

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA**

**EVERTON LUIS DA COSTA
FÁBIO GONÇALVES DE LIMA
MURILO JOSÉ TIBURCIO FERRACINI**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE TENSÃO PARA
UM MICRO AEROGERADOR PARA UTILIZAÇÃO EM REGIÃO
URBANA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2014**

**EVERTON LUIS DA COSTA
FÁBIO GONÇALVES DE LIMA
MURILO JOSÉ TIBURCIO FERRACINI**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE TENSÃO PARA
UM MICRO AEROGERADOR PARA UTILIZAÇÃO EM REGIÃO
URBANA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Walter Denis Cruz Sanchez.

**CURITIBA
2014**

Everton Luis da Costa
Fábio Gonçalves de Lima
Murilo José Tiburcio Ferracini

Desenvolvimento de um controlador de tensão para um micro aerogerador para utilização em região urbana

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 14 de agosto de 2014.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Walter Denis Cruz Sanchez, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Ismael Chiamenti, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Gules Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Walter Denis Cruz Sanchez, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A cada dia que vivo, mais me convenço de que o desperdício da vida está no amor que não damos, nas forças que não usamos e na prudência que nada arrisca, pois em cada novo desafio, está também a felicidade.

Nosso dia chegou! Valeu a pena cada dia, cada minuto rumo a nossa sonhada formatura. Estou pronto para essa nova fase em minha vida, com a certeza de levar na mente o conhecimento e, no coração, todos os momentos preciosos vivenciados com amigos e familiares nesses anos de universidade.

"E mesmo que meus passos sejam dados em falso, mesmo que os meus caminhos sejam errados, mesmo que meu jeito de levar a vida incomode, eu sei quem sou e pelo que devo lutar. Se você acha que meu orgulho é grande, é porque nunca viu o tamanho da minha fé!"

Everton Luis da Costa

Aos meus pais Luiz e Elenir, minha inspiração, sinônimo de amor, força, dedicação, sabedoria e vivacidade, responsáveis por me manter de pé, persistente e forte no caminho desta jornada tão árdua que por muitas vezes pareceu intransponível. Eles, que apesar da distância, se esforçaram para estarem presentes em todos os momentos mantendo-me motivado para superar qualquer dificuldade.

Ao meu irmão Luís Henrique, parceiro nos bons e maus momentos, sempre junto como um anjo da guarda, cuidando de mim sempre quando precisei da sua ajuda.

Aos meus amigos e familiares, que de alguma maneira, estiveram comigo durante o curso. A todos os professores, que ao longo de minha vida, contribuíram para o meu aprendizado.

Murilo José Tiburcio Ferracini

Aos meus pais Fernando e Jô, pela minha formação excelente, à Ana Julia, por me dar a motivação necessária e aos meus amigos e irmãos, pelo apoio incondicional.

Fábio Gonçalves de lima

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e saúde para realizarmos este trabalho.

Ao nosso orientador prof. Dr. Walter Denis Cruz Sanchez pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e também por sua amizade.

Aos membros da banca examinadora, prof. Dr. Ismael Chiamenti, prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha e prof. Dr. Roger Gules, pelo empenho na leitura e correção do trabalho.

Ao setor de manutenção e oficina da UTFPR, pelo apoio e material fornecido para a montagem da bancada de testes.

Aos estagiários e funcionário do SEMAP, pela atenção e fornecimento dos equipamentos para a realização dos testes.

Ao prof. Dr. Eloy Fassi Casagrande Jr., pela concessão do micro aerogerador.

A COPEL, pela provisão dos equipamentos de medição da velocidade do vento.

A WEG, pelo fornecimento de grande parte da bancada de testes.

A todos os professores do curso, que nos proporcionaram conhecimento para a realização deste trabalho.

The answer, my friend, is blowin' in the wind... (BOB DYLAN,1963)

A resposta, meu amigo, está soprando no vento... (BOB DYLAN,1963)

RESUMO

COSTA, Everton L. da; LIMA, Fábio G. de; FERRACINI, Murilo T. Desenvolvimento de um controlador de tensão para um micro aerogerador para utilização em região urbana. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

A energia eólica é um recurso abundante e está presente em todas as regiões da Terra, contudo a sua utilização plena está restrita à tecnologia disponível. Neste trabalho é desenvolvido um conversor CC-CC microcontrolado com intuito de explorar o potencial de geração eólica em pequenas escalas, especificamente para um micro aerogerador em região urbana, baseando-se nos dados da velocidade do vento coletados na região central de Curitiba através de um anemômetro.

Palavras-chave: micro aerogerador, conversor microcontrolado, dados de anemômetro.

ABSTRACT

COSTA, Everton L. da; LIMA, Fábio G. de; FERRACINI, Murilo T. Development of a voltage controller for a micro wind turbine for use in urban areas 20142014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

Wind energy is an abundant resource and is present in all regions of the Earth, yet its full use is restricted to the present available technology. In this academic paper is develop a microcontroller-based DC-DC converter with the intention of exploiting the potential of wind power on small scales, specifically for a micro wind turbine in an urban area, based on collected wind speed data in central Curitiba through an anemometer.

Keywords: micro wind turbine, microcontrolled converter, anemometer data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da capacidade de geração eólica no Brasil.....	16
Figura 2: Área de interferência devido um obstáculo.....	22
Figura 3: Turbina eólica de eixo vertical de 34m.....	23
Figura 4: Capacidade eólica brasileira.	26
Figura 5: Velocidades Médias Anuais.....	29
Figura 6: Vórtices envolvendo um edifício.....	30
Figura 7: Anemômetro de concha de Robinson.	31
Figura 8: Sensor de direção do vento, modelo 200P da NRG Systems.	32
Figura 9: <i>Data logger</i> instalado na UTFPR.	33
Figura 10: Disposição do <i>Data logger</i> dos sensores de medições instalados na UTFPR.	34
Figura 11: a) Máquina com ímãs superficiais. b) Máquina com ímãs internos.....	36
Figura 12: Micro aerogerador Phoenix Wind Turbine.	37
Figura 13: Dimensões, em mm, do micro aerogerador.	38
Figura 14: Disposição do micro aerogerador com o retificador trifásico de onda completa não controlado.	39
Figura 15: Estrutura de potência do conversor Boost.	40
Figura 16: a) Primeira etapa de funcionamento do conversor Boost. b) Segunda etapa.	41
Figura 17: Amostra dos dados do vento do dia 12/11/12 retirados do <i>Symphonie data retriever</i>	46
Figura 18: Amostra dos dados do vento do dia 12/11/12 retirados do <i>Symphonie data retriever</i>	47
Figura 19: Distribuição de frequências da velocidade do vento do dia 12/11/12 retirados do <i>Symphonie data retriever</i>	48
Figura 20: Velocidade do vento em jun 2013. Velocidade média 1,6 m/s.....	48
Figura 21: Velocidade do vento em out 2013. Velocidade média 2,7 m/s.....	49
Figura 22: Amostra dos dados do vento do dia 12/11/12 até o dia 11/12/13 retirados do <i>Symphonie data retriever</i>	50
Figura 23: Amostra da distribuição das frequências da velocidade do vento do dia 12/11/12 até o dia 11/12/13 retirados do <i>Symphonie data retriever</i>	50
Figura 24: Toróide de ferrite, modelo NT-23/14/8 da Thornton.	63
Figura 25: Esquema de funcionamento do circuito.	68
Figura 26: Esquema do divisor de tensão.	69
Figura 27: Disposição dos pinos do PIC16F877A.	69
Figura 28: Fluxograma da programação do microcontrolador.....	71
Figura 29: Esquema da simulação em ambiente virtual.....	72
Figura 30: Simulação do circuito de controle.....	73
Figura 31: Esquema do circuito de controle projetado no Proteus.....	74
Figura 32: Placa de controle corroída.....	75
Figura 33: Circuito de controle e circuito conversor Boost (10W).....	75
Figura 34: Disposição da bancada de testes.	76
Figura 35: Gerador de vento. Fonte: Própria.....	77
Figura 36: Túnel e gerador de vento.....	78
Figura 37: Túnel de vento, anemômetro e micro turbina.	78
Figura 38: Partida do gerador em 3,03 m/s.	79
Figura 39: Gerador atinge sua tensão nominal em 11,83 m/s.	80
Figura 40: Tensão máxima gerada sem túnel de vento.	82
Figura 41: Tensão máxima gerada com o túnel de vento.....	82
Figura 42: Esquema para teste do circuito controlador.	83

Figura 43: imagem adquirida com auxílio do osciloscópio digital.	84
Figura 44: Esquema do teste do Boost de 70 W microcontrolado.	87
Figura 45: Topologia com 2 Boosts em paralelo.....	88
Figura 46: Medição das corrente de entrada.....	89
Figura 47: Esquema do teste do conversor de 70 W com dois Boosts em paralelo.	90
Figura 48: Esquema para o primeiro teste do gerador com o Boost de 10W.....	92
Figura 49: Conversor Boost (10W) em funcionamento com o gerador.	93
Figura 50: Esquema para o teste final com o circuito novo compacto.....	94
Figura 51: Conversor de 70 W microcontrolado em funcionamento acoplado ao gerador.....	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Percentual de energia renovável.....	25
Gráfico 2: Gráfico da potência gerada em função da velocidade do vento.....	40
Gráfico 3: Característica ideal de transferência estática do conversor CC-CC elevador.	41
Gráfico 4: Principais formas de onda.	43
Gráfico 5: Gráfico retirado do Excel contendo a distribuição de frequências.	52
Gráfico 6: Gráfico retirado do Excel contendo o a sobreposição das Distribuição de Weibull e da Distribuição das Frequências com $k=2$	53
Gráfico 7: Gráfico retirado do Excel contendo o a sobreposição das Distribuição de Weibull e da Distribuição das Frequências como valor recalculado de $k=2,71$	55
Gráfico 8: Gráfico retirado do Excel contendo a sobreposição das Distribuição de Weibull e da Distribuição das Frequências da densidade de energia.....	57
Gráfico 9: Potência x Velocidade do vento para $C_p = 0,2178$	60
Gráfico 10: Indutância mínima em função da tensão de entrada para conversor de 10W.	62
Gráfico 11: Indutância mínima em função da tensão de entrada para conversor de 70W.	66
Gráfico 12: Relação entre tensão gerada e velocidade do vento-à vazio.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ranking Mundial de Capacidade Total Eólica instalada.....	25
Tabela 2: Classificação de pequenas turbinas eólicas.	27
Tabela 3: Especificações do gerador.	38
Tabela 4: Tabela retirada do Excel contendo o histograma dos dados e a distribuição de frequências.....	51
Tabela 5: Tabela retirada do Excel contendo a média das densidades com $k=2$	53
Tabela 6: Tabela retirada do Excel contendo a média das densidades como valor recalculado de $k=2,71$	54
Tabela 7: Tabela retirada do Excel contendo os valores da Distribuição de Weibull e da Distribuição das Frequências da densidade de energia.	56
Tabela 8: Potência x Velocidade do vento para $C_p = 0,2178$	59
Tabela 9: Parâmetros do projeto do conversor Boost de 10W.	61
Tabela 10: Parâmetros do projeto do conversor Boost de 70 W.	65
Tabela 11: Relação entre tensão gerada e velocidade do vento sem carga.	80
Tabela 12: Resultados do teste de controle.	85
Tabela 13: Resultados do teste de controle.	85
Tabela 14: Resultados para o teste do Boost microcontrolado.....	88
Tabela 15: Resultados do teste com 2 Boosts em paralelo.....	90
Tabela 16: Resultados com o novo algoritmo.	91
Tabela 17: Resultados do protótipo final.....	95

LISTA DE SIMBOLOS

C	Fator de escala
k	Fator de forma
P	Potência
v	Velocidade
γ	Massa especifica
C_p	Coefficiente de rotor
R	Raio
n_s	Velocidade síncrona
f	Frequência
p	Número de Polos
E	Fonte de Tensão CC
L	Indutor
D	Diodo
S	Chave
C	Capacitor
t_c	Tempo de condução
T	Período
D_c	Razão cíclica
V_o	Tensão de saída
ΔI	Ondulação da corrente
ΔV	Ondulação da tensão
N	Número de voltas no indutor
A_l	Indutância por unidade de espira
\emptyset	Diâmetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 TEMA.....	17
1.1.1 Delimitação do Tema.....	17
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 Objetivos Gerais.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.4 JUSTIFICATIVA.....	19
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
1.6 ESTRUTURAS DO TRABALHO.....	20
2 ENERGIA EÓLICA.....	21
2.1 RECURSO ENERGÉTICO: VENTO.....	22
2.2 PANORAMA NACIONAL.....	24
2.3 MICROGERAÇÃO EÓLICA.....	27
2.3.1 Vantagens e Desvantagens da Microgeração Eólica.....	28
2.3.2 Viabilidade da Instalação de um Sistema de Geração Micro Eólico.....	28
2.3.3 Potencial Eólico em Ambiente Urbano.....	29
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
3.1 SENSORES E DISPOSITIVO PARA AQUISIÇÃO DA VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO.....	30
3.1.1 Conceito de Anemômetro.....	30
3.1.1.1 Anemômetro de conchas de Robinson.....	31
3.1.2 Sensor de direção do vento.....	31
3.1.3 <i>Data logger</i>	32
3.2 MÉTODO ESTATÍSTICO PARA OBTER A VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO.....	34
3.2.1 Distribuição de Weibull.....	34
3.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA.....	35
3.4 BREVE NOÇÃO SOBRE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE IMÃ PERMANENTE.....	36
3.5 MICRO AEROGERADOR.....	37
3.6 COMPONENTES DO CONVERSOR MICROCONTROLADO.....	40
3.6.1 Conversor Boost.....	40
3.6.2 PIC 16F877A.....	44
4 MEDIÇÃO DA POTÊNCIA DO VENTO.....	44
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS.....	44
4.1.1 Local escolhido.....	45
4.1.2 Anemômetro.....	46
4.1.3 <i>Data logger</i>	46
4.1.3.1 Software utilizado.....	46
4.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS.....	51
4.2.1 Distribuição de Weibull.....	51
4.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA.....	55
4.3.1 Disponível no vento.....	55
5 CONVERSOR CC-CC BOOST MICROCONTROLADO.....	57
5.1 PROJETO DO BOOST.....	58
5.1.1 Definição da tensão de entrada e saída do Boost.....	58
5.1.2 Definição da potência do conversor.....	58
5.1.3 Projeto do conversor CC-CC Boost de saída fixa ($P = 10W$).....	60

5.1.3.1 Cálculo do indutor	61
5.1.3.2 Cálculo do capacitor	63
5.1.3.3 Transistor	64
5.1.3.4 Diodo	64
5.1.4 Projeto do conversor CC-CC Boost de saída fixa ($P = 70 \text{ W}$)	64
5.1.4.1 Cálculo do indutor	65
5.1.4.2 Cálculo do capacitor	67
5.1.4.3 Transistor	67
5.1.4.4 Diodo	67
5.2 MICROCONTROLADOR	68
5.2.1 Sensor de tensão	68
5.2.1.1 Divisor de tensão	68
5.2.1.2 Conversão analógico-digital	69
5.2.2 Algoritmo	70
5.2.3 Simulação	72
5.3 CONFEÇÃO DO CIRCUITO	73
5.4 BANCADA DE TESTES	76
5.4.1 Descrição da bancada de teste	76
5.4.2 Testes da Bancada	79
6 RESULTADOS	83
6.1 CIRCUITO DE CONTROLE	83
6.2 CONVERSOR CC-CC BOOST MICROCONTROLADO	86
6.2.1 Teste do conversor microcontrolado	86
6.2.2 Teste do conversor microcontrolado com compensação de erro	91
6.3 SIMULAÇÃO EM BANCADA	92
6.3.1 Circuito controlado pela tensão de entrada	92
6.3.2 Circuito controlado pela tensão de entrada e de saída	94
7 CONCLUSÃO	96
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
APÊNDICE A	98
APÊNDICE B	99
ANEXO A	101
ANEXO B	102
ANEXO C	103
ANEXO D	104
ANEXO E	105
ANEXO F	106
REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é utilizada há milhares de anos para finalidades como bombeamento de água e moagem de grãos, através da conversão da energia cinética das massas de ar em energia mecânica. A exploração dos oceanos, e consequentemente do planeta através da navegação só foi possível devido à habilidade do homem de aproveitar a energia cinética eólica, dominando-a e convertendo-a em movimento direcionável através de sistemas de velas em seus navios. Apenas no século XIX surgiram as primeiras tentativas de gerar energia elétrica a partir da energia eólica.

No Brasil, a partir de 1970 surgiram os primeiros empreendimentos eólicos elétricos, que possibilitaram o desenvolvimento atual (ANEEL, 2005). A necessidade de criar uma segurança no fornecimento de energia elétrica tem gerado crescente interesse nas fontes alternativas, especialmente a eólica. No Brasil, segundo a ANEEL (2013), em 2003 a capacidade de geração eólica era de 22 MW, 0,03% da matriz energética do país. Em 2013 a capacidade de geração eólica já alcançou 2.109 MW, 1,59% do total da capacidade instalada.

O Brasil foi de 9 para 96 empreendimentos em operação no período. Com 93 empreendimentos em construção e mais 197 outorgados essa capacidade alcançará aproximadamente 10.000 MW nos próximos anos. A figura 1 apresenta a evolução da energia eólica como fonte de geração de energia elétrica no Brasil no período de 2001 a 2010.

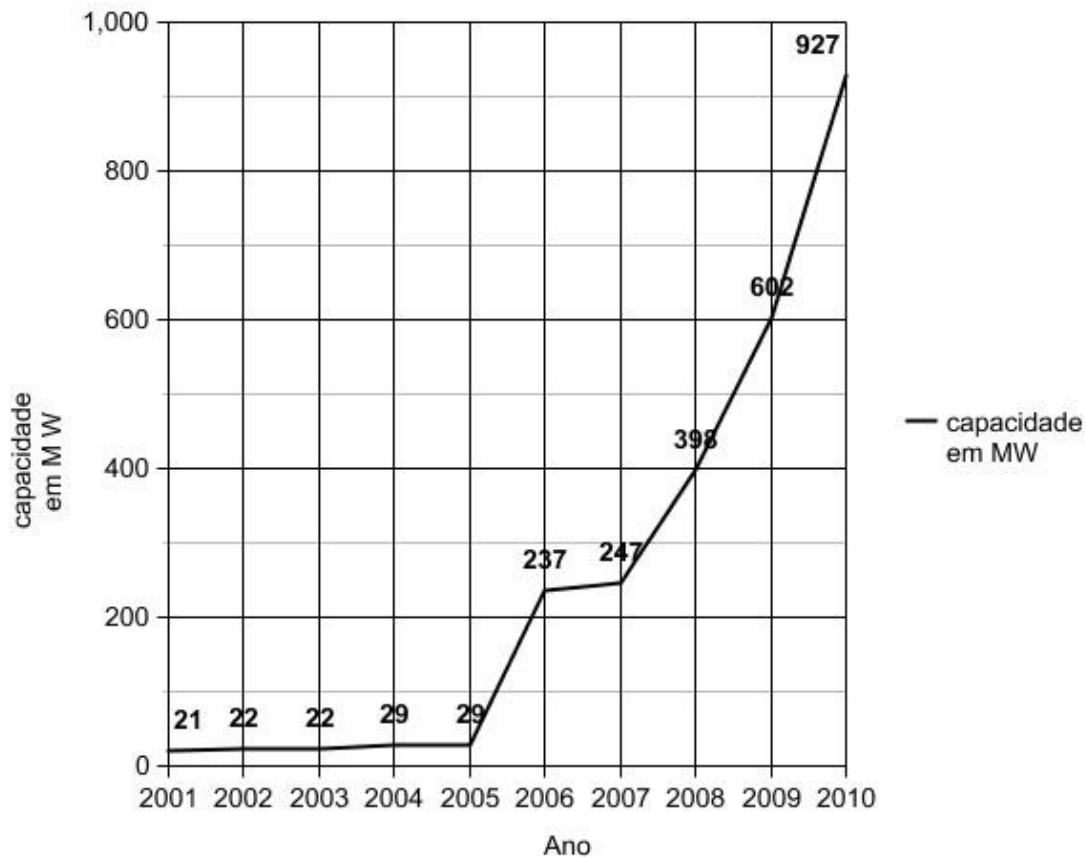


Figura 1: Evolução da capacidade de geração eólica no Brasil.

Fonte: ANEEL (2013)

Em Portugal, uma iniciativa que minimiza o impacto ambiental das turbinas eólicas e aproveita um recurso gratuito é a utilização de micro geradores eólicos na região urbana das cidades. “... ao contrário do que se pensa, a energia eólica urbana tem elevado potencial de exploração num cenário de consumo energético sustentável.” (ESTANQUEIRO, 2010, p. 44).

Uma das alternativas para o aproveitamento da energia cinética contida nas massas de ar em uma região urbana, é utilizar um micro aerogerador.

Nenhuma outra tecnologia gerou uma mudança tão grande na engenharia energética ou tem maior potencial para aprimoramento no futuro do que a eletrônica de potência (PATEL, M. R., 2006, p. 221). Com conversores baseados em eletrônica de potência é possível implementar um sistema destinado a garantir a qualidade da tensão gerada por um micro aerogerador. O aerogerador alimentado pela força cinética do vento, necessita de um conversor que eleve e estabilize a tensão gerada. O desenvolvimento de um conversor CC-CC com tensão de entrada variável e tensão de saída fixa, garantindo a qualidade da tensão gerada fornecida poderá viabilizar sua aplicação em regiões urbanas e rurais.

1.1 TEMA

1.1.1 Delimitação do Tema

Esta proposta tem como foco o desenvolvimento e construção de um conversor CC-CC, com a finalidade de converter uma tensão de entrada variável em uma tensão de saída fixa.

Os dados obtidos através de uma micro estação meteorológica instalada no campus da UTFPR localizado em Curitiba serão usados para levantar as características da velocidade do vento do local. Embora o potencial eólico da região seja baixo devido à má localização, os dados medidos devem ser utilizados apenas para demonstrar o método utilizado neste trabalho para se avaliar as características do vento em uma região urbana com a intenção da instalação de um micro aerogerador.

Será utilizado um micro aerogerador do modelo Phoenix com potência máxima de 550 W. A tensão gerada será variável em função da variação da velocidade do vento. O conversor vai ser responsável por elevar e estabilizar essa tensão a níveis capazes de atender a aplicação. O conversor será micro controlado e incorporará sensores capazes de detectar as variações de tensão.

No laboratório serão realizados testes em uma bancada implementada capaz de simular o comportamento do sistema.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Um gerador eólico através das pás de sua turbina “... capta parte da energia cinética do vento que passa através da área das turbinas e a transforma em energia mecânica de rotação. O eixo do rotor acionando o gerador elétrico transforma uma parte dessa energia mecânica de rotação em energia elétrica” (WEG, 2006, p 3). Um micro aerogerador é uma máquina elétrica de dimensão reduzida capaz de converter a energia cinética contida no deslocamento do ar, o “vento”, em energia elétrica. Para tanto as características da energia eólica específicas da região devem ser estudadas, diminuindo se as incertezas relacionadas à sua instalação. “A aceleração, ou variação na quantidade de movimento, experimentada pelas parcelas de ar atmosférico, é decorrente da resultante vetorial de todas as forças atuantes sobre elas (segunda lei de Newton)” (MARTINS et al., 2007, p. 3).

Sendo uma força dinâmica o vento é o resultado da somatória de várias forças que atuam sobre as massas de ar atmosférico, forças que são os gradientes da pressão atmosférica,

a gravidade e as forças viscosas resistivas (o ar é um fluido). Segundo Álvares (2006, p. 24), o vento é consequência da radiação solar que esquentando o ar criando movimento de massas e também é moldado pelas formas irregulares da terra e oceanos. Devido à natureza instável dos mecanismos globais que geram as massas de ar, a força do vento não é constante. Um gerador eólico, portanto, não é capaz de fornecer por si próprio uma tensão de saída constante. Esta é a principal desvantagem deste tipo de energia.

Nos sistemas eólicos elétricos, são empregados basicamente dois tipos diferentes de geradores, são eles: o gerador síncrono e o gerador assíncrono. No presente trabalho será utilizado um gerador síncrono de ímã permanente comercial, de modelo Phoenix Wind Turbine da GreenenergyStar.

A geração eólica enfrenta alguns problemas causados pelas peculiaridades da dinâmica das massas de ar. Devido à variação da velocidade do vento, a energia transmitida ao gerador é variável, assim como a tensão gerada em seus terminais. O presente projeto prevê um conversor CC-CC capaz de otimizar a micro geração eólica eliminando, ou reduzindo, as características da geração previamente citadas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um conversor de tensão CC-CC microcontrolado. Este conversor deve elevar a tensão e manter a tensão constante para garantir a qualidade da tensão gerada.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Instalar uma haste de 8 metros de altura com sensores, no topo do prédio do campus da UTFPR, localizado no centro de Curitiba, no intuito de levantar as características do vento em ambiente urbano para objeto de estudo do método de coleta e o tratamento de dados;
- Coletar e analisar dados da velocidade do vento em ambiente urbano com a utilização de um anemômetro em conjunto com um *data logger*;
- Realizar estudos laboratoriais e interpretação dos dados registrados pelo anemômetro associado ao micro aerogerador;
- Fazer o levantamento da curva de potência do gerador de acordo com a velocidade do vento obtida em campo;

- Projetar um conversor capaz de regular a tensão e elevar a tensão de saída para viabilizar sua utilização;
- Projetar um sistema com sensores capazes de medir a tensão fornecida pelo conjunto;
- Implementar um microcontrolador capaz de receber dados dos sensores e regular autonomamente a tensão ao nível desejado;
- Efetuar a montagem do circuito integrado ao gerador;
- Avaliar o desempenho do sistema em testes de bancada;

1.4 JUSTIFICATIVA

A preocupação internacional com o esgotamento dos combustíveis fósseis e o aquecimento global vêm se intensificando cada vez mais. O estudo de novas aplicações e aprimoramento das aplicações atuais da geração com fontes de energia é de extrema importância para o presente e principalmente para o futuro. Dentre as fontes renováveis de energia temos a energia eólica que “... é uma fonte de energia limpa, renovável e inesgotável. Além disso, o seu impacto ambiental é relativamente baixo quando comparado ao das fontes de energia convencionais.” (COPEL, 2007, p. 23).

Geradores eólicos de grande porte geram poluição sonora e visual, mas geram potências maiores. Sua utilização no ambiente urbano não seria satisfatória, gerando desconforto para a população local. Micro aerogeradores, por outro lado, não geram uma poluição tão intensa, porém sua tensão de saída é baixa.

No Brasil, o conhecimento e a utilização dos micro aerogeradores em áreas urbanas ainda é muito limitada devido ao maior foco na geração hidráulica ou mesmo na geração eólica em sítios remotos. O presente trabalho propõe fornecer uma alternativa de geração em centros urbanos que fomente a utilização desta fonte renovável.

A geração com micro aerogeradores apresenta entraves técnicos, que são a estabilização da tensão gerada e a baixa tensão gerada. O desenvolvimento do conversor CC-CC proposto irá contribuir para o estudo da utilização da região urbana como uma alternativa para a instalação de fontes geradoras. Outra vantagem da micro geração no ambiente urbano é a proximidade da fonte de energia com o consumidor final.

Um conjunto de micro aerogeradores pode ser utilizado para alimentar sistemas específicos de edificações. Sua instalação também pode ser uma alternativa mais prática para locais remotos onde a instalação de grandes aerogeradores é difícil. Além disso, como a tensão gerada por um aerogerador varia de acordo com a velocidade do vento, uma questão a

ser levada em consideração é sobre a qualidade desta tensão gerada. Principalmente em ambientes urbanos onde os edifícios dificultam ainda mais a circulação e estabilidade do vento.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo proposto será composto de pesquisa bibliográfica, projeto e construção de protótipo e testes em laboratório. O trabalho tem como foco um caso particular de aplicação do conhecimento, caracterizando o trabalho como de natureza científica aplicada.

Os objetivos da pesquisa bibliográfica, além de gerar familiaridade com o tema do trabalho, é definir a forma de melhor aproveitamento do protótipo a ser construído, utilizando experiências bem sucedidas e estudos realizados em ambientes similares aos do foco do trabalho. A análise da velocidade do vento, coletada a partir de um anemômetro registrador que se encontra instalado no edifício do campus da UTFPR localizado no centro da cidade de Curitiba, será realizada com auxílio do software que, em conjunto com os dados coletados em pesquisa, será o ponto de partida para definir as características construtivas do sistema.

No laboratório, serão realizados ensaios, com auxílio de um túnel de vento, para definir as características nominais do gerador a ser utilizado e definir a curva de potência real do gerador em função da velocidade do vento. Após definidas as características do vento que serão simuladas e características nominais do gerador, será escolhido o tipo de conversor a ser utilizado e serão dimensionados os componentes eletrônicos que irão compor o conversor. O dispositivo será desenvolvido baseado na teoria de eletrônica de potência e em simulações através do software Proteus. O controlador será constituído de três partes: um conversor Boost, um sensor de tensão na entrada do sistema e um microcontrolador interligado ao conversor e ao sensor.

A última etapa, após a montagem do circuito e seu acoplamento junto ao micro aerogerador, será testar o protótipo em laboratório, com a ajuda de um inversor de frequência e um motor acoplado à um rotor aletado, capaz de simular diferentes faixas de vento possíveis.

1.6 ESTRUTURAS DO TRABALHO

O trabalho será dividido em 7 capítulos, sendo o primeiro a introdução, contendo a apresentação do tema, a delimitação do tema, a motivação e os procedimentos metodológicos a serem adotados para desenvolver o trabalho.

O segundo capítulo será a apresentação do quadro de geração de energia elétrica presente e seu histórico, no Brasil e no mundo, com ênfase na geração eólica e a apresentação da energia eólica como fonte alternativa, limpa e renovável.

O terceiro capítulo consistirá da base teórica para o desenvolvimento do projeto, incluindo conceitos sobre geradores eólicos, seu funcionamento e construção e conceitos sobre conversores e qualidade de energia gerada.

No quarto capítulo serão analisados os dados referentes à velocidade do vento obtidos através do anemômetro registrador instalado no campus da UTFPR em Curitiba a fim de dimensionar o conversor.

O quinto capítulo apresentará o desenvolvimento do circuito do controlador. Será dividido entre: projeto do conversor CC-CC, especificação do sensor a ser utilizado e programação de um microcontrolador capaz de satisfazer as especificações a serem definidas.

O sexto capítulo será composto pelos resultados dos testes do protótipo completo e a análise de sua eficácia.

O sétimo capítulo será dedicado as considerações finais.

2 ENERGIA EÓLICA

A energia cinética produzida pelo vento e transformada em energia mecânica é denominada energia eólica. Esta energia tem características diferentes de acordo com a rugosidade, obstáculos, geografia local, altura, velocidade e direção do vento (DUARTE, 2004, p.9).

O crescimento da demanda energética mundial em razão da melhoria dos padrões de vida nos países em desenvolvimento, e até mesmo o crescimento industrial dos países emergentes trazem consigo a preocupação com alguns aspectos essenciais para a política e planejamento energético de todas as economias mundiais (PEREIRA, 2010, p.III). Fatores ambientais também podem reduzir a segurança energética como, por exemplo, a ocorrência de longos períodos de estiagem (MARTINS et al., 2007, p.1).

As fontes renováveis são a principal alternativa para atender as demandas futuras, levando em consideração qualidade, segurança e redução de danos ambientais decorrentes da geração de energia. Neste contexto a energia produzida pelos ventos pode ser considerada a fonte ideal para geração (PEREIRA, 2010, p.III).

2.1 RECURSO ENERGÉTICO: VENTO

A energia eólica deve ser produzida por meio de ventos de origem regional, mas as medições devem ser feitas no respectivo local onde será instalada a turbina para que possa ser otimizada a geração de energia (SOBREIRA, 2006, p. 24).

Segundo instruções da ANEEL em seu Atlas de Energia Elétrica do Brasil, lançado em 2005, as medições para instalação de uma turbina eólica devem ser sistemáticas com relação os dados de velocidade e regime de ventos. Mas dados de aeroportos e estações meteorológicas podem ser levados em consideração.

Tendo em vista que as características do vento podem variar em pequenas distâncias, é necessário considerar os seguintes fatores:

- *Velocidade do vento;
- *Direção do vento;
- *Obstáculos;
- *Rugosidade e orografia local.

Os obstáculos são considerados algum tipo de construção ou vegetação que possa interferir na intensidade ou direção do vento (PIAZEZZOLA, 2006, p.48). O obstáculo cria uma região de interferência, inviabilizando a instalação de um aerogerador, como mostra a figura 2.



Figura 2: Área de interferência devido um obstáculo.

Fonte:(ELETROBRÁS - ATLAS EÓLICO DO ESTADO DO ALAGOAS, 2008, p. 17).

Para reforçar a importância da análise do comportamento do vento, torna-se necessário lembrar que uma incerteza de 10% na velocidade do vento, causará uma incerteza de 30% na potência gerada. (SOBREIRA, 2006, p.27)

2.1 Histórico, Evolução e Características das Turbinas Eólicas

O primeiro gerador eólico é muito similar ao que existe atualmente. Ele foi criado em 1888 por Charles F. Brush, dispoendo de 144 pás, 17 metros de diâmetro e uma torre de 18 metros de altura, com uma potência equivalente a 12kW (RÚNCOS, 2000, p.2).

Outro grande avanço ocorreu na Rússia, em 1931, com o gerador Balaclava. Este gerador foi bastante representativo na história da energia eólica, pois foi o primeiro gerador conectado à linha de transmissão. Ele fornecia 100kW ligado a uma linha de transmissão de 30 km a 6,3 kV (DUTRA, 2001, p.13).

Durante a Segunda Guerra Mundial, foram ampliados os estudos dos geradores eólicos no intuito de diminuir o consumo de petróleo. Com o fim da guerra, a geração eólica foi deixada novamente de lado, sendo quase que totalmente substituída pelos combustíveis fósseis (DUTRA, 2001, p.11).

Influenciados pela tentativa de aprimoramento tecnológico e aumento da produtividade, a NASA começou a pesquisar sobre geradores com eixo vertical (figura 3) (DUTRA, 2001, p.19). O modelo mais competitivo de gerador com eixo vertical era conhecida como Darrieus, e gerava 100kW.



Figura 3: Turbina eólica de eixo vertical de 34m.

Fonte: (DUTRA, 2001, p.20).

As turbinas eólicas são classificadas de acordo com seu eixo: horizontal ou vertical.

Turbinas verticais: as turbinas de eixo vertical podem ser de rotor Darrieus ou Savonius. Esse tipo de turbina apresenta a vantagem de não necessitar de mecanismo de direcionamento, o que simplifica a transmissão da energia do vento. Por outro lado, o movimento de rotação muda constantemente o ângulo de ataque, o que ocasiona uma alteração nas forças resultantes, causando limite de rendimento e vibrações (SILVA, 2013, p.29).

Turbinas horizontais: as turbinas de eixo horizontal, utilizadas em grande escala nos dias de hoje, apresentam a melhor relação custo-benefício. Podem ser de múltiplas, de duas ou de três pás, sendo que o modelo três pás é o mais utilizado em áreas com ventos com velocidades altas, visto que este tem maior eficiência em relação ao de múltiplas pás. A turbina horizontal de múltiplas pás é aconselhada para ambientes com vento de baixa velocidade, mas não é muito comercializada. As turbinas horizontais são praticamente unanimidade no mercado devido a sua boa relação de potência/área abrangida e por sua tecnologia ter se desenvolvido mais nos últimos anos (SILVA, 2013, p.28).

2.2 PANORAMA NACIONAL

A energia eólica começou a se desenvolver no Brasil por meio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) que se comprometeu a diversificar a matriz energética brasileira por meio de incentivos. O programa abrange as pequenas centrais hidrelétricas, parques eólicos e biomassa, que ficou dividido em duas etapas: na primeira etapa foram alocados um total de 3.000 MW, dos quais 1.423 MW foram direcionados à geração eólica. Nessa etapa, ficou estabelecida a compra garantida pela ELETROBRÁS da produção das energias citadas por 20 anos (GWEC, 2011, p.6).

Na segunda etapa, fixou-se o objetivo de alcançar 10% do consumo anual do país em 20 anos, começando somente quando atingir os 3.300 MW da primeira etapa (GWEC, 2011, p. 42).

O Brasil, no ano de 2011, contou com 44,1% da sua matriz energética composta por energias renováveis, apresentando uma pequena queda em relação a 2010, devido à menor oferta de etanol. No mundo, esse percentual corresponde a 13,3 %, de acordo com o gráfico 1, onde OCDE significa Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (EPE, 2012, p.15).

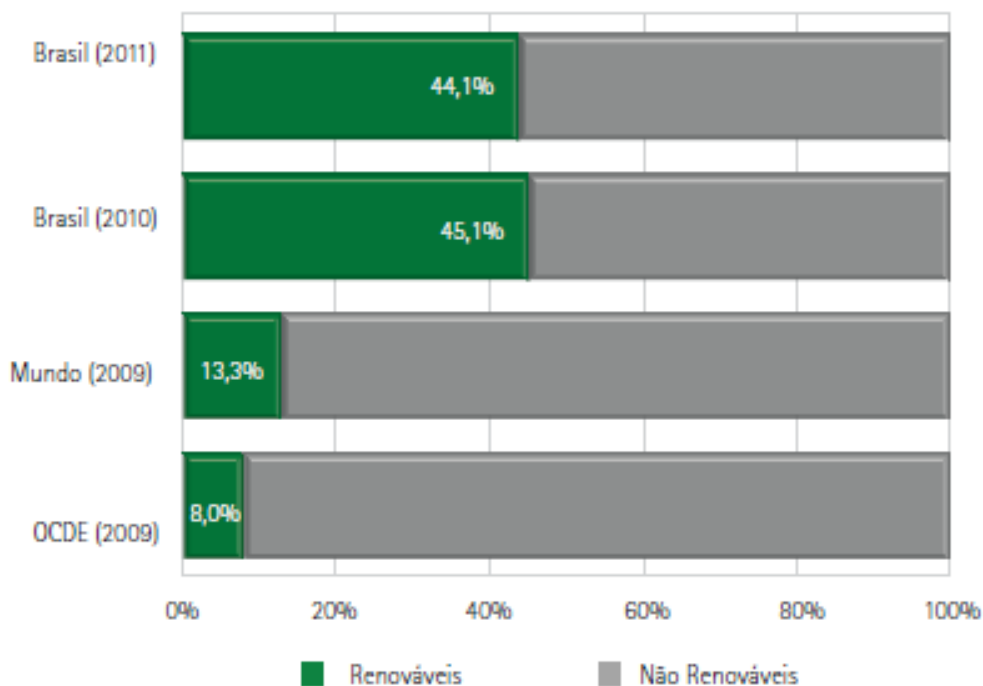


Gráfico 1: Percentual de energia renovável.

Fonte: (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - EPE, 2012, p.15).

No ranking mundial de capacidade total instalada, o Brasil apresenta uma capacidade de 2.507 MW, ocupando a 15ª posição no ano de 2012, sua taxa de crescimento foi de 75,4 %, comparando os dados dos anos de 2011. Conforme a tabela 1 (THE WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2012, p.18).

Tabela 1: Ranking Mundial de Capacidade Total Eólica instalada.

Posição em 2012	País / Região	Capacidade Total Instalada 2012 [MW]	Capacidade Adicionada 2012 [MW]	[%]	Posição em 2011	Capacidade Total Instalada 2011 [MW]	Capacidade Total Instalada 2010 [MW]	Capacidade Total Instalada 2009 [MW]	Capacidade Total Instalada 2008 [MW]
1	China	75'324,0	12'960,0	20,8	1	62'364,0	44'733,0	25'810,0	12'210,0
2	Estados Unidos	59'882,0	12'999,0	27,6	2	46'919,0	40'180,0	35'159,0	25'237,0
3	Alemanha	31'308,0	2'415,0	7,7	3	29'075,0	27'215,0	25'777,0	23'897,0
4	Espanha	22'796,0	1'122,0	5,2	4	21'673,0	20'676,0	19'149,0	16'689,0
5	Índia	18'321,0	2'441,0	15,4	5	15'880,0	13'065,8	11'807,0	9'587,0
6	Reino Unido	8'445,0	1'897,0	40,3	8	6'018,0	5'203,8	4'092,0	3'195,0
7	Itália	8'144,0	1'273,0	20,9	6	6'737,0	5'797,0	4'850,0	3'736,0
8	França	7'473,4	757,0	14,1	7	6'549,4	5'569,4	4'483,4	3'313,7
9	Canadá	6'201,0	936,0	17,8	9	5'265,0	4'008,0	3'319,0	2'369,0
10	Portugal	4'525,0	145,0	10,8	10	4'083,0	3'702,0	3'357,0	2'862,0
11	Dinamarca	4'162,0	217,0	6,0	11	3'927,0	3'734,0	3'465,0	3'163,0
12	Suécia	3'745,0	846,0	33,8	12	2'798,0	2'052,0	1'448,2	1'066,9
13	Japão	2'614,0	87,0	4,5	13	2'501,0	2'304,0	2'083,0	1'880,0
14	Austrália	2'584,0	358,0	16,1	16	2'226,0	1'880,0	1'877,0	1'494,0
15	Brasil	2'507,0	1'076,5	75,4	20	1'429,0	930,0	600,0	338,5
16	Polónia	2'497,0	880,0	54,5	19	1'616,4	1'179,0	725,0	472,0

Fonte: (THE WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION, 2012, p. 18).

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, estimou-se que o Brasil possui um potencial eólico disponível de 143,5 GW e uma energia anual de 272,2 TWh/ano. Este potencial está distribuído da seguinte forma: região Norte, potência disponível 12,8 GW e uma energia anual de 26,4 TWh/ano; região Nordeste, potência disponível 74 GW e uma energia anual de 144,3 TWh/ano; região Sudeste, potência disponível 29,7 GW e uma energia anual de 54,9 TWh/ano, região centro-oeste, potência disponível 3,1 GW e uma energia anual de 5,4 TWh/ano; região sul, potência disponível 22,8 GW e uma energia anual de 41,1 TWh/ano. De acordo com esses dados ilustrados na figura 4, pode-se constatar que a região que detém um maior potencial elétrico é a região nordeste.

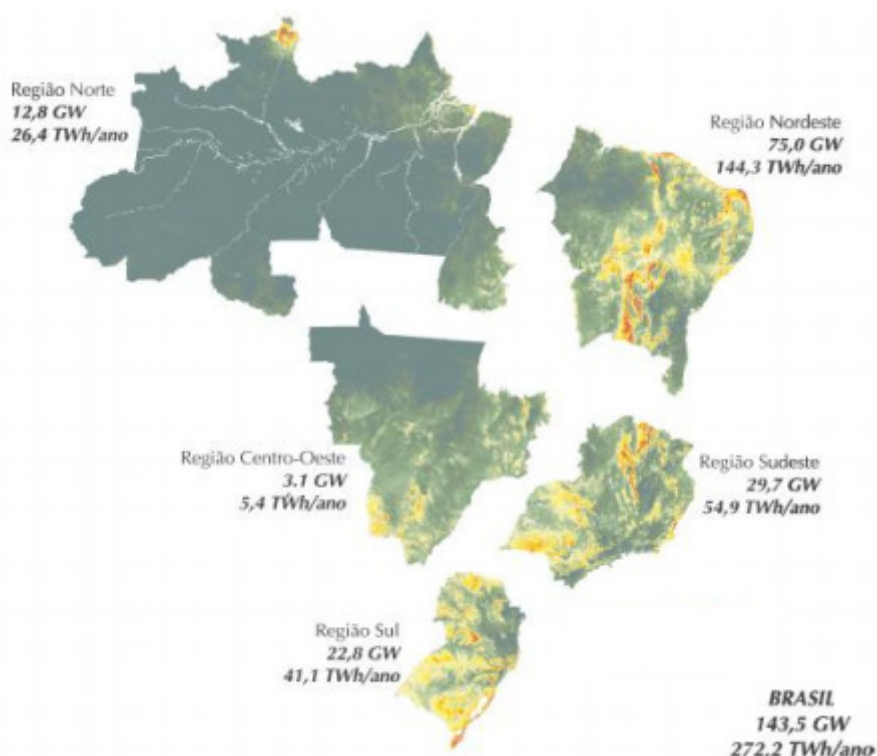


Figura 4: Capacidade eólica brasileira.

Fonte: Adaptado (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro-CEPEL, 2001, p. 44)

Com toda essa capacidade de geração por meio dos ventos, os leilões deixaram de ser a única opção de compra e venda desta energia, dando espaço ao mercado livre, que constitui uma alternativa viável para a construção de parques eólicos. Quem lidera esse ranking é o Rio Grande do Norte com 184 MW gerados (SILVA, 2013, p.22). Segundo as estimativas do Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energia (CERN), o Brasil já ultrapassou a faixa de 15 mil empresas com esse perfil de consumo.

Apesar da energia eólica estar ganhando espaço no mercado livre de energia, no Brasil apenas 27 % do total gerado é fornecido a este mercado. Existem apenas três estados

com parques eólicos instalados através do mercado livre: Rio Grande do Norte, com 184 MW, Sergipe e Piauí com 30 MW cada. (SILVA, 2013, p.22).

2.3 MICROGERAÇÃO EÓLICA

Tendo em vista os grandes desafios e perspectivas de mudança que virão a acontecer no cenário energético nas próximas décadas, uma das soluções plausíveis para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico é o consumidor se tornar um pequeno produtor, mas para que isso ocorra no Brasil o consumidor deve respeitar a Resolução Normativa de nº482 aprovada pela ANEEL em 2012, na qual se definiu os requisitos para que o consumidor entre em paralelo com a rede de distribuição da concessionária. Desta forma, a distribuidora oferece desconto na conta de luz de acordo com o injetado na rede pelo consumidor, impactando diretamente na redução de carga na rede (ANELL, 2012).

Para que essa ideia seja colocada em prática, é possível recorrer à geração via micro turbinas eólicas, que podem ser instaladas em zonas urbanas. Assim qualquer consumidor pode se tornar um gerador, fornecendo energia para si próprio, e até mesmo para a rede elétrica da concessionária (PEREIRA, 2010, p. 7).

No que diz respeito às dimensões das turbinas eólicas de pequeno porte, é possível seguir o padrão descrito na tabela 2 para classificação em Micro, Mini e Pequena turbina.

Tabela 2: Classificação de pequenas turbinas eólicas.

Sub-classe	Diâmetro do rotor [m]	Classificações normativas (Área Varrida, A [m ²])	Classificações comuns (Potência nominal, Pu [kW])	Aplicações
Micro-turbina	D < 1,6 m	A < 2 m ²	Pu < 5kW	Domésticas
Mini-turbina	1,6 m < D < 5 m	2 < A < 78,5 m ²	5 < Pu < 50 kW	Urbanizações e pequenas empresas
Pequena-turbina	5 m < D < 16 m	78,5 < A < 200 m ²	50 < Pu < 500 kW	Grandes urbanizações e PMEs de consumo significativo (agropecuárias e outras)

Fonte: Adaptado (ESTANQUEIRO, 2012, p.45)

O que diferencia as micro turbinas das grandes turbinas é sua constituição mais. Para Duarte (2004) as aplicações desses equipamentos podem ser para uso residencial, pequenas empresas ou pequenos parques eólicos.

2.3.1 Vantagens e Desvantagens da Microgeração Eólica

Segundo Magalhães (2009 *apud* UNESP, 2002, p. 31) existem vantagens e desvantagens quanto ao uso de um sistema de microgeração eólica, sendo:

- Vantagens:
 - Não emite gases poluentes;
 - Não gera resíduos na sua operação;
 - Transformação limpa do recurso energético natural (vento);
 - Sistema requer pouca manutenção;
- Desvantagens:
 - Se houver mau estudo do mapeamento, previsão e medição dos ventos no local não se tornam fontes confiáveis;
 - Possuem custo de investimento elevado;
 - Poluição visual;
 - Poluição sonora dependendo da velocidade do vento incidente;

2.3.2 Viabilidade da Instalação de um Sistema de Geração Micro Eólico

A viabilidade da instalação de um sistema de geração micro eólico depende de alguns fatores principais, por exemplo:

- Incidência da velocidade dos ventos na região;
- Topografia da região;
- Altitude;
- Condições climáticas;
- Custos de mão de obra e material.

No Brasil existem várias regiões com um bom potencial eólico, sendo as regiões Nordeste e Sul do país com maiores índices, como demonstrado na figura 5.



Figura 5: Velocidades Médias Anuais.

Fonte: Adaptado (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro-CEPEL, 2001, p.28)

2.3.3 Potencial Eólico em Ambiente Urbano

O potencial eólico em zonas urbanas é de caracterização difícil devido à presença de obstáculos e estruturas naturalmente existentes nas cidades, como prédios e edifícios, principalmente na área central. A presença desses obstáculos causa efeitos de separação do escoamento, redução da velocidade do vento e turbulência elevada nas zonas acima e ao redor dos edifícios, como ilustrado na figura 6 (ESTANQUEIRO, 2012, p.47).

Esta dificuldade é reforçada pelos elevados custos dos equipamentos utilizados para medição do vento, o que faz com que, no caso da micro aerogeração, estudos sejam inviabilizados por motivos econômicos, fato que é considerado uma enorme barreira ao desenvolvimento de aproveitamentos urbanos de energia eólica.

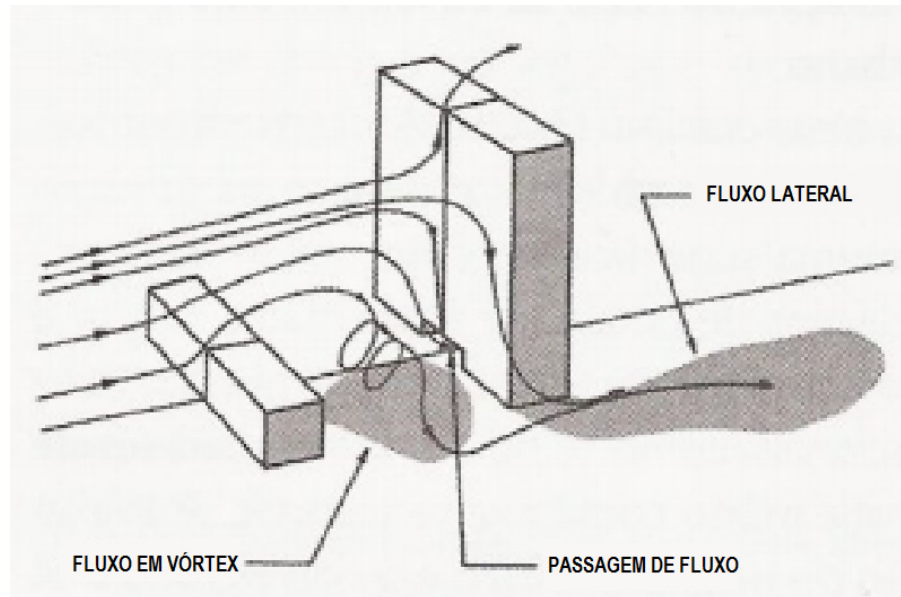


Figura 6: Vórtices envolvendo um edifício

Fonte: (ESTANQUEIRO, 2012, p. 47).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 SENSORES E DISPOSITIVO PARA AQUISIÇÃO DA VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO

Neste item serão abordados alguns sensores e o dispositivo de armazenamento de dados do perfil eólico na UTFPR – Campus Curitiba, localizada na região central de Curitiba. Utilizou-se anemômetro de conchas, sensor de direção do vento e o *data logger*.

3.1.1 Conceito de Anemômetro

“É um sensor que mede a velocidade da corrente de ar em (m/s) e, em alguns tipos, também a direção (em graus)” (INPE). O tipo mais comum é o anemômetro de conchas de Robinson, sendo que este será utilizado no presente trabalho.

A qualidade da medição é a base para o estudo de vento, produção de energia e viabilidade econômica. Por isso, tem que se obter resultados confiáveis. Deve-se considerar alguns fatores na escolha do sensor de medição, pois a aquisição de dados é a base de um projeto, portanto os fatores são: linearidade do sinal de saída com a velocidade do vento, pouca sensibilidade em relação à componente vertical do vento e à turbulência causada pelos braços de suporte e torre (COPEL, 2007).

3.1.1.1 Anemômetro de conchas de Robinson

As características deste instrumento, quanto a geometria e formato dos rotores, influenciam na linearidade dos sensores, sensibilidade de medição da componente vertical do vento e resposta dinâmica. Rotores grandes podem apresentar maior linearidade, porém tem maior inércia e menor resposta dinâmica (COPEL, 2007).

O anemômetro de conchas de Robison é preciso, robusto, têm preços relativamente baixos em relação a outros tipos de sensores e possui Normas Técnicas que direcionam o seu uso (COPEL, 2007).

O equipamento, que foi cedido pela COPEL, mostrado na figura 7, foi instalado a 37 metros de altura em relação ao solo. O modelo e marca utilizado é o #40 Maximum da NRG Systems, que possui três conchas (NRG Systems).



Figura 7: Anemômetro de concha de Robinson.

Fonte: NRG Systems.

3.1.2 Sensor de direção do vento

Este sensor, como o nome já diz, é utilizado para medir a direção do vento. O tipo mais conhecido utiliza uma “barbatana” ligada em um eixo vertical. O sensor procura constantemente uma posição de equilíbrio, alinhando-se ao vento. A maioria dos sensores usa um transdutor que gera um sinal elétrico em relação à posição da “barbatana”. Este sinal elétrico é transmitido via cabo para o *data logger* e relaciona a posição da palheta para um ponto de referência conhecido (geralmente o norte verdadeiro). Portanto, o alinhamento do sensor a um ponto de referência é muito importante (NREL,1997).

O sensor utilizado, que foi cedido pela COPEL, é o 200P da NRG Systems. Este é um sensor popular, pois, conforme figura 8, possui design simples e possui baixos custos de manutenção. Ele é um potenciômetro construído de componentes de aço inoxidável e termoplástico (NREL,1997).



Figura 8: Sensor de direção do vento, modelo 200P da NRG Systems.

Fonte: NRG Systems

3.1.3 *Data logger*

Neste trabalho utilizamos o *data logger* cedido pela COPEL, o Symphonie Internet Enable da NRG Systems, conforme figura 9 que mostra uma foto do equipamento instalado na universidade. Este dispositivo permite armazenar dados mensurados pelo anemômetro e pelo sensor de direção do vento, de maneira eficaz e precisa, em um certo período de tempo.



Figura 9: Data logger instalado na UTFPR.

Fonte: Autoria própria.

Este *data logger* foi projetado especificamente para a indústria de energia eólica. A velocidade do vento é obtida pela média aritmética das leituras realizadas ao longo de um período de tempo (MUKUND, 1942). Esta é a ideia utilizada para a obtenção dos dados pelo dispositivo. As leituras são captadas a cada 2 segundos e a cada 10 minutos é extraído medidas como a média, desvio-padrão, mínimo e velocidade máxima do vento. As mensurações colhidas são armazenadas em um cartão multimídia. O *data logger* marca no *display* quantos dias de registro foram feitos. A figura 10, mostra o *data logger* instalado juntamente com os sensores que localizam-se acima dele.



Figura 10: Disposição do *Data logger* dos sensores de medições instalados na UTFPR.
Fonte: Autoria própria.

3.2 MÉTODO ESTATÍSTICO PARA OBTER A VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

Existem diferentes métodos de distribuição probabilísticos para se obter a velocidade média para calcular a potência do gerador. O método mais eficiente é a distribuição de Weibull, pois apresenta melhor aderência às estatísticas de velocidade do vento (COPEL, 2007).

3.2.1 Distribuição de Weibull

A frequência de velocidade u , ou seja a Distribuição de Weibull, é expressa por:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Onde:

C é fator de escala, em metros por segundo;

k é fator de forma, adimensional;

v é a velocidade, em metros por segundo.

Quando $k = 2$ temos a Distribuição de Rayleigh, que estará em função apenas de C . O valor médio da velocidade do vento \bar{v} , que posteriormente será utilizado no cálculo da potência do gerador, é dado por:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} u \cdot f(v) dv = C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2)$$

Desta maneira, pode-se observar a função de velocidade média do vento depende de C e k (COPEL, 2007).

3.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA

Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia mecânica de rotação. O eixo do rotor acionando o gerador elétrico, transforma uma parte desta energia mecânica de rotação em energia elétrica (WEG, 2006, p 3).

A potência elétrica P gerada em watts é uma função da velocidade ao cubo do vento, dada por:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot C_p \cdot (\pi \cdot R^2) \cdot v^3 \quad (3)$$

Onde o termo γ representa a massa específica do ar que a 15°C , ao nível do mar, vale $\gamma = 1,225 \text{ kg/m}^3$. O termo R representa o raio do rotor da turbina em metros e v a velocidade dos ventos em metros por segundo (WEG, 2006).

A potência de energia do vento não é totalmente aproveitada pela turbina eólica. Ocorrem perdas quando há transferência da energia do vento para a turbina, portanto, para a potência de geração ficar mais perto da realidade é levado em consideração o C_p , coeficiente de potência do rotor, que está relacionado à eficiência. Dependendo do gerador, este coeficiente pode chegar no valor máximo de 0,5, para turbinas de duas pás, e de 0,2 a 0,4 para turbinas de mais pás (PATEL, 2006).

3.4 BREVE NOÇÃO SOBRE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE IMÃ PERMANENTE

As máquinas síncronas de ímãs permanentes podem ser construídas com ímã superficiais ou internos, conforme figura 11. A utilização de ímãs internos em motores, possibilita a operação em grande faixa de velocidade acima da nominal, pode-se afirmar também que os ímãs estão protegidos contra a força centrífuga. Já “o motor com ímãs superficiais apresenta uma limitada capacidade de operar em velocidades acima da nominal, com potência constante, devido à baixa indutância resultante do grande entreferro” (WEG).

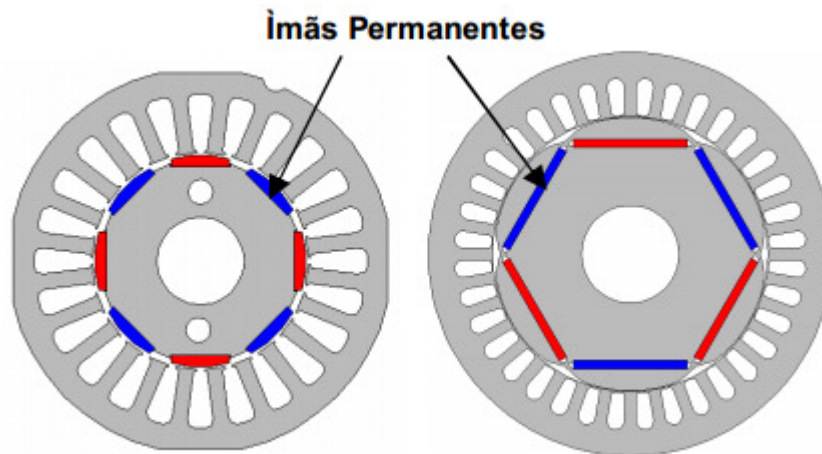


Figura 11: a) Máquina com ímãs superficiais. b) Máquina com ímãs internos.

Fonte: WEG.

Em máquinas de grande desempenho é utilizado ímãs que apresentam elevada coercividade (H_c) e também elevada remanescência (Br). O ímã de Neodímio-Ferro-Boro ($NdFeB$) possui essa característica (WEG).

A velocidade do campo girante, ou conhecida também por campo girante, pode ser calculada por:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (4)$$

Onde:

n_s é a velocidade síncrona dada, em rpm;

f é a frequência das correntes de alimentação, em Hz;

p é o número de polos.

Esse tipo de gerador apresenta algumas características na qual o torna favorável sua utilização para a geração eólica de energia. Ele apresenta um alto torque em baixas velocidades de rotação que dispensa o uso de caixa de engrenagem, tem boa eficiência em virtude de possuir elevada densidade de potência, isso torna-os compactos e leves, reduzindo o esforço da estrutura da torre que o gerador é instalado (REIS, 2008, p.17).

3.5 MICRO AEROGERADOR

O micro aerogerador que será utilizado no trabalho, é um gerador comercial de imã permanente, o Phoenix Wind Turbine da marca GreenergyStar. Ele possui três pás e apresenta as características mais compatíveis para utilização no trabalho, já que é um gerador de pequeno porte com potência máxima de 550 W, ideal para geração em centro urbano. Este gerador foi fornecido pelo professor da UTFPR, Eloy Fassi Casagrande Júnior.



Figura 12: Micro aerogerador Phoenix Wind Turbine.

Fonte: GreenergyStar.

A seguir na tabela 3 tem-se as especificações do gerador segundo o manual do mesmo:

Tabela 3: Especificações do gerador.

Material da carcaça	Alumínio
Material da hélice	Fibra de carbono
Material do nariz da hélice	Plástico
Material do eixo	Alumínio
Diâmetro do rotor	117 cm
Peso	5 kg
Velocidade de partida	3 m/s
Velocidade nominal	12,5 m/s
Velocidade máxima	45 m/s
Tensão nominal	12 VAC
Potência nominal	400 W
Potência máxima	550 W

Fonte: GreenergyStar

A figura 13 esboça as dimensões e as características construtivas do micro aerogerador.

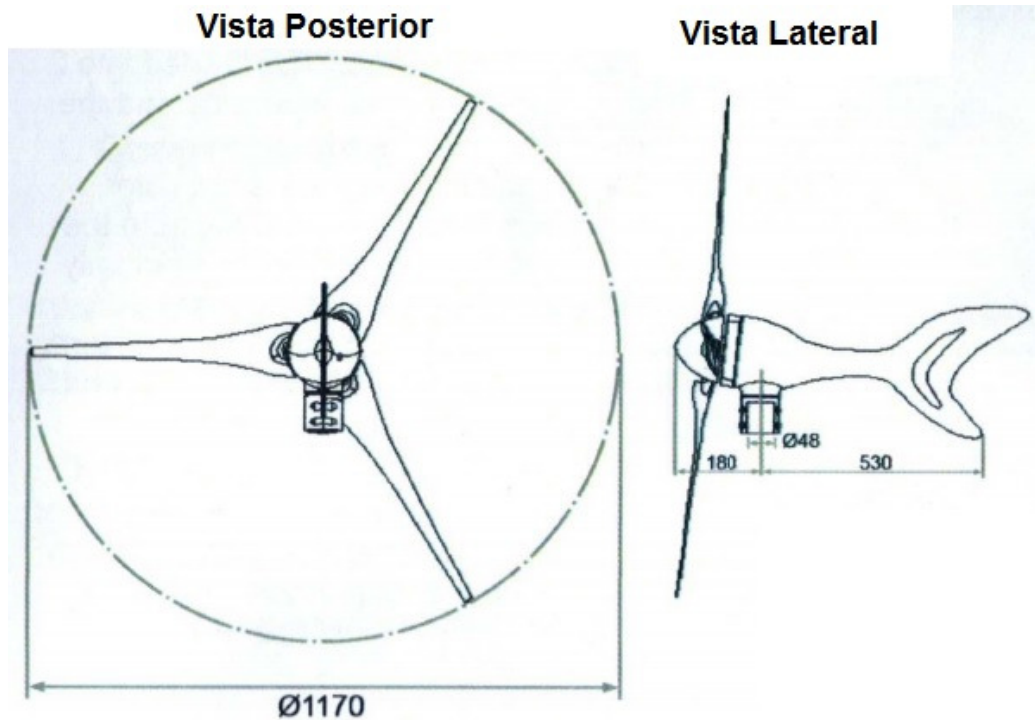


Figura 13: Dimensões, em mm, do micro aerogerador.

Fonte: GreenergyStar

Quando o gerador sofrer ação do vento, e se a velocidade do vento for favorável para geração, ele produzirá corrente alternada, esta corrente será retificada por um retificador trifásico de onda completa, que vem acoplado de fábrica ao sistema, obtendo-se então uma corrente contínua.

A figura 14 mostra como o sistema é fornecido.

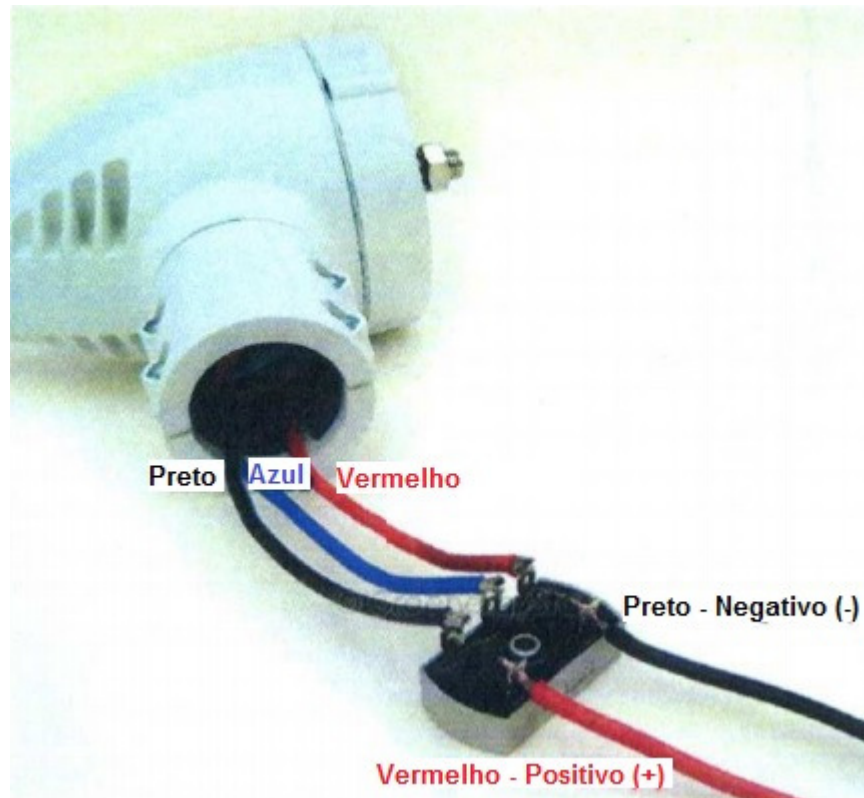


Figura 14: Disposição do micro aerogerador com o retificador trifásico de onda completa não controlado.

Fonte: GreenergyStar

O gráfico 2 mostra o gráfico da potência gerada em função da velocidade do vento, fornecido pelo fabricante, no qual mostra as condições de operação inicial até a máxima. Quando ele atinge a potência máxima, 550 W, através de um sistema interno de segurança, a geração é cessada para o gerador não sofrer danos.



Gráfico 2: Gráfico da potência gerada em função da velocidade do vento.

Fonte: GreenergyStar.

3.6 COMPONENTES DO CONVERSOR MICROCONTROLADO

3.6.1 Conversor Boost

O conversor Boost é um conversor CC-CC que “a tensão média de saída é maior que a tensão de entrada” (BARBI, 2000). A topologia do conversor, para uma carga resistiva, pode de ser descrita pelo circuito da figura 15.

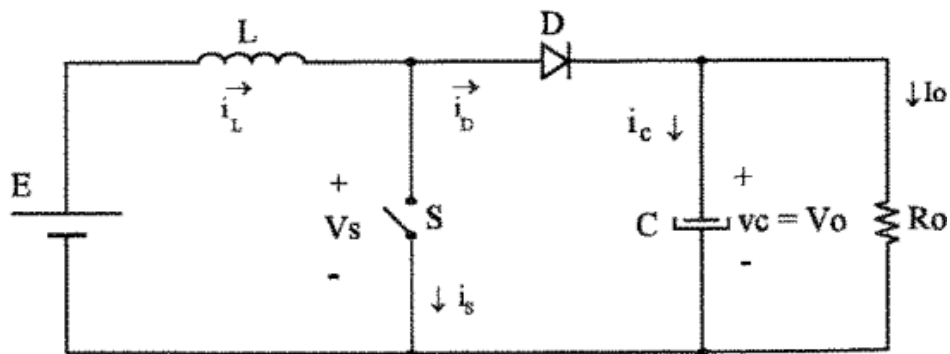


Figura 15: Estrutura de potência do conversor Boost.

Fonte: BARBI, 2000.

Os componentes que compõe o conversor são: fonte E, indutor L, que juntos operando em altas frequência, atuam como fonte de corrente, chave S, diodo D e capacitor C, que também em altas frequências, se comporta como uma fonte de tensão E_o .

O funcionamento do conversor, de maneira resumida, pode ser explicado em duas etapas: Na primeira, onde o tempo é de 0 a t_c tal que t_c é o tempo de condução, a chave S está fechada, ocorre um curto circuito isolando o estágio de saída da fonte de alimentação i_L . Na segunda etapa, onde o tempo é de t_c a T tal que T é o período, a chave S está aberta e o diodo

D conduz. A fonte de corrente I_L passa a entregar energia à fonte E_o . Nessa etapa a corrente que passa pela chave é zero ($i_s = 0$) e a corrente no diodo i_D é igual à corrente no indutor I_L . Essa etapa termina quando a chave S fecha, reiniciando a primeira etapa (BARBI, 2000).

A figura 16 representa a primeira etapa e a segunda etapa.

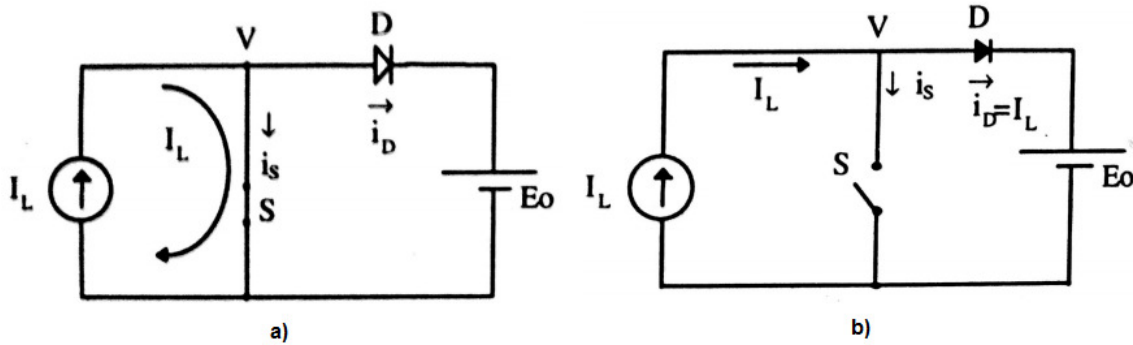


Figura 16: a) Primeira etapa de funcionamento do conversor Boost. b) Segunda etapa.

Fonte: BARBI, 2000.

Segundo Barbi (2000, p.69), chamada razão cíclica D_c , é dada pela seguinte relação:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{1}{1 - D_c} \quad (5)$$

O gráfico 3 abaixo representa a característica ideal do conversor Boost quando D_c tende à unidade:

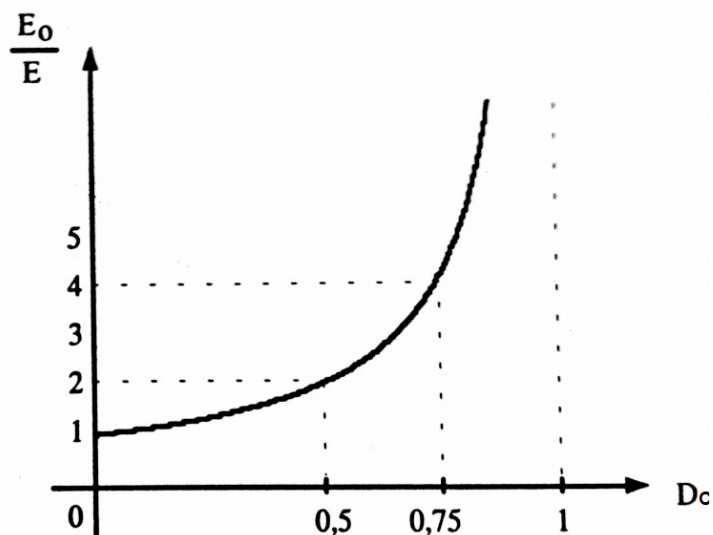


Gráfico 3: Característica ideal de transferência estática do conversor CC-CC elevador.

Fonte: Adaptado BARBI, 2000.

O conversor Boost possui dois modos de condução: contínua e descontínua. Dependendo da carga ou do grau de energia armazenada na indutância L , devido a corrente na

fonte de alimentação E, o Boost poderá estar sujeito a um desses dois modos de condução. Se a corrente no indutor não se anular no tempo que o chaveamento estiver aberto, a condução é contínua, caso contrário, a condução é descontínua (BARBI, 2000).

Para o modo de operação contínuo, a corrente no indutor L deve fluir continuamente. Esta condição está relacionada ao valor da indutância, que deve ser maior que o valor da indutância crítica, caso seja menor, o circuito operará em modo descontínuo. O valor da indutância crítica pode ser calculado pela seguinte equação:

$$L_{crit} = \frac{E^2(V_o - E)}{2 \cdot f \cdot V_o^2 \cdot I_o \min} \quad (6)$$

Onde f é a frequência de chaveamento. Esta indutância é considerada um filtro para o conversor. O capacitor de filtro, conforme figura 15, pode ser calculado pela seguinte equação:

$$C = \frac{I_o}{f \cdot \Delta V_c} \cdot \frac{(V_o - E)}{V_o} \quad (7)$$

Onde ΔV_c é a ondulação da tensão no capacitor pré-estabelecido pelo projeto (BARBI, 2000). No gráfico 4 estão as principais formas de onda no circuito de potência Boost:

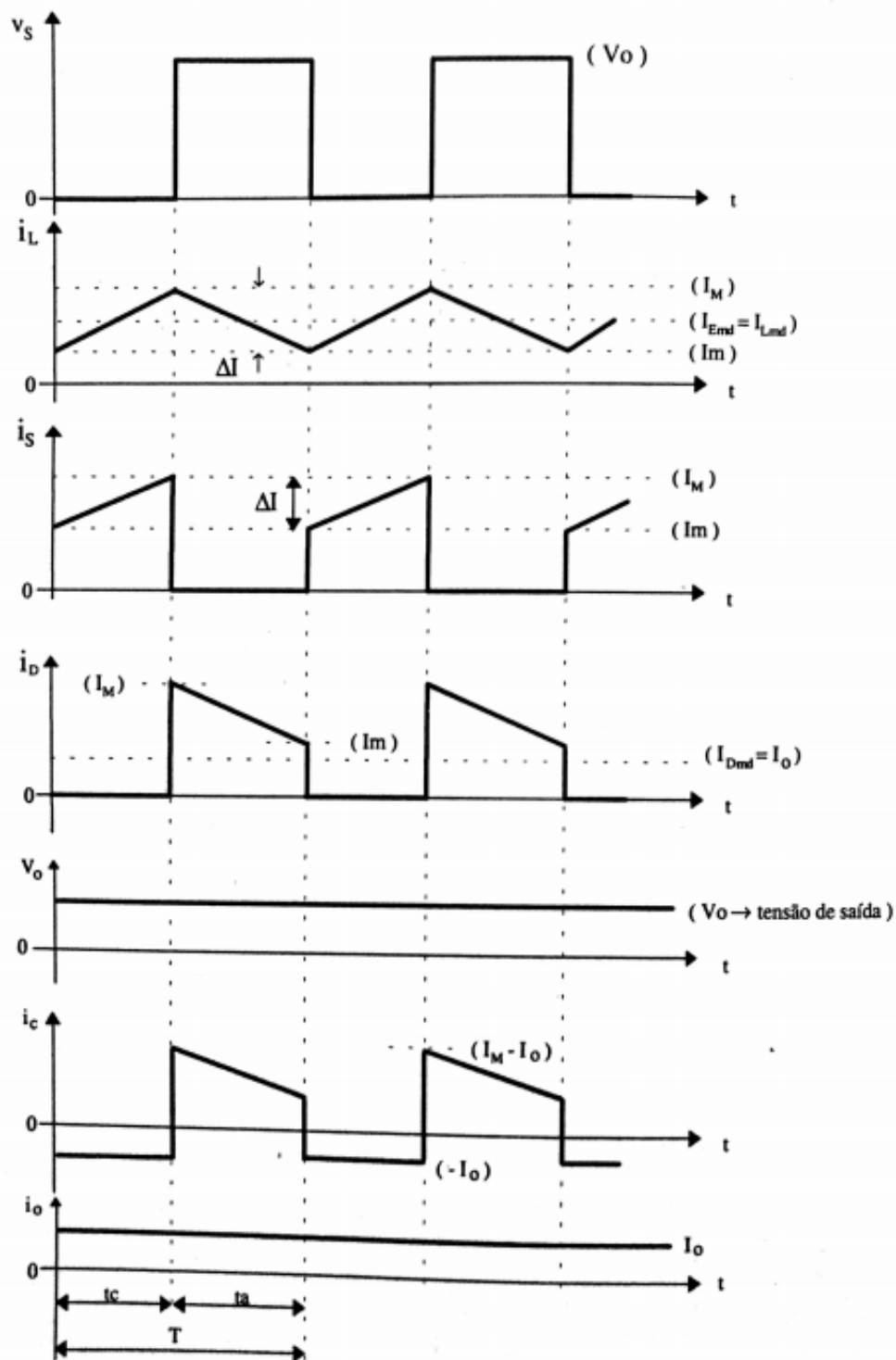


Gráfico 4: Principais formas de onda.

Fonte: BARBI, 2000.

No gráfico, ΔI é a ondulação da corrente, que é definida pelo projeto, I_M é a corrente máxima e I_m é a corrente mínima devido a ondulação. Nota-se que a corrente máxima no indutor será a mesma corrente que passará quando a chave S estiver fechada, de maneira análoga, quando a chave S abre, que seria o tempo t_a , a corrente carregada no indutor será descarregada no diodo (BARBI, 2000).

É possível elevar a tensão do conversor utilizando um controlador de tensão com modulação por largura de pulso. Através deste dispositivo é possível variar a razão cíclica para regular a tensão média do conversor para que a tensão de saída V_o seja próxima à tensão de entrada E (BARBI, 2000).

3.6.2 PIC 16F877A

PICs (*Programmable Interfaced Controller*) ou Controladores de Interface Programável são microcontroladores produzidos pela *Microchip Technology* que possuem várias aplicações, como receber e transmitir sinais. Neste trabalho abordaremos em especial o PIC16F877A que além das funções básicas de um microcontrolador possui dois pinos capazes de atuar como Modulador por Largura de Pulso, ou PWM (*pulse-width modulation*) (DESHMUKH, 2007, p. 115). Este PIC pode ser programado para receber sinais externos e através de uma programação interna controlar a função PWM. O pino de saída da função PWM por sua vez pode ser usado para chavear um Boost seguindo critérios definidos em seu projeto.

4 MEDIÇÃO DA POTÊNCIA DO VENTO

A energia eólica disponível em determinada região precisa ser medida e analisada para determinar a viabilidade da instalação de um aerogerador. Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para o levantamento das informações sobre as condições do vento em ambiente urbano. Os dados utilizados para este capítulo foram coletados pela própria equipe para demonstrar o procedimento de coleta e tratamento de dados de um projeto real, aproveitando uma oportunidade para criação de conhecimento acadêmico, pois o equipamento cedido pela COPEL e os procedimentos envolvidos na sua instalação tem custo elevado.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento dos dados em campo é a primeira etapa para a instalação de um micro aerogerador. Esta etapa consiste da escolha de um local, da instalação dos equipamentos de medição e da extração dos dados coletados.

4.1.1 Local escolhido

O local a ser escolhido deve ser analisado quanto a algumas características: Acesso a pessoas ou animais, incidência de vento, possibilidade de poluição sonora ou visual e distância até a carga.

Por se tratar de uma máquina girante existe o risco potencial de danos a seres vivos, portanto deve se analisar a facilidade com que pessoas não autorizadas e/ou animais têm acesso a área do gerador. As aves e morcegos em especial sofrem inúmeros acidentes com turbinas grandes (AMERICAN WIND WILDLIFE INSTITUTE, 2010, p. 2) e o tamanho reduzido das pás do micro aerogerador em si já reduz este risco.

De acordo com o Manual de Avaliação Técnico-Econômico de Empreendimento Eólico-Elétricos (COPEL, p. 8) existem atlas ou mapas do potencial eólico de certas regiões, como o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná realizado pela COPEL ou o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro realizado pela Eletrobrás, que podem ser utilizados como base para se definir a capacidade do vento de determinada região, porém a topografia da região urbana deve ser analisada de maneira mais detalhada.

O ruído emitido por geradores pode causar perturbações do sono, doença cardiovascular e doença vibro acústica (MAIA, 2010, p. 38) devendo estes serem instalados longe de locais onde pessoas possam se sentir incomodadas. O barulho emitido pela turbinas geralmente tem duas possíveis fontes, um mecânico inerente ao sistema de engrenagens e um ruído conhecido como ruído aerodinâmico que aumenta com a velocidade do vento e com a rotação das pás, sendo a maior fonte de reclamações (PATEL, 2006, p, 82). Grandes turbinas geram ruídos maiores mas, geralmente, ficam longe de centros populacionais. Embora a dimensão reduzida dos micro aerogeradores reduza também o ruídos, se estes forem instalados muito próximo de locais onde exista concentração de pessoas, o limite de emissão de ruído deve ser levado em conta. A poluição visual é mais relativa, e deve ser estudada caso a caso com a população local como no caso de regiões com grande fluxo turístico ou monumentos históricos.

Por último a distância até a carga deve influenciar o projeto, pois distancias maiores implicam em maiores custo para a instalação. Para se aproveitar as velocidades mais altas dos ventos que normalmente se encontram a alturas mais elevadas, a instalação em ambientes urbanos deve, preferencialmente, ser realizada em locais de altitude elevada.

4.1.2 Anemômetro

Após o local ser definido o anemômetro deve ser instalado. Uma haste de 8 metros devidamente ancorada com três cabos de aço foi instalada no local escolhido pela equipe com participação da equipe de manutenção da UTFPR com o material fornecido pela COPEL. Em um projeto real a haste deve possuir a altura em que o gerador vai ser instalado. O ideal é a maior altura possível estruturalmente, visto que a velocidade do vento aumenta com a altura (MARTINS et al., 2007, p. 7).

4.1.3 Data logger

O *data logger* armazenou os dados do anemômetro durante o período de 10/10/12 até 12/11/13. Como visto no capítulo 3 o circuito interno do *data logger* gravou os dados em um cartão multimídia. Este circuito armazena todas as medidas compreendidas entre as 00:00 e 23:50 horas de um dia em um único arquivo. Este arquivo possui um formato compatível com o software disponibilizado junto ao *data logger* e que será abordado em seguida.

4.1.3.1 Software utilizado

O software utilizado para extrair os dados do cartão multimídia do *data logger* foi o *Symphonie data retriever* da NRG Systems. Os dados obtidos devem ser importados para o programa. O período utilizado para a análise foi reduzido para apenas um ano, da data de 12/11/12 até 12/11/13. A figura 17 contém os dados do vento referentes ao dia 12/11/12 das 00:00 horas até 23:50 horas.

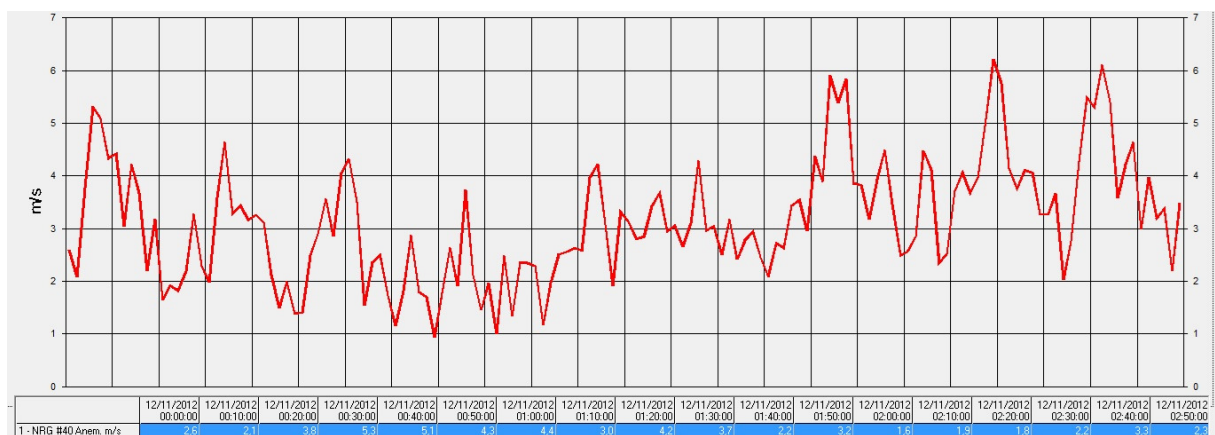


Figura 17: Amostra dos dados do vento do dia 12/11/12 retirados do *Symphonie data retriever*.

Fonte: Autoria própria.

O *data logger* possui 12 canais para receber dados de diferentes equipamentos analógicos ou digitais (NGR systems, p. 29). Na figura acima é possível ver o canal 1, referente ao anemômetro utilizado, indicando a velocidade média do vento em intervalos de 10 minutos. O canal 7 é referente à direção do vento e é representado em graus, sendo 90° a direção norte. A figura 18 apresenta a carta dos ventos para o mesmo dia.

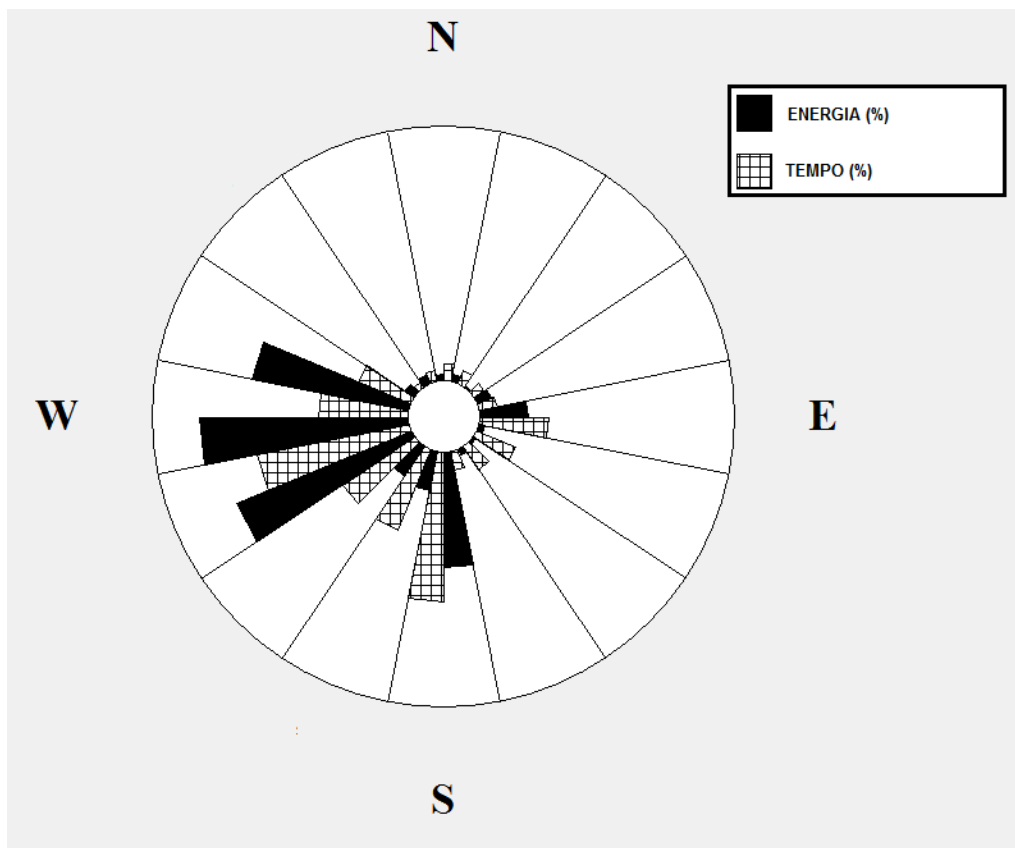


Figura 18: Amostra dos dados do vento do dia 12/11/12 retirados do *Symphonie data retriever*.

Fonte: Autoria própria.

As barras de textura quadriculada representam a porcentagem de tempo em que o vento se manteve na direção enquanto as barras pretas indicam a porcentagem de energia do vento na direção. Como visto no capítulo 3 é a velocidade do vento que influencia na energia e não a quantidade de tempo que ele sopra em determinada direção observam-se duas situações. Ao Sul o vento soprou por mais tempo, porém a energia que ele possuía era baixa. Ao Oeste a energia foi bem maior, mesmo soprando por menos tempo.

A distribuição de frequências do vento, ou seja, quanto tempo o vento soprou em determinada velocidade, também pode ser obtida com o software *Symphonie data retriever*. A figura 19 apresenta a distribuição de frequências para o primeiro dia da análise.

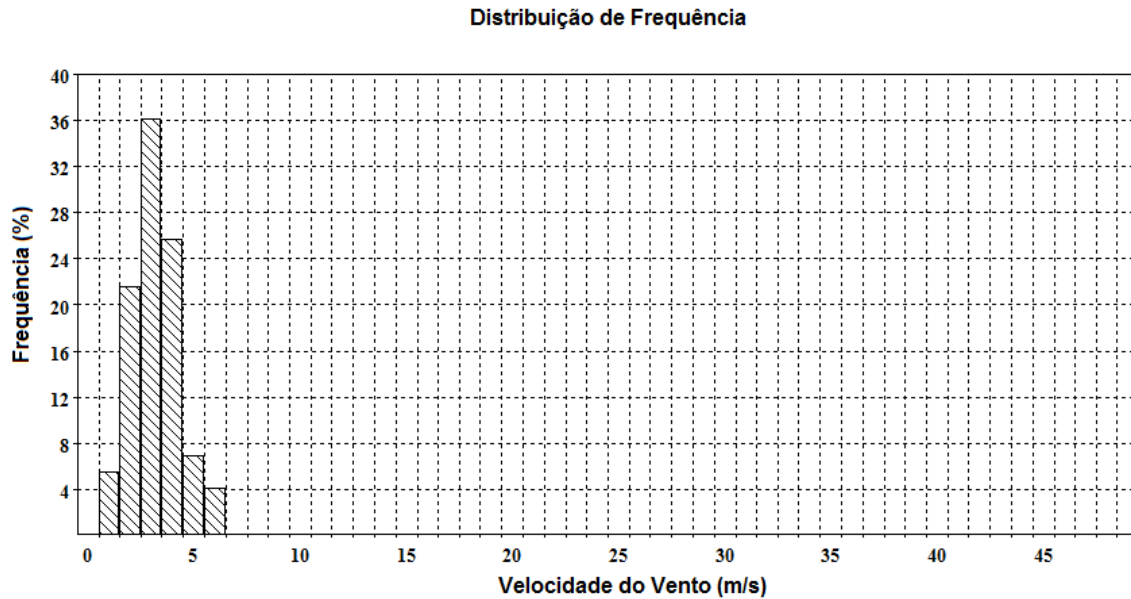


Figura 19: Distribuição de frequências da velocidade do vento do dia 12/11/12 retirados do Symphonie data retriever.

Fonte: Autoria própria.

A velocidade média que foi mais frequente durante o dia foi entre 3 e 4 m/s, enquanto não houve uma média de velocidade menor do que 1 m/s e acima de 7 m/s. O software não gera o gráfico anual de velocidades medias medidas, mas gera mensal. Desta maneira, as características do vento podem ser definidas mensalmente, visto que as mesmas variam conforme o período do ano. Em um projeto real, o ideal é que a análise seja feita em pelo menos três anos consecutivos, mas para objeto de pesquisa acadêmica os gráficos do período de um ano foram utilizados. As figuras 20 e 21 são referentes aos meses de junho e outubro de 2013 e apresentam a maneira como a informação é detalhada.

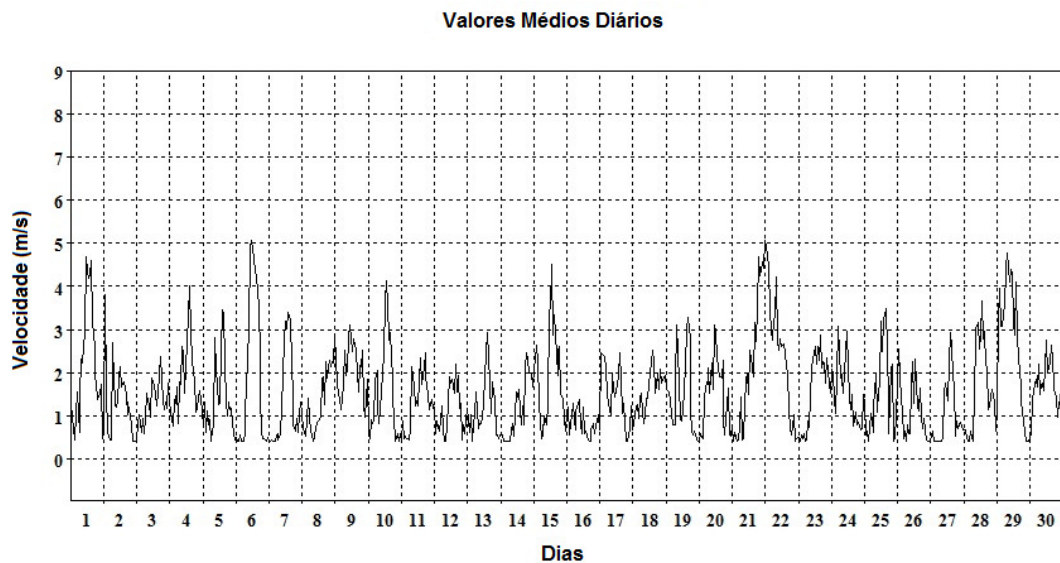


Figura 20: Velocidade do vento em jun 2013. Velocidade média 1,6 m/s.

Fonte: Autoria própria.

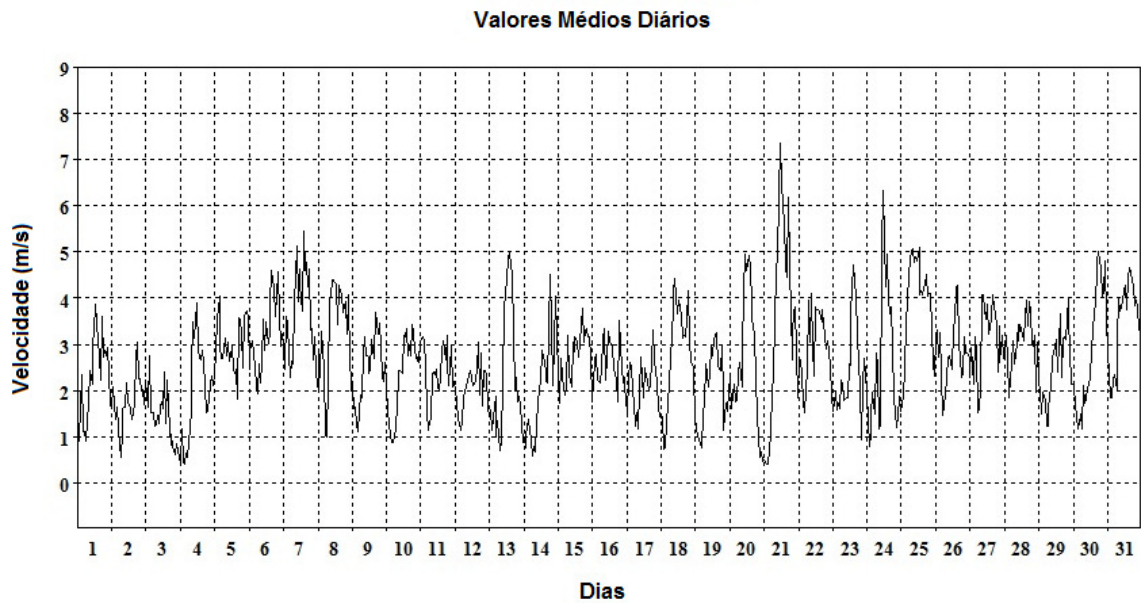


Figura 21: Velocidade do vento em out 2013. Velocidade média 2,7 m/s.

Fonte: Autoria própria.

Após análise dos dados, ficou claro que na metade do ano os ventos sopraram com uma intensidade média mais baixa do que no começo e fim do ano, com a menor média em junho com 1,6 m/s e a maior sendo novembro com 2,9 m/s, calculando a média de novembro de 2012 e 2013. Esta variação deve ser levada em conta em um projeto e em determinadas regiões ela pode ser menor ou maior.

Com este software é possível analisar os dados no intervalo escolhido. As figuras 22 e 23 apresentam a carta dos ventos e a distribuição de frequências gerados pelo software com os dados relativos ao período de 12/11/12 até 12/11/13, foco de estudo deste capítulo.

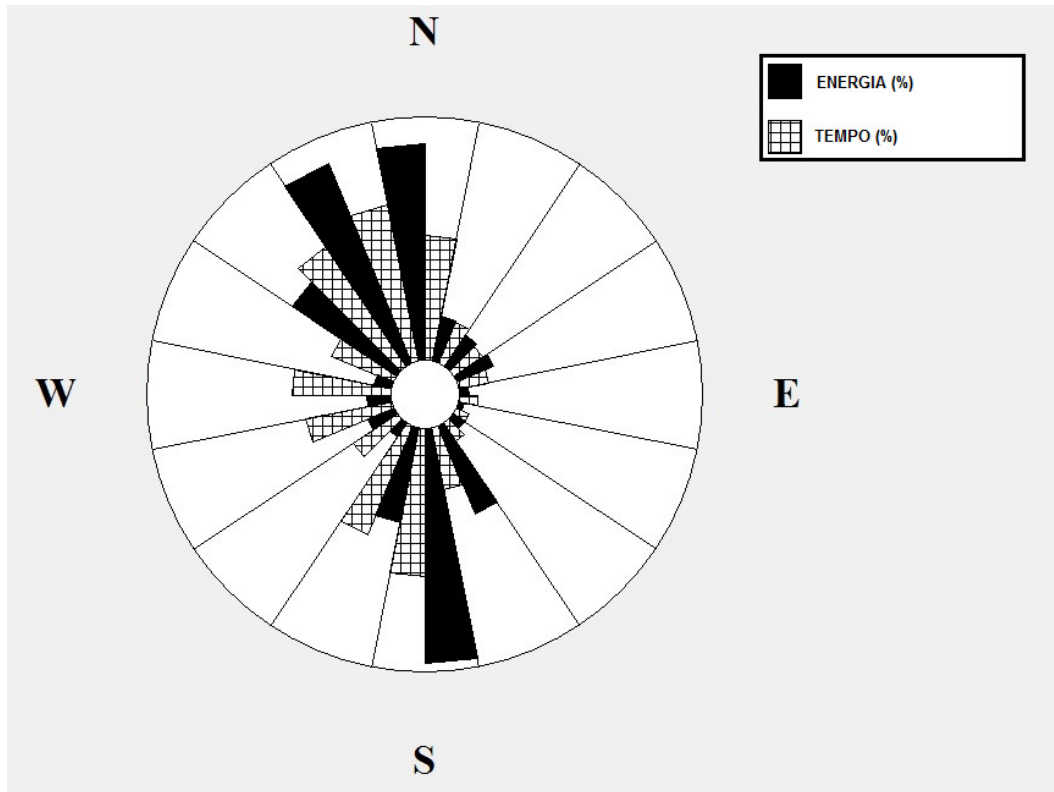


Figura 22: Amostra dos dados do vento do dia 12/11/12 até o dia 11/12/13 retirados do *Symphonie data retriever*.

Fonte: Autoria própria.

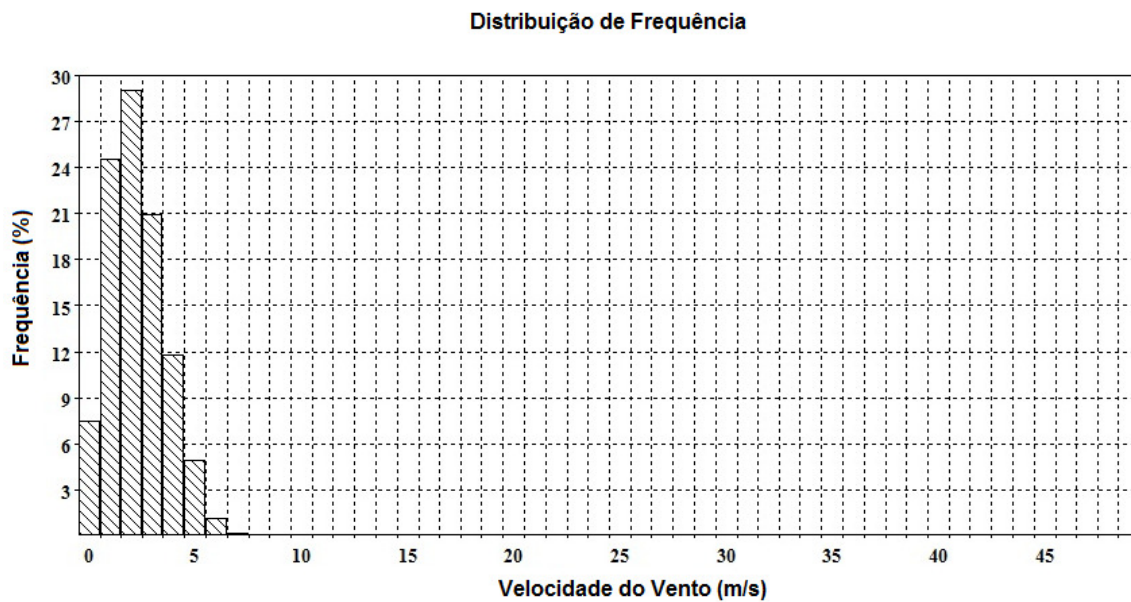


Figura 23: Amostra da distribuição das frequências da velocidade do vento do dia 12/11/12 até o dia 11/12/13 retirados do *Symphonie data retriever*.

Fonte: Autoria própria.

4.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os dados da velocidade média do vento registrados no período de um ano somaram 52668 medições. Existem vários métodos para se analisar a variação da velocidade do vento e o melhor deles é através da distribuição probabilística de Weibull (PATEL, 2006, p. 34).

4.2.1 Distribuição de Weibull

As 52668 medições foram transferidas do software da NGR systems, o *Symphonie data retriever*, para uma planilha do Excel a fim de ponderá-las.

O primeiro passo foi criar um histograma que apresenta a quantidade de vezes que cada velocidade do vento incidiu no anemômetro. Foi escolhido o intervalo de 1m/s para montar o histograma. A ferramenta de análise de dados disponível no Excel foi utilizada para criar o histograma apresentado na tabela 4. A partir do histograma é possível calcular a frequência em que cada intervalo da velocidade média do vento ocorre e plotar um gráfico da distribuição das frequências como visto na gráfico 5.

Tabela 4: Tabela retirada do Excel contendo o histograma dos dados e a distribuição de frequências.

V(m/s)	Frequência	%
0	0	0
1	11145	0,211608567
2	15035	0,285467457
3	13158	0,249829118
4	7959	0,151116427
5	3932	0,074656338
6	1160	0,022024759
7	220	0,004177109
8	37	0,000702514
9	16	0,00030379
10	3	5,69606E-05
11	2	3,79737E-05
12	1	1,89869E-05
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0

Fonte: Autoria própria.

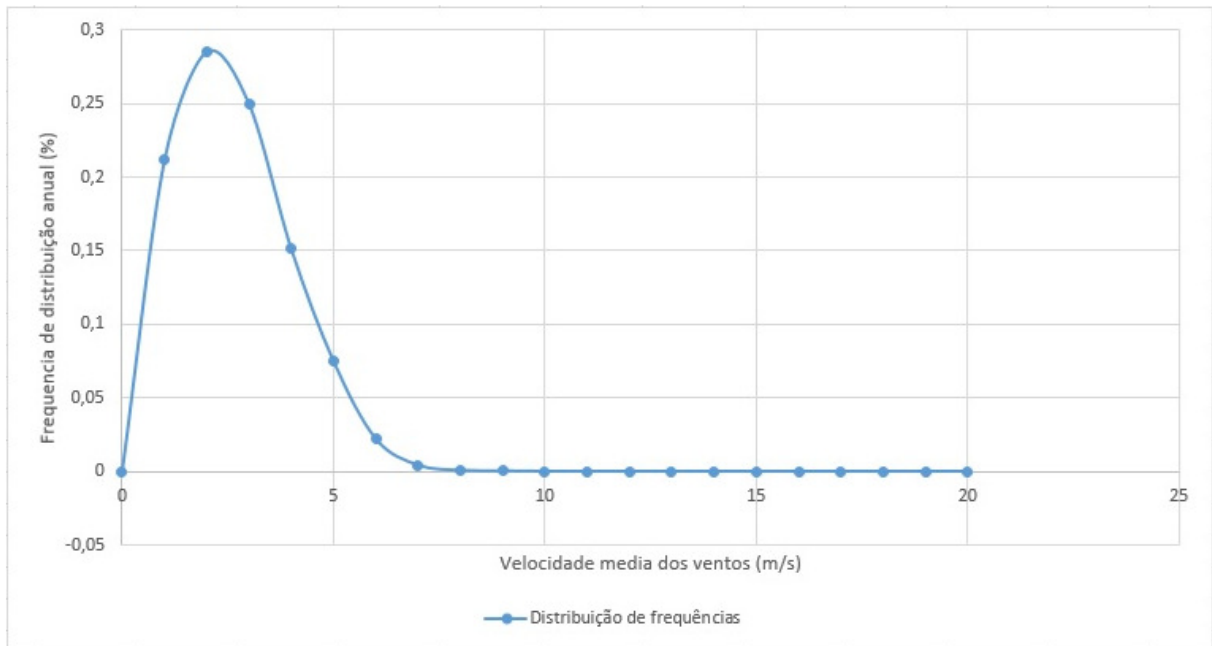


Gráfico 5: Gráfico retirado do Excel contendo a distribuição de frequências.

Fonte: Autoria própria.

Para a distribuição de Weibull foi utilizada fórmula pronta do Excel WEIBULL(x,alpha,beta,cumulativo) onde x representa o valor que se quer aplicar a função de Weibull, alpha (representado por k na planilha) é o fator de forma, beta (representado por lambda na planilha) é o fator de escala e cumulativo indica se a função é cumulativa ou não. Como queremos a função de densidade o valor a função não deve ser cumulativa.

Para o valor do fator de escala utiliza-se a formula abaixo com o valor da velocidade média anual de 2,227 m/s calculado através da média aritmética de todas as velocidades e com o valor do fator de forma como 2, pois definir o valor de 2 para o valor inicial do fator de forma é um bom método de iniciar as estimativas por se tratar da função de Rayleigh.

Com o fator de escala calculado e com o fator de forma inicial definido como 2, podemos comparar a distribuição de Weibull com a distribuição de frequências previamente calculada. O gráfico 6 apresenta a sobreposição dos gráficos das duas distribuições e a tabela 5 apresenta a média da Densidade de Energia da frequência da velocidade do vento e a média da Densidade de Energia calculada pela função de Weibull.

Tabela 5: Tabela retirada do Excel contendo a média das densidades com k=2.

V(m/s)	Frequência	%	Weibull	Densidade(W/m ²)
0	0	0	0	0
1	11145	0,211608567	0,384200169	0,235322603
2	15035	0,285467457	0,409644808	2,007259558
3	13158	0,249829118	0,155374676	2,569508701
4	7959	0,151116427	0,024143958	0,94644317
5	3932	0,074656338	0,001559155	0,119372774
6	1160	0,022024759	4,13149E-05	0,00546596
7	220	0,004177109	4,40253E-07	9,24916E-05
8	37	0,000702514	1,84543E-09	5,78728E-07
9	16	0,00030379	2,97665E-12	1,32911E-09
10	3	5,69606E-05	1,80854E-15	1,10773E-12
11	2	3,79737E-05	4,05549E-19	3,30619E-16
12	1	1,89869E-05	3,29186E-23	3,48411E-20
13	0	0	9,49524E-28	1,27774E-24
14	0	0	9,56329E-33	1,6073E-29
15	0	0	3,30732E-38	6,83685E-35
16	0	0	3,86522E-44	9,69706E-41
17	0	0	1,50336E-50	4,52394E-47
18	0	0	1,91774E-57	6,85035E-54
19	0	0	7,91124E-65	3,32362E-61
20	0	0	1,04127E-72	5,10221E-69
Mais	0			
	media da	densidade de	weibull	5,883465838 W/m ²
	media da	densidade da	frequencia	14,73230476 W/m ²

Fonte: Autoria própria.

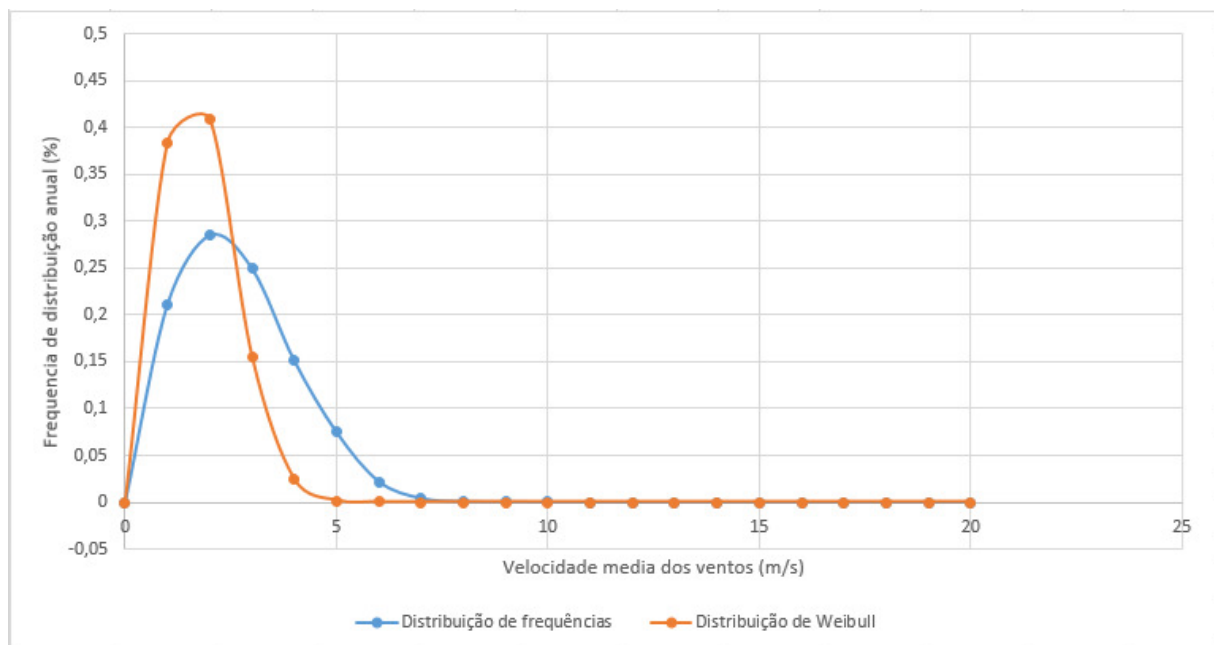


Gráfico 6: Gráfico retirado do Excel contendo a sobreposição das Distribuição de Weibull e da Distribuição das Frequências com k=2.

Fonte: Autoria própria.

A curva da distribuição de Weibull com o fator de forma igual a 2, não é adequado para análise dos dados apresentados. No gráfico 6 é possível perceber que ela não está ajustada tendo um pico de frequência muito maior que a distribuição de frequências e que as duas médias de Densidade de Energia são diferentes. Para ajustarmos o fator de forma a fim de obtermos a curva da distribuição de Weibull, que melhor se ajusta à distribuição anual dos ventos, deve se igualar a média da densidade de energia do vento anual e a média da densidade obtida da função de Weibull.

A função Solver do Microsoft Excel permite igualar as duas médias das densidades de maneira a definir um valor para o fator de forma que mais aproxima as curvas como apresentado na tabela 6 e no gráfico 7.

Tabela 6: Tabela retirada do Excel contendo a média das densidades como valor recalculado de $k=2,71$.

V(m/s)	Frequência	%	Weibull	Densidade(W/m ²)
0	0	0	0	0
1	11145	0,211608567	0,216039964	0,132324478
2	15035	0,285467457	0,339703636	1,664547817
3	13158	0,249829118	0,26595008	4,398149445
4	7959	0,151116427	0,12342267	4,838168648
5	3932	0,074656338	0,03532134	2,704290122
6	1160	0,022024759	0,006283178	0,831264433
7	220	0,004177109	0,000692979	0,145586161
8	37	0,000702514	4,70762E-05	0,014763086
9	16	0,00030379	1,95373E-06	0,000872363
10	3	5,69606E-05	4,91017E-08	3,00748E-05
11	2	3,79737E-05	7,407E-10	6,03847E-07
12	1	1,89869E-05	6,64809E-12	7,03634E-09
13	0	0	3,52008E-14	4,73684E-11
14	0	0	1,09049E-16	1,83279E-13
15	0	0	1,96085E-19	4,05343E-16
16	0	0	2,03085E-22	5,095E-19
17	0	0	1,20257E-25	3,61879E-22
18	0	0	4,04243E-29	1,444E-25
19	0	0	7,66096E-33	3,21848E-29
20	0	0	8,13106E-37	3,98422E-33
Mais	0			
	media da	densidade de	weibull	14,72999724 W/m ²
	media da	densidade da	frequencia	14,73230476 W/m ²

Fonte: Autoria própria.

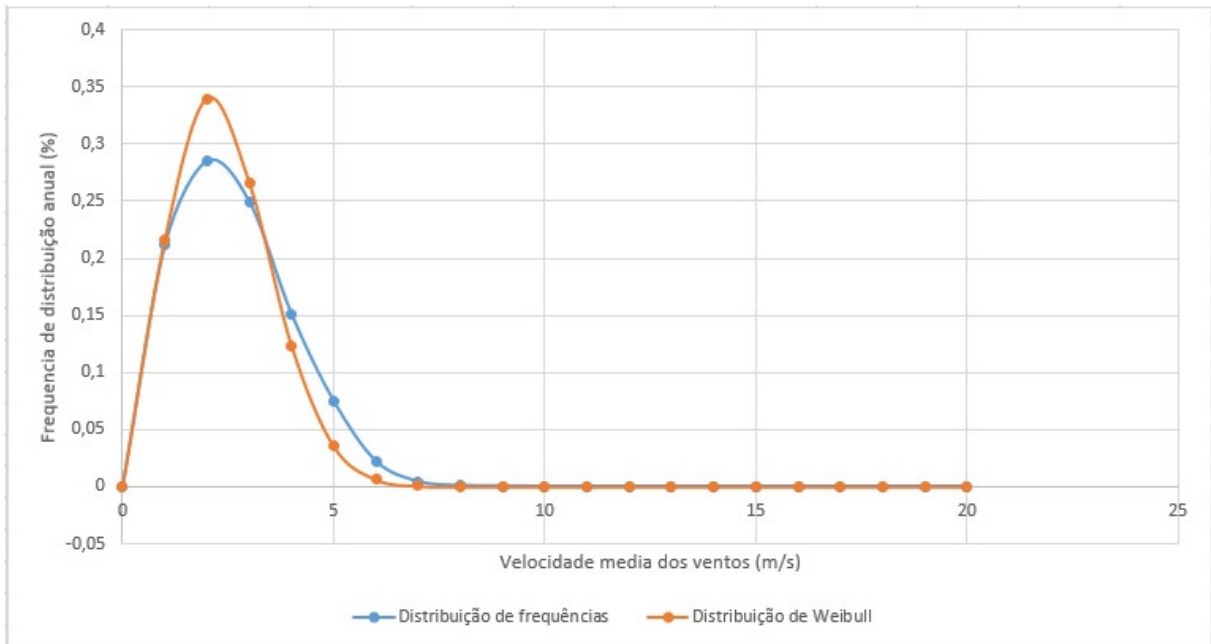


Gráfico 7: Gráfico retirado do Excel contendo a sobreposição das Distribuição de Weibull e da Distribuição das Frequências como valor recalculado de $k=2,71$.

Fonte: Autoria própria.

O fator de forma, encontrado igualando-se as médias das densidades, altera o valor do fator de escala, uma função dependente do valor do fator de forma, e altera a curva de Weibull. Desse modo a curva de Weibull representa os dados coletados da forma mais fiel para o objetivo de se analisar a potência disponível no local escolhido.

4.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA

A potência disponível no vento, que tem uma relação com o cubo da velocidade, é o fator mais importante quando se analisa a viabilidade de uma região disponível para instalação de geradores eólicos. No caso de regiões urbanas a velocidade do vento tende a ser mais baixa que em outras regiões e a área reduzida das turbinas dos micro aerogeradores reduz a potência gerada. O estudo da potência disponível permite fazer essa avaliação prévia de um local.

4.3.1 Disponível no vento

É possível, através da distribuição de Weibull combinada com a distribuição da frequência da densidade de energia disponível no vento, perceber quais as velocidades que são melhor aproveitadas. Sabendo que a tensão na saída do gerador varia com a velocidade do vento, essa percepção é essencial para projetar o conversor, já que a faixa de velocidades que

queremos aproveitar é a que gera mais potência no gerador e não a de velocidade mais frequente nem mais alta. O gráfico 8 mostra a curva da distribuição de Weibull combinada com a curva da frequência da densidade de energia e a tabela 7 os valores calculados.

Tabela 7: Tabela retirada do Excel contendo os valores da Distribuição de Weibull e da Distribuição das Frequências da densidade de energia.

<i>V(m/s)</i>	<i>Weibull</i>	<i>energia</i>	<i>%</i>
0	0	0	0
1	0,21604	0,132324	0,008983
2	0,339704	1,664548	0,113004
3	0,26595	4,398149	0,298584
4	0,123423	4,838169	0,328457
5	0,035321	2,70429	0,183591
6	0,006283	0,831264	0,056433
7	0,000693	0,145586	0,009884
8	4,71E-05	0,014763	0,001002
9	1,95E-06	0,000872	5,92E-05
10	4,91E-08	3,01E-05	2,04E-06
11	7,41E-10	6,04E-07	4,1E-08
12	6,65E-12	7,04E-09	4,78E-10
13	3,52E-14	4,74E-11	3,22E-12
14	1,09E-16	1,83E-13	1,24E-14
15	1,96E-19	4,05E-16	2,75E-17
16	2,03E-22	5,09E-19	3,46E-20
17	1,2E-25	3,62E-22	2,46E-23
18	4,04E-29	1,44E-25	9,8E-27
19	7,66E-33	3,22E-29	2,18E-30
20	8,13E-37	3,98E-33	2,7E-34

Fonte: Autoria própria.

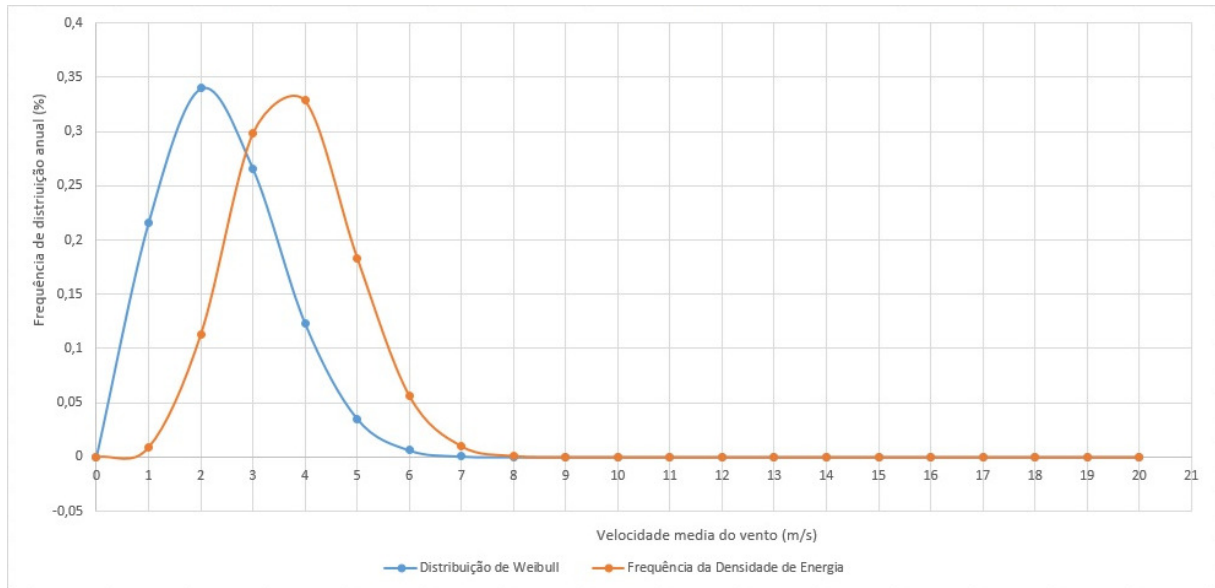


Gráfico 8: Gráfico retirado do Excel contendo a sobreposição das Distribuição de Weibull e da Distribuição das Frequências da densidade de energia.

Fonte: Autoria própria.

Embora a velocidade que seja mais constante durante o ano inteiro seja a velocidade de 2,22 m/s, a maior potência disponível o ano inteiro vem da faixa entre 3 e 4 m/s mesmo que estes apareçam com frequência menor. Em um projeto com variações de vento com velocidades mais altas esta curva destaca ainda mais a necessidade do estudo da densidade do vento, pois a escolha da região é em função da potência disponível no vento.

Com a velocidade média de 2,22 m/s a potência disponível por metro quadrado de turbina é de 6,7 Watts. Considerando perdas no gerador e o coeficiente de potência, esse número é ainda menor. Assim como o gerador que será utilizado neste trabalho, a grande maioria dos geradores comerciais não inicia a rotação das turbinas com velocidades inferiores a 3,0 m/s (GREENERGYSTAR, 2014).

5 CONVERSOR CC-CC BOOST MICROCONTROLADO

Este capítulo irá tratar sobre o projeto do conversor Boost, circuito de controle, e também a implementação da bancada na qual serão realizado os testes.

5.1 PROJETO DO BOOST

5.1.1 Definição da tensão de entrada e saída do Boost

O objetivo deste trabalho é desenvolver um conversor Boost de entrada variável, de 5 V a 12 V, e de saída fixa de 12 V. A escolha desses valores é justificada pelo ensaio realizado do gerador, demonstrado posteriormente. Um aspecto considerável para o projeto é que os componentes certos devem ser utilizados para que o circuito opere em condições favoráveis e em condução contínua. Portanto, houve a necessidade de estabelecer alguns critérios de projeto para cálculo dos componentes que possibilitaria um bom funcionamento do circuito.

Para que a realização deste projeto estivesse integrada ao nosso gerador, foi realizado um ensaio com o micro aerogerador para descobrir o valor de tensão que o conversor CC-CC Boost iria receber e assim fixar valores de entrada e saída.

Foi ligado o ventilador, e na frente colocado o gerador e o anemômetro, para medir a velocidade do vento. O ventilador foi ligado na potência máxima para que o gerador pudesse entregar a maior tensão possível e poder encontrar o limite na qual ele poderia trabalhar. Com a ajuda de um multímetro foi constatado que a tensão máxima gerada era 13,42 V em um vento de velocidade de 13,74 m/s, conforme figura 40, localizada na seção 5.4.

A partir deste resultado, a tensão máxima recebida pelo nosso conversor foi de 12 V, e por convenção, o valor de tensão mínima de 5 V, pois se esta tensão for menor, a corrente injetada no circuito poderia ser muito alta.

5.1.2 Definição da potência do conversor

A definição da potência do conversor está diretamente ligada com o potencial eólico do local. Neste caso, pode-se observar pela tabela 8 que para valores superiores a 7 m/s, que as frequências das velocidades diminuíram consideravelmente, e assim, por conveniência, as mesmas foram desprezadas para embasar o projeto do conversor no ponto que a velocidade é de 7 m/s. O valor de C_p é característica de cada gerador, como foi estabelecido pelo fabricante que a 12,5 m/s obtém-se 400 W de potência, utilizou-se a Equação 4 para definir C_p que é, aproximadamente, igual a 0,2178. Utilizando a Equação 4 novamente, variando a velocidade para se obter a potência, chegou-se à tabela abaixo, na qual consiste o potencial de geração da turbina fundamentado nos dados colhidos com o *data logger*, mais próximo do real, devido ao C_p .

Tabela 8: Potência x Velocidade do vento para $C_p = 0,2178$.

V [m/s]	Potência [W] ($C_p = 0,2178$)
0	0
1	0,204815393
2	1,638523146
3	5,530015618
4	13,10818517
5	25,60192416
6	44,24012495
6,9	67,28370003
6,95	68,75701396
6,97	69,35230949
6,99	69,95103117
7	70,25167989
8	104,8654814
9	149,3104217
10	204,8153933
11	272,6092884
12	353,9209996
12,5	400,030065

Fonte: Autoria própria.

Tendo em vista a tabela 8, percebe-se que a potência de 70 W está entre a velocidade de 6,99 m/s e 7 m/s, portanto, esta será a potência utilizada para o dimensionamento do conversor.

A partir dessa tabela pode-se gerar o gráfico 9 que representa o potencial de geração eólico baseado nos dados obtidos do anemômetro.

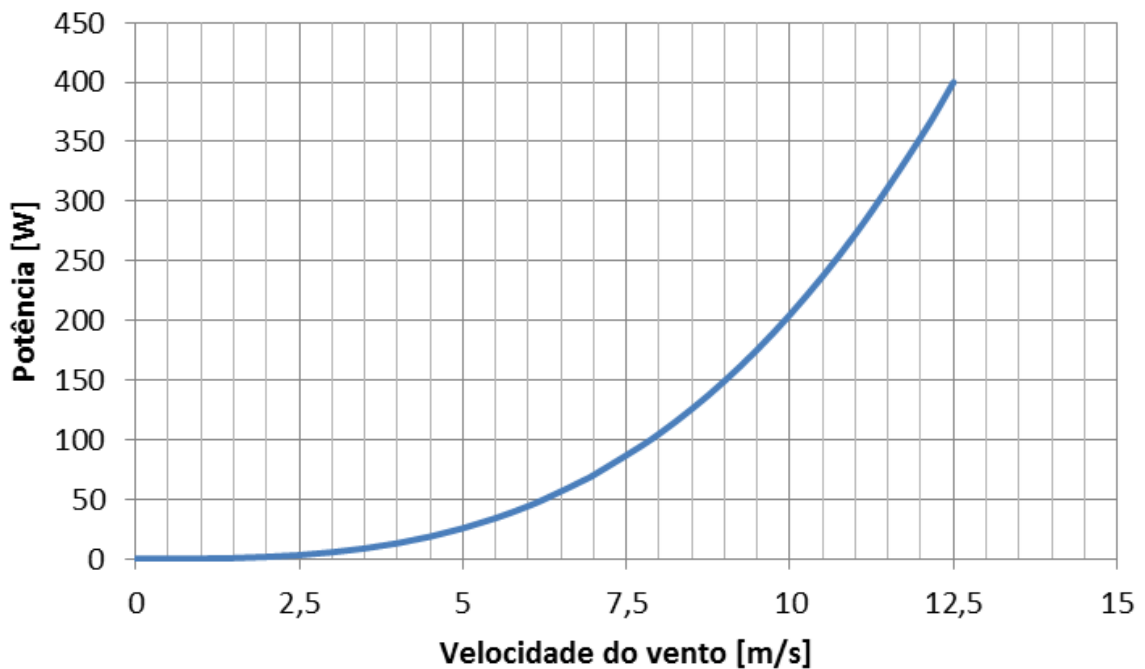


Gráfico 9: Potência x Velocidade do vento para $C_p = 0,2178$.

Fonte: Autoria própria.

Mesmo já definido a potência do conversor, foi projetado um conversor de menor potência a fim de realizar testes antes de fazer o circuito de maior potência. Medida esta tomada para se trabalhar com componentes mais acessíveis, baratos e também para se trabalhar com baixos parâmetros de corrente. Portanto, no desenvolvimento do primeiro protótipo, utilizou-se uma potência de 10 W, e em seguida iremos fazer o segundo protótipo de 70 W.

5.1.3 Projeto do conversor CC-CC Boost de saída fixa ($P = 10W$)

Este conversor de baixa potência será utilizado para o estudo de possíveis dificuldades antes da construção do conversor de 70 W. Dessa forma, para se obter o Boost de 10 W, foram definidos alguns parâmetros de projeto e com eles realizados os cálculos necessários para que o circuito opere em modo de condução contínuo. A tabela 9 contém os parâmetros utilizados:

Tabela 9: Parâmetros do projeto do conversor Boost de 10W.

Parâmetro	Valor
Tensão mínima de entrada (E_{\min})	5 V
Tensão de máxima de entrada (E_{\max})	12 V
Tensão de saída fixa (V_o)	12 V
Potência (P)	10 W
Ondulação de corrente de entrada (ΔI_{in})	10 %
Ondulação de tensão de saída (ΔV_o)	2 %
Frequência de chaveamento (f)	48 kHz

Fonte: Autoria própria.

5.1.3.1 Cálculo do indutor

Para obter o valor da indutância é utilizada a Equação (7), onde a corrente mínima será quando a tensão de entrada for 12 V, menos a ondulação de corrente, tem-se:

$$I_{in\min} = I_{in} - (\Delta I_{in}) = \frac{10}{12} - \left(\frac{10}{12} \cdot 0,1 \right) = 0,75 A$$

$$L_{crit} = \frac{E^2 (V_o - E)}{2 \cdot f \cdot V_o^2 \cdot I_{o\min}} = \frac{E^2 (12 - E)}{2 \cdot 48000 \cdot 12^2 \cdot 0,75}$$

Obtemos então, a expressão da indutância em função da tensão de entrada,

$$L_{crit} = \frac{E^2 (12 - E)}{10368000}$$

Plotando o gráfico 10, tem-se:

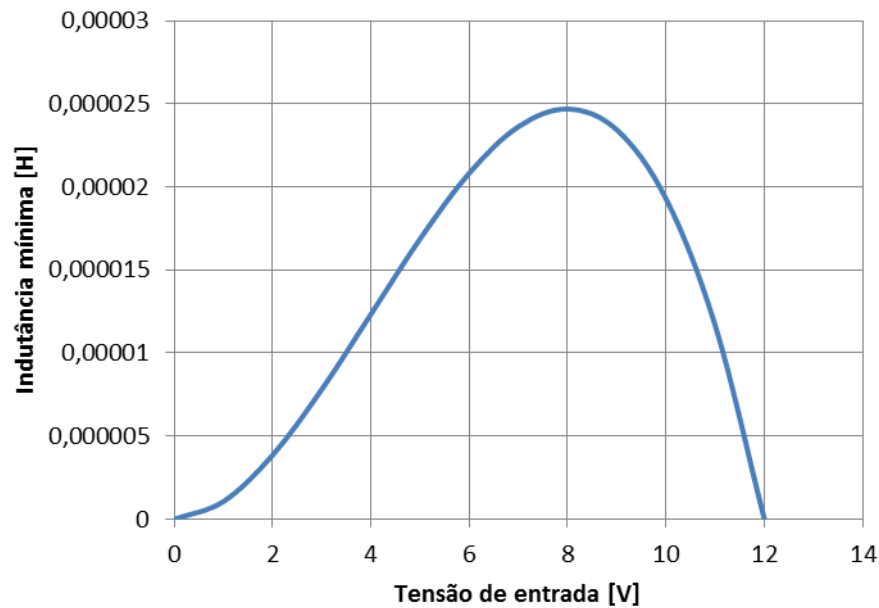


Gráfico 10: Indutância mínima em função da tensão de entrada para conversor de 10W.
Fonte: Autoria própria.

Observou-se que o valor da indutância mínima para utilizar no circuito é quando a tensão de entrada for 8 V, que será de aproximadamente 24,7 μH , contudo foi utilizado um indutor de 2,5 mH.

5.1.1.1 Construção do indutor

No indutor passará uma corrente máxima que pode ser calculada por:

$$I_{inm\acute{a}x} = I_{in} + (\Delta I_{in}) = \frac{10}{5} + \left(\frac{10}{5} \cdot 0,1 \right) = 2,2A$$

Portanto, foi utilizado um condutor AWG 19. Este condutor suporta uma corrente de até 2 A, corrente esta 0,2 A inferior a corrente máxima calculada, contudo, os testes que serão realizados em bancada demandarão baixíssima corrente tendo em vista a carga que será utilizada.

O núcleo utilizado é de formato toroidal de ferrite, modelo NT-23/14/8, segundo catálogo da Thornton (2008, p.109). Este núcleo possui as seguintes medidas: $\varnothing d = 14$ mm, $\varnothing D = 23$ mm e $h = 8$ mm. A figura 24 apresenta um esboço do núcleo utilizado.

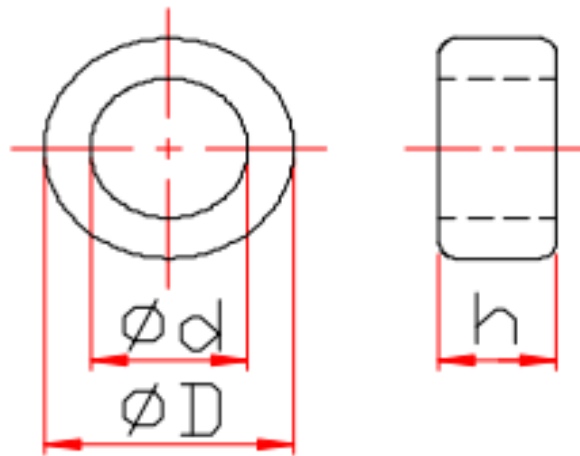


Figura 24: Toróide de ferrite, modelo NT-23/14/8 da Thornton.

Fonte: Catálogo da Thornton.

Para o cálculo do número de voltas do condutor, utilizou-se a expressão a seguir (Thornton, 2008):

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} \quad (8)$$

Onde:

N é o número de voltas do condutor;

L é a indutância desejada, em μH ;

Al é a indutância por unidade de espira.

Então, temos:

$$N = \sqrt{\frac{2500}{1,7}} \approx 38$$

Portanto, serão necessárias, aproximadamente 38 voltas para fornecer a indutância do projeto.

5.1.3.2 Cálculo do capacitor

Para calcular o capacitor, será utilizada a Equação (8), onde:

$$I_o = \frac{10}{12} = 0,833\text{A}$$

$E = 5\text{V}$, para situação mais crítica.

Portanto,

$$C_{\min} = \frac{0,833}{48000 \cdot 12 \cdot 0,02} \cdot \frac{(12 - 5)}{12} = 42,197 \mu F$$

O valor mínimo do capacitor de filtro na saída é de 42,197 μF , contudo, foram utilizados dois capacitores eletrolíticos de 470 μF em paralelo, resultando em uma capacitância de 940 μF .

5.1.3.3 Transistor

Como a corrente máxima que irá passar pelo indutor será de 2,2 A, deve-se escolher um transistor que atenda esta corrente e também que seja compatível para chaveamento do PIC16F877A. foi utilizado o IRF740 pois ele suporta até 10 A (Anexo D) e possui chaveamento rápido. Este componente é barato e facilmente encontrado nas lojas de componentes eletrônicos.

5.1.3.4 Diodo

De acordo com a gráfico 4 anteriormente apresentado, que apresenta as principais formas de onda do conversor Boost, a corrente máxima no indutor é igual a corrente máxima que o diodo receberá, portanto, o diodo deve suportar uma corrente de 2,2 A e também ser compatível com o chaveamento do transistor. Por questão de disponibilidade, foi utilizado o diodo NS8GT que é compatível com as especificações e suporta até 8 A. *Datasheet* do diodo NS8GT disponível em Anexo E.

5.1.4 Projeto do conversor CC-CC Boost de saída fixa (P = 70 W)

O procedimento para a realização do conversor de 70 W será basicamente o mesmo para o de 10 W. Será realizada uma mudança de topologia do circuito para dividir a corrente no circuito, uma vez que o circuito demandará alta corrente quando estiver com 5 V na entrada, contudo isto será explicado detalhadamente adiante. A tabela 10 contém os parâmetros utilizados:

Tabela 10: Parâmetros do projeto do conversor Boost de 70 W.

Parâmetro	Valor
Tensão mínima de entrada (E_{\min})	5 V
Tensão de máxima de entrada (E_{\max})	12 V
Tensão de saída fixa (V_o)	12 V
Potência (P)	70 W
Ondulação de corrente de entrada (ΔI_{in})	10 %
Ondulação de tensão de saída (ΔV_o)	2 %
Frequência de chaveamento (f)	48 kHz

Fonte: Autoria própria.

5.1.4.1 Cálculo do indutor

Para obter o valor da indutância é utilizada a Equação (7), onde a corrente mínima é quando a tensão de entrada for 12 V, contudo, a topologia convencional do Boost será alterada para uma associação de dois Boosts em paralelo, com o intuito de injetar em cada malha metade da corrente total, exigindo, componentes menos robustos. O que diferirá do cálculo anterior é que teremos que dividir a $I_{in\min}$ por 2, para se obter a menor corrente em cada indutor. Então temos:

$$I_{in\min} = \frac{1}{2} \cdot [I_{in} - (\Delta I_{in})] = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{70}{12} - \left(\frac{70}{12} \cdot 0,1 \right) \right] = 2,625 A$$

$$L_{crit} = \frac{E^2 (V_o - E)}{2 \cdot f \cdot V_o^2 \cdot I_{o\min}} = \frac{E^2 (12 - E)}{2 \cdot 48000 \cdot 12^2 \cdot 2,625}$$

Obtemos então, a expressão da indutância em função da tensão de entrada,

$$L_{crit} = \frac{E^2 (12 - E)}{36288000}$$

Plotando o gráfico 11, temos:

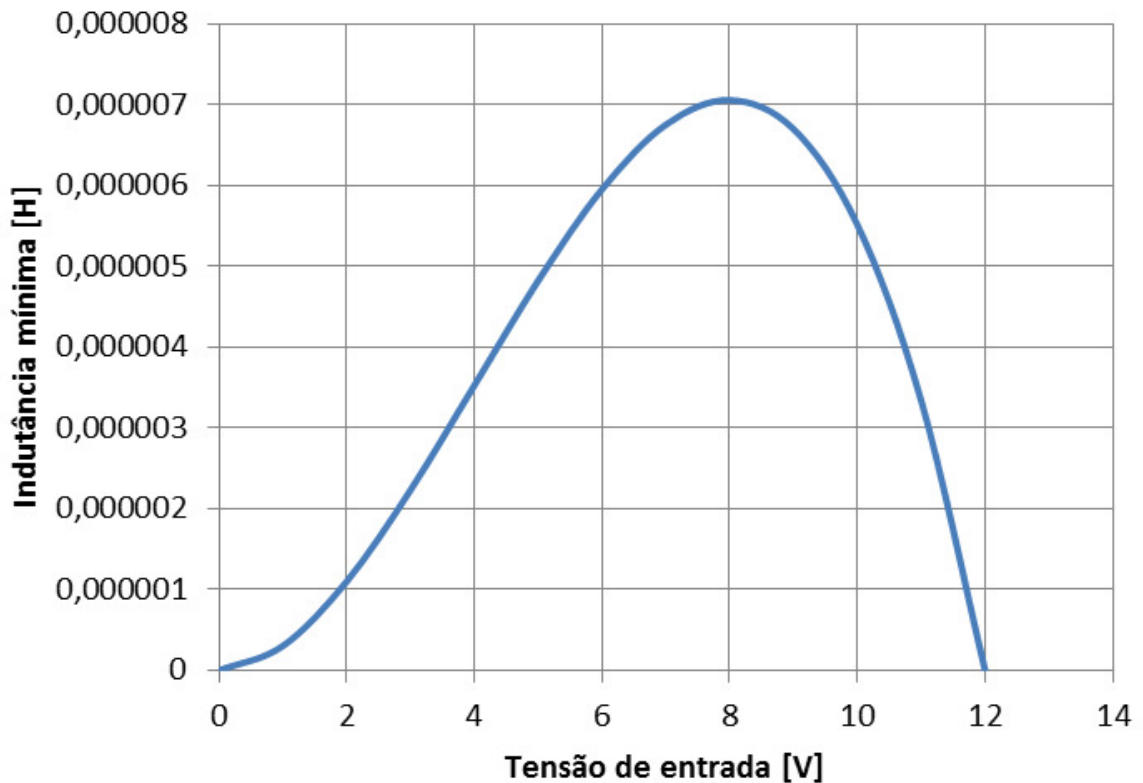


Gráfico 11: Indutância mínima em função da tensão de entrada para conversor de 70W.

Fonte: Autoria própria.

Observou-se que o valor da indutância mínima para utilizar no circuito é quando a tensão de entrada for 8 V, que será de aproximadamente 7,05 μH , portanto, para valores superiores o conversor irá operar em modo de condução contínuo. O núcleo foi envolvido com sete voltas do condutor, e com a ajuda de uma ponte LCR, o valor medido foi de 114,4 μH .

5.1.1.1 Construção do indutor

Pelos condutores dos indutores fluirá uma corrente máxima, isto ocorre quando a tensão é 5 V. A metodologia usada para o cálculo da corrente máxima é igual à utilizada para o conversor de 10 W, porém, dividindo a corrente em dois para definir a corrente máxima em cada um dos indutores. Logo:

$$I_{inm\acute{a}x} = \frac{1}{2} \cdot [I_{in} + (\Delta I_{in})] = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{70}{5} + \left(\frac{70}{5} \cdot 0,1 \right) \right] = 7,7 \text{ A}$$

A universidade nos disponibilizou um condutor de 2,5 mm^2 com isolamento PVC, que atende à demanda de corrente do indutor. Segundo o guia de dimensionamento de baixa

tensão da Prysmian (Anexo F), para dois condutores carregados de 2,5 mm², isolados em PVC e passando por um mesmo eletroduto tem-se uma corrente máxima de 19,5 A.

O núcleo utilizado foi o mesmo do Boost de 10 W, conforme figura 26. Para o cálculo de número de voltas do condutor, utilizou-se a Equação (9), mesma usada para o protótipo do Boost de 10W. Logo:

$$N = \sqrt{\frac{144,4}{1,7}} \approx 8$$

Portando, serão necessárias, aproximadamente oito voltas em cada indutor. Esse valor está bem próximo das sete voltas feitas, portanto o cálculo está correto.

5.1.4.2 Cálculo do capacitor

Para calcular o capacitor, será utilizada a Equação (8), onde:

$$I_o = \frac{70}{12} = 5,833A$$

$E = 5V$, para situação mais crítica.

Portanto,

$$C_{\min} = \frac{5,833}{48000 \cdot 12 \cdot 0,02} \cdot \frac{(12 - 5)}{12} = 295,36\mu F$$

O valor mínimo do capacitor de filtro na saída é de 295,36μF, contudo, utilizou-se dois capacitores eletrolíticos de 470μF em paralelo, resultando numa capacitância de 940μF.

5.1.4.3 Transistor

Como a corrente máxima que irá passar por cada indutor é de 7,7 A, utilizou-se um transistor que suporte esta corrente e também que seja compatível para chaveamento do PIC 16F877A. Utilizou-se o IRF740, pois ele suporta até 10A, possui chaveamento rápido, além de ser barato e também por ser facilmente encontrado nas lojas de componentes eletrônicos.

5.1.4.4 Diodo

Seguindo o mesmo procedimento utilizado para o Boost de 10W, a corrente máxima no indutor é igual a corrente máxima que o diodo receberá, portanto o diodo deve suportar uma corrente de 7,7 A e também ser ultra-rápido para acompanhar o chaveamento. Dessa forma utilizou-se o diodo NS8GT que suporta até 8 A.

5.2 MICROCONTROLADOR

O ganho do conversor Boost é controlado diretamente pelo tempo de fechamento da chave característica ao circuito, neste trabalho este fechamento é efetuado por um MOSFET que tem o papel de abrir ou fechar o caminho para o carregamento ou descarregamento do indutor. O MOSFET tem também a característica de permitir o controle dessa função de chaveamento através de um sinal recebido. O microcontrolador PIC16F877A tem as funções necessárias para prover este controle ao MOSFET, como será apresentado nesta parte do capítulo. A figura 25 mostra o esboço do funcionamento do sistema.

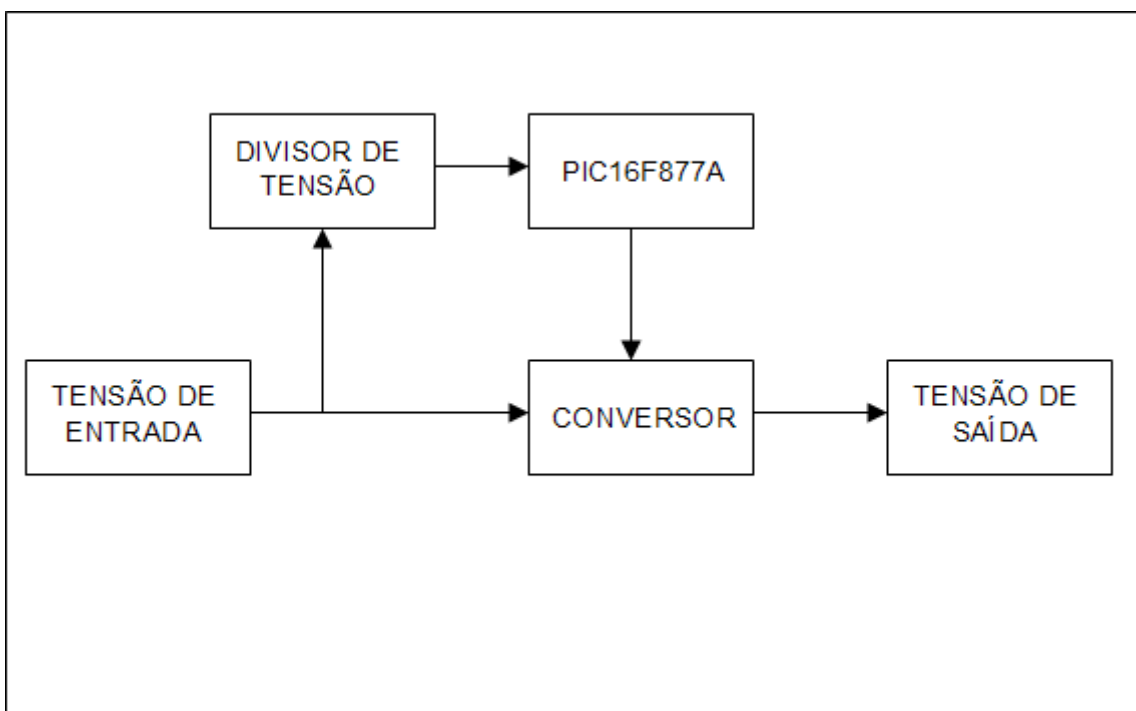


Figura 25: Esquema de funcionamento do circuito.

Fonte: Autoria própria.

5.2.1 Sensor de tensão

Para controlar o conversor Boost a primeira necessidade do circuito controlador é a detecção da grandeza na qual o controle é baseado. A premissa do projeto desenvolvido é controle da tensão de saída em função da tensão de entrada, logo o circuito controlador deve ser capaz de identificar e mensurar a tensão de entrada.

5.2.1.1 Divisor de tensão

A tensão de entrada do nosso conversor Boost é a tensão de saída do micro aerogerador. Conforme os dados obtidos em laboratório com simulação do vento a tensão

máxima encontrada foi 13,5 V contínua. Com o objetivo de reduzir essa tensão ao nível de trabalho do pino do microcontrolador, o divisor de tensão apresentado na figura 26 foi utilizado:

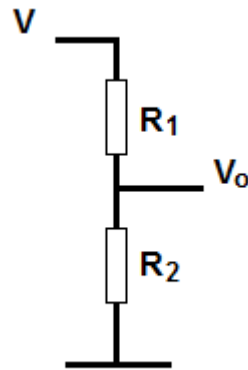


Figura 26: Esquema do divisor de tensão.

Fonte: Autoria própria.

Na figura acima R1 foi escolhido como uma resistência de 100 k Ω e R2 uma resistência de 5,6 k Ω . Com estes valores a tensão máxima que o microcontrolador pode receber será 0,72 V no caso de a tensão do gerador chegar a 13,5 V.

5.2.1.2 Conversão analógico-digital

A figura 27 apresenta a disposição dos pinos do microcontrolador utilizado neste trabalho:

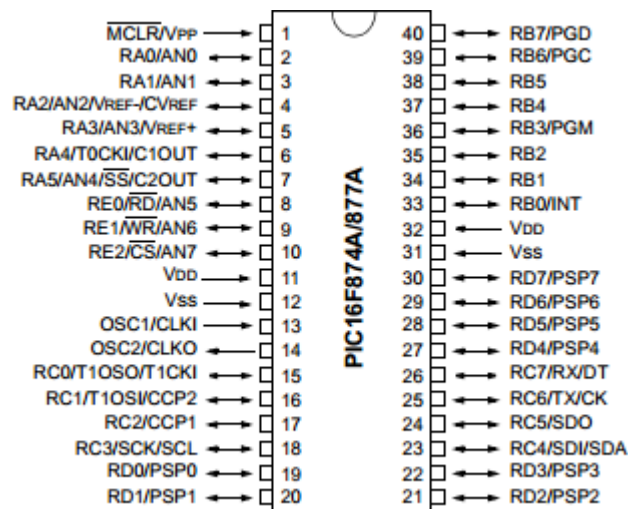


Figura 27: Disposição dos pinos do PIC16F877A.

Fonte: (Microchip).

O divisor de tensão entrega ao pino AN0 do microcontrolador, pino do módulo conversor analógico-digital, uma tensão máxima de 5 V. Esta tensão é um sinal analógico e o microcontrolador tem a capacidade de interpretar seu nível de 0 V até 5 V. Para esta medida poder ser analisada pelo programa interno do microcontrolador ela é convertida para digital. A conversão do sinal para o formato de 10 bits permite o microcontrolador trabalhar com a seguinte precisão:

$$\text{resolução} = \frac{5V}{1023} = 4,88mV$$

O valor da tensão de entrada em formato digital é armazenado na memória do microcontrolador e disponibilizada ao programa do microcontrolador capaz de interpretar o número no formato digital. Esta operação é repetida a cada ciclo do programa mantendo o valor da tensão atualizado no microcontrolador.

5.2.2 Algoritmo

Um circuito composto de um sensor de tensão e um conversor Boost, que dotado de um MOSFET pode ser controlado por um sinal PWM, para ser autônomo precisa de um dispositivo de controle. O circuito desenvolvido conta com um microcontrolador 16F877A para executar esta função. Através de suas características já apresentadas o microcontrolador recebe e interpreta a tensão de entrada, executa o programa desenvolvido especificamente para o projeto e fornece o sinal PWM necessário para o conversor funcionar de acordo com o que foi definido.

O algoritmo desenvolvido para este projeto está apresentado no fluxograma da figura 28:

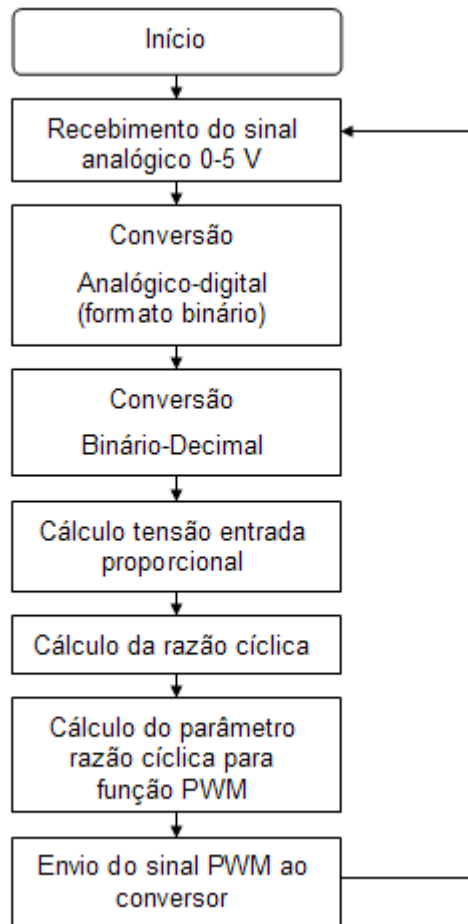


Figura 28: Fluxograma da programação do microcontrolador.

Fonte: Autoria própria.

O primeiro passo do programa é converter o valor da tensão de entrada, adquirido através do pino AN0 e convertido de analógico para digital, para a base decimal.

A equação da razão cíclica demonstrada no capítulo 3 permite definir qual a razão cíclica para quaisquer valores de tensão de entrada e saída fornecidos. Com o objetivo de ter a tensão de saída fixa no projeto, a tensão de saída foi definida como 12 V para o cálculo. Uma vez que a tensão de saída é fixada a razão cíclica depende apenas da tensão de entrada. O programa, dotado do valor da tensão de entrada adquirida pelo sensor e o valor da tensão de saída fixado pelo projeto, calcula a razão cíclica. Este valor de razão cíclica é necessário para manter a tensão de entrada fixada no valor definido no projeto.

O próximo passo do programa é calcular o valor que precisa ser incluído na função que vai definir a razão cíclica. Este valor pode variar de 0 à 255, parâmetro característico do controlador, e para representar a razão cíclica desejada basta multiplicar o seu valor por 255, com 0 representando 0 de razão cíclica e 255 representando 1. O sinal com este valor fica

então disponível, com a frequência de 48 kHz definida no programa, no pino CCP1 do microcontrolador. O programa contendo o algoritmo está disponível no apêndice A.

O software utilizado para escrever o programa foi o MikroC e a linguagem de programação utilizada foi linguagem C. O MikroC foi escolhido devido a familiaridade dos autores e por apresentar a facilidade de exportar o programa desenvolvido no formato adequado para ser utilizado. O arquivo é gravado no PIC16F877A através de um gravador comum ligado a um computador por uma saída USB, utilizando o próprio programa MikroC.

5.2.3 Simulação

O software Proteus foi utilizado para simular o circuito de controle do projeto. A figura 29 apresenta o esquema de ligação dos componentes do circuito:

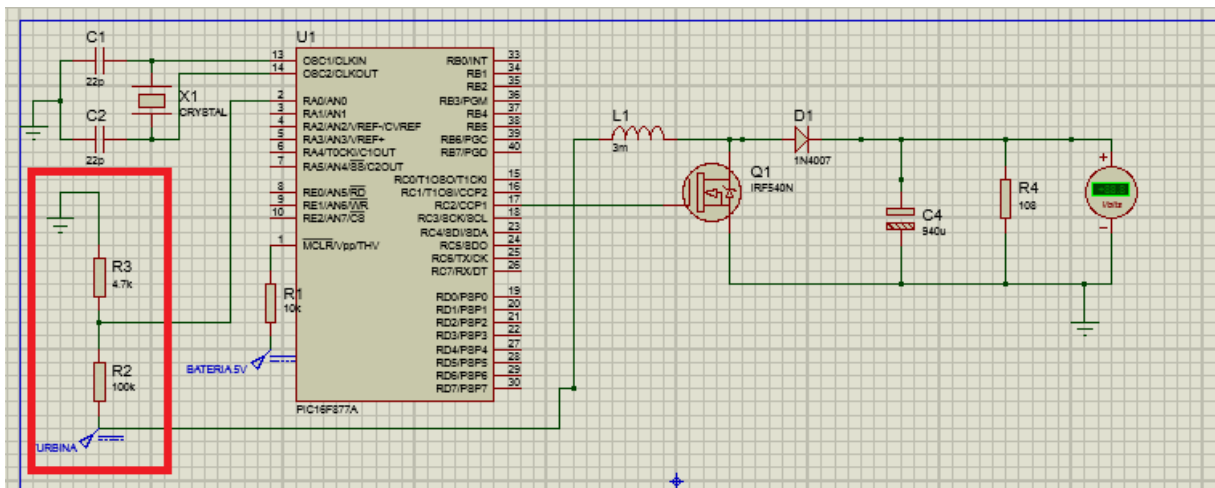


Figura 29: Esquema da simulação em ambiente virtual.

Fonte: Autoria própria.

Em destaque na figura 29 está o divisor de tensão utilizado no projeto alimentado por uma fonte de tensão que representa o micro aerogerador, a mesma fonte alimenta o conversor Boost. A disponibilidade e disposição dos pinos do microcontrolador na figura 29 não são condizentes com o formato real do PIC16F877A, são apenas uma representação para simulação. O osciloscópio virtual disponível no programa foi utilizado para análise do funcionamento. A figura 30 apresenta a razão cíclica no osciloscópio para uma tensão de entrada de 6 V para a qual esperamos uma razão cíclica de 0,5 conforme demonstrado no capítulo 3.

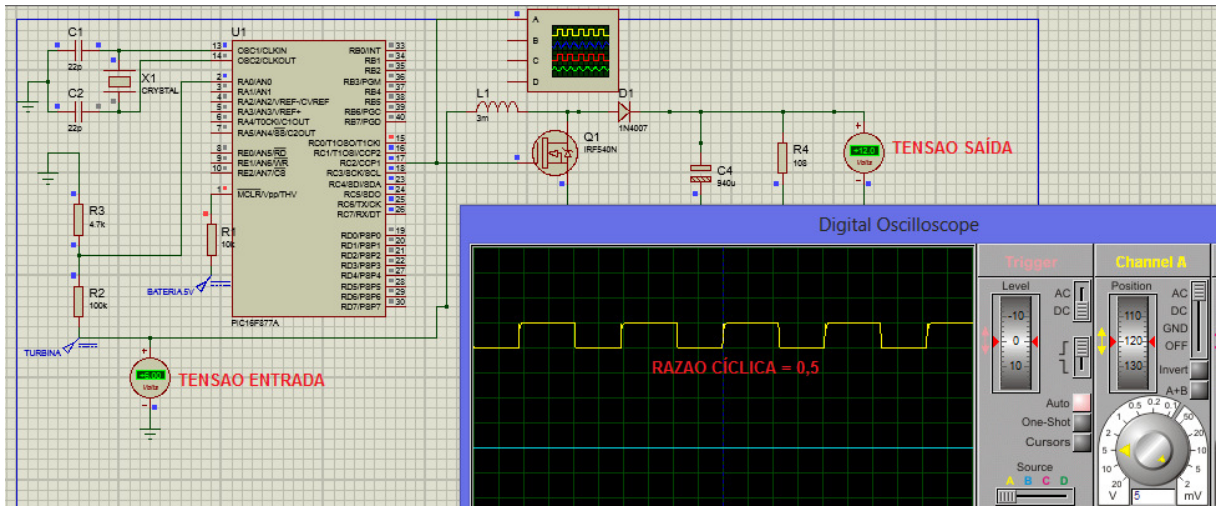


Figura 30: Simulação do circuito de controle.

Fonte: Autoria própria.

A Simulação em ambiente virtual forneceu resultados satisfatórios quanto as capacidades do microcontrolador escolhido e também demonstrou que o programa desenvolvido é viável para o controle do conversor.

5.3 CONFEÇÃO DO CIRCUITO

Uma das vantagens da simulação do circuito de controle no Proteus é a facilidade para desenhar o esquema do circuito real. Dentro do programa existe uma função que dispõe os componentes automaticamente e desenha as trilhas de ligação entre eles automaticamente, incluindo a distribuição dos pinos de componentes como o PIC16F877A. Para a confecção do esquema final dos circuitos do projeto foi utilizada uma distribuição manual das trilhas e componentes para melhor visualização do projeto. As figura 31 contém o esquema desenvolvido pela equipe para o circuito de controle utilizado no projeto.

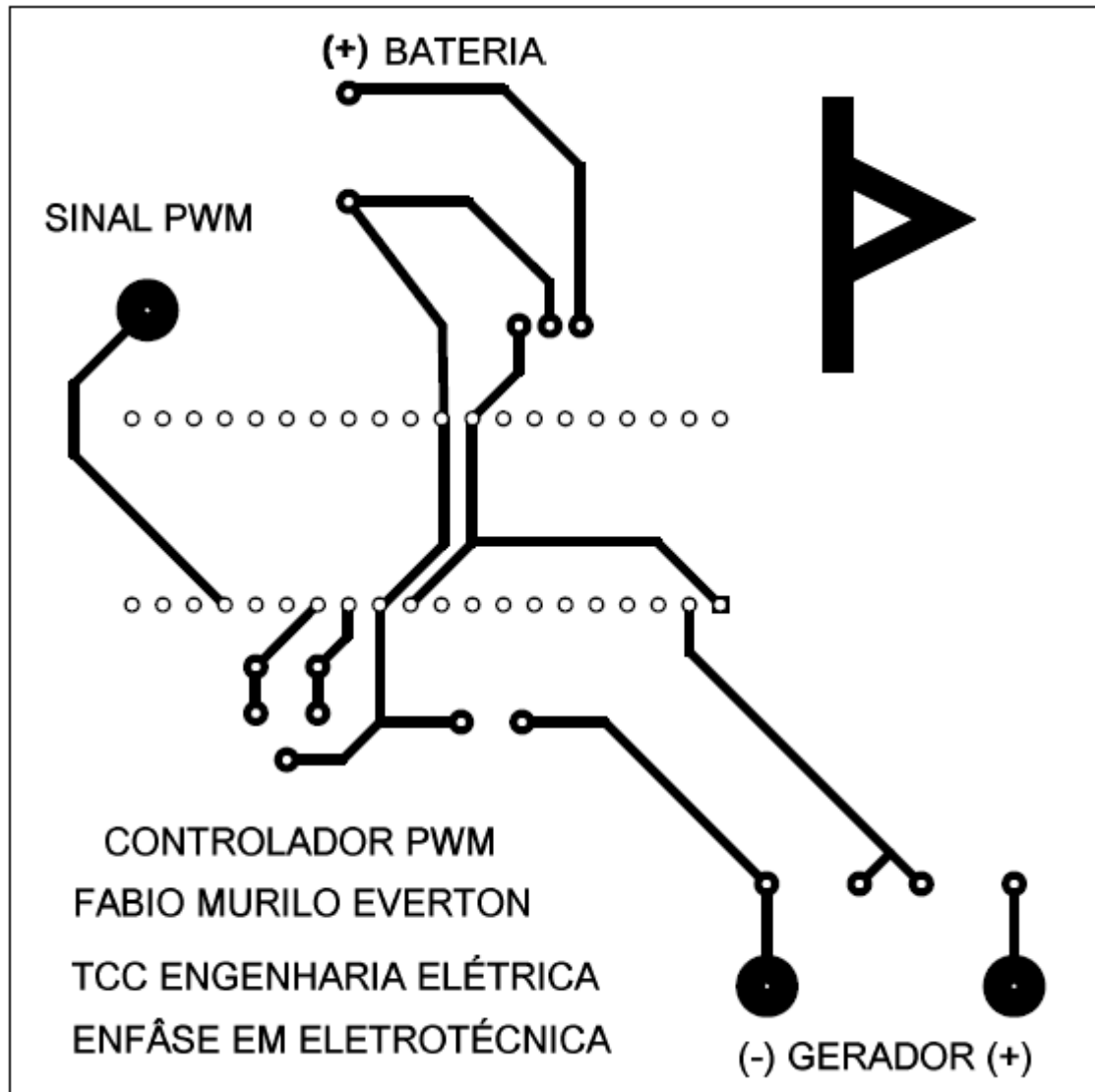


Figura 31: Esquema do circuito de controle projetado no Proteus.

Fonte: Autoria própria.

O desenho impresso é transferido com auxílio de um ferro quente para a face de cobre de uma placa de 10x10 cm de fenolite, que depois de imersa em uma solução de perclorato de ferro está pronta para fixação dos componentes. A figura 32 mostra o resultado do banho da placa na solução aquosa de perclorato de ferro.

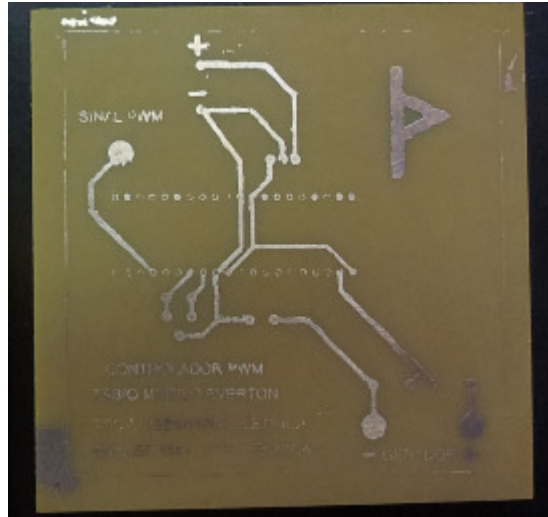


Figura 32: Placa de controle corroída.

Fonte: Aatoria própria.

Após o processo de perfuração, fixação dos bornes e soldagem dos componentes o circuito está pronto para ser testado. Este método tem a vantagem de ser barato, exigir pouca familiaridade com confecção de circuitos e ser facilmente replicável e adaptável. A figura 33 mostra o circuito de controle e o circuito do conversor de 10W prontos para os testes.

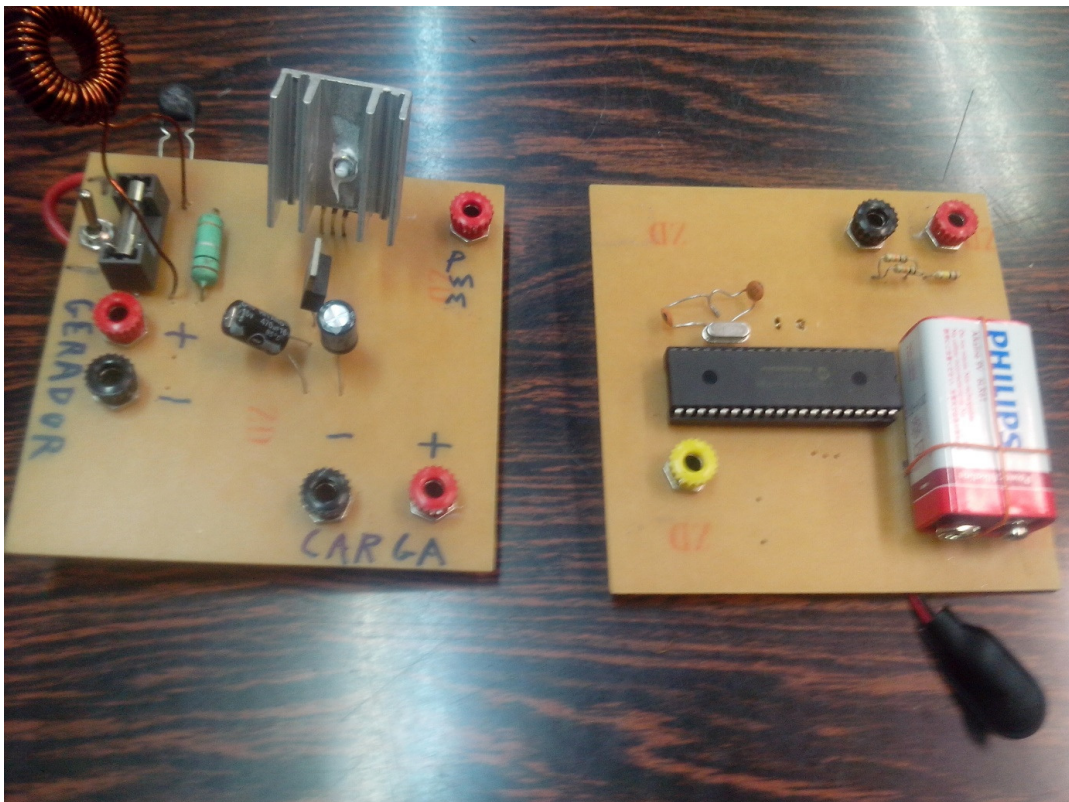


Figura 33: Circuito de controle e circuito conversor Boost (10W).

Fonte: Aatoria própria.

5.4 BANCADA DE TESTES

A bancada de testes para o desenvolvimento da parte experimental foi construída, em sua maior parte, com recursos da UTFPR campus Curitiba, utilizando-se instrumentação e equipamentos tipicamente aplicados em parques eólicos para medição da velocidade do vento, permitindo o estudo do comportamento de um micro aerogerador em um ambiente controlado e monitorado.

5.4.1 Descrição da bancada de teste

No sistema montado na figura 34, o gerador de vento é composto por um inversor de frequência que tem a função de controlar um motor de potência 4 CV e rotação nominal 3460 rpm (Anexo A), acoplado a um rotor aletado com pás curvadas para frente, também conhecido como rotor sirocco. Este rotor é alocado dentro de uma coifa que funciona como uma fonte de vento para que o micro aerogerador possa ser testado. Ligado diretamente ao bocal da coifa está o túnel de vento, que tem a função de uniformizar e direcionar o máximo de vento possível às pás da micro turbina. Para medição da velocidade do vento incidente, será instalado um anemômetro em conjunto com um *data logger* para aquisição de dados. Por fim, a micro turbina eólica será alocada logo à frente do anemômetro. Com isso, os dados de vento obtidos no *data logger* serão os mesmos incidentes nas pás.

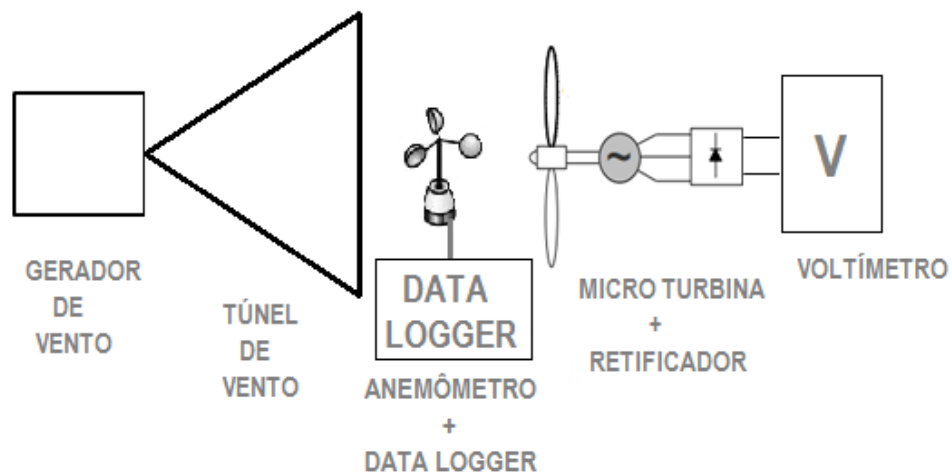


Figura 34: Disposição da bancada de testes.

Fonte: Autoria própria.

O gerador de vento utilizado nos testes é de fabricação WEG, e como foi dito anteriormente, utiliza um inversor de frequência para controlar a velocidade do motor. O inversor utilizado é o CFW09 (Anexo B). Já o rotor sirocco, utilizado para efetiva geração de vento, abrange uma gama de volume de ar e pressão que atende basicamente a todas as necessidades do ramo. As características do rotor e da corrente no motor em função da sua rotação síncrona, está especificada no Anexo C. O gerador de vento incluindo todos os itens descritos acima está ilustrado na figura 35.



Figura 35: Gerador de vento. Fonte: Própria.

Fonte: Autoria própria.

A estrutura do túnel de vento foi construída com ajuda da serralheria da UTFPR campus Curitiba e dimensionada de acordo com o diâmetro das pás da turbina de 1,4 m. Com 1,5 m de diâmetro, o túnel homogeniza o vento por meio de uma grade, fazendo com que a turbulência da saída da coifa fique mais estável. O problema desse sistema é que foram constatadas perdas significativas quando comparado com o sistema sem túnel.

O *data logger* e o anemômetro utilizados nos testes em bancada são da NRG System, mesma marca e modelo conforme citado no Capítulo 3. A bancada completa está ilustrada nas figuras 36 e 37.



Figura 36: Túnel e gerador de vento.

Fonte: A autoria própria.

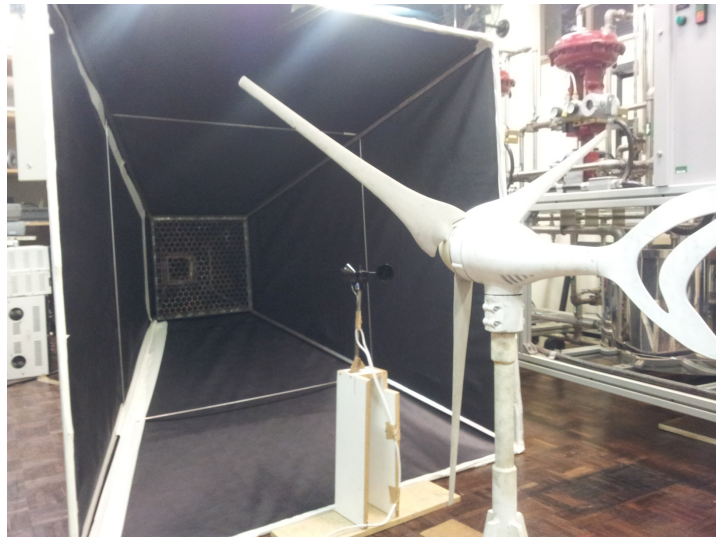


Figura 37: Túnel de vento, anemômetro e micro turbina.

Fonte: A autoria própria.

5.4.2 Testes da Bancada

Nesta seção serão apresentados os testes da bancada para validar sua efetividade. Serão descritos os procedimentos de ajuste e conexão dos equipamentos. Também serão apresentados os testes de validação na forma de tabelas e gráficos.

Os testes da bancada foram realizados de duas maneiras: com o túnel de vento e sem o túnel de vento, para testar a eficácia desse elemento. Para realizar o procedimento de ensaio sem o túnel, foi necessário apenas direcionar o ventilador em direção do anemômetro e do micro aerogerador. O primeiro teste foi realizado com o gerador à vazio, ilustrado nas figuras 38 e 39. A primeira mostra a velocidade do vento da partida do gerador, que foi de 3,03 m/s, e na segunda, uma das tensões mais altas alcançada, que resultará na relação entre a tensão gerada e velocidade do vento, ilustrado na tabela 11, no gráfico 12.



Figura 38: Partida do gerador em 3,03 m/s.

Fonte: Autoria própria.



Figura 39: Gerador atinge sua tensão nominal em 11,83 m/s.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11: Relação entre tensão gerada e velocidade do vento sem carga.

Velocidade (m/s)	Tensão (V)
3,03	0,12
3,41	1,02
3,79	2,16
4,18	2,91
4,56	3,48
6,09	4,56
7,24	5,58
8	7,55
9,15	9,45
9,91	10,36
10,3	11,06
11,83	11,98
12,59	12,35
13,74	13,42

Fonte: Autoria própria.

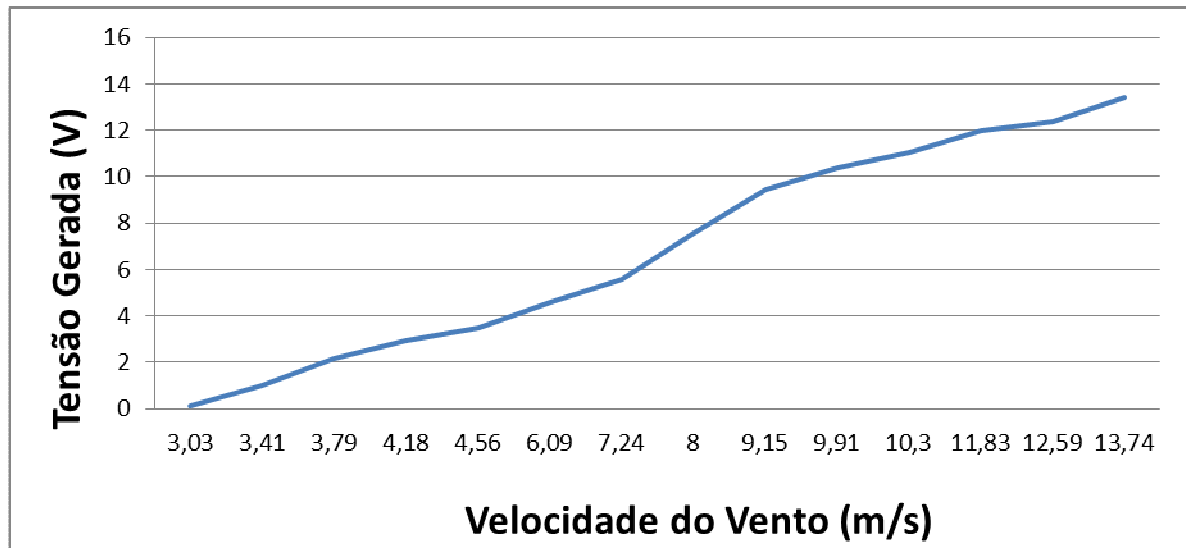


Gráfico 12: Relação entre tensão gerada e velocidade do vento-à vazio.

Fonte: Autoria própria.

Já o segundo teste foi realizado com a utilização do túnel de vento. Para que este procedimento de ensaio desse certo, foi necessário, antes de tudo, ajustar as posições do túnel e do gerador de vento para que não houvesse nenhum desalinhamento ou desacoplamento, evitando assim o vazamento de ar e, conseqüentemente, diminuição da potência oferecida pelo gerador de vento à micro turbina.

Mesmo tomando tais cuidados, nesta configuração as perdas aumentaram devido à grade metálica colocada a 30 cm do início do túnel para tentar homogenizar o perfil turbulento do vento que sai do ventilador. Conforme figura 40 e 41, estas perdas foram evidenciadas na comparação da tensão máxima gerada nos dois sistemas testados à vazio.

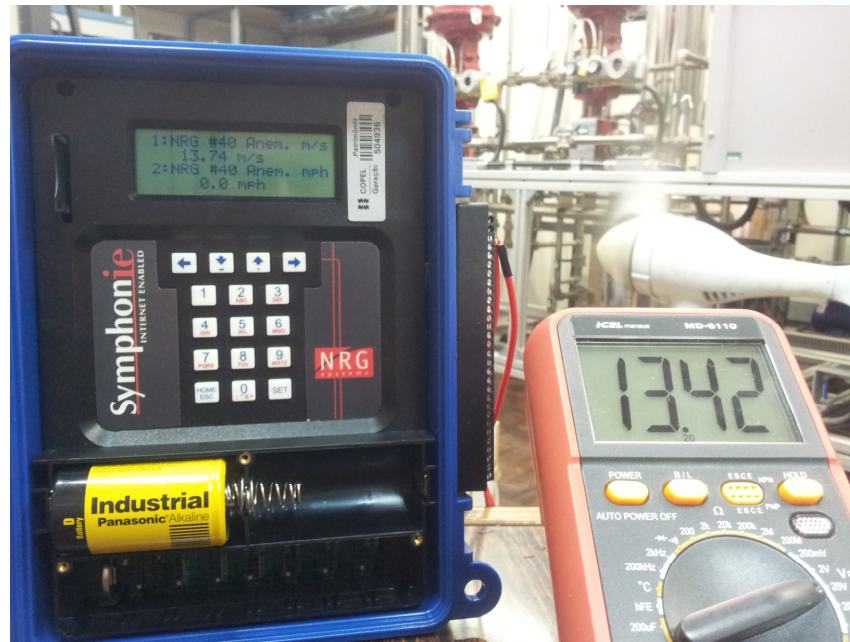


Figura 40: Tensão máxima gerada sem túnel de vento.

Fonte: Autoria própria.



Figura 41: Tensão máxima gerada com o túnel de vento.

Fonte: Autoria própria.

Os testes á vazio apresentaram resultados positivos quanto ao funcionamento do micro aerogerador. Foi concluído que o túnel de vento construído para o trabalho apresentava alto nível de perdas energéticas, sendo excluído dos testes realizados na sequência.

6 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados do circuito projetado no capítulo anterior. Os testes foram realizados em laboratório com equipamentos capazes de simular as condições nas quais o circuito deve ser capaz de funcionar.

6.1 CIRCUITO DE CONTROLE

O teste em bancada do circuito de controle foi realizado com auxílio de duas fontes de tensão reguladas disponibilizadas pela UTFPR. Uma das fontes foi utilizada para alimentar o PIC16F877A com tensão constante de 5 V no lugar da bateria de 9 V algumas vezes nas quais uma bateria não estava disponível. A outra fonte foi utilizada para simular a tensão de entrada do circuito de controle, ou a tensão de saída do micro aerogerador. Um osciloscópio digital foi utilizado para capturar o sinal de saída do microcontrolador. A disposição dos equipamentos e do circuito é mostrada na figura 42 e a imagem do osciloscópio é mostrada na figura 43.

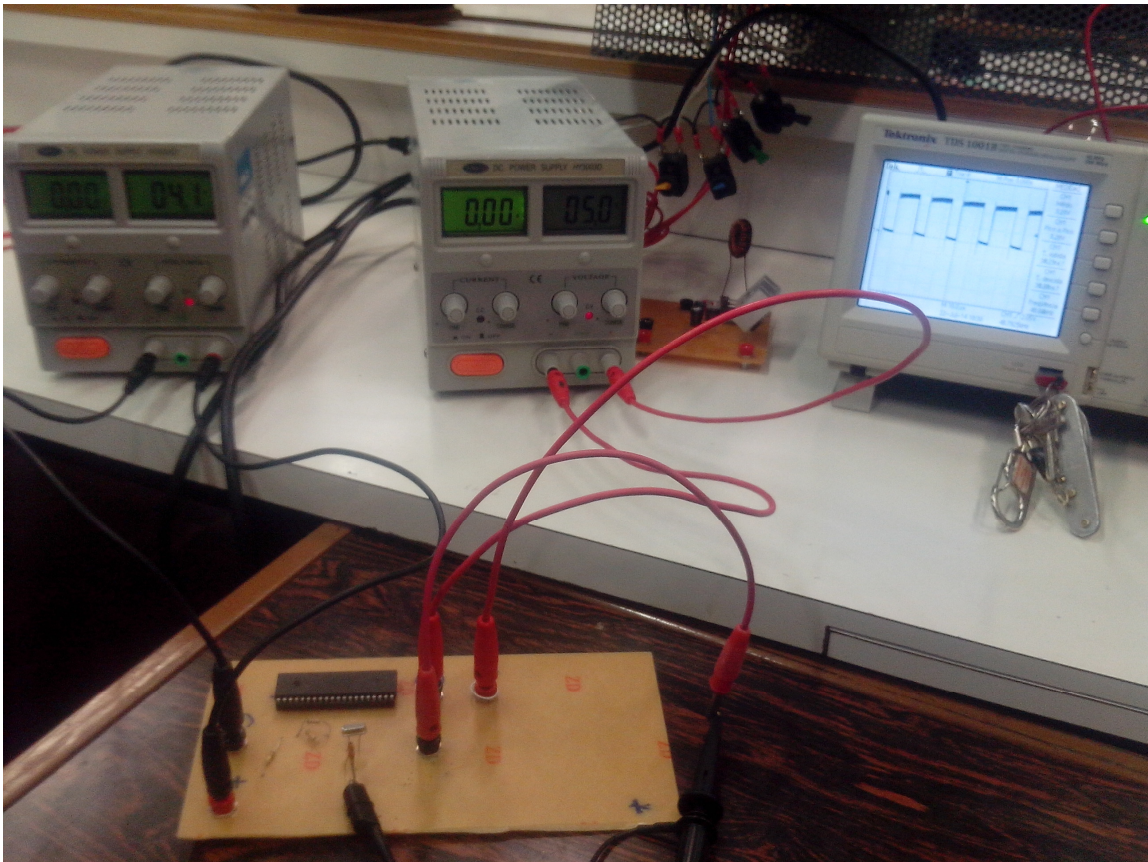


Figura 42: Esquema para teste do circuito controlador.

Fonte: Autoria própria.

A figura contém o sinal relativo a uma tensão de entrada de 6 V e foi capturado diretamente do osciloscópio digital.

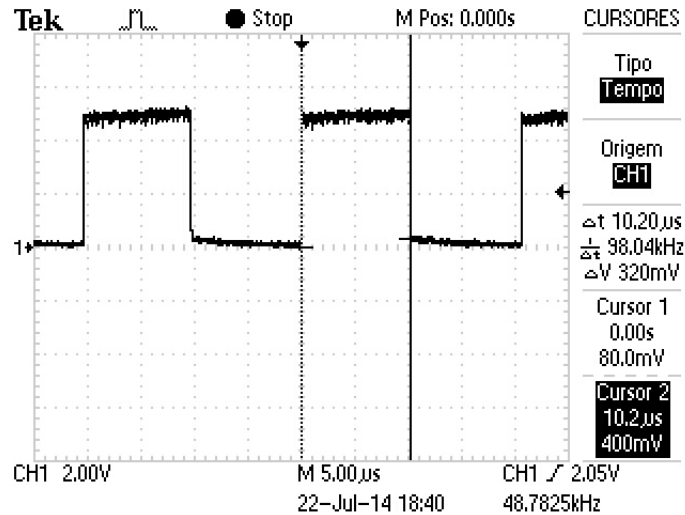


Figura 43: imagem adquirida com auxílio do osciloscópio digital.

Fonte: Autoria própria.

O valor teórico para que deve ser encontrado para uma tensão de entrada de 6V é 0,5. A razão cíclica da figura 43 pode ser calculada dividindo o Δt pelo período, ou pelo inverso da frequência. A razão cíclica da figura 43 acima é:

$$Dc = \frac{t_c}{T} = \frac{10,2 \times 10^{-6}}{2,083 \times 10^{-5}} = 0,49$$

Um valor muito próximo do valor teórico.

A tensão de entrada foi variada manualmente de 2 V até 11 V e os valores da razão cíclica calculados como demonstrado anteriormente, os valores demonstrados na tabela 12 foram encontrados.

Tabela 12: Resultados do teste de controle.

Tensão de entrada (V)	Δt (μs)	Razão cíclica medida	Razão cíclica teórica	Erro relativo (%)
2	17	0,82	0,83	1,6
3	15,2	0,73	0,75	2,67
4	13,6	0,65	0,67	2,5
5	11,8	0,57	0,58	2,29
6	10,2	0,49	0,5	2,00
7	8,6	0,41	0,42	1,6
8	6,8	0,33	0,33	1,00
9	5,2	0,25	0,25	0,00
10	3,4	0,16	0,17	4,00
11	1,8	0,09	0,08	8,00

Fonte: Autoria própria.

Embora o erro relativo observado na tabela 12 para valores de tensão maiores que 9 sejam maiores que 3%, o erro na tensão de saída do circuito diminui conforme a tensão de entrada se aproxima da tensão de saída. Isto pode ser visto na tabela 13 abaixo.

Tabela 13: Resultados do teste de controle.

Tensão de entrada (V)	Tensão de saída adquirida (V)	Tensão de saída teórica (V)	Erro relativo (%)
2	11,11	12	7,4
3	11,11	12	7,4
4	11,42	12	4,76
5	11,62	12	3,1
6	11,76	12	1,96
7	11,86	12	1,12
8	11,94	12	0,49
9	12	12	0
10	11,90	12	0,79
11	12,08	12	0,73

Fonte: Autoria própria.

Um conversor Boost que não apresente perdas internas quando controlado por este circuito teria estes erros. Alguns erros podem ter sido amplificados pela imprecisão das medidas causadas pela manipulação do osciloscópio

A presença desses erros é também uma característica do tipo de controle utilizado. Como a razão cíclica é definida com base apenas na tensão detectada na entrada, o controlador não está compensando perdas do circuito ou outras causas de erro. O controlador com controle pela tensão de entrada, com a programação utilizada neste projeto, só apresentaria uma saída realmente fixa para um circuito ideal, ou seja, sem perdas.

6.2 CONVERSOR CC-CC BOOST MICROCONTROLADO

6.2.1 Teste do conversor microcontrolado

O teste do conversor Boost microcontrolado incluiu a utilização de uma fonte de tensão utilizada para simular o micro aerogerador e o circuito de controle para fornecer o sinal de controle ao MOSFET. O circuito de controle foi utilizado pra este teste por ter apresentado resultado satisfatório no teste anterior. A figura 44 mostra a disposição dos equipamentos e circuitos para o teste.

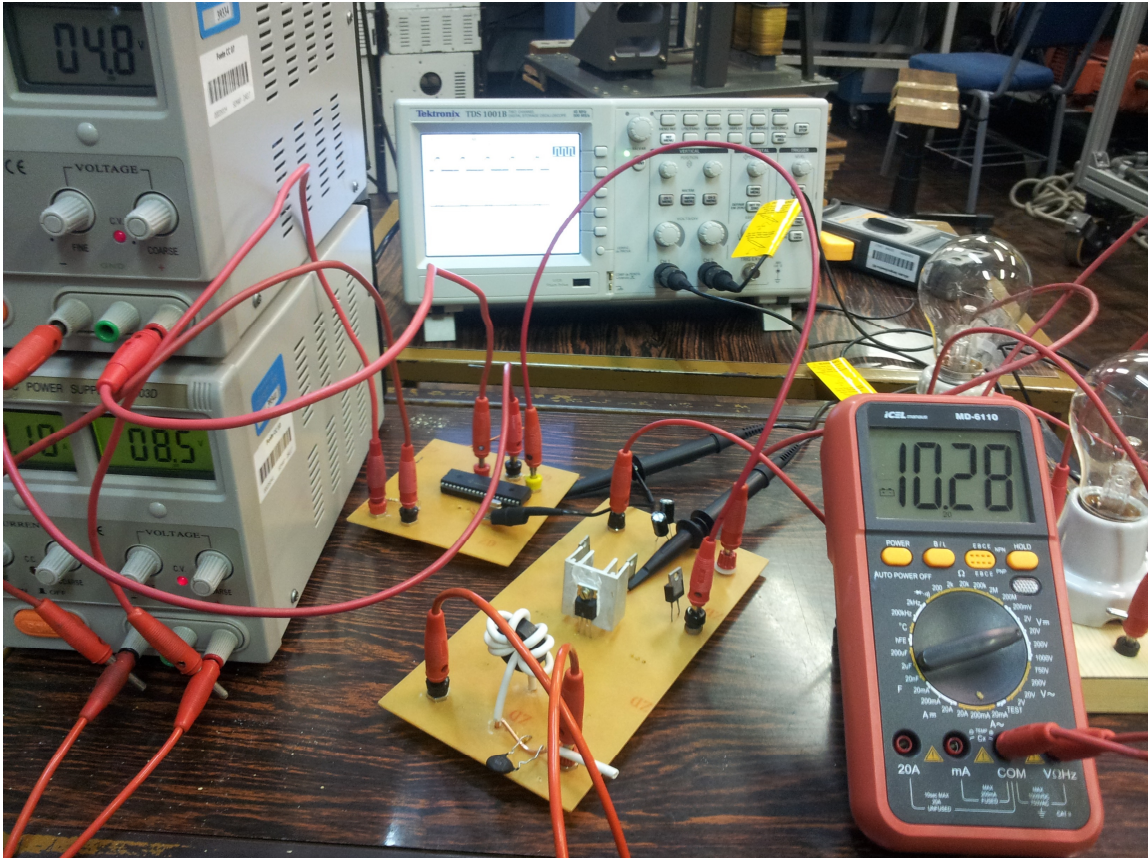


Figura 44: Esquema do teste do Boost de 70 W microcontrolado.

Fonte: Autoria própria.

Como é possível ver na figura 44 a fonte de tensão que simula o micro aerogerador é conectada ao circuito do Boost e ao divisor de tensão utilizado como sensor localizado no circuito de controle, o sinal do microcontrolador é conectado ao MOSFET do circuito do Boost e duas lâmpadas, com resistência total de 108Ω , são ligadas na saída do conversor como carga. A tensão fornecida pelo gerador é regulada manualmente para os valores desejados e a tensão na carga é mostrada no multímetro digital como na visto figura 44. A tabela 14 apresenta os resultados obtidos nos testes para uma função de saída fixada em 12 V:

Tabela 14: Resultados para o teste do Boost microcontrolado.

Tensão de entrada (Volts)	Tensão de saída (Volts)	Erro na saída(%)
5	10,2	15,00
6	10,6	11,66
7	11,1	7,50
8	11,3	5,83
9	11,0	8,33
10	11,0	8,33
11	11,2	6,66

Fonte: Autoria própria.

Para o segundo teste, foram anexados na placa junto ao segundo diodo, mais um indutor e mais um MOSFET em paralelo à primeira linha que contém os mesmos componentes, conforme a figura 45 apresenta. Com isto temos 2 conversores Boost em paralelo, com o intuito de diminuir as correntes, como mostra a figura 46.

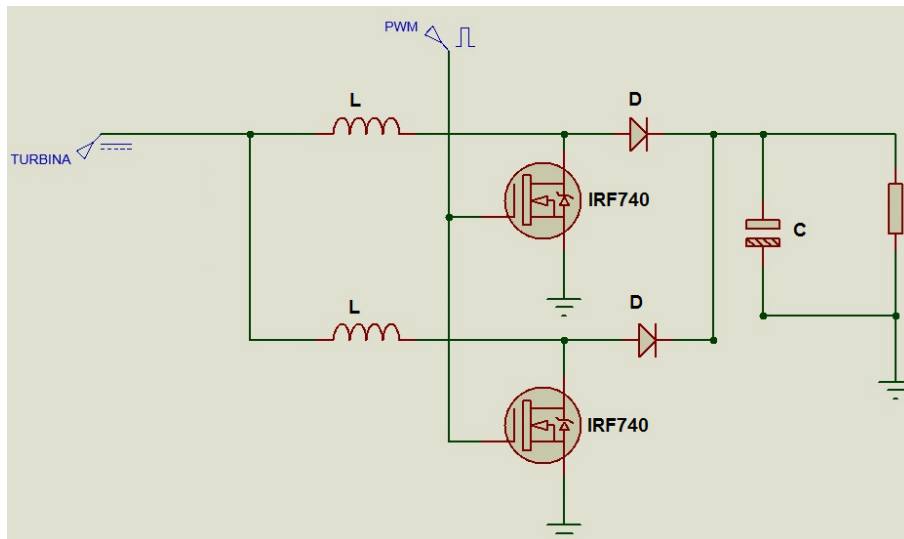


Figura 45: Topologia com 2 Boosts em paralelo.

Fonte: Autoria própria.

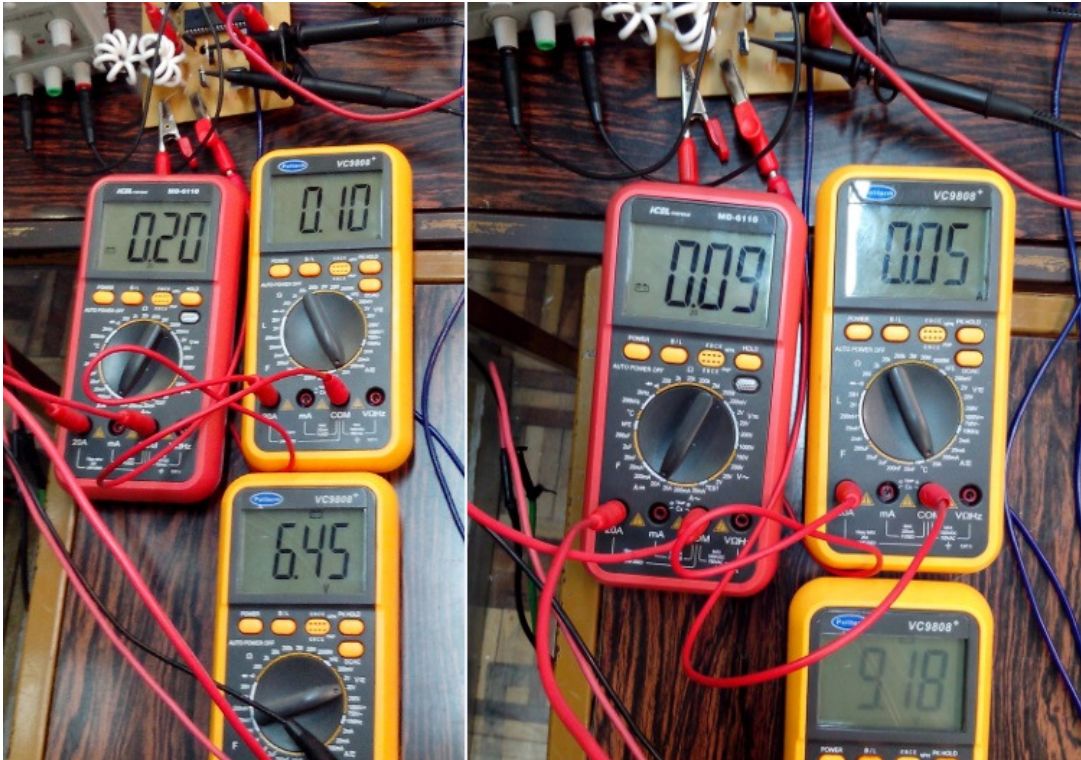


Figura 46: Medição das corrente de entrada.

Fonte: Autoria própria.

A figura 46, que contém duas fotos de medições diferentes, comprova que a associação de Boosts em paralelo divide a corrente entre ambos. O conjunto de multímetros da esquerda apresenta a corrente de entrada de 0,2 A e a corrente em um dos indutores de 0,1 A, para a tensão de entrada de 6,45 V. O conjunto de multímetros da direita apresenta a corrente de entrada de 0,09 A e a corrente em um dos indutores de 0,05 A, para a tensão de entrada de 9,18 V.

A figura 47 mostra o circuito durante o teste.

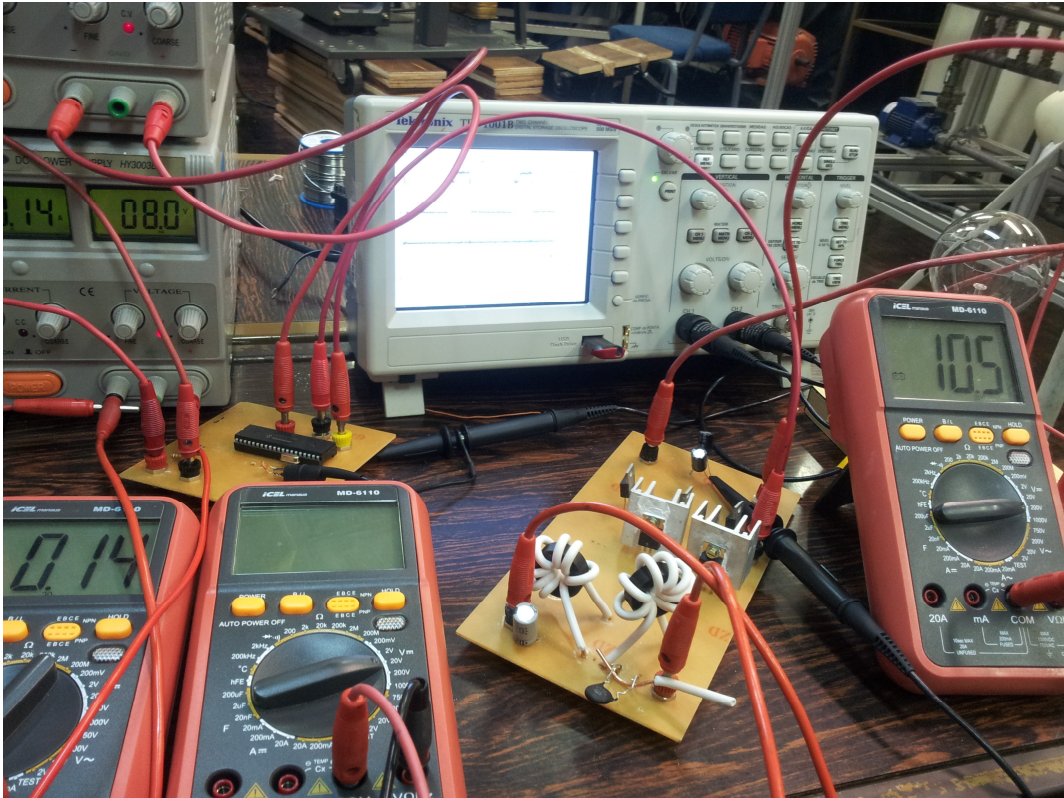


Figura 47: Esquema do teste do conversor de 70 W com dois Boosts em paralelo.

Fonte: Autoria própria.

Na figura 47 é possível ver os dois indutores na placa durante o teste, a fonte que alimenta o conversor com 8 V e o multímetro digital à direita apresenta a tensão de saída de 10,5 V. O mesmo teste, realizado anteriormente, foi feito para o circuito com dois Boosts. A tabela 15 apresenta os resultados:

Tabela 15: Resultados do teste com 2 Boosts em paralelo.

Tensão de entrada (Volts)	Tensão de saída (Volts)	Erro na saída (%)
5	9,5	20,83
6	10,2	15
7	10,3	14,17
8	10,5	12,5
9	10,8	10
10	10,9	9,17
11	10,7	10,83

Fonte: Autoria própria.

Os erros encontrados nos testes do circuito de controle somados às perdas do conversor e nas conexões são menores conforme a tensão de entrada se aproxima da tensão fixada na saída. Analisando os dois testes é possível perceber que o circuito com dois Boosts em paralelo possui uma margem de erro maior. Isto acontece pois o microcontrolador ligado diretamente aos dois transistores diminuiu a eficiência do chaveamento.

6.2.2 Teste do conversor microcontrolado com compensação de erro

Com os conhecimentos adquiridos na experimentação e testes anteriores, um novo circuito mais compacto foi desenvolvido. Com o objetivo de aproximar a tensão de saída do conversor do resultado esperado, um novo divisor de tensão foi acrescentado à parte de controle, junto a tensão de saída. De forma idêntica à utilizada para detectar a tensão de entrada, este sensor foi conectado ao microcontrolador em outro modulo de conversão analógico-digital, o pino 3.

Com o novo sensor, o algoritmo, disponível no apêndice B, foi reestruturado para compensar os erros do sistema. Após calcular a razão cíclica com base na tensão de entrada do circuito, o algoritmo encontra a diferença entre a tensão de saída esperada e a tensão de saída detectada e modifica proporcionalmente o valor da razão cíclica para compensar o erro. Os resultados encontrados no teste com o novo algoritmo estão na tabela 16.

Tabela 16: Resultados com o novo algoritmo.

Tensão de entrada (Volts)	Tensão de saída (Volts)	Erro na saída (%)
5	11,3	5,83
6	11,6	3,33
7	11,1	7,5
8	11,4	5
9	11,2	6,67
10	10,9	9,17
11	10,4	13,33

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultado obtidos, a adição do sensor de tensão de saída e a implementação do novo algoritmo diminuiram os erros como esperado.

6.3 SIMULAÇÃO EM BANCADA

6.3.1 Circuito controlado pela tensão de entrada

Para simulação da condição real de operação, o conversor Boost microcontrolado foi ligado ao micro aerogerador. Para simular as condições reais do vento é usado o painel da WEG, que é capaz de fornecer energia eólica o suficiente para o micro aerogerador fornecer energia elétrica ao conversor. O arranjo para o primeiro teste é mostrado na figura 48.

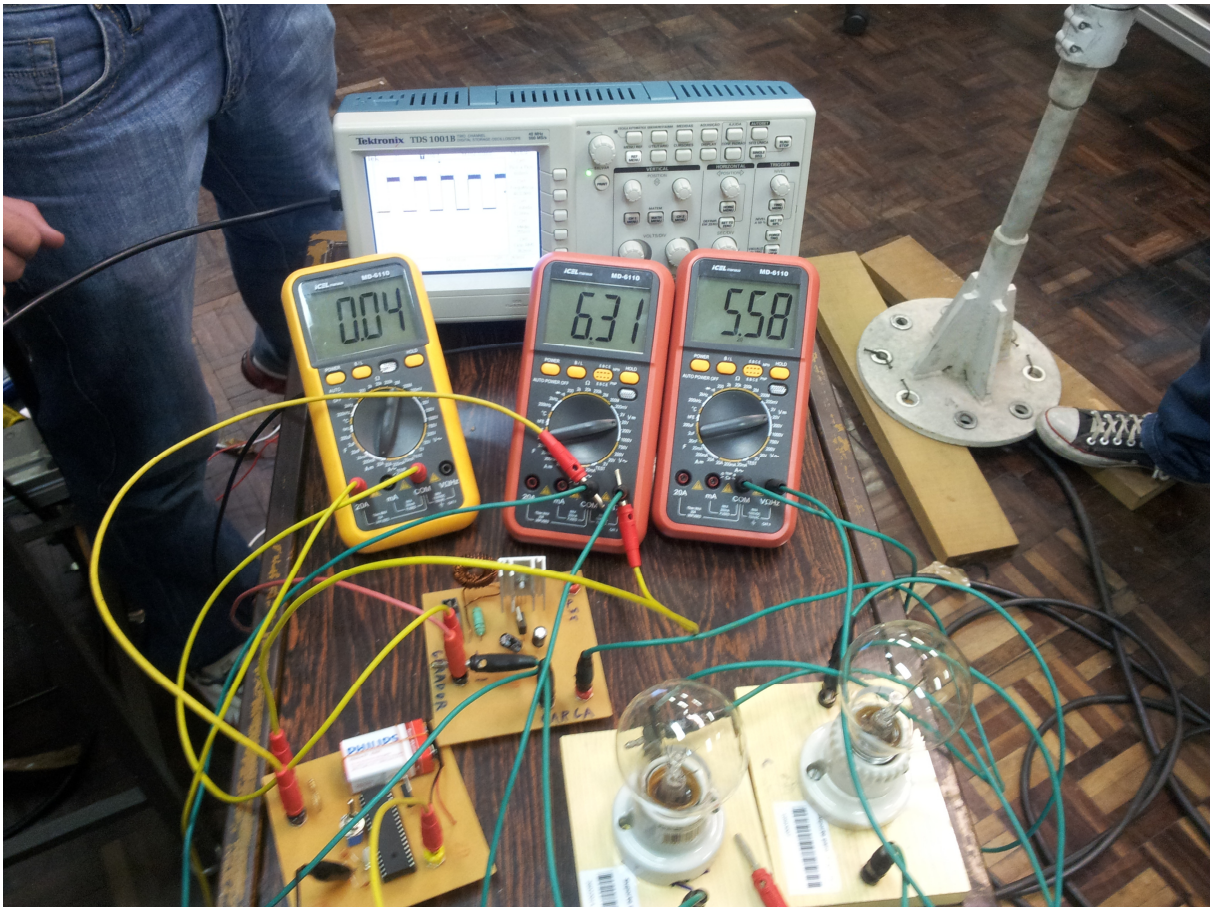


Figura 48: Esquema para o primeiro teste do gerador com o Boost de 10W.

Fonte: Autoria própria.

Durante o primeiro teste o circuito Boost e o circuito de controle foram ligados em paralelo ao gerador, o primeiro para converter a tensão e o segundo para mensurar a tensão de entrada, mas o sinal de controle não era conectado aos MOSFETs do conversor. Com auxílio de multímetros e do osciloscópio, este teste serviu para analisar se o sinal de controle do microcontrolador estava de acordo com o esperado. Da esquerda para direita, os multímetros mostram a corrente de entrada, a tensão de entrada e a tensão na carga, o osciloscópio apresenta o sinal PWM.

Para acionar o chaveamento do conversor, o pino do sinal PWM foi conectado aos MOSFETs. Foi adicionado um termistor NTC (Negative Temperature Coefficient, ou Coeficiente de Temperatura Negativa) em serie com o indutor na entrada do conversor para absorver surtos de corrente. “Quando o circuito é energizado, a temperatura do NTC aumenta e a sua resistência diminui” (BARBI, p.55, 2007).

A figura 49 mostra o conversor em funcionamento.



Figura 49: Conversor Boost (10W) em funcionamento com o gerador.

Fonte: Autoria própria.

É possível observar o NTC em destaque na figura 49. Também na figura estão os multímetros, o da esquerda apresenta a tensão de entrada, o de cima a tensão na carga e o último apresenta a corrente na entrada (a corrente não é negativa, a polaridade do multímetro está invertida). Ainda é possível ver na tela do osciloscópio que o chaveamento está de acordo com a tensão de entrada.

Para velocidades fixas do vento o circuito demonstrou uma resposta rápida estabilizando a tensão de saída com pequenas variações. Como comentado nos testes com fontes de tensão, devido ao sensor de tensão que controla o circuito trabalhar com a tensão de

entrada, as perdas dos componentes não são levadas em conta para controle da saída. Dessa forma o valor encontrado na saída do sistema embora seja controlado não é fixo em 12 V. A presença do termistor adicionou uma perda extra por efeito joule. Com o objetivo de evitar esta perda de energia uma chave simples foi colocada em paralelo ao termistor e, uma vez que o surto de corrente tenha sido absorvido a chave elimina o termistor do circuito. A chave deve ser acionada manualmente pois não estava prevista no circuito de controle.

6.3.2 Circuito controlado pela tensão de entrada e de saída

O último teste foi realizado com o circuito final de 70 W desenvolvido para este trabalho e com o microcontrolador programado para compensar o erro conforme explicado anteriormente. A figura 50 mostra o arranjo final para o teste.

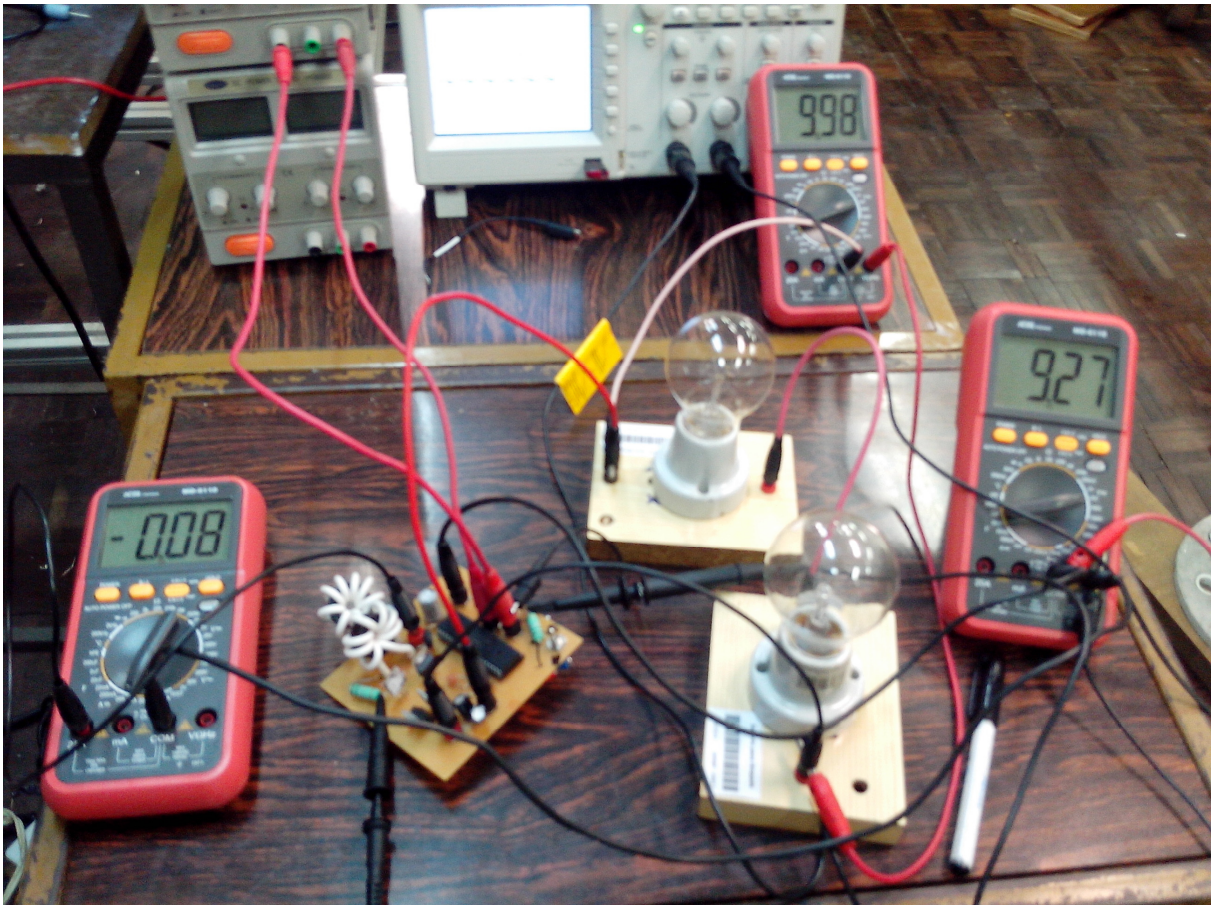


Figura 50: Esquema para o teste final com o circuito novo compacto.

Fonte: Autoria própria.

O multímetro mais à esquerda mostra a corrente de entrada, o da direita a tensão de entrada e o de cima a tensão na carga. O novo circuito integrado em apenas uma placa de 10x10cm² eliminou a necessidade de se conectar manualmente, através de um cabo com ponta

tipo banana, o sinal do microcontrolador ao conversor. A figura 51 apresenta o sistema durante o teste e a tabela 17 apresenta os resultados medidos

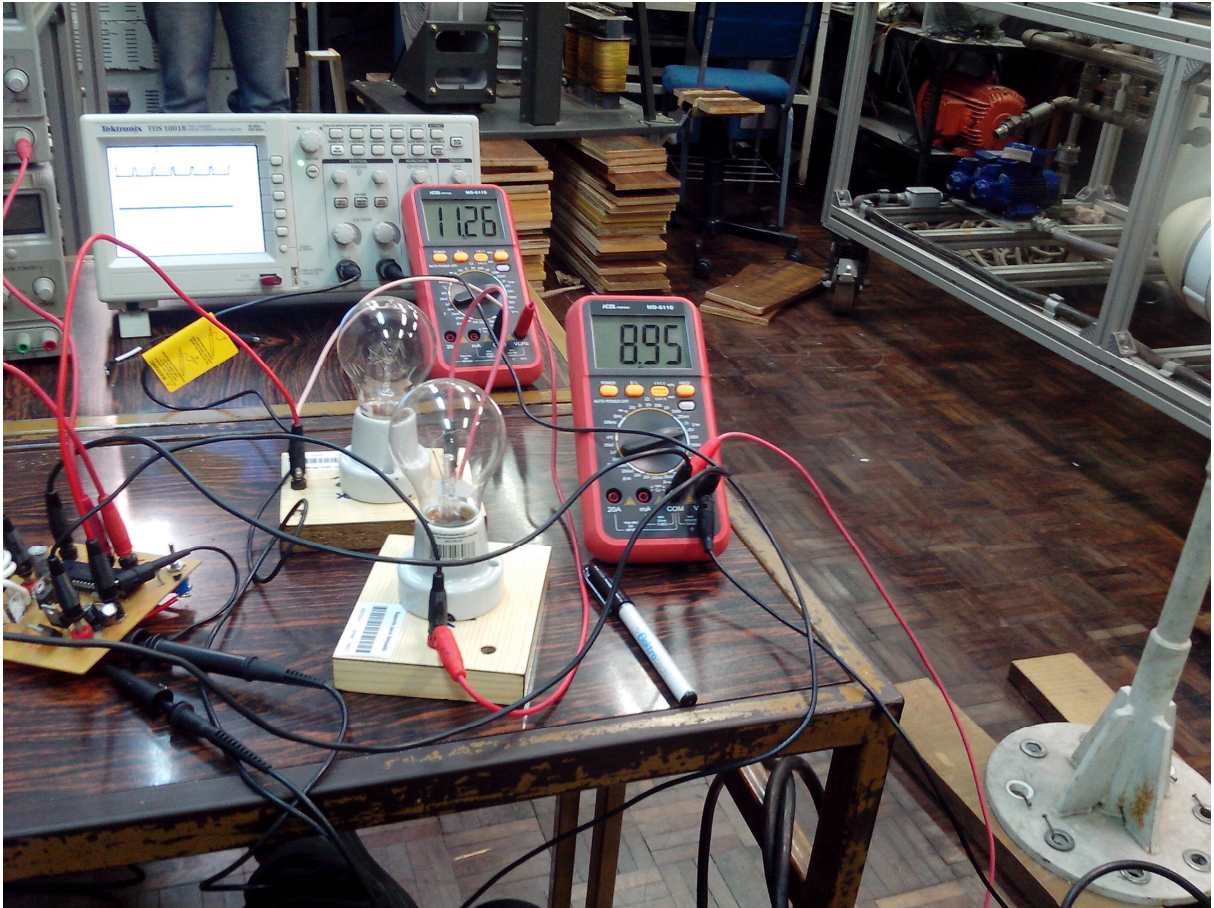


Figura 51: Conversor de 70 W microcontrolado em funcionamento acoplado ao gerador.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17: Resultados do protótipo final.

Tensão de entrada (Volts)	Tensão de saída (Volts)	Erro na saída (%)
5,12	10,76	10,33
6,24	11,46	4,5
7,61	11,46	4,5
8,29	11,08	7,66
9,23	11,03	8,08
10,01	10,85	9,58

Fonte: Autoria própria.

Neste último teste o conversor microcontrolado apresentou um erro médio de 7,44% na tensão de saída.

7 CONCLUSÃO

A disponibilidade e abundancia da energia eólica em todas as regiões da terra só encontra uma barreira real para ser convertida em energia elétrica, a tecnologia disponível. Este projeto apresenta uma alternativa para o aproveitamento deste recurso em regiões urbanas. O circuito desenvolvido é uma alternativa tecnológica para este cenário.

Os testes iniciais obtiveram um bom resultado quanto as capacidades do microcontrolador e do programa desenvolvido pela equipe. Buscando um resultado mais completo, foi realizada a implementação de um sensor na tensão de saída do conversor e um novo programa capaz de amenizar o erro com esse novo sensor.

Com a variação do vento simulada, no último teste, foi possível observar que o conversor consegue regular a tensão prontamente. Mesmo com variações bruscas do vento, a tensão fornecida na entrada varia gradativamente devido a inercia do gerador, possibilitando ao conversor estabilizar a tensão conforme proposto. Embora a tensão de saída do sistema não seja fixa em torno de 12 V, o controlador demonstrou capacidade para regular a tensão. Contudo, observou-se a necessidade da implementação de um algoritmo de controle mais eficiente e de um meio de melhorar o sinal do PWM para saturar os MOSFETs, tornando-os mais efetivos. Notou-se também que o núcleo dos indutores não suportariam potências elevadas devido a suas características, havendo assim, a necessidade de estudo mais aprofundado nesta questão.

A confecção de vários circuitos diferentes durante o processo também obteve uma evolução significativa. A última versão do protótipo ficou bem compacta integrando todo o circuito em uma pequena placa 10x10cm². A utilização de um circuito com Boost em paralelo foi uma alternativa apresentada para diminuir o custo dos componentes envolvidos no circuito.

O trabalho desenvolvido apresentou uma multidisciplinaridade e complexidade de estudos abrangendo vários aspectos da área da engenharia: teoria de circuitos elétricos, teoria de eletrônica de potência, manuseio de equipamentos de captação de vento em campo, manuseio de um gerador eólico real, implementação de uma bancada para testes não disponível anteriormente na universidade, dimensionamento e escolha de componentes

elétricos, confecção de circuitos impressos, trabalho estatístico de dados eólicos reais, programação em linguagem C e utilização de microcontroladores e simuladores virtuais.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido foi uma iniciativa para estudos na área da geração de energia alternativa, abrindo muitas possibilidades de estudos futuros. As principais sugestões vem da experiência adquirida durante o projeto e devem certamente trazer melhoras para o sistema no futuro.

- Implementação de um sistema de controle PID para aumentar a eficiência;
- Projeto de um túnel de vento eficiente e uma bancada permanente para a universidade visando a evolução continua dos estudos de aerogeração;
- Estudo sobre a implementação do circuito acoplado a um sistema para carregamento de baterias;
- Implementação de um *driver* para melhorar a eficiência dos MOSFETs;
- Estudo aprofundado sobre funcionamento dos indutores em conversores;

APÊNDICE A

```

unsigned long adc_value;
unsigned char d1,d2,d3,d4;
unsigned short f1,f2,f3,f4,vi,f51,duty1;

#define tensao    d1=adc_value/1000*10;          d2=(adc_value%1000)/100;  \
                 d3=((adc_value%1000)%100)/10*0.1; d4=((adc_value%1000)%100)%10*0.01;

void main() {
    short duty1 = 0 ; // duty cycle
    PWM1_Init(48000); //pwm com 48kHz
    PWM1_Start(); // start pwm
    PWM1_set_duty(duty1); //set duty cycle
    delay_ms(1);

    while (1)
    {
        adc_value=ADC_Read(0); // Registra o valor da leitura no pino ADC
        adc_value=adc_value*0.49; // converte a leitura para mV
        adc_value=(adc_value/5)*105; // calculo para tensao de entrada, considerando o divisor
100k e 5k
        delay_us(5);

        tensao // separa os digitos da tensão
        vi=(d1+d2+d3+d4); // soma os digitos da tensão em um só
        delay_us(5) ;

        f51=(12-vi); // parte superior da formula para calcular a razao cíclica para o
Boost
        PWM1_set_duty(21.25*f51); //muda a razao ciclica de 0 até 1. 21.25 é 255 dividido por
12, parte da formula da razao ciclica
        delay_us(5) ;

    }
}

```

APÊNDICE B

```

unsigned long adc_value,adc_value2;
unsigned char d1,d2,d3,d4,d5,d6,d7,d8;
unsigned short vi,vo,f51,duty1,erro,prop,soft,dutymax,ds,de,f52;

#define tensaoE   d1=adc_value/1000*10;          d2=(adc_value%1000)/100;  \
                 d3=((adc_value%1000)%100)/10*0.1; d4=((adc_value%1000)%100)%10*0.01;

#define tensaoS   d5=adc_value2/1000*10;        d6=(adc_value2%1000)/100;  \
                 d7=((adc_value2%1000)%100)/10*0.1;
d8=((adc_value2%1000)%100)%10*0.01;

void main() {
    short duty1 = 0 ; // duty cycle
    PWM1_Init(48000); //pwm com 48kHz
    PWM1_Start();    // start pwm
    PWM1_set_duty(duty1); //set duty cycle
    delay_ms(5);

    /******* ROTINA DE CONTROLE
    *****/
    while (1)
    {
        adc_value=ADC_Read(0); // TENSAO ENTRADA
        adc_value=adc_value*0.49;
        adc_value=(adc_value/5.6)*105.6; // calculo para de tensao entrada real, considerando
o divisor 100k e 5k

        adc_value2=ADC_Read(1); // TENSAO SAIDA
        adc_value2=adc_value2*0.49;
        adc_value2=(adc_value2/5.6)*105.6; // calculo para de tensao entrada real,
considerando o divisor 100k e 5k
        delay_us(5);

        tensaoE
        vi=(d1+d2+d3+d4); // TENSAO ENTRADA DETECTADA

        tensaoS
        vo=(d5+d6+d7+d8); // TENSAO ENTRADA DETECTADA
        delay_ms(5);

    /*******INICIO DA COMPENSAÇÃO DO
    ERRO*****/

        erro = (12-vo)*0.0833 ; // DIFERENÇA ENTRE SAIDA E TENSAO DESEJADA
EM %
        prop = (vi-erro*vi) ; // AUMENTA A RAZAO CICLICA PROPORCIONALMENTE
AO ERRO
        if(vo>12){

```

```
prop = (vi) ;  
}  
f51=(12-prop);  
duty1 = (21.25*f51); // RAZAO CICLICA CALCULADA PARA TENSAO  
ENTRADA // parte superior da formula para calcular a razao ciclia  
    PWM1_set_duty(duty1);//muda a razao ciclica de 0 até 1. 21.25 é 255 dividido por 12  
da formula da razao ciclica  
    delay_ms(5);  
  
}}
```

ANEXO A

ESPECIFICAÇÕES E CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR

ESPECIFICAÇÕES GERAIS		ROLAMENTOS		
Potência	: 4 cv		Dianteiro	Traseiro
	: 3 kW		6205 z	6204 z
Carcaça	: 90L	Rolamento		
Polaridade	: 2	Interv. lubrif.	8000 h	8700 h
Frequência	: 60Hz	Quant. de graxa	4 g	4 g
Rotação nominal	: 3460 rpm	Tipo de graxa : à base de lítio.		
Tensão nominal	: 220/380 V			
Corrente nominal	: 10,8/6,25 A			
Reg. de serviço	: S1			
Fator de serviço	: 1,15			
Temp. ambiente	: 40°C			
Altitude	: 1000m			
Classe de isol.	: B			
Elevação de temp.	: 80°C			
Categoria	: N			
Conj. Nominal	: 0,828 kgfm (8,12Nm)			
Conj. Partida	: 290 %			
Conj. máximo	: 310 %			
Corrente partida	: 82,1/47,5 A			
Ip/In	: 7,6			
Escorregamento	: 3,89 %			
Corrente a vazio	: 5,00/2,89 A			
Tempo máximo de rotor travado à quente	: 6 s			
		CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS		
		Proteção	: IP54	
		Forma Construtiva	: B3D	
		Sentido de rotação	: Ambos	
		Massa aproximada	: 23 kg	
		Momento de inércia	: 0,0055 kgm ²	
		DESEMPENHO EM CARGA		
		Carga	CosØ	Rend (%)
		100%	0,86	83,2
		75%	0,80	82,6
		50%	0,70	80,0

Os valores indicados são medidos com base em ensaios, sujeitos as tolerâncias da norma ABNT-NBR 7094.

Fonte: Folha de dados do motor nº 17063/96 (Weg Motores).

ANEXO B



The image shows two white WEG CFW 09 VECTRUE INVERTER units and a green motor. The inverters have a digital display showing '1800' and several control buttons. The motor is connected to the inverters. The background features a blue grid pattern and a globe.

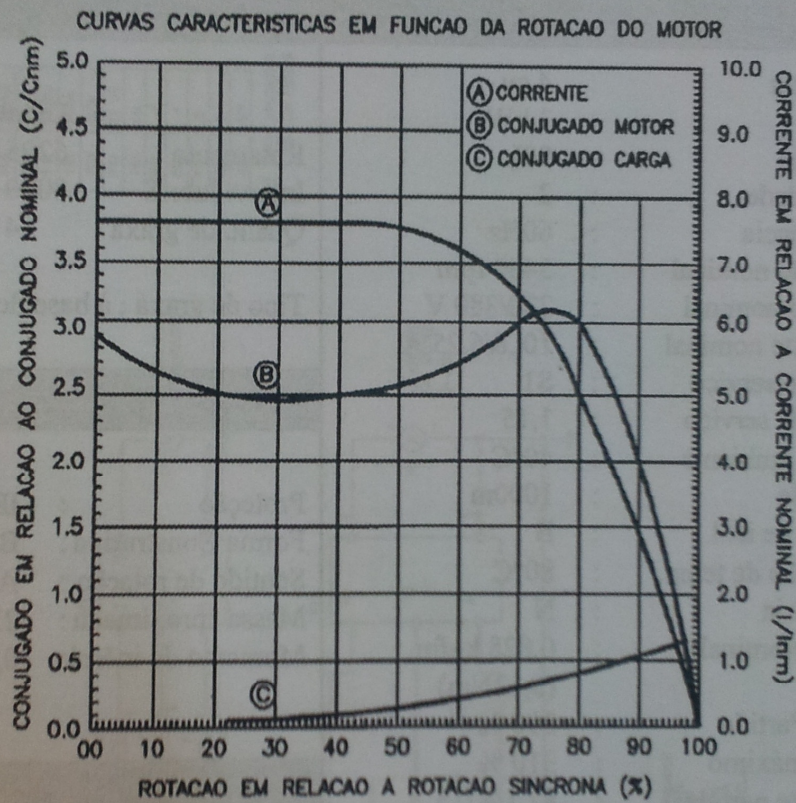
CFW 09
VECTRUE INVERTER

- User's Guide Frequency Inverter
- Guia del Usuario Convertidores de Frecuencia
- Manual do Usuário Inversores de Freqüência
- Bedienungsanleitung Frequenzumrichter
- Guide d'installation et d'exploitation Variateur de Vitesse
- Installatie en gebruikshandleiding Frequentie-Omzetter
- Bruksanvisning Frekvensomriktare
- Руководство по эксплуатации преобразователя частоты



ANEXO C

CURVAS CARACTERÍSTICAS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR

**Dados da carga (ventilador):**

Momento de inércia : 0,01225kgm²
 Conjugado médio : 0,1587Nm

ANEXO D



IRF740

N - CHANNEL 400V - 0.48 Ω - 10 A - TO-220
PowerMESH™ MOSFET

TYPE	V _{DSS}	R _{DS(on)}	I _D
IRF740	400 V	< 0.55 Ω	10 A

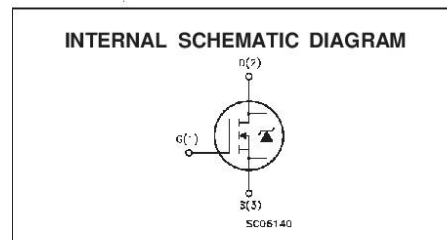
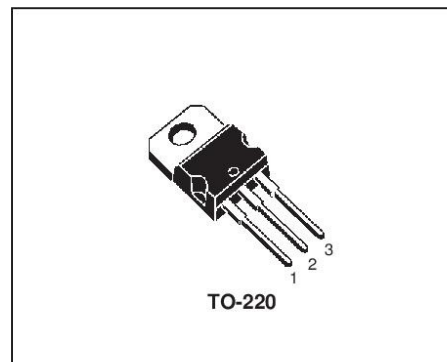
- TYPICAL R_{DS(on)} = 0.48 Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- GATE CHARGE MINIMIZED

DESCRIPTION

This power MOSFET is designed using the company's consolidated strip layout-based MESH OVERLAY™ process. This technology matches and improves the performances compared with standard parts from various sources.

APPLICATIONS

- HIGH CURRENT SWITCHING
- UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY (UPS)
- DC/DC CONVERTERS FOR TELECOM, INDUSTRIAL, AND LIGHTING EQUIPMENT.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V _{DS}	Drain-source Voltage (V _{GS} = 0)	400	V
V _{DGR}	Drain- gate Voltage (R _{GS} = 20 k Ω)	400	V
V _{GS}	Gate-source Voltage	\pm 20	V
I _D	Drain Current (continuous) at T _c = 25 °C	10	A
I _D	Drain Current (continuous) at T _c = 100 °C	6.3	A
I _{DM} (*)	Drain Current (pulsed)	40	A
P _{tot}	Total Dissipation at T _c = 25 °C	125	W
	Derating Factor	1.0	W/°C
dv/dt(1)	Peak Diode Recovery voltage slope	4.0	V/ns
T _{stg}	Storage Temperature	-65 to 150	°C
T _j	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

(*) Pulse width limited by safe operating area (1) I_{SD} \leq 10 A, di/dt \leq 120 A/ μ s, V_{DD} \leq V_{BR(DSS)}, T_j \leq T_{JMAX}
First Digit of the Datecode Being Z or K Identifies Silicon Characterized in this Datasheet

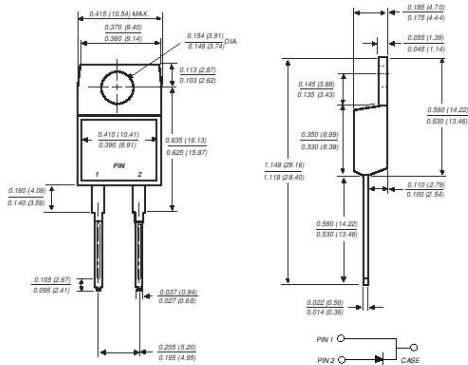
ANEXO E

NS8AT THRU NS8MT

GLASS PASSIVATED GENERAL PURPOSE PLASTIC RECTIFIER

Reverse Voltage - 50 to 1000 Volts Forward Current - 8.0 Amperes

TO-220AC



Dimensions in inches and (millimeters)

FEATURES

- ◆ Plastic package has Underwriters Laboratory Flammability Classification 94V-0
- ◆ High forward current capability
- ◆ High surge current capability
- ◆ Low forward voltage drop
- ◆ Glass passivated chip junction
- ◆ High temperature soldering guaranteed: 260°C/10 seconds, 0.160" (4.06 mm) lead length



MECHANICAL DATA

Case: JEDEC TO-220AB molded plastic body over passivated chip
Terminals: Plated leads solderable per MIL-STD-750, Method 2026
Polarity: As marked
Mounting Torque: 5 in. - lbs. max.
Mounting Position: Any
Weight: 0.064 ounce, 1.81 grams

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

	SYMBOLS	NS8 AT	NS8 BT	NS8 DT	NS8 GT	NS8 JT	NS8 KT	NS8 MT	UNITS
Maximum repetitive peak reverse voltage	V _{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum RMS voltage	V _{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	Volts
Maximum DC blocking voltage	V _{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum average forward rectified current at T _C =100°C	I _{AV}	8.0							Amps
Peak forward surge current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	I _{FSM}	125.0							Amps
Maximum instantaneous forward voltage at 8.0A	V _F	1.1							Volts
Maximum DC reverse current at rated DC blocking voltage T _C =25°C T _C =100°C	I _r	10.0 100.0							μA
Typical junction capacitance (NOTE 1)	C _J	55.0							pF
Typical thermal resistance (NOTE 2)	R _{θJC}	3.0							°C/W
Operating junction and storage temperature range	T _J , T _{STG}	-55 to +150							°C

NOTES:
 (1) Measured at 1.0 MHz and applied reversed voltage of 4.0 Volts
 (2) Thermal resistance from junction to case mounted on heatsink

ANEXO F

BAIXA TENSÃO

Uso Geral

CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE

TABELA 2 - (*) CAPACIDADES DE CONDUÇÃO DE CORRENTE, EM AMPÈRES, PARA OS MÉTODOS DE REFERÊNCIA, A1, A2, B1, B2, C e D DA TABELA 1 FIOS E CABOS ISOLADOS EM TERMOPLÁSTICO, CONDUTOR DE COBRE.

- Cabo Superastic, Cabo Superastic Flex, Fio Superastic, Cabo Sintenax, Cabo Sintenax Flex e Afumex 750V;
- 2 e 3 condutores carregados;
- Temperatura no condutor: 70 °C;
- Temperaturas: 30 °C (ambiente) e 20 °C (solo).

seções nominais (mm ²)	métodos de instalação definidos na tabela 1											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122
70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184	183	151
95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223	216	179
120	210	188	192	172	269	239	232	206	299	259	246	203
150	240	216	219	196	309	275	265	236	344	299	278	230
185	273	245	248	223	353	314	300	268	392	341	312	258
240	321	286	291	261	415	370	351	313	461	403	361	297
300	367	328	334	298	477	426	401	358	530	464	408	336
400	438	390	398	355	571	510	477	425	634	557	478	394
500	502	447	456	406	656	587	545	486	729	642	540	445
630	578	514	526	467	758	678	626	559	843	743	614	506
800	669	593	609	540	881	788	723	645	978	865	700	577
1000	767	679	698	618	1012	906	827	738	1125	996	792	652

(*) De acordo com a tabela 36 da NBR 5410/2004.

A Prysmian reserva-se ao direito de modificar sem aviso prévio as características técnicas, pesos e dimensões apresentadas neste catálogo, sempre respeitando os valores previstos nas normas citadas. A Prysmian não se responsabiliza por danos pessoais ou materiais decorrentes do uso inadequado e/ou negligente das informações contidas neste catálogo.



Tel: 11 4998-4155; Fax: 11 4998-4166; e-mail: webcabos@prysmian.com; internet: www.prysmian.com.br

REFERÊNCIAS

ÁLVARES, Clemente. **Manuales de Energías Renovables: Energía eólica**. Madri, 2006. 180p.

AMERICAN WIND WILDLIFE INSTITUTE. Disponível em:
<http://nationalwind.org/wp-content/uploads/assets/publications/Birds_and_Bats_Fact_Sheet_.pdf>, Acesso em: 02 fev. 2014.

ANEEL. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/EVOLUCAO_DA_CAPACIDADE_IN_TALADA_ANEEL_MME.PDF>
Acesso em 02 ago. 2013.

ANEEL. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>
Acesso em 02 ago. 2013.

ATLAS de energia elétrica do Brasil. 2 ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243p.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados**. 3.ed. Florianópolis Ed. do Autor, 2008. 380 p. ISBN 8590520323.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência: projetos de fontes chaveadas**. 2. ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2007. 332 p.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Brasília, 2001.

COPEL. **Manual de Avaliação Técnico-Econômica de Empreendimentos Eólico-Elétricos**. Curitiba, 2007, 101p.

CRESESB. **Energia eólica: princípios e tecnologia**. Rio de Janeiro, 2008. 58p.

DESHMUKH, Ajay V.. **Microcontrollers: Theory and Applications**. 6 ed. Nova Deli: McGraw Hill group, 2007.

DUARTE, Hamide N. M.. **Utilização da energia eólica em sistemas híbridos de geração de energia visando pequenas comunidades**. 2004. (Trabalho de conclusão de curso) – Engenharia elétrica, PUC-RS, Porto Alegre, 2004.

DUTRA, Ricardo Marques. **“Viabilidade Técnica-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro”**. (Tese de Mestrado) – Curso de Mestrado em Ciências em Planejamento Energético, UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

ELETROBRÁS, **Atlas Eólico do Estado do Alagoas**, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2012**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, p. 282. 2012.

ESTANQUEIRO, Ana; SIMÕES, Teresa. Aproveitamento da energia eólica em ambiente urbano e construído. **Renováveis Magazine**, n. 10, p 44-49, 2 trimestre de 2012.

Global Wind Energy Council (GWEC). **Análise do Marco Regulatório para a Geração Eólica no Brasil**, mar. 2011.

GREEN ENERGY STAR. Disponível em:

<<http://www.greenergystar.com/shop/wind-generators/55-phoenix-dc-12v.html>>, Acesso em: 05 fev. 2014.

MAGALHÃES, Murilo Vill. **Estudo de Utilização da Energia Eólica Como Fonte Geradora de Energia no Brasil**. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso de Graduação em Ciências Econômicas, UFSC, nov. 2009.

MAIA, Daniel S. N. **Ruídos de Parques Eólicos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, 1304 p.1-12, mar. 2008.

National Renewable Energy Laboratory (NREL), **Wind Resource Assessment Handbook**, abr. 1997.

NRG Systems. Disponível em:

<http://www.nrgsystems.com/FileLibrary/e4c1a4b10a594610a419a93278dcef03/NRG_Symphonie_Data_Logger_Manual%20-%20Rev.5.08.pdf>, Acesso em: 05 fev. 2014.

PATEL, Mukund R., **Wind and solar Power systems: Design, analysis and operation**. 2 ed. New York: Taylor e Francis group, 2006.

PEREIRA, Ivan Q. G. **Condições de viabilidade da Microgeração eólica em zonas urbanas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

PIANEZZOLA, Gilberto. **Mapas de Complementaridade dos Potenciais Solar e Eólico no Estado do Rio Grande do Sul**. (Dissertação para obtenção do título de mestre), jul. 2006.

REIS, Mônica R. **Sistema eólico de pequeno porte para interligação à rede elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, 2008.

RUNCOS, F.; CARLSON, R.; KUO-PENG, P.; VOLTOLINI, H.; BATISTELA, N. J.; **Geração de energia eólica – tecnologias atuais e futuras**. WEG máquinas – GRUCAD-EEL-TET-UFSC (2000)

SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5 ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2013.

SILVA, EVELLY M. F.. **Análise de um Projeto Mecânico de um Freio Aplicado em Geradores Eólicos de Pequeno Porte**. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Ciências em Tecnologia, UFERSA, 2013.

SOBREIRA, Leonardo Pudell; RUTHES, Maurício; WASILEWSKI, Victor Hugo. **“Projeto de um Sistema Híbrido Eólico-Solar de Pequeno Porte para a UTFPR para fins de Pesquisa no Campus Curitiba.”** (Monografia de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica Eletrotécnica, UTFPR, Curitiba, 2006.

THE WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION (WWEA). **World Wind Energy Report 2012**, 2012

THORNTON. Disponível em:

< <http://thornton.com.br/produtos/nt.htm>>, Acesso em: 06 jun. 2014.

WEG, **Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG**, jan 2009.