



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Faculdade de Engenharia Mecânica

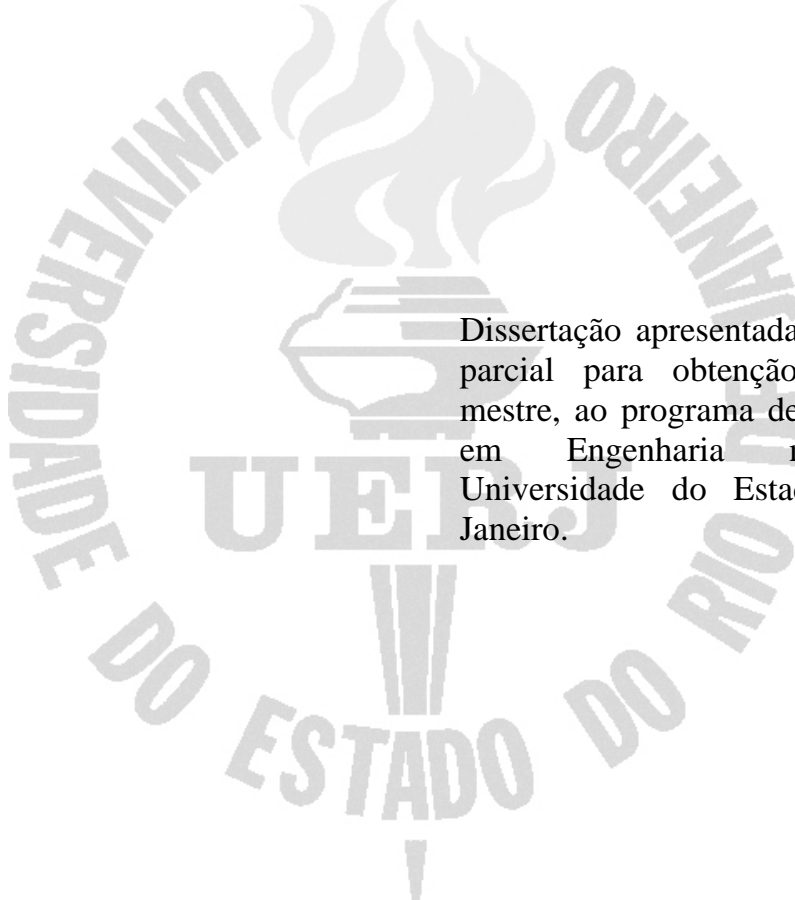
Eden Rodrigues Nunes Junior

***Metodologia de projeto de turbinas eólicas de
pequeno porte***

Rio de Janeiro
2008

Eden Rodrigues Nunes Junior

***Metodologia de projeto de turbinas eólicas
de pequeno porte***



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientadora: Prof^a. Dra. Mila Rosendal Avelino

Rio de Janeiro
2008

N972 Nunes Junior, Édén Rodrigues

Metodologia de projeto de turbinas eólicas de pequeno porte. / Édén Rodrigues Nunes Junior. - 2008
188 f.:il.

Orientador: Mila Rosendal Avelino
Dissertação (Mestrado).Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Faculdade de Engenharia

Bibliografia: f.186-188.

1. Turbinas eólicas-Teses I. Avelino, Mila Rosendal. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade de Engenharia. II.Título

CDU 621

Eden Rodrigues Nunes Junior

***Metodologia de projeto de turbinas
eólicas de pequeno porte***

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovado em _____

Banca Examinadora: _____

Prof^a. Dra. Mila Rosendal Avelino (Orientadora)
Faculdade de Engenharia Mecânica – UERJ

Prof. Dr. Luiz Artur Pecorelli Peres
Faculdade de Elétrica Mecânica – UERJ

Prof. Dr. Manoel Antônio da Fonseca Costa Filho
Faculdade de Engenharia Mecânica – UERJ

Prof. Dr. Sebastião Ércules Melo de Oliveira
Faculdade de Engenharia Mecânica – UFRJ

Rio de Janeiro
2008

*Dedico esta dissertação a minha filha Carolina,
cujo exemplo de bondade e amor
tem sido um norteador para a minha vida.*

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos para:

- à Deus acima de tudo, por me dar a vida em primeiro lugar e permitir que eu tenha saúde para aproveitar todas as oportunidades que surgiram em minha vida;
- à professora DSc. Mila Rosendal Avelino, pela orientação, incentivo e amizade;
- à equipe da ENERSUD, em especial ao Engenheiro Luiz César Sampaio Pereira, ao Sr. Bruno Bressan de Cnop, pela ajuda, pelo suporte técnico, dicas valiosas, sem os quais esse trabalho não teria sido realizado;
- à FINEP, pelo fomento a pesquisa no Brasil, em especial a Sra Ione Maria Dias;
- à minha namorada Renata, pelas palavras de incentivo, carinho e pela sincera crença que eu seria bem sucedido neste projeto;
- ao Engenheiro, professor e colega de trabalho Washington da Costa, cuja ajuda, suporte, dicas e suor foram fundamentais para o desenvolvimento da metodologia elétrica deste trabalho;
- ao Engenheiro Rodrigo Calado do Amaral, pela inestimável ajuda em todas as fases deste projeto;
- ao Sr Santos, faxineiro do Laboratório de Engenharia da UERJ, pelo cafezinho amigo;
- ao meu coordenador Luiz Claudio, pela compreensão nos momentos em que tive que me ausentar do trabalho;
- aos meus alunos do CEFET RJ, pela compreensão quando não pude comparecer para ministrar minhas aulas;
- todos os colegas do Mestrado em Engenharia Mecânica da UERJ;
- à todos os funcionários do CEFEN, que sempre me ajudaram em todos os momentos, em todas as compras que realizei para esse projeto.

*“De tanto ver triunfar as nulidades,
de tanto ver prosperar a desonra,
de tanto ver crescer a injustiça,
de tanto ver agigantarem-se os poderes nas mãos dos maus,
o homem chega a desanimar da virtude,
a rir-se da honra,
a ter vergonha de ser honesto.”*

Rui Barbosa

Resumo

O potencial eólico do Brasil, de vento firme e com viabilidade econômica de aproveitamento, é de 143 GW. Isso equivale ao dobro de toda a capacidade da geração já instalada no país. No Brasil, a energia eólica tem uma sazonalidade complementar à energia hidrelétrica, porque os períodos de melhor condição de vento coincidem com os de menor capacidade dos reservatórios. O projeto desenvolvido neste trabalho nasceu de uma chamada pública do FINEP, e sob os auspícios do recém criado CEPER. Ao projeto foi incorporado um caráter investigativo, de contribuição científica original, resultando em um produto de tecnologia inovadora para aerogeradores de baixa potência. Dentre os objetivos do projeto, destacamos a avaliação experimental de turbinas eólicas de 5000 W de potência. Mais especificamente, dentro do objetivo geral deste projeto estão incluídas análise estrutural, análise aerodinâmica e análise de viabilidade de novos materiais a serem empregados. Para cada uma das diferentes áreas de conhecimento que compõem o projeto, será adotada a metodologia mais adequada. Para a Análise aerodinâmica foi realizada uma simulação numérica preliminar seguida de ensaios experimentais em túnel de vento. A descrição dos procedimentos adotados é apresentada no Capítulo 3. O Capítulo 4 é dedicado aos testes elétricos. Nesta etapa, foi desenvolvido um banco de testes para obtenção das características específicas das máquinas-base, como curvas de potência, rendimento elétrico, análise e perdas mecânicas e elétricas, e aquecimento. Este capítulo termina com a análise crítica dos valores obtidos. Foram realizados testes de campo de todo o conjunto montado. Atualmente, o aerogerador de 5kW encontra-se em operação, instrumentado e equipado com sistema de aquisição de dados para consolidação dos testes de confiabilidade. Os testes de campo estão ocorrendo na cidade de Campos, RJ, e abrangem as seguintes dimensões de análise; testes de eficiência para determinação da curva de potência, níveis de ruído e atuação de dispositivos de segurança. Os resultados esperados pelo projeto foram atingidos, consolidando o projeto de um aerogerador de 5000 W.

Abstract

Initial estimates of the potential contribution of wind power in Brazil for selected areas are approximately of 143GW. This figure represents two times the total power already installed. In Brazil, wind power relates to hydroelectrical power in such way that when wind speeds are high and stable, reservoirs experiences low capacity in water volume. The project herein presented has its origins on the approval of sponsorship from FINEP, a governmental agency that provided grant to develop a 5kW windmill over a period of 30 months. Among the objectives of this project are the development of a new technology to be applied to windmills, by means of technological innovation. More specially, the main proposal was to evaluate wind turbines behavior numerically and experimentally, including its implementation in wind towers to generate 5kW. This is accomplished in detail x out performance of analysis of structural characteristics, aerodynamic, performance e viability on the use of new materials were performed. To this end, we shall define a specific methodology to each area of knowledge. Aerodynamic analysis was performed by means of initial numerical simulation followed by experimental tests in wind tunnel. A detailed description of the experimental set up and procedures is provided in chapter 3. Chapter 4 deals with electrical parts of the project. At this point an apparatus was specifically designed and built in order to acquire relevant parameters, which describe the electrical generator, provided we can predict on some measure the electrical energy performance under three different operating conditions, namely, without load, loaded and charging batteries. A detailed description of 5kW prototype manufactured is presented along with an analysis of the results are presented at the end of this chapter. Finally, the whole set was completed and were performed. The complete Truck-test set of the windmill is composed by tower, generator, turbines, controlling system and safety system. Results obtained are in agreement with the expected. At this moment, the 5kW windmill finds itself in operation. The windmill is instrumented and equipped with an data acquisition system to consolidate reliability tests, which provide efficiency tests, noise determination and safety devices test performance. This set of data will confirm the global performance and consolidate the 5kW windmill.

Sumário

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E

INTRODUÇÃO	p. 27
1.1 Fundamentos aerodinâmicos das maquinas eólicas	p. 27
1.1.1 <u>Justificativa</u>	p. 28
1.1.2 <u>Metodologia</u>	p. 29
1.1.2.1 Identificação, Testes e Análises dos equipamentos bases	p. 30
1.1.2.2 Testes Aerodinâmicos	p. 30
1.1.2.3 Testes Elétricos	p. 30
1.1.3 <u>Análise crítica dos valores obtidos</u>	p. 30
1.1.3.1 Eletrônica de potência.	p. 30
1.1.3.2 Definição de especificações e critérios.	p. 30
1.1.4 <u>Desenvolvimento de modelos</u>	p. 31
1.1.4.1 Modelo aerodinâmico.	p. 31
1.1.4.2 Testes de protótipo em laboratório.	p. 31
1.1.4.3 Testes Aerodinâmicos	p. 31
1.1.4.4 Teste elétrico	p. 31

1.1.4.5	Testes em carga resistiva e em banco de baterias	p. 31
1.1.4.6	Teste da eletrônica de potência	p. 31
1.1.4.7	Testes de campo em todo o conjunto	p. 31
2	ESTADO DA ARTE	p. 32
2.1	Antecedentes históricos	p. 32
2.2	Circulação global	p. 37
2.2.1	<u>Tipos de ventos</u>	p. 41
2.2.2	<u>Brisas</u>	p. 42
2.2.3	<u>Ventos catabáticos e anabáticos</u>	p. 44
2.2.4	<u>FOHN</u>	p. 45
2.2.5	<u>Velocidade do vento</u>	p. 45
2.2.6	<u>Lei exponencial de Hellmann</u>	p. 47
2.2.7	<u>Energia útil do vento</u>	p. 49
2.2.8	<u>Curvas de potência</u>	p. 50
2.2.9	Representação estatística do vento	p. 50
2.2.10	<u>Fator de distribuição de forma</u>	p. 51
2.2.11	<u>Distribuição de Rayleigh</u>	p. 52
2.2.12	<u>Distribuição de Weibull</u>	p. 54
3	METODOLOGIA AERODINÂMICA	p. 56
3.1	Fundamentos aerodinâmicos das máquinas eólicas	p. 56
3.2	Forças sobre um perfil	p. 56
3.2.1	<u>Forças de arrasto e sustentação em perfis fixos</u>	p. 59
3.2.2	<u>Polar de um perfil</u>	p. 60
3.3	Ação do vento sobre o perfil, potência útil e rendimento	p. 61
3.3.1	<u>Pás perfiladas</u>	p. 61

3.3.2	<u>Ângulos da corda</u>	p. 61
3.3.3	<u>Forças de arrasto e de sustentação em perfis móveis</u>	p. 62
3.3.4	<u>Forças do conjugado e axial</u>	p. 65
3.3.5	<u>Conjugado motor</u>	p. 66
3.3.6	<u>Rendimento aerodinâmico das hélices</u>	p. 68
3.3.7	<u>Potência máxima</u>	p. 70
3.3.8	<u>Conjugado motor máximo</u>	p. 71
3.3.9	<u>Velocidade angular máxima</u>	p. 71
3.4	Modelo teórico de Betz	p. 72
3.4.1	<u>Considerações práticas</u>	p. 74
3.5	Rotor Multipá	p. 75
3.5.1	<u>Força axial sobre uma pá</u>	p. 75
3.5.2	<u>Força axial total</u>	p. 76
3.6	cálculo da força e do conjugado do motor	p. 76
3.6.1	<u>Representação gráfica</u>	p. 78
3.7	Teoria turbilhonaria das hélices eólicas	p. 79
3.8	Otimização de uma instalação eólica	p. 82
3.9	Classificação	p. 84
3.9.1	<u>Máquinas eólicas de eixo horizontal</u>	p. 85
3.9.2	<u>Máquinas eólicas de eixo vertical</u>	p. 86
3.10	Aerogeradores de eixo horizontal	p. 87
3.11	Cargas que atuam sobre o rotor	p. 90
3.11.1	<u>Situações limites</u>	p. 91
3.11.2	<u>Vibrações</u>	p. 92
3.12	Materiais de construção	p. 92
3.13	Parâmetros práticos utilizados no projeto de aerogeradores eólicos	p. 93

3.13.1	<u>Relação da velocidade periférica TSR</u>	p. 93
3.13.2	<u>Relações práticas entre C_D e C_L</u>	p. 94
3.13.3	<u>Fator de atividade FA</u>	p. 95
3.13.4	<u>Rendimento aerodinâmico η</u>	p. 96
3.13.5	<u>Coeficiente de torque C_M</u>	p. 96
3.14	Dimensionamento de um rotor eólico	p. 97
3.14.1	<u>Área frontal varrida por uma pá</u>	p. 97
3.14.2	<u>Tamanho das pás e coeficiente de solidez Ω</u>	p. 100
3.15	Resistência aerodinâmica do rotor	p. 101
3.15.1	<u>Força centrífuga</u>	p. 101
3.15.2	<u>Resistência aerodinâmica da pá</u>	p. 102
3.15.3	<u>Momento fletor da pá</u>	p. 102
3.15.4	<u>Momento torsor</u>	p. 102
3.16	Cálculo simplificado de aerogeradores rápidos de eixo horizontal	p. 103
3.16.1	<u>Diâmetro do rotor</u>	p. 103
3.16.2	<u>Acoplamento rotor eólico-gerador elétrico</u>	p. 104
3.16.3	<u>Solidez das pás</u>	p. 104
3.16.4	<u>Perfil da pá</u>	p. 105
3.16.5	<u>Valores de θ</u>	p. 105
3.16.6	<u>Cálculo dos coeficiente de sustentação C_L máximo</u>	p. 106
3.16.7	<u>Comprimento da corda</u>	p. 106
3.16.8	<u>Relação R/L da pá</u>	p. 107
3.16.9	<u>Correção do ângulo de ataque α</u>	p. 108
3.16.10	<u>Ângulo de inclinação β</u>	p. 108
3.17	O Projeto da turbina eólica GRW5000	p. 108
3.18	Fundamentos para o dimensionamento estrutural dos componentes	p. 109

3.18.1	<u>Cargas atuantes</u>	p. 110
3.18.1.1	Carregamento aerodinâmico	p. 110
3.18.1.2	Carregamento gravitacional.....	p. 112
3.18.1.3	Carregamento inercial.....	p. 112
3.18.1.4	Carregamento operacional	p. 113
3.18.2	<u>Estimativa do cálculo da potência</u>	p. 113
3.19	Desenvolvimento das tarefas	p. 114
3.20	NORMA IEC	p. 116
3.21	Condições operacionais	p. 118
3.22	Cálculo das cargas de projeto	p. 119
3.22.1	<u>cargas na longarina</u>	p. 120
3.22.2	<u>Cargas no revestimento</u>	p. 121
3.23	Cálculo das tensões	p. 122
3.23.1	<u>Tensões na longarina</u>	p. 122
3.23.2	<u>Tensões no revestimento</u>	p. 123
3.24	Verificação da rigidez	p. 125
3.24.1	<u>Verificação da rigidez flexural</u>	p. 125
3.24.2	<u>Verificação da rigidez torcional</u>	p. 126
3.25	Resultados	p. 127
4	METODOLOGIA ELÉTRICA	p. 128
4.1	Máquinas de fluxo axial	p. 128
4.1.1	<u>Classificação das máquinas de fluxo axial e princípios de funcionamento</u>	p. 129
4.2	Os ímãs permanentes	p. 130
4.3	Cronologia do magnetismo	p. 130
4.4	Ímã de neodímio	p. 131

4.5	Máquina de fluxo axial utilizada no experimento	p. 133
4.5.1	<u>Protótipo utilizado</u>	p. 135
4.6	Descrição matemática	p. 135
4.6.1	<u>Variáveis primárias envolvidas</u>	p. 137
4.6.2	<u>Variáveis secundárias envolvidas</u>	p. 137
4.7	Circuito equivalente de um gerador trifásico	p. 138
4.8	Equações de funcionamento	p. 138
4.9	Método experimental	p. 140
4.9.1	<u>Controles exercidos no experimento em bancada de teste</u>	p. 141
4.9.2	<u>Controles e Velocidade de rotação da máquina</u>	p. 141
4.9.3	<u>Controle da tensão terminal</u>	p. 142
4.9.4	<u>Controle da corrente elétrica</u>	p. 142
4.9.5	<u>Controle da temperatura</u>	p. 142
4.9.6	<u>Observações sobre a bancada de ensaios</u>	p. 142
4.10	Determinação do número de amostras	p. 143
4.11	Subsídios ao dimensionamento	p. 143
4.12	Bancada de teste para realização do experimento	p. 144
4.12.1	<u>Dispositivos utilizados na bancada</u>	p. 144
4.12.2	<u>Estrutura mecânica da bancada</u>	p. 145
4.12.3	<u>Sistema elétrico de potência</u>	p. 147
4.12.4	<u>Sistema de supervisão</u>	p. 152
4.12.5	<u>Aquisição de dados</u>	p. 154
4.12.6	<u>Avaliação da instrumentação utilizada adaptadas ao experimento</u>	p. 157
4.13	Ensaio realizados com a máquina AFPM	p. 157
4.13.1	<u>Análise do comportamento da tensão</u>	p. 157

4.14 Análise do comportamento da tensão em vazio através de simulação em bancada	p. 159
4.15 Análise do comportamento da tensão com carga através de ensaios em bancada	p. 161
4.16 Resultados obtidos nos ensaios para recarga do banco de baterias	p. 163
4.17 Avaliação de resultados obtidos	p. 164
4.17.1 <u>Resultados obtidos em vazio</u>	p. 165
4.17.2 <u>Resultados obtidos com resistores e banco de baterias acoplado</u>	p. 165
4.17.3 <u>Avaliação do desempenho térmico da máquina AFPM GRW5000</u>	p. 165
4.17.4 <u>Análise da variação das tensões</u>	p. 166
4.17.5 <u>Análise das variações das correntes</u>	p. 167
4.17.6 <u>Avaliação do rendimento em relação à carga aplicada</u>	p. 167
 CONCLUSÕES	 p. 185
 REFERÊNCIAS	 p. 186

Lista de Figuras

1	Potência eólica instalada no mundo (WWEA, 2008)	p. 28
2	Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica (CBEE, 2008)	p. 29
3	Radiação solar. A) Radiação solar sobre uma superfície horizontal; B) Radiação solar absorvida pela Terra. C) Radiação devolvida ao espaço exterior, (DíEZ, 2003.)	p. 37
4	Modelo de Circulação Geral (1920)-(Modelo de 3 células), (CORRêA,)	p. 39
5	Movimentos Atmosféricos, (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2007)	p. 39
6	Esquema geral de um vento particular terra-mar e vice-versa (brisas), (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2007)	p. 43
7	Ventos de vales e montanhas (dia), (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2007)	p. 44
8	Ventos de vales e montanhas (noite), (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2007)	p. 44
9	Ventos catabáticos, (DíEZ, 2003.)	p. 44
10	Efeito Fohn, (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2007)	p. 45
11	Influência de obstáculos topográficos sobre a velocidade do vento, (RGG, 2008)	p. 46
12	Rosa dos ventos características para um fluxo dominante dentro de um vale, em uma planície e acima das elevações extremas se um vale, (DíEZ, 2003.)	p. 46
13	Diversos tipos de anemômetros, (DíEZ, 2003.)	p. 47
14	Variação da velocidade do vento (camada limite) com a altura sobre o terreno, segundo a lei exponencial de Hellmann, (DíEZ, 2003.)	p. 48
15	Area A varrida pelo rotor de diâmetro D, (DíEZ, 2003.)	p. 49
16	número total de horas ao ano que se prevê que o vento possa soprar a uma velocidade \vec{v} , (DíEZ, 2003.)	p. 52

17	Comparação da energia disponível com a curva de Rayleigh correspondente, (DíEZ, 2003.)	p. 53
18	Perfil situado no seio de uma corrente fluida. (DíEZ, 2003.)	p. 57
19	Forças de sustentação em um perfil com grande inclinação. (DíEZ, 2003.)	p. 58
20	Forças de sustentação em um perfil com pequena inclinação inclinação. (DíEZ, 2003.)	p. 58
21	Coeficiente k para alguns perfis semiesféricos. (DíEZ, 2003.)	p. 58
22	Coeficiente de arrasto e sustentação. (DíEZ, 2003.)	p. 59
23	Polar do perfil MH 110 para diferentes números de Reynolds. (Curvas geradas pelo software PROFILI)	p. 60
24	Forças que atuam sobre um elemento de pá em rotação. (DíEZ, 2003.)	p. 62
25	Pá de uma hélice de avião. (DíEZ, 2003.)	p. 63
26	Pá de uma hélice de aerogerador. (DíEZ, 2003.)	p. 63
27	a) velocidades e b) forças que aparecem sobre a pá de um aerogerador. (DíEZ, 2003.)	p. 64
28	Rotor Savonius. (GASCH; TWELE, 2002.)	p. 66
29	Moinho multipá. (GASCH; TWELE, 2002.)	p. 66
30	Aerogerador Darrieus. (WIKIPÉDIA, 2008)	p. 67
31	Aerogerador de hélice. (GASCH; TWELE, 2002.)	p. 67
32	Esbeltez de um perfil NACA. (DíEZ, 2003.)	p. 69
33	Modelo de Betz. (citegasch modificado	p. 72
34	Forças sobre um perfil. (DíEZ, 2003.)	p. 75
35	Triângulos de velocidades na entrada e na saída do perfil. (DíEZ, 2003.)	p. 77
36	Representação gráfica da equação 3.61. (Gráfico desenvolvido pelo autor com o software Grapher 6.0)	p. 79
37	Representação gráfica da equação 3.62. (Gráfico desenvolvido pelo autor com o software Grapher 6.0)	p. 80
38	Teoria turbilhonária de hélices eólicas. (DíEZ, 2003.)	p. 81

39	Aerogerador Darrieus com dois Savonius que atuam como motor de partida. (DÍEZ, 2003.)	p. 87
40	Disposição da turbina VENTIS 20-100.(GASCH; TWELE, 2002.)	p. 89
41	Disposição da turbina NORDTANK 150 XLR.(GASCH; TWELE, 2002.)	p. 89
42	Diagrama para a determinação da potência em aerogeradores rápidos. (GASCH; TWELE, 2002.)	p. 90
43	Flexão das pás do rotor pela ação do vento. (DÍEZ, 2003.)	p. 91
44	Estrutura de uma pá moderna. (DÍEZ, 2003.)	p. 93
45	Coefficientes de arrasto e de sustentação do perfil MH110. (Gráfico plotado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p. 95
46	Relação entre o rendimento aerodinâmico, o TSR e o número de pás para, $D/L \rightarrow \infty$. (DÍEZ, 2003.)	p. 96
47	Curvas (η_{aerod} - TSR), (JOHNSON, 2001.)	p. 98
48	Curvas (η_{aerod} - TSR), para hélices. (DÍEZ, 2003.)	p. 98
49	Relação entre o coeficiente de solidez Ω e o TSR. (GASCH; TWELE, 2002.)	p. 101
50	Divisão de uma pá (DÍEZ, 2003.)	p. 105
51	Valores de θ em função de SR. (DÍEZ, 2003.)	p. 106
52	Valores do parâmetro de forma SP em função de SR. ((DÍEZ, 2003.))	p. 107
53	Projeção das forças aerodinâmicas. (DÍEZ, 2003.)	p. 110
54	Fluxograma da metodologia de projeto. (RIBEIRO, 2006.)	p. 115
55	Escala de vento Beaufort	p. 119
56	Forma em planta das pás. (Desenho feito pelo autor com o uso do software Solidworks 2006)	p. 120
57	Momento fletor ao longo da envergadura. (Gráfico plotado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p. 121
58	Momento tursor ao longo da envergadura. (Gráfico plotado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p. 122

59	Nível de tensões ao longo da envergadura. (Gráfico plotado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.123
60	Seção transversal dos perfis das pás. (Desenho extraído do software PROFILI 2.21)	p.124
61	Tensões no revestimento ao longo da envergadura. (Gráfico plotado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.124
62	Condição considerada nos cálculos. (RIBEIRO, 2006.) modificado . .	p.125
63	Torção na pá. (Gráfico plotado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.126
64	Disposição de estatores e rotores nas máquinas AFPM. (COSTA, 2007.)	p.130
65	Desenho do aerogerador eólico GRW 5000. desenho feito pelo autor utilizando o software Solidworks 2008	p.134
66	Gerador GRW 5000 fechado e em vista explodida. (Desenho feito pelo Eng. Rodrigo Calado com o auxílio do software Solidworks 2006)	p.134
67	Arquitetura do enrolamento da máquina AFPM GRW 5000. (COSTA, 2007.)	p.135
68	Diagrama de bloco de um sistema de geração de energia eólica. (COSTA, 2007.)	p.137
69	Circuito equivalente de um gerador trifásico. (COSTA, 2007.)	p.138
70	Diagrama de bloco da bancada de teste. (COSTA, 2007.)	p.141
71	Bancada de testes do gerador GRW 5000. (Desenho feito pelo autor utilizando o software Solidworks 2008)	p.146
72	Foto do painel com os dispositivos de potência. (Foto tirada pelo autor)	p.147
73	Circuito de potência do painel. (COSTA, 2007.)	p.148
74	Circuito de comando painel. (COSTA, 2007.)	p.148
75	Foto do inversor de potência WEG CFW09. (Foto tirada pelo autor)	p.149
76	Foto do cartão PLC. (WEG, 2007)	p.150
77	Ilustração do programa WLP. (WEG, 2007)	p.151
78	Modo SCURVE. (COSTA, 2007.)	p.153

79	Tela de operação do programa de supervisão.(COSTA, 2007.)	p.153
80	Sistema de aquisição de dados via LABVIEW. (COSTA, 2007.)	p.155
81	Tela do LABVIEW usada na aquisição de dados. (Sistema de aquisição de dados desenvolvido pelo autor com o software Labview 8.0)	p.156
82	Diagrama em bloco do LABVIEW da aquisição de dados. (Sistema de aquisição de dados desenvolvido pelo autor com o software Labview 8.0)	p.156
83	Gráfico dos valores da tensão calculada em função da rotação. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.160
84	Gráfico dos valores experimentais obtidos em vazio. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.169
85	Gráfico da comparação de tensões entre os valores calculados e ensaiados em bancada. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.170
86	Circuito do banco de resistores. (COSTA, 2007.)	p.171
87	Gráfico Tensão x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 1. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.172
88	Gráfico Corrente x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 1. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.173
89	Gráfico Potência x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 1. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.174
90	Gráfico Tensão x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 2. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.175
91	Gráfico Corrente x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 2. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.176
92	Gráfico Potência x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 2. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.177
93	Gráfico Tensão x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 3. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.178

94	Gráfico Corrente x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 3. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.179
95	Gráfico Potência x RPM do ensaio em bancada com carga resistiva 3. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.180
96	Gráfico Tensão x RPM do ensaio em bancada carregando as baterias. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.181
97	Gráfico Corrente x RPM do ensaio em bancada carregando as baterias. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.182
98	Gráfico Potência x RPM do ensaio em bancada carregando as baterias. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.183
99	Gráfico do rendimento em % do ensaio em bancada carregando as baterias. (gráfico elaborado pelo autor utilizando o software Grapher 6.0)	p.184
100	Circuito de potência do painel. (COSTA, 2007.)	p.184

Lista de Tabelas

1	Valores do expoente de Hellmann em função da rugosidade do terreno	p. 48
2	Velocidade do vento e horas de funcionamento	p. 55
3	Máquinas de eixo horizontal	p. 94
4	Valores do fator de potência F	p. 99
5	Fatores de correção da densidade do ar	p. 100
6	Valores estimados da eficiência	p. 100
7	Número de pás em função do TSR	p. 104
8	Classes de turbinas	p. 117
9	Fatores de segurança	p. 117
10	Propriedades magnéticas típicas	p. 132
11	Unidades de medidas magnéticas	p. 132
12	Fatores de conversão	p. 132
13	Dados construtivos da máquina GRW 5000	p. 136
14	Valores calculados das tensões para o gerador GRW 5000	p. 159
15	Resultados obtidos a partir da simulação experimental em bancada . .	p. 161
16	Ensaio em bancada com carga resistiva 1	p. 162
17	Ensaio em bancada com carga resistiva 2	p. 163
18	Ensaio em bancada com carga resistiva 3	p. 163
19	Ensaio em bancada com o sistema realizando a recarga das baterias com o gerador GRW5000.	p. 164
20	Resumo dos resultados obtidos no gerador com carga R1 acoplado às baterias	p. 166

21	Resumo dos resultados obtidos no gerador com carga R2 acoplado às baterias	p.167
----	--	-------

Lista de Símbolos

a	[-]	fator do escoamento axial induzido
\acute{a}	[-]	fator do escoamento tangencial induzido
A	[m^2]	área do disco atuador
c	[m]	corda da pá
C_D	[-]	coeficiente de arrasto
C_L	[-]	coeficiente de sustentação
C_P	[-]	coeficiente de potência
D	[N]	força de arrasto
F	[N]	força de reação aerodinâmica
F_a	[N]	projeção das forças aerodinâmicas perpendicular ao plano de rotação
F_d	[N]	projeção das forças aerodinâmicas paralela ao plano de rotação
F_D	[N]	força de arrasto
F_L	[N]	força de sustentação
F_{ir}	[N]	força inercial na direção radial
F_{ia}	[N]	força inercial na direção axial
L	[N]	força de sustentação
m_p	[kg/m^3]	massa específica da pá
M_t	[$N.m$]	momento de torção da seção da pá
M_f	[$N.m$]	momento de flexão da seção da pá
M_z	[$N.m$]	momento causado pelas forças de precessão
M_∞	[-]	Número de Mach no escoamento não perturbado
N	[-]	número de pás
N_g	[-]	eficiência mecânica
P	[W]	potência
P	[N/m^2]	pressão
p_0	[N/m^2]	pressão atmosférica
p_+	[N/m^2]	pressão a montante do disco atuador
p_-	[N/m^2]	pressão a jusante do disco atuador
p_d	[N/m^2]	pressão dinâmica $1/2\rho U^2$

Q	$[N/m^2]$	torque
Q	$[ms^{-1}]$	intensidade de escoamento do vórtice
r	$[m]$	posição radial
r_θ	$[m]$	coordenadas do ponto no plano X-Y
R	$[m]$	raio do rotor
u	$[ms^{-1}]$	componente cartesiana da velocidade V
U	$[ms^{-1}]$	velocidade do escoamento
U_B	$[ms^{-1}]$	velocidade do vento quando o rotor opera em sua máxima rotação
U_C	$[ms^{-1}]$	velocidade do vento quando do início da rotação do rotor
U_d	$[ms^{-1}]$	velocidade do escoamento no disco
U_F	$[ms^{-1}]$	velocidade do vento máxima para operação da turbina
U_W	$[ms^{-1}]$	velocidade do vento para geração de máxima potência contínua
U_∞	$[ms^{-1}]$	velocidade do escoamento a jusante do disco
U_W	$[ms^{-1}]$	velocidade do escoamento a montante do disco (esteira)
v	$[ms^{-1}]$	componente cartesiana da velocidade V
V	$[ms^{-1}]$	velocidade do escoamento
V_r	$[ms^{-1}]$	velocidade radial provocada pela fonte/sumidouro
V_θ	$[ms^{-1}]$	velocidade tangencial provocada pela fonte/sumidouro
V_∞	$[ms^{-1}]$	velocidade do escoamento não perturbado
W	$[ms^{-1}]$	velocidade resultante
X	$[m]$	posição na direção da corda
Y	$[m]$	posição na direção da envergadura
Z	$[m]$	posição normal à superfície da pá
α	$[rad]$	ângulo de ataque
α_0	$[rad]$	ângulo de ataque de sustentação nula
β	$[rad]$	ângulo de passo local da pá
Γ	$[m^2/s]$	circulação
μ	$[-]$	razão entre o raio local e o raio da pá = r/R
γ	$[-]$	componente tangencial da velocidade na superfície de um perfil
γ	$[-]$	ângulo entre a sustentação e a força resultante
ρ	$[kg/m^3]$	densidade do ar 1.25 kg/m ³
ϕ	$[rad]$	ângulo entre a direção da velocidade resultante W e o plano de rotação do rotor
σ	$[-]$	solidez da pá
σ	$[-]$	solidez de corda

λ	[-]	razão de velocidades na ponta da pá R/U
λ_R	[-]	razão de velocidades local da pá r/U
ψ	[-]	função corrente
Ω	[<i>rad/s</i>]]	freqüência angular do rotor

Lista de abreviaturas e siglas

AC	-	Corrente Alternada
CBEE	-	Centro Brasileiro de Energia Eólica
DC	-	Corrente Contínua
ENERSUD	-	Indústria e Soluções Energéticas Ltda
FINEP	-	Financiadora de projetos
RPM	-	Rotação por minuto