

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GUILHERME MARTINS BARBOZA**

**Desenvolvimento de protótipo de uma bicicleta geradora de energia elétrica.**

**BAGÉ  
2017**

**GUILHERME MARTINS BARBOZA**

**Desenvolvimento de protótipo de uma bicicleta geradora de energia elétrica.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Fabio L. Tomm

**BAGÉ  
2017**

**GUILHERME MARTINS BARBOZA**

**Desenvolvimento de protótipo de uma bicicleta geradora de energia elétrica.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 18 de dezembro de 2017.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Fabio L. Tomm  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Jocemar Biasi Parizzi  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes  
UNIPAMPA

Dedico este trabalho ao meu avô Antônio Barboza.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço a Deus pelo dom da vida.

A minha tia Ana pela dedicação interminável.

A Camila, pelos momentos de incentivo.

Aos meus pais, João e Rose, e irmã, Bruna, pelo apoio e amor incondicional.

A minha avó Lurdes, pelas orações e pelo carinho.

Ao colega Kaynan Maresch pelas ajudas nas atividades práticas.

Aos professores do curso de Engenharia de Energia, na pessoa do Dr. Fábio Tomm, pela sabedoria na orientação deste trabalho.

E especialmente ao meu avô Antônio, por me ensinar que, enquanto há vida, há esperança.

"Ninguém baterá tão forte quanto a vida. Porém, não se trata de quão forte pode bater, se trata de quão forte pode ser atingido e continuar seguindo em frente. É assim que a vitória é conquistada."

Rocky Balboa

## RESUMO

Face à necessidade iminente de propostas que incitem a uma consciência ambiental coletiva, bem como o uso sensato de energia elétrica e a instrução sobre seu consumo e geração, o presente projeto apresenta a pesquisa e a implementação de uma planta lúdica e simultaneamente funcional de geração de energia. Através de análise experimental explicativa, construiu-se um protótipo de uma bicicleta capaz de transformar energia mecânica, empregada pela tração humana, em energia elétrica. A planta foi equipada com um alternador automotivo, o qual tem a finalidade de realizar as transformações de energia envolvidas no processo, havendo, assim, interação entre o usuário e a geração de energia. Frente a necessidade de controle em geradores operantes a velocidades variáveis, fez-se necessário o estudo, dimensionamento e emprego de conversores estáticos em um sistema de controle em malha fechada, compatibilizando os níveis de saída do gerador e aumentando a eficiência e segurança dos componentes. Ainda, fez-se uma modificação estrutural da máquina, substituindo o rotor bobinado por um rotor a ímãs permanentes, verificando a eficácia. Como complemento e justificativa aos resultados obtidos, simulou-se, através do método dos elementos finitos, com condições ótimas e também com dados estimados em ensaio para comparação. A proposta premia alternativas que contribuam com soluções inovadoras frente à crescente necessidade de novas formas descentralizadas de geração de energia, proporcionando uma fonte interativa e sustentável.

Palavras-Chave: gerador, ímã permanente, produto, bicicleta.

## RESUMEN

En el presente proyecto se presenta la investigación y la implementación de una planta lúdica y simultáneamente funcional de generación de energía, energía. A través del análisis experimental explicativo, se construyó un prototipo de una bicicleta capaz de transformar energía mecánica, empleada por la tracción humana, en energía eléctrica. La planta fue equipada con un alternador automotriz, el cual tiene la finalidad de realizar las transformaciones de energía involucradas en el proceso, habiendo así así interacción entre el usuario y la generación de energía. Frente a la necesidad de control en generadores operantes a velocidades variables, se hizo necesario el estudio, dimensionamiento y empleo de convertidores estáticos en un sistema de control en malla cerrada, compatibilizando los niveles de salida del generador y aumentando la eficiencia y seguridad de los componentes. Además, se hizo una modificación estructural de la máquina, sustituyendo el rotor bobinado por un rotor a imanes permanentes, verificando la eficacia. Como complemento y justificación a los resultados obtenidos, se simuló, a través del método de los elementos finitos, con condiciones óptimas y también con datos estimados en ensayo para comparación. La propuesta premia alternativas que contribuyan con soluciones innovadoras frente a la creciente necesidad de nuevas formas descentralizadas de generación de energía, proporcionando una fuente interactiva y sostenible.

Palabras clave: generador, imán permanente, producto, bicicleta.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de histerese de magnetização de um material ferromagnético	27
Figura 2 – Esquema de geração de uma hidrelétrica	31
Figura 3 - Estator e disposição das bobinas	35
Figura 4 – Diagrama esquemático de uma máquina de ímãs permanentes	36
Figura 5 – Topologia do conversor <i>Buck-Boost</i>	39
Figura 6 - Modulação por Largura de Pulso (PWM)	40
Figura 7 – Processo de carga da bateria, curvas de corrente e tensão	43
Figura 8 – Diagrama esquemático da metodologia do trabalho	46
Figura 9 – Esquema simplificado de funcionamento	53
Figura 10 – Vista tridimensional da planta.	54
Figura 11 – Vista Explodida do gerador.	54
Figura 12 - Ligação entre o motor de indução trifásico e o alternador	55
Figura 13 - Bateria, amperímetro e multímetro ligados a saída do alternador	57
Figura 14- Curvas de potência do motor trifásico: A vazio e sob carga	58
Figura 15- Curva de potência fornecida pelo motor e curva da potência gerada pelo alternador	59
Figura 16 - Curva de rendimento do alternador	60
Figura 17 – Diagrama de Blocos	61
Figura 18 – Modelo de controle em malha fechada	63
Figura 19 - Conversor <i>Buck-Boost</i>	64
Figura 20 – Conversor Buck-Boost interruptor aberto (cima) e fechado (baixo)	65
Figura 21 - Montagem do Conversor e da malha de controle em <i>protoboard</i> .	67
Figura 22 - Montagem do Conversor e malha de controle em placa perfurada	68
Figura 23 -Gráficos de operação do conversor buck-boost implementado, para a) Tensão da saída $V_{out}$ , b) Ondulação de corrente no indutor $\Delta i_L$ e c) Corrente no diodo.	68
Figura 24 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um $D=0,42$ .	69
Figura 25 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um $D=0,8$ .	71
Figura 26 - Conversor Buck-Boost e o esquema dos drivers empregados.	73
Figura 27 - Protótipo final	77
Figura 28 – Estator, real e em vistas ortográficas.	80
Figura 29 – Polia montada sobre o eixo de aço.	85

Figura 30 – Ímãs de Neodímio-Ferro-Boro utilizados.	85
Figura 31 – Rotor de 8 polos com polia de alumínio	86
Figura 32 – Rotor de 8 polos com polia de ferro	88
Figura 33 – Malha base utilizada nas simulações.	90
Figura 34 – Resultados da simulação para o <i>Caso A</i> .	91
Figura 35 - Resultados da simulação para o <i>Caso B</i> .	92
Figura 36 - Resultados da simulação para o <i>Caso C</i> .	95
Figura 37 - Resultados da simulação para o <i>Caso D</i> .	96
Figura 38 - Resultados da simulação para o <i>Caso D</i> , com ímãs sem espaçamento.	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da liga de neodímio-ferro-boro	30
Tabela 2 - Clientes potenciais da planta geradora	51
Tabela 3 – Materiais e Especificações	52
Tabela 4 – Potência cedida ao motor versus rotação	56
Tabela 5 - Potência nos terminais do alternador, em função de tensão e corrente	57
Tabela 6 - Potência nos terminais do alternador em Watts	58
Tabela 7 – Parâmetros para a construção do conversor	66
Tabela 8 – Características do núcleo do indutor do circuito conversor	67
Tabela 9 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um $D=0,42$	69
Tabela 10 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um $D=0.8$ .	70
Tabela 11 – Relação teórica de velocidade de rotação	75
Tabela 12 - Velocidade de rotação prática	75
Tabela 13 - Potência, tensão e corrente para a carga de 46W	77
Tabela 14 – Potência, tensão e corrente para a carga de 56W	78
Tabela 15 – Sequência de passos para o dimensionamento e estimativa do gerador a ímãs permanentes	79
Tabela 16 – Ligas de NdFeB em relação à temperatura de trabalho	83
Tabela 17 – Teste com rotor de um ímã por polo e núcleo de alumínio.	87
Tabela 18 – Requisitos base para aplicação da ferramenta QFD	98
Tabela 19 – QFD simples	100

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CA - Corrente alternada

CC - Corrente contínua

FEM - Força eletromotriz

FMM - Força magnetomotriz

HP - Horse Power

MIT - Motor de indução trifásica

PID – Controle proporcional integral derivativo

PV - Painel Fotovoltaico

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1 Contextualização do tema	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 Justificativa	18
1.4 Estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso	18
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>19</b>
2.1 Energia elétrica	19
2.2 Fontes de energia	21
2.2.1 Fontes de geração renováveis	21
2.2.2 Fontes de geração não renováveis	22
2.3 Princípios do eletromagnetismo	23
2.3.1 Teoria do magnetismo	25
2.3.2 Curvas de magnetização	26
2.3.3 Materiais ferromagnéticos	28
2.3.4 Ímãs permanentes	29
2.3.5 Terras-raras	29
2.3.5.1 Liga de Neodímio-Ferro-Boro	30
2.4 Geração de energia elétrica	31
2.4.1 O sistema de geração de energia elétrica	31
2.4.1.1 Máquinas primárias	32
2.4.1.2 Geradores	32
2.4.1.3 Transformadores	33
2.4.1.4 Sistemas de controle	33
2.5 Máquinas síncronas	34
2.5.1 Aspectos construtivos das máquinas síncronas	35
2.6 Geradores síncronos de ímãs permanentes	36
2.7 Teoria de Controle	37
2.7.1 Conversores estáticos	38
2.7.2 Conversor <i>Buck-Boost</i>	39

2.7.3 Modulação por Largura de Pulso (PWM)	40
2.7.4 Malha de controle	40
2.8 Baterias	41
2.8.1 Processo de carga	42
2.9 Processo de desenvolvimento de Produto	44
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>46</b>
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>50</b>
4.1 Pré-desenvolvimento do produto	50
4.2 Projeto Informacional	52
4.2.1 Materiais que compõem o produto	52
4.3 Projeto detalhado	53
4.3.1 Layout dimensional do produto	54
4.3.2 Determinação do rendimento do alternador	55
4.3.2.1 Potência cedida do motor versus rotação	56
4.3.2.2 Potência nos terminais do alternador	57
4.3.3 Implementação do circuito de controle	60
4.3.3.1 Diagrama de blocos	61
4.3.3.2 Modelagem matemática do sistema	62
4.3.3.3 Implementação e análise	64
4.3.4 Testes de funcionamento do protótipo	74
4.3.4.1 Condições iniciais do teste	74
4.3.4.2. Variação da carga	75
4.3.5 Alteração da característica operacional: conversão em gerador síncrono a ímãs permanentes	78
4.3.5.1 Dimensionamento da máquina	79
4.3.5.1.1 Limitações dimensionais	79
4.3.5.1.2 Escolha do ímã	80
4.3.5.1.3 Cálculo do entreferro	80
4.3.5.1.4 Escolha do número de polos e ranhuras	80
4.3.5.1.5 Cálculo do fluxo/polo	82
4.3.5.1.6 Estimativa do valor da resistência em cada fase	82

4.3.5.1.7 Análise Térmica	83
4.3.6. Ensaio experimentais do protótipo com ímãs permanentes	84
4.3.6.1 Rotor de 8 polos com polia de alumínio.	84
4.3.6.2 Rotor de 6 polos com polia de ferro.	87
4.3.6.3 Simulação e análise dos experimentos.	89
4.3.6.3.1 Caso A - Rotor de 8 polos com núcleo de alumínio.	90
4.3.6.3.2 Caso B - Rotor de 6 polos com núcleo de ferro.	92
4.3.6.3.3 Tratamento matemático para a implementação dos Casos C e D.	93
4.3.6.3.4 Caso C - Rotor de 8 polos de núcleo de alumínio, com dados estimados.	94
4.3.6.3.5 Caso D - Rotor de 6 polos de núcleo de ferro, com dados estimados.	95
4.3.7 Montagem da máquina e finalização da estrutura.	97
4.3.8 Requisitos do cliente e do produto – ferramenta QFD.	98
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>103</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do tema

A necessidade a nível mundial, do desenvolvimento, a modernização e automação da produção e o aumento significativo do consumo tornam, atualmente, a disponibilidade de energia elétrica um fator limitante no progresso das nações.

O papel da energia elétrica nas relações macroeconômicas mundiais torna-se cada vez mais fundamental, trazendo à tona a necessidade iminente de uma geração sustentável e eficiente de energia, bem como a utilização consciente em todos os níveis sociais.

A formulação de premissas que contemplem uma maior responsabilidade energética torna-se de grande importância, visto que, economicamente, apresenta-se como as mais viáveis medidas para a obtenção de um consumo sensato.

Tendo em vista essa necessidade iminente de uma maior instrução sobre o consumo e a utilização de energia elétrica, o presente trabalho tem por fim trazer aos meios sociais e educacionais uma planta lúdica e simultaneamente funcional, que visa a interação do usuário com a geração direta de energia.

Diante desse escopo, propõe-se a pesquisa, o projeto e o desenvolvimento de uma bicicleta geradora de energia elétrica, onde a tração fornecida pelo usuário, na forma de energia mecânica, será transformada pelo circuito proposto em energia elétrica, para posterior emprego da carga gerada.

O sistema de controle de geração de energia se dará por um conversor estático realimentado, fazendo com que se garantam sinais compatibilizados das grandezas físicas envolvidas, tornando o processo mais eficaz e seguro.

Ainda, serve de incentivo ao trabalho, a interação do usuário com a geração de energia, fazendo com que o mesmo vivencie de forma prática as transformações, as quais são abstratas no cotidiano, proporcionando uma reflexão sobre os impactos de um consumo demasiado e, adicionalmente, tenha contato com formas alternativas e funcionais de geração de energia elétrica.



## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O presente projeto tem como objetivos gerais a pesquisa, o desenvolvimento e a proposição de um produto, o qual tem por finalidade a geração de energia elétrica a partir de materiais convencionais, como a bicicleta e o alternador automotivo. Baseado nesta visão, o projeto tem a proposta de proporcionar ao usuário o contato com uma forma de geração e utilização de energia limpa, servindo como fonte de alimentação de pequenas cargas, como o carregamento de baterias. Adicionalmente, busca-se levar o projeto às escolas e comunidade, onde pode-se mostrar a ciência na prática, instigando a curiosidade e a utilização sustentável de energia elétrica. Em linhas gerais, o objetivo maior é proporcionar conscientização energética e o contato direto com a geração de energia.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Como pontos específicos a serem alcançados, tem-se:

- Construção de um módulo principal de geração de energia composto por um gerador síncrono e sistema de controle, o qual será adaptável ao acoplamento de bicicletas.
- Elaborar o projeto de desenvolvimento de produto, definindo as etapas a serem realizadas para a confecção da planta.
- Realizar a modificação estrutural do gerador utilizado, trocando os enrolamentos do gerador por ímãs permanentes.
- Elaborar um sistema de controle em malha fechada, controlando os níveis de tensão e corrente, de forma que a transferência de energia gerada se dará com máximo aproveitamento e segurança dos dispositivos.

- Identificar o rendimento dos equipamentos envolvidos no circuito proposto, a fim de se obter dados de aplicação prática.

### **1.3 Justificativa**

Frente à necessidade de uma construção de consciência ambiental e de uma maior educação quanto ao consumo de energia, torna-se cada vez mais importante a inclusão de propostas que visem trazer a prática das ciências de encontro com escolas e sociedade. Além de servir como incentivo a uma melhor utilização da energia elétrica, o projeto se justifica pela crescente necessidade de novas formas descentralizadas de geração de energia, proporcionando uma fonte interativa, sustentável e de grande potencial.

### **1.4 Estrutura do trabalho de conclusão de curso**

O presente projeto está estruturado de forma a ser compreendido quando submetido a uma leitura seriada. O estudo foi dividido em quatro capítulos: Introdução, Conceitos e revisão da literatura, Metodologia e Desenvolvimento do produto e Análise dos resultados.

No primeiro capítulo, o leitor é convidado a conhecer o tema de forma simples, através da apresentação do tema, sua justificativa, objetivos e estrutura.

Após essa parte introdutória, o corpo do projeto contém a revisão bibliográfica, onde são citados autores que tiveram trabalhos destacados na área pesquisada. São abordados temas pertinentes à geração de energia, suas fontes e métodos de utilização.

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos. O capítulo possui uma explanação sobre a classificação da pesquisa quanto ao seu delineamento metodológico.

O quarto e último capítulo se refere ao desenvolvimento do protótipo proposto, incluindo a experimentação em si, explanando sobre cada método utilizado e expondo todos os dados obtidos de forma clara, se possível graficamente.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

São abordados neste capítulo assuntos pertinentes à teoria que envolve a pesquisa, o desenvolvimento e a construção do presente projeto, bem como o cenário brasileiro atual da geração e consumo de energia elétrica, destacando sua importância e correlacionando com as questões ambientais envolvidas. Serão abordados todos os itens que compõem o mecanismo eletromecânico proposto, a fim de esclarecer, de forma introdutória, o funcionamento dos mesmos.

### 2.1 Energia elétrica

Partindo do conceito estabelecido por Haddad (2004), a definição de energia passa primordialmente por conceitos desenvolvidos em meados do século XIX, onde se buscava explicações para diversos fenômenos físicos. Esses conceitos iniciais foram lapidados de forma a serem posteriormente descritos como “energia é a medida da capacidade de efetuar trabalho”. Segundo o autor, essa definição não é ampla o suficiente para a descrição completa do termo energia e acaba perdendo o sentido quando contrastada com o calor; o qual é apenas parcialmente conversível em trabalho. Para Haddad (2004), a definição só ganha *quórum* a partir da definição de Maxwell, em 1871, quando este afirma:

“Energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança.” (MAXWELL, J, C.. Theory of Heat. [S.l.]: Dover Publications, Inc., 1871.)

A citação do autor resume ideias fundamentais para a definição de energia, como as modificações de estado implicam em vencer resistências, sendo justamente a energia que permite obter estas modificações de estado. Desse modo, cada mudança de estado exprime a obtenção de fluxos energéticos.

Dentro dessa ampla visão, entende-se que em todas as atividades na terra há consumo de energia e, em decorrência desse, pode-se alavancar o desenvolvimento humano (Eletrobrás, 2008). Desde os primórdios da história, o homem passou a lidar com diferentes formas de energia. Depois da própria força humana, o fogo e a força dos ventos foram as primeiras formas empregadas em auxílio da caça e da pesca e,

após o início da agricultura e da pecuária rudimentar, a biomassa passou a ser explorada como combustível, entre 10000 e 5000 AC.

Segundo o autor, o domínio pleno das energias se deu com a Revolução Industrial, entre XVIII e XIX, onde o homem passou a movimentar suas máquinas com o vapor, mudando de forma radical a organização industrial.

Oka (2000) defende que a primeira aparição da expressão eletricidade foi em 1600, com William Gilbert, médico da rainha Elizabeth I. Gilbert entendeu que o efeito elétrico seria uma característica comum às substâncias, as quais poderiam ser eletricamente carregadas ao serem esfregadas. Foi então que derivou a expressão da palavra grega “*elektron*”, a qual se refere a âmbar.

Em todo o século XVIII, fenômenos elétricos foram bastante estudados; Oka (2000) cita Stephen Gray que, em 1729, descobriu características de materiais e os qualificou como condutores ou isolantes, onde condutores permitiriam o fluxo livre, enquanto os isolantes não permitiriam esse fluxo; Charles du Faye, em 1733, identificou tipos diferentes de cargas, as quais teriam características inversas como de atração e repulsão. Essas representações qualitativas tiveram significativo avanço com a contribuição de Charles Auguste Coulomb, em 1785. O físico francês estabeleceu a relação entre força elétrica, quantidade de carga e distância, estendendo a teoria de Isaac Newton, para a gravitação.

Já em 1799, Alessandro Volta anunciou a “pilha voltaica” e, pela primeira vez na história, pode-se gerar corrente contínua, utilizando pares de discos de Zn e Cu com papel ensopado por solução salina ou ácida, sendo de fundamental importância para a determinação de fenômenos eletromagnéticos posteriores. Em 1827, Georg Simon Ohm demonstrou, a partir de seus experimentos, que a diferença de potencial através de um dispositivo é proporcional à corrente através do mesmo, formulando assim a lei de Ohm.

James Clerk Maxwell foi quem postulou matematicamente as teorias eletromagnéticas, através das Equações de Maxwell, prevendo a luz como uma onda eletromagnética, e sua velocidade dada por medidas elétricas e magnéticas. Os estudos de Maxwell foram provados experimentalmente em 1888 por Herz.

Desde as grandes descobertas envolvendo energia elétrica, muito conhecimento foi ampliado e aplicado no cotidiano da sociedade. Para Haddad (2004), a eletricidade é hoje um fator imprescindível para a vida, sendo de fundamental

importância em todos os setores sociais. Sua falta causaria um caos generalizado e o regresso aos tempos mais remotos da humanidade.

O autor destaca a eletricidade como uma forma de energia imediata e eficiente, a qual pode ser transformada em qualquer outra. É produzida nas mais diversificadas situações, como explorado a seguir, e pode ser transportada a longas distâncias bem como estocada, e tem gigantesco potencial econômico pela grande variedade de utilizações, como uso doméstico, industrial e comercial.

## **2.2 Fontes de energia**

Para os autores Pinho *et al.* (2008), fontes de energia são substâncias e meios que possibilitam gerar energia útil diretamente ou através de alguma transformação. Dividem-se em dois grandes grupos, os quais serão detalhados a seguir: as fontes do tipo renovável e não renovável.

### **2.2.1 Fontes de geração renováveis**

São caracterizadas como fontes renováveis de energia todas as substâncias ou meios cujas taxas de reposição são equivalentes ou superiores às de sua utilização, seja por reposição natural ou artificial. Os autores citam como fontes renováveis naturalmente as fontes solar, eólica, hídrica, e a biomassa natural. Já como as que se renovam artificialmente, cita-se biomassa plantada e resíduos gerados, sejam eles advindos de processos exercidos pelo homem.

O cenário brasileiro é altamente favorável à geração de energia através de fontes renováveis, uma vez que se apresenta como um território rico hidrograficamente, de grande incidência de radiação solar em todas as épocas do ano e de grande potencial de exploração da biomassa, sob diversas formas de utilização.

Com o amplo desenvolvimento das tecnologias para a geração eólica, solar e de biomassa, o país torna-se de alto potencial para a exploração dessas fontes em aplicações, sejam elas próprias ou em sistemas híbridos. (Pinho *et al.*, 2008.)

Van Dingenen (1999), discorre sobre a utilização de energia solar, a qual tem como fonte a maior parcela da energia utilizada no cotidiano, advinda do sol. O aquecimento direto, as ondas, o vento e inclusive fontes fósseis, obtêm sua energia advinda dessa radiação solar. Diversos métodos auxiliam a explorar essa radiação,

onde a escolha técnica apropriada se dará pela utilização final e localidade do projeto. Os painéis fotovoltaicos (PV) são a maior aplicação para a geração de eletricidade a partir da irradiação. Os painéis podem ser instalados nas coberturas ou paredes, onde geram carga para o uso, seja doméstico ou complementar.

A energia eólica tem grande potencial por permitir sua exploração em quase todos os cenários e em qualquer escala. Van Dingenen (1999) destaca sua utilização como vital na construção de fontes renováveis de geração. Grandes parques eólicos têm capacidade para o fornecimento de energia elétrica suficiente para alimentar boa parte do mercado ligado à rede, já que turbinas pequenas são suficientes o bastante para atender a necessidade de mais de um ponto de consumo residencial, sendo que pequenos módulos variam de 50W a 250 W. Pontos isolados da rede têm na energia eólica seu fornecimento principal, como zonas rurais ou de difícil acesso.

No Brasil, segundo Eletrobrás (2008), a geração de energia eólica aumentou de 22 MW em 2003 para 602 MW em 2008. A previsão geral é que, ao final de 2013, o país atinja 4400 MW de potência instalada.

A importância da utilização de energia hidrelétrica é destacada segundo Ministério de Minas e Energia (2007). O aproveitamento dos recursos hídricos, seja para a geração elétrica ou para abastecimento urbano, rural ou industrial, é um dos maiores desafios para o desenvolvimento nacional, o que, pela sua importância, requer planejamento amplo. Especialmente para a geração de energia elétrica, a utilização do recurso em questão tem aberto uma grande discussão, sendo ela diretamente ligada aos impactos socioambientais causados.

Ainda segundo Ministério de Minas e Energia (2007), do potencial de geração hídrica brasileiro, apenas 30% são explorados, contando com usinas instaladas e em processo de instalação, sendo este um potencial de cerca de 126.000 MW. Esses dados, até 2030, devem ganhar incremento e chegar à beira dos 80% dos recursos disponíveis explorados.

### **2.2.2 Fontes de geração não renováveis**

A segunda classe de fontes de geração de energia, segundo os autores Pinho *et al.* (2008), se caracteriza como não renováveis. Dentre essas, ressalta-se o petróleo, o gás natural, o carvão mineral, e o xisto betuminoso. Nessas fontes não ocorre produção ao mesmo passo do consumo, logo, ocorrerá um momento em que

os estoques serão esgotados. Atualmente, a extração desses componentes se dá de forma abundante e, de certa forma, de fácil obtenção e transformação, o que acarretou no uso em grande escala, principalmente após a Revolução Industrial. A falta de responsabilidade ambiental aliada ao uso praticamente irrestrito dessas fontes resultou em uma dada escassez e no amplo comprometimento da flora, fauna e de grandes reservatórios de água.

Leão (2009), destaca como a forma não renovável mais utilizada a geração termelétrica. Esta utiliza a energia térmica obtida pela reação de combustão de uma fonte fóssil. Em um cenário mundial atual, a geração a partir de fontes fósseis é responsável por 81,3% da geração total, em 40% se utiliza carvão, sendo esta a fonte mais usada para a geração de energia elétrica no mundo. Quanto à potência, usinas termelétricas geram, em sua maioria, algo em torno de 200 e 2000 MW.

Em solo brasileiro, 25,15% da geração elétrica é térmica, sendo que somente a parcela fóssil é responsável por 23,23%. O alto custo de novas tecnologias capazes de explorar recursos renováveis, tornam a geração a carvão mais atrativa economicamente, especialmente em nações com grandes reservas de carvão, como China, Índia e EUA.

### 2.3 Princípios do eletromagnetismo

Del Toro (1999) defende a essencialidade do desenvolvimento da ciência na área do eletromagnetismo dentro da engenharia. Para o autor, grande parte da operação fabril é diretamente dependente das relações envolvidas nesta área de conhecimento, seja em pequenos motores utilizados em eletrodomésticos, seja em gigantescos geradores.

O autor começa a explanação indicando a lei de Ampère (1) como um ponto de partida para o entendimento básico de máquinas elétricas. A mesma foi elaborada com embasamento em experiência prática, relacionando as forças existentes em dois condutores que conduzem uma dada corrente com grandezas como densidade de fluxo magnético, intensidade do campo magnético, permeabilidade e fluxo magnético.

$$\oint H \cdot dl = I_{liq} \quad (1)$$

Chapman (2013) define a lei de Ampère (1) como a teoria regente na produção de um campo magnético por uma corrente, onde  $H$  apresenta-se como a intensidade do campo magnético produzido por uma corrente líquida  $I_{liq}$ , e um elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho de integração  $dl$ .

O autor reconhece a importância da lei de Ampère (1) na teoria de circuitos magnéticos e cita uma exemplificação. Em um dado núcleo retangular composto por material ferromagnético, envolvido em um enrolamento de  $N$  espiras, o qual conduz uma certa corrente, o campo magnético produzido permanecerá inteiramente dentro do núcleo, sendo o caminho de integração o comprimento médio deste. Deste modo, Chapman (2013) define que a intensidade do campo magnético  $H$  é uma medida de esforço exercida por uma corrente para estabelecer um campo magnético.

A intensidade de campo magnético é diretamente relacionada com as características do material do núcleo, de forma que o produto dessa relação é indicado por:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad [\text{T}] \quad (2)$$

Sendo  $H$  a intensidade de campo magnético, sob a unidade de ampère-espira por metro,  $\mu$  a permeabilidade magnética, representando a suscetibilidade de um dado material estabelecer um campo magnético, mensurada em Henry por metro, e  $B$  a densidade de fluxo magnético, medida em tesla (T).

Chapman (2013) postula que, a partir da densidade de fluxo  $B$ , é possível determinar o fluxo magnético total, se estabelecida uma certa superfície. A notação é descrita pela equação, conhecida como lei de Gauss (3).

$$\phi = \oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad [\text{Wb}] \quad (3)$$

Onde  $\phi$  descreve o fluxo total em uma determinada área  $A$ . Chapman (2013) ainda cita que o conceito de circuitos magnéticos simplifica difíceis cálculos quando define certos parâmetros para a correta prospecção das grandezas envolvidas.

Fitzgerald (2006) cita que o campo magnético produzido afeta as características físicas de suas proximidades, causando efeitos importantes para as



conversões eletromecânicas. O autor cita a lei de Faraday (4) como um destes efeitos, afirmando que se através de uma espira de fios condutores estiver passando um fluxo magnético, uma tensão diretamente proporcional a variação do fluxo em relação ao tempo será induzida na bobina.

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad [V] \quad (4)$$

$\varepsilon$  representa a tensão interna, ou força eletromotriz, produzida através de uma variação do fluxo magnético  $\phi$  ao longo de um dado tempo  $dt$  e por N bobinas cruzadas pelo mesmo fluxo. A lei de Lenz contribui nesta expressão, visto que atribui o sinal negativo afirmando que o sentido crescente de tensão na bobina causa uma corrente produtora de um fluxo em sentido oposto a variação original.

### 2.3.1 Teoria do magnetismo

Para Del Toro (1999), para se entender o comportamento magnético de um dado material é necessário que se aplique este a um exame de microscopia. Segundo o autor, neste teste fica perceptível o aparecimento de um certo torque quando um átomo de qualquer substância é submetido a um campo magnético. Este fenômeno é descrito como momento magnético, e é dependente de três fatores: cargas positivas do núcleo girando em seu eixo, cargas negativas dos elétrons girando em seu eixo e o efeito dos elétrons se movendo em suas orbitas.

Este momento magnético resultante dos movimentos rotacionais e translacionais dos elétrons é superior ao momento das cargas positivas. Todavia, se dois átomos se combinam, essas forças se opõem entre si, visto que o momento magnético é afetado na presença de um outro átomo adjacente. Neste escopo, podem-se definir grupos de materiais que reagem de formas diferentes quando submetidos a esta situação.

Del Toro (1999) classifica os materiais diamagnéticos como os que estabelecem um campo magnético oposto quando aplicados a um campo externo, ocorrendo um movimento que altera as cargas rotativas em relação à direção do campo. São materiais que, em consequência desta característica, não são atraídos por ímãs. Cita-se o hidrogênio, a prata e o chumbo como exemplos.

Materiais paramagnéticos, como explica Del Toro (1999), se caracterizam pela falta de neutralização dos movimentos de rotação e translação dos elétrons, ou seja, quando aplicados a influência de um campo magnético externo, há orientação dos elétrons de forma que seu momento magnético se alinha com o campo, aumentando a densidade de fluxo, deixando de existir quando o campo externo é cessado. Tem característica de fraca atração a ímãs e podem ser representados pelo alumínio e a platina.

Del Toro (1999) propõe que a grande maioria dos materiais existentes se classificam nas duas primeiras classes citadas, contudo, alguns materiais como o ferro e ligas de níquel apresentam características diferenciadas e de grande importância no magnetismo. São os materiais ferromagnéticos, que possuem estrutura cristalina com grande volume de átomos por centímetros cúbicos. Nesta configuração, os momentos magnéticos dos átomos estão alinhados no mesmo sentido, fazendo com que exista um momento magnético devido a rotação de um átomo não neutralizado e também a rotação resultante de todos os átomos em seu domínio.

Devido a esta característica estrutural, materiais ferromagnéticos adquirem o campo magnético no mesmo sentido do campo no qual foram imersos, resistindo ainda quando esse campo externo é cessado. São materiais fortemente atraídos por ímãs. Del Toro (1999) ainda observa que grandes elevações de temperatura podem causar uma significativa diminuição na capacidade de magnetização, atuando na interferência do paralelismo existente entre os momentos magnéticos.

### **2.3.2 Curvas de magnetização**

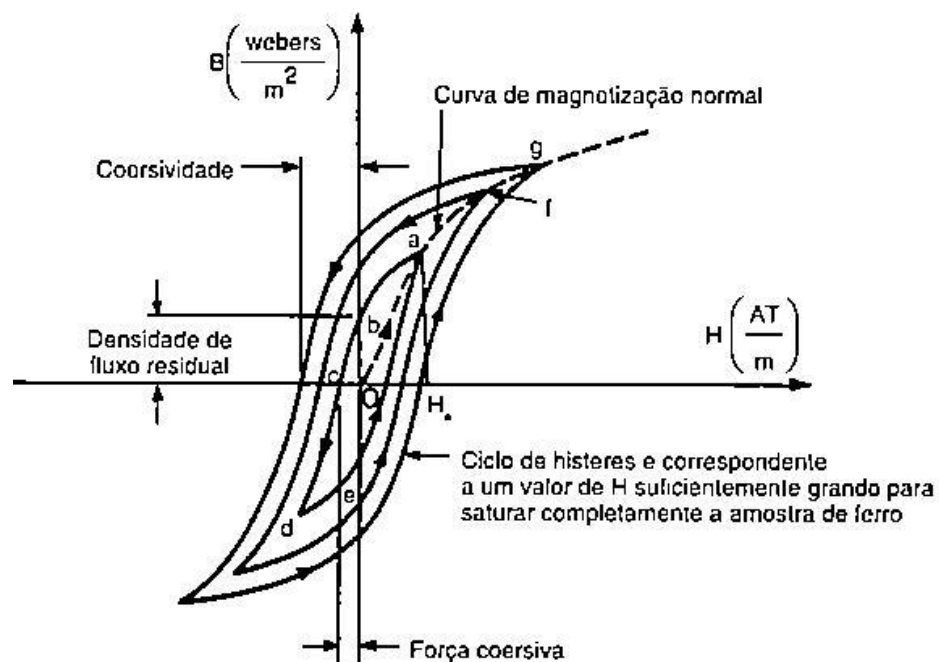
Del Toro (1999) apresenta a curva de magnetização de materiais ferromagnéticos como um gráfico obtido através de experimentação, visto que a concepção dos valores através de detalhamento unicamente teórico é limitada. As características magnéticas dos materiais são apresentadas através de gráficos que relacionam a densidade de fluxo  $B$  como função da intensidade do campo magnético  $H$ , podendo ainda apresentar a relação do fluxo magnético e corrente de excitação. Este gráfico é obtido para cada material, sendo representativo para qualquer geometria deste.

Del Toro (1999) exemplifica a construção da curva: Seja que em um dado momento a intensidade de campo no qual o material está sob efeito é aumentada, o

fluxo magnético também sofre aumento, estando estes, a princípio, em relação linear. Quando intensidade de campo é abruptamente reduzida, o material ferromagnético se opõe a desmagnetização, não retornando ao mesmo ponto da curva inicial. Essa característica se dá pela orientação dos domínios magnéticos que não retornam ao estado natural depois que lhes é aplicado um campo. Este valor residual de densidade de fluxo, depois que a intensidade de campo é nula é denominado densidade residual de fluxo e tem seu valor variável com o ponto onde o material foi magnetizado. Este valor máximo possível é chamado de retentividade e ocorre independentemente do valor da intensidade de fluxo para causar a completa saturação.

A figura abaixo explicita graficamente a reação do material a esse efeito.

Figura 1 – Ciclo de histerese de magnetização de um material ferromagnético.



Fonte: Del Toro (1999)

Em aplicações de conversão de energia, materiais ferromagnéticos são submetidos ciclicamente a valores de intensidade de campo variáveis, fazendo com que essa característica seja de suma importância no dimensionamento dos circuitos magnéticos envolvidos. Del Toro (1999) indica que a tendência da densidade de fluxo é de se atrasar em reação à intensidade de campo quando o material está em condições cíclicas e simétricas de magnetização, essa tendência é chamada de

histerese. Adicionalmente, o autor classifica como força coerciva a quantidade de intensidade de campo magnético necessário para reduzir a densidade de fluxo residual a zero, tendo seu valor máximo chamado de coersividade.

Em suma, Del Toro (1999) indica que a curva descrita dentro dos limites debatidos neste tópico é chamada de curva de magnetização normal e é obtida ao se traçar através das extremidades de um grupo de ciclos de histerese obtidos em condições cíclicas, respeitando os limites de saturação do material.

### **2.3.3 Materiais ferromagnéticos**

Devido a importância e ampla utilização de materiais ferromagnéticos na indústria atual, tem-se cada vez mais desenvolvido novas ligas para aumentar o desempenho e reduzir custos nas aplicações destes. Pinho (2009) cita a procura por ligas que aumentem a autoindução de uma bobina ou um melhor acoplamento magnético entre bobinas. Estes materiais devem apresentar o ciclo de histerese alto, bem como a indução de saturação, reduzindo as perdas e harmônicos indesejados.

Pinho (2009) designa como ferro puro a denominação para ligas de ferro com alto teor de pureza, diferindo-o de outras ligas. É um material de coercividade relativamente alta, porém quando aplicado a campos superiores a 1 kA/m a indução magnética cresce de forma lenta. Possui baixa resistividade elétrica, o que acaba sendo uma desvantagem em altas frequências, ocasionando perdas.

O autor discorre sobre as ligas mais utilizadas na aplicação industrial, citando algumas das mais utilizadas. As ligas de ferro-silício, para Pinho (2009), apresentam melhorias na propriedade do ferro, aumentando a resistividade à medida que o ferro é enriquecido com silício e diminuindo a magnetização de saturação. Tem aplicação em transformadores de potência, os quais levam finas chapas do material em seu núcleo, possuindo por volta de 3% de silício. Apresentam desvantagens quanto o aumento da fragilidade do ferro, limitando a liga a 5% de Si para a garantia das propriedades mecânicas.

Pinho (2009) destaca as ligas de ferro-níquel como outra liga frequentemente utilizada em aplicações de engenharia. São ligas que entregam ao dispositivo alta eficiência, tendo como principal vantagem a diminuição de perdas comparada a outras ligas. Possuem alta permeabilidade mesmo para valores baixos de indução e se caracterizam por possuírem propriedades especiais como o ciclo de histerese

retangular. São utilizadas com índices acima de 50% de níquel, visto que índices baixos de enriquecimento enfraquecem a liga, ao contrário do ferro-silício. Como desvantagens, a indução de saturação é baixa e seu custo relativamente alto.

#### **2.3.4 Ímãs permanentes**

Pinho (2009) define como ímã permanente todo o material que possui a característica da manutenção do campo magnético mesmo quando não está submetido a passagem de corrente elétrica. São materiais utilizados em engenharia para aumentar o fluxo magnético, pois possuem uma espécie de armazenamento de energia que proporcionam a retenção de energia mesmo após a excitação externa do campo magnético cessar.

Pinho (2009) define essa energia como a energia potencial magnética máxima e é descrita pelo ciclo de histerese, no quadrante de desmagnetização. Essa curva é importante pois mostra como o material continua exercendo fluxo magnético mesmo depois de ter sido submetido a um campo. Esse magnetismo residual é o que capacita o material a exercer influência magnética de forma permanente.

São materiais com altas taxas de coercividade, indicando que o material não se descaracteriza sob outros campos de menor intensidade, além de possuir um ciclo de histerese largo comparado aos materiais ferromagnéticos citados anteriormente. Possuem baixa condutividade elétrica e baixa resistência a tração. (PINHO, 2009)

#### **2.3.5 Terras-raras**

Rocio (2012) define como terras raras um grupo de 17 elementos químicos pertencentes na família dos lantanídeos mais o ítrio. Existem em ampla distribuição na superfície terrestre, porém em baixíssimas concentrações. As maiores reservas destes minerais estão localizadas na China, Estados Unidos da América, Índia e Austrália.

Suas maiores aplicações se dão na produção de alta tecnologia como a produção de catalisadores, ímãs permanentes e ligas metálicas. Conforme Rosental (2008) a produção mineral de terras raras é encabeçada mundialmente pela China, com mais de 95% da produção.

Como exemplos de utilização Rosental (2008) cita o Escândio, utilizado no enriquecimento de ligas de alumínio para componentes aeroespaciais; o Ítrio, utilizado em *lasers* e supercondutores de alta temperatura; o Promécio, em baterias nucleares e o Neodímio, utilizado em ímãs, *lasers* e capacitores de cerâmica.

Os elementos de terras-raras são reconhecidos desde 1787, porém somente em 1913 obteve-se tecnologia suficiente para determinar o número exato de elementos. As técnicas de extração, separação e beneficiamento destes elementos são altamente custosas, empregando alta tecnologia, o que encarece o preço final do produto.

### 2.3.5.1 Liga de neodímio-ferro-boro

Rosental (2008) define os ímãs de neodímio-ferro-boro (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B) como os mais potentes materiais magnéticos presentes no mercado, sintetizando em pequenos volumes de material altas taxas de produto energético e coercividade.

A liga é feita utilizando moagem e jateamento de partículas pulverizadas, sendo sintetizadas na presença de um campo magnético de direção predefinida de magnetização. Pinho (2009) cita a ampla utilização desse material em discos rígidos de computadores, motores de alto desempenho e em motores e geradores *brushless*.

Para Pinho (2009) são os ímãs permanentes que apresentam as melhores características dentre todos os existentes e possuem uma relação indução/peso altamente satisfatória. Tem deficiência na característica térmica, onde possui limitações no emprego em máquinas elétricas que operem em temperaturas superiores a 150° C.

Tabela 1 – Especificações da liga de neodímio-ferro-boro

Tipo	Indução remanescente	Energia potencial magnética máxima	Coercividade	Temperatura máxima de trabalho
Nd-Fe-B	1.35 T	350 kJ/m <sup>-3</sup>	960 kA/m	150° C

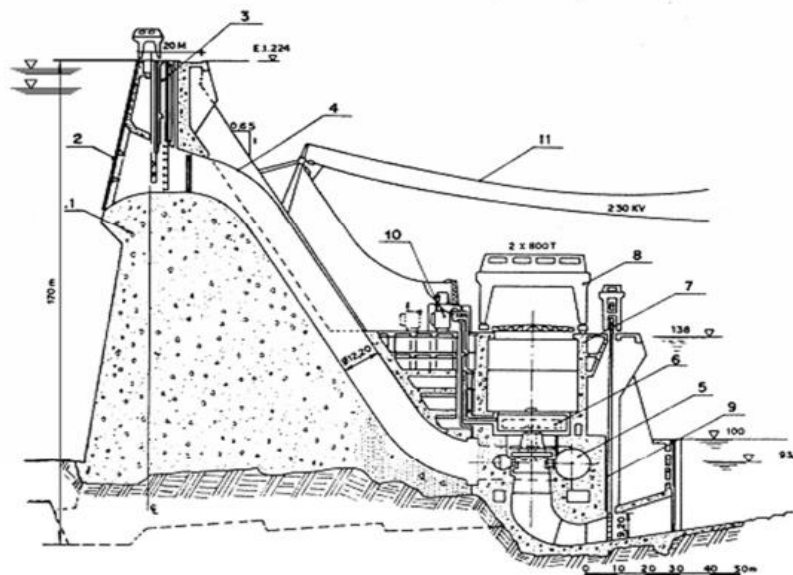
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

## 2.4 Geração de energia elétrica

De acordo com Modesto (2011), a geração de energia elétrica se define pela transformação de um determinado tipo de energia em energia elétrica. Para o entendimento do funcionamento dos processos, divide-se em dois passos. Em um primeiro momento, uma máquina primária transforma uma dada energia empregada, em energia cinética de rotação. Em um segundo momento, essa energia cinética de rotação produzida excitará um gerador elétrico acoplado à máquina primária, que, através de processos eletromagnéticos, transforma a rotação em energia elétrica.

Modesto (2011) cita o exemplo de uma hidroelétrica, onde uma turbina hidráulica usa a energia potencial da água armazenada em energia cinética de rotação, que logo transfere-se a um gerador acoplado, como pode ser visto no esquema seguinte.

Figura 2 - Esquema de geração de uma hidrelétrica



Fonte: MODESTO (2011), adaptado pelo autor (2017).

### 2.4.1 O sistema de geração de energia elétrica

Basicamente, em centrais onde há a transformação de energia através de sistemas eletromecânicos, o sistema de geração é formado por quatro grupos

principais de equipamentos: Máquina primária, geradores, transformador e sistema de controle, comando e proteção; estes serão apresentados de forma separada nos próximos tópicos. (Galdino, 2011)

#### **2.4.1.1 Máquinas primárias**

Para os autores Galdino (2011) e Modesto (2011), define-se máquina primária todo o grupo de componentes que tem por finalidade a transformação de quaisquer tipos de energia em cinética de rotação, para posterior aproveitamento pelo gerador.

Apresentam-se como as principais máquinas primárias as turbinas, sejam hidráulicas, a vapor, a gás ou eólicas. Motores Diesel também integram o grupo das máquinas primárias.

Em turbinas hidráulicas, a finalidade se dá pela transformação da energia cinética do escoamento da água em trabalho mecânico. Para essa transformação, as turbinas são equipadas com pás ou conchas, que permitem retirar a energia cinética do fluido e induzir potência no rotor. Destacam-se as turbinas tipo Francis, Pelton e Kaplan.

Motores Diesel identificam-se como uma máquina térmica, cuja finalidade se dá pela transformação da energia térmica em energia mecânica, utilizando o princípio de motores a combustão interna, o qual obtém trabalho pela liberação da energia química presente no combustível.

É importante citar as turbinas a gás e as termonucleares, onde o princípio de transformação encontra-se na obtenção de energia elétrica pela queima de um combustível o qual aquecerá vapor para o processo.

#### **2.4.1.2 Geradores**

Conforme Pinho *et al.* (2008), geradores elétricos têm por finalidade a transformação da energia mecânica em elétrica. Baseado na teoria do eletromagnetismo e nas equações de Maxwell, o princípio de ação do gerador elétrico encontra-se na interação de uma espira e um campo magnético. Aparece sempre acoplado a uma máquina primária, a qual fornece energia cinética de rotação ao eixo do gerador, fazendo com que tensões se manifestem em seus terminais, o que logo



servirá para alimentação de cargas. Os geradores serão apresentados em destaque nos itens 2.5, visto a importância neste trabalho.

#### **2.4.1.3 Transformadores**

Após a tensão surgir nos terminais do gerador, é de imprescindível importância que se normalize o nível de tensão do grupo ao sistema no qual este faz ligação. A máquina que realiza essa transformação de níveis de tensão é conhecida como transformador. Logo, uma tensão qualquer gerada pode ser ligada em uma linha de transmissão de alta tensão, desde que o transformador faça devidamente este ajuste.

Esse fenômeno é baseado no efeito da indução mútua. Um núcleo principal é formado por lâminas de aço prensadas e nele são adicionados dois enrolamentos. Quando há uma tensão no enrolamento primário, ocorrerá o aparecimento de uma corrente que implicará em um fluxo magnético, o qual, em sua maior parte, ficará confinado junto ao núcleo. Esse fluxo produzido fará com que haja uma força eletromotriz (f.e.m.) no enrolamento primário e outra no secundário, sempre em proporcionalidade ao número de espiras de cada bobina. Logo, se a tensão aplicada ao enrolamento primário for maior que a tensão obtida no secundário, o transformador é denominado abaixador; se ocorrer processo inverso, é um transformador elevador. (WEG, 2010)

#### **2.4.1.4 Sistemas de controle**

Para Pinho e *t al.* (2008), existem vários requisitos necessários para realizar a interligação entre o grupo gerador e a destinação final, como uma rede de transmissão. É necessário que a tensão nos terminais do gerador não varie mais que 10% e ainda é necessário que haja concomitância com a rede. Estas medidas requerem um sistema de controle e segurança, os quais geralmente são agrupados em um dado quadro de comando e proteção, permitindo a ação caso exista alguma não conformidade. Uma das principais funções dos quadros de comando é a regulação das frequências envolvidas, atuando como agentes reguladores da velocidade das máquinas primárias, fazendo com que se garanta qualidade de energia na entrega da geração.

## 2.5 Máquinas síncronas

Segundo Nasar (1984), as máquinas síncronas são grupo de máquinas de importância fundamental em escala global. São denominadas síncronas pois tem frequência operativa constante em regime permanente.

Para Del Toro (1999), geradores síncronos são universalmente utilizados na geração de energia para fornecimento de potência aos consumidores. O autor classifica-os em dois tipos: o gerador síncrono de baixa velocidade, caracterizado pela construção com polos salientes, grande diâmetro e pequeno comprimento axial, acionado por um motor ou hidraulicamente; e o turbogerador que utiliza a turbina a vapor como força motriz, o qual opera em altas velocidades e é dotado de rotor cilíndrico ou liso em função das solicitações mecânicas envolvidas, possuindo pequeno diâmetro e longo comprimento axial.

Como qualquer máquina girante, a máquina síncrona é capaz de operar como motor ou como gerador. Dentro deste escopo, a atenção maior será dada ao grupo dos geradores, visto que além de ser alvo do presente trabalho, representa a grande maioria das máquinas síncronas.

Esta operação, segundo Nasar (1984) é baseada na lei da indução eletromagnética de Faraday (4), e seu princípio básico de funcionamento se dá pelo acionamento do rotor do gerador, produzindo um campo magnético girante em seu interior. Esse campo é o responsável pela indução de tensão trifásica nos enrolamentos do estator do gerador. A frequência de operação do gerador é determinada pela velocidade da máquina primária, sendo esta proporcional à corrente de campo e à amplitude da tensão gerada. As impedâncias da própria máquina e da carga, juntamente com a excitação do campo do gerador, determinam a corrente o fator de potência da mesma.

Fitzgerald (2006) indica que é possível realizar o controle da potência reativa de uma máquina síncrona através do ajuste da magnitude de corrente de campo do rotor, permitindo, através dessa postulação, que se opere uma máquina síncrona em um sistema de potência apenas com a característica de compensador, ou seja, corrigindo o fator de potência e o controle do fluxo de reativos injetados.

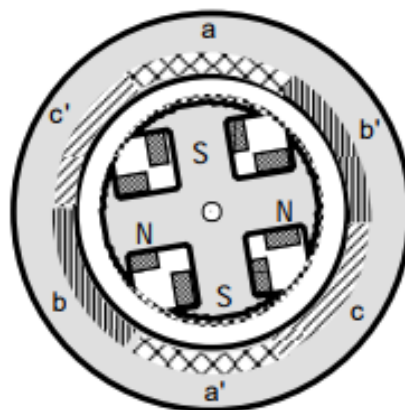
### 2.5.1 Aspectos construtivos das máquinas síncronas

Para Chapman (2013), os enrolamentos de uma máquina síncrona são definidos por enrolamentos de campo, os quais são responsáveis pela produção do campo magnético principal, e os enrolamentos de armadura, sob os quais são aplicadas as tensões induzidas.

A construção de um gerador síncrono passa-se primordialmente pelo dimensionamento do estator (Figura 3), parte fixa da máquina construída de chapas de aço laminadas onde ficam alocados os enrolamentos de armadura com alimentação trifásica defasada de  $120^\circ$ , representados por a, b e c. Estes enrolamentos são adaptados dimensionalmente de forma que as correntes de todas as fases contribuam na geração de um campo girante. Seu núcleo é fabricado de lâminas de material ferromagnético. A espessura destas deve ser dimensionada no projeto para que se adquira um menor efeito de correntes de fuga e as perdas por histerese. (CHAPMAN, 2013)

O rotor, parte girante da máquina, tem duas formas clássicas de construção, tendo polos magnéticos salientes ou não salientes, diferindo basicamente pela posição dos polos junto ao eixo, sendo os polos salientes com protuberâncias e o de polos não salientes, ou lisos, de forma justaposta a este. Esta parte da máquina é submetida a campos magnéticos variáveis, logo deve ser construído a partir de lâminas que ajudam a reduzir as perdas. (FITZGERALD, 2006)

Figura 3 - Estator e disposição das bobinas



Fonte: Guedes (1992)

## 2.6 Geradores síncronos de ímãs permanentes

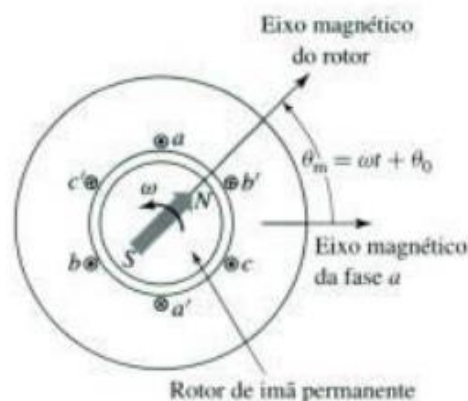
Neste tipo de máquina, o enrolamento de armadura trifásico é colocado nas ranhuras do estator, semelhante aos aspectos construtivos de um gerador síncrono convencional. A diferença básica se dá quanto aos ímãs permanentes posicionados junto ao rotor. São denominados também como geradores *brushless*, por não possuírem escovas em sua construção. (CAETANO, 2013).

Para Fitzgerald (2006), as técnicas de análise para um gerador com ímãs permanentes são as mesmas para um gerador síncrono comum, apenas que a excitação vem de uma corrente de campo de valor constante e que as indutâncias levem em conta a permeabilidade magnética do ímã permanente.

O autor cita algumas postulações sobre a distribuição da densidade de fluxo imposta pelos ímãs, que difere das máquinas síncronas comuns. Devido a reação de espraçamento causada pelas extremidades dos ímãs, a distribuição de densidade de fluxo deixa de ter caráter retangular sofrendo deformações.

Deste modo, a onda de fluxo concatenado com o enrolamento passa a ter uma geometria de trapezoide. Essa distribuição diferenciada influencia diretamente no torque máximo da máquina, visto que sob tensões induzidas nulas e fluxo concatenado máximo, o deslocamento ocorre em  $60^\circ$  elétricos, devido a forma trapezoidal. A figura abaixo representa uma vista longitudinal de uma máquina com ímãs permanentes fixados no rotor, indicando o sentido de magnetização rotor através da seta. As bobinas são representadas por a,b e c,  $\theta_m$  significa o ângulo do arco percorrido em função de  $\omega t$ , que é a frequência angular.

Figura 4 – Diagrama esquemático de uma máquina de ímãs permanentes



Fonte: Fitzgerald (2006)

Fitzgerald (2006) cita que geradores com ímãs permanentes geralmente são utilizados com velocidade variável de acionamento, como em centrais eólicas. Por essa característica, são em sua grande maioria instalados juntos a uma ponte retificadora e um circuito de controle como os reguladores de tensão, fazendo com que se obtenha saídas em corrente contínua e de níveis constantes.

O autor descreve que podem ser classificadas quanto a montagem dos ímãs no rotor tendo as formas mais comuns de aplicação os ímãs montados na superfície do rotor; ímãs alocados em ranhuras na superfície do rotor e ímãs no meio das laminações do rotor.

Caetano (2013) cita como vantagens de operação de um gerador *brushless*, a não utilização de escovas, diminuindo mau contato; menor índice de manutenção, baseando esta apenas para lubrificação de rolamentos, maiores índices de rendimento e fácil controle através de reguladores e conversores. As desvantagens desta máquina são a possível desmagnetização dos ímãs quando operados em temperaturas muito altas; maior custo de aquisição e perda do controle de campo, o que pode levar a afundamentos de tensões visto que não é possível controlar a excitação.

## 2.7 Teoria de Controle

Para Andrea (2012) a técnica de controle de processos é dada por um algoritmo com embasamento matemático que modifica variáveis em relação a um dado erro proveniente de uma malha de controle.

Uma das técnicas mais utilizadas, segundo Andrea (2012) é o controle proporcional integral derivativo (PID). Nesta modelagem, o sinal de erro é tratado por três coeficientes distintos que tendem a corrigir o erro com velocidade antecipativa.

Quando é necessário ao sistema que se obtenha um controle de grandezas externas, ou seja, quando o sinal de erro é advindo de uma fonte externa não-controlada, implementa-se um ou mais dos tipos de algoritmos que executem a solução com maior precisão e rapidez.

Andrea (2012) cita os tipos mais comuns como: Controle ON-OFF; controle com ação proporcional (P); controle com ação integral (I); controle com ação derivativa (D).

O controle ON-OFF apresenta solução binária ao sistema, atuando como uma chave. Quando o valor desejado é atingido, o sensor liga ou desliga a chave fazendo com que o sistema se mantenha de maneira intermitente.

O controle proporcional (P), caracteriza-se por uma relação de linearidade fixa entre o valor da variável controlada e o valor que o atuador de controle fornece. Essa relação pode ser descrita como um ganho, sendo este uma porcentagem fixa entre a variação do controlador pela variação proporcional da grandeza

O controle integral (I) é uma técnica mais suave de controle pois integra o sinal de erro no tempo, fazendo com que se obtenha resposta a variações de maneira contínua. O controle integral é aplicado geralmente com o controle proporcional, formando o controle proporcional integral (PI), sendo que o sistema passa a operar com o set-point ajustado de forma automática, melhorando o amortecimento.

O controle derivativo (D) é responsável por aplicar correções proporcionais à velocidade com que o desvio aumenta, realizando assim uma correção antecipada a um desvio que ainda não aconteceu.

Logo, Andrea (2012) define o controle proporcional integral derivativo (PID) como a junção das vantagens dos métodos de controle. Concentra em um algoritmo o ajuste da variável de controle de forma proporcional, baseando-se no tempo em que o erro acontece e ajustando com base na taxa de variação do erro. É um método rápido e preciso em resposta a transitórios.

### **2.7.1 Conversores Estáticos**

Segundo Barbi (2000), em sistemas de geração instáveis, ou seja, os quais fornecem tensões incertas, como a saída de um gerador de velocidade variável, faz-se necessário a adoção de métodos que diminuam ou até eliminem alterações brutas que possam influenciar no bom funcionamento da planta.

Para exercer esse controle é necessário a adoção de conversores estáticos, os quais regulam a tensão média de saída e a normatiza em um nível desejado, uma vez que existem flutuações na tensão de entrada e saída da carga. O método utilizado para controlar a tensão de saída emprega um circuito eletrônico de chaveamento a uma frequência constante, ajustando a duração dos estados das chaves controladas. (BARBI, 2000).

### 2.7.2 Conversor *Buck-Boost*

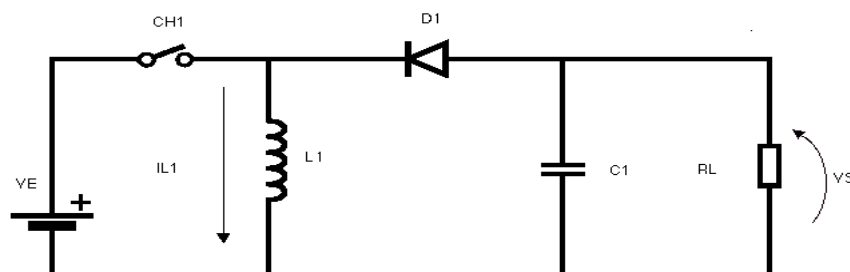
Ahmed (2000) define o conversor abaixador-elevador de tensão, conhecido como *Buck-Boost*, que produz uma tensão de saída com valores variando de zero até nove vezes sua tensão de entrada, em função do ciclo de trabalho estabelecido.

Teoricamente esse tipo de conversor é concebido para possibilitar uma variação contínua de tensão na carga, variando desde zero até o valor de tensão de alimentação. (BARBI, 2000).

Para Ahmed (2000) o *Buck-Boost*, apesar de possuir uma topologia simples, é um dos circuitos conversores mais aplicados em eletrônica de potência, apresentando diversas funções em engenharia. Sua capacidade de operar em grandes variações de tensão possibilita compatibilizar níveis de tensão de operação que garantem a carga otimizada de dispositivos eletrônicos, a um baixo custo de implementação.

Tem como princípio de funcionamento variado de acordo com a posição da chave controlada por um circuito auxiliar. No modo contínuo, a chave fechada possibilita ao indutor presente no circuito conduzir corrente e o capacitor, suficientemente dimensionado, garante a tensão de saída constante. Nessa situação, como pode ser observado na figura 5, toda a tensão da fonte fica sobre o indutor, já que o diodo empregado não possibilita a passagem de corrente. Realizando o controle da tensão na carga de modo eficaz. Com a chave aberta, o diodo diretamente polarizado fornece corrente a carga e recarrega o capacitor, fazendo com que o indutor fique em paralelo com a carga e tenha a mesma tensão de saída. (AHMED, 2000)

Figura 5 – Topologia do conversor *Buck-Boost*



Fonte: Disponível em <<http://nerdeletrico.blogspot.com.br>>. Acessado em 12/11/2017.

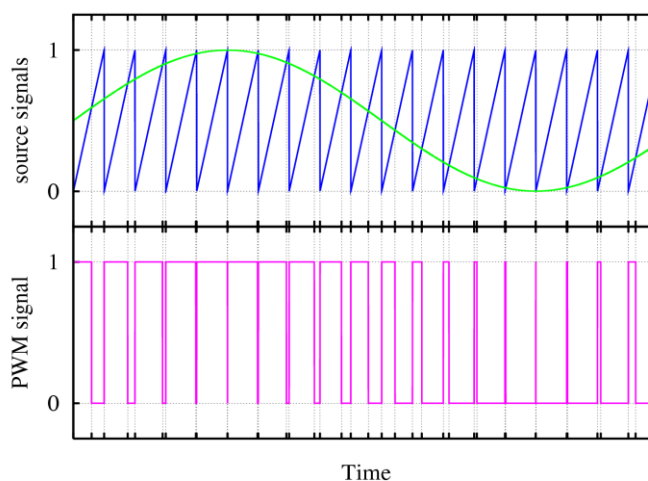
### 2.7.3 Modulação por Largura de Pulso (PWM)

Ahmed (2000) discorre que para o chaveamento em alta frequência da chave do conversor ocorra de forma esperada, faz-se necessário que o sinal de controle (ciclo de trabalho do conversor) seja modulado em largura de pulsos. O sinal de comando é obtido, geralmente, pela comparação de um sinal de controle com uma onda periódica.

A resposta dessa interposição se dá por um sinal alternado com frequência fixa e largura de pulso variável. Para obter-se um sinal na saída do acionamento de forma desejada, é necessário compará-lo com um sinal de tensão de referência, que seja a relativo da tensão de saída desejada. Em conversores CC-CC, como o *Buck-Boost*, é utilizado um sinal dente-de-serra como referência, conforme figura 6. (POMILIO, 2013)

O modulador por sua vez, é o circuito responsável em comparar o sinal de referência com o sinal da modulação. A largura do pulso na saída do modulador varia de acordo com a amplitude do sinal de referência em comparação com o sinal portador. Tem-se dessa forma a modulação por largura de pulso – PWM.

Figura 6 - Modulação por Largura de Pulso (PWM)



Fonte: Pomilio (2013)

### 2.7.4 Malha de Controle

A malha de controle é uma ferramenta útil na identificação do processo e na proposição de atuadores que modifiquem as variáveis envolvidas neste. Como



definição, tem-se a manutenção do valor de uma certa condição através da sua média, da determinação do desvio em relação ao valor desejado e da utilização do desvio para se gerar e aplicar uma ação de controle capaz de reduzir ou anular o desvio. (REIS, 2011)

A necessidade de se encontrar meios para a construção de uma malha de controle somente é sanada pela modelagem matemática dos componentes envolvidos na mesma. Pelo entendimento matemático, pode-se estudar e simular sistemas dinâmicos, analisando a estabilidade e as respostas do sistema e, com isto, obter a estratégia de controle conveniente. Na área de projetos, quando se requer precisão e confiabilidade esta análise é essencial. (BARBI, 2000)

No presente trabalho, existe a necessidade da implementação de uma malha de controle que quegarantirá a inspeção e realimentação do conversor estático instalado, fazendo com que haja precisão do ajuste e a rápida correção na tensão de saída, controlando desvios provenientes de transitórios na alimentação ou mudanças de carga. No item 4, se buscará a implementação gráfica, matemática e física desta malha, afim de relacionar a tensão de saída com a tensão de controle, determinando um método de eficaz de controle em função do erro existente entre as mesmas.

## **2.8 Baterias**

Para Roseback (2004) baterias eletroquímicas podem ser definidas como elementos armazenadores de energia, ou seja, dispositivos que atuam como acumuladores eletroquímicos que tem por finalidade o armazenamento de energia para posterior utilização. Bastos (2013) completa a afirmação, citando que baterias são dispositivos conversores de energia química contida em seus materiais construtivos diretamente em energia elétrica, partindo da reação eletroquímica de oxidação e redução.

Souza (2012) cita as baterias recarregáveis, onde o processo de oxi-redução torna-se bidirecional, ou seja, atua em ciclos de carga e descarga. Esse ciclo tem duração finita e com autonomia, dependendo do material constituinte, de centenas de vezes.

Em definições gerais, Souza (2012) define a carga nominal da bateria (Ah) como a quantidade correspondente de corrente elétrica que pode ser fornecida pela bateria em uma hora de operação, o que implica diretamente em seu tempo de

descarga. Uma bateria é considerada descarregada quando o valor da tensão nos terminais for inferior a tensão do circuito de corte por baixa tensão da mesma.

Cândido (2010) relaciona os principais tipos de baterias encontradas de maneira comercial, as quais se diferenciam basicamente pelo meio em que as placas estão imersas: baterias de chumbo-ácido, níquel-cadmio, níquel-hidreto metálico e íon lítio, sendo que cada tipo possui vantagens e desvantagens dependentes do modo de uso e necessidade do projeto. Devem ser escolhidas através de um dimensionamento criterioso, que leve em consideração a quantidade pretendida de ciclos de funcionamento, tempo de carga e descarga, densidade de potência, nível de manutenção e segurança e principalmente seu custo.

Uma das mais utilizadas baterias, a chumbo-ácido, é dividida em células com duas placas de polaridades opostas e isoladas, imersas em um eletrólito. Basicamente, possuem chumbo como matéria ativa e o eletrólito uma solução aquosa de ácido sulfúrico. Muitas baterias de chumbo-ácido têm como desvantagem a baixa profundidade de descarga, sendo essa uma relação entre a capacidade nominal e o quanto ela pode fornecer sem que fique comprometida. Esse processo de descarga também favorece a sulfatação que se define pela formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas.

### **2.8.1 Processo de carga**

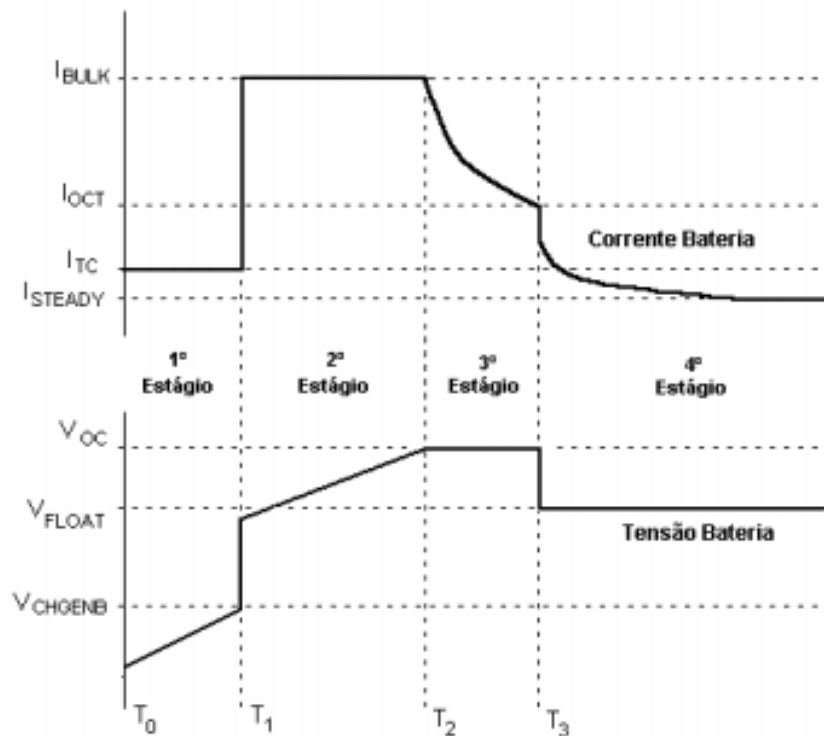
O processo de carga de uma bateria leva em consideração o tempo de carga disponível e o rendimento. Carrega-se mais rápido uma bateria aumentando a corrente de carga, ao custo de um rendimento baixo. Bastos (2012) cita que um dos fatores limitantes nesse processo é o cuidado com o aumento de tensão durante o processo de carga quando se termina o carregamento. Caso nesse ponto não haja interrupção da corrente de carga, a bateria passa a consumir toda a energia entregue, realizando a eletrolise das partículas de água presente no meio aquoso do eletrólito, causando perda de água e necessidade de manutenção.

No processo de carga, é necessário que haja emprego de controle, para que se eliminem o risco de sobrecargas. Quando o processo de carga advém de uma fonte instável, faz-se mais importante a função do controlador de carga, a fim de evitar imprevistos, intervenções ambientais, ou quaisquer outros eventos. Bastos (2012) define o controlador como um dispositivo capaz de controlar e monitorar o processo

de carga e descarga das baterias, evitando danificações e descargas profundas. São constituídos, basicamente, com um circuito de controle, o qual monitora as grandezas elétricas do sistema, e um de comutação, capaz de controlar tensão ou corrente de carga ou descarga. Tem como principal função o carregamento completo da bateria, evitar sobrecargas, impedir corrente reversa entre a bateria e o sistema e prevenir descargas profundas.

Em baterias de chumbo-ácido, Rosemback (2004) recomenda dividir o processo em estágios, sendo estes: a) carga leve; b) carga profunda; c) sobrecarga e d) carga de flutuação. Os processos são mostrados na figura abaixo.

Figura 7 – Processo de carga da bateria, curvas de corrente e tensão



Fonte: Rosemback (2004)

O primeiro estágio conta com a carga leve, ocorrendo quando a bateria apresenta níveis de carga abaixo do valor de sua capacidade de descarga crítica. A bateria recebe pequena corrente, de  $C/100$ , onde  $C$  é a capacidade nominal da bateria em 10 horas. Essa corrente é aplicada até que a bateria suba ao nível do valor da tensão de capacidade de descarga crítica  $V_{CHGENB}$ .

No segundo estágio, fornece-se à bateria uma corrente constante  $I_{bulk}$ , a qual é a máxima corrente de carga que a bateria suporta sem o processo excessivo de eletrólise. Aplica-se este nível até que a tensão na bateria alcance o valor máximo de sobrecarga de tensão  $V_{OC}$ .

No terceiro estágio o controlador passa a regular a tensão da bateria até o valor constante de  $V_{OC}$  para que alcance o nível de plena carga. Assim, quando a corrente cair até o valor de 10% de  $I_{bulk}$ , inicia-se o outro estágio.

No último estágio será dever do controlador aplicar uma tensão constante de flutuação  $V_{float}$ . Quando os níveis de tensão, através do processo de descarga caírem 10%, o controlador, se alimentado de fonte externa, volta a inserir a corrente  $I_{bulk}$ , fazendo com que não haja descarga.

## 2.9 Projeto de Desenvolvimento de Produto

O desenvolvimento de produtos baseia-se em um conjunto de atividades através das quais se busca, a partir da necessidade do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, alcançar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de fabricação, para que este possa ser executado (ROZENFELD et al., 2013).

De acordo com Kotler (2000), produto é algo que pode ser oferecido ao mercado, para sua apreciação, aquisição ou consumo, satisfazendo assim um desejo ou necessidade do consumidor. O autor define ainda que o Processo de Desenvolvimento de Produto – PDP, é um conjunto de atividades organizadas que visam produzir um bem ou serviço específico para cada cliente, seja este interno ou externo.

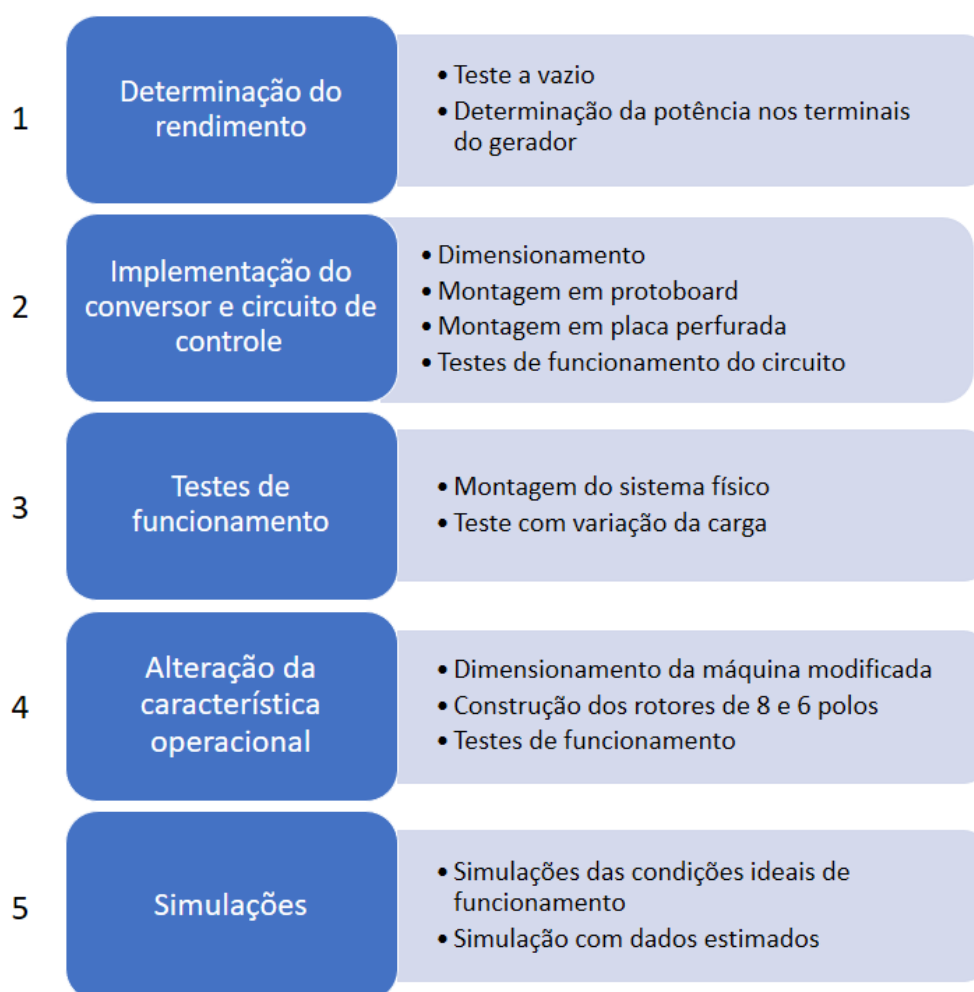
De forma simplificada, Batalha (2008) descreve as etapas do Processo de Desenvolvimento de Produto defendidas por Rozenfeld et al.(2013). Este processo é descrito em três etapas: o Pré-desenvolvimento, o Desenvolvimento que conta com o Projeto Informacional, Projeto Detalhado, Preparação da Produção e Lançamento do Produto e a etapa de Pós Desenvolvimento que conta com Acompanhamento do Produto e Descontinuidade do Produto. De acordo com Batalha (2008):

- **Pré-desenvolvimento:** a primeira fase do desenvolvimento do produto define o produto a ser desenvolvido, o público que será atingido e o seu lançamento;
- **Projeto Informacional:** esta fase relaciona as informações necessárias sobre o produto além de definir as especificações do projeto;
- **Projeto Detalhado:** esta fase conclui a descrição do produto, finalizando a descrição dos materiais e o dimensionamento dos componentes. É realizado o planejamento da fabricação, testes são realizados e a documentação necessária do produto é organizada;
- **Preparação do Produto:** nesta fase é realizada a mobilização dos recursos da produção, à preparação dos dispositivos de fabricação e é produzido um piloto ou lote piloto;
- **Lançamento do Produto:** esta fase inicia-se quando são desenvolvidos os processos de comercialização, vendas, distribuição, atendimento ao cliente, assistência técnica e são documentadas as melhores práticas;
- **Acompanhamento do Produto:** a primeira fase do pós desenvolvimento realiza avaliações de satisfação dos clientes, monitora o desempenho e realiza auditoria do processo de desenvolvimento;
- **Descontinuidade do Produto:** nesta fase, se for considerado adequado, define-se a descontinuidade do produto e o fim da sua produção.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se pela pesquisa e desenvolvimento de uma planta capaz de gerar energia elétrica através da energia mecânica imposta pelo usuário ao pedalar uma bicicleta. Para isto, necessitou-se da utilização de meios que experimentalmente demonstrassem a eficácia dos componentes empregados, bem como expressassem numericamente seus resultados. A figura 8 mostra, de maneira passo-a-passo, os ensaios realizados, bem como os métodos utilizados para a realização destes.

Figura 8 – Diagrama esquemático da metodologia do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Os ensaios foram realizados nos laboratórios do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, campus Bagé, na finalidade de exprimir constatações quantitativas dos testes.

Em resolução dessas etapas, inicialmente, para obter o resultado esperado, a tração desenvolvida pelo usuário na bicicleta deve gerar energia elétrica. Essa energia deve ser, em um primeiro momento, utilizada pelas cargas instaladas.

Desta forma, como metodologia para a obtenção dos objetivos, são descritas as etapas seguintes:

### **1) Determinação do rendimento**

O ensaio controlado foi realizado através da medição da potência do motor elétrico trifásico VOGES, 4 polos, com potência nominal de 2HP, utilizando o Analisador de Qualidade de Energia Fluke 435 série II instalado em seus terminais.

O primeiro teste procedeu da seguinte forma: variou-se, através do inversor de frequência instalado na bancada, a velocidade do motor até que este atingisse a velocidade síncrona. Anotou-se pontos estratégicos para que se pudesse criar uma linha de tendência destes. O alternador esteve acoplado eixo-a-eixo durante este experimento, porém com os terminais abertos. Este procedimento foi realizado para levar em conta a inércia do rotor no teste, a fim de garantir a lisura dos dados.

Em um segundo momento, conectou-se os terminais do alternador a uma carga, representada por uma bateria sem a função de armazenador de energia.

Novamente, repetiu-se a variação de velocidade do motor, fazendo com que se determinasse a potência de saída no alternador, para assim determinar seu rendimento.

### **2) Implementação do conversor e circuito de controle**

Nesta etapa do trabalho, foram estudados e dimensionados todos os componentes pertinentes a montagem do conversor estático CC-CC *Buck-Boost*. Criou-se, seguindo o referencial teórico, diagramas e fluxogramas que auxiliassem na acepção do projeto.

Após o cálculo dos parâmetros de operação e especificações iniciais, utilizou-se os materiais presentes em laboratório para sua implementação. Foram usados o modulador PWM SG3524, driver do MOSFET foi um IR2304, resistores, capacitores, diodos e um indutor. A montagem primeiramente se deu em uma placa *protoboard* e

posteriormente em uma placa perfurada de fenolite, utilizando solda de estanho e um ferro de solda de 30W.

Em sequência, os experimentos foram realizados sob tensão de 12V, onde pode-se aferir os resultados através do osciloscópio TEKTRONIX TDS 2014B e multímetros. Na posse destes dados, traçou-se tabelas e gráficos a fim de sintetizar os resultados obtidos de maneira descritiva.

### **3) Testes de funcionamento**

Os testes do modelo propostos foram feitos com a reunião dos componentes e montagem do protótipo em armação de ferro. As condições iniciais de giro do acoplamento mecânico foram calculadas em função da necessidade de estimação das relações de velocidade entre o pedal da bicicleta e o eixo do alternador.

Após, montou-se todo o aparato, colocando os terminais do alternador em um conjunto de rádio e alto-falante, com potência de aproximadamente 46W. A bateria instalada no protótipo foi uma Heliar Extreme XTZ-BL, de tensão nominal de 12V e com reserva de capacidade (RC) de 4Ah.

A sequência de teste foi a seguinte: com a unidade de 46W, mediu-se a potência cedida na carga da bateria. Em um segundo momento, utilizou-se um resistor cerâmico para aumentar a carga até 56W. A velocidade das pedaladas foi estimada através de um estroboscópio. Em posse dos dados, foram confeccionadas tabelas que suprissem a demanda de análise descritiva desta etapa.

### **4) Alteração da característica operacional**

Nesta etapa, foram revisados conceitos de máquinas elétricas e seu funcionamento com ímãs permanentes instalados no rotor. As características dos materiais envolvidos também foram estudadas. A partir do embasamento teórico, definiu-se passos para o dimensionamento da máquina, podendo assim realizar-se a compra dos materiais. Foram usados como ímãs permanentes peças de 10mmx10mmx10mm de liga de neodímio-ferro-boro, instalados em duas polias, uma de ferro e outra de alumínio. Para a colagem das peças foram utilizadas colas Araldite e Durepox. Para a usinagem da polia, utilizou-se torno.

Após a devida limpeza e acondicionamento dos rolamentos, fechou-se a máquina e colocou-se sob teste. Com a utilização do motor trifásico VOGES, 4 polos de 2HP, deu-se início aos testes utilizando como instrumento de aferição um



multímetro. A metodologia de ensaios seguiu a mesma sequência de passos do experimento 1.

### **5) Simulações**

Nesta etapa, utilizou-se o software de simulação com o método dos elementos finitos *FEMM – Finite Element Method Magnetics*, da empresa QinetiQ North America. A malha de simulação foi desenhada na área gráfica do *software* com refinamento de 50000 pontos, com o objetivo de reconhecer a distribuição da densidade de fluxo ao longo da peça.

## 4 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas todas as etapas de análise, desenvolvimento e construção do projeto idealizado no presente trabalho. Serão exploradas detalhadamente as etapas experimentais, gerando dados que posteriormente servirão de parâmetro para análise da potencialidade do protótipo, conhecendo assim possíveis utilidades e demais propósitos.

Baseado no modelo de PDP proposto por Batalha (2008), iniciou-se o processo de desenvolvimento do produto. A primeira etapa do processo compreende o pré desenvolvimento, onde busca-se idealizar um produto que seja inovador, útil, técnico e economicamente viável de forma que seja possível a confecção de seu protótipo.

### 4.1 Pré-desenvolvimento do produto

No setor de energia, poucos são os projetos e produtos de geração e conversão de energia destinados à educação, em especial de forma lúdica. Em vista disso, optou-se inicialmente pela construção de um gerador de energia elétrica, onde a tração fornecida pelo usuário, na forma de energia mecânica ao pedalar a bicicleta acoplada ao produto, será transformada pelo circuito proposto em energia elétrica.

O produto será destinado a consumidores interessados em adquirir um grupo gerador *off-grid* de pequenas dimensões para a geração de energia para atividades domésticas simples. Além deste, o produto foi pensando como opção de ferramenta educacional lúdica para aulas no Ensino Fundamental e Médio, e para aulas no Ensino Superior nos cursos de ciências exatas, trazendo ao usuário o contato direto com a geração de energia elétrica.

Foram avaliados os seguintes itens do produto idealizado, a fim de destacar sua conveniência:

- **Utilidade:** o produto tem como objetivo a transformação de energia mecânica em elétrica, através de pedais na bicicleta acoplada ao sistema gerador;
- **Funcionalidades:** o produto pode ser utilizado para geração de energia elétrica para uso em pequenas atividades domésticas, como carregar uma bateria, e também para fins didáticos elucidando as conversões de energia que se implicam no funcionamento da planta bem como, a geração de energia vista

de um modo prático onde o usuário sente através de seu esforço a necessidade de um consumo consciente e sustentável de energia;

- **Nível de complexidade:** o produto apresenta um nível médio de complexidade, sua fabricação não apresenta processos complexos, entretanto o desenvolvimento técnico do produto exige conhecimentos avançados na área;
- **Principal caráter de inovação:** possibilidade de geração de energia caseira e usual e equipamento didático lúdico de fácil utilização e compreensão;
- **Tipo de processo produtivo:** simples, com processos de usinagem, solda e manufatura de materiais;
- **Estimativa de preço:** R\$ 290,00, baseado nos itens utilizados e processos de fabricação realizados.

Investigando o interesse de possíveis clientes potenciais, elaborou-se a tabela 2 apresentando algumas considerações relevantes relacionadas a venda do produto.

Tabela 2 - Clientes potenciais da planta geradora.

<b>Clientes potenciais</b>	<b>O que levaria estas pessoas a adquirirem o produto</b>
Público geral	Busca por economia de energia elétrica e uso consciente de energia.
Docentes da área de exatas	A simples utilização do produto e a facilidade em visualizar a geração de energia a partir do trabalho empregado no equipamento
Instituições de Ensino	Implementar aulas práticas aos alunos com um equipamento que demonstra a geração de energia, colaborando com a aprendizagem e incentivando o uso consciente da energia.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Ao final desta fase estabeleceu-se o novo produto como um equipamento de uso didático e/ou doméstico, e que com sua utilização o usuário possa compreender melhor a geração de energia e assim ter um uso mais consciente desta.

Adicionalmente, é possível gerar energia a fim de alimentar pequenas cargas, servindo como fonte alternativa de baixo custo.

## 4.2 Projeto informacional

Nesta fase do Projeto de Desenvolvimento de Produto, busca-se a base teórica das tecnologias e meios que compõem o processo de produção do protótipo a fim de contextualizar e justificar cientificamente a criação deste.

Esta base teórica está referida no capítulo dois da presente pesquisa, de forma que sana satisfatoriamente as necessidades técnicas da fase em questão.

### 4.2.1 Materiais que compõem o produto

A Tabela 3 apresenta os materiais utilizados na fabricação da planta.

Tabela 3 – Materiais e Especificações

	Material	Especificação
Elétrico	Fio de cobre esmaltado para bobinagem	1.7 mm
	Ferro de soldar	
	Retificadores	25A - 200V
	Dissipadores	Aço
Ferragem	Armação de ferro para sustentação	-
	Eixo	20cm – $\varnothing$ 11mm $\varnothing$ 16mm
	Polia	$\varnothing$ 75mm
	Parafusos	Diversos
	Eixo de acoplamento mecânico	$\varnothing$ 17mm
Ímãs	Ímã de neodímio – ferro - boro	$\varnothing$ 10mm - $\varnothing$ 10mm - $\varnothing$ 10mm
	Grade de ferrite estator	-
Outro	Resina epóxi araldite	

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

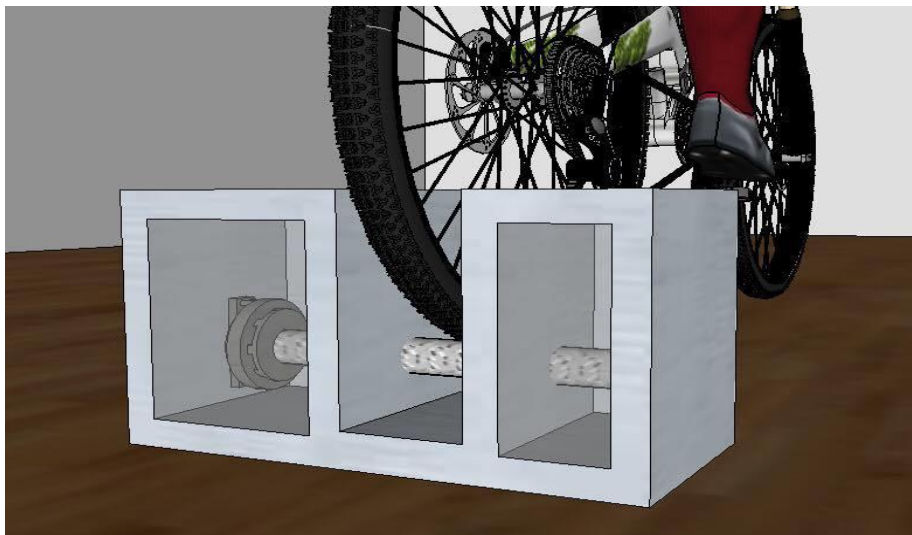


### 4.3.1 Layout dimensional do produto

Visto a necessidade de prospecção do produto, criou-se um modelo final do layout da planta geradora. A máquina fica alojada na parte esquerda da caixa, seu eixo transpassa por um furo de 20mm de diâmetro até encontrar um rolamento na outra parede da caixa da esquerda. São implementados adaptadores para a fixação da roda traseira da bicicleta, de forma que seja de fácil encaixe. Desde modo a bicicleta fica fixa e suspensa pela parte de trás, tocando com o pneu direito no eixo, o qual é de material aderente a borracha, garantindo acoplamento mecânico.

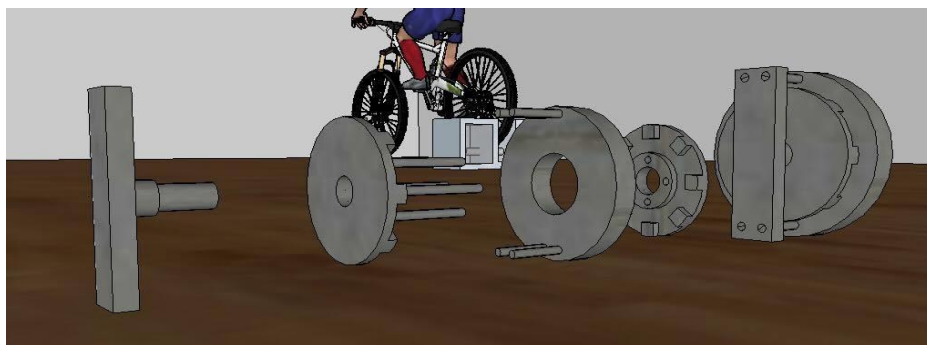
A vista tridimensional seguinte, na figura 10, exemplifica mais facilmente a construção do *layout*, e a figura 11 trás a vista explodida do gerador.

Figura 10 – Vista tridimensional da planta



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Figura 11 – Vista Explodida do gerador



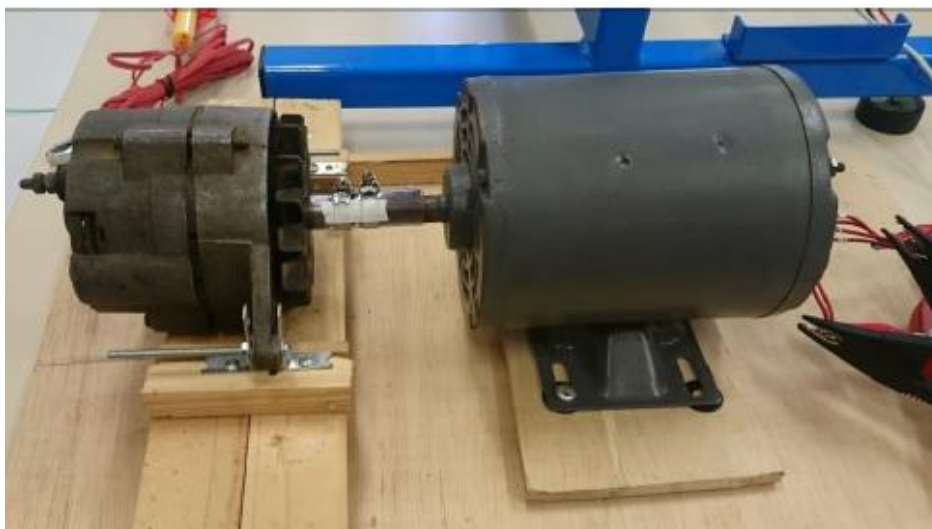
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

### 4.3.2 Determinação do rendimento do alternador

A fim de determinar dados envolvendo a potência mecânica concedida e a potência elétrica obtida nas transformações envolvidas nos processos eletromecânicos, foi necessário realizar um experimento controlado, variando a velocidade de giro no rotor do alternador.

Para essa constatação, foi criada uma base de madeira onde fixou-se o alternador, de forma a diminuir quaisquer perdas mecânicas envolvidas. Ainda nessa base, fixou-se um motor elétrico trifásico VOGES, 4 polos abertos de 2HP. A ligação entre o rotor do alternador e o rotor do motor foi de forma eixo a eixo, utilizando uma mangueira e duas abraçadeiras de aço, de forma a não existirem perdas perceptíveis. A base com os equipamentos devidamente fixados pode ser vista a seguir.

Figura 12 - Ligação entre o motor de indução trifásico e o alternador



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para o controle da potência fornecida ao motor elétrico, utilizou-se o equipamento Analisador de Qualidade de Energia Fluke 435 série II.

Para a determinação da potência elétrica aplicada no motor em função de sua rotação (rpm), o experimento foi dividido em duas partes. Na primeira, a medição foi feita sem carga nos terminais do alternador, ou seja, a rotação foi variada, conforme a elevação da potência, apenas no motor elétrico trifásico, ignorando as transformações do alternador. Na segunda parte, o alternador foi ligado a um

amperímetro digital e a um voltímetro, que, por sua vez estavam em contato com uma carga. Essa segunda medição levou em conta a potência fornecida ao motor e a potência extraída do alternador, de forma a traçar curvas características de carga do mesmo.

#### 4.3.2.1 Potência cedida ao motor *versus* rotação

Como explicado no item anterior, nesta parte do experimento variou-se a rotação do motor a fim de encontrar a potência consumida pelo mesmo, sem a aferição de dados do alternador. Pode-se, então, traçar a seguinte tabela:

Tabela 4 - Potência cedida ao motor *versus* rotação

Rotação (rpm)	Potência (W)
1124	310
1294	360
1391	390
1496	410
1551	440
1713	440

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

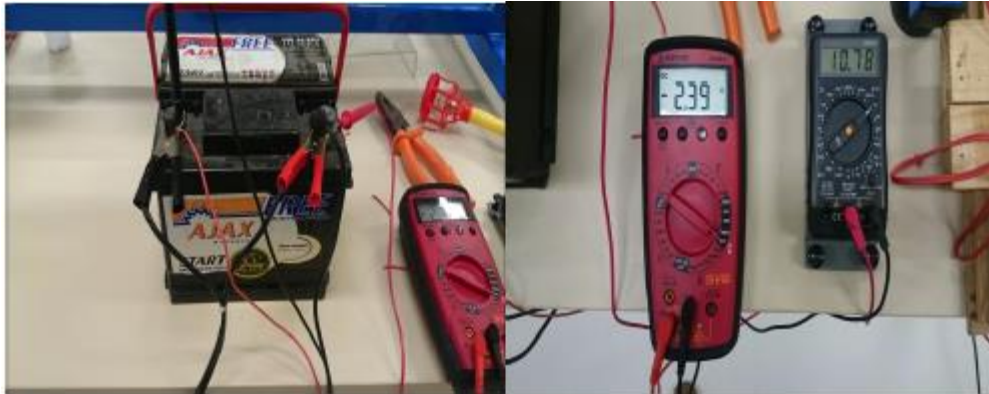
Os dados obtidos nessa parte do experimento serão analisados no item 4.2.3.

#### 4.3.2.2 Potência nos terminais do alternador

Para a execução da segunda parte do experimento, necessitou-se ampliar o circuito, a fim de que fossem medidas a tensão e a corrente elétrica nos terminais do alternador. Para tal, utilizou-se um amperímetro e um voltímetro digitais, os quais foram instalados diretamente na saída do mesmo. Ligada a esses, foi colocada uma bateria automotiva 12V/45A, a fim de que servisse apenas como carga para a energia gerada pelo alternador, não como armazenador de energia.



Figura 13 - Bateria, amperímetro e multímetro ligados a saída do alternador



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Nessa etapa do experimento, a intenção do experimentador era gerar dados relativos à transformação de energia, ou seja, a potência fornecida pelo motor elétrico contrastada com a potência nos terminais do alternador, em função da rotação. Assim, foi possível obter os dados dispostos na tabela seguinte.

Tabela 5 - Potência nos terminais do alternador, em função de tensão e corrente.

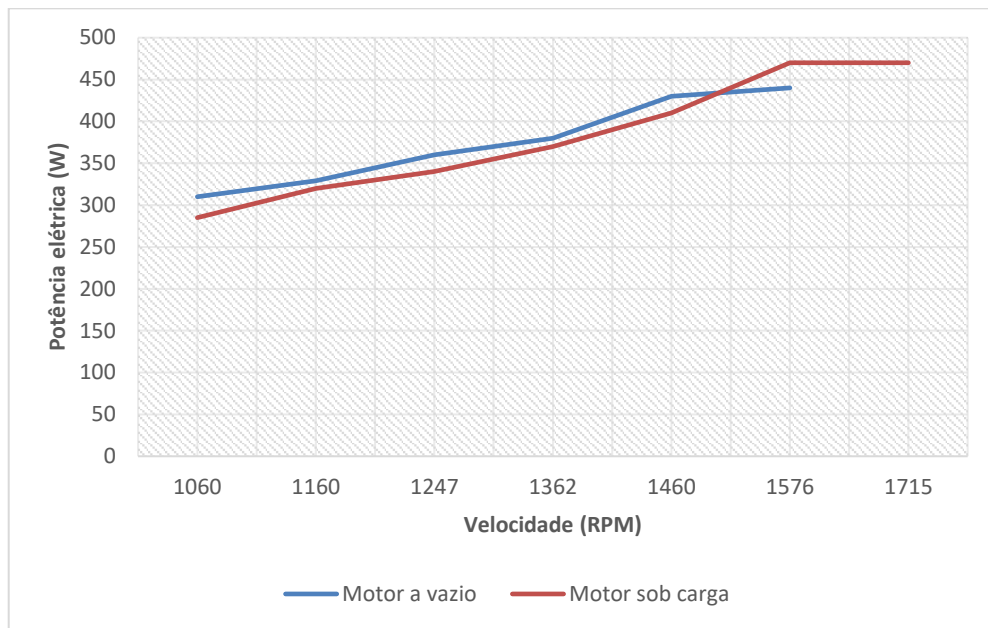
Potência fornecida pelo motor elétrico ao sistema (W)	Rotação (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)
270	1060	8.9	0.9
300	1160	10.3	1.1
320	1247	11.4	1.3
350	1362	11.9	1.6
390	1460	12.44	1.9
440	1576	12.9	2.1
460	1715	13.2	2.3

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Conforme a experimentação, foram geradas duas tabelas as quais exprimem os dados da potência do motor elétrico em função de sua rotação, no caso da primeira, e os dados da potência gerada pelo alternador, no caso da segunda.

Subentende-se que a potência do motor aumenta com o aumento da rotação do eixo, e, ao aproximar-se de sua rotação máxima, apresenta-se minimamente contínua, tendendo a um declive. A curva do teste em vazio do motor (azul) e a curva do teste com carga (vermelho) mostraram, na figura 14, similaridade analítica, visto que se considera a resistência ao torque fornecida pelo alternador muito pequena.

Figura 14 – Curvas de potência do motor trifásico: A vazio e sob carga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Quando o motor elétrico fornece energia mecânica ao alternador, obtém-se a tabela 6. Para essa análise, é necessário processar os dados de tensão e de corrente, para que estes assumam a forma de potência.

Tabela 6 - Potência nos terminais do alternador em Watts.

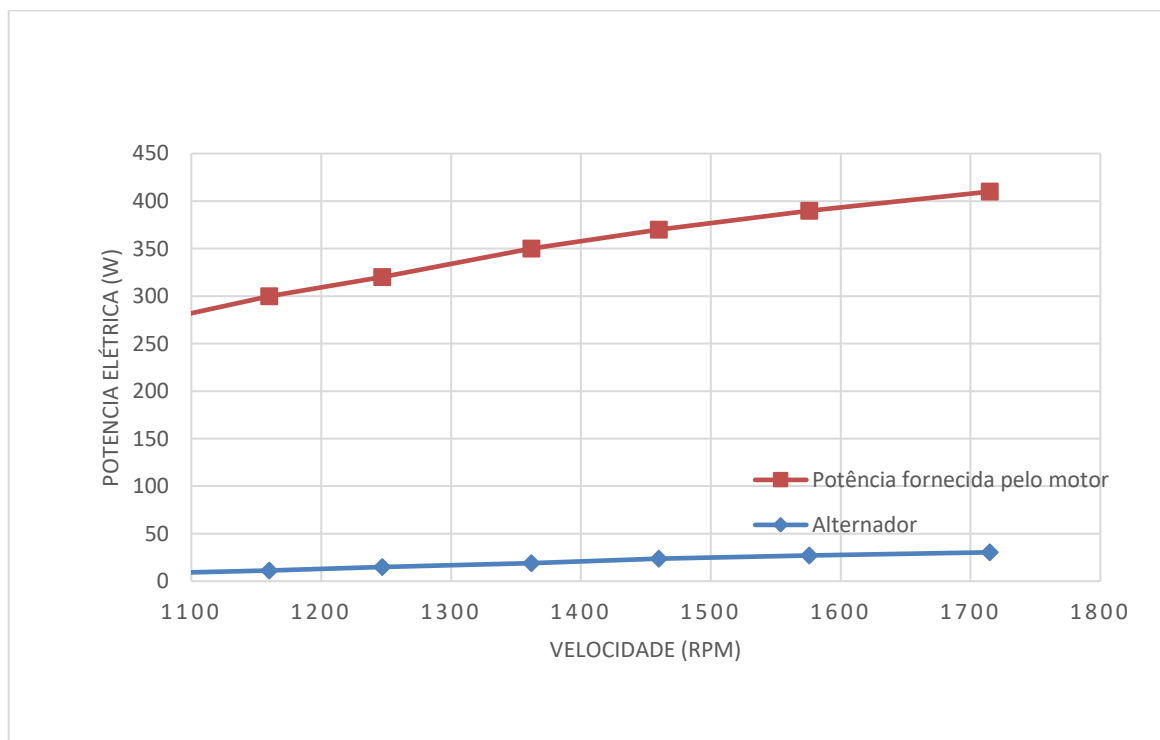
Potência fornecida pelo motor elétrico (W)	Rotação (rpm)	Potência entregue pelo alternador a bateria (W)
270	1060	8.01
300	1160	11.33
320	1247	14.82
350	1362	19.04

390	1460	23.64
440	1576	27.1
460	1715	30.36

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Os dados encontrados podem ser expressos em forma gráfica, para uma melhor compreensão.

Figura 15 - Curva de potência fornecida pelo motor e curva da potência gerada pelo alternador.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

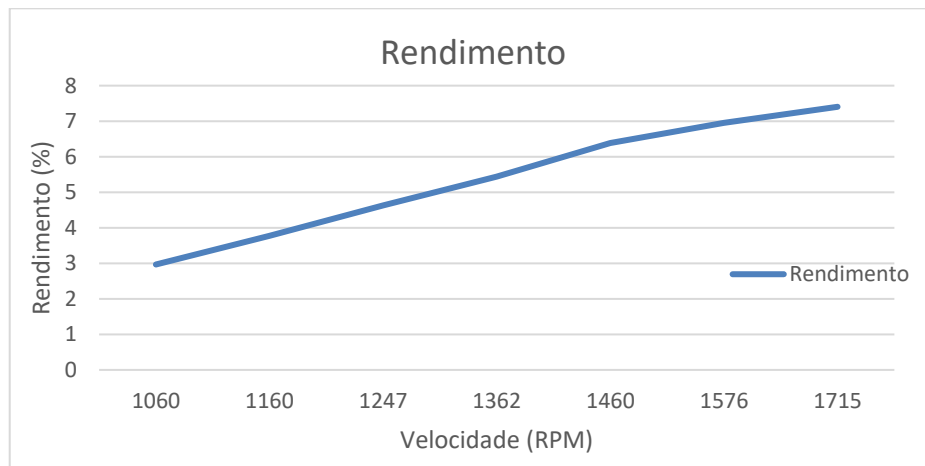
O gráfico acima identifica a relação entre a potência fornecida, na forma de rotação no eixo pelo motor elétrico (em azul), e a potência gerada pelo alternador na bateria (em vermelho).

Nota-se uma diferença nas curvas. Isso se dá diretamente pela relação de rendimento que o alternador tem em função da potência mecânica nele induzida. Essa relação não é constante, depende da velocidade de rotação empregada, porém indica

com clareza o rendimento do alternador para o fim desejado, já que rotações muito elevadas são impossíveis de se empregar com o uso de uma bicicleta.

Após o trato matemático, pode-se traçar um novo gráfico, levando em consideração apenas o rendimento encontrado no alternador, como segue.

Figura 16 - Curva de rendimento do alternador



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Nota-se que, com a elevação da velocidade de rotação no eixo do alternador, maior seu rendimento. Porém, para fins práticos, esse rendimento é muito abaixo do necessário, uma vez que o usuário deverá pedalar a uma velocidade elevada para que haja transformação satisfatória de energia.

#### 4.3.3 Implementação do circuito de controle

Segundo Barbi (2000), conversores estáticos são sistemas que realizam a função de conversão da energia elétrica de uma forma a outra valendo-se para isto da característica de comutação dos interruptores de potência. O controle desta transferência de energia é obtido ao serem aplicados sinais de controle nestes interruptores afim de modificar os seus tempos de condução.

Como a malha de controle opera em laço fechado, os sinais da comutação são gerados automaticamente de acordo com os valores obtidos nas funções de transferência. Assim, o passo de tempo depende da dinâmica do controlador e do circuito.

Com esse advento, a corrente elétrica na saída do projeto será controlada e fornecida a um componente qualquer, utilizando um resistor como sensor.

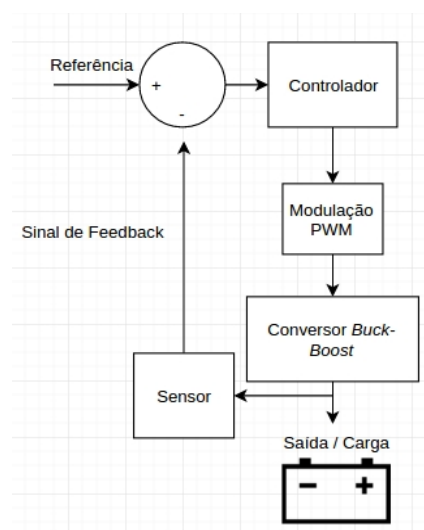
#### 4.3.3.1 Diagrama de blocos

Como o projeto trata-se de uma malha de controle, utiliza-se o método dos diagramas de blocos para representar um sistema, segundo Andrea (2012). Procura-se combinar a descrição matemática do sistema através das equações de estado, com a visualização proporcionada por um diagrama. Um bloco pode representar um único componente ou um grupo de componentes, mas cada bloco é completamente caracterizado por uma função de transferência.

Os diagramas de bloco são constituídos basicamente de blocos associados à operação de multiplicação entre a entrada e a função de transferência do bloco, produzindo a saída, a somadores, que fornecem como saída a soma algébrica dos sinais de entrada, e pontos de ramificação, onde o mesmo sinal se ramifica é levado a pontos diferentes do diagrama. (ANDREA, 2012)

Em um primeiro momento, elaborou-se um diagrama de maior visibilidade, atendendo a proposta da construção de um modelo a ser seguido para posteriormente destacar-se as funções matemáticas regentes no processo de conversão e retroalimentação desejadas na construção do protótipo. Logo, tem-se como a malha de controle a figura 17.

Figura 17 – Diagrama de Blocos



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O diagrama de blocos proposto mostra uma visão simplificada do que se pretende apresentar como malha de controle, visto que cada bloco traz consigo uma função matemática, onde busca-se sempre controlar ou manter constantes algumas variáveis. O objetivo é melhorar a qualidade, diminuir o desperdício de energia, aumentar a quantidade produzida e manter a segurança do projeto.

Após tratamento no controlador, a corrente, variável de controle, passa por uma comparação, onde a função gera um sinal de erro que contenha a informação do resultado da diferença algébrica entre o sinal de referência e o sinal de realimentação, no caso do projeto, utilizasse a modulação por largura de pulso, PWM, ou seja, através da largura do pulso de uma onda quadrada é possível o controle de potência.

O sensor, que no modelo trata-se de um resistor, tem a função de fazer transdução da informação de estado da variável controlada, enviando um sinal adequado ao controlador, o qual denomina-se realimentação. Após o processo proposto, tem-se como elemento final de controle a atuação na variável manipulada em função de um sinal de controle recebido, o que pode ser entregue a carga com eficiência, segurança e eficácia, pois fornece correntes e tensões elétricas adequadas à atuação de equipamentos da planta, como o banco de baterias ou diretamente à carga.

#### **4.3.3.2 Modelagem matemática do sistema**

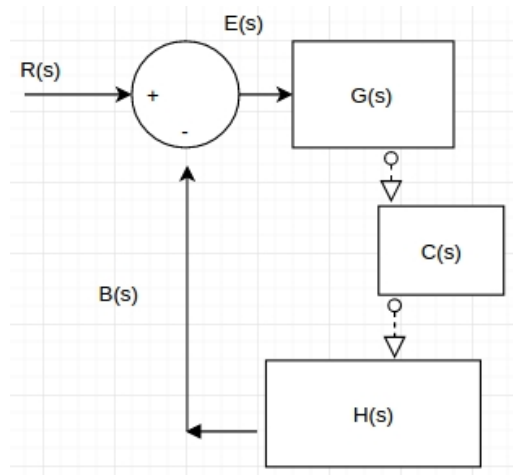
A necessidade de se encontrar meios para a construção de uma malha de controle somente é sanada pela modelagem matemática dos componentes envolvidos na mesma. Pelo entendimento matemático, pode se estudar e simular sistemas dinâmicos, analisando a estabilidade e as respostas do sistema e, com isto, obter a estratégia de controle conveniente. Na área de projetos, quando se requer precisão e confiabilidade esta análise é essencial.

Em sistemas que apresentam controle por malha fechada, existe uma função de retroação que leva a informação de saída, que comparada a informação de entrada, determina o erro atuante entre o sinal de entrada e o sinal de saída. Por meio deste erro o sistema de controle passa a corrigir a saída, atenuando o erro do sinal em questão.

Como exemplo, nos casos em que o sinal de saída não possui a mesma dimensão da entrada, como a luminosidade de uma lâmpada, onde o sinal de entrada é uma tensão.

Para isso, um sensor deve converter a luminosidade em uma referência da tensão para aplicar como um sinal  $H(s)$ . Já em outros casos o sinal de retroalimentação deve ser modificado para gerar o erro atuante e corrigir a saída. Exemplifica-se na figura 18 esse conceito.

Figura 18 – Modelo de controle em malha fechada



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para entender-se a função de transferência do sistema em malha fechada, considerando condições iniciais como nulas, sabendo que as funções no domínio da frequência são polinomiais e no regime da frequência, pode-se descrever tal fato como:

$$C(s) = G(s) \cdot E(s) \quad (5)$$

Em que:

$$E(s) = R(s) - B(s) \quad (6)$$

$$B(s) = C(s) \cdot H(s) \quad (7)$$

Então

$$E(s) = R(s) - C(s) \cdot H(s) \quad (8)$$

Desta forma podemos escrever a função de transferência do sistema como:

$$C(s) = G(s) \cdot [R(s) - C(s) \cdot H(s)] \quad (9)$$

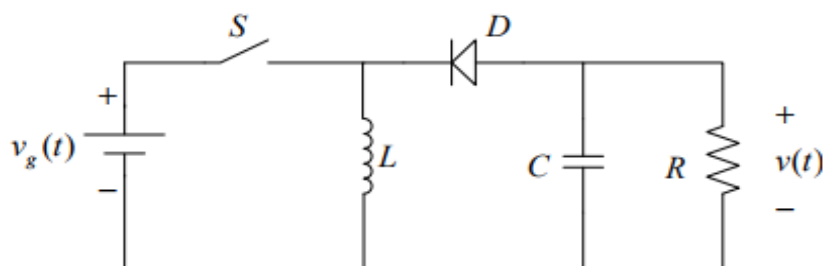
Segue-se, no presente trabalho, a técnica de inspeção, onde a implementação de uma ou mais malhas de controle garantem a precisão do ajuste variável de saída, bem como a rápida correção de desvios provenientes de transitórios na alimentação ou mudanças de carga.

Busca-se a expressão que relacione a tensão de saída e a tensão de controle, a qual determina o ciclo de trabalho da fonte, sendo fornecida pelo compensador a partir do erro existente entre a referência e a saída.

#### 4.3.3.3 Implementação e análise

Para Barbi (2000), o conversor CC-CC *Buck-Boost* é responsável no sistema pelo fornecimento contínuo de tensão ainda que seja suprido com uma fonte inconstante. Esta característica se adapta ao projeto, visto que em função da velocidade variável das pedaladas, a tensão advinda do gerador tem grande oscilação. O conversor *Buck-Boost* não transfere energia diretamente para a saída. É conveniente dividir seu funcionamento em duas etapas: com a chave *S* fechada, existe armazenamento de energia no indutor *L*. Quando aberta, a fonte é seccionada do circuito e o indutor descarrega toda a energia armazenada em forma de campo magnético na saída.

Figura 19 – Conversor Buck-Boost



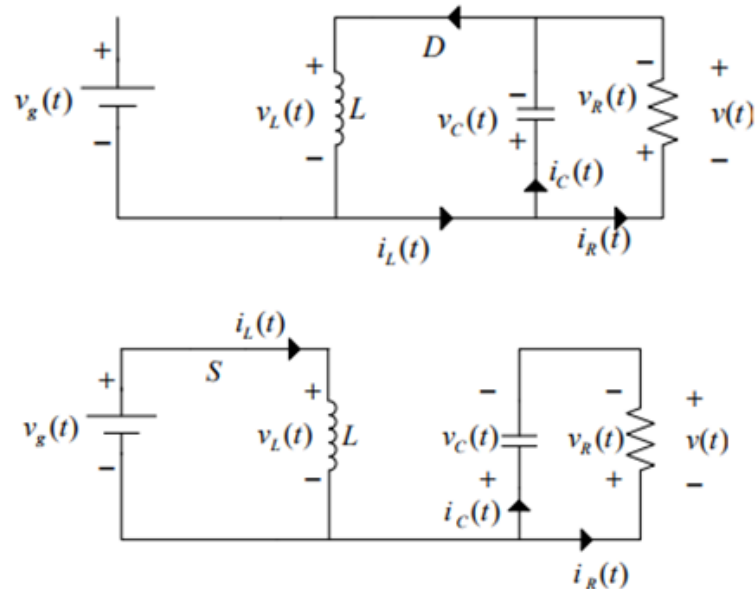
Batschauer (2012)

Para a modelagem do conversor, segundo Carvalho (2012), é necessário que assumam condições de simplificação do método: a resistividade do diodo e da chave são nulas em modo de condução quando aberta; operação do conversor sempre em modo contínuo; função de chaveamento binária, ou seja, assume-se 1 quando a chave



está fechada e 0 quando aberta. As etapas distintas são definidas pela figura seguinte, sendo a de cima com chave aberta e abaixo com a chave em condução.

Figura 20 – Conversor Buck-Boost interruptor aberto (cima) e fechado (baixo)



Batschauer (2012)

Desta forma Carvalho (2012), o sinal de comando define a etapa de operação, controlando assim o comportamento da tensão no indutor, pela observação da etapa que a chave está conduzindo:

$$V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \quad [V] \quad (5)$$

Quando a chave não conduz, observa-se, pela lei dos nós.

$$i_c(t) = i_L(t) - i_r(t) \quad [A] \quad (6)$$

Em regime permanente, a tensão média no indutor e a corrente média no indutor são nulas. Para que se garanta essa condição, a corrente no indutor é invariável durante o período de uma mesma etapa de condução da chave, o que explicita que quando o período de comutação começa, instantaneamente a corrente

no indutor tem variação. No capacitor, esse efeito também acontece. Essa asserção implica que a corrente média no indutor seja sempre zero.

Em regime permanente, o ganho estático do conversor será:

$$M = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (7)$$

Onde M representa o ganho estático, correspondente a razão entre a tensão de saída e tensão de entrada, D representa a razão cíclica, ou seja, a razão entre a largura do pulso e o período.

É necessário que se utilize as técnicas de realimentação para aumentar a precisão do sistema, rejeitar o efeito de perturbações nos momentos de comutação, melhorar a dinâmica do sistema e estabilizar um sistema naturalmente instável em malha aberta e diminuir a sensibilidade a variações dos parâmetros do processo, como no caso, o fornecimento da tensão desejada.

Para isso, implementou-se um circuito com os cálculos dos componentes de acordo com a nossa necessidade e para manter o conversor em modo de condução contínuo. De acordo com os elementos disponíveis no laboratório, foram estabelecidos os parâmetros do conversor. A Tabela 7 mostra as especificações iniciais do conversor *Buck-Boost*, de forma que a montagem do circuito foi feita de acordo com o esquema elétrico da figura 26.

Tabela 7 - Parâmetros para a construção do conversor

Tensão de entrada - 20V	8~15V
Tensão de saída	12V
Frequência de chaveamento (Malha aberta)	50KHz
Resistência de carga	5~10Ω
Ondulação da corrente no indutor	10% (100uH)
Ondulação de tensão de saída	0.5%

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Foram utilizados componentes disponíveis no laboratório, de forma que a montagem do circuito foi feita de acordo com o esquema elétrico descrito na figura 26. O dimensionamento do controlador foi previamente estipulado de acordo com a tabela 7 e o dimensionamento do núcleo do indutor de acordo com a tabela 8. O modulador PWM utilizado foi um SG3524 e o driver do MOSFET foi um IR2304.

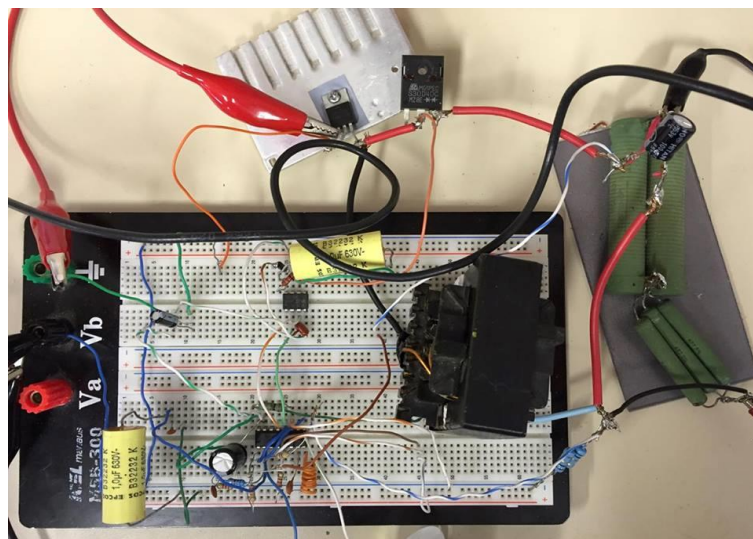
Tabela 8 – Características do núcleo do indutor do circuito conversor

Condutância magnética	Seção transversal efetiva do	Tamanho efetivo do núcleo	Seção transversal mínima do	Máxima densidade de fluxo	Número de Espiras
$A_L$	$A_{in}$	$l_{in}$	$A_{min}$	$B_{máx}$	N1
196nH	125mm <sup>2</sup>	92mm	123mm <sup>2</sup>	297mT	23

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Após a idealização do projeto, pôde-se construí-lo utilizando um protoboard e demais componentes já citados. Os circuitos integrados foram devidamente ligados de forma que o ciclo de trabalho seja oriundo do sinal de erro da saída, a partir de um resistor em paralelo com a carga. Esse sinal de erro realimenta a malha de controle, fazendo com que se obtenha a variável tensão controlada e reajustada a cada passo. Segue na figura a seguir o procedimento prático de montagem.

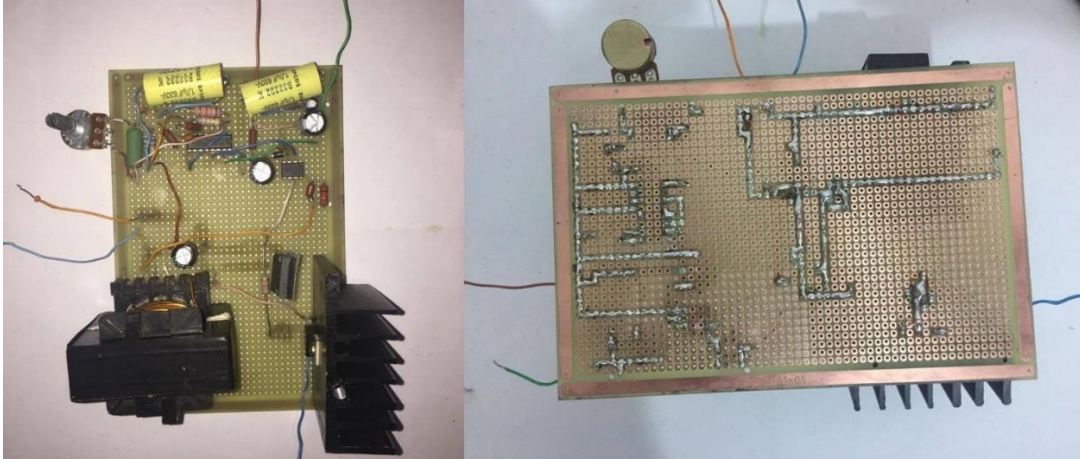
Figura 21 - Montagem do Conversor e da malha de controle em *protoboard*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A malha de controle bem como a parte de potência do circuito foi implementada também utilizando uma placa de fenolite ilhada de 15cm x 10cm, a montagem seguiu o esquema previamente implementado na placa de testes *protoboard*.

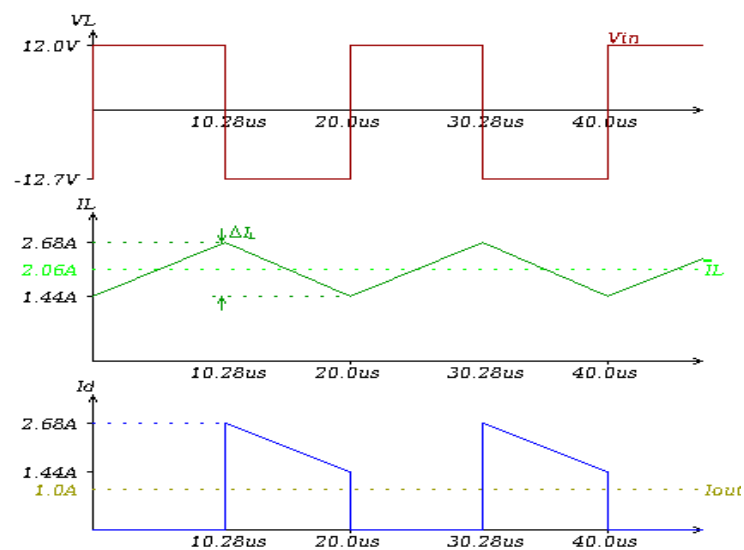
Figura 22 - Montagem do Conversor e da malha de controle em placa perfurada



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para as especificações de trabalho desejadas, obteve-se os parâmetros adjacentes de corrente no indutor e tensão de saída  $V_{out}$  necessárias para que se garanta modo de condução contínua do conversor, conforme os gráficos apresentados na figura 22.

Figura 23 - Gráficos de operação do conversor buck-boost implementado, para a) Tensão da saída  $V_{out}$ , b) Ondulação de corrente no indutor  $\Delta i_L$  e c) Corrente no diodo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Com o ciclo de trabalho fixo, a partir de um gerador de funções na porta do gatilho do conversor, pode-se realizar o experimento controlado de eficiência, gerando a tabela a seguir. Para este experimento, utilizou-se um *duty* de 0.42 e resistência de  $5\Omega$ .

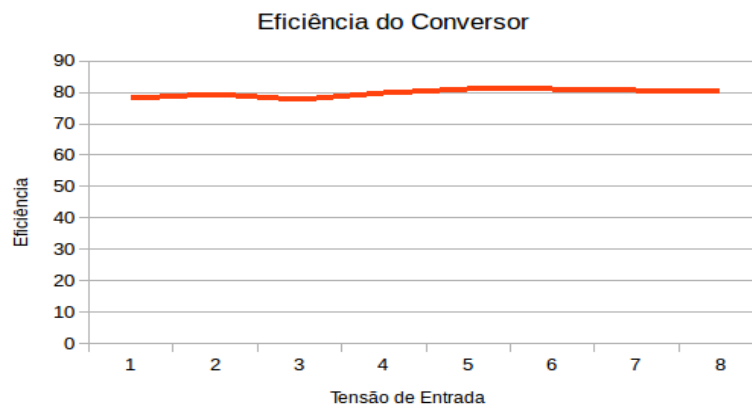
Tabela 9 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um  $D=0.42$ .

Tensão de Entrada (V)	Corrente de Entrada (A)	Potência de Entrada (W)	Tensão de saída (V)	Potência de saída (W)
8	0.37	2.96	3.42	2.33
9	0.42	3.78	3.84	2.94
10	0.47	4.7	4.3	3.7
11	0.51	5.61	4.75	4.51
12	0.56	6.72	5.2	5.4
13	0.61	7.93	5.67	6.42
14	0.66	9.24	6.11	7.46
15	0.71	10.65	6.57	8.63

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Os dados da tabela encontrada nos testes fornecem a possibilidade de se encontrar a eficiência do conversor construído. Para tanto, foi plotado um gráfico afim de influir sobre as perdas na conversão.

Figura 24 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um  $D=0,42$ .



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Observa-se no gráfico, que a um ciclo de trabalho de 0,42, obteve-se uma eficiência moderada ao longo das tensões de entrada, podendo se estimar uma média de 80%. Trata-se, então, de que o conversor construído trabalha de forma que atende os requisitos do projeto, fazendo com que se obtenha variação pequena de tensão na carga a um custo de perdas relativamente baixas para os elementos ativos do sistema. Para um *duty* maior, fixou-se em 0.8 e obteve-se a seguinte tabela.

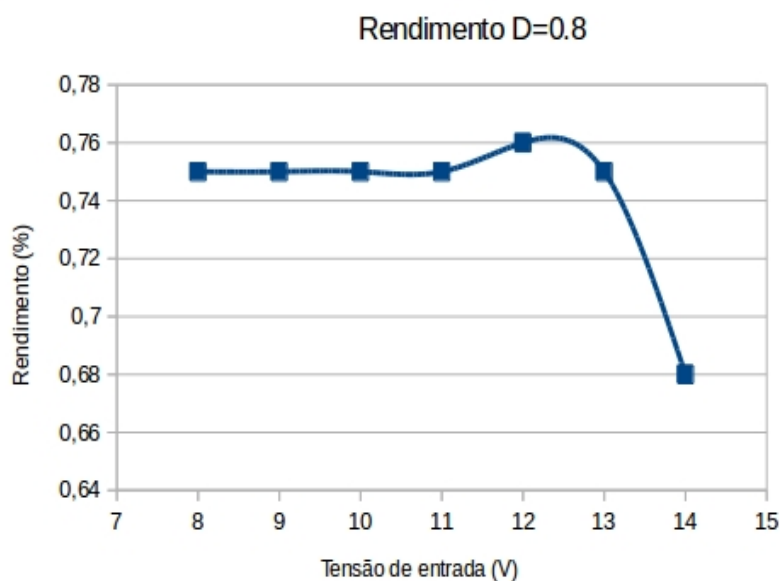
Tabela 10 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um D=0.8.

Tensão de Entrada (V)	Corrente de Entrada (A)	Potência de Entrada (W)	Tensão de saída (V)	Potência de saída (W)
8	2.89	23.12	9.32	17.37
9	3.3	29,7	10.6	22.47
10	3.69	36.9	11.8	28
11	4.11	45.21	13.1	34.33
12	4.54	54.5	14.4	41.5
13	4.87	63.3	15.4	47.4
14	5.32	74.5	16	51.4

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

É possível então traçar outro gráfico que represente a eficiência do conversor a um ciclo de trabalho alto, ou seja, operando em modo elevador de tensão.

Figura 25 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um  $D=0,8$ .



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Mais uma vez, ainda que com menor eficiência do que com ciclos de trabalho mais baixos, pode-se constatar uma eficiência relativamente alta no conversor, atingindo uma média de 75%.

Com o controle em malha fechada, pôde-se observar uma grande estabilidade nas variáveis de controle. As alterações mais abruptas se deram quando o potenciômetro oferecia uma resistência muito grande ou muito pequena, fazendo com que o conversor entrasse em modo de condução descontínua, o que não é objeto de estudo do presente projeto.

Logo, a análise dos resultados concluiu que a técnica de modulação empregada, bem como a realimentação da malha de controle e o conversor construído aparecem como uma ótima alternativa ao projeto de geração de energia a partir do protótipo da bicicleta estacionária, já que se obtém controle das variáveis de processo, segurança nos equipamentos e otimização da geração de energia a uma perda muito pequena. Os rendimentos encontrados na análise experimental explicitam a necessidade de um dimensionamento preciso dos componentes ativos do conversor. Como existe necessidade do aumento da frequência de operação em função do sinal de erro, há tendência do aumento da ondulação da corrente no indutor. Entretanto, essa mudança faz com que se apresentem maiores perdas nos elementos

semicondutores, os quais são proporcionais à frequência, ondulação de corrente e ao nível de potência envolvidos no processo. Maiores perdas nestes elementos resultam em um menor rendimento e na necessidade da utilização de dissipadores térmicos, o que trazem ao projeto um aumento de volume, peso e custo do equipamento, logo o aumento da frequência de operação em um conversor Buck-Boost é limitado devido às perdas de comutação dos semicondutores. Nos gráficos de rendimento construídos, é possível observar essa tendência, tanto que a níveis de tensão de saída maiores que 12V se observa uma queda brusca na função de rendimento, além de um grande aumento da temperatura no dispositivo.





#### **4.3.4 Testes de funcionamento do protótipo**

Para a realização da segunda fase de testes do modelo proposto, houve a necessidade da concepção estrutural do protótipo, a fim de que os dados coletados fossem derivados de uma situação real de uso.

##### **4.3.4.1 Condições iniciais do teste**

Após a reunião dos componentes e montagem do protótipo, iniciou-se uma bateria de testes afim de determinar a viabilidade técnica do projeto em questão.

A primeira constatação feita foram as condições iniciais de giro do acoplamento mecânico. Como o processo envolvido nessa transmissão se dá pela combinação de polias, pode-se determinar matematicamente as condições esperadas de giro no eixo do rotor do alternador, a fim de ter uma estimativa de rendimento do modelo estacionário.

A velocidade final fornecida por um conjunto transmissor depende da relação do diâmetro das polias, se forem diferentes, transmitem diferentes velocidades de rotação, se forem iguais, transmitem a mesma velocidade. Para uma amplificação dessa velocidade, a polia motora, fornecedora do movimento, deve ser maior que a polia movida.

Diante desse escopo, pôde-se projetar a rotação no eixo do alternador, confeccionando uma tabela onde é relacionado o diâmetro da polia com sua rotação aproximada (Tabela 11). É necessário ressaltar que as rotações dependem diretamente da tração empregada pelo usuário, estimada em 60 rpm.

A primeira polia (14cm) corresponde ao diâmetro do pedivela da bicicleta, a segunda identifica o diâmetro do cassete (9cm) que por sua vez transmite a mesma rotação à terceira polia (58cm) correspondente ao diâmetro do pneu da bicicleta, pois quando o cassete gira, o aro (roda) gira de forma proporcional. A última relação da transmissão se dá diretamente pelo diâmetro do pneu com o diâmetro do eixo do rotor do alternador (2cm). A tabela 11 apresenta as relações e as rotações projetadas.

Tabela 11- Relação teórica de velocidades de rotação

Diâmetro da polia (cm)	Rotação (rpm)	Aumento da rotação em relação a tração inicial
14	60 (pico)	=
9	93.6	1.56 x maior
58	93.6	1.56 x maior
2	2727	45.45 x maior

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Em teste, utilizou-se o auxílio de um estroboscópio para a determinação da rotação real no eixo do alternador, conforme a tabela 11.

Tabela 12 - Velocidade de rotação prática

Intensidade das pedaladas	Rotação no eixo do alternador (rpm)	Rotação no pedal (rpm)
Velocidade de pico	1700	37,77
Velocidade de cruzeiro	750	16,66

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

É possível concluir que a baixa rotação encontrada nos testes deve-se a dificuldade do usuário em pedalar nas marchas mais pesadas da bicicleta, requerendo um maior esforço físico. Outro aspecto importante é a resistência ao giro do eixo do rotor do alternador quando esse começa a gerar o campo eletromagnético, fazendo com que o sistema fique ainda mais pesado e diminua a rotação do sistema.

Como último aspecto a ser analisado, mediu-se a corrente de descarregamento da bateria, com o auxílio de um amperímetro, sendo encontrado 0,8A.

#### 4.3.4.2 Variação da carga

Para a aferição de dados referentes ao teste final de carga da bateria e potência gerada pelo alternador, optou-se por dois testes distintos:

- Primeiramente, com a unidade consumidora de 46W instalada, é dado início às pedaladas, excitando o alternador e carregando a bateria.
- Em segundo momento, a unidade consumidora é expandida para 56W, logo executa-se o mesmo experimento.

Procedeu-se com a montagem do circuito elétrico entre os terminais do alternador. que ainda pode ser explicada como:

- O usuário fornece energia mecânica aos pedais da bicicleta, ligada mecanicamente ao alternador.
- O alternador, por sua vez, inicia a produção do campo magnético, fazendo com que haja geração de energia.

Como visto, o alternador reage a rotação empregada, e, baseado no princípio da Lei de Lenz, cria fluxo de corrente elétrica no rotor. Nesse momento, inicia a produção de um campo magnético que causa indução nos enrolamentos do estator. No circuito do alternador convencional, existe uma lâmpada indicadora que apaga quando a tensão gerada é aplicada ao circuito, fazendo papel de resistor e excitando o campo eletromagnético no interior do equipamento para que o mesmo possa gerar eletricidade. Quando apagada, indica que há produção de energia e que a bateria está sendo recarregada; quando acesa, mostra que o sistema está consumindo a potência armazenada e não está gerando energia.

Para o conjunto de carga, ou seja, os equipamentos que consumidores da potência gerada, optou-se por um conjunto de rádio e alto-falante, com potência de aproximadamente 46W.

A bateria instalada no protótipo foi Heliar Extreme XTZ-BL modelo próprio para motocicletas, de tensão nominal de 12V e com reserva de capacidade (RC) de 4Ah. A figura 26 exhibe o módulo de teste devidamente instalado.

Figura 27 - Protótipo final



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Com o auxílio de voltímetro e amperímetro, mediu-se as tensões e correntes envolvidas na carga da bateria, afim de estimar a potência gerada. Foi dado o início aos testes, os quais renderam como resultado a tabela 13.

Tabela 13 - Potência, tensão e corrente para a carga de 46W

Teste	Tensão (V)	Corrente de pico (A)	Corrente média (A)	Potência de pico (W)	Potência média (W)
Teste 1	12.3	4.5	2.4	55.35	29.52
Teste 2	12.3	3.5	2.5	43.05	30.75

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para o aumento pretendido da carga, utilizou-se um resistor de fio axial cerâmico capaz de dissipar uma potência de 10W, somando-se com a unidade consumidora totalizando 56W. Foram utilizados os mesmos materiais de aferição para tensões e correntes, bem como os métodos analíticos. A tabela 14 representa os dados encontrados.

Tabela 14 - Potência, tensão e corrente para a carga de 56W

Teste	Tensão (V)	Corrente de pico (A)	Corrente média (A)	Potência de pico (W)	Potência média (W)
Teste 1	12.3	-0.5	-3.0	-6.15	-36.9
Teste 2	12.3	-0.3	-3.0	-3.69	-36.9

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O experimento trouxe as respostas para os questionamentos levantados ao fim do experimento 1. Existia a necessidade de se avaliar se a energia mecânica na forma de tração, exercida pelo usuário da bicicleta, seria suficiente para que houvesse transformação satisfatória de energias a fim de um uso imediato da energia gerada.

O teste de variação de cargas, trouxe a seguinte explicação: para cargas consumidoras ou dissipadores de potência maiores de aproximadamente 50W, o alternador utilizado, através das transformações advindas da rotação da bicicleta, não consegue realizar essa alimentação de forma eficiente. Existe a necessidade de uma fonte externa, no caso, a bateria, para que haja a devida alimentação dessa carga.

Para consumidores de potência abaixo de 50W, essa relação inverte, sendo o alternador capaz de suportar sozinho a alimentação dos mesmos e ainda gerar excedente, acumulado pela bateria.

Outro ponto que se nota uma relação satisfatória, deve-se a velocidade de rotação no eixo do rotor do alternador. O acoplamento trouxe bastante estabilidade ao sistema, fazendo que a rotação final no eixo fosse extremamente adequada para o presente projeto, atingindo níveis de pico bastante altos.

#### **4.3.5 Alteração da característica operacional: Conversão em gerador síncrono a ímãs permanentes.**

Após realizadas as devidas experimentações com o alternador automotivo em estado original, decidiu-se, a partir dos resultados obtidos, realizar alterações no aspecto construtivo da máquina.

As alterações justificam-se pelos baixos índices de rendimento encontrados na máquina, além de e complicações operacionais no controle de velocidades variáveis da fonte primária.

#### 4.3.5.1 Dimensionamento da Máquina

O referencial teórico deste trabalho traz consigo no item 2.6 o embasamento teórico que possibilita o correto dimensionamento dessa conversão. Em Paula (2011), encontra-se uma metodologia e memória de cálculo suficiente para realizar com segurança essa alteração. Seguindo os passos citados pelo autor, traçou-se uma estrutura a ser seguida, conforme a tabela abaixo.

Tabela 15 – Sequência de passos para o dimensionamento e estimativas do gerador a ímãs permanentes.

1	Layout dimensional
2	Escolha do ímã
3	Cálculo do Entreferro
4	Escolha do número de polos e número de ranhuras
5	Cálculo do fluxo/polo
6	Estimativa do valor da resistência em cada fase
7	Análise térmica

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

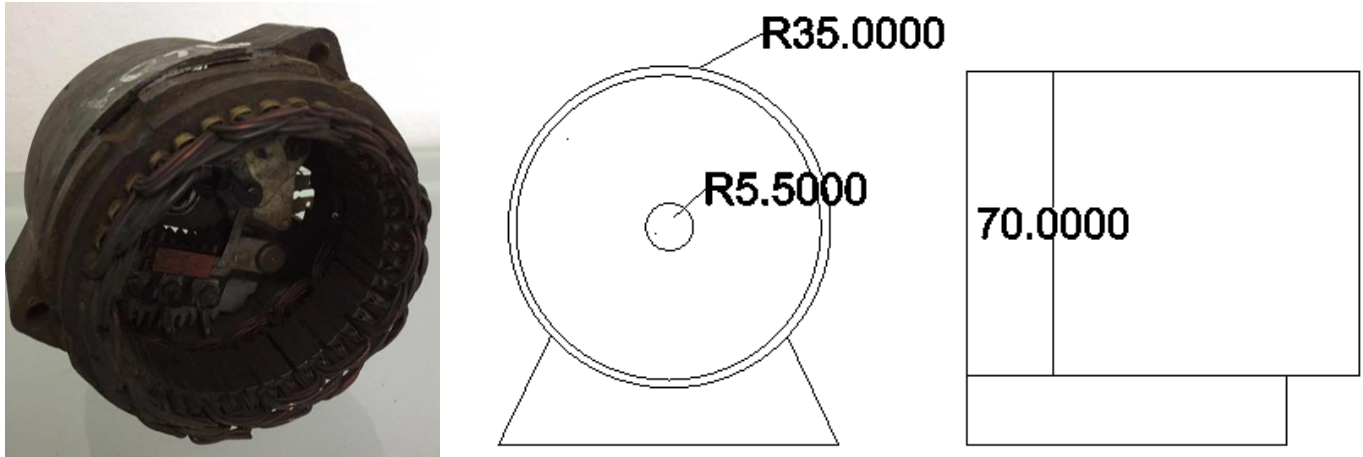
##### 4.3.5.1.1 Limitações dimensionais

Neste tópico de cálculo, são levadas em conta as dimensões do estator do alternador, visto que este não será alterado. Tem-se como área de possível alteração o rotor acoplado ao eixo o que será modificado por um novo rotor composto por uma polia onde serão anexados os ímãs.

O estator, visto na figura 27, tem 70mm de diâmetro, com 90mm de profundidade. O rolamento onde encaixa o eixo, ao fundo da peça, tem 11mm de

diâmetro. O rolamento da tampa do invólucro da máquina tem 16mm de diâmetro. As dimensões limítrofes da alteração do projeto são as descritas.

Figura 28 – Estator, real e em vistas ortográficas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

#### 4.3.5.1.2. Escolha do ímã

Como visto no referencial teórico, item 2.3.4, a correta escolha do ímã é vital no bom funcionamento do projeto. Para esta experimentação, escolheu-se o ímã de Neodímio-ferro-boro, grade N50, com dimensões de 10x10x10 mm.

A escolha deste ímã deu-se, primordialmente, pela característica satisfatória de custo benefício, visto que a aplicação não exige grandes potências nem opera em altos índices de temperatura. Como aspecto negativo da escolha, o ímã N50 não tem grande resistência mecânica e se rompe mesmo com pequenas solicitações.

#### 4.3.5.1.3 Cálculo do Entreferro

A correta dimensão do entreferro reduz a dispersão de fluxo magnético e garante o máximo fluxo por polo. Em suma, quanto menor a dimensão do entreferro, menos se perde fluxo magnético. Miller e Hendersot Jr (1994), propõe três relações para as dimensões do entreferro:

Para máquinas de baixa potência:  $0,13 < g < 0,25mm$



Para máquinas de média potência:  $0,38 < g < 0,51mm$

Para máquinas de grande potência:  $0,64 < g < 0,89mm$

Na aplicação da máquina deste experimento, serão utilizadas as menores dimensões possíveis, aproximadamente 0,15mm.

#### 4.3.5.1.4 Escolha do número de polos e número de ranhuras

É necessário, para a definição do número de polos, a velocidade síncrona do gerador a ímãs permanentes. Como analisado nos testes anteriores, optou-se por uma velocidade de cruzeiro na bicicleta, cerca de 900 RPM. Para este cálculo, utiliza-se, segundo Fitzgerald (2006):

$$n_{sinc} = \frac{120 * f}{polos} \quad [RPM] \quad (5)$$

Logo, foram necessários 8 polos compostos pelos ímãs no novo rotor da máquina. A relação entre o número de polos e o número de ranhuras é proposto por Paula (2011). O autor relata que a correta relação entre essas, influi diretamente na diminuição do efeito indesejável conhecido como torque de borda (*cogging torque*), aparecendo quando não há alinhamento entre algum dente e a fronteira de dois polos magnéticos.

O autor propõe uma relação simples: a menor incidência de *cogging torque* aparece quando o número de polos se distância em duas unidades do número de ranhuras por polo por fase, como visto em (6).

$$2p = n_{ranhuras} \pm 2 \quad (6)$$

Através da equação (6), determina-se o número ideal de ranhuras por polo na faixa de 2 a 6. Como o estator da máquina não foi alterado, com 42 ranhuras, nota-se que esta faixa ideal é respeitada.

#### 4.3.5.1.5 Cálculo do fluxo/polo

O fluxo por polo é diretamente ligado às dimensões da máquina, para calculá-lo, deve-se levar em conta  $A_m$ , área magnética indicada pela equação (7) e  $B_m$ , máxima intensidade do campo magnético-produto, em megagauss-oersteds.(MGOe).

Para o ímã de neodímio N-50, adotou-se  $B_m = 14.5 \text{ MGOe}$ . Para  $A_m$ , a equação seguinte deve ser aplicada

$$A_m = \frac{\pi * D_{ini} * L_{STK}}{2p} \quad [\text{mm}^2] \quad (7)$$

Onde,  $D_{ini}$  representa o diâmetro interno do rotor,  $L_{STK}$  a altura do ímã e  $2p$  o número de pares de polos.

Desta forma, a área magnética do projeto é de  $589,04\text{mm}^2$ . O cálculo do fluxo é o produto direto de  $A_m$  e  $B_m$ , na equação seguinte.

$$\phi/polo = A_m \cdot B_m \quad \left[\frac{\text{Wb}}{\text{polo}}\right] \quad (8)$$

Fazendo as conversões de unidade necessárias, obtém-se  $\phi/polo = 0,854 \text{ T}$

#### 4.3.5.1.6 Estimativa do valor da resistência em cada fase.

Para Miller e Hendersot Jr (1994) indicam que a estimativa da resistência de uma fase é determinada a partir do comprimento médio de uma volta de espira e da resistência do condutor, a equação (9) indica essa relação.

$$R_{fase} = CMV \frac{N_{espiras}}{N_{bobinas}} \frac{N_{bobinas}}{fase} R_{condutor} \quad [\Omega] \quad (9)$$

Onde,  $N_{espiras}$  – número de espiras

$N_{bobinas}$  – Número de bobinas

$fase$ - Número de fases

$R_{condutor}$ - Resistência do condutor por unidade de comprimento

*CMV*- Comprimento médio de uma volta de espira

Desta forma, a resistência em cada fase no gerador é de 0,25  $\Omega$ .

#### 4.3.5.1.7 Análise térmica

O Ímã permanente tem a deficiência de ser frágil quando exposto a uma temperatura alta. De acordo com suas propriedades, cada classe da grade dos ímãs de neodímio-ferro-boro tem uma temperatura específica, que, se for ultrapassada, pode acarretar sérios danos ao material, fazendo com que perca suas propriedades magnéticas.

Deste modo, é importante realizar uma análise térmica a fim de que se garantam níveis de temperatura de trabalho adequadas na operação.

A tabela a seguir representa as classes de ímãs de NdFeB e relação com a temperatura.

Tabela 16 – Ligas de NdFeB em relação à temperatura de trabalho

Classe da liga	Coeficiente de expansão térmica	Temperatura máxima de operação	Temperatura de Curie	Condutividade Térmica
	%/°C	°C	°C	Kcal/m-h-°C
N	-0,12	80	310	7,7
NM	0,12	100	340	7,7
NH	0,11	120	340	7,7
NSH	0,10	150	340	7,7
NHU	0,10	180	350	7,7
NEH	0,10	200	350	7,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

### **4.3.6 Ensaios experimentais do protótipo com ímãs permanentes.**

Nesta etapa são descritos os processos e métodos de fabricação e testes do produto, os quais foram realizados a fim de obter-se o gerador síncrono de ímãs permanentes instalado na base para o acoplamento da bicicleta.

Os materiais previamente definidos no item 4.2.1 deste trabalho foram adquiridos para que fossem utilizados neste processo.

#### **4.3.6.1 Rotor de 8 polos com polia de alumínio.**

No primeiro teste do protótipo modificado, procedeu-se com a desmontagem da máquina para a limpeza e lubrificação das peças e lubrificação dos rolamentos.

Utilizou-se chave canhão de 8mm e chave Phillips 5/16 de 8 pol para a retirada dos parafusos fixadores do estator na tampa do alternador. Separou-se então o rotor do rolamento da tampa e do rolamento do fundo do estator.

Cada rolamento foi tratado com graxa multiuso para evitar perdas mecânicas nestes. O mancal de acionamento e o anel com a grade dissipadora foram limpos a fim de evitar poeira que pudesse entupir as saídas de ar e conseqüentemente aumentar a temperatura de operação da máquina.

Utilizando prensa hidráulica, disponível em uma torneria local, foi retirado o rotor bobinado, construído sobre um eixo de aço, possui em seu interior uma bobina de cobre fixada que é envolvida por um par de sapatas polares.

O eixo original foi preservado, tendo que ser extraído com cuidado para que pudesse ser reutilizado na nova peça.

O eixo de aço original do alternador, agora desmontado dos enrolamentos, foi embutido por pressão em uma polia de 75mm de diâmetro de alumínio. Foi embutido um parafuso de pressão e ranhuras no interior do furo passante para que não houvesse movimentos rotacionais destes elementos acoplados. O resultado é ilustrado pela figura 28. Uma fenda de 1,1mm foi feita ao longo da peça, a fim de ser o local da fixação dos ímãs de neodímio-ferro-boro.

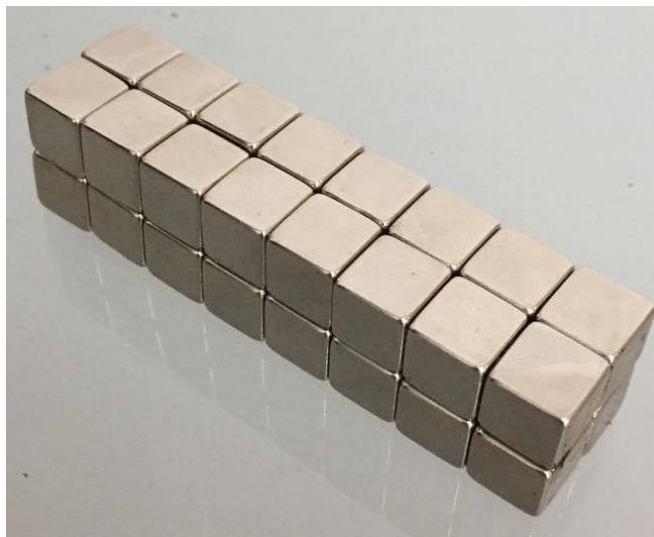
Figura 29 – Polia montada sobre o eixo de aço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Utilizou-se cola epóxi Araldite 10min e massa epóxi Durepox para a fixação das peças os ímãs de neodímio-ferro-boro N50 na peça fabricada anteriormente. Os ímãs podem ser vistos na figura seguinte.

Figura 30 – Ímãs de Neodímio-Ferro-Boro utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Com o auxílio de uma bússola, identificou-se os polos dos ímãs e procedeu-se a fixação na polia, invertendo a direção da magnetização em cada polo. Deste modo, o rotor finalizado ficou conforme a figura 30.

Figura 31 – Rotor de 8 polos com polia de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Após a finalização do rotor, procedeu-se a montagem da máquina, de forma que todos os elementos fossem devidamente instalados em seu lugar de projeto.

A máquina foi posta a teste utilizando o mesmo motor de indução trifásico dos testes anteriores, VOGES 2HP. Acoplou-se o gerador de forma eixo-a-eixo para rodar em vazio, fazendo com que as características de teste fossem as mesmas para uma melhor comparação.

O experimento controlado seguiu a metodologia de ensaios já proposta neste trabalho. Varia-se a rotação do motor cedente de energia mecânica à máquina e aferem-se os dados obtidos através de instrumentos de medição, como o multímetro e o osciloscópio.

Desta forma, procedeu-se o teste, obtendo como resultados a tabela a seguir, sintetizando as características determinadas no teste.

Tabela 17 – Teste com rotor de um ímã por polo e núcleo de alumínio.

Velocidade (RPM)	Tensão (V)	Corrente (I)
746	0,09	0,07
900	0,11	0,05
1069	0,14	0,05
1345	0,18	0,16
1692	0,22	0,26
1943	0,25	0,30

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O teste, ainda que preliminarmente, identificou dados muito aquém dos esperados, visto que os dados aferidos praticamente não representam a conversão de energia. A análise aprofundada deste teste se dará no item 9999, no qual se tratará os resultados matematicamente na determinação de respostas para estes resultados.

#### 4.3.6.2 Rotor de 6 polos com polia de ferro.

Em função da necessidade de realizar testes comparativos para a formulação de parâmetros de funcionamento em diferentes circunstâncias, optou-se por realizar mais um teste determinístico e controlado utilizando, nesta etapa, uma polia de ferro de diâmetro 80mm, contendo seis polos compostos por três ímãs cada.

O núcleo de ferro foi escolhido por apresentar maiores características de permeabilidade magnética que o de alumínio, fazendo com que as linhas de campo geradas pelos magnetos passassem também pela estrutura, diminuindo a relutância total.

Os processos de montagem do eixo foram semelhantes ao da polia de alumínio, ainda que houve a necessidade de adaptar a peça. A figura 31 mostra o processo de usinagem em torno, na intenção de retirar o excesso de ferro no contorno lateral dos ímãs para que se garantisse uma melhor distribuição do campo magnético na máquina.

A distribuição dos polos se deu pela junção de três ímãs com a mesma direção de magnetização, intercalados por mais três ímãs com a direção oposta. Neste teste, diferentemente do primeiro, optou-se por diminuir ao máximo o espaçamento dos polos, na intenção de acertar o passo polar e aumentar o fluxo por polo ( $\phi/polo$ ).

Figura 32 – Rotor de 8 polos com polia de ferro



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Com a peça finalizada, deu-se prosseguimento ao experimento. Os moldes da aferição seguiram o padrão deste trabalho.

Este teste apresentou grandes dificuldades em sua execução, visto que não se obteve grandezas elétricas significativas e concisas. Percebeu-se a existência de tensão de fase quando a máquina operava em velocidade síncrona, não apresentou nenhum tipo de constância ou linearidade.

A análise aprofundada do teste com polia de ferro e 6 polos será feita no tópico 4.3.5.3, no qual se analisará as principais características que incidiram no mau funcionamento da máquina construída.



#### 4.3.6.3 Simulação e análise dos experimentos

Frente a imprecisão dos dados obtidos, e a necessidade de formular respostas diretas aos desafios encontrados nos protótipos testados, recorresse a computação na análise aprofundada do sistema, a fim de obter-se dados comparativos entre o funcionamento ótimo da máquina projetada e os resultados analíticos obtidos.

Utilizou-se, para tal, o *software* FEMM – *Finite Element Method Magnetics*, o qual se caracteriza por ser uma suíte de programas que solucionam, a partir do método dos elementos finitos, problemas em baixa frequência eletromagnética com análises planares e aximétricas. O *software* é largamente utilizado em problemas de magnetostática em sistemas lineares ou não, problemas magnéticos harmônicos, problemas eletrostáticos lineares e de fluxo de calor no estado estacionário.

O pacote é composto por um ambiente gráfico interativo que engloba pré e pós-processamento gráfico, a partir de uma malha e solucionadores que utilizam métodos numéricos.

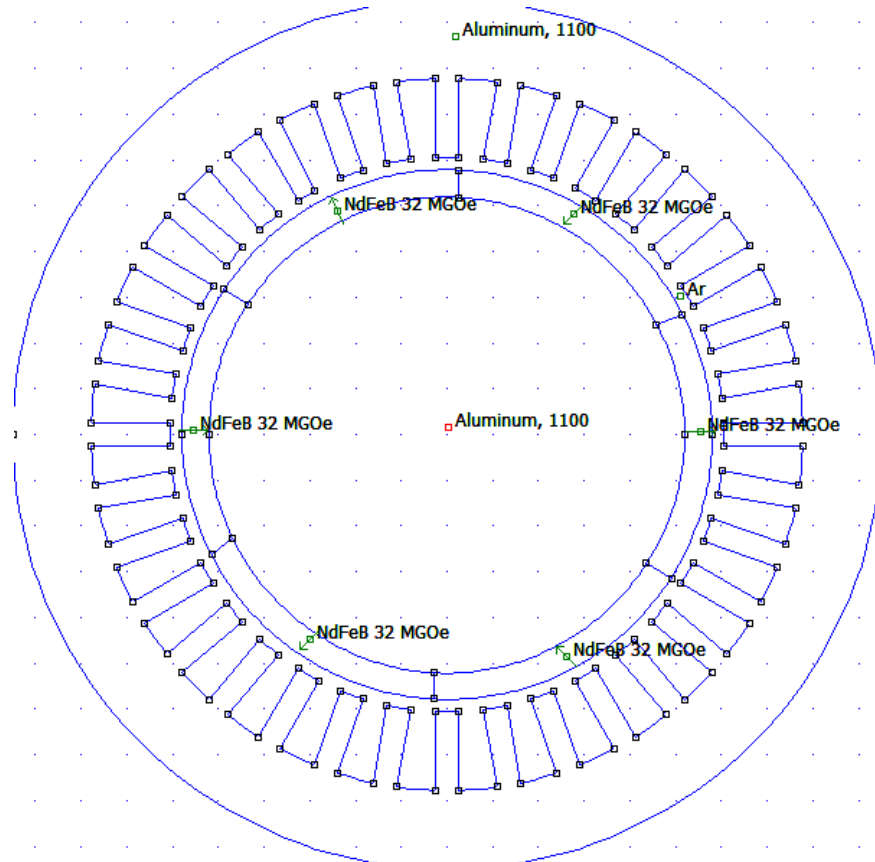
Para a entrada dos dados, desenhou-se a malha representativa do gerador, com vista em corte. O refinamento da malha foi de 50076 pontos. Os dados de entrada dos materiais não-magnéticos da máquina, como o ferro, alumínio e o ar, foram adquiridos do pacote de elementos pré-definidos do *software*, somente variando os magnetos, conforme etapas abaixo descritas.

A simulação foi traçada, para a obtenção de respostas frente a imprecisão dos testes realizados, da seguinte forma:

1. Simula-se a máquina conforme projetada, com os dados teóricos de permeabilidade magnética relativa e força coercitiva do ímã.
2. Simula-se a máquina com os dados adquiridos no experimento 1, a partir da intensidade de campo magnético estimada.
3. Compara-se os resultados.

A malha base gráfica construída no *software* pode ser vista na figura 33.

Figura 33 – Malha base utilizada nas simulações.



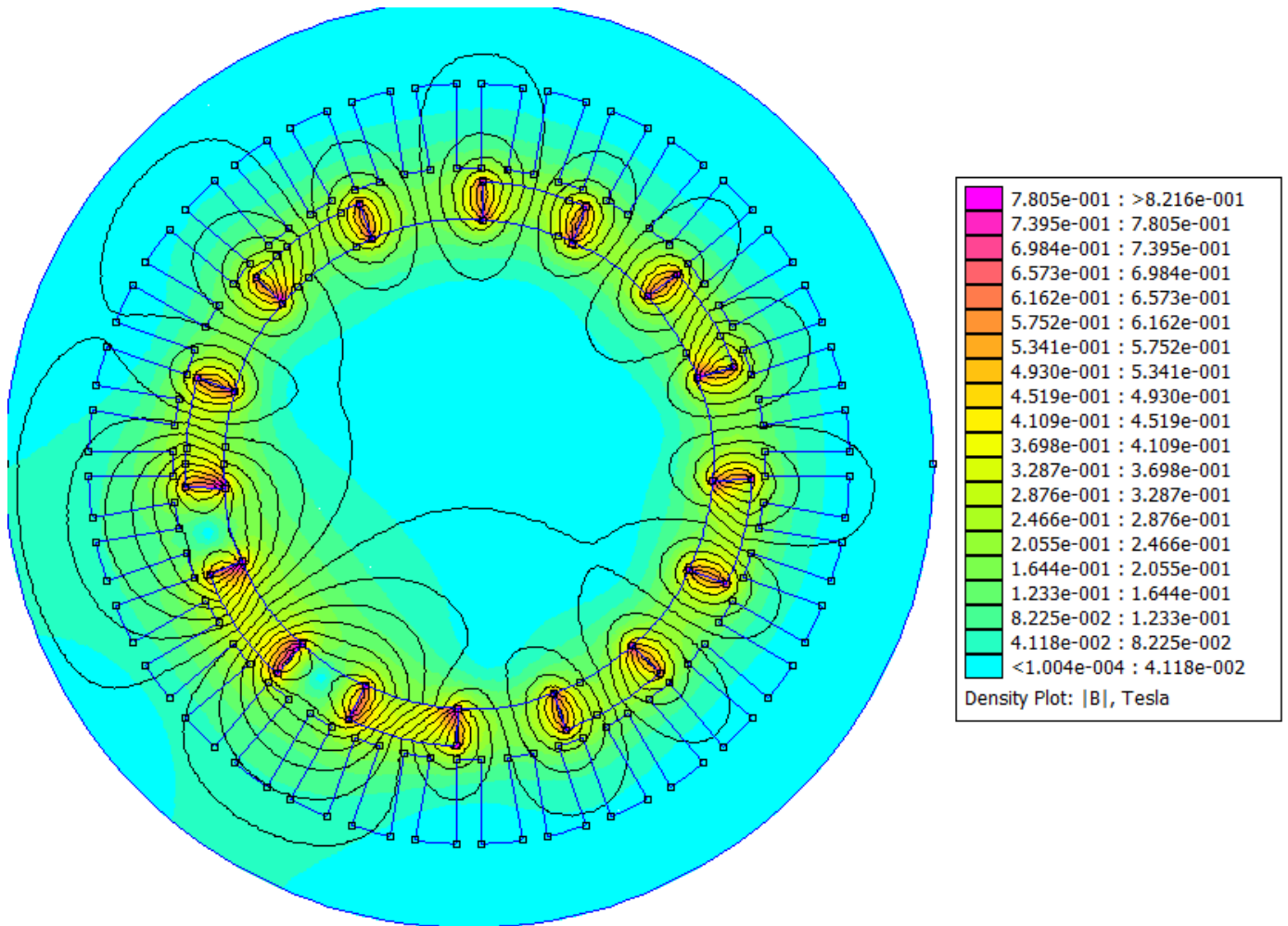
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Desde modo, procedeu-se a simulação da máquina. O *Caso A* foi realizado para o rotor de 8 polos com núcleo de alumínio, operando de maneira ideal, o *Caso B*, para o rotor de 6 polos em núcleo de ferro também de maneira idealizada. O *Caso C* trata-se do rotor de 8 polos, e o *Caso D*, com o rotor de 6 polos, ambos com dados adquiridos e tratados matematicamente.

#### 4.3.6.3.1 Caso A - Rotor de 8 polos com núcleo de alumínio

Nesta simulação, utilizou-se a força coercitiva e a permeabilidade relativa do NdFeB com os valores padrões do *software*, sendo  $\mu_{x,y} = 1,045$  e  $H_c = 9,79 \text{ MA/m}$ , respectivamente.

Figura 34 – Resultados da simulação para o Caso A.



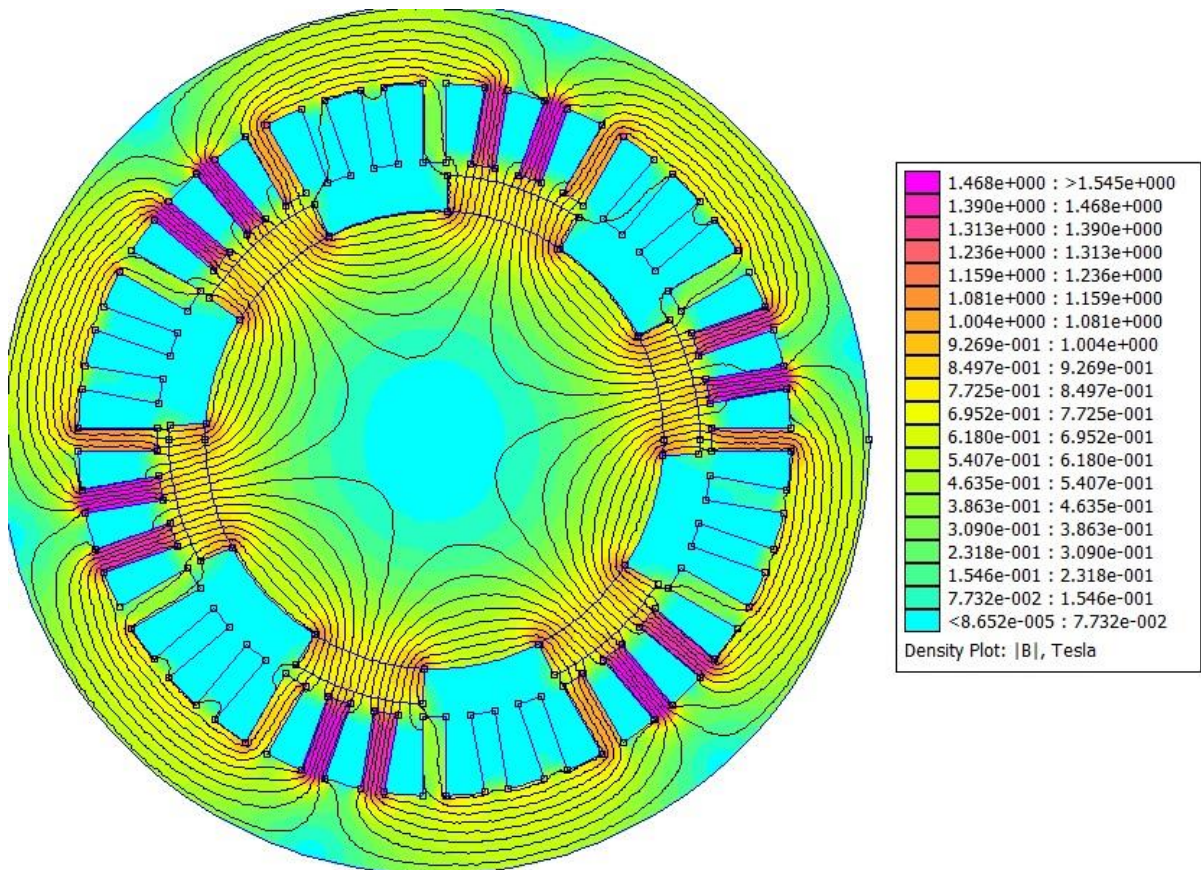
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

É perceptível que a densidade de campo magnético presente, na figura 34, vem de encontro ao ponto de projeto. A taxa estimada de fluxo por polo,  $\phi/polo = 0,854 T$ , não foi atingida, ficando na média de  $0,5 T$  nas faixas coloridas de escala mais próximas ao polo; um erro de aproximadamente 40%. Salienta-se também a interferência do núcleo de alumínio em que o rotor foi simulado. A linha de campo tem maior resistência a passagem por este, o que aumenta a relutância da máquina, causando perdas.

#### 4.3.6.3.2 Caso B - Rotor de 6 polos com núcleo de ferro

O rotor de seis polos com núcleo de ferro foi simulado a partir dos mesmos dados do Caso A, com  $\mu_{x,y} = 1,045$  e  $H_c = 9,79 \text{ MA/m}$ . A simulação pode ser vista na figura 35.

Figura 35 - Resultados da simulação para o Caso B



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Nesta etapa das simulações, seguiu-se o ponto de projeto para o rotor de 6 polos com núcleo de ferro, sendo que cada polo é composto por três ímãs idênticos, com direção magnética invertida por polo. Isso faz com que o *solver* aumente a taxa de densidade de fluxo magnético. Os resultados nesse caso foram expressivos: o  $\phi/polo = 1.138 \text{ T}$  do ponto de projeto foi atingido com sucesso. Se considerarmos a faixa laranja roxa entre as ranhuras, pode-se afirmar que se obteve uma superação de cerca de 20%. Muito dessa contribuição vem pela permeabilidade do ferro que constitui o núcleo, a facilidade das linhas de campo se cruzaram de forma

multidimensional, ou seja, com baixa relutância, auxilia na densidade de fluxo relativa do campo magnético da máquina.

#### 4.3.6.3.3 Tratamento matemático para a implementação dos Casos C e D.

Na aferição dos dados do teste com o rotor de 8 polos com núcleo de alumínio, pode-se confeccionar a tabela 17, a qual relaciona tensões e correntes relativas a uma dada velocidade entregue pelo motor. Visto isto, Ulaby (2007) propõe uma solução para a Ley de Faraday-Lens (4), relacionando a densidade de campo magnético B com a tensão interna da máquina. Utilizou-se esta metodologia a fim de encontrar qual a magnitude dessa densidade na máquina implementada, podendo assim implementar os dados no *software* FEMM para análise comparativa entre os resultados otimizados e os encontrados em experimentos. O autor propõe que

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (10)$$

Sendo que  $e$  é a força eletromotriz;

$$e = n dB = nB_{max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (11)$$

A componente diferencial do fluxo concatenado, segundo o autor, é função da densidade de campo magnético B, que é fixo e independe da velocidade, assim, sabendo a tensão interna desejada, pode-se estimar essa magnitude. A componente de velocidade foi analisada no teste. Derivando, tem-se:

$$V_{med} = n \cdot \frac{B_{max}}{n_{imãs}} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (12)$$

Logo, para achar a componente B da equação, pode-se isolar a variável.

$$B_{max} = n^{-1} \cdot V_{med} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (13)$$

O ponto médio na tabela escolhido para tensão foi de 0.18 V e de velocidade 1692 RPM ou 177,18 rad/s. A representação matemática do autor, nos resulta em uma densidade de fluxo magnético total do rotor de

$$B_{rotor} = 1,0159mT \quad (14)$$

O que resulta, para 6 polos  $B_{polo} = 0,169mT$  e para 8 polos  $B_{rotor} = 0,126 mT$

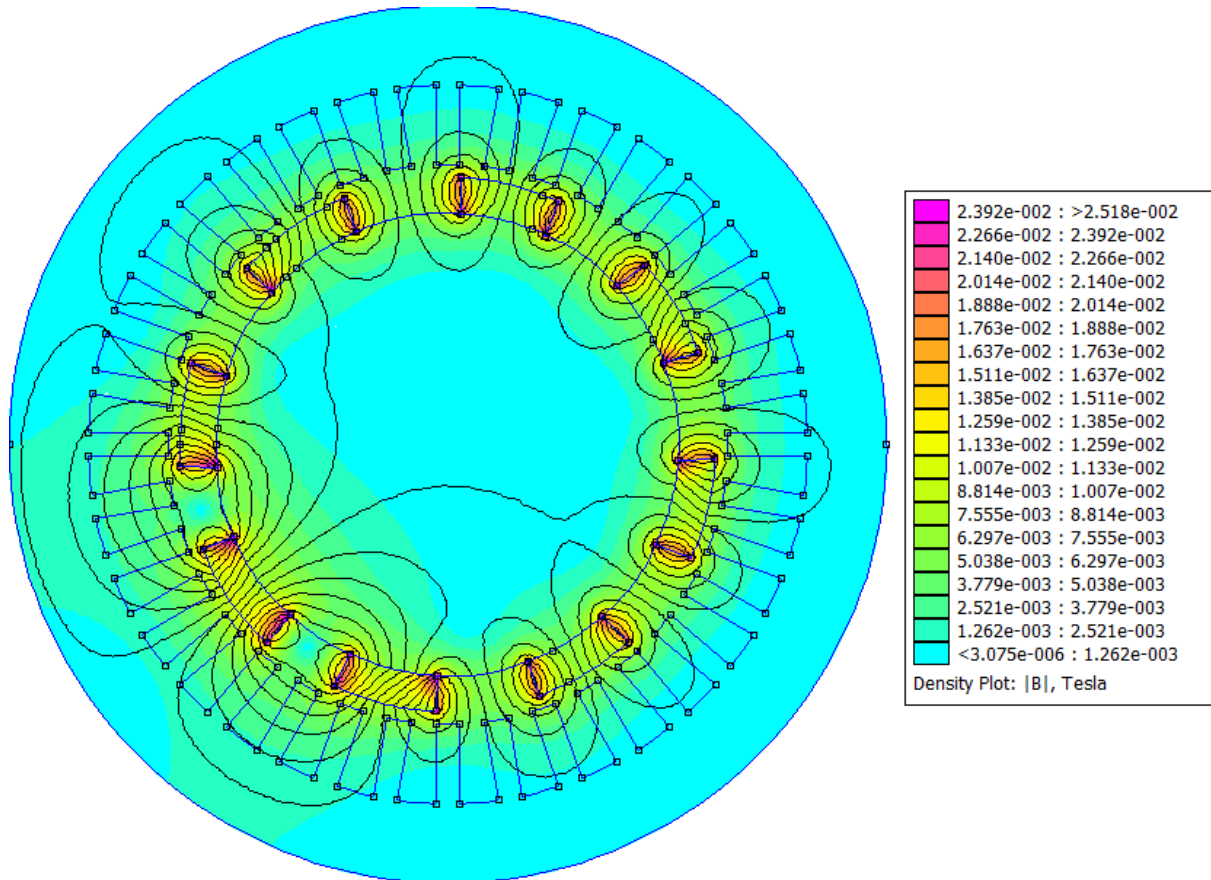
#### 4.3.6.3.4 Caso C - Rotor de 8 polos de núcleo de alumínio, com dados estimados.

A partir da premissa da densidade de fluxo magnético obtido no tratamento matemático, pode-se inserir nas variáveis do *software* a relação de força coercitiva e a permeabilidade relativa, sendo que as grandezas se relacionam pelo ciclo histerético do material. Logo, para o NdFeB aplicado no projeto:  $\mu_{x,y} = 1,045$  e  $H_c = 1,002 MA/m$

Nota-se pela figura 36, que em comparação ao modelo idealizado dos magnetos, houve uma queda significativa nas margens de fluxo por polo, fazendo com que o fluxo concatenado normal a uma área seja menor e, por conseguinte, menor conversão energética.

Esta queda na indução relativa a área mediana do polo, foi de cerca de 70%. Essa queda brusca justifica-se experimentalmente, visto que os dados obtidos em análise experimental não representavam 10% do ponto de projeto.

Figura 36 - Resultados da simulação para o Caso C



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

#### 4.3.6.3.5 Caso D - Rotor de 6 polos de núcleo de ferro, com dados estimados.

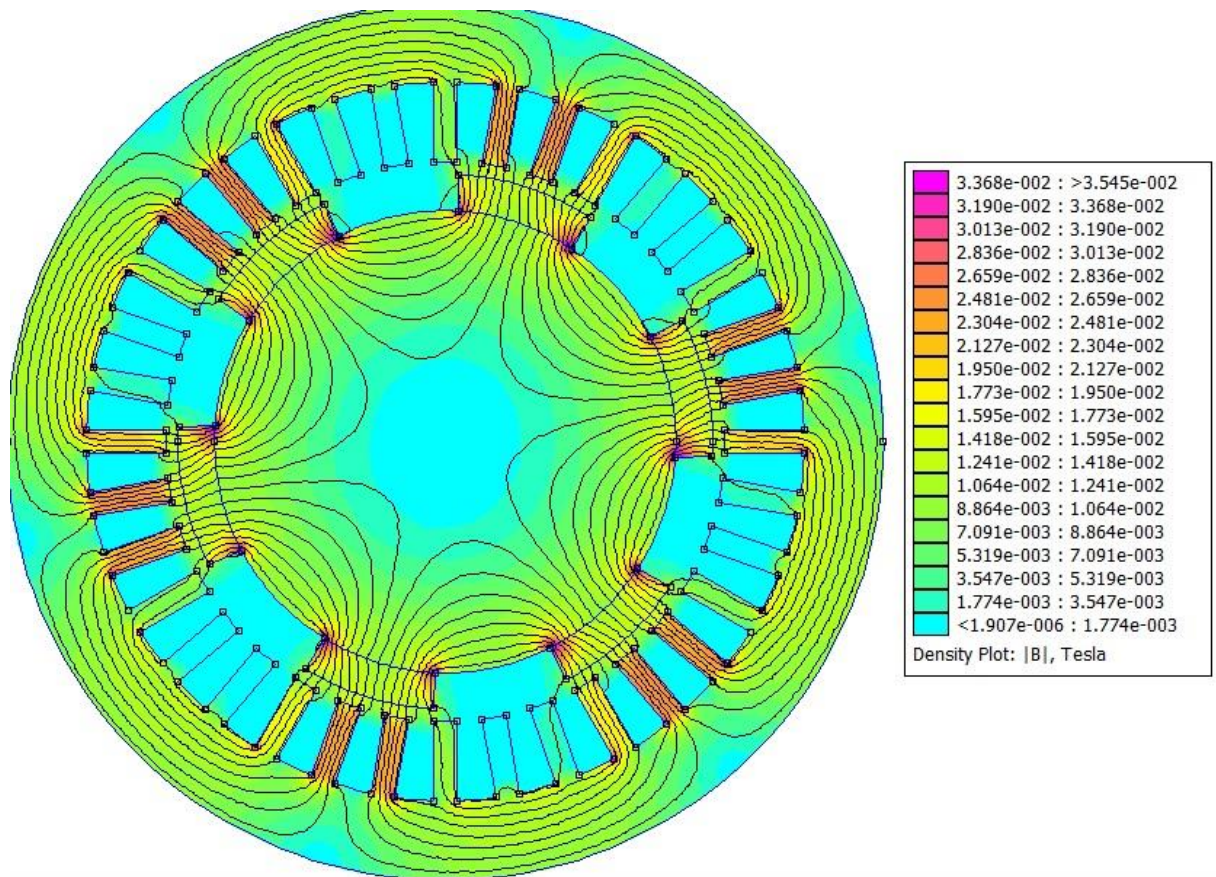
A última comparação dá-se em duas partes, o rotor de 6 polos com núcleo de ferro com espaçamento igual entre os polos, e o rotor sem espaçamento, idêntico ao implementado nos testes.

Os dados adicionados ao *software* foram  $\mu_{x,y} = 1,045$  e  $H_c = 1,344MA/m$ .

Como pode-se observar na figura 37, as linhas comportam-se ainda de maneira mais adequada do que com o rotor de alumínio, reafirmando que a permeabilidade do ferro é bem-vinda neste tipo de projeto. A diminuição da força coercitiva, visto a diminuição dos valores teóricos para os práticos da densidade de fluxo, causou uma diminuição de 77% nas áreas envolvidas pelos polos, o que dificulta a transformação eletromecânica.

A figura 37 representa a simulação do Caso D para o rotor de 6 polos com o espaçamento ideal.

Figura 37 - Resultados da simulação para o Caso D



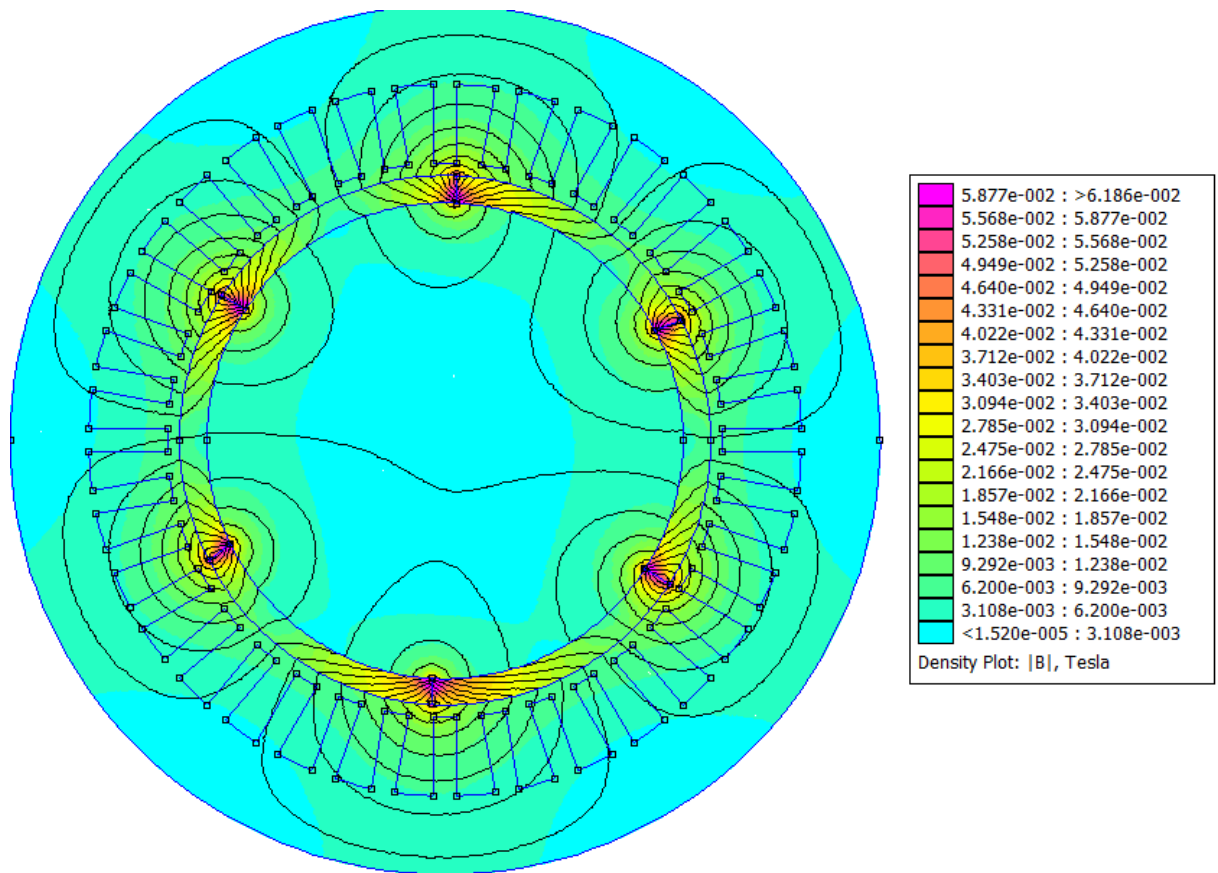
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O experimento do rotor de 6 polos estava sem espaçamento suficiente entre os polos. Tentou-se resolver “isolando” o circuito magnético através de cortes na peça e a inserção de um material isolante na fronteira, porém aparentemente as mudanças não surtiram efeito. Para sanar esse levantamento, simulou-se novamente o rotor de 6 polos porém com a singularidade de não conter nenhum espaço dentre as cabeças polares.

Esta estimativa de espaçamento é de vital importância no projeto, como visto na figura 38, sob pena de anular toda e qualquer influência no campo magnético dos polos no passo polar. A simulação mostra que o contorno dos ímãs é a região de maior influência de campo magnético, fazendo com que toda a intensidade magnética fique concêntrica, inviabilizando o projeto.



Figura 38 - Resultados da simulação para o Caso D, com ímãs sem espaçamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

#### 4.3.7 Montagem da máquina e finalização da estrutura

Como a energia mecânica do sistema é desenvolvida pela tração do usuário ao iniciar as pedaladas, priorizou-se a criação de um modelo onde as perdas dessa energia fossem as menores possíveis, fazendo com que haja aproveitamento máximo desta. Optou-se, então, pela construção de uma base fixa, feita em aço, capaz de imobilizar a bicicleta e garantir firmeza a conexão dos elementos, fazendo com que o pneu traseiro da bicicleta e o eixo do rotor do gerador se conservem mecanicamente ligados, transferindo a tração diretamente pelo contato, sem a interferência de trepidações ou escorregamentos comuns a outros sistemas.

A escolha por um modelo estacionário se deu pela diminuição relevante de movimentos paralelos envolvidos, garantindo que fugas mecânicas fossem mitigadas. Efeitos vibratórios, além de consumirem potência mecânica, podem causar avarias ao sistema, diminuindo assim, a vida útil do protótipo.

Frente a essa necessidade, desenvolveu-se uma base fixa, onde a parte traseira do quadro da bicicleta é presa junto ao apoio de metal, elevando o pneu do chão e permitindo ao mesmo correr sobre o eixo do alternador. Esse foi soldado junto a base, assegurando a diminuição de perdas por trepidação.

A bicicleta utilizada no projeto foi o modelo de passeio Caloi 100, aro 26, com quadro em alumínio. Pneus híbridos, 21 marchas, peso aproximado de 14,03 Kg, altura de 0,98m e comprimento de 1,71m. Não houve necessidade de nenhum tipo de adaptação no equipamento.

O acoplamento entre o eixo do rotor do alternador e o pneu traseiro da bicicleta é garantido pela força de atrito existente entre ambos, já que os parafusos da base asseguram que a bicicleta não tenha outro movimento se não o de induzir o eixo ao giro.

#### 4.2.8 Requisitos do cliente e do produto – ferramenta QFD

A tabela a seguir conta com requisitos tanto do cliente como do produto, resultando em uma matriz QFD simples. O QFD (Quality Function Deployment) é uma ferramenta com o objetivo de alcançar o enfoque da garantia da qualidade durante o desenvolvimento de produto. O método é aplicado tanto para o desenvolvimento de novos produtos, quanto para a remodelagem ou melhoria de produtos existentes. Sua implantação objetiva, dentre outras finalidades, auxiliar no processo de desenvolvimento do novo produto, buscando, traduzir e transmitir as necessidades e desejos do cliente, e dar aporte ao processo de garantia da qualidade (CHENG & FILHO, 2007).

Tabela 18 – Requisitos base para aplicação da ferramenta QFD

Secundário	Terciário	Características da Qualidade
Manutenção	Fácil manutenção	Nº de peças a serem trocadas (un.)
		Nº de ferramentas (un.)
	Peças de reposição acessíveis	Tempo de entrega da peça (h)

	Menor nº de peças para reposição	Itens Padronizados (%)
Desempenho	Fácil de operar	Nº de comandos (un.)
		Tempo de treinamento (h)
	Setup rápido	Tempo de Setup (min)
Custo	Baixo custo de aquisição	Custo de matéria-prima (R\$)
		Custo de produção (R\$)
	Durabilidade	Vida útil (anos)
Segurança	Poucas peças expostas	Peças expostas (un.)
	Ergonomia adequada	Conforto do equipamento (0 – 10)
Especificações Físicas	Compacto	Comprimento (cm)
		Largura (cm)
		Peso (kg)

Fonte: elaborado pelo autor (2017).

A partir da tabela 18 aplicou-se a ferramenta QFD, dando origem a tabela 19.

Tabela 19 – QFD simples

	Peças a serem trocadas (un.)	Nº de ferramentas (un.)	Tempo de entrega da peça (h)	Itens padronizados (%)	Nº de comandos (un.)	Tempo de treinamento (min)	Tempo de setup (s)	Custo de matéria-prima (R\$)	Custo de produção (R\$)	Vida útil (anos)	Peças expostas (un.)	Conforto do equipamento (0-10)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Peso (kg)
Fácil manutenção	2	2													
Peças de reposição acessíveis			48												
Menor nº de peças para reposição				100											
Fácil de operar					1	40									
Setup rápido							5								
Baixo custo de aquisição								240,00	50,00						
Durabilidade										5					
Poucas peças expostas											1				
Ergonomia adequada												8			
Compacto													65	30	10

Fonte: elaborado pelo autor (2017).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como maior motivação a pesquisa e construção de uma forma alternativa e simples de geração de energia elétrica. A intenção de utilizar materiais de uso rotineiro, proporciona descomplicação técnica diante da incompreensão popular das formas de transformação de energia, podendo servir como incentivo às escolas e comunidade, onde pode-se mostrar a ciência na prática, provocando a curiosidade e o aproveitamento sustentável de energia elétrica. Encontrou-se durante a pesquisa, uma boa forma de geração de energia, servindo satisfatoriamente para alimentação de pequenas cargas.

Dentro desta abordagem, o primeiro objetivo, o qual se deu pela construção de um módulo principal de geração de energia composto por um gerador síncrono e sistema de controle, adaptável ao acoplamento de bicicletas, foi cumprido em sua totalidade, visto que se obtiveram resultados positivos nas questões construtivas e de funcionamento do protótipo.

Como aspecto construtivo da planta, salienta-se a boa condição de acoplamento e relação de rotação. Pedaladas a velocidade de cruzeiro cedem cerca de 1700 RPM ao eixo do alternador. Desta forma, é possível pedalar confortavelmente e gerar energia.

A determinação do rendimento do alternador acusou um baixo índice, visto que os testes identificaram por volta de 7,5 % a 8 % de eficiência. Ainda assim, é possível a um pedalar de 37,7 RPM, gerar energia para alimentar uma carga de 50 W. O experimento obteve análise quantitativa e expressado graficamente no corpo do trabalho. Cargas acima de 50 W não são supridas somente com o pedalar, necessitando assim de fonte externa.

A elaboração de um sistema de controle em malha fechada contribuiu ao projeto, trazendo a este maior aproveitamento e segurança dos dispositivos empregados. A pesquisa e implementação do circuito controlador foi satisfatória, com rendimentos de 80 %. O controlador, o qual tem como variável controlada uma multiplicação linear de tensão e corrente deve ser revisto, visto que deve-se controlar apenas corrente nos casos previstos neste projeto, devendo haver apenas uma limitação de tensão, a fim de carregamento de bateria.

A alteração da característica operacional da máquina não obteve sucesso experimental, porém formulou premissas para que pudessem ser levantadas hipóteses de funcionamento. Deste modo, realizou-se simulação em software utilizando o método dos elementos finitos. Com uma malha de 50076 nós (pontos), pode-se obter os erros percentuais de projeto bem como analisar as grandezas magnéticas envolvidas.

Através dos dados coletados a partir da tabela 17 foram tratados a partir de leis fundamentais do eletromagnetismo, podendo ser estimada a densidade de fluxo  $B$  para os rotores de 6 polos,  $B_{polo}=0,169mT$ , e 8 polos  $B_{rotor} = 0,126 mT$ . Com esta estimativa, pode-se inserir as variáveis magnéticas necessárias no software FEMM – *Finite Element Method Magnetics*, e obter os gráficos da distribuição de fluxo.

Os casos foram tratados separadamente, sendo que o rotor de 8 polos com núcleo de alumínio, Caso A, com dados reais obteve simulação 40% abaixo do encontrado em projeto, Caso C, referente ao rotor de 8 polos com núcleo de alumínio, mostrou a necessidade da determinação do núcleo. É necessário que haja circulação de linhas de campo no rotor e, aliado a isso, diminuir a relutância magnética. O Caso B, com três ímãs por polo, seis polos e núcleo de ferro teve sua simulação em condições ótimas 20% maior que o ponto de projeto. O rotor de 6 polos com dados estimados ficou 77% aquém do projeto. Como explicação, simulou-se outro cenário, quando os ímãs de polos diferentes ficaram muito pertos. Deste experimento ressalta-se a necessidade de que os espaços sejam definidos e dimensionados, neste caso toda a densidade de fluxo se concentra puntiforme extremidade do ímã.

Em suma, os objetivos aqui propostos foram cumpridos, visto que foram estudadas, analisadas e propostas formas que favoreçam a construção de conscientização energética e o contato direto com a geração de energia. O projeto contribui como uma forma alternativa de geração de energia, tem cunho educacional, incita a curiosidade, desmistifica os processos envolvidos nas transformações, tem baixo custo e grande potencial para a redução de gastos com energia elétrica. Por fim, os resultados atenderam satisfatoriamente as propostas e objetivos lançados na asserção da ideia.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Mário Jorge de Andrade Ferreira. **Automóvel: Sistema de carga**. Departamento de Engenharia Electrotécnica, Porto, Portugal, 2009.

ANDREA, Cristiano Quevedo; UTFPR – **Controle & Automação**. Departamento Acadêmico de Eletrônico, Curitiba abril de 2012.

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson, 2000. 440 p

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 3.ed. Florianópolis: EDUFSC, 2000.

BATALHA, Mário Otávio. **Introdução à Engenharia de Produção**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

BASTOS, Renan Fernandes. **Sistema de gerenciamento para carga e descarga de baterias (Chumbo-Ácido) e para Busca do ponto de máxima potência gerada em painéis fotovoltaicos empregados em sistema de geração distribuída**. Escola de Engenharia, USP. São Carlos (2012)

BARROS, Jesus Paes de; LEHFELD, Neide Aparecida de Souza. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 3ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

BATSCHAUER, Alessandro Luis. **Apostila da Disciplina de Controle de Conversores Estáticos**, UFSC, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Joinville, 2012.

BRASIL, ANEEL. Resolução Normativa da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) **N.º 235** de 14/11/06.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030** / Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME: EPE, 2007.

CAETANO, R. C. **Análise de uma máquina síncrona de ímã permanente com tensão não senoidal**. Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

Carvalho Neto, João Teixeira. **Controle Robusto Aplicado a Conversor Buck-Boost em Sistemas Fotovoltaicos** / João Teixeira de Carvalho Neto. Natal, RN: UFRN, 2012. 103 p.

CHAPMAN S.J., 2000, **Máquinas Elétricas**, 3 ed., McGraw-Hill, Inc., Colômbia.

CHENG, L. C.; MELO FILHO, L. D. R. QFD. **Desdobramento da função qualidade na gestão de desenvolvimento de produtos**. São Paulo: Editora Blücher, 2007.

COSTA, Eduard Montgomery Meira; **Controle Analógico**. Ed: agBOOK – ed 1 – 2013

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Energia elétrica: conceito, qualidade e tarifação: guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2008. 127 p.: il. Guia.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.



GALDINO, Jean Carlos da Silva. **Eletrotécnica II**. Instituto Federal do Rio Grande do Norte, 2011. Apostila

GERHARDT, Tatiana Engel. SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**; SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GUEDES, Manuel Vaz. **O Motor síncrono trifásico: modelização, análise do funcionamento e utilização**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Porto, Portugal, 1992.

HADDAD, Jamil. **Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade e Tarifação** – PROCEL INDÚSTRIA. Rio de Janeiro, dezembro/2004.

HENDERSHOT Jr and. T.J.E. MILLER, **Design of Brushless Permanent-Magnet Machines**, Oxford, Motor Design Books, LLC, 2010.

INSTITUTO FEDERAL DE SÃO PAULO (Suzano, SP). **Manual de eletroeletrônica**. Suzano, 2013.

KOTLER, Philip. **Administração de Marketing: Análise, Planejamento e Controle**, 10ª ed. São Paulo, Prentice Hall, 2000

LEÃO, Ruth P S. **Tecnologias de Geração de Energia Elétrica: Geração Termoelétrica**, Cap 2. Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica. 2009.

MAXWELL, James, C.. **Theory of Heat**. [S.l.]: Dover Publications, Inc., 1871. ISBN 0-486-41735-2

MODESTO, André Márcio. **Geração, transmissão e distribuição de Energia elétrica, seus equipamentos e tecnologias aplicadas**. GTDEE, Maio, 2011.

NASAR, A. Syed. **Máquinas Elétricas**. Ed. Mac Graw Hill, 1ª edição, 1984, São Paulo.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 695 p. ISBN 8521613016.

OKA, Mauricio Massazumi. **História da Eletricidade**. USP, São Paulo, 2000.

PAULA, GEYVERSON TEXEIRA De. **Projeto de uma máquina síncrona com ímã permanente no rotor**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, SP, 2011

PEREIRA, José Claudio. **Motores e Geradores**: Princípios de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores. Tijuca, Rio de Janeiro, 2011. Apostila.

PINHO, João Tavares *et al.* 1. Energia hidrelétrica – Brasil. Ministério das Minas e Energia. III. Série. **Sistemas híbridos**. Brasília : Ministério de Minas e Energia, 2008.

PINHO, Luis Carlos Almeida. **Materiais Ferromagnéticos e suas Aplicações**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2009.

POMILIO, José Antenor. **Topologias básicas de fontes chaveadas**. Campinas, São Paulo. Apostila.

QINETIC NORTH AMERICA, **Finite Element Method Magnetics**, FEMM 4.2. Waltham, MA: **David Meeker**, 2014. Disponível em < <http://www.femm.info/wiki/HomePage>>.

REIS, L. B. D. **Geração de Energia Elétrica**. 2a. ed. Barueri: Manole Ltda., 2011.  
SEIXAS, Falcondes José Mendes. **Máquinas Elétricas II**. São Paulo. 2012.

SOUSA, Justino Miguel Neto. **Sistema bidirecional de carga de baterias para o FEUP VEC**. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Universidade do Porto, Portugal, 2013.

ROCIO, Marco Aurélio Ramalho, *et al.* **Terras-raras: situação atual e perspectivas**. Produção BNDES. São Paulo, 2012.

ROSEMBACK, Ricardo Henrique. **Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost Atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Setor de Tecnologia, Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Juiz de Fora, 2004

ROZENFELD, H. at al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. 1ªed. São Paulo: Saraiva 2013

ROSENTAL, Simon. **Rochas e Minerais Industriais**. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, 2008. (Comunicação Técnica: CT2008-188-00).

ULABY Fawwaz T. **Eletromagnetismo para engenheiros**; tradução José Lucinardo Nascimento. – Porto Alegre: Bookman 2007.

WEG. INDÚSTRIA LTDA. **Módulo IV - Geração de energia**. CENTRO DE TREINAMENTO DE CLIENTES. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2013.

**ANEXO I - ARTIGO**

# Desenvolvimento de Protótipo de uma Bicicleta Geradora de Energia Elétrica (1)

Barboza, G. M. (2) (Unipampa), Tomm, L. F. (3) (Unipampa).

(1) Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia.

(2) Acadêmico do curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, Bagé, Rio Grande do Sul; Endereço eletrônico: gmbafoza@live.com;

(3) Professor orientador; Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA.

**Resumo** Face à necessidade iminente de propostas que incitem a uma consciência ambiental coletiva, bem como o uso sensato de energia elétrica e a instrução sobre seu consumo e geração, o presente projeto apresenta a pesquisa e a implementação de uma planta lúdica e simultaneamente funcional de geração de energia. Através de análise experimental explicativa, construiu-se um protótipo de uma bicicleta capaz de transformar energia mecânica, empregada pela tração humana, em energia elétrica. A planta foi equipada com um alternador automotivo, o qual tem a finalidade de realizar as transformações de energia envolvidas no processo, havendo, assim, interação entre o usuário e a geração de energia. Frente a necessidade de controle em geradores operantes a velocidades variáveis, fez-se necessário o estudo, dimensionamento e emprego de conversores estáticos em um sistema de controle em malha fechada, compatibilizando os níveis de saída do gerador e aumentando a eficiência e segurança dos componentes. Ainda, fez-se uma modificação estrutural da máquina, substituindo o rotor bobinado por um rotor a ímãs permanentes, verificando a eficácia. Como complemento e justificativa aos resultados obtidos, simulou-se, através do método dos elementos finitos, com condições ótimas e também com dados estimados em ensaio para comparação. A proposta premia alternativas que contribuam com soluções inovadoras frente à crescente necessidade de novas formas descentralizadas de geração de energia, proporcionando uma fonte interativa e sustentável.

Palavras-Chave: gerador, ímã permanente, produto, bicicleta.

## 1 Introdução

O papel da energia elétrica nas relações macroeconômicas mundiais torna-se cada vez mais fundamental, trazendo à tona a necessidade iminente de uma geração sustentável e eficiente de energia, bem como a utilização consciente em todos os níveis sociais. Tendo em vista essa necessidade iminente de uma maior instrução sobre o consumo e a utilização de energia elétrica, o presente trabalho tem por fim trazer aos meios sociais e educacionais uma planta lúdica e simultaneamente funcional, que visa a interação do usuário com a geração direta de energia.

Diante desse escopo, o presente trabalho tem por objetivo a pesquisa, o desenvolvimento e a proposição de um produto, o qual tem por finalidade a geração de energia elétrica a partir de materiais convencionais, como a bicicleta e o alternador automotivo. Baseado nesta visão, o projeto tem a proposta de proporcionar ao usuário o contato com uma forma de geração e utilização de energia limpa, servindo como fonte de alimentação de pequenas cargas, como o carregamento de baterias. Adicionalmente, busca-se levar o projeto às escolas e comunidade, onde pode-se mostrar a ciência na prática, instigando a curiosidade e a utilização sustentável de energia elétrica.

Além de servir como incentivo a uma melhor utilização da energia elétrica, o projeto se justifica pela crescente necessidade de novas formas descentralizadas de geração de energia, proporcionando uma fonte interativa, sustentável e de grande potencial e pela à necessidade de uma construção de consciência ambiental e de uma maior educação quanto ao consumo de energia.

## 2 Revisão da Literatura

### 2.1 Teoria do Eletromagnetismo e Características dos Materiais.

Del Toro (1999) defende a essencialidade do desenvolvimento da ciência na área do eletromagnetismo dentro da engenharia, visto que grande parte da operação fabril é diretamente dependente das relações envolvidas nesta área de conhecimento. Para Fitzgerald (2006), a asserção de ideias sobre máquinas elétricas e transformação de energia, é indispensável o conhecimento a respeito das forças existentes em dois corpos que conduzem uma dada corrente, com grandezas como densidade de fluxo magnético, intensidade do campo magnético, permeabilidade e fluxo magnético.

Como ponto de partida, Chapman (2013) define a lei de Ampère (1) como a teoria regente na produção de um campo magnético por uma corrente, onde  $H$  apresenta-se como a intensidade do campo magnético produzido por uma corrente líquida  $I_{liq}$ , e um elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho de integração  $dl$ .

$$\oint H \cdot dl = I_{liq} \quad (1)$$

Deste modo, Chapman (2013) define que a intensidade do campo magnético  $H$  é uma medida de esforço exercida por uma corrente para estabelecer um campo magnético.

A intensidade de campo magnético é diretamente relacionada com as características do material do núcleo.

Fitzgerald (2006) cita que o campo magnético produzido afeta as características físicas de suas proximidades, causando efeitos importantes para as conversões eletromecânicas. Como exemplo, cita, a lei de Faraday (2), que postula que uma tensão  $\mathcal{E}$  é produzida através de uma variação do fluxo magnético  $\phi$  ao longo de um dado tempo  $dt$  e por  $N$  bobinas cruzadas pelo mesmo fluxo.

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad [\text{V}] \quad (2)$$

Del Toro (1999) classifica os materiais, em função de seu comportamento magnético quando há um certo no átomo de qualquer substância submetido a um campo magnético. Os materiais diamagnéticos, que estabelecem um campo magnético oposto quando aplicados a um campo externo, não são atraídos por ímãs; paramagnéticos, que se caracterizam pela falta de neutralização dos movimentos de rotação e translação dos elétrons, quando aplicados a influência de um campo magnético externo e regressando ao estado natural quando o campo externo é cessado; e os ferromagnéticos, em que os momentos magnéticos dos átomos se alinham no mesmo sentido, fazendo com que exista um momento magnético devido a rotação de um átomo não neutralizado e resistindo ainda quando esse campo externo é cessado, sendo estes materiais fortemente atraídos por ímãs.

Pinho (2009) define como ímã permanente todo o material que possui a característica da manutenção do campo magnético mesmo quando não está submetido a passagem de corrente elétrica. São materiais utilizados em engenharia para aumentar o fluxo magnético, pois possuem uma espécie de armazenamento de energia que proporcionam a retenção de energia mesmo após a excitação externa do campo magnético cessar.

## 2.2 Geração de energia elétrica

De acordo com Modesto (2011), a geração de energia elétrica se define pela transformação de um determinado tipo de energia em energia elétrica, quando, em um primeiro momento, uma máquina primária transforma uma dada energia empregada, em energia cinética de rotação. Após essa energia cinética de rotação produzida excitará um

gerador elétrico acoplado à máquina primária, que, através de processos eletromagnéticos, transforma a rotação em energia elétrica.

Essa transformação é possível quando um grupo de máquinas tem em seus elementos constituintes as características necessárias para tal. Para Del Toro (1999), geradores síncronos são universalmente utilizados na geração de energia para fornecimento de potência aos consumidores. São máquinas, segundo Nasar (1984), baseadas na lei da indução eletromagnética de Faraday (2), e seu princípio básico de funcionamento se dá pelo acionamento do rotor do gerador, produzindo um campo magnético girante em seu interior. Esse campo é o responsável pela indução de tensão trifásica nos enrolamentos do estator do gerador. A frequência de operação do gerador é determinada pela velocidade da máquina primária, sendo esta proporcional à corrente de campo e à amplitude da tensão gerada. As impedâncias da própria máquina e da carga, juntamente com a excitação do campo do gerador, determinam a corrente o fator de potência da mesma.

### **2.3 Geradores síncronos de ímãs permanentes**

Neste tipo de máquina, o enrolamento de armadura trifásico é colocado nas ranhuras do estator, similarmente aos aspectos construtivos de um gerador síncrono convencional. A diferença básica se dá quanto aos ímãs permanentes posicionados junto ao rotor. Para Fitzgerald (2006), as técnicas de análise para um gerador com ímãs permanentes são as mesmas para um gerador síncrono comum, apenas com a idealização de que a excitação vem de uma corrente de campo de valor constante e que as indutâncias sejam estabelecidas levando em conta a permeabilidade magnética do ímã permanente.

Fitzgerald (2006) cita que geradores com ímãs permanentes geralmente são utilizados com velocidade variável de acionamento, como em centrais eólicas. Por essa característica, são em sua grande maioria instalados juntos a uma ponte retificadora e um circuito de controle como os reguladores de tensão, fazendo com que se obtenha saídas em corrente contínua e de níveis constantes.

Caetano (2013) cita como vantagens de operação de um gerador *brushless*, a não utilização de escovas, diminuindo mau contato; menor índice de manutenção, baseando esta apenas para lubrificação de rolamentos, maiores índices de rendimento e fácil controle através de reguladores e conversores. As desvantagens desta máquina são a possível desmagnetização dos ímãs quando operados em temperaturas muito altas; maior custo de aquisição e perda do controle de campo.



## 2.4 Sistemas de Controle

Segundo Barbi (2000), em sistemas de geração instáveis, ou seja, os quais fornecem tensões incertas, como a saída de um gerador de velocidade variável, faz-se necessário a adoção de métodos que diminuam ou até eliminem alterações brutas que possam influenciar no bom funcionamento da planta.

Para exercer esse controle é necessário a adoção de conversores estáticos, os quais regulam a tensão média de saída e a normatiza em um nível desejado, uma vez que existem flutuações na tensão de entrada e saída da carga. O método utilizado para controlar a tensão de saída emprega um circuito eletrônico de chaveamento a uma frequência constante, ajustando a duração dos estados das chaves controladas. (BARBI, 2000). O controle deste é feito através de uma malha de controle, ferramenta útil na identificação do processo e na proposição de atuadores que modifiquem as variáveis envolvidas neste. Como definição, tem-se a manutenção do valor de uma certa condição através da sua média, da determinação do desvio em relação ao valor desejado e da utilização do desvio para se gerar e aplicar uma ação de controle capaz de reduzir ou anular o desvio. (REIS, 2011)

## 2.5 Baterias

Para Rosemback (2004) baterias eletroquímicas podem ser definidas como elementos armazenadores de energia, ou seja, dispositivos que atuam como acumuladores eletroquímicos que tem por finalidade o armazenamento de energia para posterior utilização. Souza (2012) cita as baterias recarregáveis, onde o processo de oxi-redução torna-se bidirecional, ou seja, atua em ciclos de carga e descarga. Esse ciclo tem duração finita e com autonomia, dependendo do material constituinte, de centenas de vezes. Em definições gerais, Souza (2012) define a carga nominal da bateria (Ah) como a quantidade correspondente de corrente elétrica que pode ser fornecida pela bateria em uma hora de operação.

Cândido (2010) relaciona os principais tipos de baterias: baterias de chumbo-ácido, níquel-cádmio, níquel-hidreto metálico e íon lítio, sendo que cada tipo possui vantagens e desvantagens. Devem ser escolhidas através de um dimensionamento criterioso, que leve em consideração a quantidade pretendida de ciclos de funcionamento,

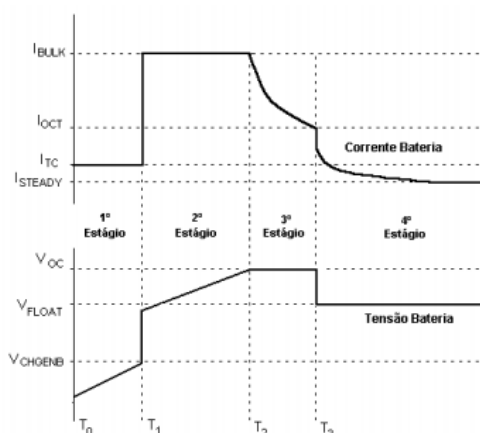
tempo de carga e descarga, densidade de potência, nível de manutenção e segurança e principalmente seu custo.

O processo de carga de uma bateria leva em consideração o tempo de carga disponível e o rendimento. Carrega-se mais rápido uma bateria aumentando a corrente de carga, ao custo de um rendimento baixo. Bastos (2012) cita que um dos fatores limitantes nesse processo é o cuidado com o aumento de tensão durante o processo de carga quando se termina o carregamento. Caso nesse ponto não haja interrupção da corrente de carga, a bateria passa a consumir toda a energia entregue, realizando a eletrolise das partículas de água presente no meio aquoso do eletrólito, causando perda de água e necessidade de manutenção.

No processo de carga, é necessário que haja emprego de controle, para que se eliminem o risco de sobrecargas. Quando o processo de carga advém de uma fonte instável, faz-se mais importante a função do controlador de carga, a fim de evitar imprevistos, intervenções ambientais, ou quaisquer outros eventos. Bastos (2012) define o controlador como um dispositivo capaz de controlar e monitorar o processo de carga e descarga das baterias, evitando danificações e descargas profundas. São constituídos, basicamente, com um circuito de controle, o qual monitora as grandezas elétricas do sistema, e um de comutação, capaz de controlar tensão ou corrente de carga ou descarga. Tem como principal função o carregamento completo da bateria, evitar sobrecargas, impedir corrente reversa entre a bateria e o sistema e prevenir descargas profundas.

Em baterias de chumbo-ácido, Rosemback (2004) recomenda dividir o processo em estágios, sendo estes: a) carga leve; b) carga profunda; c) sobrecarga e d) carga de flutuação. Os processos são mostrados na figura abaixo.

Figura 7 – Processo de carga da bateria, curvas de corrente e tensão



Fonte: Roseback (2004)

O primeiro estágio conta com a carga leve, ocorrendo quando a bateria apresenta níveis de carga abaixo do valor de sua capacidade de descarga crítica. A bateria recebe pequena corrente, de  $C/100$ , onde  $C$  é a capacidade nominal da bateria em 10 horas. Essa corrente é aplicada até que a bateria suba ao nível do valor da tensão de capacidade de descarga crítica  $V_{CHGENB}$ .

No segundo estágio, fornece-se à bateria uma corrente constante  $I_{bulk}$ , a qual é a máxima corrente de carga que a bateria suporta sem o processo excessivo de eletrólise. Aplica-se este nível até que a tensão na bateria alcance o valor máximo de sobrecarga de tensão  $V_{OC}$ .

No terceiro estágio o controlador passa a regular a tensão da bateria até o valor constante de  $V_{OC}$  para que alcance o nível de plena carga. Assim, quando a corrente cair até o valor de 10% de  $I_{bulk}$ , inicia-se o outro estágio.

No último estágio será dever do controlador aplicar uma tensão constante de flutuação  $V_{float}$ . Quando os níveis de tensão, através do processo de descarga caírem 10%, o controlador, se alimentado de fonte externa, volta a inserir a corrente  $I_{bulk}$ , fazendo com que não haja descarga

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se pela pesquisa e desenvolvimento de uma planta capaz de gerar energia elétrica através da energia mecânica imposta pelo usuário ao pedalar uma bicicleta. Para isto, necessitou-se da utilização de meios que experimentalmente demonstrassem a eficácia dos componentes empregados, bem como expressassem numericamente seus resultados.

Os ensaios foram realizados nos laboratórios do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, campus Bagé, na finalidade de exprimir constatações quantitativas dos testes.

Em resolução dessas etapas, inicialmente, para obter o resultado esperado, a tração desenvolvida pelo usuário na bicicleta deve gerar energia elétrica. Essa energia deve ser, em um primeiro momento, utilizada pelas cargas instaladas. Desta forma, como metodologia para a obtenção dos objetivos, são descritas as etapas seguintes:

## 6) Determinação do rendimento

O ensaio controlado foi realizado através da medição da potência do motor elétrico trifásico VOGES, 4 polos, com potência nominal de 2HP, utilizando o Analisador de Qualidade de Energia Fluke 435 série II instalado em seus terminais.

O primeiro teste procedeu da seguinte forma: variou-se, através do inversor de frequência instalado na bancada, a velocidade do motor até que este atingisse a velocidade síncrona. Anotou-se pontos estratégicos para que se pudesse criar uma linha de tendência destes. O alternador esteve acoplado eixo-a-eixo durante este experimento, porém com os terminais abertos. Este procedimento foi realizado para levar em conta a inércia do rotor no teste, a fim de garantir a lisura dos dados. Em um segundo momento, conectou-se os terminais do alternador a uma carga, representada por uma bateria sem a função de armazenador de energia. Novamente, repetiu-se a variação de velocidade do motor, fazendo com que se determinasse a potência de saída no alternador, para assim determinar seu rendimento.

## 7) Implementação do conversor e circuito de controle

Nesta etapa do trabalho, foram estudados e dimensionados todos os componentes pertinentes a montagem do conversor estático CC-CC *Buck-Boost*. Criou-se, seguindo o referencial teórico, diagramas e fluxogramas que auxiliassem na aceção do projeto.

Após o cálculo dos parâmetros de operação e especificações iniciais, utilizou-se os materiais presentes em laboratório para sua implementação. Foram usados o modulador PWM SG3524, driver do MOSFET foi um IR2304, resistores, capacitores, diodos e um indutor. A montagem primeiramente se deu em uma placa *protoboard* e posteriormente em uma placa perfurada de fenolite, utilizando solda de estanho e um ferro de solda de 30W.

Em sequência, os experimentos foram realizados sob tensão de 12V, onde pode-se aferir os resultados através do osciloscópio TEKTRONIX TDS 2014B e multímetros. Na posse destes dados, traçou-se tabelas e gráficos a fim de sintetizar os resultados obtidos de maneira descritiva.

## 8) Testes de funcionamento

Os testes do modelo propostos foram feitos com a reunião dos componentes e montagem do protótipo em armação de ferro. As condições iniciais de giro do acoplamento mecânico foram calculadas em função da necessidade de estimação das relações de velocidade entre o pedal da bicicleta e o eixo do alternador.

Montou-se o aparato, colocando os terminais do alternador em um conjunto de rádio e alto-falante, com potência de aproximadamente 46W. A bateria instalada no protótipo foi uma Heliar Extreme XTZ-BL, de tensão nominal de 12V e com reserva de capacidade (RC) de 4Ah.

A sequência de teste foi a seguinte: com a unidade de 46W, mediu-se a potência cedida na carga da bateria. Em um segundo momento, utilizou-se um resistor cerâmico para aumentar a carga até 56W. A velocidade das pedaladas foi estimada através de um estroboscópio. Em posse dos dados, foram confeccionadas tabelas que suprissem a demanda de análise descritiva desta etapa.

#### **9) Alteração da característica operacional**

Nesta etapa, foram revisados conceitos de máquinas elétricas e seu funcionamento com ímãs permanentes instalados no rotor. As características dos materiais envolvidos também foram estudadas. A partir do embasamento teórico, definiu-se passos para o dimensionamento da máquina, podendo assim realizar-se a compra dos materiais. Foram usados como ímãs permanentes peças de 10mmx10mmx10mm de liga de neodímio-ferro-boro, instalados em duas polias, uma de ferro e outra de alumínio. Para a colagem das peças foram utilizadas colas Araldite e Durepox. Para a usinagem da polia, utilizou-se torno.

Após a devida limpeza e recondicionamento dos rolamentos, fechou-se a máquina e colocou-se sob teste. Com a utilização do motor trifásico VOGES, 4 polos de 2HP, deu-se início aos testes utilizando como instrumento de aferição um multímetro. A metodologia de ensaios seguiu a mesma sequência de passos do experimento 1.

#### **10) Simulações**

Nesta etapa, utilizou-se o software de simulação com o método dos elementos finitos *FEMM – Finite Element Method Magnetics*, da empresa QinetiQ North America. A malha de simulação foi desenhada na área gráfica do *software* com refinamento de

50000 pontos, com o objetivo de reconhecer a distribuição da densidade de fluxo ao longo da peça.

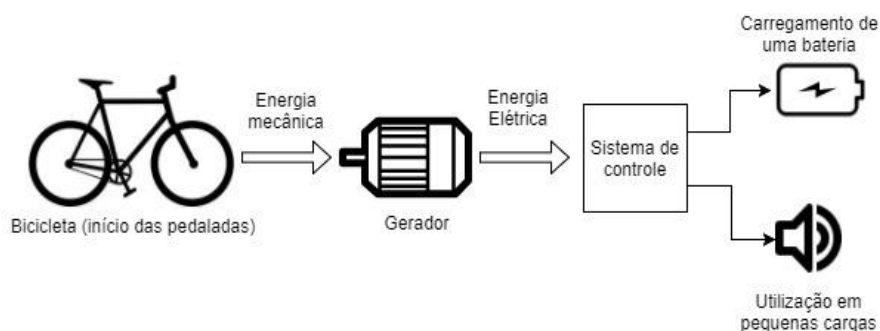
#### 4 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a proposta do desenvolvimento e construção de uma bicicleta capaz de gerar energia elétrica, houve necessidade da montagem de um esquema prévio apto a expressar graficamente a ideia inicial da planta (Figura 1). Em linhas gerais, a planta apresenta-se composta por uma bicicleta comum ligada mecanicamente a um alternador automotivo. Ao fornecer tração, o usuário implicará em ceder energia mecânica ao sistema, fazendo com que essa energia se manifeste em forma de energia mecânica de rotação na roda traseira através da relação de polias previamente existente na bicicleta. Ao movimentar a roda, o rotor do gerador anexado na mesma produzirá um campo magnético girante em seu interior. Esse campo é o responsável pela indução de tensão nos enrolamentos do estator do mesmo. A frequência de operação do gerador é determinada pela velocidade das pedaladas, sendo esta proporcional à corrente de campo e à amplitude da tensão gerada, como explica Fitzgerald (1999).

Foram testados aspectos construtivos diferentes do gerador: primeiro, houve um experimento de determinação de rendimento com o rotor bobinado original da máquina. Posteriormente, efetuou-se a construção e análise prática de funcionamento de dois rotores compostos por ímãs permanentes, um com seis polos e núcleo de ferro, e outro com oito polos e núcleo de alumínio.

A tensão nos terminais do gerador, foi tratada pela malha de controle implementada no circuito conversor, onde há controle sobre a mesma, fazendo com que se obtenha níveis padronizados de saída. Após tratamento, a energia gerada poderá ser consumida instantaneamente, alimentando as cargas instaladas no protótipo, ou armazenada em uma bateria para posterior uso.

Figura 1 – Visão geral do protótipo.



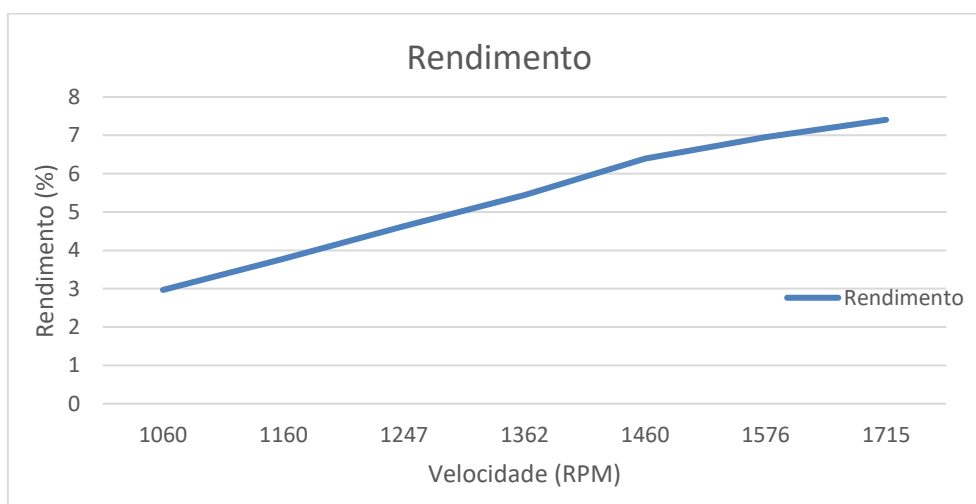
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

#### 4.1 Aferição do rendimento da máquina

A fim de determinar dados envolvendo a potência mecânica concedida e a potência elétrica obtida nas transformações envolvidas nos processos eletromecânicos do alternador original, foi necessário realizar um experimento controlado, variando a velocidade de operação com a utilização de um motor elétrico trifásico VOGES, 4 polos abertos de 2HP. A determinação da potência elétrica aplicada no motor em função de sua rotação, no primeiro teste, e a potência convertida na saída do gerador, no segundo, foi realizada com a medição a utilização do equipamento Analisador de Qualidade de Energia Fluke 435 séries II, podendo assim traçar-se uma curva de rendimento do gerador e as curvas do motor a vazio e sob carga.

Assim, foi possível confeccionar a figura 2, que apresenta o rendimento encontrado no alternador. Para fins práticos, esse rendimento é muito abaixo do necessário, uma vez que o usuário deverá pedalar a uma velocidade elevada para que haja transformação satisfatória de energia, portanto traçou-se novos experimentos em que fosse possível atenuar essa diferença, aumentado, portanto o rendimento do gerador.

Figura 2 - Curva de rendimento do alternador



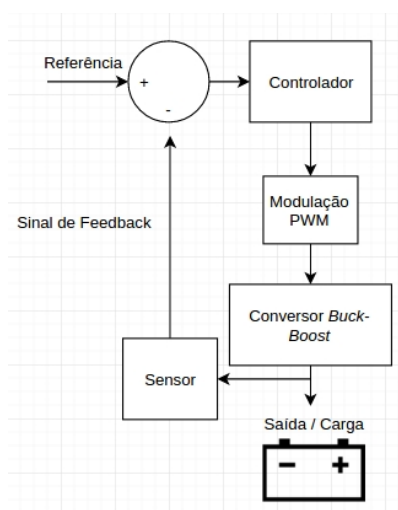
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

#### 4.2 Implementação do circuito de controle

Segundo Barbi (2000), conversores estáticos são sistemas que realizam a função de conversão da energia elétrica de uma forma a outra valendo-se para isto da característica de comutação dos interruptores de potência. O controle desta transferência de energia é obtido ao

serem aplicados sinais de controle nestes interruptores afim de modificar os seus tempos de condução. Como a malha de controle opera em laço fechado, os sinais da comutação são gerados automaticamente de acordo com os valores obtidos nas funções de transferência. Assim, o passo de tempo depende da dinâmica do controlador e do circuito.

Figura 3 – Diagrama de Blocos



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Com esse advento, a corrente elétrica na saída do projeto será controlada e fornecida a um componente qualquer, sendo a tensão limitada a 12V, utilizando um resistor como sensor. Na figura 3, observa-se o diagrama de blocos do sistema implementado.

Após tratamento no controlador, a variável de processo passa por uma comparação, onde a função gera um sinal de erro que contenha a informação do resultado da diferença algébrica entre o sinal de referência e o sinal de realimentação, no caso do projeto, utilizasse a modulação por largura de pulso, PWM, ou seja, através da largura do pulso de uma onda quadrada é possível o controle.

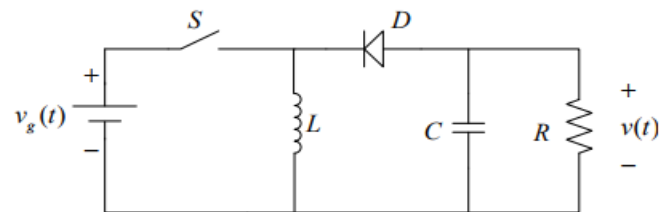
Ahmed (2000) define o conversor abaixador-elevador de tensão, conhecido como *Buck-Boost*, que produz uma tensão de saída com valores variando de zero até nove vezes sua tensão de entrada, em função do ciclo de trabalho estabelecido.

Para Barbi (2000), o conversor CC-CC *Buck-Boost* é responsável no sistema pelo fornecimento contínuo de tensão ainda que seja suprido com uma fonte inconstante. Esta característica se adapta ao projeto, visto que em função da velocidade variável das pedaladas, a tensão advinda do gerador tem grande oscilação. O conversor *Buck-Boost* não transfere energia diretamente para a saída. É conveniente dividir seu funcionamento



em duas etapas: com a chave  $S$  fechada, existe armazenamento de energia no indutor  $L$ . Quando aberta, a fonte é seccionada do circuito e o indutor descarrega toda a energia armazenada em forma de campo magnético na saída.

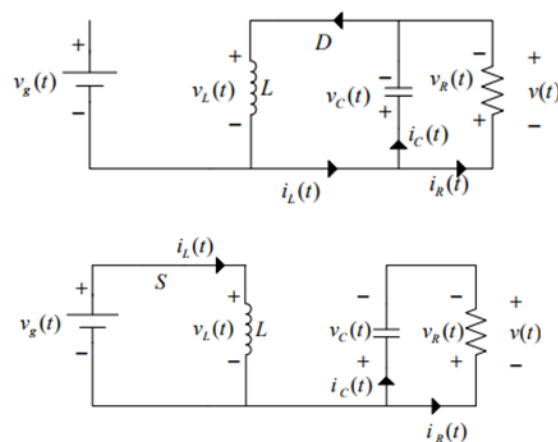
Figura 4 – Conversor Buck-Boost



Batschauer (2012)

Para a modelagem do conversor, segundo Carvalho (2012), é necessário que assumas condições de simplificação do método: a resistividade do diodo e da chave são nulas em modo de condução quando aberta; operação do conversor sempre em modo contínuo; função de chaveamento binária, ou seja, assume-se 1 quando a chave está fechada e 0 quando aberta. As etapas distintas são definidas pela figura seguinte, sendo a de cima com chave aberta e abaixo com a chave em condução.

Figura 5 – Conversor Buck-Boost interruptor aberto (cima) e fechado (baixo)



Batschauer (2012)

Desta forma Carvalho (2012), o sinal de comando define a etapa de operação, controlando assim o comportamento da tensão no indutor, pela observação da etapa que a chave está conduzindo:

$$V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \quad [\text{V}] \quad (5)$$

Quando a chave não conduz, observa-se, pela lei dos nós.

$$i_c(t) = i_L(t) - i_r(t) \quad [\text{A}] \quad (6)$$

Em regime permanente, a tensão média no indutor e a corrente média no indutor são nulas. Para que se garanta essa condição, a corrente no indutor é invariável durante o período de uma mesma etapa de condução da chave, o que explicita que quando o período de comutação começa, instantaneamente a corrente no indutor tem variação. No capacitor, esse efeito também acontece. Essa asserção implica que a corrente média no indutor seja sempre zero.

Em regime permanente, o ganho estático do conversor será:

$$M = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (7)$$

Tabela 1 - Parâmetros para a construção do conversor

Tensão de entrada - 20V	8~15V
Tensão de saída	12V
Frequência de chaveamento (Malha aberta)	50KHz
Resistência de carga	5~10Ω
Ondulação da corrente no indutor	10% (100uH)
Ondulação de tensão de saída	0.5%

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

É necessário que se utilize as técnicas de realimentação para aumentar a precisão do

sistema, rejeitar o efeito de perturbações externas, melhorar a dinâmica do sistema e estabilizar um sistema naturalmente instável em malha aberta e diminuir a sensibilidade a variações dos parâmetros do processo, como no caso, o fornecimento da tensão desejada.

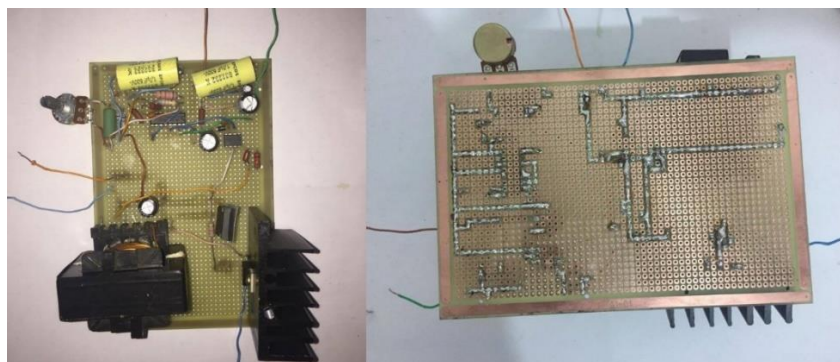
Para isso, implementou-se um circuito com os cálculos dos componentes de acordo com a nossa necessidade e para manter o conversor em modo de condução contínuo. De acordo com os elementos disponíveis no laboratório, foram estabelecidos os parâmetros do conversor. A tabela 1 mostra as especificações de serviço do conversor *Buck-Boost*. Foram utilizados componentes disponíveis no laboratório, de forma que a montagem do circuito foi feita de acordo com o esquema elétrico do anexo I. O dimensionamento do controlador foi previamente estipulado de acordo com a tabela 1 e o dimensionamento do núcleo do indutor de acordo com a tabela 2. Na figura 5, o esquema de montagem em placa perfurada.

Tabela 2 – Características do núcleo do indutor do circuito conversor

Condutância magnética	Seção transversal efetiva do núcleo	Tamanho efetivo do núcleo	Seção transversal mínima do	Máxima densidade de fluxo	Número de Espiras
$A_L$	$A_{in}$	$l_{in}$	$A_{min}$	$B_{máx}$	N1
196nH	125mm <sup>2</sup>	92mm	123mm <sup>2</sup>	297mT	23

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

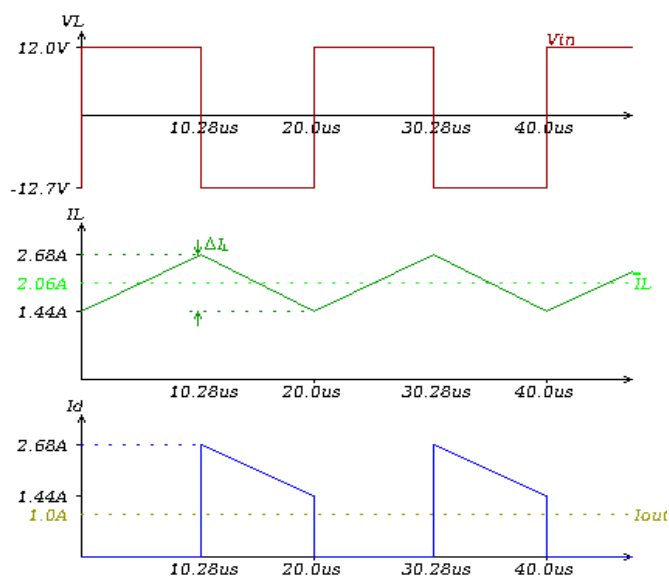
Figura 5 - Montagem do Conversor e da malha de controle em *protoboard*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para as especificações de trabalho desejadas, obteve-se os parâmetros adjacentes de corrente no indutor e tensão de saída  $V_{out}$  necessárias para que se garanta modo de condução contínua do conversor, conforme os gráficos apresentados na figura 6.

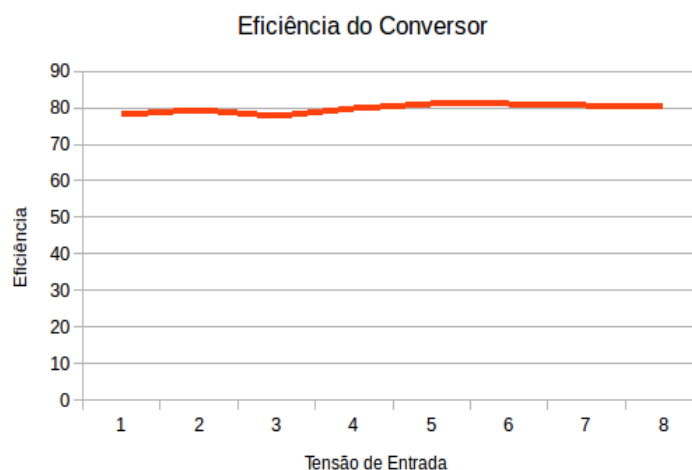
Figura 6 -Gráficos de operação do conversor buck-boost implementado, para a) Tensão da saída  $V_{out}$ , b) Ondulação de corrente no indutor  $\Delta i_L$  e c) Corrente no diodo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Com o ciclo de trabalho fixo, a partir de um gerador de funções na porta do gatilho do conversor, pode-se realizar o experimento controlado de eficiência, gerando a figura a seguir. Para este experimento, utilizou-se um *duty* de 0.42 e resistência de 5Ω. Para tanto, foi plotado um gráfico afim de influir sobre as perdas na conversão.

Figura 7 - Eficiência do Conversor Buck-Boost a um  $D=0,42$ .



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Observa-se no gráfico, que a um ciclo de trabalho de 0,42, obteve-se uma eficiência média de 80%. Com o controle em malha fechada, pôde-se observar uma grande estabilidade nas

variáveis de controle. As alterações mais abruptas se deram quando o potenciômetro oferecia uma resistência muito grande ou muito pequena, fazendo com que o conversor entrasse em modo de condução descontínua, o que não é objeto de estudo do presente projeto.

Logo, a análise dos resultados concluiu que a técnica de modulação empregada, bem como a realimentação da malha de controle e o conversor construído aparecem como uma ótima alternativa ao projeto de geração de energia a partir do protótipo da bicicleta estacionária, já que se obtém controle das variáveis de processo, segurança nos equipamentos e otimização da geração de energia a uma perda muito pequena. Os rendimentos encontrados na análise experimental explicitam a necessidade de um dimensionamento preciso dos componentes ativos do conversor.

### **4.3 Conversão da máquina em gerador síncrono a ímãs permanentes.**

Após realizadas as devidas experimentações com o alternador automotivo em estado original, decidiu-se, a partir dos resultados obtidos, realizar alterações no aspecto construtivo da máquina.

As alterações justificam-se pelos baixos índices de rendimento encontrados na máquina, além de complicações operacionais no controle de velocidades variáveis da fonte primária.

Seguindo da metodologia de cálculo das características da máquina foram primeiramente levadas em conta as dimensões do estator do alternador, visto que este não será alterado. Tem-se como área de possível alteração o rotor acoplado ao eixo o que será modificado por um novo rotor composto por uma polia onde serão anexados os ímãs. Tem 70mm de diâmetro, com 90mm de profundidade. O rolamento onde encaixa o eixo, ao fundo da peça, tem 11mm de diâmetro. O rolamento da tampa do invólucro da máquina tem 16mm de diâmetro.

Para esta experimentação, escolheu-se o ímã de Neodímio-ferro-boro, grade N50, com dimensões de 10x10x10 mm. A escolha deste ímã deu-se, primordialmente, pela característica satisfatória de custo benefício, visto que a aplicação não exige grandes potências nem opera em altos índices de temperatura.

A correta dimensão do entreferro reduz a dispersão de fluxo magnético e garante o máximo fluxo por polo. Em suma, quanto menor a dimensão do entreferro, menos se perde fluxo magnético. Segundo Miller e Hendersot Jr (1994), que propõe relações para as dimensões do entreferro, escolheu-se para aplicações de baixa potência de aproximadamente 0,15mm.

Para a definição do número de polos, a velocidade síncrona do gerador a ímãs permanentes. Como analisado nos testes anteriores, optou-se por uma velocidade de cruzeiro na bicicleta, entre 900 e 1200RPM. Para este cálculo, utiliza-se, 8 e 6 polos compostos pelos ímãs no novo rotor da máquina.

O fluxo por polo é diretamente ligado às dimensões da máquina, para calculá-lo, deve-se levar em conta a área magnética e a máxima intensidade do campo magnético-produto. Para o ímã de neodímio N-50, adotou-se  $B_m = 14.5 \text{ MGOe}$  e para  $A_m = 589,04 \text{ mm}^2$  em função do diâmetro do rotor e altura do ímã, obtendo-se assim  $\phi/polo = 0,854 \text{ T}$ .

#### **4.4 Processos experimentais do protótipo com ímãs permanentes.**

Nesta etapa são descritos os processos e métodos de fabricação e testes do produto, os quais foram realizados a fim de obter-se o gerador síncrono de ímãs permanentes instalado na base para o acoplamento da bicicleta.

Para a melhor aferição da característica de funcionamento, bem como explicar possíveis falhas de projeto e respostas diretas aos desafios encontrados nos protótipos testados, recorresse a computação na análise aprofundada do sistema, a fim de obter-se dados comparativos entre o funcionamento ótimo da máquina projetada e os resultados analíticos obtidos. Utilizou-se, para tal, o *software* FEMM – *Finite Element Method Magnetics*, o qual se caracteriza por ser uma suíte de programas que solucionam, a partir do método dos elementos finitos.

Para a entrada dos dados, desenhou-se a malha representativa do gerador. Os dados de entrada dos materiais da máquina, como o ferro, alumínio e o ar, foram adquiridos do pacote de elementos pré-definidos do software, somente variando os magnetos, conforme etapas abaixo descritas.

A simulação foi traçada, para a obtenção de respostas frente a imprecisão dos testes realizados, da seguinte forma:

4. Simula-se a máquina conforme projetada, com os dados teóricos de permeabilidade magnética relativa e força coercitiva do ímã.
5. Simula-se a máquina com os dados adquiridos no experimento, a partir da intensidade de campo magnético estimada.
6. Compara-se os resultados.

a) **Caso A - Rotor de 8 polos com polia de alumínio.**

No primeiro teste do protótipo modificado, procedeu-se com a desmontagem da máquina para a alteração da estrutura do rotor. Utilizando prensa hidráulica, disponível em uma tornearia local, foi retirado o rotor bobinado, construído sobre um eixo de aço, possui em seu interior uma bobina de cobre fixada que é envolvida por um par de sapatas polares. O eixo de aço original do alternador, agora desmontado dos enrolamentos, foi embutido por pressão em uma polia de alumínio de 75mm de diâmetro de alumínio. Foi embutido um parafuso de pressão e ranhuras no interior do furo passante para que não houvesse movimentos rotacionais destes elementos acoplados. Uma fenda de 1,1mm foi feita ao longo da peça, a fim de ser o local da fixação dos ímãs de neodímio-ferro-boro.

Figura 8 – Rotor de 8 polos com polia de alumínio

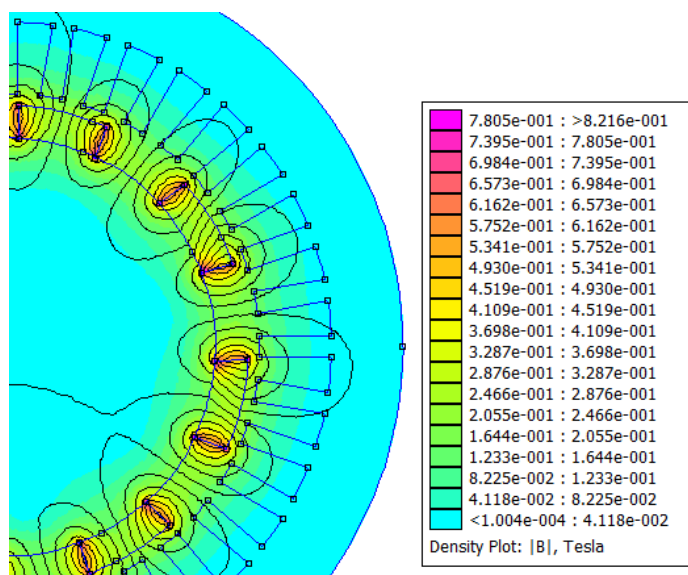


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A máquina foi posta a teste utilizando o mesmo motor de indução trifásico dos testes anteriores, VOGES 2HP. Acoplou-se o gerador de forma eixo-a-eixo para rodar em vazio, fazendo com que as características de teste fossem as mesmas para uma melhor comparação. O experimento controlado seguiu a metodologia de ensaios já proposta neste trabalho. Varia-se a rotação do motor cedente de energia mecânica à máquina e afere-se os dados obtidos através de instrumentos de medição, como o multímetro e o osciloscópio. O teste, ainda que preliminarmente, não conseguiu aferir dados que representassem a conversão de energia, ainda que pôde-se estimar, pela lei de Faraday, a função da densidade de campo magnético  $B$ , a partir das pequenas induções de tensão na máquina. Para o rotor de 8 polos, estimou-se cerca de  $B_{rotor} = 0,126 \text{ mT}$ .

Os dados encontrados mostraram uma taxa ínfima de rendimento, o que gerou a necessidade da utilização de análise de simulação gráfica para a correta comparação com o ponto de projeto. Nesta simulação, utilizou-se a força coercitiva e a permeabilidade relativa do NdFeB com os valores padrões do *software*, sendo  $\mu_{x,y} = 1,045$  e  $H_c = 9,79 \text{ MA/m}$ , respectivamente.

Figura 9 – Resultados da simulação do *Caso A*, com *valores* padrões.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

É perceptível que a densidade de campo magnético presente, na figura 9, vem de encontro ao ponto de projeto. A taxa estimada de fluxo por polo,  $\phi/polo = 0,854 \text{ T}$ , não foi atingida, ficando na média de  $0,5 \text{ T}$  nas faixas coloridas de escala mais próximas ao polo; um erro de aproximadamente 40%. Salienta-se também a interferência do núcleo de alumínio em que o rotor foi simulado. A linha de campo tem maior resistência a passagem por este, o que aumenta a relutância da máquina, causando perdas.

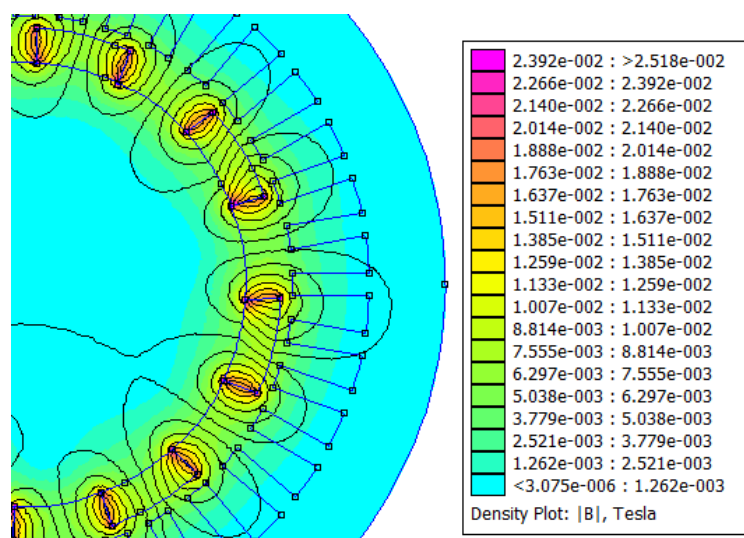
A partir da premissa da densidade de fluxo magnético obtida no experimento, pode-se inserir nas variáveis do *software* a relação de força coercitiva e a permeabilidade relativa, sendo que as grandezas se relacionam pelo ciclo histerético do material. Logo, para o NdFeB aplicado no projeto:  $\mu_{x,y} = 1,045$  e  $H_c = 1,002 \text{ MA/m}$

Nota-se pela figura 10, que em comparação ao modelo idealizado dos magnetos, houve uma queda significativa nas margens de fluxo por polo, fazendo com que o fluxo



concatenado normal a uma área seja menor e, por conseguinte, menor conversão energética. Esta queda na indução relativa a área mediana do polo, foi de cerca de 70%. Essa queda brusca justifica-se experimentalmente, visto que os dados obtidos em análise experimental não representavam 10% do ponto de projeto.

Figura 10 - Resultados da simulação do *Caso A*, com dados experimentais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

#### b) **Caso B - Rotor de 6 polos com polia de ferro.**

Em função da necessidade de realizar testes comparativos para a formulação de parâmetros de funcionamento em diferentes circunstâncias, optou-se por realizar mais um teste determinístico e controlado utilizando, nesta etapa, uma polia de ferro de diâmetro 80mm, contendo seis polos compostos por três ímãs cada.

O núcleo de ferro foi escolhido por apresentar maiores características de permeabilidade magnética que o de alumínio, fazendo com que as linhas de campo geradas pelos magnetos passassem também pela estrutura, diminuindo a relutância total.

Os processos de montagem do eixo foram semelhantes ao da polia de alumínio, ainda que houve a necessidade de adaptar a peça. A figura 11 mostra o processo de usinagem em torno, na intenção de retirar o excesso de ferro no contorno lateral dos ímãs para que se garantisse uma melhor distribuição do campo magnético na máquina.

A distribuição dos polos se deu pela junção de três ímãs com a mesma direção de magnetização, intercalados por mais três ímãs com a direção oposta. Neste teste,

diferentemente do primeiro, optou-se por diminuir ao máximo o espaçamento dos polos, na intenção de acertar o passo polar e aumentar o fluxo por polo ( $\phi/polo$ ).

Figura 11 – Rotor de 8 polos com polia de ferro



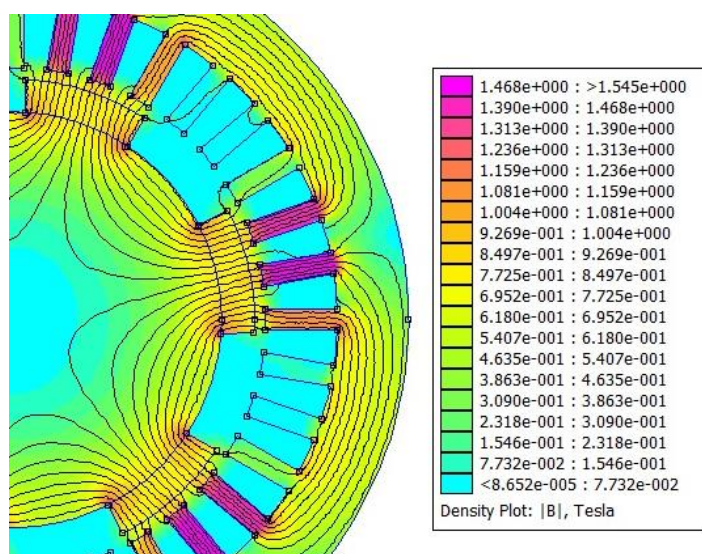
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Com a peça finalizada, deu-se prosseguimento ao experimento. Os moldes da aferição seguiram o padrão deste trabalho.

Este teste apresentou grandes dificuldades em sua execução, visto que não se obteve grandezas elétricas significativas e concisas. Percebeu-se a existência de tensão de fase quando a máquina operava em velocidade síncrona, não apresentou nenhum tipo de constância ou linearidade.

Não foi possível extrair dados numéricos deste teste, ainda que visualmente podesse formular premissas que posteriormente puderam trazer respostas aos problemas encontrados.

A fim da determinação de respostas dos problemas encontrados, o rotor de seis polos com núcleo de ferro foi simulado a partir dos dados padrões, com  $\mu_{x,y} = 1,045$  e  $H_c = 9,79 \text{ MA/m}$ . A simulação pode ser vista na figura 12.

Figura 12 - Resultados da simulação para o *Caso B*

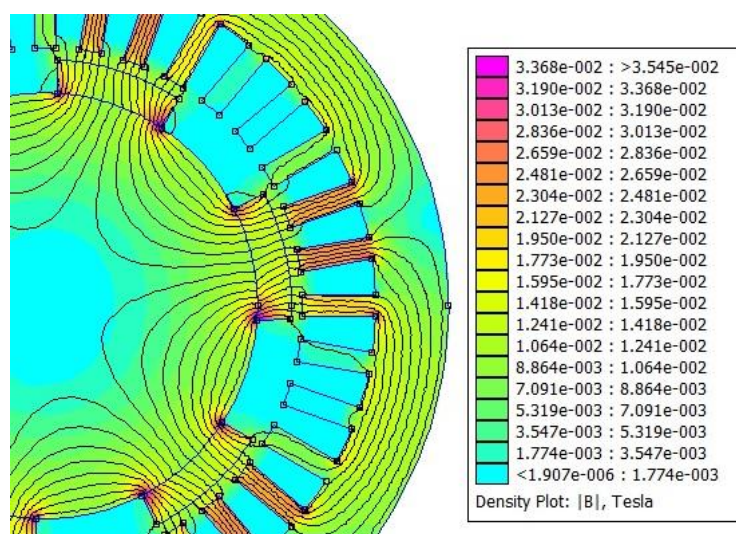
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Nesta etapa das simulações, seguiu-se o ponto de projeto para o rotor de 6 polos com núcleo de ferro, sendo que cada polo é composto por três ímãs idênticos, com direção magnética invertida por polo. Isso faz com que o *solver* aumente a taxa de densidade de fluxo magnético. Os resultados nesse caso foram expressivos: o  $\phi/polo = 1.138 T$  do ponto de projeto foi atingido com sucesso. Se considerarmos a faixa laranja roxa entre as ranhuras, pode-se afirmar que se obteve uma superação de cerca de 20%. Muito dessa contribuição vem pela permeabilidade do ferro que constitui o núcleo, a facilidade das linhas de campo se cruzarem de forma multidimensional, ou seja, com baixa relutância, auxilia na densidade de fluxo relativa do campo magnético da máquina.

A partir da premissa da densidade de fluxo magnético obtido no tratamento matemático da lei de Faraday. Os dados adicionados ao *software* foram  $\mu_{x,y} = 1,045$  e  $H_c = 1,344 MA/m$ .

Como pode-se observar na figura 12, as linhas comportam-se ainda de maneira mais adequada do que com o rotor de alumínio, reafirmando que a permeabilidade do ferro é bem-vinda neste tipo de projeto. A diminuição da força coercitiva, visto a diminuição dos valores teóricos para os práticos da densidade de fluxo, causou uma diminuição de 77% nas áreas envolvidas pelos polos, o que dificulta a transformação eletromecânica.

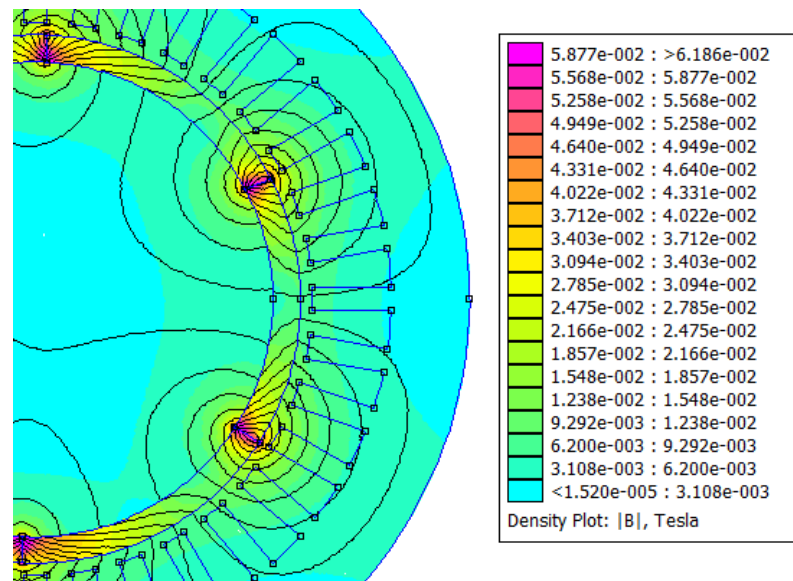
A figura 13 representa a simulação do Caso D para o rotor de 6 polos com o espaçamento ideal.

Figura 13 - Resultados da simulação para o *Caso D*

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O experimento do rotor de 6 polos estava sem espaçamento suficiente entre os polos. Tentou-se resolver “isolando” o circuito magnético através de cortes na peça e a inserção de um material isolante na fronteira, porém aparentemente as mudanças não surtiram efeito. Para sanar esse levantamento, simulou-se novamente o rotor de 6 polos porém com a singularidade de não conter nenhum espaço dentre as cabeças polares.

Esta estimativa de espaçamento é de vital importância no projeto, como visto na figura 14, sob pena de anular toda e qualquer influência no campo magnético dos polos no passo polar. A simulação mostra que o contorno dos ímãs é a região de maior influência de campo magnético, fazendo com que toda a intensidade magnética fique concêntrica, inviabilizando o projeto.

Figura 14 - Resultados da simulação para o *Caso D*, com ímãs sem espaçamento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

## **.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este estudo teve como maior motivação a pesquisa e construção de uma forma alternativa e simples de geração de energia elétrica. A intenção de utilizar materiais de uso rotineiro, proporciona descomplicação técnica diante da incompreensão popular das formas de transformação de energia, podendo servir como incentivo às escolas e comunidade, onde pode-se mostrar a ciência na prática, provocando a curiosidade e o aproveitamento sustentável de energia elétrica. Encontrou-se durante a pesquisa, uma boa forma de geração de energia, servindo satisfatoriamente para alimentação de pequenas cargas.

Dentro desta abordagem, o primeiro objetivo, o qual se deu pela construção de um módulo principal de geração de energia composto por um gerador síncrono e sistema de controle, adaptável ao acoplamento de bicicletas, foi cumprido em sua totalidade, visto que se obtiveram resultados positivos nas questões construtivas e de funcionamento do protótipo.

Como aspecto construtivo da planta, salienta-se a boa condição de acoplamento e relação de rotação. Pedaladas a velocidade de cruzeiro cedem cerca de 1700RPM ao eixo do alternador. Desta forma, é possível pedalar confortavelmente e gerar energia.

A determinação do rendimento do alternador acusou um baixo índice, visto que os testes identificaram por volta de 7,5% a 8% de eficiência. Ainda assim, é possível a um pedalar de 37,7RMP, gerar energia para alimentar uma carga de 50W. O experimento obteve análise quantitativa e expressado graficamente no corpo do trabalho. Cargas acima de 50W não são supridas somente com o pedalar, necessitando assim de fonte externa.

A elaboração de um sistema de controle em malha fechada contribuiu ao projeto, trazendo a este maior aproveitamento e segurança dos dispositivos empregados. A pesquisa e implementação do circuito controlador foi satisfatória, com rendimentos de 80%. O controlador, o qual tem como variável controlada uma multiplicação linear de tensão e corrente deve ser revisto, visto que deve-se controlar apenas corrente nos casos previstos neste projeto, devendo haver apenas uma limitação de tensão, a fim de carregamento de bateria.

A alteração da característica operacional da máquina não obteve sucesso experimental, porém formulou premissas para que pudessem ser levantadas hipóteses de funcionamento. Deste modo, realizou-se simulação em software utilizando o método dos

elementos finitos. Com uma malha de 50076 nós (pontos), pode-se obter os erros percentuais de projeto bem como analisar as grandezas magnéticas envolvidas.

Através dos dados coletados a partir do experimento com o rotor de 8 polos foram tratados a partir de leis fundamentais do eletromagnetismo, podendo ser estimada a densidade de fluxo  $B$  para os rotores de 6 polos,  $B_{polo}=0,169mT$ , e para 8 polos  $B_{rotor}$ . Com esta estimativa, pode-se inserir as variáveis magnéticas necessárias no software FEMM – *Finite Element Method Magnetics*, e obter os gráficos da distribuição de fluxo.

Os casos foram tratados separadamente, sendo que o rotor de 8 polos com núcleo de alumínio, Caso A, com dados reais obteve simulação 40% abaixo do encontrado em projeto, Caso C, referente ao rotor de 8 polos com núcleo de alumínio, mostrou a necessidade da determinação do núcleo. É necessário que haja circulação de linhas de campo no rotor e, aliado a isso, diminuir a relutância magnética. O Caso B, com três ímãs por polo, seis polos e núcleo de ferro teve sua simulação em condições ótimas 20% maior que o ponto de projeto. O rotor de 6 polos com dados estimados ficou 77% aquém do projeto. Como explicação, simulou-se outro cenário, quando os ímãs de polos diferentes ficaram muito pertos. Deste experimento ressalta-se a necessidade de que os espaços sejam definidos e dimensionados, neste caso toda a densidade de fluxo se concentra puntiforme extremidade do ímã.

Em suma, os objetivos aqui propostos foram cumpridos, visto que foram estudadas, analisadas e propostas formas que favoreçam a construção de conscientização energética e o contato direto com a geração de energia. O projeto contribui como uma forma alternativa de geração de energia, tem cunho educacional, incita a curiosidade, desmistifica os processos envolvidos nas transformações, tem baixo custo e grande potencial para a redução de gastos com energia elétrica. Por fim, os resultados atenderam satisfatoriamente as propostas e objetivos lançados na asserção da ideia.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson, 2000. 440 p
- BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 3.ed. Florianópolis: EDUFSC, 2000.
- CAETANO, R. C. **Análise de uma máquina síncrona de ímã permanente com tensão não senoidal**. Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.
- DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 1999
- CHAPMAN S.J., 2000, **Máquinas Elétricas**, 3 ed., McGraw-Hill, Inc., Colômbia.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- HENDERSHOT Jr and. T.J.E. MILLER, **Design of Brushless Permanent- Magnet Machines**, Oxford, Motor Design Books, LLC, 2010.
- NASAR, A. Syed. **Máquinas Elétricas**. Ed. Mac Graw Hill, 1ª edição, 1984, São Paulo.
- MODESTO, André Márcio. **Geração, transmissão e distribuição de Energia elétrica, seus equipamentos e tecnologias aplicadas**. GTDEE, Maio, 2011.
- PINHO, Luis Carlos Almeida. **Materiais Ferromagnéticos e suas Aplicações**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2009.
- REIS, L. B. D. **Geração de Energia Elétrica**. 2a. ed. Barueri: Manole Ltda., 2011.



## ANEXO I – Circuito da malha de controle e conversor Buck-Boost

