça girante com os ímãs permanentes do gerador e é o componente do Aero gerador responsável pela conversão da energia cinética contida nos ventos em energia mecânica de rotação de todo o conjunto.

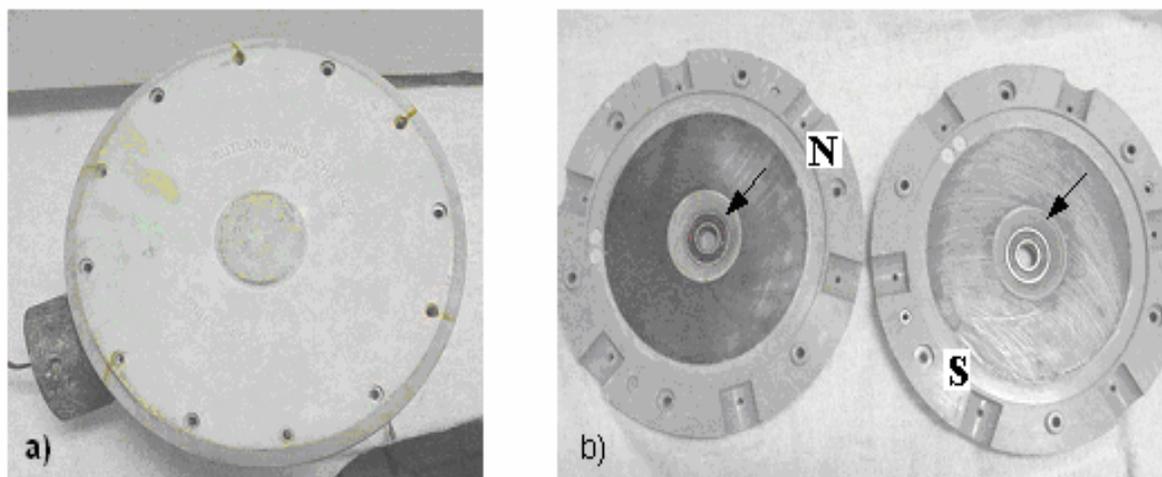
O gerador elétrico com rotor a ímã permanente traz o enrolamento induzido no estator da máquina.

A nacele abriga os dispositivos eletroeletrônicos da Turbina e o leme de orientação que posiciona o Aero gerador na direção predominante do vento.

### ***2.3.1.3 O Gerador Elétrico da Turbina Eólica***

A Turbina Eólica WG 910 é constituída de um gerador a ímã permanente cujo indutor é estacionário (estator) e o Rotor é constituído por um conjunto de ímãs que formam duas peças polares em forma de disco que se acoplam e se encaixam mecânicamente envolvendo o estator.

O arranjo formado pelas duas peças polares encaixadas forma a carcaça do Gerador da Turbina Eólica conforme apresentado nas Figuras 2.9a) e 2.9b).



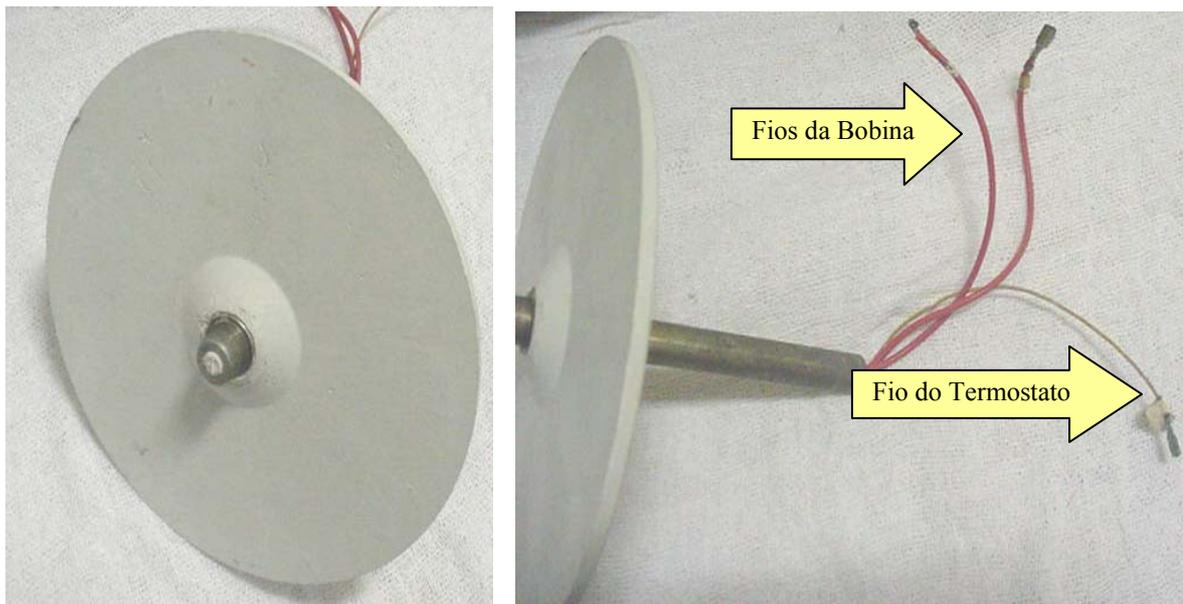
Figuras 2.9 – a) Mostra o Gerador da Turbina WG 910 montado; b) Mostra as peças polares do Gerador desmontado, formadas por ímãs permanentes Norte (N) e Sul (S).

O estator é envolvido pelas duas peças polares do rotor (Figura 2.9 b) que formam os conjuntos de ímãs permanentes (Norte e Sul). O conjunto como um todo forma o gerador síncrono a ímã permanente (Figura 2.9a).

O núcleo ou estator da Turbina Eólica WG 910 é constituído por uma bobina a dois fios (gerador monofásico), que é a responsável efetiva pela geração de energia elétrica, e um termostato encapsulados em um material cerâmico formando um disco, que no funcionamento normal do Aerogerador é estacionário e inserido entre as peças polares que, no caso, são girantes.

O termostato constitui um dispositivo de segurança contra superaquecimento do estator da Turbina Eólica.

Do interior do eixo central do estator saem os dois condutores da bobina e os dois condutores do termostato, conforme ilustrado na Figura 2.10.



Figuras 2.10 – a) Mostra a vista frontal do estator do Gerador da Turbina Eólica; b) Mostra a vista lateral do estator.

A Figura 2.10a mostra a vista frontal do estator do Gerador da Turbina Eólica composto de bobina elétrica e termostato ambos encapsulados em resina epóxi.

A Figura 2.10b mostra a vista lateral do estator da Turbina Eólica com destaque para o eixo central de onde saem os dois condutores da bobina (fios vermelhos) e o fio do termostato (fio branco). Na Figura vê-se apenas um dos condutores do termostato e revela uma das condições em que foi recebida a Turbina Eólica para elaboração deste Trabalho conforme descrito no APÊNDICE B.

A tensão fornecida pelo Gerador é, em princípio, alternada senoidal, mas é retificada através de uma ponte retificadora **a)** de onda completa (formada por quatro diodos retificadores integrados em uma pastilha semicondutora única), fornecendo uma tensão contínua pulsante na saída.

#### **2.3.1.4 A Nacele e os Dispositivos Eletroeletrônicos**

A nacele abriga os dispositivos eletro-eletrônicos da Turbina Eólica os quais nela, estão instalados, conforme Figura 2.11, a saber: uma ponte retificadora de diodos, um indutor e um conjunto de escovas e anéis coletores solidários ao eixo de vertical da Turbina.

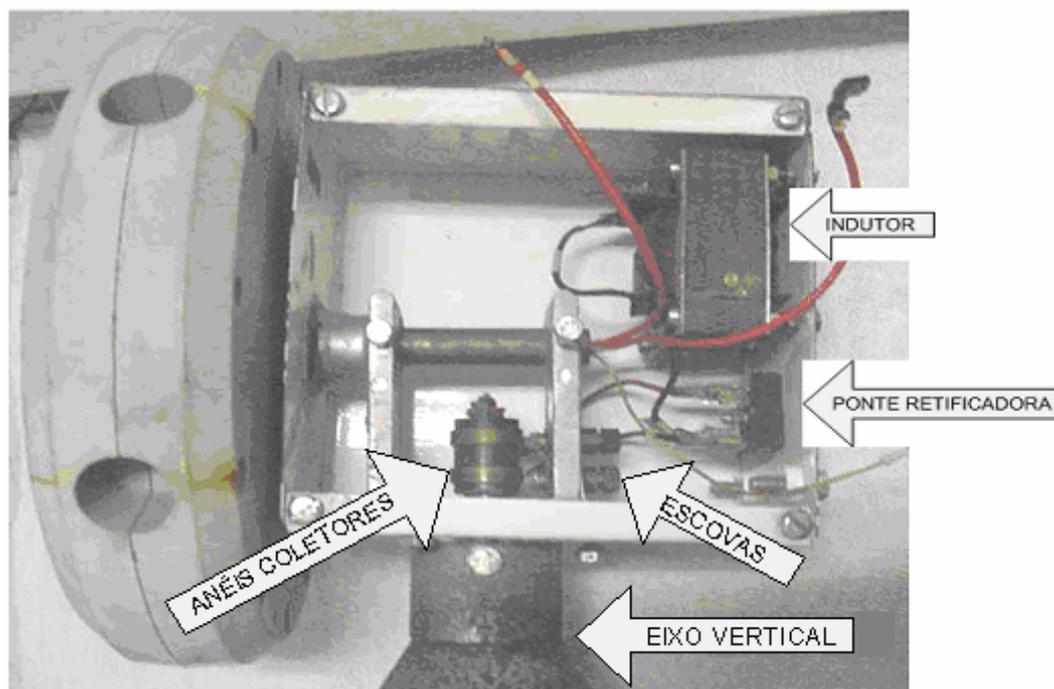


Figura 2.11 – Interior da nacele: o indutor, a ponte retificadora, os anéis coletores e as escovas.

A Figura 2.11 Mostra o interior da nacele da Turbina Eólica com o destaque para os principais componentes:

- Ponte retificadora → é um circuito retificador de onda completa que transforma a tensão alternada ( $V_{CA}$ ) oriunda do Gerador da Turbina Eólica transformando-a em uma tensão contínua pulsante ( $V_{CC}$ ) a ser entregue à carga por condutores apropriados;
- O indutor → é usado para fins de controle do fluxo de corrente fornecido à carga, limitação do índice de ondulação da tensão retificada e proteção efetiva do gerador elétrico;
- O conjunto de anéis coletores → os anéis coletores apresentam-se solidários ao eixo vertical de sustentação da Turbina Eólica e são responsáveis pela aplicação da energia elétrica gerada, recebida das escovas, ao meio exterior;
- O conjunto de escovas → as escovas de carbono apresentam-se solidárias à estrutura de fixação do estator da Turbina Eólica e é responsável pela recepção da energia elétrica oriunda do Gerador a ser aplicada aos anéis coletores.

O arranjo formado pelo conjunto anéis coletores e escovas torna possível o giro da Turbina Eólica em torno do eixo vertical de sustentação dela sem interrupção do fornecimento da alimentação à carga. Este giro que eventualmente a Turbina deve realizar para se manter na direção predominante do vento é determinado pelo leme de orientação.

Devido ao este conjunto de dois anéis coletores, fabricados em liga de cobre e montados sobre material isolante solidários ao eixo de sustentação da Turbina, a nacele terá livre movimentação em 360°, no plano horizontal, de maneira que o Rotor aerodinâmico possa permanecer na direção predominante do vento mesmo com as variações deste. Desta forma a tensão contínua pulsante oriunda da ponte retificadora, é aplicada aos anéis coletores através de escovas de carbono e a partir deles, é conduzida ao longo do eixo vertical de sustentação da Turbina sendo entregue à carga por condutores apropriados.

#### ***2.3.1.5 Representação Esquemática da Turbina Eólica WG910***

A Figura 2.12 ilustra em diagrama esquemático o gerador da Turbina e seus dispositivos eletroeletrônicos. Na referida Figura, pode-se observar com detalhes o posicionamento dos dispositivos supracitados.

Nota-se a conexão dos cabos de saída do gerador para o indutor limitador de ondulação (16) e para a ponte retificadora (7) e desta para as escovas (9) que devem permanecer em contato com os anéis coletores de cobre (11) a fim de fornecer tensão contínua para a carga.

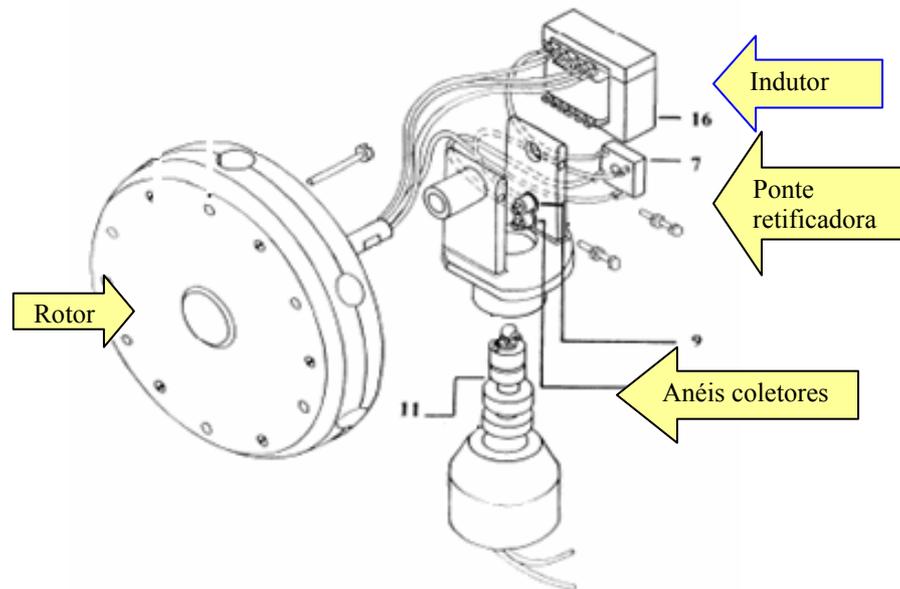


Figura 2.12 – Mostra o posicionamento dos componentes do gerador e dos dispositivos eletroeletrônicos - Cortesia : MARLEC [15] - adaptado.

### 2.3.1.6 Circuito Elétrico Equivalente da Turbina Eólica WG 910

O circuito elétrico equivalente é disposto de forma a caracterizar o funcionamento elétrico da Turbina promovendo o carregamento de um banco de baterias.

A Figura 2.13 exibe o diagrama elétrico equivalente da Turbina Eólica WG 910.

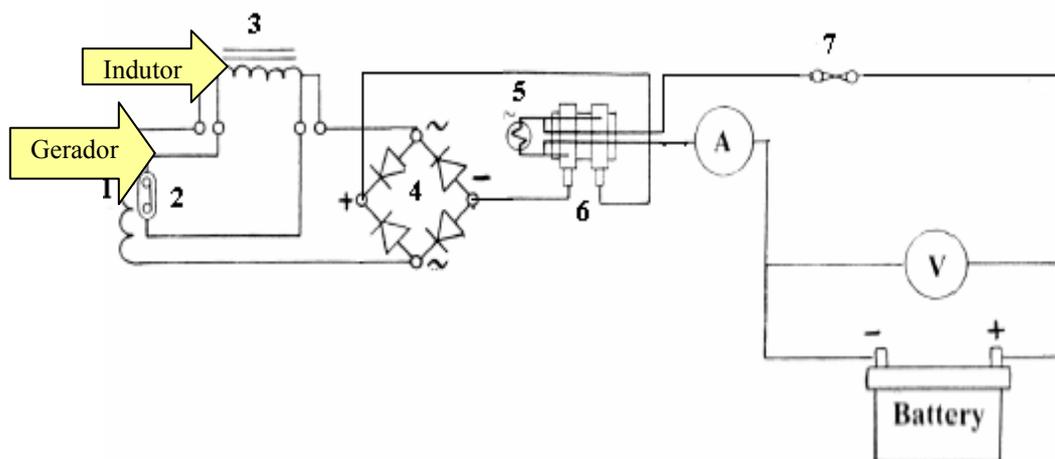


Figura 2.13 – Diagrama do circuito elétrico equivalente da Turbina incluindo a ponte retificadora e alimentação da carga (bateria) – Cortesia MARLEC [15] - adaptado.

Na Figura 2.13 as bobinas do Gerador síncrono são representadas no circuito por uma indutância (1). O enrolamento do Gerador é ligado em série com o indutor limitador de

ondulação (3) que permanece em curto-circuito enquanto o contato do termostato (2) permanecer fechado.

Finalmente, o retificador é representado no diagrama pela ponte de diodos (4) conectada aos terminais do gerador e ao indutor limitador de ondulação.

O dispositivo representado em (5) é um diodo de proteção contra inversão de polaridade e que suprime eventuais transientes de tensão.

O componente representado em (6) representa os anéis coletores e o componente (7) representa o fusível de proteção dimensionado de acordo com a potência da Turbina Eólica.

Descrição dos componentes do diagrama:

- 1 – bobina do gerador → bobina embutida juntamente com o termostato no disco estator;
- 2 – termostato → com contato Normalmente Fechado (NF), embutido no disco estator e que serve de proteção para a Turbina Eólica de modo a evitar superaquecimento na bobina do Gerador, quando da solicitação de uma sobre-corrente pela carga;
- 3 – indutor → instalado em série com a bobina do gerador, na nacele da Turbina Eólica;
- 4 – ponte retificadora → formada por quatro diodos retificadores encapsulados em uma unidade integrada, referência: BF 37933, de fabricação FACON [15].

Os componentes  $\text{\textcircled{A}}$  e  $\text{\textcircled{V}}$  representam respectivamente o amperímetro e o voltímetro indicadores da corrente de carga e da tensão de carga da bateria.

### ***2.3.1.7 Análise do Funcionamento do Circuito Eletroeletrônico da Turbina Eólica***

Em condições normais de operação, o termostato (2) está com o contato fechado e sendo assim o indutor série estará em curto-circuito, permitindo pleno fluxo de corrente elétrica para a carga. Na iminência de um superaquecimento da bobina do gerador, causado por uma solicitação demasiada de corrente pela carga, os contatos do termostato abrem, inserindo o indutor limitador de ondulação da corrente (3) no circuito e daí então, promovendo uma redução da corrente fornecida. O indutor limita a corrente pela contribuição

da sua reatância indutiva ( $X_L$ ) em série. A redução da corrente elétrica fornecida para a carga, provoca um abaixamento da temperatura evitando o superaquecimento da bobina do gerador. Assim, o termostato volta a fechar seus contatos, normalizando a alimentação da carga [16] e [17].

Tem-se:

$$X_L = \omega \cdot L \quad (2.1)$$

Onde:

$X_L$  → reatância indutiva ( $\Omega$ );

$\omega$  → velocidade angular do rotor da turbina (rad/s);

$L$  → indutância do indutor (H) (Henry).

### 2.3.1.8 O Regulador de Carga da Turbina Eólica WG 910

A Marlec Co[15], Fabricante da Turbina Eólica WG 910, trabalha com um regulador de carga do tipo Shunt modelo SR 200 o qual destina-se à regulagem de tensão para pequenas turbinas eólicas e para painéis solares e que é comercializado a US\$ 280.

A Figura 2.14 exibe o regulador de carga SR 200 que a Marlec Co usado pela Marlec.



Figura 2.14 – Reguladores SR 200 e HRS 913 respectivamente – Cortesia: Marlec [15] - adaptado.

O SR 200, exibido na Figura 2.14, opera em sistemas isolados híbridos eólico/painéis solares e recebe simultaneamente alimentação elétrica da turbina eólica e dos painéis solares efetuando seu adequado controle de modo a prover com segurança o adequado controle de carga de um banco de baterias.

Atualmente o regulador de carga SR 200 tem sido substituído por uma versão mais moderna cujo modelo é o HRS 503 ou HRS 913.

A Marlec [15] informa ainda que o regulador SR 200 protege as baterias de sobrecarga evitando a perda de eletrólito pela produção excessiva de gases, prolongando a vida útil das baterias. Ele também protege os equipamentos eletrônicos contra danos causados por tensão elevada nas baterias.

O referido regulador é indicado pelo Fabricante [15] para recarga de baterias chumbo ácido de ciclo profundo e para baterias seladas.

#### ***2.3.1.9 Princípio de Operação do Regulador HRS 503***

O regulador de carga HRS 503 [15], monitora constantemente a tensão da bateria e pré-seleciona o nível de corte inicial em 13,8 V e a tensão máxima em 14,4 V.

O sistema dispõe de Diodos Emissores de Luz (LEDs) indicadores das condições de carga e estabelece um controle da máxima carga da bateria através de um circuito em paralelo que desvia o excesso de carga.

A Marlec [15] aconselha observar as especificações da bateria a ser alimentada pelo sistema e reajustar o regulador caso a bateria seja do tipo Níquel-Cádmio ou com eletrólito na forma de gel.

## **CAPÍTULO 3**

### **3.1 CIRCUITOS CONTROLADORES DE CARREGAMENTO DE BATERIAS: O ESTADO DA ARTE**

Os circuitos controladores de carregamento de bateria são equipamentos que convertem a tensão alternada gerada pela turbina eólica em tensão contínua de valor adequado para fins de alimentar uma bateria ou banco de baterias, cargas elétricas que necessitam de alimentação com tensão contínua ou inversores de tensão CC/CA. Neste capítulo será apresentado o estado da arte destes equipamentos.

### **3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES**

De uma maneira geral um circuito controlador de carregamento de baterias, usado em aplicações isoladas e alimentado por turbina eólica, consiste de: um retificador, um circuito de filtragem e de um circuito de controle da potência a ser aplicada à bateria.

A Figura 3.1 Exibe um diagrama em blocos dos modelos mais habituais de configurações de sistemas de carregamento de bateria por turbinas eólicas [18].

A configuração (1) exibida na Figura 3.1 é uma da mais simples e mostra que a tensão alternada oriunda da Turbina Eólica (TE) é aplicada à bateria após passar por um retificador (R) que a transforma em tensão contínua pulsante.

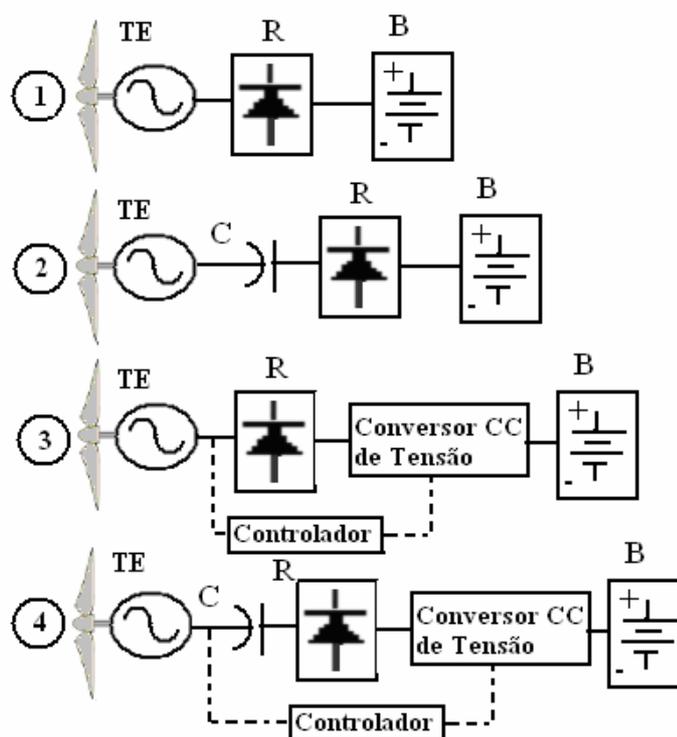


Figura 3.1 – Mostra as configurações de sistemas de carregamento de baterias

Este sistema é aplicado particularmente para turbinas eólicas de pequeno porte e não possui dispositivo de controle da energia a ser aplicada ao banco de baterias, pois espera-se que os acumuladores (B) mantenham constante a tensão aplicada aos seus terminais.

A configuração (2) é bastante similar à configuração (1) acrescida de um capacitor de acoplamento (C) que filtra os possíveis ruídos elétricos emitidos pela Turbina Eólica (TE) e viabiliza o casamento de impedâncias particularmente nas altas frequências.

A configuração (3) exibida na Figura 3.1 mostra um sistema de qualidade já bastante melhorada com relação aos anteriores. Nele há um dispositivo conversor de tensão, que no diagrama corresponde ao bloco “Conversor CC de Tensão”, a ser entregue à bateria e um sistema de controle de carga, que no diagrama corresponde ao bloco “Controlador”, que regula a energia a ser entregue à bateria (B).

A configuração (4) exibida na Figura 3.1 é bastante similar à configuração (3) acrescida apenas do capacitor de acoplamento (C) que filtra os possíveis ruídos elétricos

emitidos pela Turbina Eólica (TE) e viabiliza um melhor casamento de impedâncias nas altas frequências.

### **3.3 O CIRCUITO CONTROLADOR DE CARREGAMENTO DE BATERIAS OBJETO DESTA DISSERTAÇÃO**

#### **3.3.1 Resultados Esperados**

A proposta desta Dissertação é efetuar o projeto e implementação de um Circuito Controlador de Carregamento de Bateria inovador, diferente dos existentes no mercado, que forneça uma tensão contínua de 13,8V e que supervise a descarga dos acumuladores permitindo que a tensão mínima de descarga não seja inferior a 11,8V, de forma a otimizar a vida útil dos acumuladores eletrolíticos, conforme citado na literatura específica sobre o assunto [19] a [26] no APÊNDICE A.

Desta forma a energia armazenada na bateria poderá ser disponibilizada para a execução de projetos viáveis em sistemas independentes da rede convencional de energia elétrica.

#### **3.3.2 Projeto do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria**

Para efetivação do projeto do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria para Turbinas Eólicas de pequeno porte serão seguidas as etapas:

- Para efetivação dos testes do Circuito foi usada uma Turbina Eólica de pequeno porte Rutland Wind Charger, modelo: WG 910 de 100 W, fabricada pela Marlec [15], existente no CBEE (Centro Brasileiro de Energia Eólica). A Turbina Eólica foi o dispositivo responsável pelo fornecimento de energia elétrica a ser aproveitada pela carga. Os detalhes construtivos da Turbina Eólica usada neste trabalho e a rotina de manutenção efetuada para fins de recuperação do exemplar obtido no CBEE encontram-se descritos no APÊNDICE B desta Dissertação;

- O Circuito Controlador de Carregamento de Baterias a ser projetado e construído disporá de um tipo de carga a saber: uma bateria que irá receber a energia elétrica retificada, filtrada, oriunda da Turbina Eólica para manter o citado acumulador em flutuação. A bateria por sua vez, irá alimentar uma carga de tensão contínua ou um inversor para suprir uma determinada carga alimentada por tensão alternada em funcionamento. Desta forma, o inversor será alimentado em paralelo com a bateria de tal modo que na falta de energia do vento, será usada a energia armazenada pelo acumulador para manter a carga em funcionamento;

A Figura 3.2 ilustra em um fluxograma o funcionamento do Controlador de Potência.

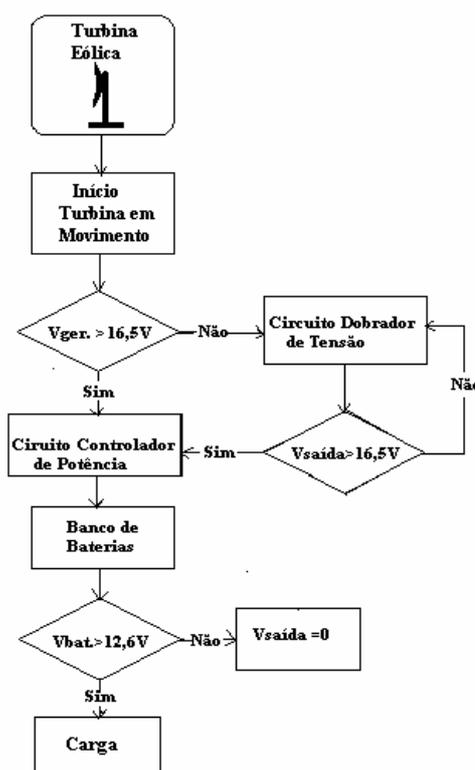


Figura 3.2 – Fluxograma do funcionamento do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria

- Um dos principais diferenciais do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria proposto neste Trabalho é a inclusão de uma etapa Dobradora de Tensão que irá duplicar o valor da tensão gerada pela Turbina Eólica em baixas rotações (pequenas velocidades de

vento) de modo a melhorar o aproveitamento da energia gerada.

O Equipamento proposto incluirá ainda um Circuito Eletrônico de Segurança que irá Supervisionar a condição de carregamento da bateria e irá desligá-la do circuito consumidor (carga) caso a sua tensão nominal caia abaixo de um valor pré-determinado, de modo a evitar uma descarga profunda do acumulador, prolongando sua vida útil.

### 3.4 PROJETO E EXECUÇÃO DO CIRCUITO CONTROLADOR DE CARREGAMENTO DE BATERIAS

#### 3.4.1 Diagrama em Blocos do Sistema

A proposta desta Dissertação é projetar e elaborar o protótipo de um Controlador de Carregamento de Baterias que seja mais completo e, portanto diferente dos demais.

O Equipamento aqui proposto incorpora em uma só unidade: um Circuito Dobrador de Tensão, um Circuito Controlador de Carregamento de Bateria e um Circuito de Supervisão de descarga da Bateria.

A Figura 3.3 exibe o diagrama em blocos do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias objeto desta Dissertação com destaque para a Turbina Eólica e para a simbologia de cada componente dos blocos funcionais.

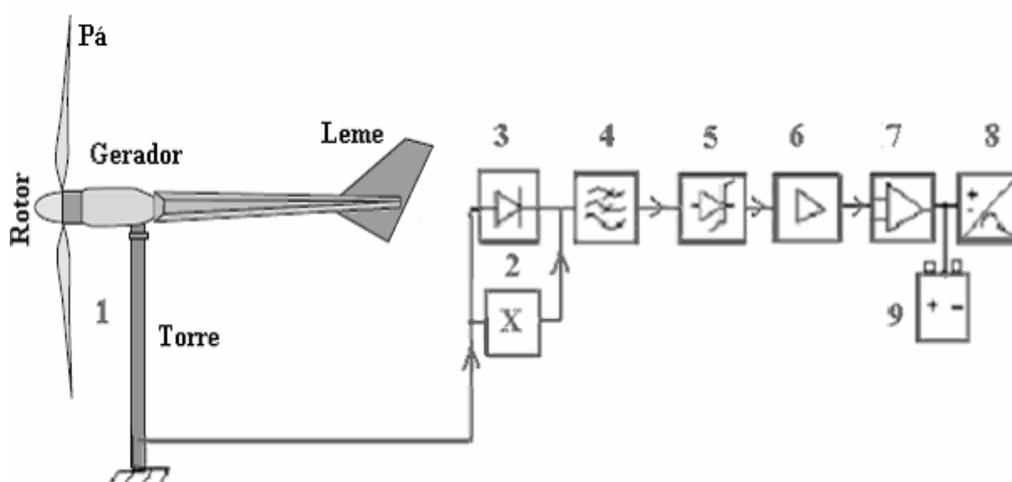


Figura 3.3 – Diagrama em blocos do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias.

Legenda:

1 – Turbina Eólica → dispositivo responsável pelo fornecimento da energia renovável que irá alimentar as cargas;

1.1 – Componentes da turbina eólica:

- ✓ Rotor → dispositivo responsável pela extração da energia eólica;
- ✓ Pá → elemento que recebe diretamente a energia do vento para transformá-la em torque de acionamento do rotor;
- ✓ Gerador/alternador → componente que converte a energia mecânica recebida do ar em movimento em energia elétrica;
- ✓ Torre → estrutura vertical de sustentação de todo o conjunto;
- ✓ Leme → dispositivo responsável pela orientação da turbina eólica na direção do vento incidente.

2 – Circuito multiplicador de tensão → dispositivo responsável por dobrar a tensão fornecida pela Turbina Eólica de modo a melhor aproveitar a energia gerada em baixas rotações, quando a tensão obtida ainda é insuficiente para acionar o Circuito Controlador de Potência. Caso a tensão gerada pela Turbina Eólica supere o valor mínimo necessário para alimentação do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias, a tensão gerada pela Turbina Eólica será retificada e aplicada diretamente ao citado Circuito;

3 – Etapa retificadora de tensão → usa uma ponte retificadora integrada, que converte a tensão alternada oriunda da Turbina Eólica em tensão contínua pulsante;

4 – Etapa de filtragem → filtra os pulsos de tensão contínua oriundo da etapa retificadora de tensão, transformando a tensão contínua pulsante em tensão contínua com ripple (pequeno fator de ondulação);

5 – Etapa estabilizadora de tensão → etapa responsável pelo fornecimento de uma tensão invariável no tempo que irá ser fornecida ao circuito comparador para fins de decisão sobre qual carga será alimentada;

6 – Circuito amplificador de potência → circuito responsável pela quantidade adequada de energia a ser entregue à bateria/inversor de forma a alimentá-los conforme suas necessidades de projeto;

7 – Circuito comparador de tensão → etapa responsável pela análise condição de carga/descarga da bateria para fins de determinação se ela será ou não desligada da carga (ou inversor);

8 – Inversor → trata-se de um dispositivo eletrônico que irá converter a energia recebida da bateria/Turbina Eólica em tensão alternada de 110 ou 220 Volts a ser usada para alimentar cargas AC;

9 – Bateria Chumbo-ácido → dispositivo a ser usado para armazenar energia elétrica recebida da Turbina Eólica.

### **3.5 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO CONTROLADOR DE CARREGAMENTO DE BATERIAS**

O Circuito Controlador de Carregamento de Baterias objeto deste Trabalho é do tipo Dobrador de Tensão, acoplado a um Circuito Controlador série e manterá a tensão aplicada ao banco de baterias em um valor fixo, ajustável, em torno de 13,8 Volts. A tensão de descarga da bateria será continuamente supervisionada, quando da falta de vento ou falha da Turbina Eólica, de tal forma que o citado dispositivo será desconectado do elemento consumidor (carga DC ou inversor DC/CA) quando a tensão do citado acumulador chegar a um nível crítico, ajustável, de 11,8 Volts. Desta forma o sistema prevê uma histerese para as condições de carga e descarga da bateria:  $11,8 \text{ Volts} \leq V_B \leq 13,8 \text{ Volts}$ , conforme as condições de projeto citadas no APÊNDICE A.

Onde:  $V_B$  → tensão da bateria.

### 3.5.1 Dimensionamento da Autonomia do Sistema Isolado

Das características da Turbina Eólica, para uma potência nominal de 100 W e tensão de 12 Volts, tem-se uma corrente de:

$$I_N = P_N / V_N = 100W / 12 V = 8,33 A.$$

Onde:

$I_N$ ,  $P_N$  e  $V_N$  → são valores nominais de corrente, potência e tensão da Turbina Eólica, respectivamente.

A descarga da bateria ocorrerá se não houver vento, ou com vento insuficiente durante um intervalo de tempo máximo de 2h, tempo este referente à autonomia do sistema, ou seja: intervalo de tempo no qual o sistema irá funcionar sem que haja reposição alguma da energia da bateria. Se a bateria estiver acoplada a uma carga de potência 100 Watts, ter-se-á uma capacidade de corrente da bateria necessária de:  $C_B = 70Ah$ , conforme explicado no APÊNDICE A.

Desta forma, a bateria ou o banco de baterias a ser usado no sistema será de especificações: 12 V / 70 Ah, que na condição de alimentar a carga nominal (100W), terá uma autonomia de 2h na ausência total de vento incidente ou falha na Turbina Eólica.

### 3.5.2 Controle de Carga com Regulador de Tensão Integrado

A Turbina Eólica WG 910 de fabricação Marlec Co [15], em condições normais de operação, já fornece uma tensão retificada por um retificador em ponte de diodos, BF37933 fabricação FACON. Este componente é um dos integrantes dos dispositivos existentes na nacela da Turbina Eólica.

A tensão fornecida pela Turbina Eólica WG 910 deverá ser convenientemente regulada e aproveitada para alimentar um banco de baterias e/ou alimentar cargas DC ou inversores CC/CA

A Figura 3.4 exibe o diagrama elétrico do Circuito Controlador de Potência.

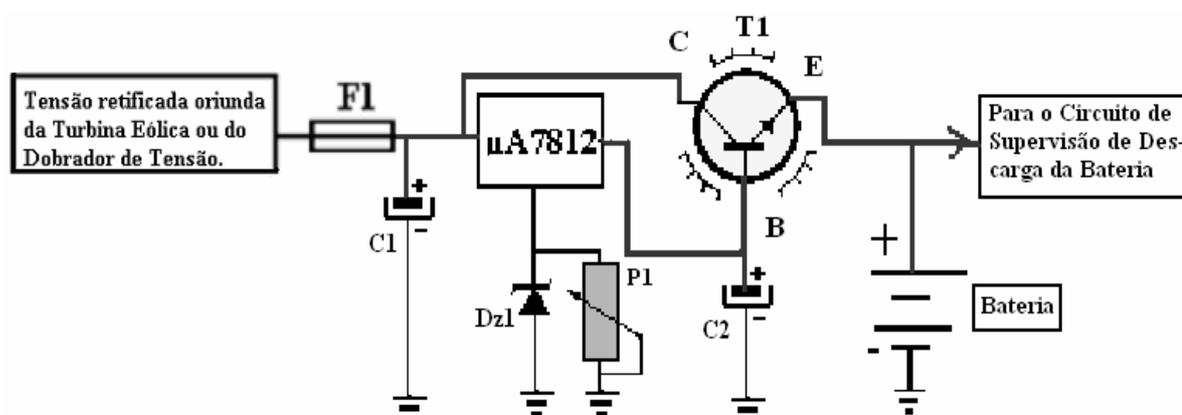


Figura 3.4 – Diagrama elétrico do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias

O Diagrama elétrico da Figura 3.4 estabiliza a tensão retificada, fornecida pela Turbina Eólica, a qual mediante um ajuste do *trim-pot* P<sub>1</sub> determina o valor mais adequado de tensão a ser aplicado à bateria.

O Fusível F<sub>1</sub> é um dispositivo de proteção contra picos de corrente demandada pela carga que a Marlec [15] recomenda que seja de 10 A, compatível com a corrente máxima que a Turbina Eólica fornecerá à plena carga que é de 8,33A.

A tensão fornecida pela Turbina Eólica é contínua pulsante e deverá ser filtrada pelo capacitor C<sub>1</sub> para ser então aplicada ao circuito eletrônico que irá promover sua estabilização.

Como elementos de filtros serão usados os capacitores eletrolíticos C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub> [27] a [31].

O Circuito Integrado (CI) μA 7812 é um circuito estabilizador de tensão contínua a três terminais (entrada, terra e saída), da família 78XX, onde o “XX” representa o valor da tensão de saída. Dito CI admite uma tensão de entrada máxima de 37 Volts e necessita de uma tensão na entrada mínima de: XX + 2,0 Volts para poder operar adequadamente [27].

Se no pino 2 do CI for colocado um diodo *zener* e um *trim-pot*, conforme exibido na Figura 3.3, pode-se ajustar o valor da tensão de saída de “XX” até “XX + Vz”, onde Vz é o valor da tensão *zener*. Com este procedimento ter-se-á uma tensão estabilizada e ajustada pelo diodo *zener* Dz<sub>1</sub> e pelo *trim-pot* P<sub>1</sub>, na saída do CI, a ser aplicada na base do transistor

amplificador de potência  $T_1$  proporcionando desta forma, sua adequada polarização de forma a se obter 13,8V no emissor dele, conforme desejado, para carregar a bateria.

O valor máximo da tensão de saída a ser aplicada à bateria pode ser ajustado em 13,8V através de  $P_1$  que controla o nível de tensão na base do transistor  $T_1$ .

A tensão na base de  $T_1$  deverá ser:

$$V_B = V_E (= V_{BAT}) + V_{BE} (=0,7V), \text{ ou seja: } V_B = 13,8 + 0,7 = 14,5 \text{ V.}$$

O CI nas condições em que irá operar no circuito irá necessitar receber no seu *borne* de entrada: 16,5 V (14,5V + 2,0 V) [30] e [31].

A Figura 3.5 exibe o diagrama elétrico do circuito Controlador de Descarga da bateria (ou de Supervisão de Descarga do Banco de Baterias), que será implementado em anexo ao Circuito de Controle de Carregamento de Bateria, com as respectivas especificações dos componentes complementadas pelas considerações subseqüentes.

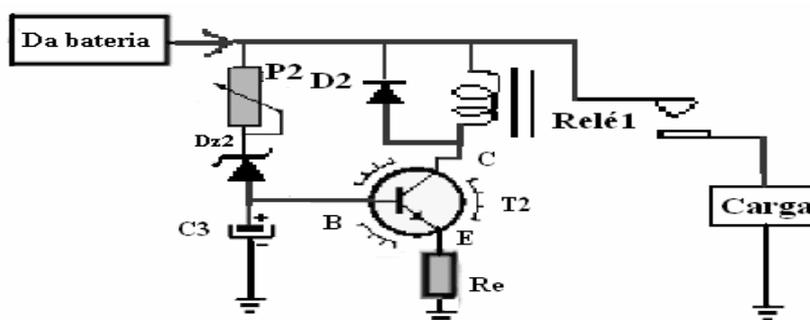


Figura 3.5 – Diagrama elétrico do Circuito Controlador de Descarga do banco de baterias.

O Circuito de Controle de Descarga da bateria opera desligando-a da carga quando a tensão dela atingir o limiar mínimo ajustável de 11,8V.

O contato do  $Relé_1$  é NA (normalmente aberto) e a condição para que a carga seja alimentada por ele é que a tensão mínima do banco de baterias seja de 12,6V, suficiente para polarizar o transistor  $T_2$  e operar o  $Relé_1$ . Este valor de tensão pode ser ajustado pelas especificações do diodo *zener*  $D_{z2}$  e do *trim-pot*  $P_2$ .

O Relé<sub>1</sub> será desligado, e cortará a alimentação da carga, quando a tensão da bateria cair abaixo de 11,8V, valor este insuficiente para manter a condução do transistor T<sub>2</sub>. Desta forma o Circuito de Controle da Descarga da bateria possui uma histerese de operação de:

$V_B \geq 12,6V \rightarrow$  o Relé<sub>1</sub> opera e a carga é alimentada;

$V_B \leq 11,8V \rightarrow$  o Relé<sub>1</sub> desopera e é cortada a alimentação da carga.

A Figura 3.6 exibe a curva de histerese das condições de carregamento da bateria.

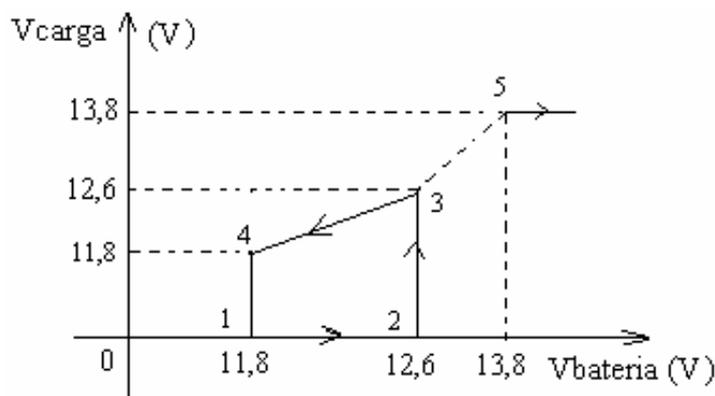


Figura 3.6 – Curva de histerese das condições de carga da bateria.

A Figura 3.6 ilustra que estando a bateria com uma tensão de 11,8V e, portanto “descarregada”, ponto 1 da curva, por falta de vento ou falha da Turbina Eólica e por ter havido consumo da energia da mesma, não haverá tensão de alimentação para suprir a carga e ela estará com 0V.

Ao serem normalizadas as condições de vento e/ou funcionamento da Turbina Eólica, citadas anteriormente, a tensão disponível para recarga da bateria aumenta (sentido 1 → 2 da curva) e ao chegar em 12,6V, ponto 3 da curva, começa a ser disponibilizado este valor de tensão para a carga.

Estando tudo dentro das condições de normalidade, com oferta de vento e a Turbina Eólica funcionando adequadamente, a tensão disponível para o carregamento da bateria continuará aumentando sendo finalmente estabilizada em 13,8V (sentido 3 → 5 da curva), permanecendo neste valor, em flutuação, o qual é disponibilizado simultaneamente para a

carga conforme as condições de projeto do Sistema.

Quando ocorrer falta de vento ou falha da Turbina Eólica, e se a bateria estiver alimentando uma carga no momento, a tensão da mesma que estava em flutuação em 13,8V (ponto 5 da curva), começará a cair (sentido 5 → 3 da curva) até 12,6V, sendo esta a tensão com a qual a carga fica sendo alimentada. Se as condições adversas persistirem e o processo de descarga da bateria prosseguir (sentido 3 → 4 da curva), a tensão da bateria atingirá as condições mínimas de projeto, conforme as condições estabelecidas no APÊNDICE A, e a carga será finalmente desenergizada.

As condições de histerese do Circuito são estabelecidas pelas características magnéticas de operação do Relé<sub>1</sub> associadas às características eletrônicas do circuito de alimentação dele.

### 3.5.3 Diagrama do Circuito de Controle de Carregamento e Supervisão da Tensão da Bateria

A proposta do Circuito de Controle de Carregamento e Supervisão de Descarga da Bateria é proporcionar um carregamento adequado da bateria mantendo-a em flutuação e supervisionar suas condições de descarga conforme as condições de projeto do fabricante dela.

A Figura 3.7 exibe o diagrama do Circuito de Controle de Carregamento acoplado ao Circuito de Supervisão de Descarga da Bateria.

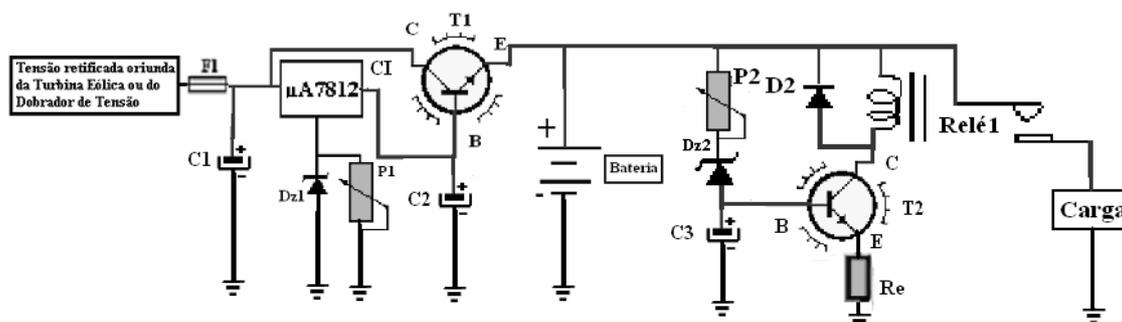


Figura 3.7 – Diagrama elétrico do Circuito de Controle de Carga e de Supervisão de Descarga da Bateria.

As Figuras 3.8a e 3.8b mostram o exemplar do Circuito de Controle de Carregamento e de Supervisão de Descarga da Bateria que foi implementado em uma placa de *fenolite* de (115 x 55) mm para efetivação dos experimentos referentes a esta Dissertação.

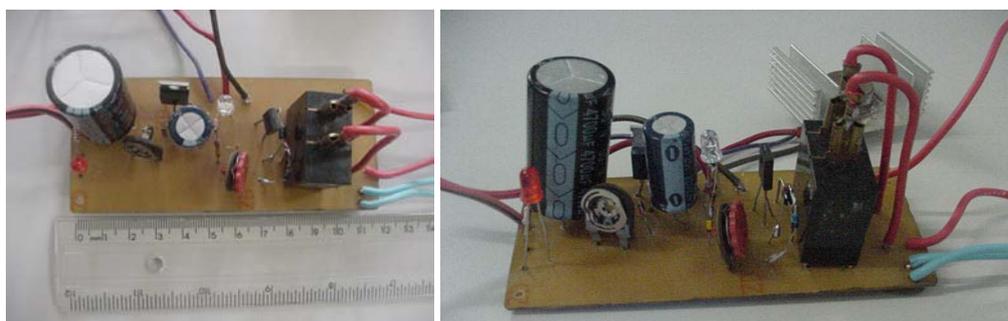


Figura 3.8a e Figura 3.8b – Mostram o Protótipo do Circuito de Controle de Carregamento e de Supervisão de Descarga da Bateria, fabricado para efetivação dos experimentos.

Nas Figuras 3.8a e 3.8b observa-se com destaque os capacitores de filtro de entrada da tensão retificada oriunda da Turbina Eólica a ser estabilizada, os *trim-pots* de ajuste do valor da tensão a ser regulada para carregar a bateria e o relé de chaveamento da tensão da bateria quando esta estiver se esgotando por falta de recarga.

### 3.5.4 Uso do Circuito Dobrador de Tensão

A proposta de implementar um Circuito Dobrador de Tensão no Circuito de Controle de Carregamento de Bateria tem como finalidade o aproveitamento da energia gerada pela Turbina Eólica em baixas velocidades de vento, melhorando desta forma o desempenho do sistema. Esta facilidade representa mais um diferencial de qualidade com relação aos outros controladores de carregamento existentes no mercado, os quais apenas regulam o valor da tensão elétrica a ser entregue à bateria.

#### 3.5.4.1 Projeto do Circuito Dobrador de Tensão

A Figura 3.9 exhibe o diagrama elétrico do Circuito Dobrador de Tensão, com destaque

para a tensão recebida por ele que neste caso é alternada (não passa pela ponte retificadora existente na nacele da Turbina Eólica).

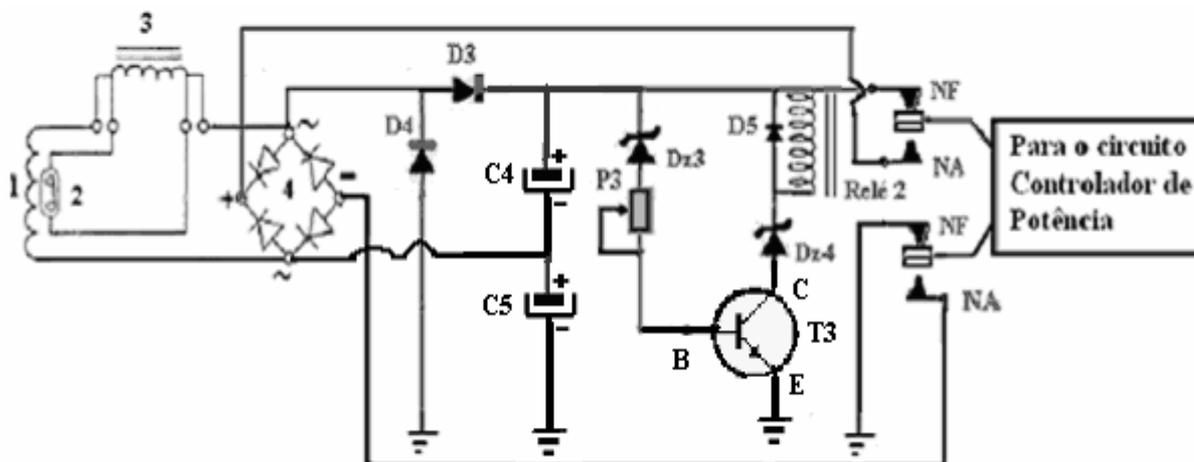


Figura 3.9 – Circuito Dobrador de Tensão

O Circuito Dobrador de Tensão mostrado na Figura 3.9 é formado por  $D_3$ ,  $D_4$ , e pelos capacitores  $C_4$  e  $C_5$  conforme [27]. Os capacitores  $C_4$  e  $C_5$  apresentam-se em uma associação série e recebem carga um por vez a cada meio ciclo da tensão de entrada. A tensão disponível nos extremos da associação é aproveitada efetivamente para através do Relé<sub>2</sub> ser aplicada à etapa seguinte formada pelo Circuito Controlador do Carregamento de Bateria.

A tensão que deverá chegar ao coletor do Transistor T1, do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, para ser devidamente regulada, carregar a bateria e mantê-la em flutuação com 13,8 V é de no mínimo 16,5V.

Desta forma somente haverá tensão na saída suficiente para carregar a bateria se a tensão no coletor de T1 for maior que 16,5V o que corresponde pelas características da Turbina Eólica, na condição de circuito aberto, a uma velocidade de rotação maior que 450 RPM [15] que conforme as condições de caracterização estabelecidas no Capítulo 4, corresponde a uma velocidade de vento maior que 7m/s.

Conforme esclarece a literatura técnica [27] a [31] o capacitor  $C_1$  ao receber energia, carrega-se com a tensão máxima gerada pela Turbina Eólica dada por:  $V_{C1} = \sqrt{2} \cdot V_{Turb}$ , o que

corresponde a uma tensão gerada pela Turbina de:  $V_{Turb} = \frac{16,5}{\sqrt{2}} = 11,67\text{Volts}$ .

Onde:  $V_{Turb}$  → é a tensão elétrica eficaz gerada pela Turbina Eólica;  
 $V_{CI}$  → é a tensão elétrica eficaz máxima gerada pela Turbina Eólica com a qual o capacitor vai se carregar.

Visando contornar esta situação e fazer com que a energia da Turbina seja melhor aproveitada deve-se usar um circuito Dobrador de Tensão que irá proporcionar um ótimo aproveitamento da energia gerada.

Com o uso do Circuito Dobrador de Tensão, o capacitor vai ser carregado com:

$V_{CI} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{Turb} = 16,5\text{V} \rightarrow V_{Turb} = 6,5\text{V}$ . Ou seja: com o uso do Circuito Dobrador de Tensão, para tensões geradas pela Turbina Eólica maiores que 6,5V, ter-se-á no capacitor  $C_1$  uma tensão mínima disponível de 16,5V a ser aplicada na entrada do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria.

A tensão de 6,5V corresponde pelas características da Turbina Eólica na condição de circuito aberto a uma velocidade de rotação maior que 180RPM, que conforme as condições de caracterização estabelecidas no capítulo 4, é obtida a uma velocidade de vento maior que 3m/s.

Desta forma, com o uso do Circuito Dobrador de Tensão, para tensões geradas pela Turbina Eólica maiores que 6,5V, já se obtém tensão suficiente para alimentar o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, que irá prover na sua saída o valor padrão de 13,8V.

Esta condição é fruto de uma análise teórica em circuito aberto e, portanto, despreza as perdas do Circuito Dobrador de Tensão e circuitos eletroeletrônicos da Turbina Eólica.

No Capítulo 4 será apresentada a metodologia dos ensaios experimentais realizados em bancada e serão apresentados os resultados práticos obtidos considerando todos os parâmetros citados.

As Figuras 3.10a e 3.10b exibem o protótipo do Circuito Dobrador de Tensão que foi implementado em uma placa de fenolite de (90x55) mm para efetivação dos experimentos

referentes a este Trabalho de Dissertação.

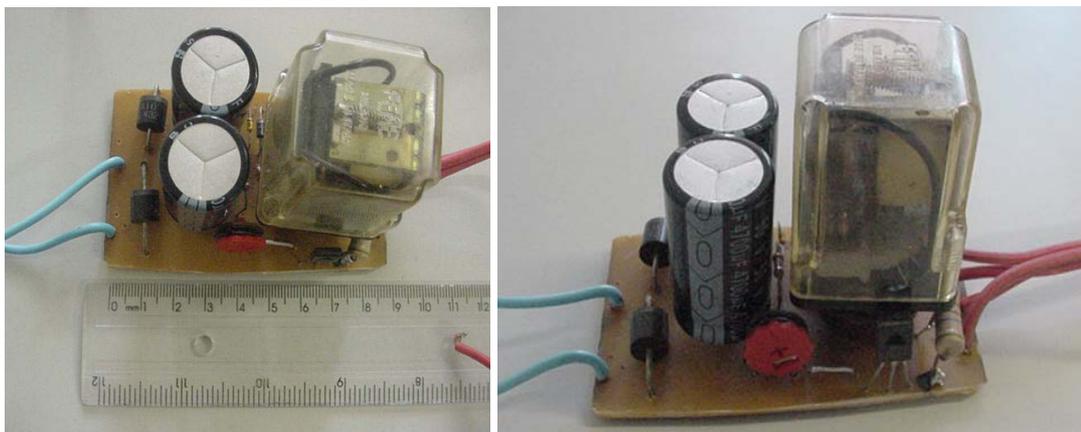


Figura 3.10a e Figura 3.10b – Mostram o Protótipo dos Circuitos Dobrador de Tensão e de Supervisão de descarga da bateria fabricados para efetivação dos experimentos.

Nas Figuras 3.10a e 3.10b observa-se com destaque os diodos  $D_3$  e  $D_4$  e os capacitores  $C_4$  e  $C_5$  responsáveis pela duplicação da tensão, o Relé 2 e o *trim-pot* de ajuste da tensão de chaveamento.

Ainda na análise em circuito aberto, para rotações do Rotor maiores que 450 RPM, ou pelas condições de caracterização do Capítulo 4, velocidades de vento maiores ou iguais a 7m/s, o Circuito Dobrador de Tensão deverá “sair do circuito” e comutar a tensão oriunda da Turbina Eólica para ser aplicada diretamente ao Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, pois a partir deste valor, a tensão gerada será suficiente para alimentar o citado Circuito.

A tensão alternada oriunda da Turbina Eólica é retificada por  $D_3$  e  $D_4$ , e “duplicada” pelo carregamento dos capacitores  $C_4$  e  $C_5$  que são apresentados em associação série, sendo em seguida, aplicada ao circuito de saída através do contato NF (normalmente fechado) do Relé<sub>2</sub>.

O diodo *zener*  $D_{z3}$  e o ajuste do potenciômetro  $P_3$  controlam a polarização de base do transistor  $T_3$  que irá controlar o ponto de operação do Relé fazendo com que ele opere nas condições desejadas.

Quando a tensão de entrada do circuito (gerada pela Turbina Eólica) for  $V_{Turb} \geq 11,68$  V, não haverá mais necessidade de que seja dobrada pois os capacitores vão carregar-se com o valor máximo de:  $V_{C4} = V_{C5} = \sqrt{2} \cdot 11,68 \text{ V} = 16,52\text{V}$ , e os dois em série irão perfazer um total de 33V suficiente para operar o circuito de chaveamento e “desacoplar” o Dobrador de Tensão do Circuito Regulador de Carga.

Este valor de tensão pode ser adequadamente ajustado por  $D_{Z3}$ ,  $D_{Z4}$  e  $P_3$  para regular a o ponto de operação do transistor  $T_3$  que por sua vez, irá operar o Relé<sub>2</sub>.

O chaveamento do Relé<sub>2</sub>, que ocorrerá quando a tensão gerada pela Turbina Eólica for  $V_{Turb} \geq 11,68$  V deixará disponível para o Circuito Regulador do Carregamento de Bateria via contato NA (normalmente aberto) do Relé<sub>2</sub> que irá operar, a tensão de carga do capacitor  $C_4$  de 16,52 Volts. Esta tensão irá aumentar de acordo com o aumento da velocidade de rotação do Rotor da Turbina Eólica e terá seu valor devidamente ajustado em 13,8V pelo circuito Regulador de Carregamento de Bateria.

Desta forma, o Circuito Dobrador de Tensão funciona também como um supervisor da tensão gerada pela Turbina Eólica e mantenha a tensão a ser aplicada ao Regulador de Carga em 16,5V para tensões geradas pela Turbina Eólica  $V_{Turb} \geq 6,5\text{V}$ , ou seja, para velocidades de rotação  $\geq 180$  RPM, ou velocidades de vento  $\geq 3\text{m/s}$ , na condição sem carga.

Nas condições de carga, o desempenho do Circuito Dobrador de Tensão será diferenciado e deverá ser avaliado experimentalmente no Capítulo 4 referente aos resultados obtidos e discussões.

## **3.6 METODOLOGIA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

### **3.6.1 Introdução**

Nesta seção será descrita a metodologia dos ensaios experimentais de avaliação do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias descrito na seção anterior.

Inicialmente será apresentada a metodologia e a expectativa dos experimentos efetuados e em seguida serão apresentados os equipamentos utilizados.

### **3.6.2 Necessidade das Medições**

O objetivo das medições que foram efetuadas foi a avaliação do desempenho do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias em comparação com o desempenho do funcionamento da Turbina Eólica com o circuito controlador de carregamento original de Fábrica que é fornecido junto com o Aerogerador.

Por ocasião das medidas foram avaliados os desempenhos do Circuito Dobrador de Tensão e do Circuito de Desligamento Automático da bateria dimensionado para evitar descarga profunda do banco de acumuladores, além da avaliação do Circuito Controlador de Carregamento de Baterias propriamente dito.

O Circuito Dobrador de Tensão incluso no presente trabalho teve sua análise de desempenho a princípio a partir dos testes realizados com a aplicação de uma tensão elétrica da rede de energia convencional, com tensão de entrada variável e frequência constante de 60Hz. Ditos testes foram realizados estaticamente de forma a fazer uma primeira avaliação do desempenho do referido Circuito.

Em uma ocasião posterior foram repetidos os testes com o Circuito Dobrador de tensão de modo a avaliar seu desempenho em uma condição dinâmica com alimentação a partir da tensão gerada da Turbina Eólica objeto deste trabalho.

As rotinas de testes com o Circuito Dobrador de Tensão a partir da alimentação pela Turbina Eólica foram efetuadas com tensões e frequências variáveis, face à variação destas grandezas empreendidas pelo Aerogerador em função da velocidade de rotação do Rotor.

Para efetivação das rotinas de ensaios, o Dobrador de Tensão foi colocado em vazio e analisado com alimentação a partir da rede elétrica de energia e em seguida com alimentação pela Turbina Eólica.

### 3.6.3 Princípio Metodológico

O princípio metodológico utilizado foi o de efetuar a duplicação da tensão de entrada fornecida pela Turbina Eólica, através do Circuito Dobrador de Tensão, de modo a viabilizar o aproveitamento da energia gerada pela Turbina Eólica com baixas velocidades de vento (baixas rotações do Rotor da Turbina Eólica).

Em seguida esta tensão foi estabilizada em 13,8V para alimentar a bateria.

A bateria necessária para uma aplicação específica foi referenciada no APÊNDICE A e irá alimentar cargas CC ou inversor de tensão CC/CA e terá sua tensão supervisionada por um Sistema de Supervisão de Tensão inserido no Circuito Controlador do Carregamento de Bateria de modo a evitar a descarga profunda do acumulador.

Os ensaios foram efetuados com a Turbina Eólica instalada em uma bancada de testes e submetida a um acionamento mecânico por um motor elétrico que teve sua velocidade de rotação controlada por um dispositivo de controle de potência.

Foram verificados os comportamentos da variação da tensão e da potência elétrica gerada pela Turbina Eólica quando do seu acionamento pelo motor elétrico na bancada de testes, de modo a estabelecer a viabilidade técnica do projeto do Circuito Controlador de Potência.

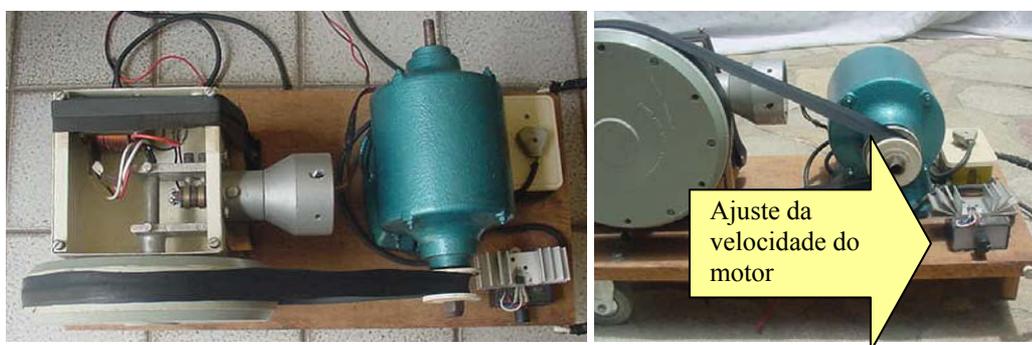
Por ocasião da rotina de testes serão avaliados valores de tensão, frequência e potência gerada em função da rotação do rotor da Turbina Eólica, bem como as perdas advindas do funcionamento do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria.

Ditas medições foram efetuadas com o Rotor acionado na bancada de testes com velocidades de rotação variando de 0 a 2000 RPM, faixa esta de rotação compatível com a geração de tensão da Turbina Eólica dentro dos limites de valores nominais da mesma, preservando suas especificações de segurança.

### 3.6.4 Bancada de Testes

Por ocasião da efetivação dos trabalhos experimentais foi projetada e implementada uma Bancada de Testes construída em madeira de lei com 600mm de largura e 1200mm de comprimento e 30mm de espessura. A bancada possui uma caixa de madeira em sua região superior com dispositivo apropriado para suporte, acomodação e encaixe da Turbina Eólica, com a finalidade de garantir a fixação e estabilidade mecânica dela por ocasião da dinâmica dos ensaios.

As Figuras 3.11a e 3.11b exibem a bancada de testes.



Figuras 3.11a e 3.11b – Bancada de testes projetada e construída para efetivação dos ensaios experimentais.

A Bancada de Testes mostrada na Figura 3.11a e 3.11b possui rodízios de teflon na sua região inferior traseira que viabiliza e facilita seu deslocamento por suspensão através de tirante de material sintético situado na sua região frontal, próximo ao motor elétrico.

Na parte inferior da região frontal há ainda, um freio de estacionamento constituído por um segmento de madeira que garante a estabilidade e inércia posicional da mesa quando na condição de repouso ou acionamento do conjunto motor elétrico / Turbina Eólica.

Quando instalado na Bancada de Testes, o Rotor da Turbina Eólica é provido de um envoltório de borracha de modo a preservá-lo e evitar danos e desgaste por atrito com o sistema de acionamento mecânico formado pelo conjunto motor/correia de tração.

O acionamento mecânico da Turbina Eólica, pelo motor elétrico, é efetuado por transmissão flexível constituída por correia de borracha sintética de modo a preservar a

integridade do rotor do Aerogerador.

Para fins de viabilizar o controle de rotação do motor elétrico de acionamento e simular as condições de funcionamento da Turbina Eólica, foi projetado e implementado também, um circuito eletrônico com chaveamento por tiristor de modo a controlar a velocidade de rotação dele. O citado circuito controla o ângulo de condução do tiristor e daí então a tensão e corrente elétrica, entregue ao motor elétrico, controlando desta forma, a sua velocidade de rotação.

### 3.6.5 Equipamentos Usados nos Experimentos

Por ocasião da efetivação dos trabalhos experimentais referentes a esta dissertação foram usados os equipamentos:

- um tacômetro digital<sup>1</sup> conforme exibido nas Figura 3.12a e 3.12b, com a finalidade de caracterizar o comportamento da Turbina Eólica, em função da velocidade de rotação do Rotor;



Figuras 3.12a e 3.12b – Tacômetro usado para medição das rotações da Turbina.

A Figura 3.12b ilustra o procedimento de medição das velocidades de rotação do

Rotor referentes aos experimentos da presente Dissertação, com o acoplamento do Tacômetro diretamente ao Rotor da Turbina Eólica;

- foram usados três multímetros eletrônicos digitais<sup>2</sup> conforme ilustrado na Figura 3.13A para efetivação das medidas de grandezas presentes nos circuitos referentes a frequências, tensões e correntes elétricas alternadas e contínuas;



Figura 3.13 – Multímetros digitais usados nas medições de tensão corrente e frequência por ocasião dos experimentos.

Por ocasião das rotinas de testes e experimentos, utilizando os instrumentos exibidos nas Figura 3.13, pode-se efetuar medições simultâneas de tensão de saída AC direto da Turbina Eólica, tensão CC após a ponte retificadora, bem como a medição da frequência da tensão gerada de modo a se obter os dados para caracterização da Turbina conforme apresentado na seção anterior.

- cargas resistivas e baterias<sup>3</sup> para fins de simulação das condições de funcionamento do sistema.

---

<sup>1</sup> Tacômetro digital de Fabricação Minipa modelo: MDT 2245 com memória para armazenamento da medida efetuada e resolução até os décimos da grandeza selecionada para medição, podendo ser chaveado para medições de velocidades de rotação em RPM, ou velocidades de deslocamento tangencial em m/s, ft/min ou pol/min.

<sup>2</sup> Multímetros digitais da marca Minipa sendo dois modelo: ET-2082B e um modelo ET-1110, todos de categoria II (profissionais) e com resolução de uma casa decimal nas medidas das grandezas: tensão, corrente, resistência e frequência;

<sup>3</sup> Para efetivação dos testes foram usadas cargas resistivas com resistências ôhmicas de (3,3; 3,9; 4,7; 5,6; e 6,8) $\Omega$  usadas em cada uma das faixas de rotações do Rotor da Turbina Eólica e de potências de 50, 75 e 100Watts, visando o perfeito casamento de impedância e ótima transferência de energia. Nos ensaios experimentais foram usadas também lâmpadas incandescentes de (21, 50 e 100) Watts e baterias chumbo ácido seladas de 12V / 7Ah, compatíveis com as especificações do APÊNDICE A.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **4.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO CIRCUITO DOBRADOR DE TENSÃO**

Os ensaios do Circuito Dobrador de Tensão foram efetuados com alimentação a partir da tensão elétrica da rede de energia e em seguida com alimentação a partir da tensão gerada pela Turbina Eólica.

Inicialmente os testes foram realizados na condição de vazio com as duas formas de alimentação citadas acima e em seguida com alimentação apenas pela Turbina Eólica foram efetuados os testes visando uma condição real de funcionamento do circuito.

##### **4.1.1 Funcionamento com Alimentação por Tensão da Rede Elétrica**

A Figura 4.1 ilustra a evolução da tensão de saída em função da tensão de entrada no Circuito Dobrador de Tensão.

Neste ensaio foram aplicadas tensões alternadas, de valor ajustável de 0 a 70V, oriundas da rede elétrica, compatíveis com as tensões geradas pela Turbina Eólica e com frequência fixa de 60Hz.

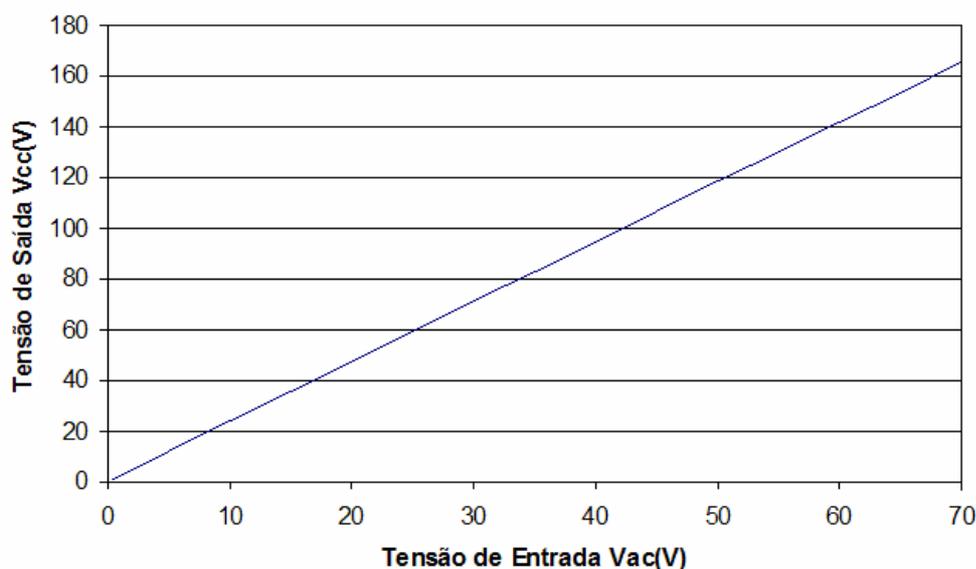


Figura 4.1 – Desempenho do Circuito Dobrador de Tensão.

O Gráfico da Figura 4.1 mostra o efeito da duplicação da tensão de entrada obtido a partir dos ensaios efetuados com alimentação pela tensão da rede elétrica com variação linear da tensão de saída.

A análise do Gráfico mostra que para tensões de entrada superior a 8,5V já há tensão na saída do Circuito Dobrador de Tensão suficiente para alimentar o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, que necessita de uma tensão mínima de 16,5 V.

Os ensaios também demonstraram que a máxima potência dissipada pelo circuito Dobrador de Tensão nestas condições é inferior a 2,5W, o que torna sua utilização bastante promissora em função do aproveitamento de energia que será experimentado com a sua aplicação.

#### **4.1.2 Funcionamento do Circuito Dobrador e Tensão em Vazio e com Alimentação a partir da Turbina Eólica**

Os ensaios revelaram um bom desempenho do Circuito Dobrador de Tensão, com dissipação de potência inferior a 3W, e o aproveitamento da energia gerada mesmo em baixas rotações do Rotor (i.e.  $\geq 110\text{RPM}$ ), que pelas condições de caracterização explicitadas mais adiante correspondem a velocidades de vento superiores a 2m/s, e frequências superiores 15

Hz. Esse aproveitamento seria tecnicamente impossível em outras aplicações que exigissem estabilidade de tensão e frequência.

A Figura 4.2 ilustra o desempenho do Circuito Dobrador de Tensão com alimentação pela Turbina Eólica.

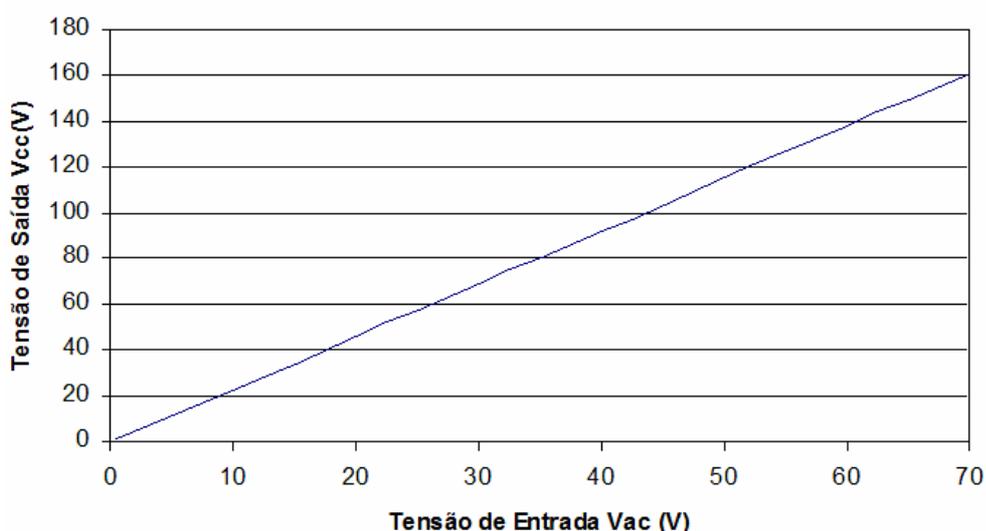


Figura 4.2 – Desempenho do Circuito Dobrador de Tensão com alimentação pela Turbina Eólica (em vazio).

A Figura 4.2 exibe a etapa subsequente dos ensaios referentes aos testes para aquisição de dados que foi efetuada com a alimentação do Circuito Dobrador de Tensão a partir Turbina Eólica na condição de vazio e, portanto, com tensões e frequências variáveis.

A partir de uma tensão gerada pela Turbina Eólica de 16,5V, o Circuito Dobrador de Tensão irá promover o *by-pass* da tensão de entrada direto para o Circuito Controlador de Potência que a irá estabilizar em 13,8 V para carregar o banco de baterias.

#### 4.1.3 Efeito de Histerese no Circuito Dobrador de Tensão

A linearidade da tensão de saída em função da tensão de entrada foi observada bem como um efeito de histerese no funcionamento do Circuito Dobrador de Tensão.

Assim que a Turbina Eólica é colocada em funcionamento em baixas velocidades de vento, o Circuito Dobrador de Tensão funciona duplicando o valor da tensão gerada e

disponibilizando-a através do contato NF (Normalmente Fechado) do Relé<sub>2</sub> para o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria que necessita de uma tensão mínima de 16,5V na entrada para garantir 13,8V na saída para a bateria.

Quando a tensão gerada pela Turbina Eólica atinge um valor mínimo de 18,5V, o Circuito Dobrador de Tensão comuta o Relé<sub>2</sub> que através do seu contato NA (Normalmente Aberto), envia esta tensão diretamente para alimentar diretamente o Circuito de Controle de Carregamento da Bateria.

Caso o vento diminua, a tensão gerada pela Turbina Eólica irá diminuir, ao chegar em 16,5V, o Circuito Dobrador de Tensão irá comutar o Relé<sub>2</sub> que através do seu contato NF irá disponibilizar o valor da tensão gerada, duplicada, para o Circuito de Controle de Carregamento de Bateria.

Desta forma o valor padrão da tensão gerada pela Turbina Eólica estará disponível através dos contatos NA, o valor da tensão duplicada será fornecida através dos contatos NF do Relé<sub>2</sub> e o Circuito Dobrador de Tensão aplicará uma condição de histerese de operação da seguinte forma:

- Para  $V_G \leq 18,5V \rightarrow$  o Relé<sub>2</sub> estará em repouso e o Circuito de Controle de Carga da Bateria será alimentado pela tensão duplicada oriunda do Circuito Dobrador de Tensão;
- Para  $V_G > 18,5V \rightarrow$  o Relé<sub>2</sub> opera e o Circuito de Controle de Carga da Bateria será alimentado diretamente pela tensão gerada pela Turbina Eólica.

Onde:  $V_G \rightarrow$  tensão gerada pela Turbina Eólica.

A Figura 4.3 exibe a curva de histerese do Circuito Dobrador de Tensão com seus pontos notáveis.

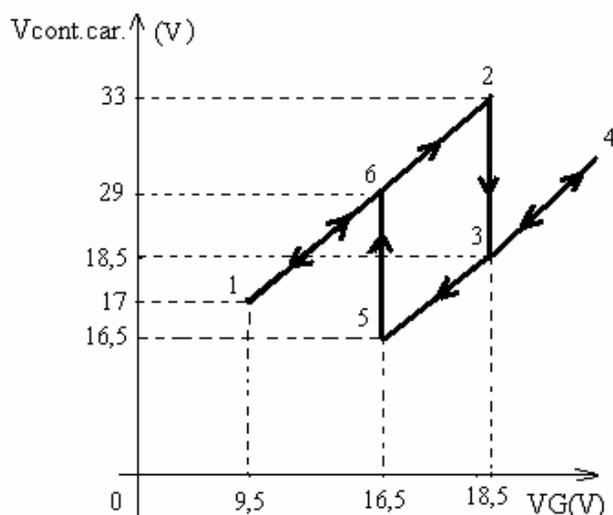


Figura 4.3 – Curva de histerese de operação do Circuito Dobrador de Tensão.

Onde:  $V_{cont.car.}$  → tensão de alimentação do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria.

A Figura 4.3 mostra que para uma tensão gerada pela Turbina Eólica de 9,5V, ponto 1 da curva, já há tensão disponível (17V), para alimentar o Circuito de Controle de Carga da Bateria, graças ao funcionamento do Circuito Dobrador de Tensão.

À medida em que a tensão gerada pela Turbina Eólica aumenta, sentido 1 → 2 da curva, as tensões disponíveis para alimentar o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria aumentam proporcionalmente até que para uma tensão gerada de 18,5V, ponto 2 da curva, tem-se uma tensão disponível para o Circuito de Controle de Carregamento de Bateria de 33V.

Para uma tensão gerada pela Turbina Eólica maior que 18,5V, o Relé<sub>2</sub> do Circuito Dobrador de Tensão, que estava em repouso, comuta e aplica a tensão gerada pela Turbina Eólica diretamente ao Circuito de Controle de Carregamento de Bateria, ponto 3 da curva, obedecendo a partir deste ponto o sentido 3 → 4 da curva.

Se a tensão gerada pela Turbina Eólica, que era maior que 18,5V cair (sentido 4 → 3 → 5 na curva Figura 4.3), para valores de tensão gerada menores que 16,5V (ponto 5 da curva), o Relé<sub>2</sub> desopera, vai para o repouso, e através do seu contato NF, o Circuito Dobrador de Tensão volta a atuar duplicando o valor da tensão gerada para aplicar ao Circuito

Controlador de Carregamento de Bateria, sentido 5 → 6 da curva, e o ciclo torna a se repetir.

As condições de histerese do Circuito Dobrador de Tensão são estabelecidas pelas características magnéticas de operação do Relé<sub>2</sub> associadas às características eletrônicas do circuito de alimentação dele.

A Figura 4.4 mostra a variação da tensão gerada pela Turbina Eólica em função da rotação do Rotor na condição de vazio.

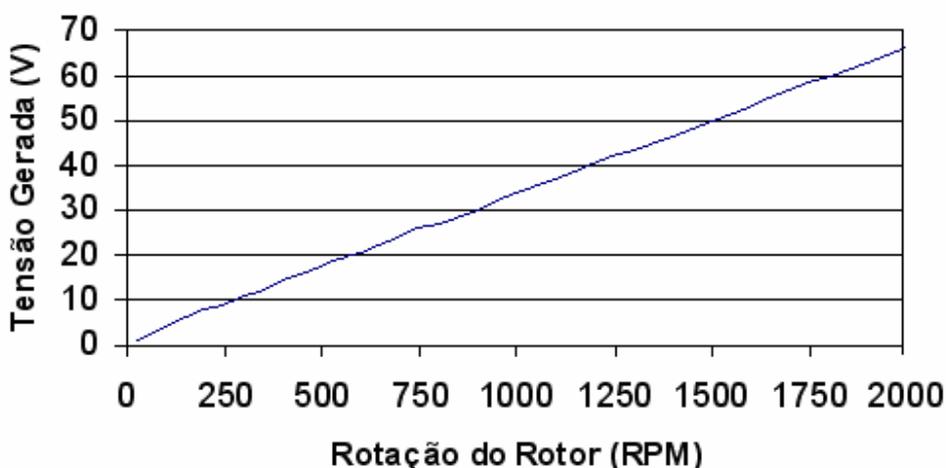


Figura 4.4 – Tensão gerada pela Turbina Eólica em função da rotação do Rotor.

A análise das Figuras 4.2 e 4.4 mostra que para tensões geradas pela Turbina maiores que 7 V na condição de vazio, o que corresponde a uma velocidade de rotação do Rotor mínima de 110RPM, já há tensão suficiente na saída do Circuito Dobrador de Tensão para alimentar o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria que necessita de uma tensão mínima de 16,5 V na entrada.

Pela análise da Figura 4.4, a partir de uma tensão gerada pela Turbina Eólica da ordem de 19V ( $\geq 18,5$  V), o Circuito Dobrador de Tensão disponibiliza esta tensão, que já é de valor suficiente conforme as condições de projeto, para ser aplicada ao Circuito Controlador de Carregamento de Bateria que a irá estabilizar em 13,8 V para carregar a bateria.

#### 4.1.4 Funcionamento com Alimentação pela Turbina Eólica na Condição de Carga

A Figura 4.5 exibe o desempenho do Circuito Dobrador de Tensão alimentado pela Turbina Eólica na condição de carga, quando submetido a distintas condições de carregamento.

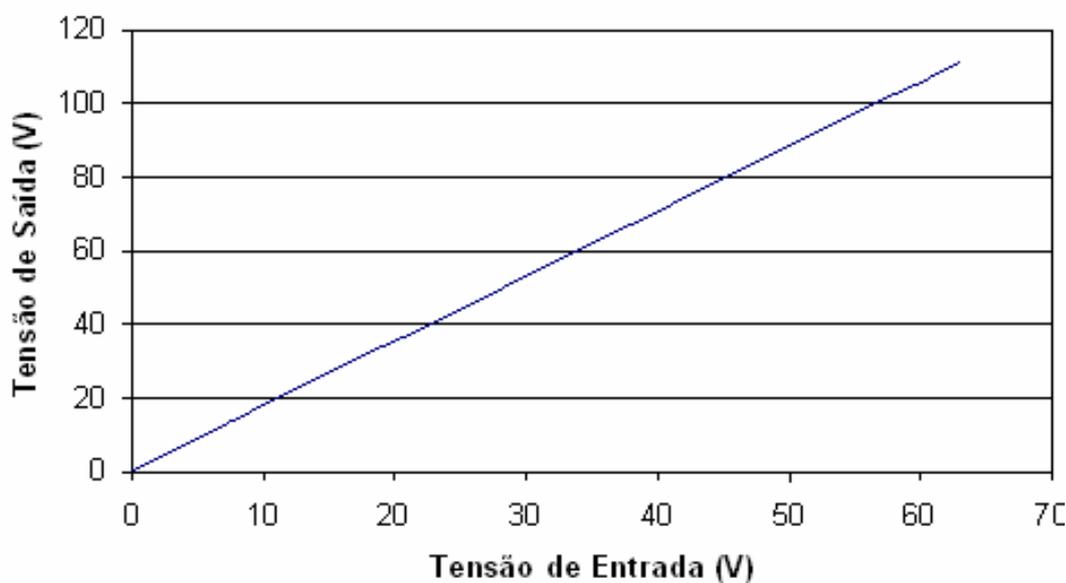


Figura 4.5 – Desempenho do Circuito Dobrador de Tensão com alimentação pela Turbina Eólica.

Dando prosseguimento aos ensaios referentes aos testes para aquisição de dados foram efetuadas avaliações de desempenho do Circuito Dobrador de Tensão a partir Turbina Eólica na condição de carga, cujos resultados estão exibidos na Figura 4.5.

A Figura 4.5 ilustra o efeito do carregamento no sistema que mesmo na condição de carga disponibiliza na saída do Circuito tensões ligeiramente menores que as tensões obtidas na condição de vazio, bem como o fato de que o efeito do carregamento diminui um pouco a eficiência do Circuito Dobrador de Tensão face às quedas de tensão que ocorrem nele. Desta forma, enquanto em vazio tem-se uma razão entre tensão de saída/tensão de entrada da ordem de 2,37 na condição de carga esta mesma razão cai para 1,77, contudo, sem perda das vantagens do Circuito Dobrador de Tensão.

Para tensões de entrada da ordem de (9 a 10) Volts, já há tensões na saída com valores

adequados para alimentar o circuito Controlador de Carregamento de Bateria e para daí promover o carregamento de bateria ou alimentar um circuito inversor CC/CA.

A análise da Figura 4.5 mostra também que o efeito do Circuito Dobrador de Tensão é bastante expressivo para valores de tensão de entrada da ordem de (9 a 10) Volts e até valores próximos a (19 ou 20) Volts, intervalo no qual o referido Circuito atua efetivamente fornecendo tensões de saída compatíveis com as exigências do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria.

Para valores de tensão  $\geq 18,5$  V, que já são suficientes para alimentar diretamente o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, o Circuito Dobrador de Tensão transfere a tensão gerada pela Turbina Eólica diretamente para o Circuito Controlador, que cumprindo sua tarefa estabiliza a tensão recebida em 13,8Volts.

#### **4.1.5 Dados Fornecidos pelo Fabricante da Turbina Eólica (em vazio)**

A documentação técnica fornecida pelo fabricante da Turbina Eólica traz informações sobre a potência e a tensão geradas pela turbina Eólica.

A Figura 4.6 exhibe a curva de potência da Turbina Eólica em função da velocidade de vento fornecida pela Marlec Co [15].

Uma análise da Figura 4.6 mostra que a potência nominal de 100W é obtida para velocidades de vento da ordem de 12m/s, e velocidade de rotação de Rotor de 1250RPM conforme dados da caracterização da Turbina Eólica exibidos adiante, e que a potência gerada aumenta continuamente em função da velocidade do vento chegando a 180W para 20m/s. Este valor de potência gerada é bastante superior à potência nominal e que ocorre para velocidades de vento bastante expressivas.

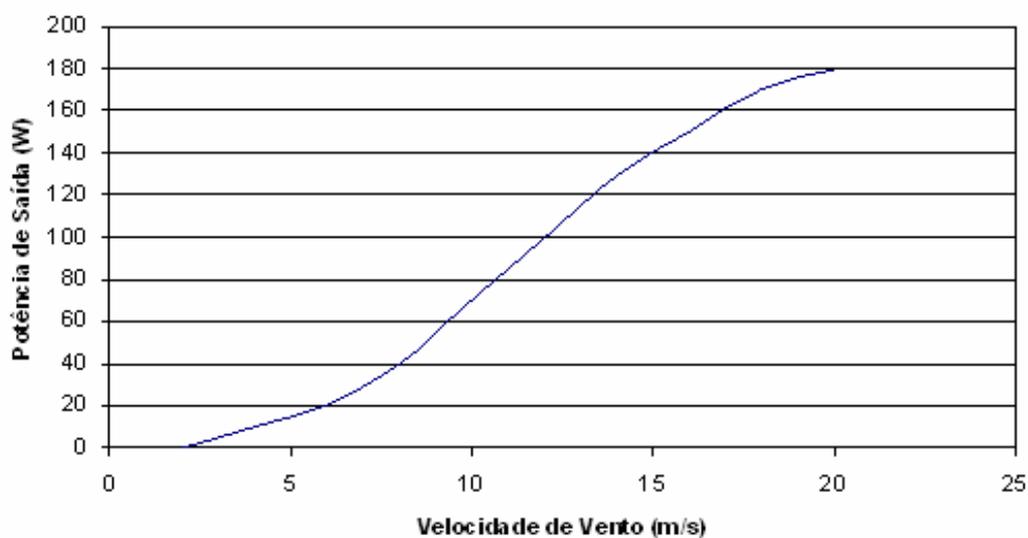


Figura 4.6 – Curva de potência da Turbina Eólica – Cortesia: Marlec Co [15] – Adaptado.

A Figura 4.7 exibe a curva de tensão gerada pela Turbina Eólica em função da velocidade de rotação do Rotor fornecida pela Marlec Co [15].

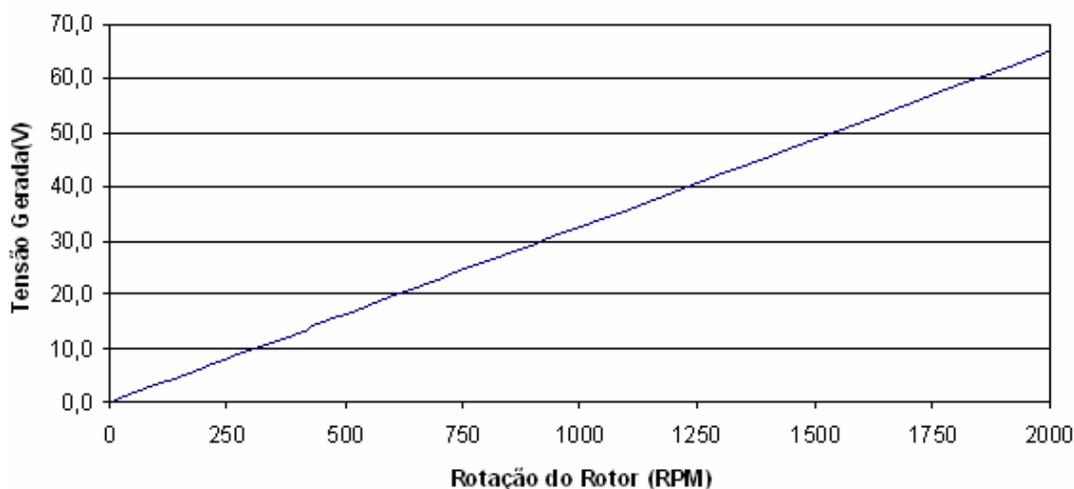


Figura 4.7 – Curva de tensão gerada (volts) x velocidade de rotação do Rotor (RPM) – Cortesia: Marlec Co [15] - Adaptado

A Figura 4.7 exibe a linearidade da tensão gerada pela Turbina Eólica em função da velocidade de rotação do Rotor e que para 300RPM tem-se na saída da Turbina Eólica uma tensão de 10 Volts, insuficiente para a maioria das aplicações com tensão nominal de alimentação de 12 Volts, e particularmente para recarga de bancos de baterias que devem ter uma tensão nominal de flutuação em torno de 13,8Volts.

#### 4.1.6 Dados Obtidos a partir dos Experimentos em Bancada

Os ensaios em bancada foram efetuados inicialmente com a Turbina Eólica em vazio e em seguida na condição de carga de modo a obter elementos de comparação com o desempenho apresentado pelo Fabricante [15].

Para efetivação dos ensaios da Turbina Eólica na condição de carga e efetivação do levantamento de dados foram acopladas cargas resistivas na saída do Aerogerador contemplando as condições de casamento de impedância citadas e recomendadas para maximização da energia transferida à carga [32].

A Tabela 4.1 exibe os valores médios de tensões elétricas alternadas e contínuas e frequências geradas medidas a partir dos ensaios em vazio da Turbina Eólica WG910 em função da velocidade de rotação do Rotor.

Tabela 4.1 – Tensões e Frequências Geradas pela Turbina.

<b>Tensão em Circuito Aberto(Exp.)</b>			
<b>N(RPM)</b>	<b>Vent(ac)</b>	<b>V(CC)</b>	<b>f(HZ)</b>
0	0	0	0,0
100	4	3	6,6
200	8	6	13,2
300	11	10	19,7
500	17	16	32,9
600	21	19	39,5
700	24	23	46,1
800	27	26	52,6
900	30	29	59,2
1000	34	32	65,8
1100	37	36	72,4
1200	40	39	79,0
1300	43	42	85,5
1400	47	45	92,1
1500	50	49	98,7
1600	53	52	105,3
1700	56	55	111,9
1800	60	58	118,4
1900	63	62	125,0
2000	66	65	131,6

Conforme verificado, a Tabela 4.1 exibe a grande variação de frequência em função da velocidade de rotação do Rotor.

Os dados obtidos nos ensaios mostram valores crescentes de tensão gerada e da frequência em função do aumento da velocidade de rotação do Rotor da Turbina Eólica, o que inviabiliza o aproveitamento direto da energia gerada pela mesma em situações onde se deseja estabilidade de tensão e/ou frequência e justifica a razão de ser do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, objeto deste Trabalho.

Para efetivação do levantamento de dados foram efetuadas medidas em um total de cinco faixas distintas de rotações do Rotor, a cada 250RPM, com um mínimo de dez medidas em cada faixa, intercaladas a cada dez minutos.

A primeira faixa de medida foi de (0 a 250)RPM, a segunda faixa de (251 a 500)RPM, a terceira faixa de (501 a 750)RPM, a quarta faixa de (751 a 1000)RPM e a quinta faixa de (1001 a 1250)RPM.

Em cada medição foi efetuada uma verificação das medidas das grandezas em um intervalo de tempo não inferior a um minuto.

Foram considerados os valores médios obtidos a partir da repetição dos experimentos e foi efetuada a comparação com os dados da Marlec [15], os quais seguem listados a seguir.

O Rotor da Turbina Eólica foi submetido a diferentes velocidades de rotação, e foram obtidos valores médios das grandezas geradas para fins de caracterização da Turbina Eólica.

A condição de variação da frequência gerada em função da rotação do Rotor é um fator que estabelece definitivamente que a Turbina Eólica é síncrona e que deve ser usada para recarga de baterias ou alimentação de cargas que não exijam estabilidade de tensão e/ou frequência tais como as cargas resistivas.

Comparando as colunas 2 e 3 da Tabela 4.1 verificam-se as quedas de tensão devidas aos componentes eletroeletrônicos inseridos na nacela da Turbina Eólica por ocasião da retificação de tensão promovida pela ponte retificadora existente na estrutura do citado Aerogerador.

A comparação entre os dados obtidos nos experimentos na bancada com os dados do Fabricante da Turbina Eólica na condição de carga foi efetuada com a finalidade da obtenção de um parâmetro de validação dos experimentos.

A Figura 4.8 ilustra graficamente uma comparação entre os dados obtidos nos experimentos na bancada com os dados do Fabricante da Turbina Eólica na condição de carga.

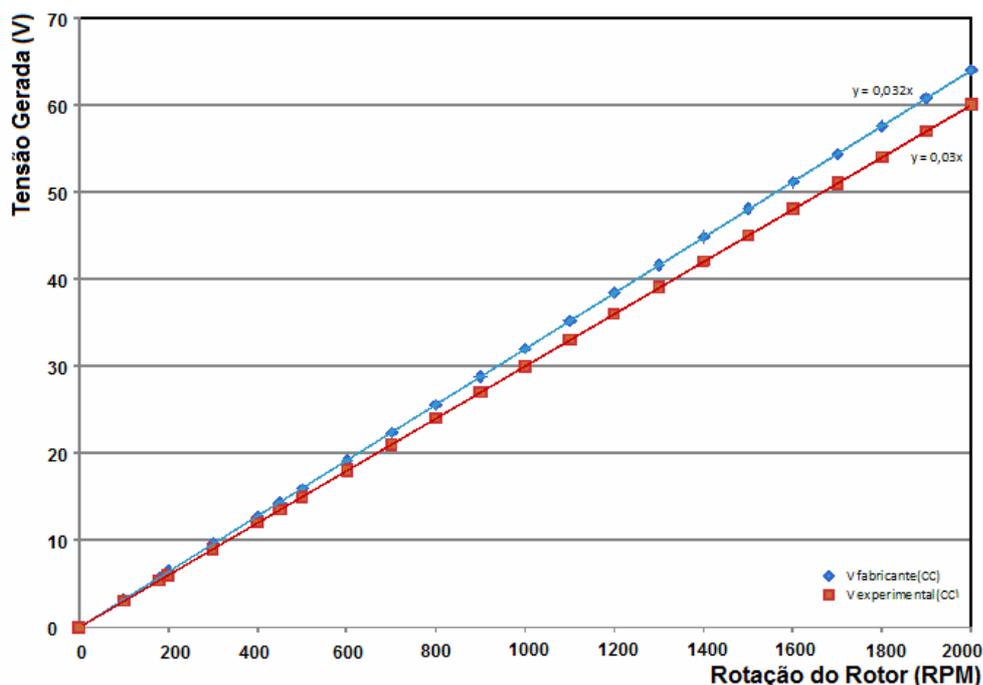


Figura 4.8 – Comparação entre os dados medidos da tensão gerada pela Turbina com os dados apresentados pelo Fabricante.

A Figura 4.8 ilustra que, de maneira similar ao que foi apresentado pelo Fabricante da Turbina Eólica [15], os experimentos de bancada revelaram que a tensão gerada é diretamente proporcional à velocidade de rotação do Rotor e que o valor máximo de tensão gerada, dentro dos limites estabelecidos e recomendados para os testes, ocorre para uma rotação do Rotor em torno de 2000RPM.

A Figura 4.8 revela que há uma grande similaridade entre a tensão gerada pela Turbina nas condições estabelecidas pela Marlec Co[15] e os dados de caracterização da mesma, sendo que os dados obtidos na bancada são cerca de 10% inferiores aos apresentados pelo

Fabricante[15].

As tensões oriundas da Turbina Eólica, na condição de circuito aberto, já retificadas pelo retificador em ponte de diodos inserido na nacele, podem ser diretamente aproveitáveis pelo Circuito Controlador de Carregamento de Bateria para valores de velocidade de rotação do Rotor da Turbina maiores que 400RPM, ou velocidade de vento maiores que 7m/s de acordo com as condições de caracterização estabelecidas adiante. Nesta condição tem-se na saída da ponte retificadora valores de tensão maiores que 16,5Volts. Esta situação é compatível com a tarefa do Circuito Dobrador de Tensão que desta forma, tem sua tensão de saída desacoplada do Circuito Controlador do Carregamento de Bateria, para rotações do Rotor nesta ordem de grandeza.

Os resultados dos testes realizados para caracterização da Turbina Eólica foram bastante similares aos dados fornecidos pelo fabricante (Marlec Co [15]).

#### **4.1.7 Análise do Desempenho da Turbina Eólica em Carga**

Para efetivação dos ensaios da Turbina Eólica na condição de carga foram acopladas cargas resistivas na saída do Aerogerador contemplando as condições de casamento de impedância citadas e recomendadas para que houvesse a máxima transferência de energia entre a Turbina Eólica e a carga [32].

O Rotor foi submetido a diferentes velocidades de rotação, e foram obtidos valores médios para fins de caracterização da Turbina Eólica.

Para efetivação do levantamento de dados foram efetuadas medidas em um total de cinco faixas distintas de rotações do Rotor, a cada 250RPM, com um mínimo de dez medidas em cada faixa, intercaladas a cada dez minutos.

A primeira faixa de medida foi de (0 a 250)RPM, a segunda faixa de (251 a 500)RPM, a terceira faixa de (501 a 750)RPM, a quarta faixa de (751 a 1000)RPM e a quinta faixa de (1001 a 1250)RPM.

Em cada medição foi efetuada uma verificação das medidas das grandezas em um intervalo de tempo não inferior a um minuto.

Para efeito de exibição nas tabelas e gráficos foram considerados os valores médios obtidos a partir da repetição dos experimentos e foram estabelecidas comparações com os dados da Marlec Co [15], os quais seguem listados a seguir.

Os ensaios da Turbina Eólica para fins de estimativa da sua curva de potência foram efetuados para valores de velocidade de rotação do Rotor de até 1250RPM para fins de preservação da integridade da Turbina Eólica uma vez que este valor já superou a condição de máxima geração de potência do Aerogerador.

A Tabela 4.2 exhibe os valores de tensão elétrica, potências geradas e frequências na condição de carga pela Turbina Eólica Rutland Wind Charger, em função da rotação do Rotor.

A Tabela 4.2 ilustra a variação da potência gerada em função da velocidade de rotação do Rotor, as perdas de potência devido aos componentes eletroeletrônicos na nacela já que a Potência AC refere-se à potência efetiva na saída do gerador da Turbina Eólica antes de ser retificada pela ponte de diodos existente na nacela. A Potência DC refere-se à potência de saída efetivamente após a retificação da tensão gerada.

A Tabela 4.2 foi obtida a partir dos valores médios de tensões, frequências e potências geradas em condições de carregamentos distintos contemplando o perfeito casamento de impedância de modo a se obter a máxima transferência de energia e reitera a grande variação de tensões geradas e de frequências em função da velocidade de rotação do Rotor da Turbina Eólica [32].

Tabela 4.2 – Tensões, Potências e Frequências Geradas pela Turbina Eólica.

<b>Nturb.(RPM)</b>	<b>VExp.(V)</b>	<b>Pot.ac (W)</b>	<b>Vdup.(V)</b>	<b>Pot.cc(W)</b>	<b>f(Hz)</b>
0	0	0	0	0	0
100	3	0	6	0	7
150	5	0	8	0	9
200	6	6	11	5	13
250	8	10	14	9	15
300	9	14	17	13	20
350	11	19	20	17	22
400	13	25	22	23	26
450	14	31	25	28	29
500	16	39	28	35	33
550	17	47	31	42	40
600	19	56	33	50	42
650	20	65	36	59	46
700	22	76	39	68	48
750	24	98	42	78	53
800	25	104	45	89	56
850	27	112	47	101	59
900	28	125	50	113	62
1000	32	140	56	126	66
1100	35	143	61	129	72
1150	36	146	64	131	78
1200	38	169	67	143	80
1250	39	176	70	158	84

A Tabela 4.2 estabelece também que para valores de velocidades de rotação do Rotor maiores que 500RPM, a tensão oriunda da Turbina Eólica, após retificada, não necessitará mais ter seu valor duplicado pelo Circuito Dobrador de Tensão, pois será de valor suficiente para ser aplicada diretamente por *by pass* ao Circuito Controlador de Potência.

A Figura 4.9 exibe a curva experimental de caracterização da potência gerada pela Turbina Eólica em função da velocidade de rotação do Rotor.

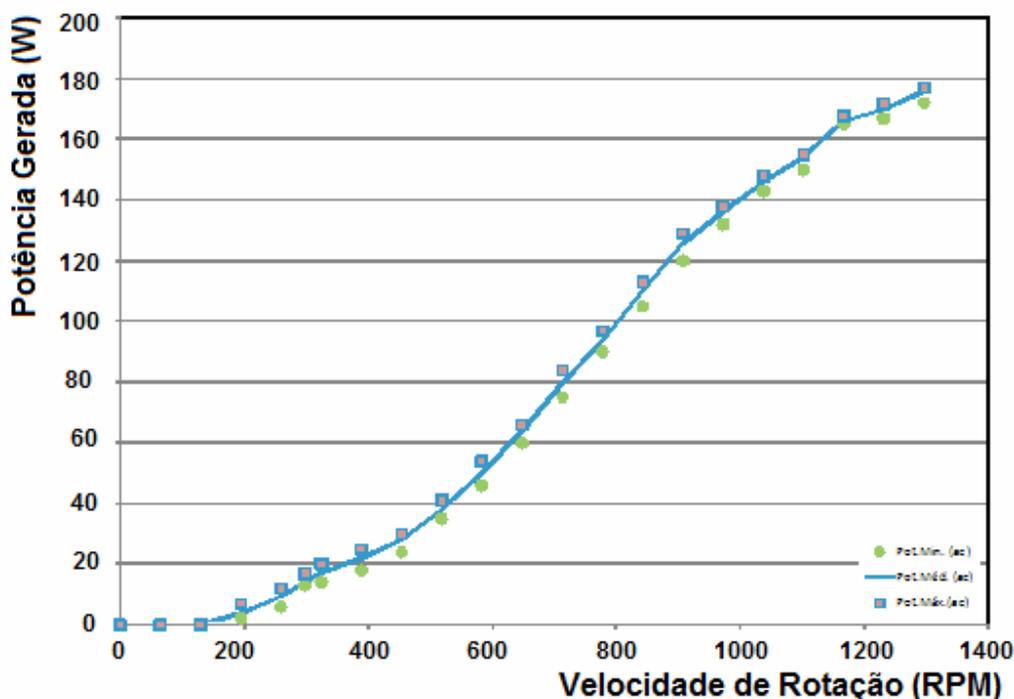


Figura 4.9 – Potência gerada pela Turbina Eólica em função da velocidade de rotação do Rotor.

A Simulação experimental da caracterização da Turbina ilustrada na Figura 4.9 mostra que a potência nominal da Turbina Eólica foi obtida para uma velocidade de rotação do Rotor em torno de 750 RPM e que em comparação com a curva ilustrada na Figura 4.8, fornecida pela Marlec Co [15], corresponde a uma velocidade de vento de 12m/s, donde pode-se calcular a razão de velocidade específica da ponta da pá (*Tip Speed Ratio* - TSR) estimada da Turbina Eólica [11]:

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{V} \quad (4.1)$$

Onde:

$\lambda$  → *Tip Speed Ratio* (razão de velocidade específica da ponta da pá);

$\Omega$  → velocidade de rotação do Rotor da Turbina Eólica (RPM);

R → raio do Rotor (m);

V → velocidade do vento incidente (m/s).

Considerando os valores obtidos:

$\Omega = 750\text{RPM}$ ;

R = 910mm, conforme catálogo da Marlec Co [15];

V = 12m/s, vem:

$\lambda = (750\text{RPM} / 60) \cdot (0,91\text{m} / 2) / 12 \text{ m/s} = 0,47396$ .

Desta forma, da Equação 4.1 pode-se obter a expressão da velocidade de vento em função da velocidade de rotação e da geometria do Rotor:

$$V = ((0,91\text{m} / 2) / 0,47396 \cdot 60) \cdot \Omega$$

$$V = 0,01599 \cdot \Omega \quad (4.2)$$

A partir da Equação 4.2 pode-se obter a Equação 4.3 e calcular a velocidade de rotação do Rotor em função da velocidade de vento, de modo a estabelecer uma Tabela de caracterização dos dados:

$$\Omega = 62,5 \cdot V \quad (4.3)$$

A Tabela 4.3 ilustra os dados estimados das condições de caracterização da potência da Turbina Eólica em função da velocidade de vento incidente no Rotor:

Tabela 4.3 – Dados estimados da caracterização da Turbina a partir do TSR considerado.

NTurb.(RPM)	Vvento(m/s)	VExp.ac(V)	Pot.ac (W)	Vdup.cc(V)	Pot.cc (W)
0	0	0	0	0	0
63	1	2	0	3	0
125	2	4	0	7	0
188	3	6	5	10	5
250	4	8	10	14	9
<b>313</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	14
375	6	12	22	21	20
438	7	14	30	24	27
<b>500</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>39</b>	28	35
563	9	18	49	31	44
625	10	20	60	35	54
688	11	22	73	38	66
813	13	26	104	45	92
875	14	28	119	49	107
938	15	30	128	52	115
1000	16	32	143	56	129
1125	18	35	152	63	137
1188	19	37	169	66	176

A análise da Tabela 4.3 mostra que o uso da Turbina Eólica na sua condição normal de Fábrica, somente irá alimentar o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, que necessita de uma tensão mínima de 16,5 Volts na entrada, a partir de velocidades de rotação

do Rotor maiores que 500RPM, com potência disponível a partir de 39W, o que corresponderia, pelas condições de caracterização que foram aplicadas, a velocidades de vento maiores que 8m/s.

A observação da Tabela 4.3 enfatiza que para velocidades de rotação maiores que 300RPM (da Tabela 4.3,  $N > 313\text{RPM}$ ), o que corresponderia, pelas condições de caracterização que foram aplicadas, a velocidades de vento maiores que 5m/s, e usando o Circuito Dobrador de Tensão, haverá uma tensão gerada pela Turbina Eólica de 10Volts e uma tensão duplicada de 17Volts. Nestas condições haverá tensão de saída disponível para alimentar adequadamente o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, o qual disponibilizará na sua saída uma tensão de 13,8 Volts para carregamento de acumuladores eletrolíticos ou alimentação de cargas CC.

Desta forma, fica estabelecida a vantagem técnica do uso do Circuito Dobrador de Tensão que viabiliza o pleno aproveitamento da energia gerada pela Turbina Eólica para velocidades de vento maiores ou iguais a 5m/s, o que corresponde a baixas rotações do Rotor da Turbina Eólica, para promover o carregamento de baterias. Sem o uso dele a energia somente seria aproveitada para velocidades de vento maiores que 8m/s e rotações do Rotor mais elevadas.

A Tabela 4.3 enfatiza também a questão da conservação da energia gerada pois com a duplicação da tensão gerada pela Turbina Eólica, a potência obtida exibida na Tabela 4.3 como “**Pot.cc(W)**”, mantém-se 10% inferior à potência original sem uso do Circuito Dobrador de Tensão, sendo que as perdas são inseridas por este Circuito e pelos demais componentes eletro-eletrônicos ao Sistema.

A Figura 4.10 exhibe a curva da velocidade de vento em função da velocidade de rotação do Rotor.

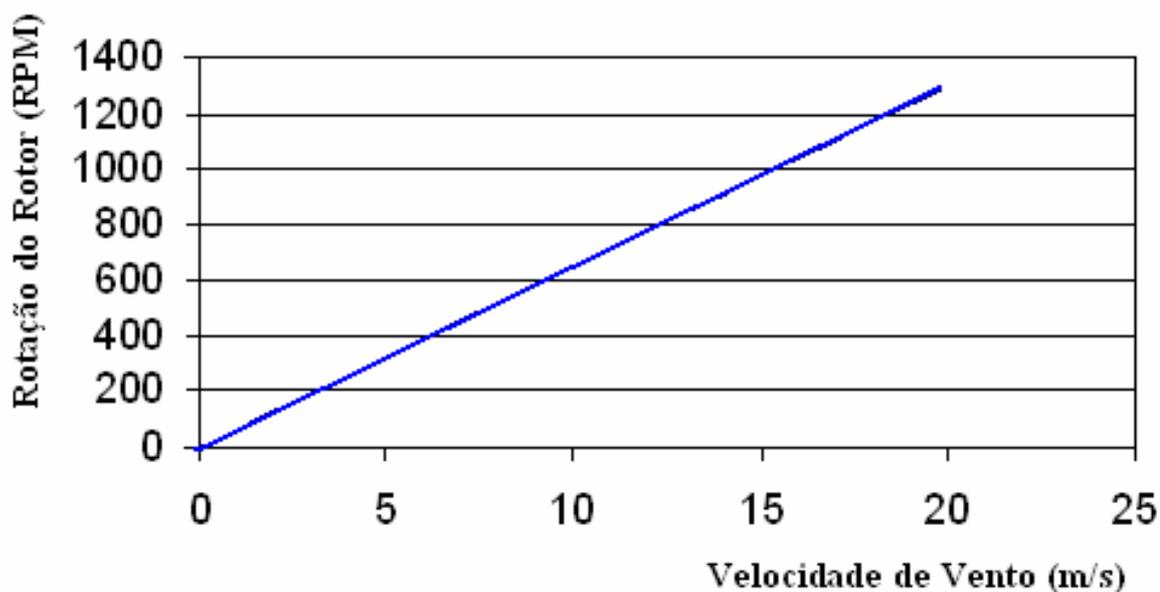


Figura 4.10 – Mostra a curva da velocidade de rotação do Rotor em função da velocidade de vento.

A Figura 4.10 foi obtida a partir das condições de caracterização estabelecidas nos ensaios experimentais e do TSR calculado e mostra também a linearidade que existe entre a velocidade de vento e a velocidade de rotação do Rotor da Turbina Eólica.

A Figura 4.11 exibe a curva da potência elétrica gerada em função da velocidade de vento obtida das condições de caracterização da Turbina Eólica. Esta Figura também ilustra que a potência gerada cresce continuamente em função da velocidade de vento incidente, a exemplo do que foi apresentado pela Marlec Co [15] e que esta potência gerada é ligeiramente inferior à potência apresentada pelo fabricante da Turbina Eólica.

A partir dos dados do Fabricante [15] vê-se que para velocidades de vento maiores que 20m/s a potência gerada aproxima-se de 180Watts, que é a máxima potência gerada.

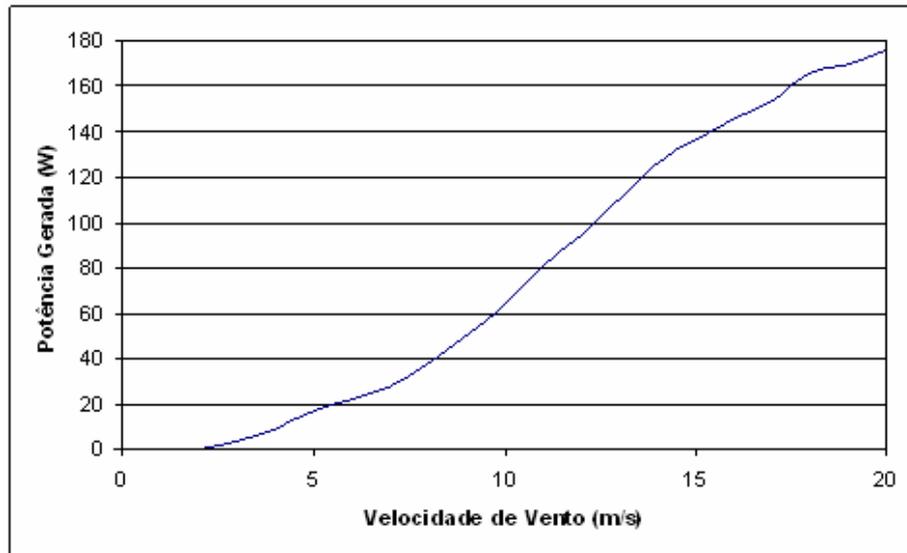


Figura 4.11 – Curva de potência experimental da Turbina Eólica

## 4.2 CÁLCULO DA ENERGIA ELÉTRICA GERADA PELA TURBINA EÓLICA

A Função Densidade de Probabilidade de Weibull  $f(\bar{v})$ , conforme indicado na Equação 4.4, é normalmente considerada como a mais adequada para descrever o regime de ventos incidente em um local [33].

$$f(\bar{v}) = \frac{k}{c} \left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^{(k-1)} \cdot \exp\left\{-\left[\left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^k\right]\right\} \quad (4.4)$$

Onde:

- $f(\bar{v})$  → representa a Função Densidade de Probabilidade;
- $\bar{v}$  → representa a velocidade média do vento (m/s);
- $c$  → é um parâmetro de escala com as dimensões de velocidade (m/s);
- $k$  → é um parâmetro de forma (adimensional).

Para um estudo efetivo das energias elétricas geradas em cada uma das situações, sem e com o uso do Circuito Dobrador de tensão, foram usados dados da equação e da curva de Weibull para um  $k = 3$ ,  $c = 8$  m/s, como forma de caracterizar uma determinada condição de vento local, conforme exibido na Figura 4.12:

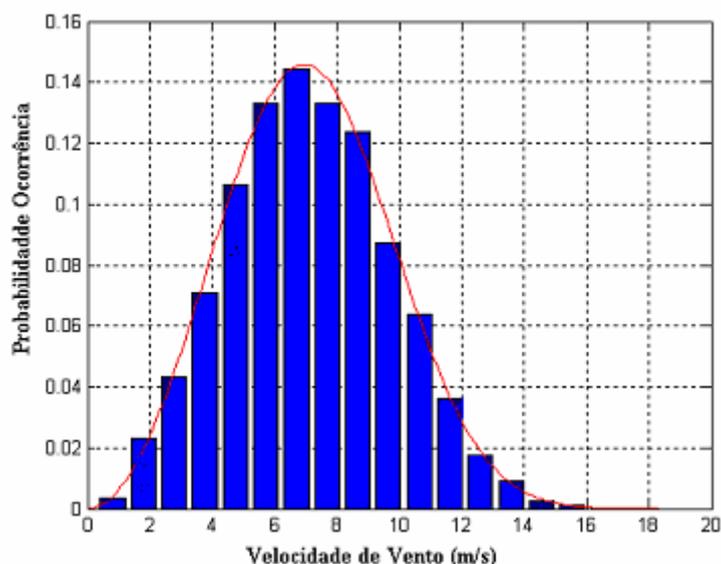


Figura 4.12 – Distribuição de Weibull para:  $k = 3$  e  $c = 8$  m/s.

A Figura 4.12 ilustra uma condição de simulação em que a maior incidência de vento ocorre para uma velocidade da ordem de 7 m/s, com probabilidade de ocorrência de 14%, e que praticamente não existe vento com velocidade maior que 12 m/s ou com velocidade menor que 2 m/s. A Figura ilustra também que as maiores probabilidades de ocorrência de ventos acontecem para:  $5 \text{ m/s} \leq V_{vento} \leq 9 \text{ m/s}$ .

#### 4.2.1 Comparação do Desempenho do Sistema Com e Sem o Uso do Circuito Dobrador de Tensão

Ao integrar as curvas de potência geradas fornecida pelo Fabricante [15] e a curva obtida dos dados de caracterização da Turbina Eólica ao longo de um ano (8.760h), usando a curva de Weibull com  $k = 3$ ,  $c = 8$ m/s, obtém-se uma distribuição acumulada das potências elétricas geradas no período conforme exibido na Figura 4.13.

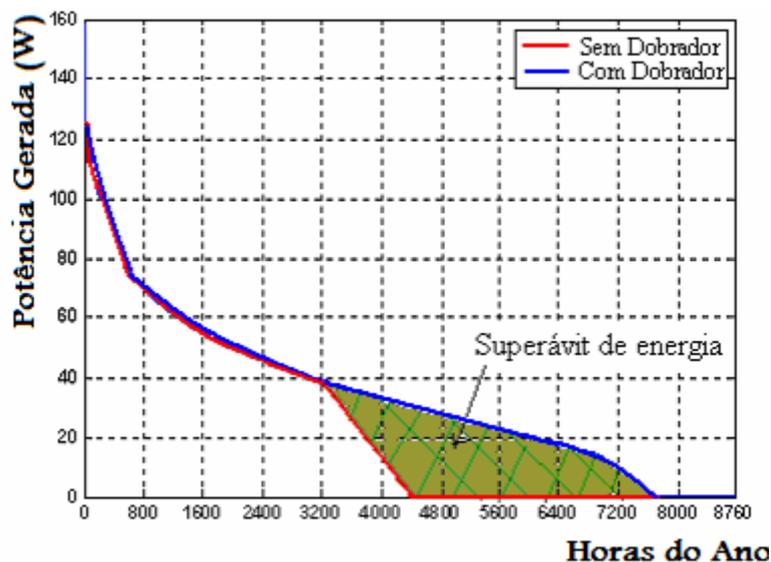


Figura 4.13 – Curva de Duração Anual da Turbina Eólica com os dados de Weibull Considerados ( $k = 3$  e  $c = 8\text{m/s}$ ).

A Figura 4.13 exibe a probabilidade de ocorrência acumulada da potência elétrica gerada em um ano considerando uma distribuição de vento obedecendo a Weibull com  $k = 3$  e  $c = 8\text{m/s}$ . A interpretação da Figura 4.13, indica, por exemplo, que existe a probabilidade de ocorrência de potências superiores a  $40\text{W}$  em até  $3200\text{h}$  no ano.

Na Figura 4.13 observa-se em vermelho a probabilidade de potência acumulada produzida pela turbina eólica sem o Circuito Dobrador de Tensão. Observa-se que somente existirá probabilidade de produzir energia em até aproximadamente  $4500\text{h}$  no ano. Com o Circuito Dobrador de Tensão, é possível observar, que existe a probabilidade de ocorrência de produção de energia em até  $7500\text{h}$  no ano.

A análise da Figura 4.13 mostra que para até  $3.200\text{h}$  do ano, por exemplo, a probabilidade de ocorrência de potência gerada é igual nas duas condições, com ou sem o uso do Circuito Dobrador de Tensão sendo superior a  $40\text{W}$ . O ganho em termos de energia é obtido através da integral da curva da Figura 4.13 onde a área demarcada como “superávit de energia” denota a probabilidade de ocorrência de oferta de energia gerada devido ao uso do Circuito Dobrador de Tensão.

A Figura 4.13 foi obtida considerando-se as condições restritivas de aproveitamento da

energia gerada conforme exibidos na Tabela 4.3, a saber:

→ o aproveitamento da potência gerada pela Turbina Eólica diretamente para prover a alimentação do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, somente será possível para rotações do Rotor maiores que 500RPM, que corresponde a velocidades de vento maiores que 8m/s, tensão gerada maior que 16V e com potências disponíveis a partir de 39Watts;

→ o aproveitamento da potência gerada pela Turbina Eólica, para prover a alimentação do Circuito Dobrador de Tensão e em seguida alimentar o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, somente será possível para rotações do Rotor maiores que 313RPM, que corresponde a velocidades de vento maiores que 5m/s, tensão gerada  $\geq 10V$  e com potências disponíveis a partir de 15Watts.

A Figura 4.13 mostra o comportamento da probabilidade da ocorrência da potência gerada no ano e ilustra, por exemplo, que em até 3.200h, é igual nas duas condições restritivas e maior que 40Watts.

A Figura 4.13 mostra também que a partir das condições restritivas a potência gerada somente poderá ser aproveitada em até 4.500h, para o carregamento de baterias, sem o uso do Circuito Dobrador de Tensão, enquanto que com o uso do mesmo a potência gerada ao longo do ano poderá ser aproveitada, para a mesma finalidade, em até 7.500h. Deste fato decorre que há uma probabilidade de aproveitamento da potência gerada em 3.000h a mais o que representa um ganho de 66,67%.

O cálculo da energia elétrica acumulada no período foi obtido da integral da potência gerada ao longo do tempo e revelou que com o uso do Circuito Dobrador de Tensão foram gerados 299,16 kWh enquanto que sem o uso dele foram obtidos 219,49 kWh o que representa um superávit de 79,67 kWh.

Há de se observar que a energia não disponível para ser usada no carregamento de bateria poderá ser usada em outras aplicações pouco exigentes no que se refere aos valores de

tensão, potência e frequências a serem aplicados à carga haja visto que, estas grandezas variam de forma diretamente proporcional ao vento incidente, com valores de tensão por exemplo, que oscilam de 0 a 39Volts, enquanto a potência disponível varia de 0 a 176W e a frequência varia de 0 a 84Hz, conforme exibido na tabela 4.3. Ditas grandezas com tamanha faixa de variação de valores apresentam uma energia sem qualidade, que somente serviria para alimentação de cargas puramente resistivas, *dump loads*, sem o compromisso com eficiência ou de otimização do trabalho realizado.

No projeto de um sistema de energia renovável, na condição do aproveitamento da energia gerada considerando as amplas condições do vento incidente, independente da velocidade, ter-se-á que se estabelecer uma prioridade de atendimento de cargas.

A Figura 4.14 exhibe o exemplo de um organograma de atendimento das cargas de acordo com a demanda de energia, com priorização das cargas primárias.

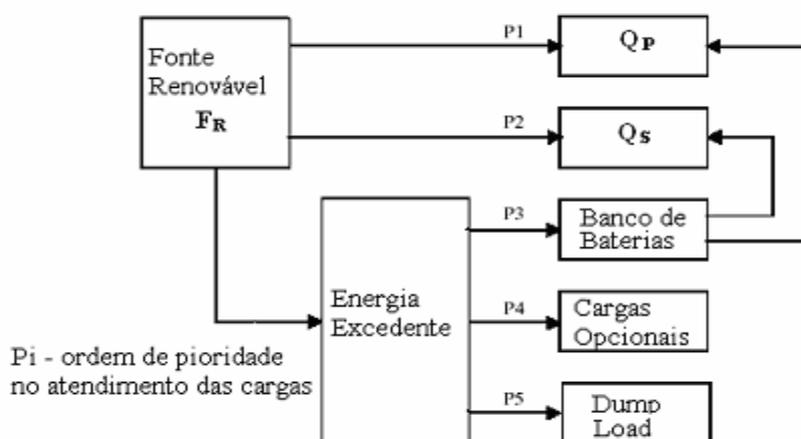


Figura 4.14 – Ordem de atendimento das cargas de acordo com a demanda de energia

Onde: Cargas opcionais → são aquelas alimentadas somente após a recarga do banco de baterias, caso ainda haja oferta de energia renovável disponível;

*Dump Load* → representa cargas resistivas usadas apenas para dissipar energia excedente, por exemplo, para fins de aquecimento de fluidos. Normalmente os *dump loads* não são usados com pequenas turbinas eólicas.

A Figura 4.14 ilustra que as cargas primárias e secundárias são alimentadas, nesta ordem, inicialmente pela Fonte Renovável (FR) e que em seguida na falta ou falha desta, as ditas cargas serão alimentadas na mesma ordem pelo banco de baterias.

Um circuito eletrônico de supervisão deverá desconectar as cargas secundárias do sistema quando de um baixo estado de carga dos acumuladores (banco de baterias), de modo a que as baterias recebam energia pelo tempo necessário para serem recarregadas. Caso a desconexão das cargas secundárias não seja suficiente para restabelecer a condição de recarga suficiente para o banco de baterias, as cargas primárias serão desconectadas do sistema, até que a condição de recarga das baterias seja satisfeita. Este procedimento evita o “afundamento” do banco de baterias e ajuda a preservar sua vida útil.

Em condições normais de oferta de energia renovável e/ou plenitude da carga do banco de baterias, as cargas serão atendidas segundo sua ordem de prioridade.

### **4.3 SIMULAÇÃO USANDO AS CONDIÇÕES DE VENTO DE OLINDA (PE)**

Para obter uma condição de simulação mais próxima da realidade do Nordeste do Brasil e melhor validar o desempenho do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, foi efetuada uma simulação usando os dados do trabalho: “Simulação da Produção de Energia Elétrica com Turbinas Eólicas de Pequeno Porte em Regime de Ventos de Olinda / BR” [34].

#### **4.3.1 Dados Eólicos Usados**

Os dados de vento utilizados neste trabalho foram medidos, pela UFPE - Universidade Federal de Pernambuco (Centro Brasileiro de Energia Eólica), na área de testes de turbinas eólicas, localizada na cidade de Olinda – PE, durante um período de três anos consecutivos, (1996, 1997 e 1998).

Por razão de menores perdas de dados na série histórica de 1998, escolheu-se este ano pra estudo.

No ano de 1998 as perdas foram referentes aos períodos de 06 a 17 de abril (com 273 amostras perdidas) e de 19 de setembro a 03 de outubro (com 337 perdas de amostras), o que representou cerca de 6,9% da massa total de dados [34].

Por falta de um sistema adequado de transformação de dados e de aplicação de modelos auto-regressivos, os dados perdidos em 1998, foram preenchidos diretamente pelos registros correspondentes ao mesmo período do ano mais próximo (1997).

As medições foram realizadas a uma altura de 20m acima do nível do solo, com taxa de amostragem de 1 hz sendo calculadas as médias horárias via integração a cada 60 minutos.

As principais características estatísticas da série de vento usada foram estimadas com o auxílio de modelos simplificados encontrando-se resultados para velocidade média anual (5,58 m/s), desvio padrão (1,77 m/s), e constantes da distribuição de Weibull, ( $k = 3,49$ ) e ( $c = 6,29$  m/s).

A Figura 4.15 mostra a distribuição de Weibull para as condições de vento de Olinda-PE.

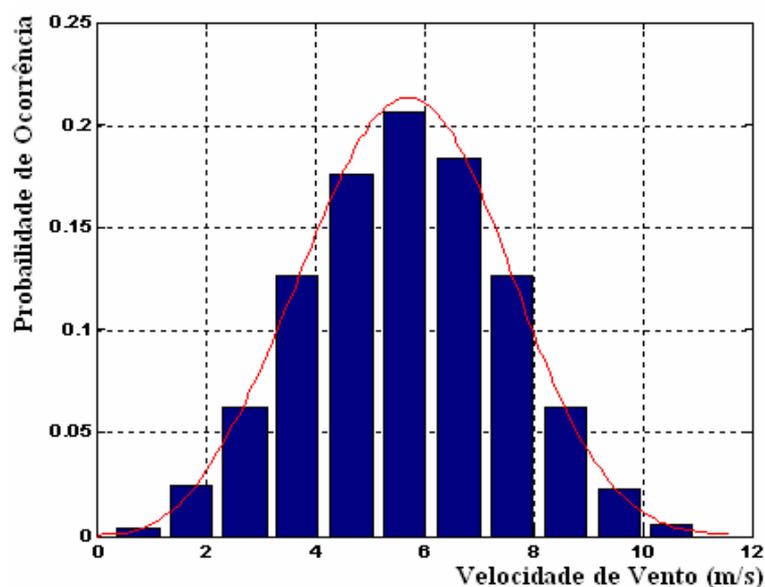


Figura 4.15 – Mostra a distribuição de Weibull para:  $k = 3,49$  e  $c = 6,29$  m/s [34].

A Figura 4.15 ilustra uma condição de simulação em que a maior incidência de vento ocorre para uma velocidade da ordem de 6 m/s, com probabilidade de ocorrência de 20%, e

que praticamente não existe vento com velocidade maior que 10 m/s ou com velocidade menor que 2 m/s. A Figura ilustra também que as maiores probabilidades de ocorrência de ventos acontecem para:  $4\text{m/s} \leq V_{\text{vento}} \leq 7\text{ m/s}$ .

#### 4.3.2 Cálculo da Energia Elétrica Gerada Pela Turbina Eólica

Ao integrar a curva de potência gerada fornecida pelo Fabricante [15] e a curva obtida dos dados de caracterização da Turbina Eólica ao longo de um ano (8.760h), usando a curva de Weibull com  $k = 3,49$  e  $c = 6,29\text{ m/s}$ , obtém-se a potência elétrica gerada no período conforme exibido na Figura 4.16.

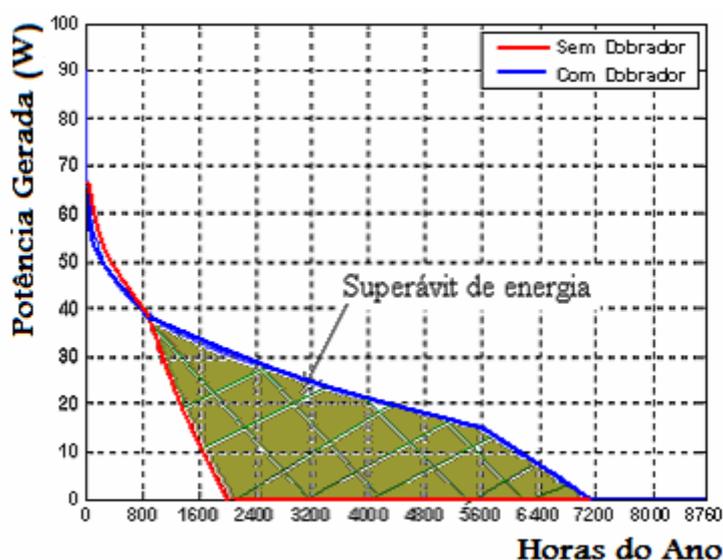


Figura 4.16 – Curva de duração da Turbina WG910 com restrição da potência gerada para carregamento de bateria.

A Figura 4.16 apresenta a probabilidade de ocorrência acumulada da potência elétrica gerada em um ano considerando uma distribuição de vento de Weibull de Olinda-PE ( $k = 3,49$  e  $c = 6,29\text{m/s}$ ).

Pela Figura 4.16 observa-se que para até 800h do ano a potência gerada é praticamente a mesma com ou sem o uso do Circuito Dobrador de Tensão, enquanto que a partir de 800h a potência gerada sem o uso do Circuito Dobrador de Tensão cai rapidamente chegando a zero em 2.000h, permanecendo assim durante o restante do ano. A análise da Figura 4.16 mostra

que com o uso do Circuito Dobrador de Tensão a queda da potência gerada a partir de 800h do ano cai mais lentamente, chegando a zero apenas em 7.200h.

A análise da Figura 4.16 mostra que para até 800h do ano, por exemplo, a potência gerada é igual nas duas condições, com e sem o uso do Circuito Dobrador de Tensão e é maior que 38 watts. Ainda na análise da Figura 4.16, para até 2.000h do ano, a probabilidade de potência gerada é maior que zero sem o uso do Circuito Dobrador de Tensão e é maior que 30 W com o uso do mesmo.

A integral da curva da Figura 4.16 dá a energia elétrica gerada no ano e a área demarcada na curva como “superávit de energia” denota probabilidade de oferta de energia a maior gerada quando do uso do Circuito Dobrador de Tensão.

A Figura 4.16 foi obtida considerando-se as condições restritivas de aproveitamento da energia gerada conforme exibidos na Tabela 4.3 a saber:

→ o aproveitamento da potência gerada pela Turbina Eólica diretamente para prover a alimentação do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, somente será possível para rotações do Rotor maiores que 500RPM, que corresponde a velocidades de vento maiores que 8m/s, tensão gerada maior que 16V e com probabilidade de potências disponíveis a partir de 39Watts;

→ o aproveitamento da potência gerada pela Turbina Eólica, para prover a alimentação do Circuito Dobrador de Tensão e em seguida alimentar o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria, somente será possível para rotações do Rotor maiores que 313RPM, que corresponde a velocidades de vento maiores que 5m/s, tensão gerada maior que 10V e com probabilidade de potências disponíveis a partir de 15Watts.

De acordo com a Figura 4.16 vê-se que para as condições do vento de Olinda-PE, (com  $k = 3,49$  e  $c = 6,29$  m/s), a situação torna-se ainda mais restritiva para o aproveitamento da energia gerada pela Turbina Eólica para alimentação direta do Circuito Controlador de

Carregamento de Bateria. Dita condição potencializa as vantagens do uso do Circuito Dobrador de Tensão.

A Figura 4.16 mostra também que a partir das condições restritivas a probabilidade de potência gerada somente poderá ser aproveitada em até 2.000h, para o carregamento de baterias, sem o uso do Circuito Dobrador de Tensão, enquanto que com o uso do mesmo a potência gerada ao longo do ano poderá ser aproveitada, para a mesma finalidade, em até 7.200h. Deste fato decorre que há um aproveitamento da probabilidade de potências geradas em 5.200h a mais no ano o que representa um ganho de 3.600%.

O cálculo da probabilidade de energia elétrica acumulada no período foi obtido a partir da integral da potência gerada ao longo do tempo e revelou que com o uso do Circuito Dobrador de Tensão foram gerados 170,60kWh, enquanto que sem o uso dele foram obtidos no mesmo período 61,70kWh o que representa um superávit de 108,9 kWh.

Desta forma, fica potencialmente configurada a vantagem técnica do uso do Circuito Dobrador de Tensão que viabiliza o pleno aproveitamento da energia gerada pela Turbina Eólica para velocidades de vento maiores ou iguais a 5m/s, com tensões geradas maiores que 10Volts para o carregamento de bateria, enquanto que com as condições normais de funcionamento da Turbina Eólica, somente será aproveitada a energia gerada para a mesma finalidade a partir de velocidades de vento maiores que 8m/s, com tensões geradas maiores que 16Volts.

#### **4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO A SER USADO EM OLINDA - PE**

Considerando as condições de caracterização da Turbina Eólica, o superávit de energia gerada com o advento do Circuito Controlador de Potência aqui proposto, o preço do kWh a R\$ 0,50, um ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias) de 25% e com o sistema funcionando durante um ano, ter-se-á um retorno financeiro anual (Rfa) de:

$$\text{Rfa} = 108,9\text{kWh} \times \text{R\$ } 0,50/\text{kWh} \times 1,25 = \text{R\$ } 68,06 \text{ (sessenta e oito reais e seis)}$$

centavos).

Considerando-se também o Controlador de Carregamento de Bateria proposto nesta Dissertação a um valor médio de R\$ 350,00 (trezentos e cinquenta reais) ( $\approx$  U\$170,00), pode-se observar que o equipamento será quitado em menos de seis anos.

O modelo de controlador de Potência fornecido pelo Fabricante da Turbina Eólica, SR200 [15], apenas regula a tensão a ser entregue à bateria, e portanto, sem a vantagem do aproveitamento da energia gerada em baixas velocidades de vento e sem a supervisão da descarga da bateria, e tem um custo de mercado de \$280,00 (duzentos e oitenta dólares).

Por outro lado observa-se que com o uso do Circuito Controlador do Carregamento de Baterias proposto nesta Dissertação, uma Turbina Eólica WG910 instalada em Olinda-PE irá gerar no ano 170,60kWh, enquanto que sem o uso dele, a mesma Turbina usando o controlador de potência SR200 [15], irá gerar 61,70kWh. Desta forma, uma só Turbina Eólica que custa U\$ 800,00 usando o Circuito Controlador de Carregamento de Baterias proposto nesta Dissertação a um custo de U\$ 170,00, perfazendo um custo total de U\$ 970,00, instalada em Olinda-PE, irá gerar a mesma quantidade de energia elétrica no ano quanto três outras Turbinas WG910, usando o controlador de carregamento de baterias SR200 ou similar [15], a um custo total de U\$ 2.400,00.

## CAPÍTULO 5

### 5.1 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A energia eólica tem se apresentado economicamente viável e a sua aplicação tem sido crescente no cenário mundial de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia.

Particularmente em aplicações em comunidades isoladas desprovidas de fornecimento de energia elétrica pela rede convencional, a energia eólica surge, desta maneira, como uma solução para a eletrificação de sistemas autônomos e minimização dos problemas advindos da exclusão social elétrica.

Nesta Dissertação foi efetuado o projeto, desenvolvimento e fabricação de um protótipo de um Circuito Controlador de Carregamento de Bateria a ser usado em Turbinas Eólicas de Pequeno Porte.

O foco principal deste Trabalho foi a efetivação do projeto e desenvolvimento de um Circuito Controlador do Carregamento de Baterias mais completo que os existentes no mercado e de aplicação mais ampla com vistas a efetuar:

- o Controle do Carregamento de Baterias;
- a Supervisão e Controle das condições de Descarga da Bateria; e sobretudo,
- a Duplicação da Tensão gerada potencializando desta forma o aproveitamento da energia gerada em baixas velocidades de vento. Desta forma os três circuitos foram implementados visando a composição de uma funcionalidade e de uma confiabilidade

mais ampla do sistema.

Com a concepção do Equipamento objeto desta Dissertação foi viabilizado o aproveitamento da energia gerada para tensões a partir de 10Volts para carregar baterias. Esse aproveitamento de energia seria inviável de outra forma, haja visto que o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria necessita de uma tensão mínima na entrada de 16,5Volts para proceder à sua regulação e garantir 13,8Volts na saída.

O Circuito Controlador de Carregamento de Bateria recebe na sua entrada tensões maiores ou iguais a 16,5Volts e garante na saída uma tensão regulada de 13,8Volts, com corrente máxima de 10A, compatível com a potência nominal da Turbina Eólica usada neste Trabalho.

O Circuito de Supervisão de Descarga da Bateria foi ajustado, e adequadamente testado em 10 ensaios de bancada, para desligar o citado acumulador das cargas consumidoras antes do afundamento dele. Durante os experimentos foram observados desacoplamentos da bateria para uma tensão mínima dela em torno de 11,8Volts, suficiente para evitar descarga profunda da mesma. Foi observado também que, após restabelecidas as condições de recarga da bateria, ela é re-acoplada à carga consumidora quando a tensão disponível voltava chegava a um valor mínimo em torno de 12,6Volts, conforme estabelecido nas condições de projeto especificadas.

Na condição de ser aproveitada a energia gerada para carregar uma bateria onde se faz necessário uma tensão mínima de entrada de 16,5Volts para alimentar o Circuito Controlador de Potência, e usando a curva de distribuição de Weibull com  $k = 3$  e  $c = 8$  m/s, com um vento de velocidade média de vento em torno de 7 m/s, mostrou-se a superioridade do Equipamento objeto deste Trabalho que possibilitou um aproveitamento otimizado da energia gerada pela Turbina Eólica para velocidades de vento maiores ou iguais a 5m/s enquanto que com as condições padrão do Fabricante a mesma energia somente seria aproveitada para

velocidades de vento maiores que 8m/s.

Nestas condições o Circuito Controlador de Carregamento de Bateria proporciona um aproveitamento anual de energia gerada pela Turbina Eólica e utilizada para carregar bateria de 299,16 kWh, enquanto que, sem o uso dele, foram obtidos 219,49 kWh o que representa um superávit de 79,67 kWh (36,3%) de energia aproveitada a mais que nas condições padrão do Fabricante.

### **5.1.1 SIMULAÇÃO USANDO O VENTO DE OLINDA- PE**

Na situação de ser aproveitada a energia gerada para carregar uma bateria onde se faz necessário uma tensão mínima de entrada de 16,5Volts para alimentar o Circuito Controlador de Potência, e usando a curva de distribuição de Weibull com  $k = 3,49$  e  $c = 6,29$  m/s, com velocidade média de vento em torno de 5,5 m/s, conforme as condições de vento de Olinda-PE, mostrou novamente a superioridade do Equipamento objeto deste Trabalho que possibilitou um aproveitamento racional da energia gerada pela Turbina Eólica para velocidades de vento maiores ou iguais a 5m/s enquanto que com as condições padrão do Fabricante a mesma energia somente seria aproveitada para velocidades de vento maiores que 8m/s.

A partir das condições restritivas, que determinam o aproveitamento da energia gerada sem o uso do Circuito Dobrador de Tensão para velocidades de vento maiores que 8 m/s a potência gerada somente poderá ser aproveitada em até 2.000h, para o carregamento de baterias. Com o uso do Circuito Dobrador de Tensão a potência gerada o ao longo do ano poderá ser aproveitada, para a mesma finalidade, em até 7.200h. Deste fato decorre que há um aproveitamento da potência gerada em 5.200h a mais o que representa um ganho de 3.600%.

O cálculo da energia elétrica acumulada no período revelou que com o uso do Circuito Dobrador de Tensão foram gerados 170,60kWh, enquanto que sem o uso dele foram obtidos no mesmo período 61,70kWh o que representa um superávit de 108,9 kWh.

Por outro lado observa-se que com o uso do Circuito Controlador do Carregamento de Baterias proposto neste Trabalho, uma Turbina Eólica WG 910 irá gerar tanta energia no ano quanto três outras que estiverem usando o controlador de carregamento de baterias original de Fábrica.

Desta forma, fica potencialmente configurada a vantagem técnica do uso do Circuito Dobrador de Tensão que viabiliza o pleno aproveitamento da energia gerada pela Turbina Eólica para locais com baixas velocidades de vento.

### **5.1.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestões para trabalhos futuros algumas opções podem ser eleitas tais como:

- a colocação da Turbina Eólica no vento para observação e acompanhamento do seu desempenho em condições reais de funcionamento;
- o desenvolvimento de um circuito multiplicador de tensão ainda mais eficiente;
- o barateamento do Circuito Controlador de Carregamento de Bateria aqui proposto;
- elaboração de estudo teórico que evidencie qual o melhor circuito controlador de carregamento de baterias para as condições de vento em Olinda-PE;
- face às vantagens potenciais do Circuito aqui apresentado, efetuar o dimensionamento dele para aplicações em turbinas eólicas de potências mais elevadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] SONNTAG, RICHARD E.; BORNAKKE, CLAUS; WYLEN, GORDON J. VAN – Fundamentals of Termodinamics – Editora: Edgar Blücher Ltda – 2003;
- [02] BOYLE, G. Renewable Energy – Power for a Sustainable Future. Oxford University, 1996;
- [03] ALDABÓ, Ricardo. Energia Eólica. São Paulo. Artliber Editora, 2002;
- [04] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica - dados obtidos em acesso realizado no dia: 05/04/2006;
- [05] [www.planalto.gov.br] acessado em abril de 2007;
- [06] DUNN, P. Renewable Energies. London: Peter Peregrinus Ltd, 1986;
- [07] Energia Eólica Princípios e Aplicações – Tutorial CRESESB – [http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_eolica.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.pdf) - acessado em setembro de 2005;
- [08] REIS, L.B., SILVEIRA S., Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável – 2ª edição. São Paulo: Edusp, 2001;
- [09] HEIER, S., 1998, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, 2 ed., Universidade de Kassel, Alemanha, John Willey & Sons Ltd;
- [10] RÛNCOS, F. Gerador Eólico. Santa Catarina: UFSC, 2000. Disponível em: <http://www.ufsc.br/wmadmni/dat/depto/fredemar/matda/texto/trgerel.doc> - acessado em fevereiro de 2006;
- [11] LYSEN, E. H. Introdução à Energia Eólica. Lisboa, Departamento de Energias Renováveis do Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, 1982, 358p.(traduzido do original editado por SWD Steering Committee Wind Energy Developing Countries, Amersfoort);
- [12] RODRÍGUES-AMENEDO J. L. Automatic generation Control of a Wind Farm UIT variable Speed Wind Turbines. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, nº 2, June 2002;
- [13] GUEY-LEE, L. FORCES Behind Wind Power. EIA - [http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.reneables/rea\\_issues/wind.html](http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.reneables/rea_issues/wind.html) - acessado em setembro de 2005;

- [14] <http://www.wind-energie.de/englisher-teil/english.html> - acessado em setembro de 2005;
- [15] Marlec Engineering Co Ltd [www.marlec.co] Rutland House Trevithick Rd – Corby Northants-NN175XY- UNITED Kingdom - acessado em abr/2005;
- [16] BARTKOVIK, Robert, CIRCUITOS ELÉTRICOS 4ª Edição – Ed. MAKRON Books, 2004;
- [17] BOYLESTAD, Robert - CIRCUITOS ELÉTRICOS - Ed. Prentice/Hall do Brasil, 10ª Edição - 2004;
- [18] DROUILHET, Stephen, PE, MULJADI, Eduard et all – “Optimizing Small Wind Turbine Performance in Battery Charging Applications” – National Renewable Energy Laboratory, Wind Technology Division, 1617 Cole Blvd, Golden, Colorado 8040, 1995;
- [19] MANWELL, J.F. Mc GOWAN, J.G. “Development in Battery Storage for Wind/Diesel Systems” – 6<sup>th</sup> Annual Battery Conference on Applications and Advances – University of California at Long Beach, January, 1991;
- [20] GORDON, I. Royd “Practical Aspects of Batteries for Small Wind Energy Systems”, 3ª Edição - 1993;
- [21] PIETROCOLA, Maurício, Fenomenologia – Universidade Federal de Santa Catarina - Centro de Ciências Físicas e Matemáticas - <http://www.fsc.ufsc.br/~inspb/fenom2.html>”;  
 CIÊNCIA, Estação – A Energia e as Transformações Químicas – Centro de Difusão Científica Tecnológica e de Extensão Universitária da Universidade de São Paulo - <http://www.eciencia.usp.br/exposicao/gepeq/pilhas.htm> ;  
 MOZENAS, Pilhas e Baterias, <http://mozenas.sites.uol.com.br/Eletricidade/pilhas.htm> - acessados em junho de 2005;
- [22] MANWELL, J.F., Mc GOWAN, J.G. “A Lead Acid Battery Storage Model for Hybrid Energy Systems Solar Energy” – Vol.50, nº 5 – Renewable Energy Research Laboratory – University Massachusetts - 1993;
- [23] MANWELL, James F. et All, “Improvements to the Hybrid2 Battery Model”, Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts - 1993;
- [24] MANWELL, J.F. Mc GOWAN, J.G. “Extension of the Kinetic Model for Wind/Hybrid Power Systems”- European Wind Energy Conference (EWEC), Outubro 1994;
- [25] MANWELL, J.F., Mc GOWAN, I. BARING, STEIN, W. “Recent Progress in Battery Models for Hybrid Wind Power Systems” In: Annual Conference of the American Wind Energy Association (AWEA), March, 1995;
- [26] FACINELLI, W. A. “Modeling and Simulation of Lead-acid Batteries for Photovoltaic Systems” - 18<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion (IECEC), 1983;
- [27] MALVINO, Albert - ELETRÔNICA VOL. 1 – Ed. MAKRON Books - 4ª Ed., 2004;

- [28] BOYLESTAD, Robert - Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos – Ed. Prentice/Hall do Brasil, 2006;
- [29] LANDER, C. V. “Eletrônica industrial Teoria e Aplicações”. São Paulo, McGraw-Hill, 1988, 428p. (traduzido do original editado por McGraw-Hill, Estados Unidos);
- [30] LALOND, David E.; Ross, John A. Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, 1999 Makron Books;
- [31] F. BOGART Jr., Theodore, Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, 2001, Makron Books.
- [32] HIRAHARA, Hiroyuki, M. Zakir Hossain, Masaaki Kawahashi, Yoshitami Nomomura, “Testing basic Performance of a very small Wind Turbine Designed for Multi-purposes” - 2005, Vol. 30, nº 8, Oxford University;
- [33] CASTRO, Rui M. G. – Energia Renovável e Produção Descentralizada – Introdução à energia Eólica – Universidade Técnica de Lisboa, março 2003 – 3ª edição;
- [34] MELO, Gilberto Martins, ARAÚJO, Alex Maurício, “SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE EM REGIME DE VENTOS DE OLINDA / BR”, 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco-Peru, 2007.

## APÊNDICE A

### A.1 BATERIA ELETROQUÍMICA

A bateria eletroquímica, conforme ilustrada na Figura A.1, é um dispositivo baseado em células de eletrólise para o armazenamento de energia elétrica sob a forma de energia química [19] a [21].

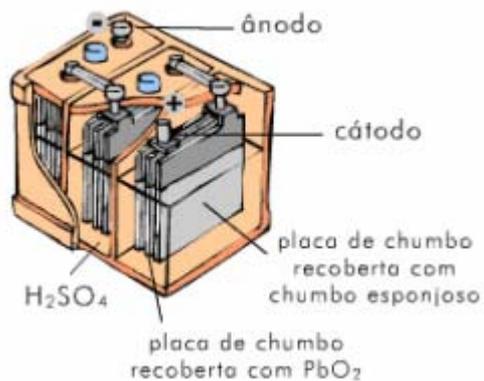


Figura A1 – Bateria eletroquímica Pb-ácido [21]

Criadas em 1859 pelo físico francês Gaston Planté, as baterias de chumbo-ácido foram as primeiras baterias para uso comercial.

Atualmente as baterias de chumbo-ácido (Pb-ácido) são usadas em automóveis, empilhadeiras e grandes sistemas de fornecimento de energia elétrica ininterrupta (*no-breaks*).

Constituem os tipos mais comuns de baterias secundárias ou recarregáveis. São formados por uma série de células individuais interligadas, cujo número depende da tensão que se deseja obter. A célula elementar constitui-se de dois eletrodos à base de chumbo, imersos num eletrólito constituído por uma solução de ácido sulfúrico em água. O eletrodo

positivo contém óxido de chumbo  $PbO_2$  e o eletrodo negativo contém chumbo em forma esponjosa. Se entre o ânodo e o cátodo for inserida uma carga, por meio dela irá fluir uma corrente elétrica no sistema. Com isso, desencadeiam-se reações químicas no interior da bateria, gerando o fluxo de elétrons necessário para manter a corrente circulando. No decorrer dessas reações, tanto o óxido de chumbo como o chumbo em estado puro são atacados pelo ácido sulfúrico, resultando em sulfato de chumbo e água. Quando a quantidade de ácido é baixa e a de sulfato é alta o suficiente para cobrir completamente os eletrodos, as reações internas diminuem e a tensão na bateria decresce, assim como a corrente. Esta chega a níveis tão baixos que se torna impossível continuar alimentando a carga externa. Nesse caso diz-se que a bateria está descarregada [19] a [22].

No processo inverso, ou seja, processo de carga, a bateria recebe tensão de um gerador externo que provoca a passagem de corrente no seu interior, mas no sentido contrário ao da descarga. Em consequência disso, o sulfato de chumbo se combina com a água liberando sobre os eletrodos o chumbo e o óxido de chumbo original e devolvendo à solução de eletrólito o ácido sulfúrico anteriormente consumido. Se a operação de carga se estender além do tempo necessário à eliminação dos sulfatos dos eletrodos, vai-se produzir uma sobrecarga da bateria e, a partir desse momento, a corrente interna fará decompor a água em seus componentes (oxigênio e hidrogênio).

A bateria ideal recomendada para atender às exigências de confiabilidade e segurança de sistemas de emergência tais como *no-breaks*, sistemas de alarmes e outros equipamentos de segurança, diferentemente das baterias automotivas, são construídas para fornecimento de correntes constantes por longos períodos de descarga o que as tornam ideais para tais utilizações.

Seu custo inicial é mais elevado que os modelos para aplicações automotivas, mas são mais confiáveis e sua vida útil é maior, representando um aumento da relação custo/benefício.

As células constituintes das baterias apresentam tipicamente tensão terminal de 2 V. As baterias comerciais são então, associações em série de células que proporcionam uma dada tensão nominal (notadamente um múltiplo de 2V) entre os terminais externos de tais baterias.

A grande maioria dos sistemas híbridos faz uso das chamadas baterias chumbo-ácido “(Pb-ácido)”, cujas células são constituídas de eletrodos de chumbo e solução de ácido sulfúrico.

O presente trabalho prevê o uso das baterias eletroquímicas Pb-ácido de ciclo profundo (*deep cycle*) para aplicações estacionárias.

## **A.2 RECARGA DAS BATERIAS**

As baterias chumbo-ácido devem ser recarregadas sob controle de tensão. Tensões altas por períodos prolongados são extremamente danosas devido à corrosão da grade das placas positivas e produção excessiva de gases. Nas condições normais de projeto, uma vez carregadas as baterias deverão permanecer em condição de “flutuação”, conforme as recomendações do fabricante, de modo a que a bateria esteja sempre disponível para utilização de sua energia nominal quando necessário.

A condição de flutuação é aquela na qual uma tensão de valor nominal de recarga, estável, é mantida aplicada aos terminais da bateria para manter sua condição de plena carga.

## **A.3 AUTO-DESCARGA DAS BATERIAS**

A auto-descarga das baterias ocorre em torno de 2% da sua carga nominal ao mês estando a bateria na condição de vazio. A vida útil de uma bateria comercial nestas condições é estimada em cerca de três a oito anos.

## **A.4 CAPACIDADE NOMINAL DE CORRENTE DAS BATERIAS**

Define-se a capacidade de corrente nominal, na tensão terminal  $V_{BF}$  das baterias, como

sendo:

$$C_B = C_C = I.t \quad (\text{A.1})$$

Onde:  $C_B = C_C \rightarrow$  capacidade de corrente da bateria (A.h);

$I \rightarrow$  corrente fornecida pela bateria ao circuito (A);

$t \rightarrow$  tempo que a bateria passou alimentado o circuito (h);

$V_{BF} \rightarrow$  tensão terminal da bateria quando descarregada.

Em sistemas eólicos e fotovoltaicos,  $V_{BF} \approx 1,85 \text{ V}$  / elemento a  $25^\circ \text{ C}$ .

Desta forma, para uma bateria de seis elementos (tensão nominal 12V) ter-se-á uma tensão ( $V_{BFT}$ ) tensão terminal total da bateria quando descarregada de:

$V_{BFT} = 6.1,85 \approx 11,1 \text{ Volts}$  (que é o máximo afundamento que uma bateria de tensão nominal 12 V pode suportar sem comprometer apreciavelmente sua vida útil) [19] a [22].

Sendo assim, a capacidade de corrente nominal de uma bateria estará disponível para uso dentre os limites de tensão:  $V_{\text{nominal}} \geq V_{\text{bateria}} \geq V_{BFT}$ .

Para uma bateria de tensão nominal de 12 V, a plena carga:  $V_B = 13,8 \text{ V}$ , e desta forma teremos:  $13,8 \text{ V} \geq V_{\text{bateria}} \geq 11,1 \text{ V}$ .

## A.5 ESTADO DE CARGA DE UMA BATERIA

O estado de carga de uma bateria é relação entre a capacidade de corrente da bateria parcialmente carregada e sua capacidade de corrente nominal [22].

$$E_C = C_B/C_N \quad (\text{A.2})$$

Onde:

$E_C \rightarrow$  estado de carga da bateria;

$C_B \rightarrow$  carga atual da bateria;

$C_N \rightarrow$  carga nominal da bateria.

O Valor de  $E_C$  varia de:  $0 < E_C < 1$ , de tal forma que:

$E_C = 1 \rightarrow$  bateria totalmente carregada ( $C_B = C_N$ );

$E_C = 0 \rightarrow$  bateria descarregada ( $C_B = 0$ ).

## A.6 MODELO CINÉTICO DE BATERIA (*KIBAM – KINETIC BATTERY MODEL*)

Desenvolvido no Laboratório de Pesquisas em Energias Renováveis, Universidade de Massachusetts [23] a [25], especificamente para regime quase estático de bateria chumbo-ácido. O modelo conforme ilustrado na Figura A.2 pressupõe a bateria como sendo uma fonte de tensão  $E$ , que fornece uma corrente  $I$ , associada em série com uma resistência  $R_0$ . Nos terminais da bateria a tensão obtida é  $V$  e irá alimentar uma carga  $R_{load}$

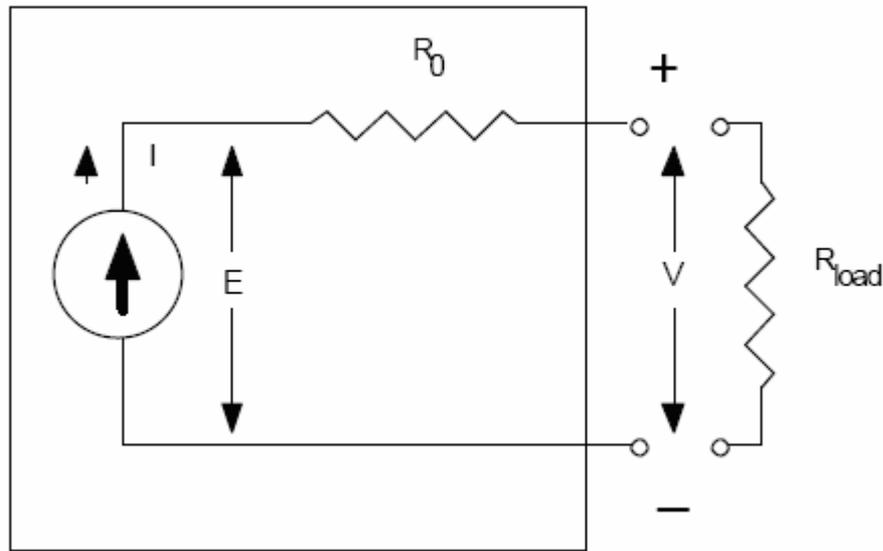


Figura A.2 – Circuito equivalente do modelo simplificado da bateria

A tensão nos terminais da bateria é dada por:

$$V = E - I.R_0 \quad (2.3)$$

Onde:

$V \rightarrow$  tensão nos terminais da bateria;

$E \rightarrow$  tensão nominal da bateria;

$I \rightarrow$  corrente fornecida pela bateria;

$R_0 \rightarrow$  resistência interna da bateria.

$R_{load} \rightarrow$  resistência de carga (dispositivo que vai consumir a energia elétrica gerada).

De saída o modelo já esclarece que quanto menor a resistência interna da bateria ( $R_0$ ), mais sua tensão de saída ( $V$ ) se aproxima da tensão nominal ( $E$ ).

Para uma bateria na condição de descarregada, a resistência interna da bateria ( $R_0$ ) assume valores elevados e daí o porquê de a tensão de saída ( $V$ ) ser tão baixa quando

fornecendo uma corrente (I) nesta condição.

### A.6.1 Tipos de Cargas

As cargas elétricas (normalmente chamadas simplesmente de cargas) são os consumidores de energia a quem se pretende alimentar, foco principal do sistema autônomo.

As cargas consomem energia sob duas formas: em corrente contínua se alimentadas diretamente da turbina/banco de baterias e em corrente alternada se alimentadas por inversores CC/CA [19] e [20].

Segundo a prioridade de alimentação as cargas podem ser divididas em quatro classes distintas:

- a. cargas primárias → que têm prioridade no atendimento pelas fonte renovável;
- b. cargas secundárias → que têm menor prioridade no atendimento pelas fonte renovável;
- c. cargas opcionais → destinadas a consumir o excedente de energia gerada pela fonte renovável após o atendimento das cargas primárias, secundárias e carregamento do banco de baterias;
- d. absorvedor de carga (*dump load*) → cargas destinadas a consumir o excedente de energia gerada que porventura permaneça n o sistema após o atendimento das cargas opcionais.

Desta forma os “*dump load*” serão alimentados apenas para garantir o equilíbrio energético do sistema após o atendimento de todas as outras cargas, mas não são usados com turbinas eólicas .de pequeno porte.

A Figura A.3 ilustra o fluxograma referente à relação entre as classes de carga, a fonte renovável e o banco de baterias. Observa-se que a manutenção das prioridades apresentadas depende diretamente da oferta de energia renovável e do estado de carga do banco de baterias e a carga líquida (*net load*) entendida como sendo:

$$N_L = Q_P + Q_S - F_R \quad (\text{A.4})$$

Onde:

$N_L$  → carga líquida (*net load*) ;

$Q_P$  → carga primária;

$Q_S$  → carga secundária;

$F_R$  → Fonte renovável.

Pela equação A.4, vê-se que uma condição de otimização ocorrerá quando a energia ofertada pela fonte de energia renovável ( $F_R$ ) for suficiente para suprir o somatório de energia demandada ( $Q_P + Q_S$ ) pelas cargas primária e secundária.

Observa-se ainda que nesta condição de otimização, a energia armazenada pelo banco de baterias permanece disponível para ser usada quando necessário.

A Figura A.3 exibe um organograma de atendimento das cargas de acordo com a demanda de energia, priorizando a alimentação das cargas primárias.

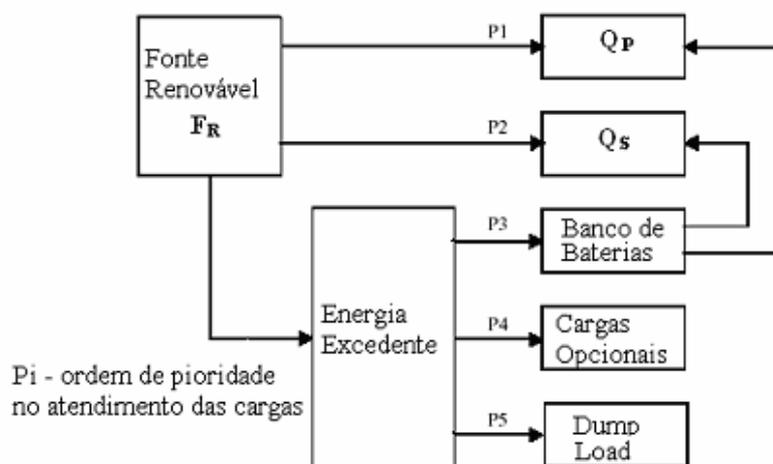


Figura A.3 – Ordem de atendimento das cargas de acordo com a demanda de energia

A Figura A.3 ilustra bem que as cargas primárias e secundárias são alimentadas, nesta ordem, inicialmente pela fonte renovável (FR) e que em seguida na falta ou falha desta, as ditas cargas serão alimentadas na mesma ordem pelo banco de baterias.

Um circuito eletrônico de supervisão deverá desconectar as cargas secundárias do sistema quando de um baixo estado de carga dos acumuladores (banco de baterias), de modo a que as baterias recebam energia pelo tempo necessário para serem recarregadas. Caso a desconexão das cargas secundárias não seja suficiente para restabelecer a condição de recarga

suficiente para o banco de baterias, as cargas primárias serão desconectadas do sistema, até que a condição de recarga das baterias seja satisfeita. Este procedimento evita o “afundamento” do banco de baterias e ajuda a preservar sua vida útil.

Em condições normais de oferta de energia renovável e/ou plenitude da carga do banco de baterias, as cargas serão atendidas segundo sua ordem de prioridade.

O modelo cinético KiBaM traz dados de simulações efetuadas com o modelo supracitado cujos resultados serão apresentados a seguir.

## **A.7 SIMULAÇÕES DE FLUXO DE DESCARGA**

As simulações referentes à capacidade de corrente da bateria x tempo de descarga reportam-se às Figuras A.4 e A.5 das curvas obtidas, onde a corrente é dada como uma fração da capacidade de corrente da bateria  $C_B$  e condições a serem usadas nas recomendações de projeto de sistemas de carregamento de baterias [23] a [26].

Pela análise das curvas de descarga da Figura A.4, considerando a curva de 0,16C por exemplo, uma bateria com capacidade de corrente ( $C_N$ ) de 36Ah, com uma tensão inicial de 12,5V, fornecendo uma corrente máxima de:  $I_{Bmáx} = 0,16 \times 36A = 5,76 A$ , proporcionaria uma autonomia ao sistema ao qual estivesse conectada de 5 horas ao chegar no “Joelho” da referida curva com uma tensão final ( $V_{BF}$ ) de 11,8 V.

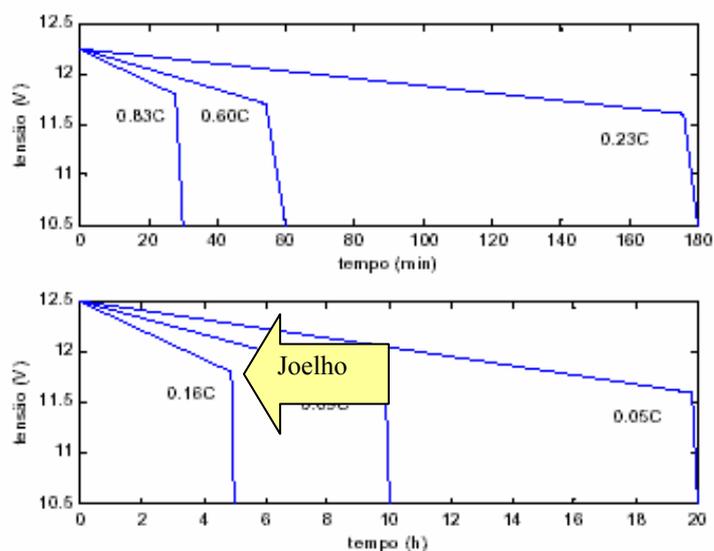


Figura A.4 – Curvas características de descarregamento de baterias de capacidade de corrente “C”, para diferentes correntes de descarga dadas como frações de “C” (Cortesia: [26] - adaptado).

A Figura A.5 exibe a curva característica de descarregamento de baterias, a qual traz sobretudo recomendações das condições a serem usadas quando do projeto dos sistemas autônomos.

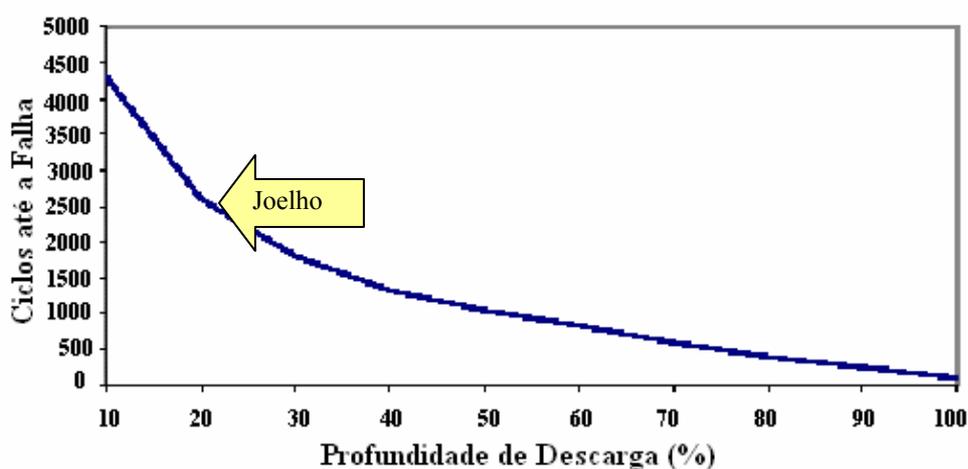


Figura A.5 - Quantidade de ciclos até a falha da bateria em função da profundidade de descarga (Cortesia: [26] - adaptado).

Pela análise da Figura A.5 observa-se que o ponto máximo recomendável de descarga de uma bateria “joelho” é de 20% de sua capacidade nominal de carga. nestas condições obtém-se uma quantidade de 2.500 ciclos até a falha da bateria.

Neste trabalho, conforme as condições de projeto, a bateria de 12V irá alimentar durante duas horas de ausência total de vento, uma carga de 100Watts. Nesta situação a carga irá consumir dela uma corrente de:  $I_B = P / V = 100 \text{ Watts} / 12 \text{ V} = 8,33 \text{ A}$ . A capacidade de corrente disponível na bateria para proporcionar esta autonomia é de:

$$C_C = I \text{ (A)} \times t \text{ (h)} \rightarrow C_C = 8,33\text{A} \times 2\text{h} = 16,66 \text{ Ah.}$$

Para preservar adequadamente a vida útil da bateria, conforme explicitado acima, este valor deverá ser inferior a 20% da capacidade de carga total da bateria.

Desta forma, para proporcionar uma autonomia de 2h ao alimentar uma carga de 100Watts, será necessária uma bateria de:  $C_C = 5 \times 16,66 \text{ Ah} = 66,64 \text{ Ah}$ .

Usando uma bateria de especificação comercial, obtém-se: Bateria estacionária chumbo-ácido, de 12 V / 70Ah.

## **A.8 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE A VIDA ÚTIL DAS BATERIAS:**

### **A.8.1 Vida Útil Nominal ( $U_N$ ) (ou *battery float life*)**

A vida útil nominal de uma bateria determina o máximo intervalo de tempo para utilização dela a despeito de quão utilizada tenha sido. Esta limitação está associada ao processo natural de corrosão interna da bateria. Os modelos comerciais apresentam  $U_N$  entre três e oito anos, sendo este um dado fornecido pelo fabricante.

### **A.8.2 Vida Útil ( $U_{ciclo}$ ) (em ciclos completos de carga/descarga (ou *battery cycle life*))**

A vida útil cíclica de uma bateria é o fluxo de entrada e saída de uma mesma quantidade de energia na bateria, tal que o ciclo completo representa a entrada e saída da energia associada à capacidade nominal. Desta forma a vida útil “ $U_{ciclo}$ ” pode ser entendida como a razão entre a “máxima quantidade de carga que, por especificação de projeto, pode circular pela bateria até que se exija uma reposição” e (*lifetime battery throughput*) ou simplesmente, “circulação máxima” e a “energia associada à capacidade nominal”,

independente da profundidade dos ciclos individuais. Os modelos comerciais apresentam valores de “ $U_{ciclo}$ ” entre 400 e 800 ciclos completos. Para a determinação da vida útil “ $U_{ciclo}$ ” parte-se de curva fornecida pelo fabricante, a curva que relaciona a quantidade de “ciclos até a falha da bateria” (*cycles to failure*) com a “profundidade de descarga” (*depth of discharge*) ou “profundidade do ciclo”.

Conforme ilustrado na Figura A.6, ao multiplicar cada ordenada da Figura 2.4 por sua respectiva abscissa e fazendo o relacionamento com a abscissa que o gerou chega-se a uma nova curva: “ciclos completos até a falha da bateria” (*full cycles to failure*) em função da profundidade de descarga.

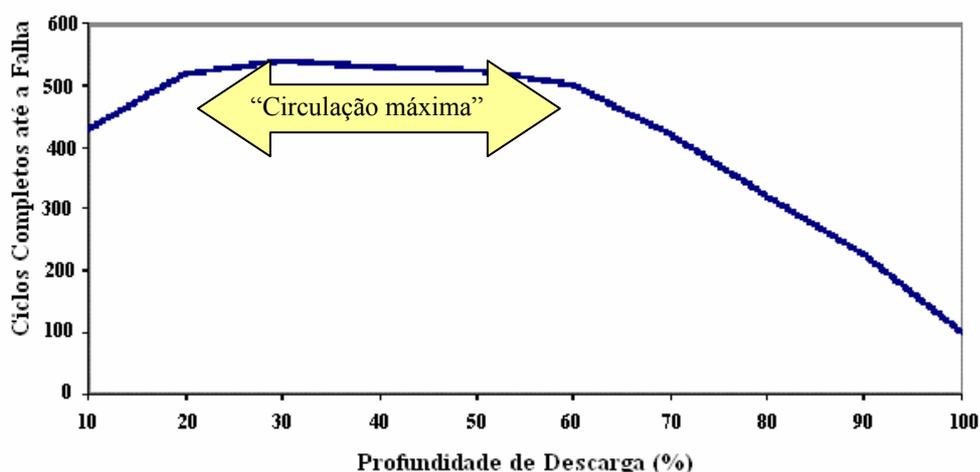


Figura A.6 - Quantidade de ciclos completos até a falha da bateria em função da profundidade de descarga (Cortesia: [26] – adaptado).

A Figura A.6 traz duas novas informações que auxiliam a pormenorizar a análise da vida útil da bateria em ciclos. Conclui-se dela que a "circulação máxima" é, de fato, dependente da "profundidade de descarga". Dentro de uma faixa de operação (no exemplo, entre 20 e 60%), a quantidade de ciclos completos até a falha mantém-se praticamente constante, o que permite a especificação de uma "faixa de operação de segurança" para a bateria. Como a circulação máxima é diretamente proporcional à quantidade de ciclos completos até a falha, tem-se que dentro da "faixa de operação" a circulação máxima é tomada como uma constante.

Ainda pela análise da referida curva observa-se que considerando uma descarga profunda de no máximo 20% a bateria irá apresentar falha após 550 ciclos completos.

Outra informação diz respeito a um valor extremo da "faixa de operação", a "máxima profundidade de descarga permitida". Tal valor é de absoluta relevância para a especificação das condições de operação da bateria pois, compromete severamente a vida útil dela.

## APÊNDICE B

### MANUTENÇÃO REALIZADA NA TURBINA EÓLICA RUTLAND WINDCHARGER WG 910

#### B.1 CONDIÇÕES EM QUE FOI ENCONTRADA A TURBINA OBJETO DESTE TRABALHO

A referida Turbina, de propriedade do Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, encontrava-se fora de uso, em estado de má conservação e sem aplicação específica, necessitando, pois, de uma manutenção geral.

Dentre os problemas encontrados na Turbina objeto deste trabalho, destacam-se:

1 – Necessidade de limpeza geral no rotor, tratamento anti-oxidante, colocação de parafusos de fechamento do rotor e limpeza e lubrificação dos mancais de rolamento.

As Figuras B.1a e B.1b exibem as condições em que foi encontrado o rotor e seu estado após sua adequada recuperação.

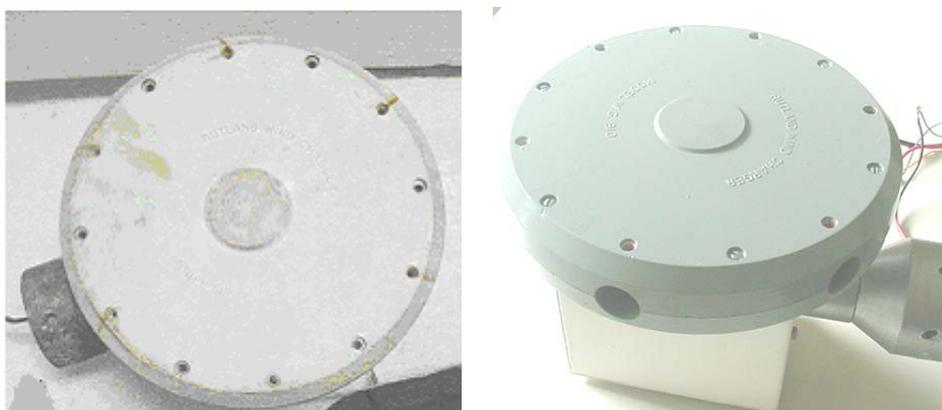


Figura B.1a e Figura B.1b – Exibem o Rotor da Turbina antes e após a manutenção.

2 – Na ocasião da efetivação dos trabalhos de manutenção da Turbina Eólica, o Termostato

encontrava-se com apenas um dos condutores necessitando portanto, que fosse efetuada sua recuperação para restabelecer a condição de normalidade no funcionamento da turbina.

As Figuras B.2a e B.2b exibem as condições em que foi encontrada a fiação do termostato (fios brancos) e o seu estado após a manutenção.

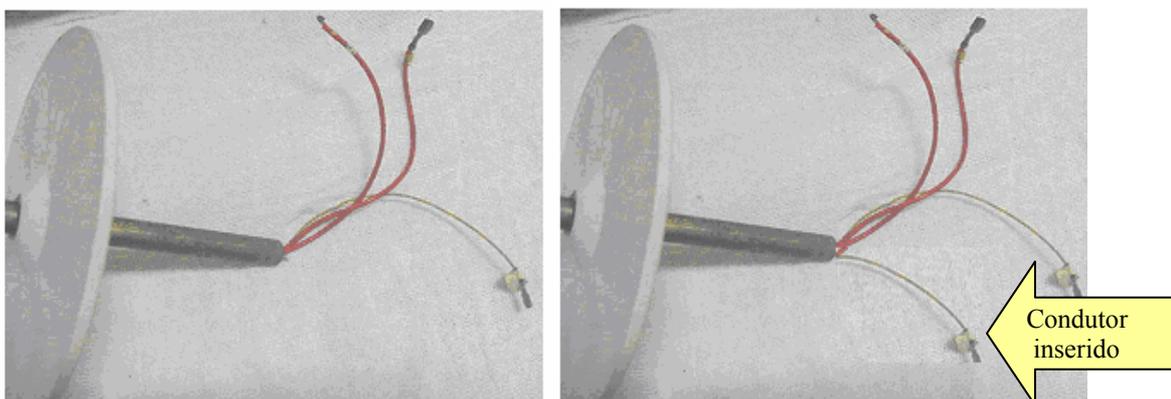


Figura B.2a e Figura B.2b – Exibem o estator da Turbina antes e após a manutenção.

3 – Por ocasião da efetivação dos trabalhos de manutenção foram observados na nacele e demais componentes a ela associados várias deficiências que estavam comprometendo o bom desempenho da Turbina Eólica WG 910, dentre as quais destacam-se:

- A nacele estava em estado de conservação bastante deficiente, necessitando de desamassamento, pintura interna, externa e de confecção de uma tampa de fechamento lateral em material resistente às intempéries para evitar penetração de poeira e umidade excessiva.

→ Todos os trabalhos necessários foram realizados visando a adequada recuperação da nacele;

- A manga de eixo do tubo de sustentação vertical da Turbina Eólica estava bastante oxidada.

→ Foram executados serviços de desoxidação da manga de eixo e o adequado tratamento

antioxidante dela;

- os anéis coletores estavam bastante sujos e oxidados proporcionando contato elétrico deficiente entre si e as escovas de carbono;

→ Foram efetuados trabalhos de limpeza geral e desoxidação dos anéis coletores;

- o contato térmico da superfície metálica da ponte retificadora com o corpo metálico da nacele estava deficiente, bem como a pasta térmica estava resseca necessitando substituição;

→ Foi efetuada a remoção da ponte retificadora, limpeza geral das superfícies e colocação de pasta térmica nova na região de contato entre a ponte retificadora e a base metálica;

- os conectores *faston* de ligação à ponte retificadora e da bobina e do termostato ao indutor estavam em estado de conservação deficiente necessitando substituição;

→ Foi efetuada a substituição de todos os conectores *faston*.

As Figuras B.3a e B.3b exibem um comparativo das condições de recuperação da nacele e dos componentes eletroeletrônicos associados a ela antes da sua recuperação. As Figuras nº B.4a e B.4b e B.5 exibem as da nacele após a competente recuperação efetuada em todos os itens encontrados deficientes, com destaque para o desamassamento e pintura geral interna e externa, a pintura da manga de eixo e substituição dos conectores de ligação.

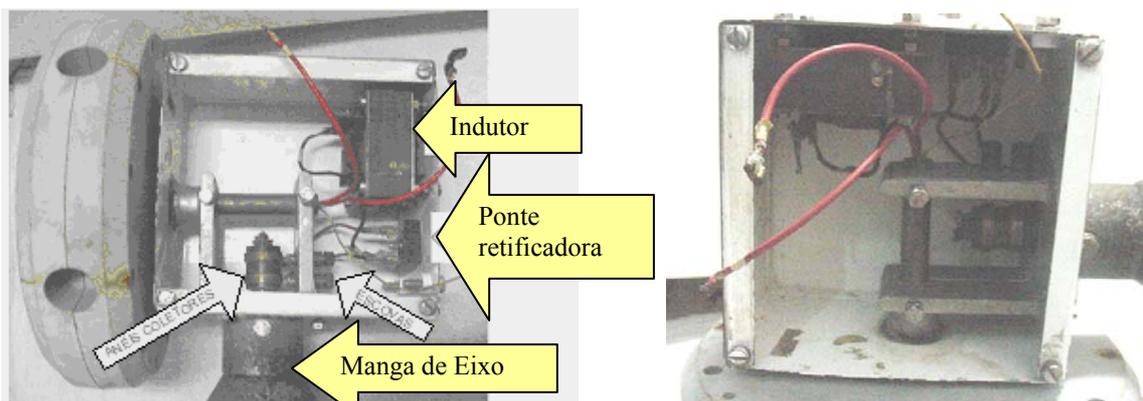


Figura B.3a e Figura B.3b – Nacele da TE antes da manutenção

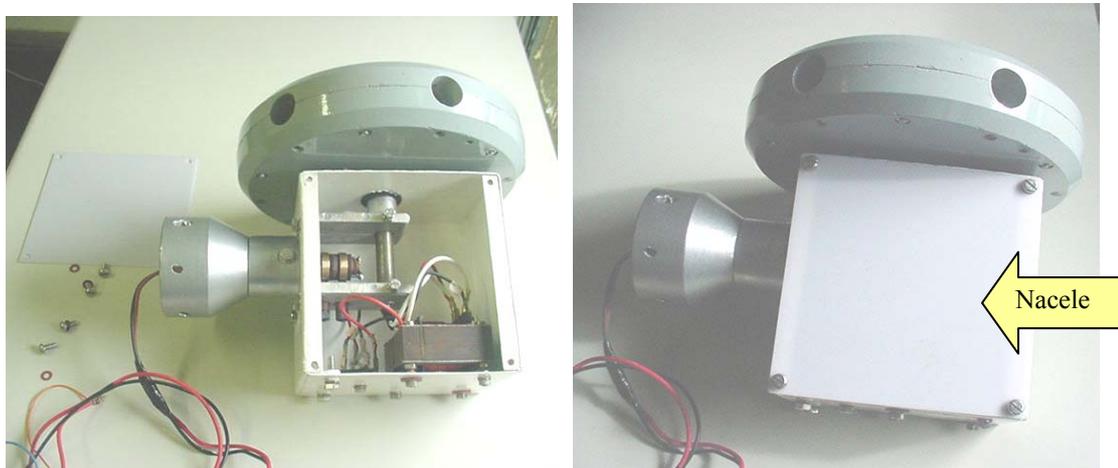


Figura B.4a e Figura B.4b – Nacele da TE após a manutenção.

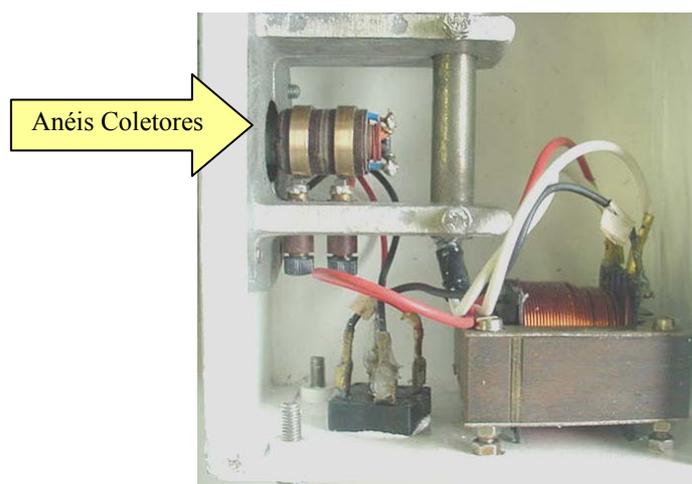


Figura B.5 – Componentes internos da nacele após a manutenção.

## B.2 RESULTADOS DA MANUTENÇÃO EFETUADA

Após a efetivação dos trabalhos de manutenção a Turbina Eólica ficou funcionando com um desempenho adequado, com o Rotor girando livremente e sem vibrações, com a

devida proteção contra a corrosão, e proporcionando um fornecimento de energia elétrica ao meio exterior dentro das especificações do Fabricante [15].

A nacele e os componentes eletroeletrônicos a ela associados resultaram em contatos elétricos perfeitos, com uma condução elétrica satisfatória e com todos os componentes convenientemente protegidos contra poeira e intempéries, em condições adequadas para anos ininterruptos de uso.