

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA – AUTOMAÇÃO

FABIANO SEIBT DO NASCIMENTO
GUILHERME LUIZ STIVAL
MATEUS STARCK PINTO DA FONSECA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR EÓLICO
A PARTIR DE COMPONENTES DE MERCADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

FABIANO SEIBT DO NASCIMENTO
GUILHERME LUIZ STIVAL
MATEUS STARCK PINTO DA FONSECA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR EÓLICO
A PARTIR DE COMPONENTES DE MERCADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do curso de Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica –DAELT- da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Jorge Assade Leludak

CURITIBA

2013

**Fabiano Seibt do Nascimento
Guilherme Luiz Stival
Mateus Starck Pinto da Fonseca**

Estudo de Viabilidade de Desenvolvimento de um Gerador Eólico a partir de Componentes de Mercado

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 Industrial Elétrica - Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 13 de novembro de 2013

Prof. Paulo Sérgio Walenia,
Coordenador de Curso Engenharia Industrial Elétrica - Automação

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Industrial Elétrica – Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Jorge Assade Leludak, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Gerson Maximo Tiepolo, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Luiz Amilton Pepplow, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Marcio Aparecido Batista, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

FONSECA, Mateus Starck; NASCIMENTO, Fabiano Seibt; STIVAL, Guilherme Luiz. Estudo de Viabilidade de Desenvolvimento de um Gerador Eólico a partir de Componentes de Mercado. 2013. 68f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica – Ênfase em Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Considerando a crescente busca pela diversificação da matriz energética brasileira, a energia eólica apresenta-se como uma interessante alternativa ambiental e econômica. Dada à possibilidade de uma pequena unidade consumidora conectar-se a rede (Geração Distribuída), e o alto custo dos geradores eólicos, o estudo mostra os componentes necessários para a construção de um gerador utilizando materiais disponíveis no mercado. Serão apresentados dois ensaios realizados em laboratório, onde o primeiro foi utilizado um alternador automotivo como máquina elétrica, e o segundo usando um dínamo, com posterior levantamento de dados, objetivando validar o uso destes no desenvolvimento de um protótipo para o Gerador Eólico.

Palavras chaves: Gerador Eólico, Geração Distribuída, Energia Eólica, Inversor Grid tie, Alternador, Dínamo.

ABSTRACT

FONSECA, Mateus Starck; NASCIMENTO, Fabiano Seibt; STIVAL, Guilherme Luiz. Feasibility Study for Development of a Wind Power Generator from Market Components. 2013. 68f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica – Ênfase em Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Considering the growing search for the diversification of the Brazilian energetic matrix. From this, the wind power energy presents itself as an interesting environmental and economic alternative. Due to the possibility of a consumer unit connect into the net (Distributed generation), and the high cost of the wind power generators, the study shows the necessary components to the construction of the equipment using commercial materials. Will be presented two tests studied in laboratory, where the first, it used an alternator as an electrical machine, and the second test, it used a dynamo, and after this, the group measure the main data, to compare the machines, aiming to validate the development of wind power generator.

Keywords: Wind Power Generator, Distributed Generation, Wind Power Energy, Grid Tie Inversor, Alternator, Dynamo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética Brasileira	13
Figura 2 – Gráfico da distribuição da capacidade instalada no mundo	15
Figura 3 – Gráfico da complementaridade geração eólico e hidroelétrica.....	16
Figura 4 – Mapa de Ventos do estado do Paraná.....	18
Figura 5 - Regime de ventos sobre o Paraná, nas escalas de espaço e tempo.....	19
Figura 6 – Centro de alta pressão e deslocamento da frente fria.....	20
Figura 7 – Regime de ventos em diferentes regiões do estado	21
Figura 8 - Previsão de evolução da instalação das várias tecnologias de GD	23
Figura 9 – Esquema de geração eólica conectada na rede	26
Figura 10 – Principais componentes do alternador	29
Figura 11 – Componentes do alternador	29
Figura 12 – Rotor de um alternador	30
Figura 13 – Estator automotivo	31
Figura 14 – Esquemático conjunto regulador.....	32
Figura 15 – Retificador de onda completa trifásico	32
Figura 16 – Regulador eletrônico básico.....	33
Figura 17 – Circuito de corrente de pré-excitação	35
Figura 18 – Circuito de corrente de carga	35
Figura 19 – Circuito de corrente de excitação.....	36
Figura 20 - Dínamo simples	37
Figura 21 - Curva de desempenho do dínamo.....	38
Figura 22 - Inversor com carga RL e formas de onda de tensão e corrente	41
Figura 23 – Princípio de funcionamento de uma hélice de pás.....	42
Figura 24 – Geradores eólicos com hélices de pás.....	43
Figura 25 – Gerador eólico com hélice de pás deformadas	44
Figura 26 – Ventoinha helicoidal	44

Figura 27 - Elementos constituintes de uma bateria	45
Figura 28 – Comportamento da tensão e potencia reativa	47
Figura 29 – Distorção Harmônica	48
Figura 30 – Efeito dos harmônicos na potência	49
Figura 31 – Componentes utilizados	53
Figura 32 – Ensaio experimental Alternador Automotivo	55
Figura 33 – Velocidade [rpm] x Corrente [A]	56
Figura 34 – Ensaio Dínamo.....	59
Figura 35 – Acoplamento direto Dínamo	60
Figura 36 – Velocidade [rpm] x Corrente [A] do dínamo	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo das Fontes de Energia.	14
Tabela 2 - Limites de emissão de acordo com a norma IEC 61800-3.....	49
Tabela 3 – Relação de corrente, potência e raio no experimento 01	57
Tabela 4 - Relação de corrente, potência e raio no experimento 02	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz

FV – Fotovoltaico

GD – Geração distribuída

IEA – *International Energy Agency*

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*

IHU - Instituto Humanitas Unisinos

INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética

MDL - Mecanismos de Desenvolvimento Limpo

MPPT – *Maximum Power Point Tracker*

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PRODIST - Procedimentos de Distribuição

PWM – *Pulse Width Modulation*

SCR – *Silicon Controlled Rectifier*

THD – *Total Harmonic Distortion*

ÚNICA - União da Indústria de cana de açúcar de São Paulo

WWF – *World Wildlife Foundation*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA E PREMISSAS	13
1.2. OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA	14
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	14
2 FONTES DE ENERGIA.....	15
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA.....	15
2.2 ENERGIA EÓLICA.....	19
2.3 MAPA EÓLICO DO PARANÁ	20
3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	24
3.1 Conceitos	24
3.2 Características	25
3.3 Vantagens	25
3.4 Aplicação e Uso	27
3.5 Norma COPEL NTC 905100	28
4 GERADOR EÓLICO.....	30
4.1 COMPONENTES	30
4.1.1 Alternador Automotivo	30
4.1.1.1 Rotor.....	32
4.1.1.2 Estator	32
4.1.1.3 Conjunto Retificador	33
4.1.1.4 Regulador de Tensão	35
4.1.1.5 Circuitos de Corrente.....	36
4.1.2 Dinamo	38
4.1.3 Inversor	41
4.1.3.1 Inversor Grid Tie.....	43
4.1.4 Elemento Motriz	44
4.1.5 Bateria.....	47

4.2 COMPORTAMENTO NA REDE	48
4.2.1 Variação de Tensão	48
4.2.2 Flicker	49
4.2.3 Harmônicos	50
4.2.4 Transitórios.....	52
4.2.5 Controle de Frequência	52
4.2.6 Controle de Tensão	52
5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	54
5.1 Experimento 01 – Alternador automotivo	54
5.2 Experimento 02 – Dínamo.....	60
6. CONCLUSÃO.....	64
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da demanda energética no Brasil e eventuais falhas no sistema elétrico atual, o país vê a necessidade da ampliação de sua matriz de energia. Atualmente cerca 74% da energia ofertada no Brasil provém de fontes renováveis, sendo 64% gerada em hidrelétricas, e 10% de origem eólica e biomassa. (ANEEL, 2013)

Dentre elas, as hidrelétricas têm como grande desvantagem seu impacto ambiental, principalmente durante sua construção, como o alagamento de grandes áreas para a formação da represa, ocasionando mudanças ambientais (alteração do microclima, como alteração dos valores médios de precipitação) e deslocamento das famílias que ali residiam.

De acordo com o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004 e sustentado pelas Leis nº 10.847 e 10.848 de 15 de março de 2004, o governo federal apresentou um novo modelo para o Setor Energético Brasileiro, visando garantir a segurança do atendimento da demanda brasileira e promover a inserção social (Portal Brasil, 2013). Nesse decreto o consumidor livre pode gerar energia para consumo próprio e o sobressalente vender para a concessionária responsável pela distribuição local (Geração Distribuída).

O equipamento proposto neste trabalho é de baixo custo para sua montagem sendo usados necessariamente componentes encontrados no mercado apresentando também uma baixa manutenção, ideal para a geração eólica residencial.

1.1 PROBLEMA E PREMISSAS

Partindo da premissa de que o consumidor tem a preocupação em buscar produtos mais eficientes e possuir autonomia perante as tarifas da concessionária:

- É possível a construção do gerador eólico com componentes encontrados no mercado?
- Este equipamento construído terá propriedades para atender uma pequena unidade consumidora?
- A construção deste gerador pode ser replicada por um proprietário de uma unidade consumidora que possuir o interesse?

É de se esperar encontrar as respostas para tais perguntas durante o estudo, e que a máquina desenvolvida seja a melhor alternativa para geradores de até 840 W.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar viabilidade técnica de um gerador a fim de atender a uma unidade consumidora em baixa tensão utilizando componentes de fácil acesso no mercado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- levantar propriedades dos componentes a serem utilizados;
- pesquisar bibliografia a respeito de geradores eólicos e seu comportamento na rede;
- desenvolver ensaios em laboratório;
- analisar os resultados obtidos experimentalmente.

1.3 JUSTIFICATIVA

A baixa acessibilidade na compra do gerador, no caso eólico, motiva a realização do estudo e construção do equipamento, assim como os benefícios econômicos. Surge também a possibilidade de atender o consumidor de áreas distantes do sistema de distribuição, contribuindo na inclusão energética e eletrificação rural. Além de que a geração eólica é uma fonte limpa e menos agressiva ao meio em que está instalada.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho se dará inicialmente em caráter bibliográfico, na coleta de informações sobre geradores eólicos e inversores de frequência. Feito isso, iniciará o estágio de aquisição dos materiais necessários para iniciar o desenvolvimento dos protótipos do gerador objetivado.

Por fim, serão analisados os resultados verificando a viabilidade da construção da máquina.

2 FONTES DE ENERGIA

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA

Considerada um exemplo mundial, a matriz energética brasileira é o somatório de toda a energia produzida e disponibilizada aos consumidores. Esta matriz mostra a representatividade das fontes no cenário nacional, como se pode ver na figura 1 (ANEEL, 2013).

A matriz brasileira é constituída na maior parte por energias renováveis, tais como hidráulica, eólica, biomassa, fotovoltaica. Completando têm-se fontes não renováveis como o carvão mineral e petróleo.

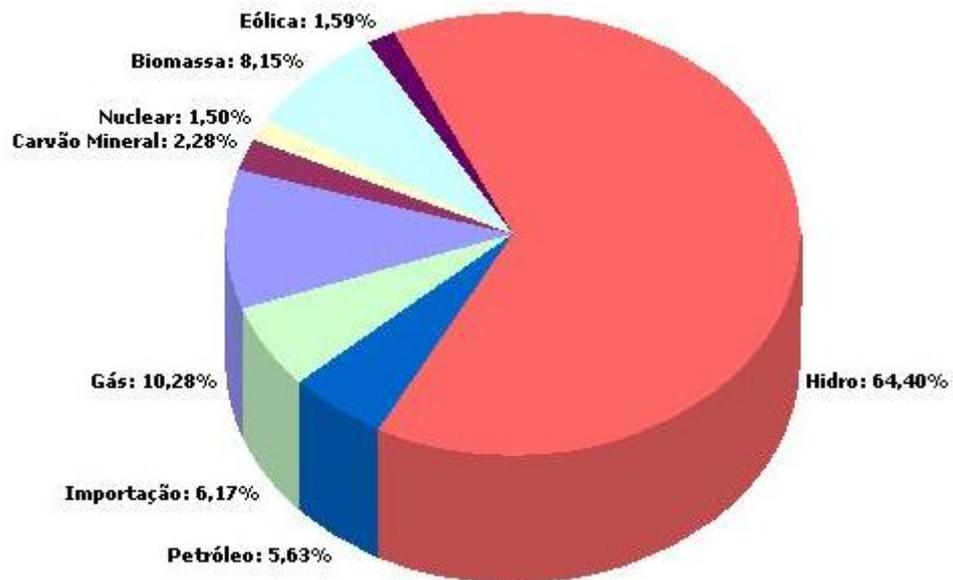


Figura 1 - Matriz energética Brasileira

Fonte:

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/operacaocapacidadebrasil.asp>

Analisando o gráfico, percebe-se que 74.14% da energia produzida provém de fontes renováveis, e outro ponto importante é que apenas cerca de 6% vem da queima de petróleo, considerado este o mais agressivo ao meio ambiente. Esses valores ganham grande foco quando comparados com a média mundial de energia limpa que é aproximadamente 13% e, 80% proveniente do petróleo e seus derivados. (Portal Brasil, 2013)

A análise da matriz energética é fundamental para a orientação do planejamento do setor energético, que deve garantir a produção e o uso adequado da energia produzida, onde uma das informações mais importantes adquiridas é a quantidade de recursos naturais que está sendo utilizada, para saber se esses recursos estão sendo feitos de forma racional.

A seguir citam-se algumas das principais fontes de energia (Tabela 1), renováveis e não renováveis, onde fontes de energia renováveis são aquelas originárias de fontes naturais que possuem a capacidade de regeneração (renovação), ou seja, não se esgotam. Já as fontes de energia não renováveis são aquelas provenientes de reservas limitadas, tendo como grande exemplo os combustíveis fósseis (Tolmasquim, 2007).

Tabela 1: Comparativo das Fontes de Energia.

	Tipo de Fonte	Elemento Motriz	Impacto Ambiental	Representatividade Nacional (ANEEL, 2013)
Hidroelétrica	Renovável	Queda d'água	Alagamento de grandes áreas, alteração do microclima	64,32%
Biomassa	Renovável	Combustão de resíduos orgânicos	Desmatamento e emissão de CO ₂	8,14%
Fotovoltaica	Renovável	Radiação solar	Material utilizado do painel solar	-
Nuclear	Não Renovável	Fissão do núcleo do átomo	Resíduos nucleares	1,51%
Carvão Mineral	Não Renovável	Combustão do carvão mineral em forma de pó	Emissão de CO ₂	2,28%
Gás Natural	Não Renovável	Combustão de gás natural com ar comprimido	Emissão de CO ₂ , NO e NO ₂	10,28%
Petróleo	Não Renovável	Combustão dos derivados de petróleo	Emissão de CO ₂ , CH ₄ e o N ₂ O	5,63%
Eólica	Renovável	Massas de ar em movimento	Poluição sonora e interferência na rota migratória de pássaros	1,59%

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2013.

2.2 ENERGIA EÓLICA

Devido a crescente preocupação com os problemas ambientais causados pelos combustíveis fósseis, e por se tratarem de uma fonte de energia não renovável, fontes limpas de emissão de gases causadores do efeito estufa vêm ganhando destaque no seu uso. A energia eólica é uma energia contida nas massas de ar em movimento (vento) onde ocorre a conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, através das turbinas eólicas para geração de eletricidade. Portanto esta fonte de energia têm tido um aproveitamento cada vez mais crescente a nível mundial, e o seu potencial para tal é muito grande. No Brasil, segundo o atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás, o território brasileiro tem capacidade para gerar até 140 GW, mas atualmente a capacidade instalada é de 1 GW, o que representa menos de 1% do potencial (ANEEL, 2008).

Um estudo indica que o país poderia substituir a energia térmica pela energia eólica. Isso porque as usinas térmicas só são acionadas durante os períodos de seca, quando os rios ficam mais baixos e as hidrelétricas são insuficientes para produzir toda a energia consumida. Porém, é justamente nesse período que o regime de ventos no Nordeste é mais intenso. A figura 2 indica a distribuição da capacidade instalada da energia eólica no mundo, onde países como a Dinamarca, a energia eólica representa cerca de 18% de toda a eletricidade gerada (ANEEL, 2008).

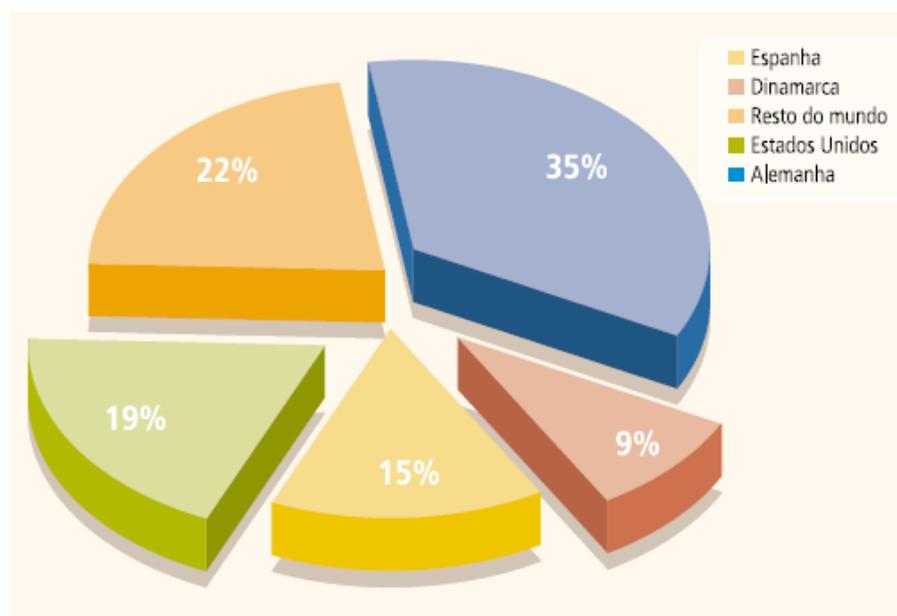


Figura 2 – Gráfico da distribuição da capacidade instalada no mundo

Fonte: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)

Outro fator atrativo da implementação em larga escala da energia eólica no país, principalmente na região nordeste, é a possibilidade da complementaridade com a geração hidroelétrica, pois, de acordo com a figura 3, o maior potencial eólico ocorre justamente no período em que a vazão do rio São Francisco está mais baixa.

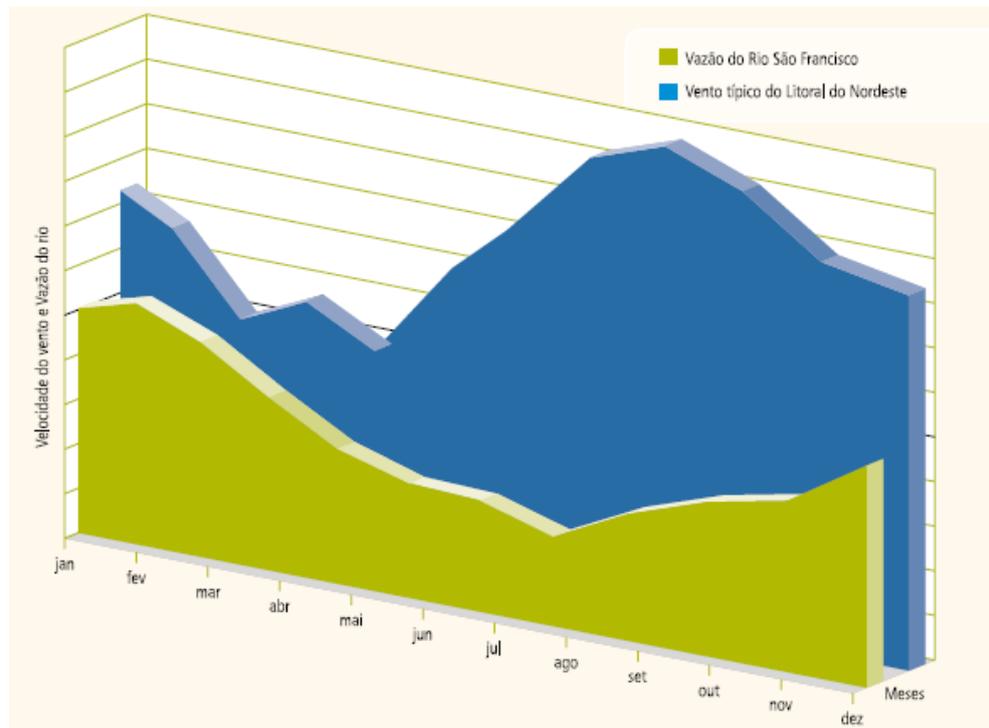


Figura 3 – Gráfico da complementaridade geração eólica e hidroelétrica

Fonte: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)

Existem duas possibilidades de instalação da geração eólica, podendo ser interligado a rede elétrica (*on grid*) que é mais utilizado comercialmente, e também isolado da rede (*off grid*), aplicado em regiões rurais ou marítimas.

Com o aumento da classe C no Brasil, surge a oportunidade da popularização da energia eólica residencial, devido aos altos preços pagos pelo kW/h. Porém atualmente existem apenas duas empresas fabricantes do equipamento com tecnologia nacional. Segundo o professor de planejamento energético da Coppe-UFRJ, o engenheiro Maurício Arouca, existem três ações essenciais para o desenvolvimento deste mercado no país, como: regulamentar a microgeração distribuída, criar uma política pública de estímulo e investir em tecnologia, pois, os equipamentos utilizados na

geração eólica residencial são diferentes dos utilizados em usinas e parques eólicos.

Vantagens como a não emissão de gases causadores do efeito estufa se tratando de uma fonte de energia limpa e renovável, poder utilizar as áreas do parque eólico para outras atividades como agricultura e pecuária e o país apresentar um grande potencial eólico, são grandes atrativos para a utilização em larga escala da energia eólica. Porém, como qualquer outra fonte de energia, ela apresenta algumas desvantagens como a possibilidade de interferência na rota migratória de pássaros, o alto custo dos equipamentos e também poluição sonora e visual.

2.3 MAPA EÓLICO DO PARANÁ

Com o intuito de descobrir o potencial eólico do estado do Paraná, a concessionária de energia Copel implementou no ano de 1994 o Projeto Ventar. O projeto levantou o potencial de 25 locais em diferentes regiões do Paraná. A campanha de medições foi realizada com a instalação de estações anemográficas (equipamentos que medem e registram os dados relativos à velocidade e direção de vento) em locais previamente escolhidos em diferentes áreas do Estado do Paraná.

Neste mapa podem ser identificadas as áreas de maior aproveitamento da energia eólica, onde foi elaborado a partir dos seguintes dados:

- Informações obtidas através do Projeto Ventar;
- Dados de vento de algumas estações meteorológicas do Iapar;
- Arquivo digital com os dados de relevo do Cehpar;
- Base cartográfica da Sema/Liserp e da Sanepar;
- Mapa do Uso do Solo da Sema/Liserp.

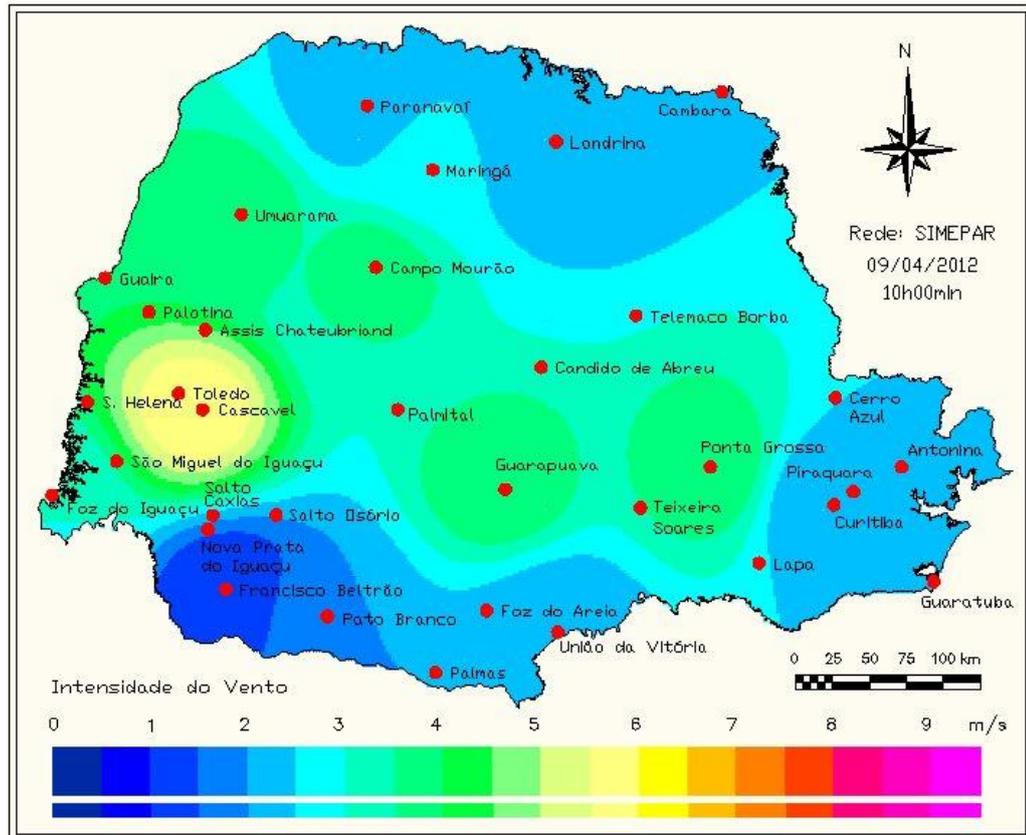


Figura 4 – Mapa de Ventos do estado do Paraná

Fonte:

<http://www.dtc.uem.br/dtc/index.php/administracao/representantes/17-newsdtc/ambiental/164-simepar-tera-estacoes-meteorologicas-em-todos-os-municipios-do-parana>

No Paraná, ocorre um fenômeno similar a da complementaridade na região nordeste, onde o regime sazonal, em termos das médias mensais, a velocidade do vento apresenta maior intensidade nos períodos de inverno e primavera, coincidindo com a estiagem na região Sudeste do Brasil, portanto a geração eólica é mais intensa nos meses em que a tarifa industrial (horossazonal) é mais elevada. No regime interanual, a variabilidade do potencial eólico é muito pequena (<10%) se comparada com a do potencial hídrico (>50%). A fonte eólica não apresenta uma produção regular de acordo com o tempo. Porém, sua participação no sistema elétrico interligado, de base predominantemente hídrica, poderá diminuir o risco de baixa nos reservatórios durante os anos de estiagem. A geração eólica pode aumentar a capacidade firme do sistema hidrelétrico. Esta característica apresenta o grande potencial de integração das fontes eólicas e hidráulica no Sistema Elétrico Interligado (COPEL, 2013).

A seguir é apresentado o regime de ventos sobre o estado.



Figura 5 - Regime de ventos sobre o Paraná, nas escalas de espaço e tempo

Fonte:

<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F301DC3A7702B129303257405005C2FDB>

Sobre o território do Paraná, existem dois fatores que ocasionam o movimento atmosférico, como um centro de alta pressão no oceano faz predominarem os ventos de quadrante Nordeste e também Frentes frias, de periodicidade irregular variam a direção do vento em 360°. O efeito secundário de diferenças térmicas e de relevo também age em escala microrregional. A figura 13 apresenta estes dois fatores.

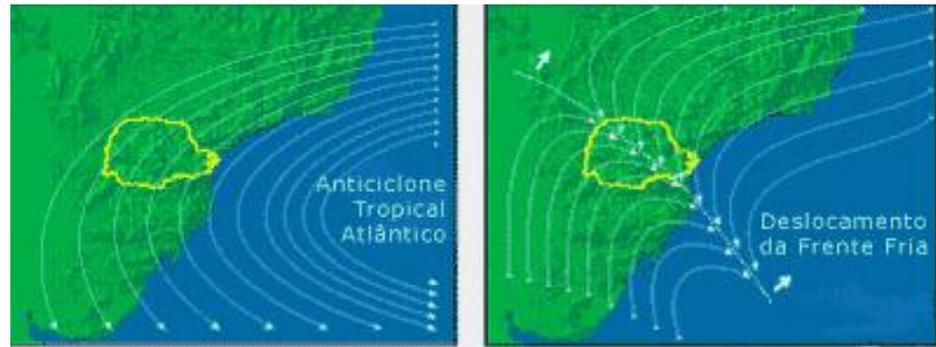


Figura 6 – Centro de alta pressão e deslocamento da frente fria

Fonte:

<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F301DC3A7702B129303257405005C2FDB>

Existem diferenças no regime diurno, na escala de médias anuais para cada hora do dia com relação aos ventos no litoral e no planalto, onde praticamente todo o interior do estado apresenta regimes diurnos semelhantes, com médias menores no período da tarde. Estas diferenças são causadas pela influência dos efeitos locais e de mesoescala como brisas marinhas e outros mecanismos térmicos e orográficos. A figura 7 apresenta a velocidade média dos ventos nestas diferentes regiões.

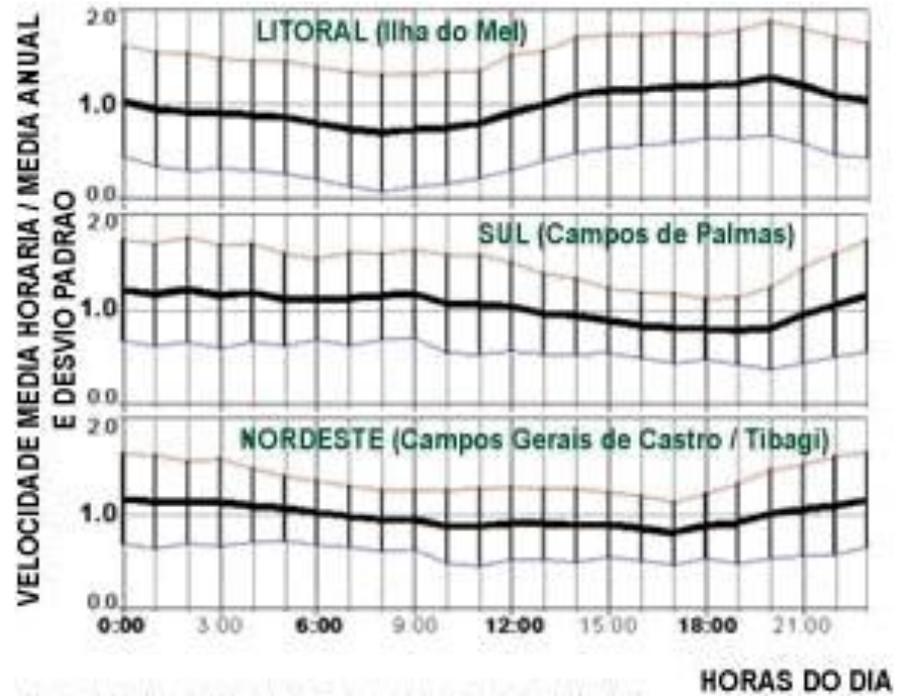


Figura 7 – Regime de ventos em diferentes regiões do estado

Fonte:

<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F301DC3A7702B129303257405005C2FDB>

3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

3.1 Conceito

Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), Geração Distribuída (GD) é uma expressão utilizada para a geração elétrica realizada junto ou próxima do consumidor independente da potência, tecnologia e fonte de energia. De acordo com a mesma fonte, GD inclui co-geradores, geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo, geradores de emergência, geradores para operação no horário de ponta, painéis fotovoltaicos e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's).

Esse tipo de geração, também chamada de geração descentralizada, chegou a ser a regra na primeira metade do século, quando a energia industrial era praticamente toda gerada próxima do consumidor. A partir da década de 40, no entanto, a geração em centrais de grande porte ficou mais barata, reduzindo o interesse dos consumidores pela geração própria e, como consequência, o desenvolvimento tecnológico para incentivar esse tipo de geração também parou. Com o fim do monopólio da geração elétrica, em meados dos anos 80, o desenvolvimento de tecnologias voltou a ser incentivado com visíveis resultados na redução de custos. (INEE,2008)

O marco da geração descentralizada aconteceu em 2004, quando GD foi mencionada na Lei 10.848/04 como uma das possíveis fontes de geração de energia. O detalhamento do Decreto 5.163/04 fornece características que ajudarão as empresas distribuidoras, que até então se opunham a esta forma de geração, a enxergarem na GD uma das formas de mitigar riscos de planejamento. (INEE,2008)

Do trabalho de Santos e Santos, 2008, para a geração distribuída, tendo como referência o “*Annual Energy Outlook 2000*” (AEO2000), podem ser vistas projeções de evolução das tecnologias de geração distribuídas num horizonte temporal de previsão até 2020 na figura 8.

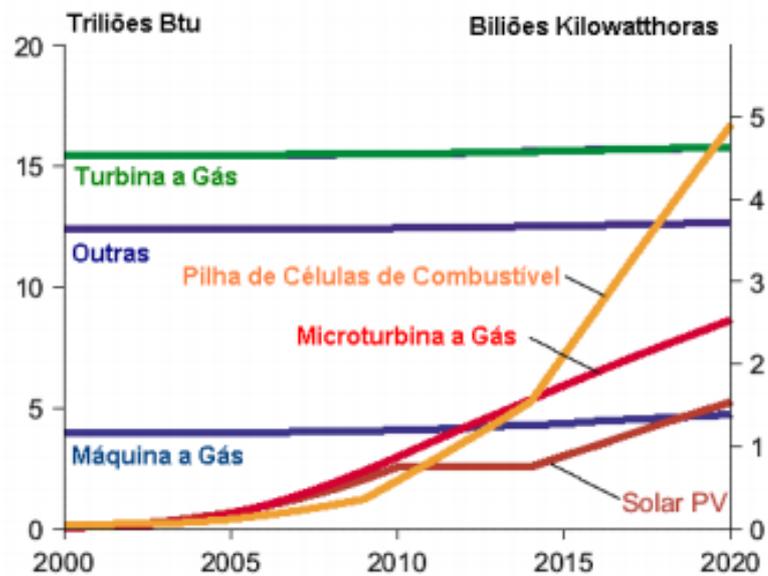


Figura 8 - Previsão de evolução da instalação das várias tecnologias de GD

Fonte: SANTOS, Fernando António, SANTOS, Fernando Miguel. Geração distribuída versus centralizada. Instituto Politécnico de Viseu, 2008. Pg5

3.2 Características

Estes geradores elétricos, instalados próximos às fontes consumidoras, deverão produzir potências relativamente baixas, tipicamente abaixo dos 10 MW, para a alimentação de cargas locais. O conceito envolve os equipamentos de controlo, sistemas que articulam o funcionamento dos geradores e o eventual controlo de cargas, para uma adaptação à oferta. (Santos e Santos, 2008)

3.3 Vantagens

A proximidade do local de consumo ao de produção vai fazer com que a geração distribuída tenha algumas vantagens, trazendo benefícios para os consumidores e ou para as empresas do setor.

Uma dessas vantagens é a diminuição das perdas na rede de transmissão e distribuição, logo redução dos custos de exploração, bem como menor investimento para reforçar o sistema de rede.

A descentralização da geração agrega também na redução dos investimentos para implementação de novas centrais, nomeadamente para satisfazer a ponta e para reservas do sistema de produção, porque com a GD as novas unidades produtoras podem ser implementadas de forma modular à medida que cresce a procura. (Santos e Santos, 2008)

Segundo Santos e Santos, GD também promove o aumento da qualidade de serviço aos consumidores próximos à produção local por adicionar fonte não sujeita a falhas na transmissão e distribuição. A garantia da continuidade de serviço é um fator crítico para alguns setores industriais e empresas de serviços, e, essencialmente, onde a interrupção de serviço é certeza de prejuízo, ou em sistemas onde a vida humana possa ser colocar em risco. Além dos ganhos em qualidade, uma existência de reserva de geração distribuída permite um aumento da estabilidade do sistema elétrico.

Para o Instituto Humanitas Unisinos (IHU), a geração descentralizada representa uma possibilidade concreta para colaborar com a redução da curva de carga, reduzindo o consumo em horários de pico e diminuindo a necessidade de investimentos na geração, transmissão e distribuição do sistema elétrico integrado brasileiro.

Nos países onde houve o desenvolvimento da geração distribuída, os consumidores passaram a preocupar-se mais com aspectos do uso eficiente da energia. Dessa constatação se espera que adotando a GD, o consumo de energia diminua, sem afetar o conforto ou o bem-estar do consumidor. Ou seja, um consumo de energia menor para o mesmo serviço. (IHU)

A descentralização da geração de energia também deve diminuir a necessidade de construção de novas usinas, e, conseqüentemente, diminuir o impacto ambiental.

Esse fator ambiental é o que atrai organizações de proteção do meio ambiente à defesa de programas na área de geração distribuída.

Nesse âmbito, a *World Wildlife Foundation* (WWF) defende o desenvolvimento de programas governamentais para uma regulação de incentivos para maior disseminação de tecnologias de geração distribuída. Em diversos países, sobretudo na Europa, o desenvolvimento de medidas regulatórias, desde tarifas especiais que possam tomar partido das características de tecnologias utilizadas para geração distribuída até questões relacionadas com qualidade e aumento de segurança de suprimento, têm sido

peças importantes das políticas públicas para auxiliar a disseminação de fontes distribuídas. (WWF)

Segundo a WWF, a geração distribuída poderia representar, em 2020, 26% da geração de energia através de sistemas de co-geração e geração distribuída, sendo 22% a partir de fontes renováveis e o restante com sistemas a gás natural.

3.4 Aplicação e Uso

De acordo com o estudo de Santos e Santos, a geração distribuída é geralmente aplicada em zonas rurais, em zonas urbanas desenvolvidas, em locais onde o preço da concessionária que fornece energia é muito alto, e para aqueles consumidores que necessitam de uma alta qualidade de energia.

A GD pode oferecer um baixo investimento inicial, bem como baixos custos de funcionamento nas zonas rurais e isoladas, onde existem encargos fixos consideráveis de transporte e distribuição de energia e onde investimentos iniciais em sistemas de rede são muitos dispendiosos e antieconômicos. (Santos e Santos, 2008)

O uso em zonas urbanas desenvolvidas ocorre nas regiões em que a rede tem dificuldade para responder a novas solicitações de carga, em que o custo de reforço da rede é muito elevado, podendo assim, a geração descentralizada ser um investimento mais rentável. (Santos e Santos, 2008)

Em regiões onde o preço fornecido pela concessionária de energia da rede local é muito elevado, a geração distribuída poderá fornecê-la a menor custo e com níveis de qualidade em termos de fiabilidade semelhante ao sistema tradicional.

Existem os consumidores que precisam de níveis altos de qualidade no fornecimento de energia, relacionada com a ausência de interrupções no fornecimento ou fiabilidade (*“power reliability”*) e ou na qualidade da onda (*“power quality”*), onde os parâmetros característicos devem estar muito próximos dos valores nominais que os definem (frequência, sistema de tensões polifásico equilibrado e simétrico e formas de onda sinusoidais). Para estes com este tipo de necessidades de qualidade, a geração distribuída faz frequentemente parte da solução mais econômica para responder às suas necessidades específicas. (Santos e Santos, 2008)

3.5 Norma COPEL NTC 905100

Retirado da Norma NTC 905100 da COPEL, o esquema da Figura 9 mostra o sistema de proteção mínimo exigido, com os pontos de atuação, para a conexão de pequenos geradores em baixa tensão (Potência de Geração menores que 75 kW) ao sistema de distribuição da COPEL em alimentadores de 13,8 kV e 34,5 kV.

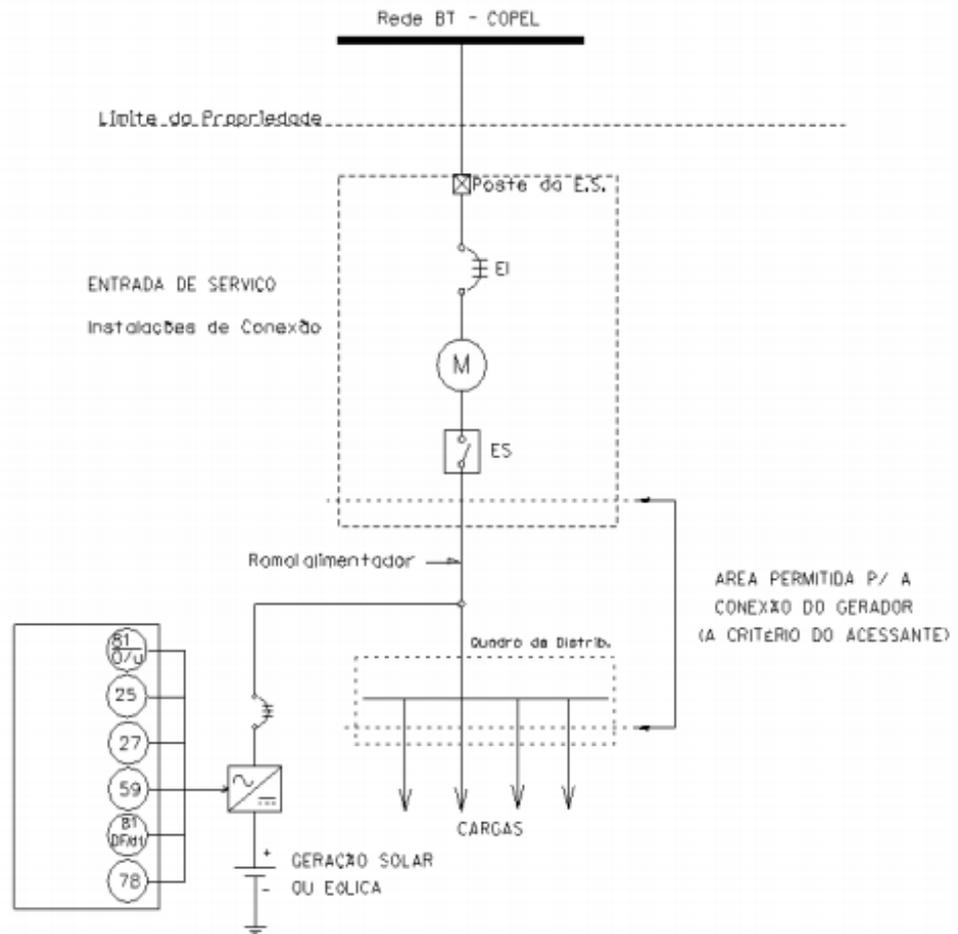


Figura 9 – Esquema de geração eólica conectada na rede

Fonte:

[http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/0342A62F50C68EC4032577F500644B9A/\\$FILE/905100.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/0342A62F50C68EC4032577F500644B9A/$FILE/905100.pdf)

Nesse esquema da Figura 13, não estão consideradas as proteções do gerador, que deverão ser estudadas e instaladas pelo consumidor que pretende conectar seu gerador a rede.

A Norma NTC 905100 retrata que a relação das funções de proteção que devem incorporar o sistema da Figura 13 deverá estar incorporada no inversor conforme norma ABNT ou internacionais:

- Sobretensão (em todas as fases) – 59;
- Subtensão (em todas as fases) – 27;
- Sobre e Subfrequência 81 O/U;
- Check de Sincronismo – 25;
- Anti-ilhamento – 78;
- Relé Anti-ilhamento – 81 df/dt .

Outras observações da norma:

- A função anti-ilhamento deverá possuir ajustes de elemento ativo de frequência e tensão;
- É recomendável que as funções 50/51 e 50/51 N sejam incorporadas pelo próprio disjuntor geral;
- O inversor deverá possuir elemento de interrupção (EI) automático acionado pela proteção do mesmo;
- Deverá ser instalado um equipamento de seccionamento visível (ES) na entrada de serviço entre o medidor e as instalações do acessante.

4. GERADOR EOLICO

4.1 COMPONENTES

Este capítulo apresenta os componentes para a construção do gerador eólico proposto, contemplando a análise de cada elemento do conjunto e seu princípio de operação. São eles: Alternador e retificador, Inversor de Frequência e Elemento Motriz.

4.1.1 Alternador

O alternador ou gerador é uma máquina elétrica girante de corrente alternada que tem como função transformar energia mecânica (giro) em elétrica (tensão). Seu princípio de operação está relacionado ao princípio da indução eletromagnética, onde a corrente elétrica flui através de um rotor, criando um campo magnético que induz a movimentação dos elétrons nas bobinas do estator, resultando em uma corrente alternada.

O princípio de funcionamento do mais simples alternador ocorre desta maneira: diante de uma bobina fixa (o induzido) põe-se a girar um ímã (indutor), que nos alternadores dos automóveis é geralmente acionado por uma polia. De qualquer modo, o indutor deve receber um impulso mecânico que o faça iniciar a operação. O ímã mantém um campo do qual o fluxo combinado com a bobina varia periodicamente, com a mesma frequência de revolução do ímã. No alternador, é a variação de fluxo que induz corrente. O fluxo varia enquanto a corrente aumenta ou diminui. Quando o fluxo é máximo, ele não varia, a força eletromagnética induzida é nula, a corrente é nula e muda de sentido. O campo magnético produzido pela corrente induzida exerce no ímã forças contrárias à sua rotação. (Braga, 2002).

Nos automóveis, acionado por uma correia diretamente ligada ao virabrequim, o alternador é o responsável pelo funcionamento de todos os componentes eletrônicos durante o funcionamento do veículo e também por recarregar a bateria. Para que isso seja possível, conectam-se ao alternador uma placa retificadora e o regulador de tensão, dois componentes fundamentais para que a corrente alternada seja retificada em contínua, corrente a qual opera os componentes do veículo.

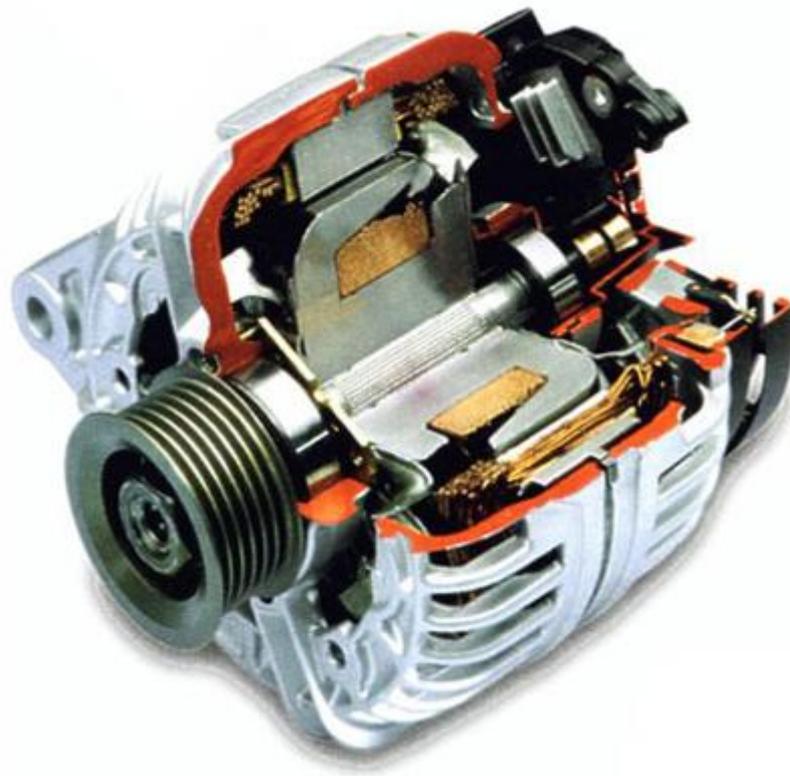


Figura 10 – Principais componentes do alternador

Fonte: <http://www.centroautomotivo3011.com.br/eletrica.htm>

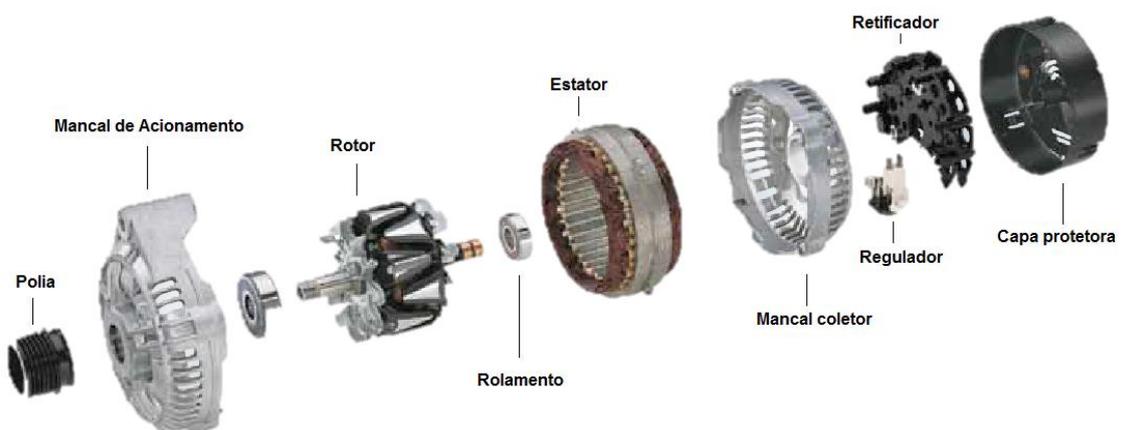


Figura 11 – Componentes do alternador

Fonte: Alternadores, Motores de Partida e Principais Componentes.

De acordo com a figura 11, os principais componentes do alternador são:

4.1.1.1 Rotor

Rotor é uma peça girante que cria o campo magnético, construído sobre um eixo de aço, possui em seu interior uma bobina de cobre fixada no seu eixo que é envolvida por um par de rodas polares (Núcleos magnéticos norte e sul). Essa bobina está conectada a dois anéis coletores. No momento em que a chave de ignição é ligada, o rotor, através do coletor, recebe da bateria a tensão que induzirá nos fios da bobina uma corrente elétrica. Esta corrente, por sua vez, produz o campo magnético que é potencializado pela construção das garras polares em aço. Este campo magnético é que induzirá a produção de corrente elétrica. A figura 12 está exibida um rotor automotivo.

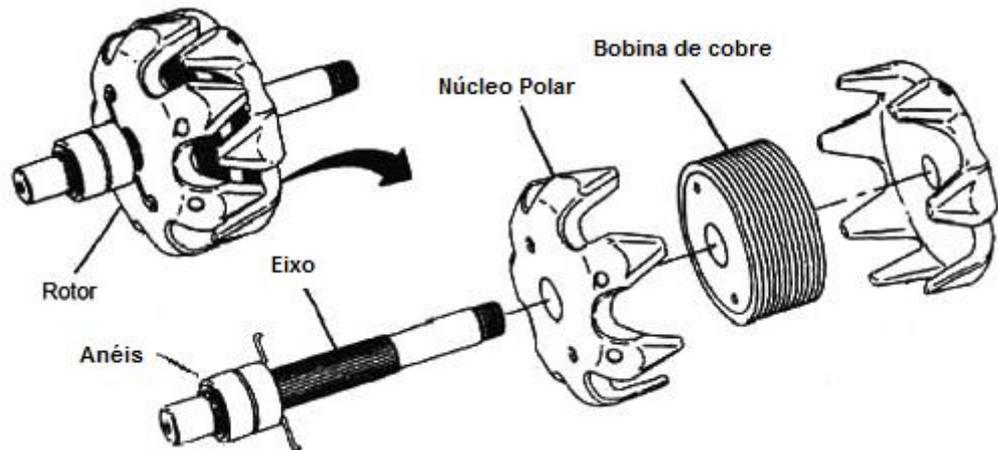


Figura 12 – Rotor de um alternador

Fonte:

http://www.tecnoficio.com/electricidad/alternador_del_automovil.php

4.1.1.2 Estator

O estator é um conjunto de bobinas isoladas entre si que são fixadas em um conjunto de laminas de aço. Esse tem objetivo de conduzir o fluxo magnético. Com o rotor inserido ao estator, em um espaçamento mínimo (menor que 1mm), a corrente elétrica é induzida pelo campo magnético, agindo nos fios do estator. Na figura 13, observa-se que o estator possui três enrolamentos distintos, uma para cada fase. Os três grupos de enrolamentos são dispostos alternadamente, com uma leve superposição, necessário para a geração dos defazamentos pretendidos, 120 graus por fase.

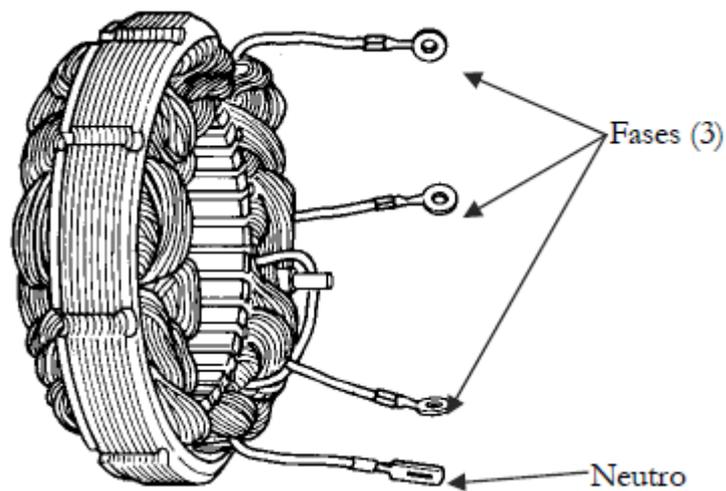


Figura 13 – Estator automotivo

Fonte: CASTRO, Miguel. Manual do alternador.

4.1.1.3 Conjunto Retificador

A corrente alternada gerada pelo alternador automotivo necessita ser convertida, pois os componentes dos automóveis operam com corrente contínua, esta retificação é feita pela placa de diodos ou conjunto retificador.

O conjunto retificador mostrado na figura 14 é constituído de díodos, um par para cada fase, para que seja aproveitado tanto o ciclo positivo quanto o negativo, através de um conjunto retificador ponte (Alves e Lourenço, 2009)

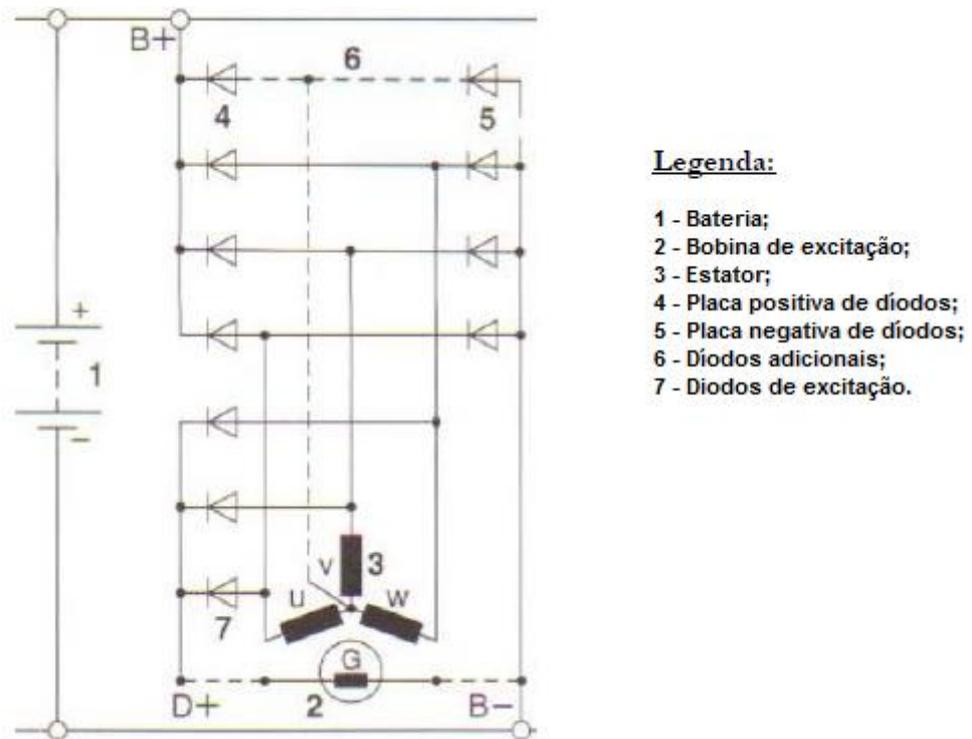


Figura 14 – Esquemático conjunto regulador

Fonte: Alves e Lourenço, 2009.

Aplicando as três fases são defasadas em 120 graus, obtém-se a retificação apresentada abaixo (figura 15).

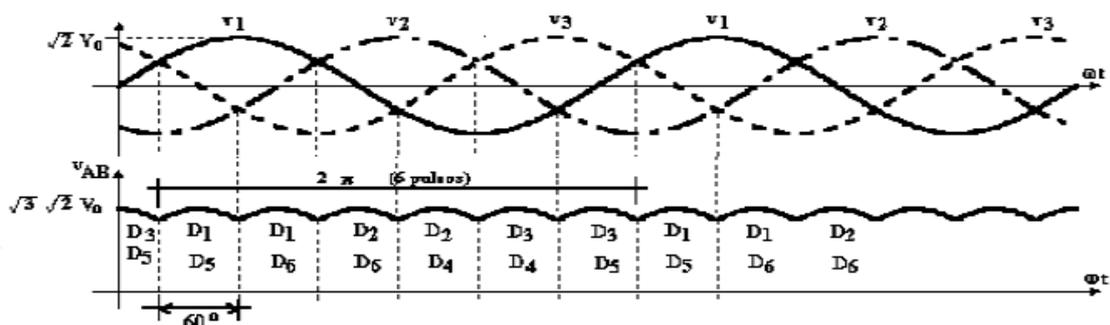


Figura 15 – Retificador de onda completa trifásico

Fonte: <http://www.corradi.junior.nom.br/ELltrifasico.pdf>

Analisando a figura 15, observa-se que em uma volta do rotor, 2π radianos, tem-se 6 pulsos de tensão, logo a tensão de saída é demasiadamente ondulada. Esse problema no entanto é minimizado nos

alternadores mais novos que possuem seis pares de polos e seis bobinas por enrolamento, pois a cada rotação terão 36 picos de tensão, fazendo com que a tensão retificada torne-se estabilizada, tendo os pequenos picos de tensão absorvidos pela bateria.

4.1.1.4 Regulador de Tensão

Esse aparelho é responsável por proteger os componentes que utilizam a energia gerada pelo alternador, fazendo isso por controlar a tensão da energia gerada em qualquer rotação do motor.

Um regulador de tensão eletrônico básico possui o esquema apresentado na figura 16.

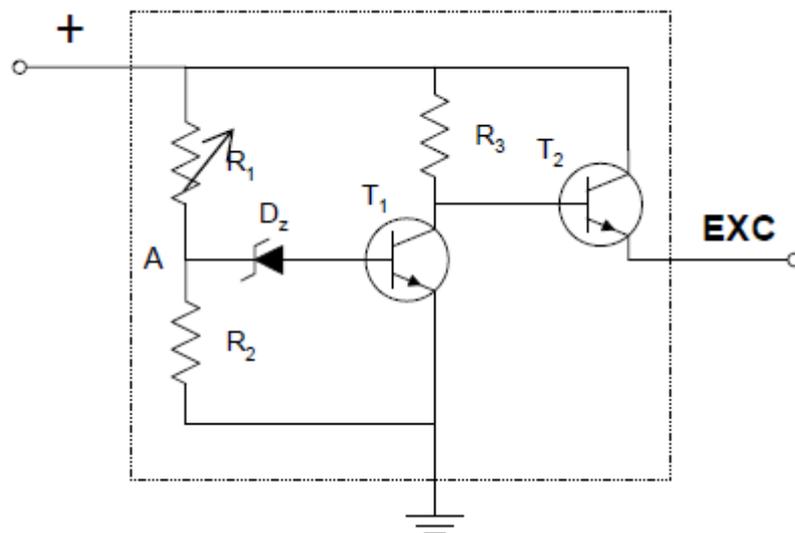


Figura 16 – Regulador eletrônico básico

Fonte: Alves e Lourenço, 2009.

Um diodo zener (D_z) que comanda os dois transistores (T_1 e T_2). Já os resistores 1 e 2 constituem um divisor de tensão, definindo a tensão que funcionará o regulador.

Dois estados de funcionamento são observados no regulador. O primeiro acontece quando o potencial no ponto A não é suficiente para que o diodo zener conduza, assim o transistor T_1 ficará em corte e o transistor T_2 conduzirá, habilitando assim a excitação do alternador. A segunda

configuração acontece quando o potencial A é suficiente para que o diodo zener conduza, fazendo com que o transistor T₁ opere e o T₂ entre em corte.

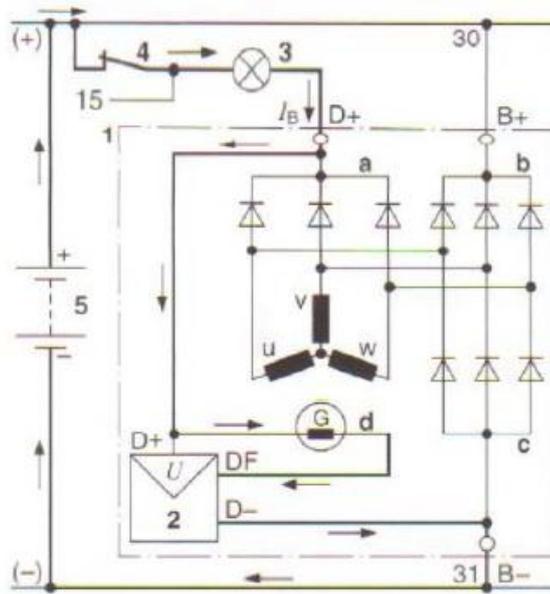
4.1.1.5 Circuitos de correntes

Nos alternadores automotivos, há três circuitos de correntes. (Alves e Lourenço, 2009)

- Circuito de corrente de pré-excitação;
- Circuito de corrente de carga;
- Circuito de corrente de excitação.

O alternador é uma máquina auto excitante, ou seja, a corrente de excitação é obtida através de um desvio da corrente principal.

No circuito de corrente de excitação há dois diodos, um de excitação e outro negativo. Isso quer dizer que a auto-excitação do alternador somente começará quando a tensão atingir um valor de, no mínimo, $2 \times 0.6V = 1,2V$. Sendo assim, torna-se necessário o circuito de corrente de pré-excitação. Esse último circuito é facilmente obtido ligando o alternador à bateria, utilizando também uma lâmpada indicativa conforme pode-se notar na figura 17.



Legenda:

- 1 - Alternador;
- 1a - Díodos de excitação;
- 1b - Díodos da placa positiva;
- 1c - Díodos da placa negativa;
- 1d - Bobina de excitação;
- 2 - Regulador;
- 3 - Lâmpada indicativa de pré-excitação;
- 4 - Interruptor;
- 5 - Bateria.

Figura 17 – Circuito de corrente de pré-excitação

Fonte: Alves e Lourenço, 2009

O circuito de carga do alternador é observado na figura 18. Percebe-se que no terminal B+ do alternador sairá a corrente que carrega a bateria e as cargas conectadas a ela.

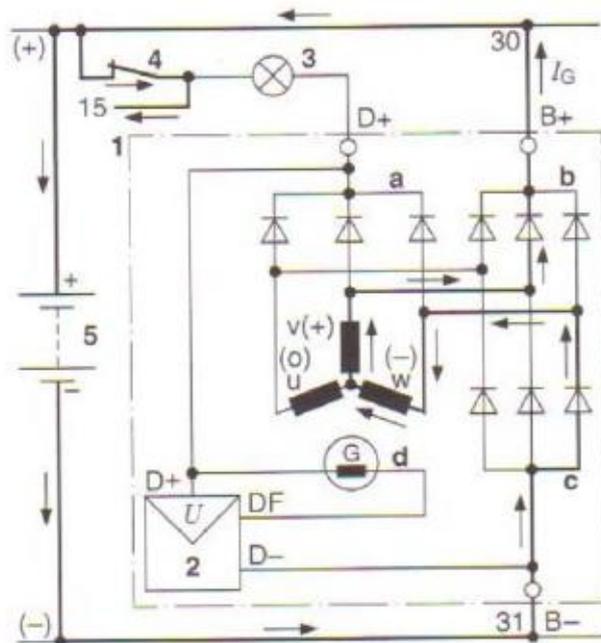


Figura 18 – Circuito de corrente de carga

Fonte: Alves e Lourenço, 2009

A corrente de excitação é derivada do enrolamento do estator através de três díodos de potencias negativas, conforme figura 19.

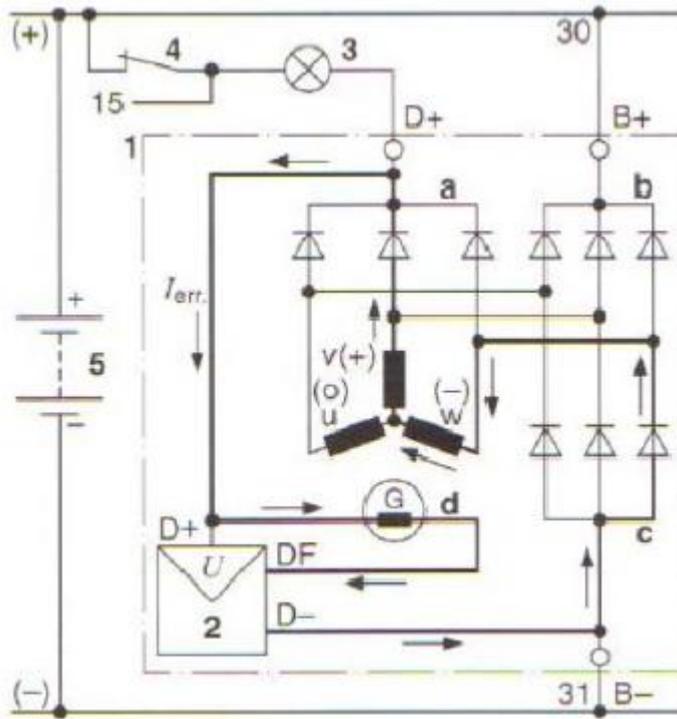


Figura 19 – Circuito de corrente de excitação

Fonte: Alves e Lourenço, 2009

4.1.2 Dínamo

O dínamo é utilizado em veículos mais antigos para gerar corrente contínua assim como o alternador (Alves e Lourenço, 2009). A figura 20 mostra os componentes desse dispositivo e uma breve descrição dos mesmos.

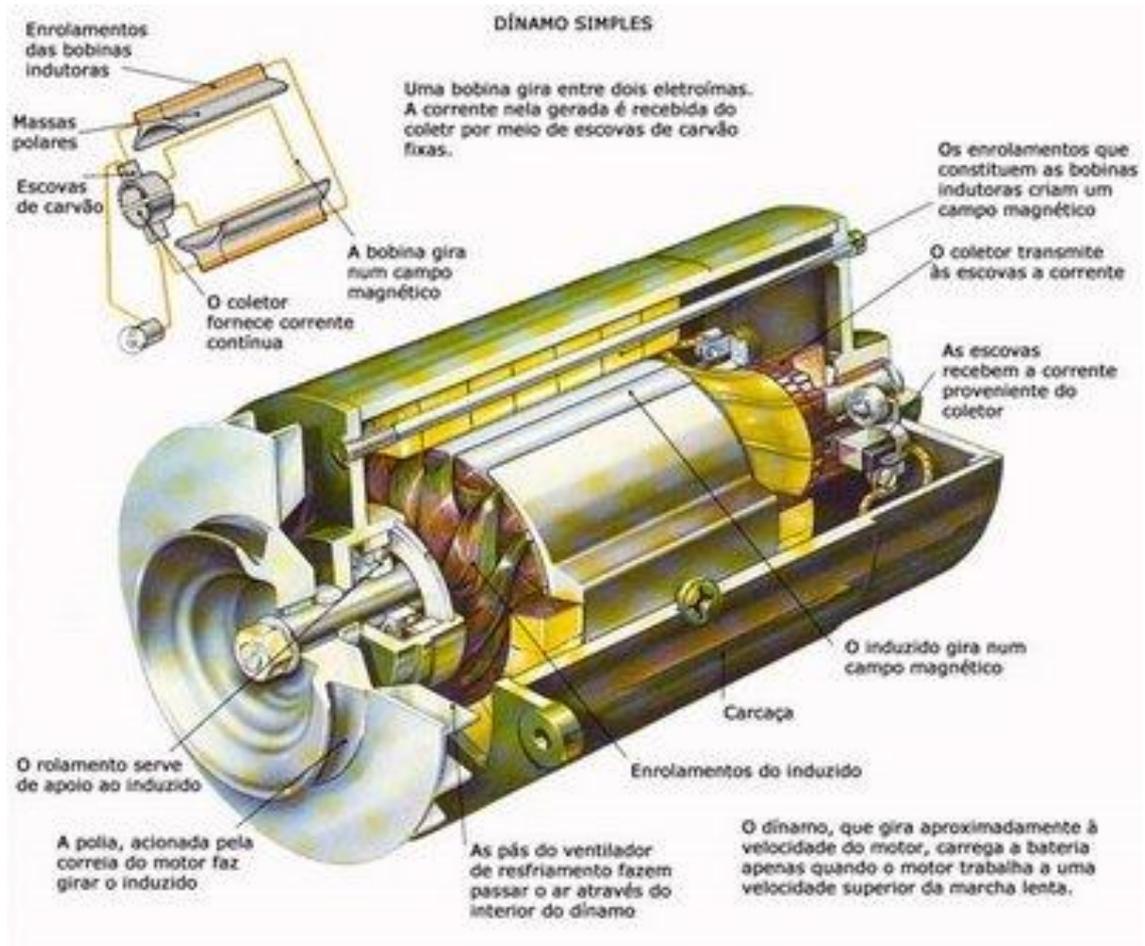


Figura 20 - Dínamo simples

Fonte: <http://autosauer.com.br/2008/12/como-funciona-um-dnamo.html>

Mas, diferentemente desse, o dínamo não possui eficiência em marcha lenta, o que equivale a rotações baixas. Por esse fato, e pela busca do proprietário de carros mais antigos pela utilização de equipamentos eletrônicos em seu veículo, muitos modificaram seus carros para o alternador.

O gráfico de Alves e Lourenço, 2009 (Figura 21) mostra a curva característica da corrente em amperes por rotações por minutos.

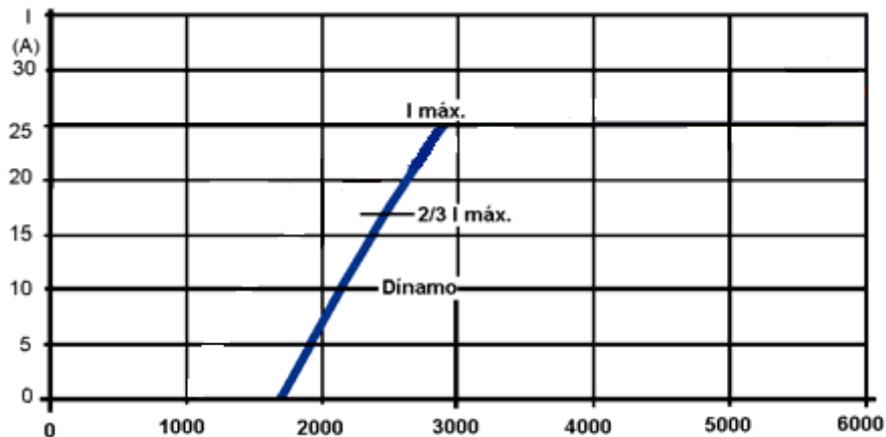


Figura 21 - Curva de desempenho do dínamo

Fonte: Alves e Lourenço, 2009

Tanto o alternador e o dínamo, são equipamentos que utilizam o princípio da indução eletromagnética. A geração de um campo magnético indutor pode ser efetuada através de ímãs permanentes (magnetos) ou eletroímãs (bobinas indutoras).

Assim como foi discutido anteriormente com o alternador, os geradores de energia elétrica podem ter dois tipos construtivos: o indutor é o estator e o induzido é o rotor; o indutor é o rotor e o induzido é o estator (Alves e Lourenço, 2009).

No caso do gerador do dínamo só pode ser feito do primeiro modo, isto é o indutor é o estator e o induzido é o rotor.

O dínamo tem uma série de desvantagens face ao alternador. Neste contexto têm-se que o dínamo é alvo de maior manutenção devido a passagem de corrente elevada dos segmentos do coletor para as escovas provocar o aparecimento de arcos elétricos, provocando um rápido desgaste do coletor e das escovas (Alves e Lourenço, 2009).

Outra diferença é que o dínamo tem um arrefecimento menos eficiente que o alternador, o que gera perdas adicionais. Além disso, para uma mesma potência elétrica a ser gerada o dínamo é mais pesado.

No caso particular do sistema de carga dos automóveis com motores de combustão, as vantagens do alternador face ao dínamo são ainda maiores:

Teoricamente, o dínamo atinge a sua tensão nominal a um número de rotações superior ao do alternador. Enquanto o alternador atinge a sua tensão nominal a partir das 400/600 rpm, afirma-se que o dínamo dificilmente a atingirá abaixo das 1300 rpm.

Esta característica influencia diretamente na utilização desse dispositivo como gerador eólico, uma vez que o trabalho atual tem como objetivo a verificação da viabilidade da construção de um gerador compacto.

Para o desenvolvimento de um protótipo de um gerador utilizando um dínamo já em mãos deve-se realizar o ensaio para verificação da curva de desempenho. Dessa maneira, analisando a rotação mínima necessária para geração de corrente será possível a discussão da viabilidade do protótipo ser construído com um elemento motriz de raio pequeno e sem compensação de polias, mantendo o espaço físico reduzido utilizado pelo projeto.

4.1.3 Inversor

Também conhecidos como conversores de frequência são dispositivos responsáveis pela conversão de corrente contínua em corrente alternada simétrica de amplitude e frequência desejadas. O inversor deve dissipar o mínimo de potência, para evitar perdas e produzir uma tensão com baixo conteúdo harmônico, estando em sincronismo com a rede (CEPEL, 2004).

Os inversores utilizam dispositivos semicondutores, como IGBTs, SCRs e transistores para realizar o chaveamento na entrada em corrente contínua, produzindo na saída uma corrente alternada. Este chaveamento também é responsável por alternar o fluxo de corrente. Com a comutação da corrente contínua através da modulação PWM e a corrente retificada, o bloco inversor irá gerar uma CA, podendo assim variar a frequência e a tensão entregues a carga. Conversores de frequência mais modernos além de realizarem o controle de velocidade no eixo de motores elétricos trifásicos em corrente alternada também controlam o seu torque (ROCHA, Joaquim, 2013).

Podem ser realizados basicamente dois tipos de controle de velocidade em cargas como motores elétricos: Escalar e Vetorial. O primeiro é vastamente empregado e baseia-se no controle da tensão e frequência, porém não é possível realizar um adequado controle do torque. Já no controle vetorial, pode-se realizar um controle mais otimizado do torque e também da velocidade do motor em questão, porém, diferentemente do controle escalar, é necessário o conhecimento do modelo matemático da carga ligada a ele, devido as equações cinemáticas existentes.

O inversor apresenta como vantagem em aplicações de grande porte, gerar economia no cabeamento das instalações e da distribuição de energia, pois, em corrente alternada a tensão de operação em questão possui amplitude maior que em corrente contínua, apresentando uma corrente elétrica menor, exigindo então cabos com menor bitola. Os conversores de frequência ainda podem ser utilizados para o acionamento de motores de indução com velocidade variável, sistemas de energia ininterrupta como banco de capacitores, UPS e no-breaks, aquecimento indutivo (indução de corrente elétrica no material para produzir calor) e por fim em reatores eletrônicos.

Para cada aplicação é necessária à determinação do tipo de inversor com base tanto na tensão CC de entrada como na tensão de saída CA, também com relação à potência, variação de tensão, frequência e forma de onda que a carga fará no conversor de frequência. Os aspectos principais para o dimensionamento do inversor devem levar em conta a potência em operação normal por um determinado período de tempo que ele deverá alimentar e a potência necessária para a partida de motores e demais cargas ligadas a ele. Outros aspectos da aplicação devem ser levados em consideração durante o dimensionamento, como por exemplo, demanda de torque (constante ou quadrático), precisão de controle, partidas e frenagens bruscas ou em intervalos curtos ou muito longos, regime de trabalho. O gerador eólico de baixo custo, deve ser usado um conversor de frequência monofásico, que são indicados para baixas potências, até 5kW e para aplicações com alta potência o uso do inversor trifásico (CEPEL, 2004). A figura 22 representa o circuito de um inversor de frequência monofásico alimentando uma carga RL, e a respectivas formas de onda de tensão e corrente:

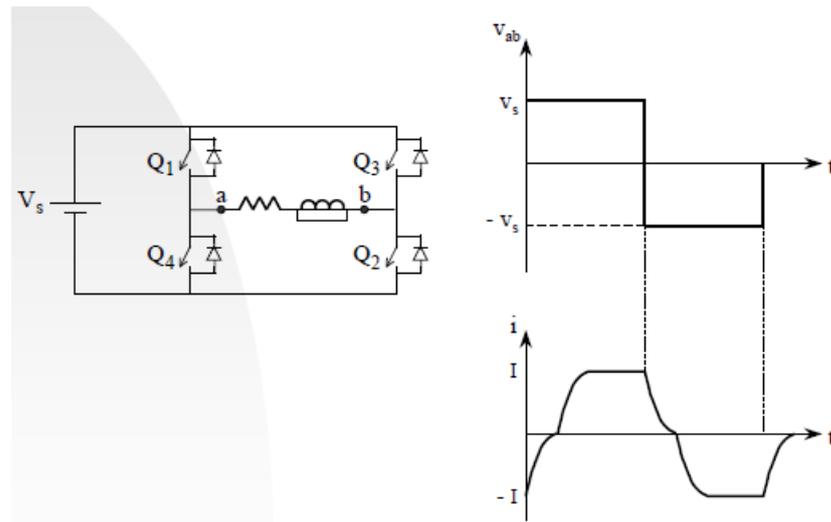


Figura 22 - Inversor com carga RL e formas de onda de tensão e corrente

Fonte:

http://pessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/arquivos/Acionamento_04_Conversor_de_Frequencia.pdf

4.1.3.1 Inversor Grid Tie

No caso do gerador eólico, e também de painéis fotovoltaicos, é necessário o uso do inversor *grid tie*, que permite a interligação dos sistemas com a rede da concessionária. Isto se deve ao fato dele conseguir sincronizar com a frequência da rede de 60Hz através de um oscilador local e limitar a tensão para que a mesma não seja superior à tensão da rede. O conversor *grid-tie* ainda possui um fator de deslocamento constante, ou seja, as formas de onda da tensão de saída e da corrente estão em fase, e muitas vezes possuindo um ângulo de defasagem de apenas 1 grau com relação à rede elétrica da concessionária. O inversor *grid tie* possui um seguidor do ponto de máxima potência (MPPT), permitindo aproveitar ao máximo a capacidade de geração do gerador eólico, além de possuir um dispositivo de proteção contra ilhamento, sobrecarga e sobretensão (FRANCHI, 2009).

O inversor *grid tie* somente funciona com a rede energizada, então em casos de queda da energia, ele não atuará como um sistema backup, pois, em casos de manutenção na rede, ela não pode estar eletrificada.

4.1.4 Elemento Motriz

O elemento motriz é um dispositivo mecânico no qual se relaciona energia eólica e mecânica. Quando utilizada em ventiladores, ou sistemas de arrefecimento, a energia mecânica de rotação da hélice é transformada em aumento de pressão do ar, gerando correntes. Porém, o objetivo do trabalho aqui é o inverso. Utiliza-se uma ventoinha para se transformar a energia eólica, dos ventos, em rotação mecânica.

Para uso em geradores, esse dispositivo é utilizado com diversos designs e maneiras de acoplamento.

O princípio de funcionamento das hélices de pás, mais comumente vista nos geradores eólicos de alta potência, é o movimento de rotação gerado pela diferença de velocidade do ar que passa na parte superior da pá, mais rápido, e a velocidade do ar que passa na parte inferior da pá, mais lento. Essa situação, semelhante a de voo de um avião, gera um movimento da pá para cima, girando o eixo da hélice, Figuras 23 e 24.

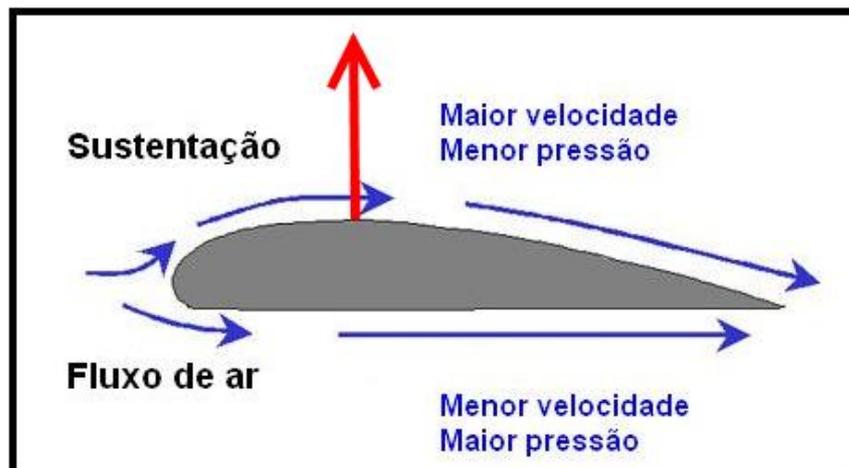


Figura 23 – Princípio de funcionamento de uma hélice de pás

Fonte: <http://quartzodeplasma.files.wordpress.com/2012/10/asa.png>



Figura 24 – Geradores eólicos com hélices de pás

Fonte: http://www.respostassustentaveis.com.br/wp-content/uploads/2012/02/Serie_energia_topo.jpg

Esse tipo de hélice necessita que o sistema gerador seja rotacionado para que a corrente de ar esteja sempre contra, ou seja, batendo de frente nas pás.

Outro tipo de hélice, semelhante ao anterior, é a encontrada nos ventiladores comerciais e helicópteros e pode ser visto na Figura 25. Nesses casos, as pás da hélice são deformadas para que a rotação da mesma "empurre" o ar para frente, ou para baixo. No uso em geradores, a corrente de ar ao se chocar com a superfície deformada da pá, será direcionada para um sentido promovendo a rotação do eixo. Porém, esse sistema compartilha a mesma falha do tipo anterior, devendo sempre estar de frente para a corrente de ar.



Figura 25 – Gerador eólico com hélice de pás deformadas

Fonte:

http://farm4.staticflickr.com/3145/2568539467_f33a2716a3_z.jpg?zz=1

Evitando-se essa necessidade de rotacionar o sistema conforme a direção do vento, existem outros tipos de ventoinhas, os quais a energia eólica pode ser captada independente da variação do sentido da corrente de ar. É o caso das ventoinhas helicoidais, Figura 26.



Figura 26 – Ventoinha helicoidal

Fonte: Autoria Própria

Essas ventoinhas são utilizadas em sistemas de ar condicionado veicular e também encontradas em sistemas aspiradores.

4.1.5 Bateria

A bateria é um dispositivo de armazenamento de energia química que tem a capacidade de se transformar em energia elétrica quando solicitada, portanto as baterias não são depósitos de energia elétrica, mas sim de energia química, até que um circuito seja conectado através dos seus pólos, dando origem a uma reação química que ocorre no seu interior, convertendo esta energia química em elétrica que é então fornecida ao circuito.

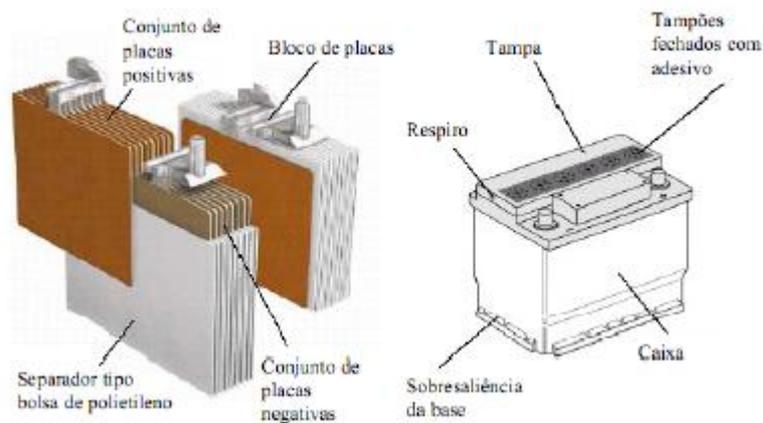


Figura 27 - Elementos constituintes de uma bateria

Fonte: <http://www.batelau.com.br/bateria.html>

Segundo Alves e Lourenço, 2009, a bateria tem um papel bem definido a desempenhar no sistema elétrico de um veículo. As principais funções da bateria são:

- Fornecer energia para fazer funcionar o motor de arranque;
- Prover de corrente elétrica o sistema de ignição durante o arranque;
- Suprir de energia as lâmpadas das lanternas de estacionamento e outros equipamentos que poderão ser usados enquanto o motor de combustão não estiver operando;
- Agir como estabilizador de tensão para o sistema de carga e outros circuitos elétricos;
- Providenciar corrente quando a demanda de energia do automóvel exceder a capacidade do sistema de carga (alternador).

4.2 COMPORTAMENTO NA REDE

A conexão do gerador eólico a rede de distribuição, pode acarretar alguns fenômenos conhecidos por influenciar na qualidade de energia elétrica, tais como: Variação de Tensão, *Flicker*, Harmônicos e Transitórios. Serão vistos também métodos para o controle de frequência e tensão.

4.2.1 Variação de Tensão

Variações de tensão podem afetar equipamentos sensíveis, processos de produção e causar indisponibilidade e prejuízos. Podem ser consideradas Variações de Tensão de Curta Duração: Afundamento de tensão e Elevação de tensão. E Variações de Tensão de Longa Duração: Sobretensão e Subtensão. (ROCHA, 2013). A seguir serão conceituados cada um destes fenômenos.

O afundamento de tensão ocorre quando o valor eficaz da tensão for superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu, tendo como duração superior ou igual a um ciclo e inferior a três minutos (ANEEL, 2008). Esta variação pode ser causada pela partida de motores. Uma alternativa para a correção do afundamento de tensão é a utilização de um sistema de armazenamento de energia conhecido como *flywheel*, onde ele converte a energia cinética produzida pela inércia do rotor em energia elétrica (ROCHA, 2013).

No caso da elevação de tensão, é o evento de valor eficaz da tensão superior a 1,1 pu, com duração igual ou superior a um ciclo e inferior a três minutos. Causado pelo curto circuito entre uma das três fases e o terra, onde esta fase têm sua tensão reduzida enquanto as outras duas têm suas tensões elevadas (ROCHA, 2013).

No caso de Variações de Tensão de Longa Duração, a Sobretensão pode ser causada pelo desligamento de cargas, e a Subtensão a ligação destas cargas, como por exemplo, motores.

4.2.2 Flicker

A flutuação de tensão é o fenômeno de variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. A origem dos estudos é devido a problemas relacionados à cintilação luminosa causada em sistemas de iluminação incandescente, ou *flickler*, como é chamado em meio industriais. (PRODIST)

As razões mais conhecidas para a ocorrência destes fenômenos são causadas por grandes cargas que consomem grandes volumes de energia reativa que, não suportadas adequadamente pela potência de curto-circuito das redes, acabam por causar seguidos afundamentos na tensão de alimentação. Outra situação clássica ocorre quando existe mudança de fonte de alimentação, como a operação de uma mesma carga por geradores de “back-up” que possuem impedâncias típicas bem maiores (e menores potências de curto-circuito) que os transformadores que eles substituem em regime de geração de emergência.

Na figura 28, pode-se ver a variação da tensão e potencia reativa da instalação quando há o *back-up* com gerador.

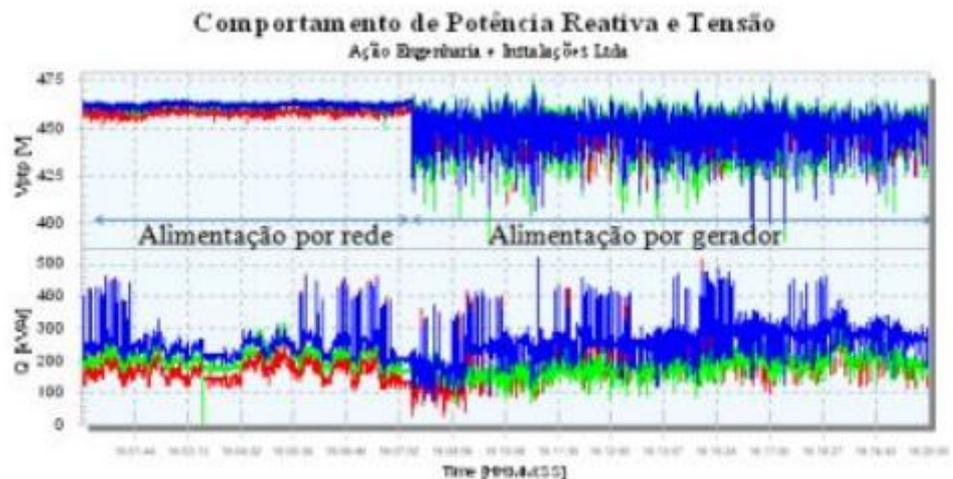


Figura 28 – Comportamento da tensão e potencia reativa

Fonte: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/colunistas/josestarosta/775-flutuacao-de-tensao-flicker.html>

Para correção desse fenômeno, pode-se optar por elevar a potencia de curto-circuito ou a adequar compensação dos reativos. (José Starosta, 2012)

4.2.3 Harmônicos

A circulação de correntes com formas de ondas deformadas através do uso de cargas não lineares vem aumentando significativamente e de forma preocupante, principalmente sob o ponto de vista da concessionária de energia elétrica. Essa preocupação se deve pois, em suas redes, circulam correntes originadas dos mais diversos tipos de fontes harmônicas (tipos de cargas). O aumento da circulação destas correntes, é originada da disseminação industrial cada vez maior dos equipamentos estáticos, cargas comprovadamente geradoras de harmônicos, cujas influências na rede de distribuição se mostram danosas à concessionária e aos outros consumidores. (CPFL, 2002)

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (Figura 29). (ROCHA, Joaquim, 2013).

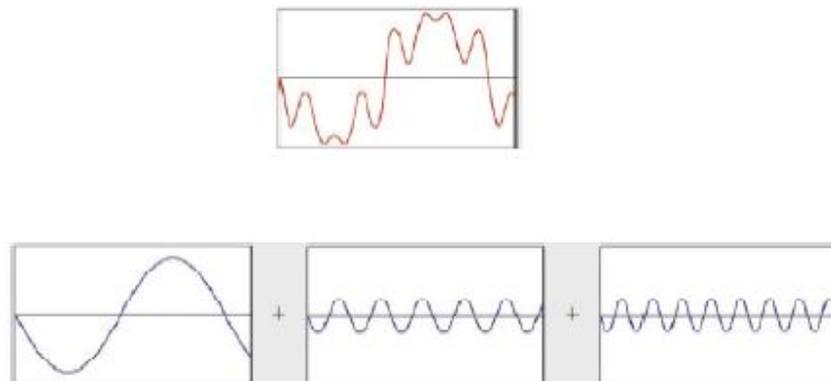


Figura 29 – Distorção Harmônica

Fonte: ROCHA, Joaquim, 2013.

Harmônicos de corrente são produzidos por cargas não lineares, tais como equipamentos de eletrônica de potência. Essas cargas geram correntes não senoidais mesmo sendo alimentadas com tensão senoidal.

Esses harmônicos têm seus efeitos na eficiência energética. Em um sistema elétrico, se existe defasagem entre a tensão e a corrente, a potência instantânea é negativa durante os intervalos em que as ondas são de sinais opostos (Figura 30). A tensão média nesse caso é reduzida comparada com a situação em que as ondas estão em fase. Logo, tem-se que a máxima

potência ativa é transmitida para a carga, somente quando a corrente e tensão estão em fase e não distorcidas. (ROCHA, Joaquim, 2013).

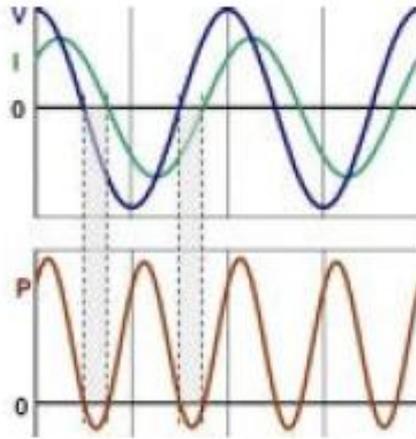


Figura 30 – Efeito dos harmônicos na potência

Fonte: ROCHA, Joaquim, 2013.

Os impactos dos geradores eólicos na rede, as turbinas de velocidade fixa por norma não podem causar harmônicos ou inter-harmônicos. Por outro lado, as turbinas que funcionam a velocidade variável, equipadas com um conversor, têm especificações próprias que regulam a emissão de harmônicos de corrente, para frequências até 50 vezes a frequência da rede. De acordo com a norma europeia IEC 61800-3, os limites relevantes para a emissão de harmônicos são os apresentados na Tabela 2. Esta norma também recomenda que a THD5 (Distorção Harmônica de ordem 5) não exceda 5% da corrente da fundamental (FERNANDES, 2010).

Tabela 2 - Limites de emissão de acordo com a norma IEC 61800-3

Ordem da harmônica	Corrente de uma harmônica par (% de I da fundamental)	Corrente de uma harmônica ímpar (% de I da fundamental)
$n < 11$	4	1
$11 \leq n \leq 17$	2	0,5
$17 \leq n \leq 23$	1,5	0,4
$23 \leq n \leq 35$	0,6	0,2
$35 \leq n \leq 50$	0,3	0,1

Fonte: FERNANDES, Nuno. Impacto da Ligação de Geradores Eólicos na Rede de Distribuição. Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Pg20

4.2.4 Transitórios

“Transitórios são desvios significativos, de curta duração (da ordem dos μs ou ms), de tensão ou corrente em relação aos seus valores nominais” (FERNANDES, 2010, p. 21).

A produção de energia eólica pode originar transitórios na rede. Segundo dissertação de FERNANDES, estes transitórios ocorrem na sua maioria quando se liga ou desliga turbinas eólicas de velocidade fixa. Quando o vento atinge uma certa velocidade, a turbina eólica inicia a sua sequência de ligação à rede elétrica. A velocidade da turbina é então aumentada até que a velocidade do gerador atinja valores próximos da velocidade de sincronismo, sendo nesse momento a turbina ligada à rede. Durante esta sequência de ligação ocorre um pico de corrente que pode atingir o dobro da corrente nominal da turbina eólica o que pode alterar de forma substancial a tensão da rede a que está ligada.

Estes transitórios podem causar distúrbios em equipamentos sensíveis ligados à mesma parte da rede elétrica.

4.2.5 Controle de Frequência

A frequência é uma grandeza que deve ser mantida dentro de uma faixa muito específica, sendo $\pm 0,1\%$ do seu valor nominal, no caso 60Hz (Kundar, 1993), onde esta está relacionada com o equilíbrio das potências ativas geradas consumidas. No caso do projeto do gerador eólico, este controle e ajuste a rede é realizado pelo inversor *grid-tie*, onde este consegue sincronizar com a frequência da rede de 60Hz através de um oscilador local e limitar a tensão para que a mesma não seja superior à tensão da rede.

4.2.6 Controle de Tensão

Ao contrário da frequência, a tensão é uma grandeza de caráter pontual, ou seja, a tensão em um determinado nó só pode ser controlada pelo nó em questão ou sua vizinhança. Na prática, em redes de distribuição a queda de tensão entre um nó e outro não pode ultrapassar 5 a 10%, valores estes permitidos. Os geradores eólicos ligados à rede afetam diretamente o sentido da corrente e conseqüentemente a tensão entre nós, sendo assim é

necessário um controle de tensão para que fique dentro dos limites permitidos.

Para o gerador proposto, haverá dois controles de tensão. O primeiro se fará na tensão gerada, retificando e regulando para que a uma tensão contínua seja entregue ao inversor *grid-tie*, que fará a conexão com a rede controlando tensão e frequência entregue.

5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção serão abordados dois experimentos para analisar o comportamento do gerador eólico com materiais de mercado. Figura 31.



Figura 31 – Componentes utilizados

Fonte: Própria

Onde serão apresentados dois modelos com diferentes máquinas geradoras de energia elétrica.

5.1 Experimento 01 – Alternador automotivo

No primeiro protótipo é utilizado um alternador automotivo como máquina elétrica geradora de energia. A figura 32 apresenta o ensaio realizado no laboratório da universidade, no qual foram utilizados os seguintes materiais:

- 3 Multímetros;
- 2 Pontes retificadoras de diodos;
- 2 Varivolts;
- 1 Reostato;
- 1 Tacômetro;
- 20 Cabos tipo banana;
- 1 Motor de corrente continua;
- 1 Bateria 7Ah;
- 1 LED;
- 1 Alternador automotivo;
- 1 Correia.

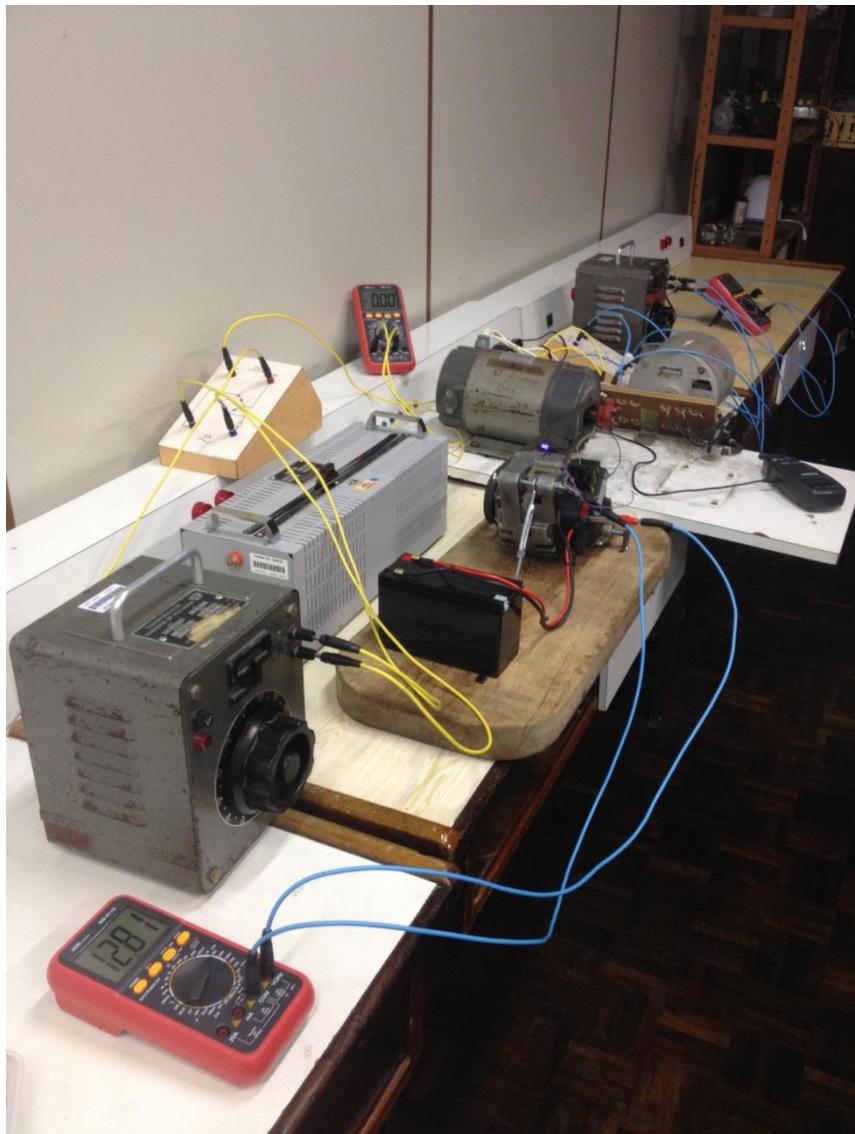


Figura 32 – Ensaio experimental Alternador Automotivo

Fonte: Própria.

A seguir serão apresentados os procedimentos para realizar o primeiro ensaio proposto, com alternador automotivo:

1. Para simular a variação da velocidade dos ventos aproveitados pelo elemento motriz é utilizado um motor CC de 3000rpm;

2. Sua ligação é feita injetando corrente contínua na sua armadura (Terminais S1 e S2) e no campo (Terminais F1 e F2);

3. Coloca-se um reostato em série com o campo para limitar a corrente e com o auxílio de multímetros é monitorada a entregue a armadura e a corrente de campo;

4. Através da correia é possível fazer a interface entre o motor e o alternador automotivo;

5. A bateria é conectada ao alternador, seu terminal positivo é ligado ao terminal B+ e o negativo a carcaça (terra). Para sinalizar que existe excitação é usado um LED entre o terminal D+ e o positivo da bateria;

6. Variando as tensões entregues ao motor, o mesmo inicia sua rotação. Ao chegar à velocidade de 1100 rpm, o LED apaga, indicando que o alternador começou a entregar energia ao sistema;

7. O incremento na velocidade permite a coleta de dados pertinentes para a construção da curva de velocidade [rpm] por corrente elétrica [A];

8. Esse levantamento é feito a partir do uso do tacômetro posicionado no eixo do alternador e um amperímetro em série entre terminal B+ e positivo da bateria.

O resultado é apresentado na figura 33.

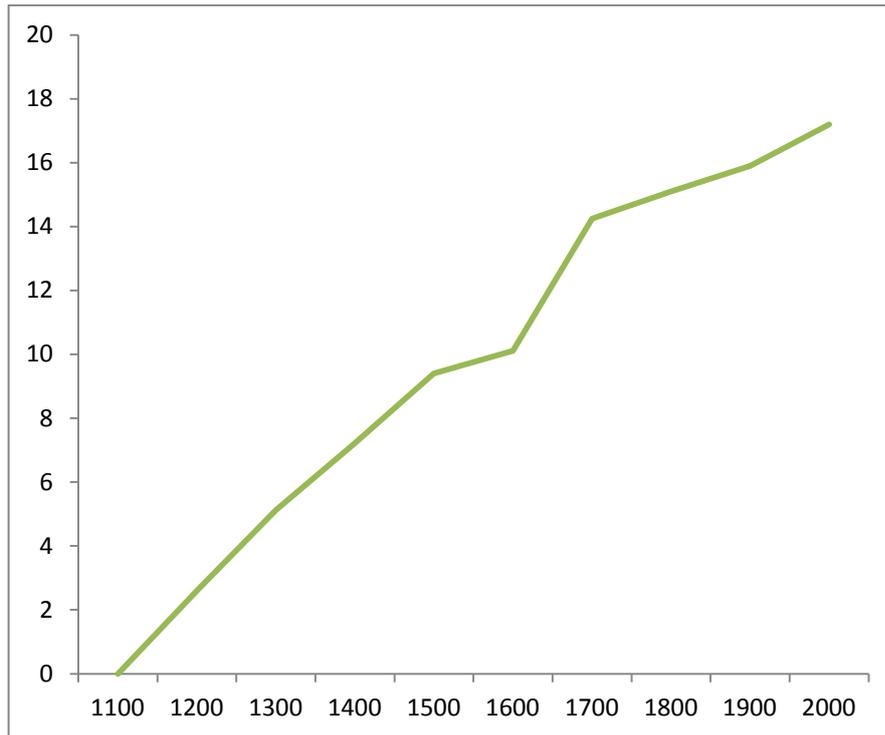


Figura 33 – Velocidade [rpm] x Corrente [A]

Fonte - Própria

Tem-se que a potencia numa turbina que passa perpendicularmente atrás de uma área circular é dada por (BETZ, 1966):

$$P = \frac{(\rho v^3 \pi r^2)}{2}$$

Onde:

P – Potência em Watts [W]

ρ – Densidade do ar seco = 1,225 kg/m³ (PTN)

v – velocidade média do vento [m/s]

π – 3.1415926

r – Raio em m [metros]

Considerando o limite de Betz, que indica a máxima eficiência para turbinas eólicas incluímos a formula um Cp máximo de 0.59 significando que recupera-se apenas 59% da energia do vento. Logo a formula torna-se:

$$P = \frac{(\rho v^3 \pi r^2) C_p}{2}$$

De acordo com o mapa de ventos do estado do Paraná, apresentado na figura 4, é considerado para efeito de cálculos, uma velocidade média do vento de aproximadamente de 6 m/s, esse que é o melhor cenário para geração eólica do estado.

A partir dos valores obtidos experimentalmente, multiplica-se por 14V, tensão nominal do alternador, para obter a potência elétrica gerada. Partindo dessa, podemos calcular o raio necessário em metros do elemento motriz, apresentada na tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Relação de corrente, potência e raio no experimento 01

Velocidade [rpm]	Corrente [A]	Potência [W]	Raio [m]
1200	2,59	36,26	0,38
1300	5,13	71,75	0,54
1400	7,22	101,08	0,64
1500	9,40	131,60	0,73
1600	10,11	141,54	0,76
1700	14,25	199,50	0,90
1800	15,10	211,40	0,93
1900	15,90	222,60	0,95
2000	17,20	240,80	0,99

Fonte: Própria

Devido à limitação dos equipamentos, não foi possível alcançar a corrente nominal, 60 amperes, do alternador utilizado.

Com a corrente nominal, obtém-se uma potência de 840W, que resultaria em raio de 1,85 metros.

Considerando o modelo proposto que utiliza uma hélice helicoidal, figura 19, torna-se inviável a confecção da mesma com raio calculado anteriormente.

Outra alternativa para o projeto de um gerador eólico, é apresentando no experimento 02.

5.2 Experimento 02 – Dínamo

O segundo experimento apresenta o projeto utilizando um dínamo em substituição ao alternador automotivo. As figuras 34 e 35 exibem o experimento realizado, no qual foram utilizados os seguintes materiais:

- 3 Multímetros;
- 2 Pontes retificadoras de diodos;
- 2 Varivolts;
- 1 Reostato;
- 1 Tacômetro;
- 20 Cabos tipo banana;
- 1 Motor de corrente contínua;
- 1 Bateria 7Ah;
- 1 Dínamo.



Figura 34 – Ensaio Dínamo.

Fonte: Própria

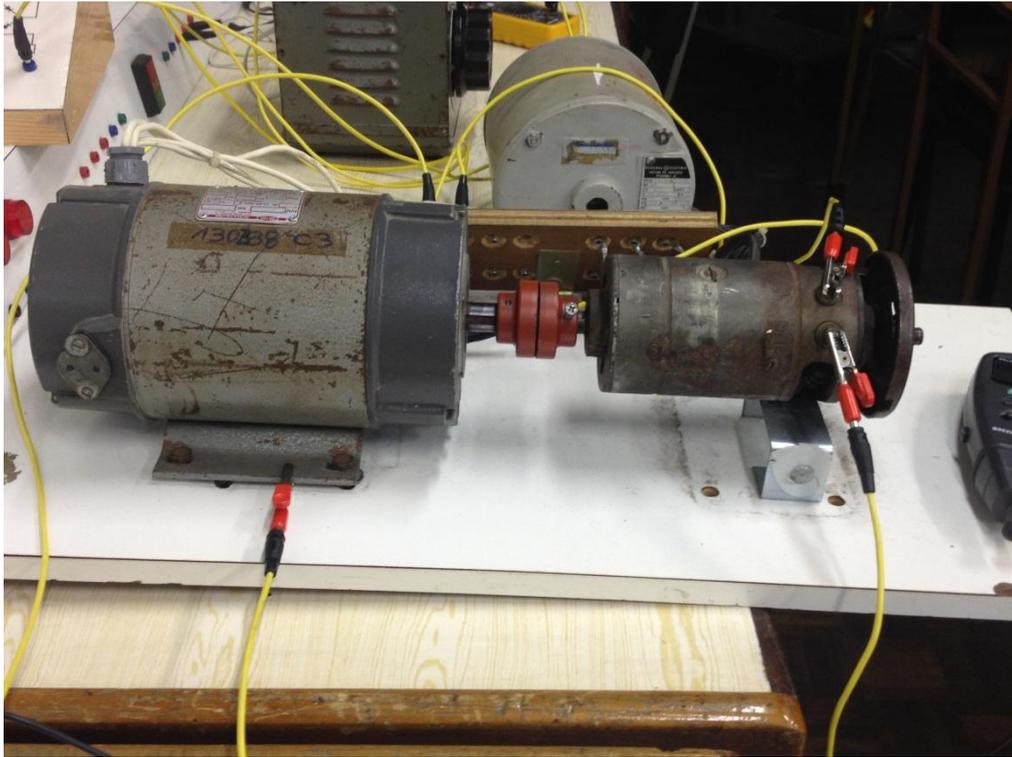


Figura 35 – Acoplamento direto Dínamo

Fonte: Própria

Agora serão apresentados os procedimentos para fazer o experimento em laboratório, utilizando Dínamo:

1. Utiliza-se o motor cc para simular a sazonalidade da velocidade dos ventos;
2. Acoplado diretamente o dínamo ao eixo do motor cc;
3. Conectando o terminal positivo da bateria ao D+, o terminal D- à carcaça, e interligando os terminais D+ ao terminal de excitação DF;
4. Com o motor cc em funcionamento, é possível levantar a curva de desempenho do dínamo (Figura 36).

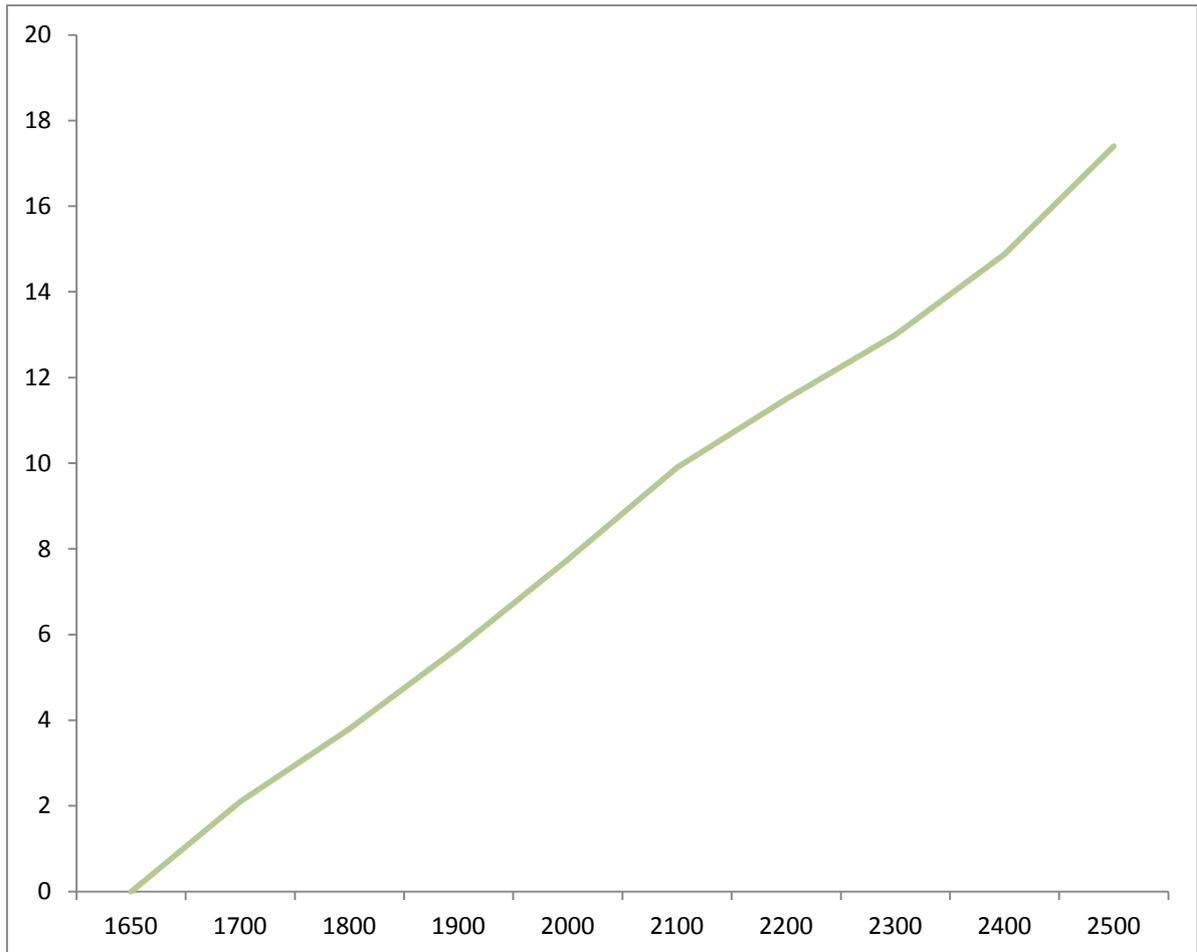


Figura 36 - Velocidade [rpm] x Corrente [A] do dínamo

Fonte: Própria

De forma análoga, utilizando o limite de Betz para o cálculo do raio da hélice, temos os resultados apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Relação de corrente, potência e raio no experimento 02

Velocidade [rpm]	Corrente [A]	Potência [W]	Raio [m]
1700	2,10	29,40	0,35
1800	3,80	53,20	0,47
1900	5,70	79,80	0,57
2000	7,75	108,50	0,67
2100	9,90	138,60	0,75
2200	11,50	161,00	0,81
2300	13,00	182,00	0,86
2400	14,88	208,32	0,92
2500	17,40	243,60	1,00

Fonte: Própria

Para a corrente nominal do dínamo que é de 30 A, o raio da hélice helicoidal será de 1,31 metros.

6. CONCLUSÃO

Devido a importância do desenvolvimento de geradores de energia alternativos, com a análise bibliográfica a respeito dos componentes propostos para a construção do equipamento e dentre eles, principalmente das máquinas elétricas (alternador automotivo e dínamo), foi possível a realização dos ensaios já apresentados onde foi constatado de que a construção de um gerador eólico com componentes encontrados no mercado é possível, porém não viável se a escolha do desenvolvedor é de um sistema de geração compacto.

Esse fato se confirmou quando estudado o funcionamento das máquinas geradoras, de maneira mais específica as encontradas em revendedoras de auto peças, alternador e dínamo. Com o ensaio realizado sob a curva de corrente em função da velocidade axial foi observado a capacidade de geração dessas máquinas elétricas, ficando os resultados à disposição para experiências futuras.

A inviabilidade verificada deve-se ao fato de que experimentalmente foi verificada a necessidade de, ou um jogo de polias ou correias, ou um elemento motriz formado por um conjunto de pás com diâmetro considerável. Isto devido à rotação do eixo necessária para se gerar corrente, tanto no protótipo com o alternador tanto no com o dínamo ser superior à 1200 rpm, resultando numa velocidade tangencial do elemento motriz escolhido pela equipe acima da velocidade média do vento encontrada no território paranaense.

Esse equipamento se construído respeitando essa necessidade, teria propriedades para atender uma pequena unidade consumidora de até 240 W e poderia ser replicado por qualquer outro consumidor que estivesse interessado.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 29 jun. 2013

Alternador e Dínamo. Disponível em: <<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/alternador.htm>>. Acesso em: 10 jul. 2013.

Alternadores. Disponível em: <<http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/eletrica/alternador.asp>>. Acesso em: 12 jul. 2013.

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2013.

BETZ, Albert. **Introduction to the Theory of Flow Machines.** Oxford: Pergamon Press. 1966.

BRAGA, Newton C.. **Como funciona o alternador.** Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/51-automotivos/709-como-funciona-os-alternadores-art094.html>> Acesso em: 03 jun. 2013.

BRAUN-GRABOLLE, Priscila. **A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana.** Tese de Doutorado, 2010.

Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). Disponível em: <<http://www.cpfll.com.br/LinkClick.aspx?fileticket=7fWk1B6nITw%3D&>>. Acesso em: 16 jul. 2013.

ROCHA, Joaquim. **Conversor de Frequência**. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/arquivos/Acionamento_04_Conversor_de_Frequencia.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2013.

ROCHA, Joaquim. **Harmônicos**. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/arquivos/Qualidade_02_Harmonicos.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2013.

Conversores de Frequência Soft Starters. Disponível em: <<http://www.ejm.com.br/download/Inversores.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2013.

CPFL, Companhia Paulista de Força e Luz. **Atendimento a Cargas Geradoras de Harmônicos em Sistemas Primários de Distribuição**. CPFL. 2002

DE LANA, Carlos Roberto. **Ímãs e indução eletromagnética**. Disponível em <<http://educacao.uol.com.br/fisica/eletromagnetismo-1-imas-e-inducao-eletromagnetica.jhtm>>. Acesso em: 13 jul.2013.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em <www.epe.gov.br>. Acesso em: 29 jun.2013

Energia Eólica Residencial para Classe Média. Disponível em: <<http://rotaenergia.wordpress.com/2011/07/28/energia-eolica-residencial-para-classe-media/>> Acesso em: 11 jun. 2013.

FERNANDES, Nuno. **Impacto da Ligação de Geradores Eólicos na Rede de Distribuição**. Universidade Técnica de Lisboa. 2010.

Flutuação de tensão (Flicker). Disponível em: <<http://www.osestoreletrico.com.br/web/colunistas/jose-starosta/775-flutuacao-de-tensao-flicker.html>> Acesso em: 10 jul.2013

FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de frequência: teoria e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Erica, 2009. 192 p. ISBN

Geração distribuída. Disponível em:

http://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/350/1/Geracao_distribuida_versus_centralizada.pdf, acesso em 11 jul.2013

KUNDAR, P. **Power System Stability and Control, The EPRI Power Systems Engineering Series**, McGraw-Hill, Inc., 1993.

Impacto de Geradores Eólicos na Rede de Distribuição. Disponível em:

<[https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/686912/1/Impact%20of%20Distributed%20Wind%20Energy%20Resources%20on%20Distribution%20Network%20-%20Dissertacao%20Nuno%20Fernandes%20\(48051\).pdf](https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/686912/1/Impact%20of%20Distributed%20Wind%20Energy%20Resources%20on%20Distribution%20Network%20-%20Dissertacao%20Nuno%20Fernandes%20(48051).pdf)> Acesso em: 16 jul. 2013.

International Energy Agency (IEA). Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: 29 jun. 2013.

Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em:

<http://lsf.iee.usp.br/lsf/index.php?option=com_content&view=article&id=66&Itemid=79>. Acesso em: 20 jun. 2013.

Manual Cepel para Energia Renovável. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2013.

Manual de acesso de geração distribuída ao sistema da Copel. Disponível em:

<[http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/0342A62F50C68EC4032577F500644B9A/\\$FILE/905100.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/0342A62F50C68EC4032577F500644B9A/$FILE/905100.pdf)>. Acesso em 01 ago. 2013.

Matriz energética. Disponível em <http://www.brasil.gov.br/cop/panorama/o-que-o-brasil-esta-fazendo/matriz-energetica>> Acesso em: 12 jun. 2013.

PORTAL BRASIL. **Matriz Brasileira**. Disponível em:
<<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica>>. Acesso em: 05 mar. 2013.

PORTAL BRASIL. **Panorama Nacional**. Disponível em:
<<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/setor-eletrico>>. Acesso em: 05 mar. 2013.

SANTOS, Fernando António ,SANTOS, Fernando Miguel. **Geração distribuída versus centralizada**. Instituto Politécnico de Viseu, 2008.

SECOM. **Geração eólica deve crescer 20 vezes em dez anos**. Disponível em:
<<http://www.secom.gov.br/sobre-a-secom/acoes-e-programas/comunicacao-publica/em-questao/edicoes-anteriores/marco-2013/boletim-1726-04.03/geracao-eolica-deve-crescer-20-vezes-em-dez-anos/>>. Acesso em: 06 mar. 2013

TOLMASQUIM, Mauricio. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**, Interciência, 2007.

URBANETZ, Jair. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: Sua influencia na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. Tese de Doutorado, 2000.

Variação de Tensão. Disponível em:
http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/Qualidade_05_Interrupcoes%20e%20Variacoes%20de%20Tensao.pdf/view>. Acesso em: 13 jul. 2013.

World Wildlife Foundation (WWF). Disponível em:
<http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima/mudancas_climaticas_resultados/setor_eletrico_brasileiro/asust/rec/programa/>. Acesso em: 11 jul. 2013.