

THIAGO ANTONIO COSTA DOS SANTOS

Projeto e construção de um inversor de frequência trifásico eletromecânico

Thiago Antonio Costa dos Santos

Projeto e construção de um inversor de frequência trifásico eletromecânico

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Zangrandi Filho

Guaratinguetá - SP
2018

S237p	Santos, Thiago Antonio Costa dos Projeto e construção de um inversor de frequência trifásico eletromecânico / Thiago Antonio Costa dos Santos – Guaratinguetá, 2018. 53f : il. Bibliografia: f. 52-53 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. João Zangrandi Filho 1. Inversores elétricos. 2. Correntes contínuas. 3. Correntes alternadas I. Título. CDU 621.314.572
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

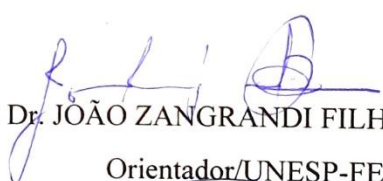
THIAGO ANTONIO COSTA DOS SANTOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOÃO ZANGRANDI FILHO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
UNESP-FEG

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CHAVES
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

THIAGO ANTONIO COSTA DOS SANTOS

NASCIMENTO 12.06.1995 – Guaratinguetá / SP

FILIAÇÃO Nivaldo Pery dos Santos
Lúcia Helena Costa dos Santos

2013/2018 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Campus de Guaratinguetá

Este trabalho é dedicado aos meus pais e à minha noiva, que sempre me apoiaram em todas as decisões de minha vida, inclusive a de me tornar engenheiro.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, *Prof. Dr. João Zangrandi*, além da atenção e paciência dedicados a este trabalho, um grande amigo.

À minha noiva, *Flaviani*, grande apoiadora de meus sonhos e projetos.

À minha família: meus pais e irmão, que de uma forma ou de outra contribuíram para o meu crescimento tanto como profissional quanto como pessoa.

A todos os meus companheiros da empresa *Bontur Bondinhos Aéreos*, grandes amigos para todos os momentos, me ajudaram a aprender o que é ser um grande profissional.

A todos os professores que tive na vida, que sempre me apoiaram e me ajudaram a ser o que sou hoje.

Finalmente, a todos os amigos, que direta ou indiretamente fizeram e faz de minha vida, me dando forças a ser cada vez mais uma pessoa melhor.

*"Dedique-se a tudo o que você faz, dê sempre
o seu melhor, faça a diferença!"*

(Lúcia Helena)

RESUMO

Neste trabalho, são apresentados os principais tipos de conversores de energia, porém de forma específica o conversor CC-CA com frequência controlada, ou seja, o inversor de frequência. Para este trabalho, optou-se pelo projeto de um inversor de frequência eletromecânico, que possui funcionamento de fácil visualização no que diz respeito ao processo de conversão CC-CA. Por fim, o inversor foi construído e testado, podendo-se demonstrar de forma prática o seu funcionamento.

PALAVRAS-CHAVE: Inversor eletrônico. Inversor eletromecânico. Tensão contínua. Tensão alternada trifásica.

ABSTRACT

In this work, the main types of energy converters are presented, but in a specific way the CC-AC converter with controlled frequency, that is, the frequency inverter. For this work, the design of an electromechanical frequency inverter was chosen, which has an easy-to-view operation with regard to the CC-CA conversion process. Finally, the inverter was built and tested, and can be demonstrated in a practical way.

KEYWORDS: Electronic inverter. Electromechanical inverter. Continue voltage. Alternate three-phase voltage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Inversores de frequência comerciais.....	16
Figura 2 - Formas de onda.....	16
Figura 3 - Representação de uma fonte de tensão contínua	18
Figura 4 - Representação de uma fonte de corrente contínua.....	18
Figura 5 - Classificação do inversor de frequência	20
Figura 6 - Esquema de um inversor de frequência eletrônico	21
Figura 7 - Circuito elétrico do chaveamento	22
Figura 8 - Circuito elétrico base	23
Figura 9 - 1º passo da comutação.....	25
Figura 10 - 2º passo da comutação.....	25
Figura 11 - 3º passo da comutação.....	26
Figura 12 - 4º passo da comutação.....	26
Figura 13 - 5º passo da comutação.....	27
Figura 14 - 6º passo da comutação.....	27
Figura 15 - Esquema do inversor de frequência eletromecânico.....	31
Figura 16 - Comando de chaveamento do inversor 6 passos.	32
Figura 17 - Detalhe das ligações elétricas do inversor	33
Figura 18 - Alimentação CC para o inversor.....	34
Figura 19 - Demonstração do campo girante.....	35
Figura 20 - Desenho de montagem do eixo na carcaça	36
Figura 21 - Eixo com os anéis coletores, escovas e fios.....	36
Figura 22 - Sistema das escovas superiores.....	37
Figura 23 - Motor elétrico DC com a polia dentada.....	38
Figura 24 - O inversor modelado em 3D.....	39
Figura 25 - Trilhas de cobre e cotas dos furos da haste.....	41
Figura 26 - Placa com trilhas, haste com furos e ligação das escovas	42
Figura 27 - Fotografia do inversor montado.....	43
Figura 28 - Vista superior do inversor.....	43
Figura 29 - Detalhe de posicionamento das escovas	44
Figura 30 - Detalhe da haste e dos trilhos de cobre.....	44
Figura 31 - Detalhe da transição entre uma escova e outra	45
Figura 32 - Formato de onda gerado durante os testes	46

Figura 33 - Onda gerada em rotação mais baixa	47
Figura 34 - Onda gerada em rotação mais alta	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sequência de chaveamento do inversor eletromecânico	24
Tabela 2 - Lista de componentes	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
DC	<i>Direct Current</i>
AC	<i>Alternate Current</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	TIPOS DE CONVERSORES CC-CA	17
2.1.1	Fonte de energia.....	17
2.1.2	Número de fases na saída do inversor	18
2.1.3	Estrutura do inversor.....	19
2.1.4	Forma de controle sobre a tensão da carga	19
2.2	O INVERSOR DE FREQUÊNCIA TRIFÁSICO ELETRÔNICO.....	21
2.3	INVERSOR TIPO SEIS PASSOS OU SEIS PULSOS	22
2.4	MÉTODO PARA CONVERSÃO CC-CA.....	23
2.4.1	O circuito de chaveamento	23
2.4.2	Sequência de chaveamento	24
3	MÉTODO UTILIZADO PARA EXECUÇÃO DO PROJETO	29
4	PROJETO DO INVERSOR ELETROMECHANICO	31
4.1	PARTES DO PROJETO	33
4.1.1	O circuito de chaveamento	33
4.1.2	O sistema rotativo.....	34
4.1.3	O sistema de acionamento	37
4.2	MONTAGEM DO INVERSOR.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1	TESTES NO INVERSOR	43
5.2	TESTES COM O OSCILOSCÓPIO	46
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
	REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

Ao se analisar o mercado, nota-se que os inversores de frequência possuem grande importância nas indústrias, visto que sua maior aplicação se dá em motores elétricos, para controle de frequência de funcionamento.

No caso deste trabalho, o foco está na obtenção de corrente alternada trifásica de frequência controlada através de um inversor de frequência eletromecânico, diferentemente do já tradicional Inversor eletrônico.

Sendo, portanto, um modelo eletromecânico, o que se busca no trabalho é trazer um cunho didático a este aparelho, visto que no modelo eletrônico não é possível visualizar o funcionamento do aparelho, pois tudo ocorre internamente e de forma eletrônica. Com isso, pode-se observar que o foco não está em inovação tecnológica, e sim em trazer maior compreensão deste aparelho aos que por ventura venham a estudá-lo futuramente.

Por fim, a relevância do trabalho está no fato de que o Inversor eletromecânico proposto é construído com materiais de fácil obtenção, baixo custo, além de ser um dispositivo de fácil construção e com aproveitamento didático nas aulas desta instituição.

1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho consiste em projetar um conjunto composto por um motor elétrico de corrente contínua acoplado através de correia a um rotor que movimentará uma haste com escovas. Estas, por sua vez, estão conectadas a uma fonte de tensão contínua e farão contatos nas trilhas de cobre para implementar o método de comutação por seis passos para a obtenção de uma tensão alternada trifásica. Este conjunto eletromecânico terá capacidade para acionar pequenos motores elétricos trifásicos.

1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Ao se analisar o mercado, nota-se que os Inversores de frequência possuem grande importância nas indústrias, visto que sua maior aplicação se dá em motores elétricos, para controle de frequência de funcionamento.

O foco deste trabalho está na obtenção de corrente alternada trifásica de frequência controlada através de um Inversor de Frequência eletromecânico, diferentemente do já tradicional Inversor eletrônico.

Por fim, a relevância do trabalho está no fato de que o Inversor eletromecânico proposto é construído com materiais de fácil obtenção, baixo custo, além de ser um dispositivo de fácil construção.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O controle da energia elétrica é essencial. Muitas são as configurações possíveis de transmissão desta energia a algum dispositivo. Um dispositivo que utiliza energia elétrica pode funcionar com CC ou AC, sendo proveniente de pilhas e baterias (fontes CC) ou da rede elétrica (fonte de AC).

A tensão alternada pode ser classificada por sua fase, sendo mais comum a tensão monofásica trifásica. Vistas estas variações, foram criados os chamados conversores, podendo converter um tipo de corrente em outro. A seguir, têm-se os tipos:

- a. Conversor CC-CC - conhecido como “Chopper”, é um dispositivo que transforma CC em CC controlada conforme a necessidade do usuário.
- b. Conversor CC-CA - conhecido como “Inversor de Frequência”, é um dispositivo que transforma CC em CA, controlando inclusive a frequência e o número de fases requerido.
- c. Conversor CA-CC - conhecido como “Retificador”, é um dispositivo que transforma CA em CC, conforme a necessidade do usuário.
- d. Conversor CA-CA - conhecido como “Chopper CA”, é um dispositivo que transforma CA em CA controlada, conforme a necessidade do usuário (Canesin, 2016).

No caso deste trabalho, o foco está no conversor CC-CA, ou mais conhecido como inversor de frequência, recebendo corrente contínua e convertendo em corrente alternada de frequência controlada.

O foco deste trabalho está nos Conversores CC-CA, ou seja, nos dispositivos conhecidos como Inversores de Frequência. Um Inversor de Frequência recebe energia de uma fonte contínua (CC), tanto de corrente quanto de tensão, e através de seus circuitos internos, transforma este sinal contínuo em alternado (CA) de frequência variável. Na Figura 1 são apresentados modelos comerciais de Inversores de Frequência.

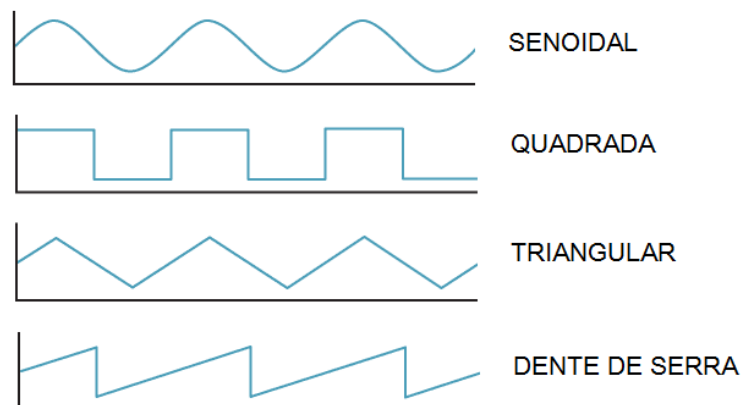
Figura 1: Inversores de frequência comerciais.



Fonte: Adaptado de WEG (2004).

Com respeito às características da tensão alternada obtida no inversor, ela está diretamente ligada à estrutura interna do inversor, tal qual o tipo de chaveamento, o que pode gerar ondas com diversos formatos. Na Figura 2 são mostradas as ondas quadrada, triangular, senoidal e dente de serra.

Figura 2: Formas de onda.



Fonte: Adaptado de Petry (2013).

No que diz respeito à aplicabilidade dos Inversores de Frequência, Petry (2013) traz exemplos de equipamentos que podem se utilizar deste dispositivo:

- Motores de corrente alternada;
- Motores de corrente contínua;
- Estabilizadores de tensão;

- Sistemas de alimentação ininterrupta (UPS);
- Aplicações no ramo aeronáutico e espacial.

Dentre estes exemplos, a aplicação mais comum se dá em Motores de corrente alternada, tal qual o motor elétrico de indução trifásico (MIT), amplamente utilizado em indústrias, devido ao controle e economia proporcionados.

2.1. TIPOS DE CONVERSORES CC-CA

Existe uma gama variada de Inversores presentes no mercado, existem algumas classificações importantes para se definir um tipo, dentre as quais estão:

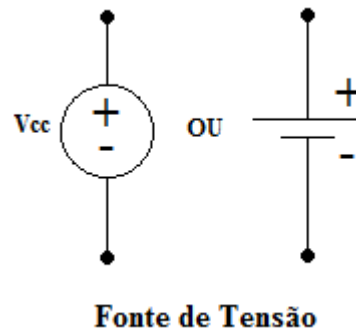
- Fonte de Energia;
- Número de fases na saída do Inversor;
- Estrutura do Inversor;
- Forma de controle sobre a tensão da carga.

2.1.1. Fonte de energia

No que se diz respeito à fonte de energia de um Inversor de Frequência, a mesma deve fornecer a energia na forma contínua (DC), existindo dois tipos: fonte de Tensão ou fonte de Corrente.

Fonte de Tensão: É a fonte de maior aplicação, sendo a tensão basicamente constante (DC), independente da corrente fornecida à carga. Pode ser proveniente de baterias como forma direta de fornecimento ou proveniente da linha de transmissão passando por um retificador AC-DC controlado. A Figura 3 mostra a representação básica de uma fonte de tensão contínua (POMILIO, 2012).

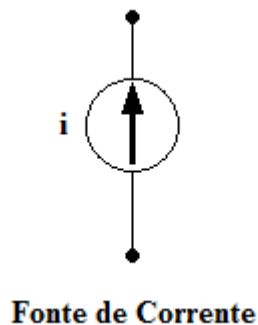
Figura 3: Representação de uma fonte de tensão contínua.



Fonte: Adaptado de Pomilio (2012).

Fonte de Corrente: Pouco utilizada, é uma fonte que possui a característica de manter um valor médio constante de corrente durante o fornecimento à carga. É obtida através de retificadores controlados e com o uso de indutores com valor elevado de indutância, atuantes como filtros. O circuito necessita de interruptores que permitam passagem de corrente apenas em um sentido, além de serem capazes de bloquear tensões com ambas polaridades (POMILIO, 2012). A Figura 4 traz uma representação básica de uma fonte de corrente.

Figura 4: Representação de uma fonte de corrente contínua.



Fonte: Adaptado de Pomilio (2012).

2.1.2 Número de fases na saída do inversor

Um Inversor de Frequência pode ser classificado a partir do número de fases fornecido em sua saída. Teoricamente esta saída não limita número de fases, ou seja, pode ser polifásica. Na prática, a saída geralmente pode possuir dois tipos: Monofásica ou Trifásica. Isto se deve ao fato de que os dispositivos encontrados comercialmente funcionam ou com tensão alternada monofásica ou com tensão alternada trifásica.

Vale ressaltar que a tensão alternada monofásica pode ser obtida através de uma extração de tensão trifásica na saída do inversor.

2.1.3 Estrutura do inversor

Os inversores podem apresentar ainda configurações a respeito do tipo de estrutura, sendo que as principais são as seguintes:

- Meia-ponte;
- *Push Pull*;
- Ponte completa ou Ponte trifásica.

Tanto a estrutura Meia-ponte quanto a *Push Pull* são utilizadas em circuitos para geração de tensão monofásica. Já a Ponte trifásica, também conhecida como Circuito Seis Passos ou Seis Pulsos, como o nome já diz, é empregada na obtenção de tensão trifásica (CANESIN, 2016).

2.1.4 Forma de controle sobre a tensão da carga

Ao se discutir a respeito do controle e regulação da tensão fornecida pelo Inversor, existem alguns métodos. Canesin (2016) classifica em três métodos principais:

- Controle da tensão na entrada do inversor;
- Controle da tensão na saída do inversor;
- Controle da tensão dentro do inversor, por modulação ou defasagem.

Falando a respeito do controle de tensão na entrada, existem dois tipos: o primeiro é utilizar-se de uma fonte DC, proveniente de uma bateria, por exemplo, que passa por um conversor DC-DC (Chopper), o qual estabiliza e controla esta tensão. Já no segundo tipo, a tensão é proveniente da rede elétrica comercial (AC), e passa por um conversor AC-DC (Retificador), preparando e controlando esta tensão.

Quando o controle é feito na saída do inversor, o processo possui complexidade muito maior, que, além disso, propicia a formação de harmônicas. Por estes motivos, este controle é raramente utilizado.

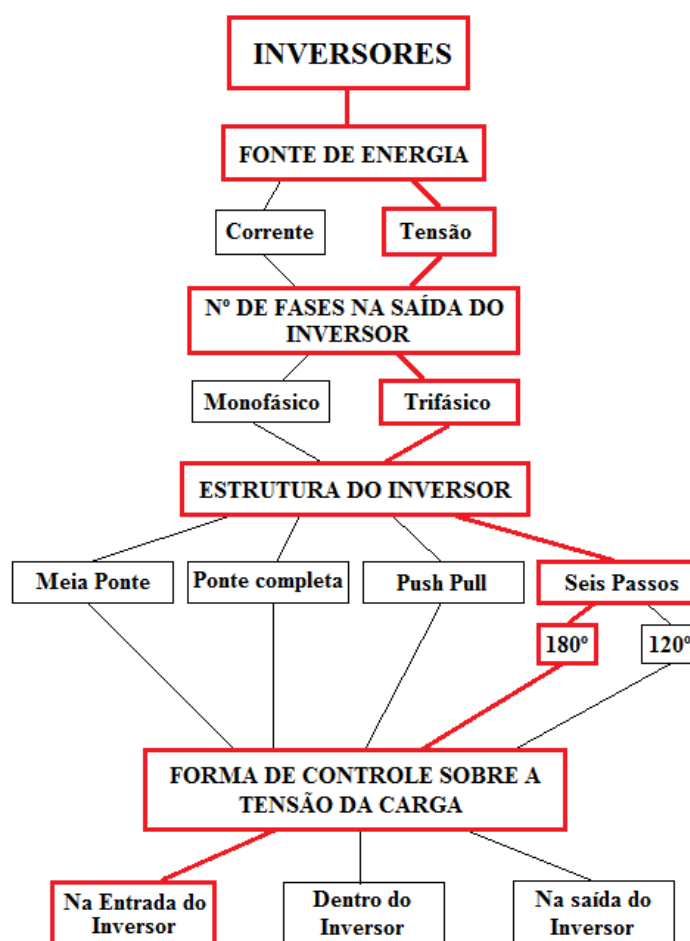
Por fim, o controle da tensão dentro do Inversor é o método mais utilizado em Inversores Industriais, sendo mais eficiente que os anteriores. Basicamente, ele incorpora o

controle de modulação de pulso dentro de si, existindo, contudo, alguns tipos de modulação, dentre os quais se encontram:

- Modulação por largura de pulso único;
- Modulação por largura de pulsos múltiplos;
- Controle por deslocamento de fase;
- Modulação por largura de pulsos senoidal.

Na figura 5 está apresentado um esquema que resume os tipos de Inversores, dividindo-os pelas classificações apresentadas anteriormente.

Figura 5 - Classificação do inversor de frequência.



Fonte: Adaptado de Mauro (2016).

Após esta breve apresentação dos tipos de inversores encontrados no mercado, o próximo tópico apresenta de forma mais detalhada o inversor de frequência trifásico

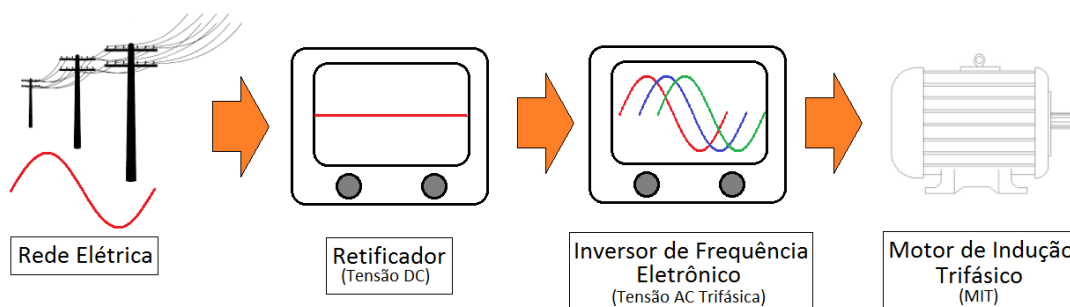
eletrônico, que servirá de base para o projeto do Inversor de Frequência Trifásico eletromecânico.

2.2. O INVERSOR DE FREQUÊNCIA TRIFÁSICO ELETRÔNICO

Alvo deste trabalho, o Inversor de Frequência trifásico é um conversor DC-AC com controle de frequência empregado de forma ampla nas indústrias para equipamentos de grande potência. É basicamente um dispositivo que gera tensão trifásica de frequência controlada, que pode alimentar motores elétricos de forma segura e totalmente controlada (GALLANTE, 2009).

Na figura 6 está apresentado um esquema básico de um Inversor de frequência, sendo utilizado para alimentar um motor elétrico de indução trifásico.

Figura 6: Esquema de um inversor de frequência eletrônico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O funcionamento básico do inversor trifásico é essencialmente o mesmo do inversor monofásico em ponte (monofásico). Para se obter o mesmo efeito de fonte trifásica, cada terminal de saída de cada braço inversor é conectado alternadamente, a cada meio período, no terminal positivo e negativo da fonte de alimentação DC.

Com este tipo de montagem, a tensão trifásica vai sendo obtida através das sequências de chaveamento. A defasagem entre cada uma das fases é de 120° , sendo que os três ciclos positivos resultam em 360° e os três ciclos negativos resultam em 360° (RASHID, 1999). As sequências e os tempos de cada chaveamento determinam, portanto, o formato de característica da tensão trifásica fornecida pelo Inversor. A seguir, será visto em detalhes como se dá o chaveamento e a montagem do circuito.

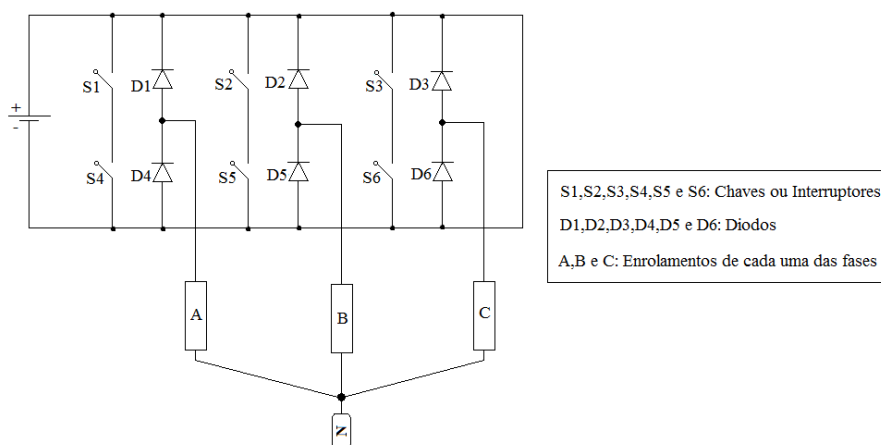
2.3. INVERSOR TIPO SEIS PASSOS OU SEIS PULSOS

No que se diz respeito aos Inversores de Frequência eletrônicos, os mesmos podem apresentar dois tipos de condução das chaves, sendo que no primeiro tipo, cada chave conduz por 120° , e no segundo tipo cada chave conduz por 180° . Este segundo tipo, o 180° apresenta vantagens sobre o tipo 120° , pois a condução do chaveamento é mais bem aproveitada, além de que quando se utiliza 180° a forma da tensão de saída não é afetada pela natureza da carga. Devido a estes motivos, é o tipo mais utilizado nos Inversores de Frequência.

Sendo assim, cada fase necessita de seis sequências de chaveamento diferentes entre si para formar uma onda completa (por isso o nome de “seis passos”), com cada chave conduzindo por 180° . No caso, como a tensão requerida é a trifásica, sempre existirá três chaves conduzindo a todo instante, cada qual conduzindo a uma das fases. Portanto, as sequências de chaveamento são montadas de forma a nunca permitir que uma das sequências se repita dentro de um mesmo ciclo. Na Figura 7 está mostrado o esquema do circuito elétrico de um Inversor de Frequência eletrônico. Nota-se que nesta configuração, o circuito apresenta sempre duas chaves na mesma coluna, ou seja, as chaves sempre estão configuradas em pares. Um exemplo é o par de chaves S1 e S4. Enquanto S1 sempre conduz a corrente proveniente do polo positivo, seu par S4 sempre conduz a corrente em direção ao polo negativo.

Neste tipo de circuito, sempre existirão duas chaves conduzindo pelo terminal positivo e uma pelo negativo, ou vice-versa, com duas chaves conduzindo pelo terminal negativo e uma pelo positivo, dando a alternância da tensão.

Figura 7: Circuito elétrico do chaveamento.



Fonte: Adaptado de Petry (2013).

2.4. MÉTODO PARA CONVERSÃO CC-CA

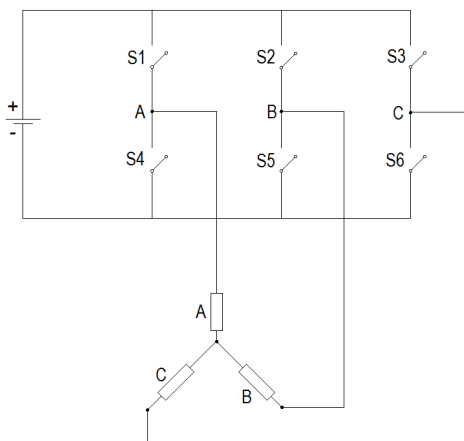
Para que ocorra a conversão CC-CA é preciso que haja um método: o método utilizado neste projeto é o chamado “Six step commutation”, ou “Comutação por seis passos”. Basicamente, após seis sequências de chaveamento, obtém-se como produto a corrente alternada trifásica.

2.4.1. O circuito de chaveamento

Para que as seis sequências ocorram de forma correta, é necessário que se haja um conhecimento a respeito do circuito elétrico que serve de base para todo o projeto.

Como o foco deste trabalho é se obter como produto a corrente alternada trifásica sem utilizar nenhum recurso na área da eletrônica, o circuito elétrico se mostra simples e direta, sem o acréscimo, por exemplo, dos diodos. Na Figura 8 é apresentado este circuito, constituído da fonte que fornece a corrente contínua, das chaves e das fases A, B e C. A fonte possui dois polos: o positivo e o negativo. A corrente deve sair do polo positivo e chegar até o polo negativo, utilizando-se das chaves condutoras para isso. As chaves por sua vez, ao sofrerem comutações proporcionam mudança de valor de corrente nas fases, o que faz o circuito gerar as ondas para as três fases. Por fim, as fases simplesmente alimentam o motor trifásico, que responde a estas variações de intensidade de fases, obtendo-se o campo girante necessário para o correto funcionamento.

Figura 8 – Circuito elétrico base.



Fonte: Adaptado de Petry (2013).

O circuito elétrico é composto por:

- Uma fonte de tensão contínua;
- Seis chaves: S1, S2, S3, S4, S5 e S6;
- Três enrolamentos: A, B e C.

2.4.2. Sequência de chaveamento

Assim como foi visto anteriormente, os chaveamentos possuem seis combinações para efetuar a conversão de Tensão DC em AC trifásica. Na Tabela 1 é apresentada a sequência de chaveamento do inversor eletromecânico, alvo deste trabalho.

Tabela 1: Sequência de chaveamento do Inversor eletromecânico.

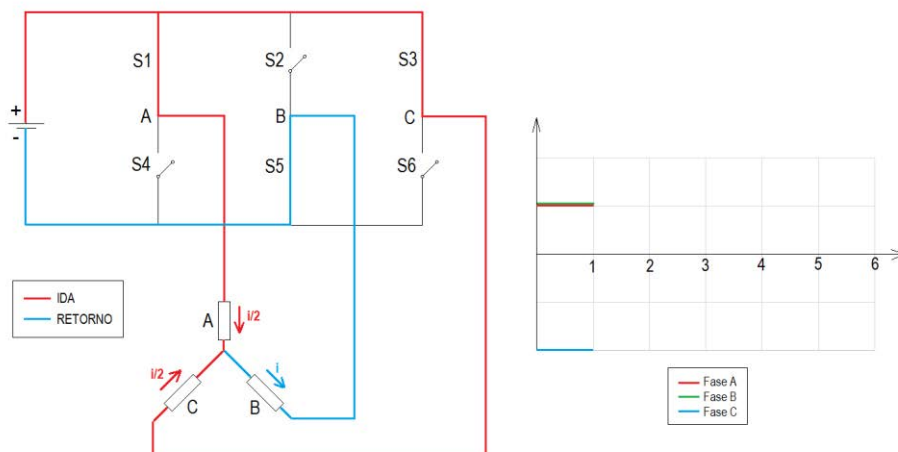
PASSO	CHAVES ATIVADAS		
1	S1	S5	S3
2	S1	S5	S6
3	S1	S2	S6
4	S4	S2	S6
5	S4	S2	S3
6	S4	S5	S3

Fonte: Adaptado de Franchi (2009).

Vista a tabela, a seguir serão apresentadas detalhadamente as seis combinações, mostrando o sentido da corrente elétrica pelo circuito. Além disso, o gráfico da corrente irá se construindo conforme as combinações forem avançando.

Na Figura 9 está apresentado o primeiro passo da comutação, e nota-se como a corrente se divide nas fases, sendo que neste instante as fases A e C estão conduzindo no barramento positivo através das chaves S1 e S3, enquanto a fase B está conduzindo no barramento negativo através da chave S5. A corrente divide-se entre as chaves S1 e S3 e junta-se novamente na chave S5. Com isso, nas fases A e C a corrente possui metade de sua corrente total positiva, enquanto que na fase B a corrente possui o valor total da corrente, porém negativa.

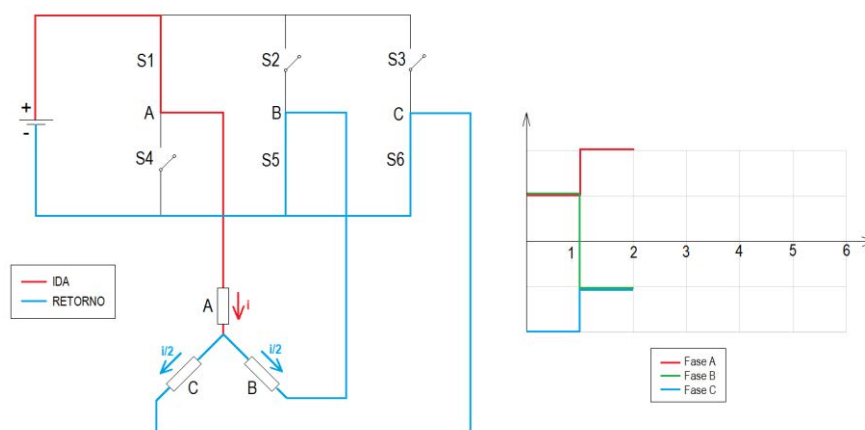
Figura 9 – 1º Passo da comutação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 10 está apresentado o segundo passo da comutação. Neste instante a fase A está conduzindo no barramento positivo através da chave S1, enquanto as fases B e C estão conduzindo no barramento negativo através das chaves S5 e S6. A fase A está em seu valor máximo positivo, enquanto as fases B e C estão com metade da intensidade máxima cada uma, porém com polaridade negativa.

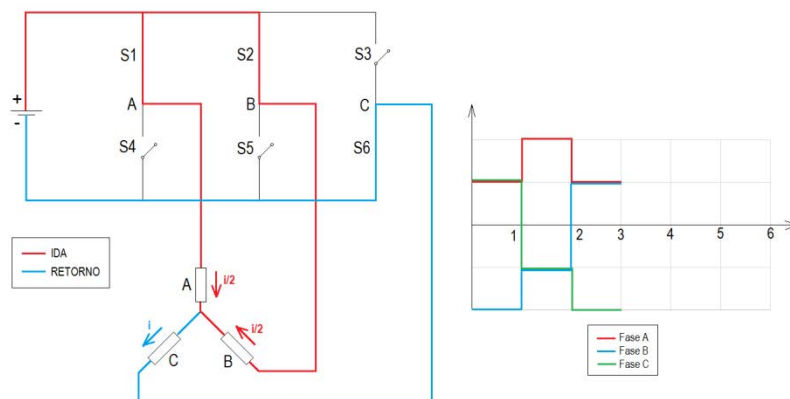
Figura 10 – 2º Passo da comutação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 11 do Passo 3, a corrente divide-se entre as fases A e B conduzindo no barramento positivo, para em seguida se juntar novamente na fase C, conduzindo no barramento negativo.

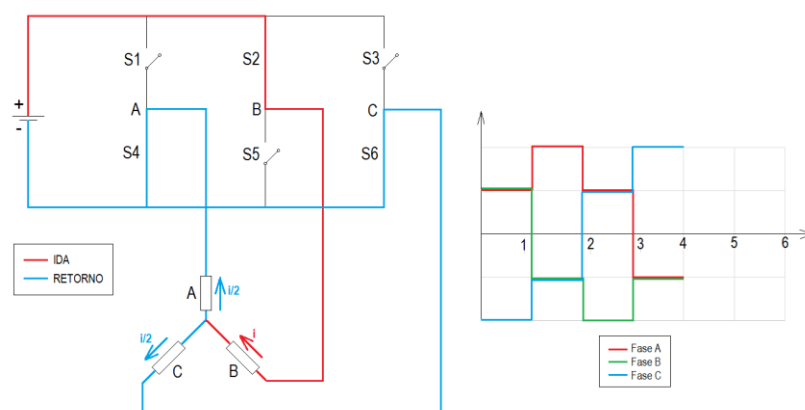
Figura 11 – 3º Passo da comutação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 12 está apresentado o quarto passo da comutação. Neste instante a fase B está conduzindo no barramento positivo através da chave S2, enquanto as fases A e C estão conduzindo no barramento negativo através das chaves S4 e S6. A fase B está em seu valor máximo positivo, enquanto as fases A e C estão com metade da intensidade máxima cada uma, porém com polaridade negativa.

Figura 12 – 4º Passo da comutação.

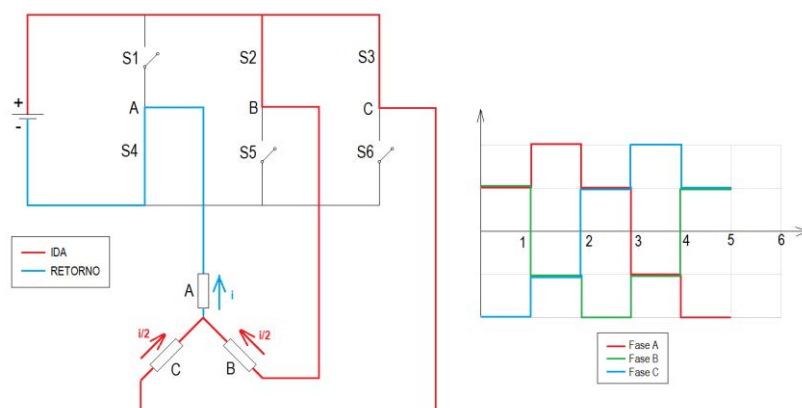


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13 está apresentado o quinto passo da comutação, e nota-se como a corrente se divide nas fases, sendo que neste instante as fases B e C estão conduzindo no barramento positivo através das chaves S2 e S3, enquanto a fase A está conduzindo no barramento

negativo através da chave S4. A corrente divide-se entre as chaves S2 e S3 e junta-se novamente na chave S4.

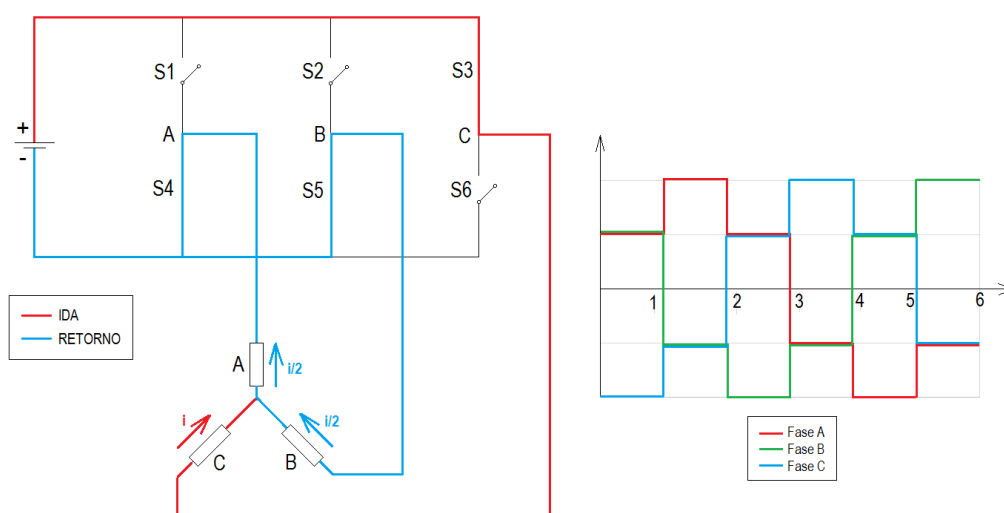
Figura 13 – 5º Passo da comutação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 14 está apresentado o sexto passo da comutação. Neste instante a fase C está conduzindo no barramento positivo através da chave S3, enquanto as fases A e B estão conduzindo no barramento negativo através das chaves S4 e S5. A fase C está em seu valor máximo positivo, enquanto as fases A e B estão com metade da intensidade máxima cada uma, porém com polaridade negativa.

Figura 14 – 6º Passo da comutação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após as seis comutações ou seis passos, pode-se observar claramente que todas as fases completaram seu ciclo, apenas estando defasadas entre si. Assim como o esperado a onda formada é quadrada.

Apesar da corrente não apresentar um formato senoidal, o circuito mostra-se funcional da mesma forma. O único problema se dá na forma de entrega da corrente, que ocorre de forma direta, sem passar por qualquer filtro ou tratamento. No caso deste projeto, a corrente é convertida e imediatamente alimenta o dispositivo requerido.

3. MÉTODO UTILIZADO PARA EXECUÇÃO DO PROJETO

Assim como em qualquer projeto, o método utilizado neste envolveu várias etapas, conforme as seguintes:

a) Pesquisa bibliográfica:

Nesta etapa, foram feitas consultas em diversas fontes, como a literatura tradicional dos livros, os artigos e teses relacionados ao tema. Com isso foi possível ampliar os conhecimentos a respeito do funcionamento dos inversores de frequência eletrônicos, dando base para o projeto do inversor eletromecânico.

b) Pesquisa tátil-visual:

Nesta etapa, foi possível se observar na prática o funcionamento real de um inversor de frequência eletrônico, sendo acoplado ainda a um motor de indução trifásico.

c) Pré-dimensionamento:

Após as pesquisas, iniciou-se o pré-dimensionamento do inversor eletromecânico, levando em conta os materiais disponíveis na universidade para a sua construção.

d) Fase desenho-cálculo-desenho:

A partir dos materiais disponíveis e do pré-dimensionamento, iniciou-se o desenho de conjunto do inversor. Após se esgotar a possibilidade de se avançar no desenho, recorria-se ao cálculo. Esta iteração ocorre até que o desenho de conjunto esteja totalmente pronto.

e) Fase desenho de detalhes:

Nesta fase, o desenho de conjunto é esmiuçado, detalhando-se cada um dos componentes, com a introdução das dimensões. Para esta parte, utilizou-se dos softwares AutoCAD® e Autodesk Inventor®.

f) Fase confecção dos componentes:

Após os detalhamentos, os componentes foram confeccionados. Os componentes pré-prontos (sucatas) foram simplesmente adaptados à necessidade do projeto.

g) Fase de montagem:

Nesta fase os componentes foram devidamente montados, fazendo-se ainda, os ajustes necessários para o funcionamento correto.

h) Fase de testes

Última e mais decisiva fase, na qual o dispositivo montado passou pelos testes de funcionamento, utilizando-se para isso um motor elétrico de indução trifásica síncrono, proveniente de uma HD de computador. Além disso, cada uma das fases foi

devidamente analisada no osciloscópio. Sendo assim, obtendo-se êxito nos testes, foi possível comprovar a funcionalidade do inversor de frequência eletromecânico.

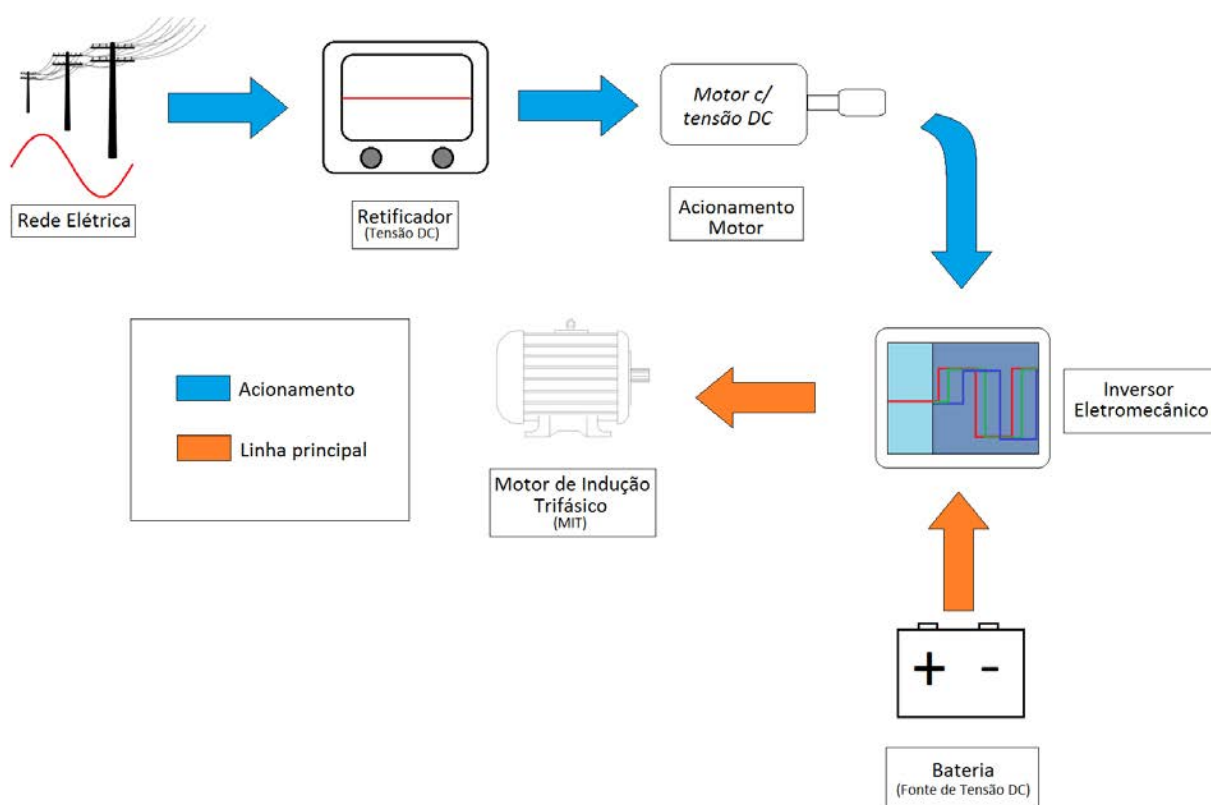
4. PROJETO DO INVERSOR ELETROMECAÂNICO

O inversor de frequência trifásico eletromecânico segue o mesmo princípio de funcionamento do inversor eletrônico, porém as sequências de chaveamento se dão de forma mecânica, ou seja, através de movimento rotativo das escovas. Sendo assim, a velocidade de rotação das escovas é que determinam a frequência da tensão trifásica obtida na saída do inversor.

No caso deste trabalho, o objetivo foi projetar e construir um inversor de frequência eletromecânico o mais simples possível, com todo o circuito basicamente no plano 2D, conforme será explicado com mais detalhes adiante.

O esquema da Figura 8 mostra os componentes básicos para o funcionamento do inversor eletromecânico.

Figura 15 – Esquema do Inversor de Frequência eletromecânico.

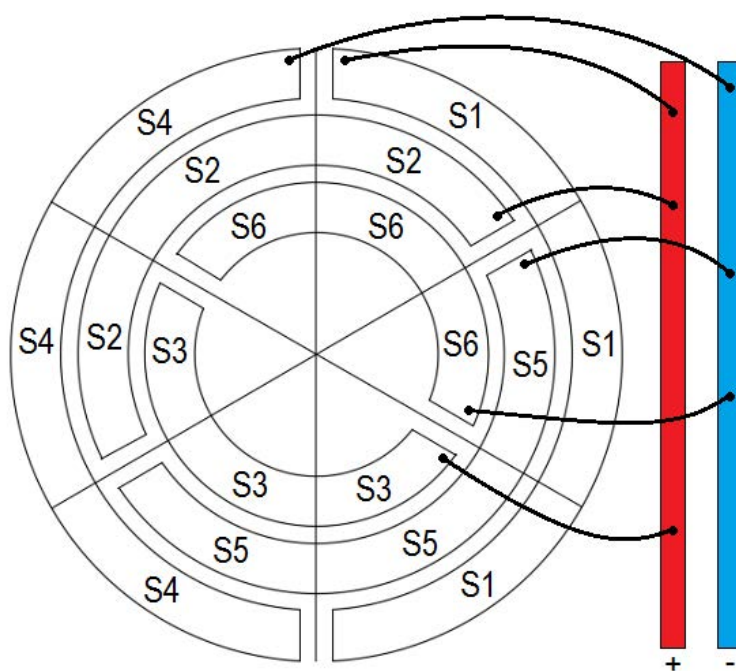


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando este esquema, nota-se que o inversor eletromecânico conta com duas fontes de energia elétrica. Uma delas é a fonte de tensão DC que será transformada em tensão AC trifásica, e a outra fonte, também DC, é a alimentação do comando de chaveamento.

Com respeito ao chaveamento optou-se por transformar as chaves em forma de trilhas de cobre. Assim, foi possível se implementar um sistema rotativo como sendo o comutador das chaves. Na Figura 9 é apresentado o circuito depois de ter sido transformado para um modelo de comutação rotativa. Cada uma das chaves possui agora o formato de meia coroa circular.

Figura 16 - Comando de chaveamento do Inversor 6 Passos.



Fonte: Adaptado de Mauro (2016).

Esta figura traz o esquema de ligação elétrica do circuito de comando, no qual as chaves S1, S2 e S3 estão ligadas no barramento positivo e as chaves S4, S5 e S6 estão ligadas no barramento negativo.

Por ser um mecanismo giratório, o comando de chaveamento aceita qualquer tipo de acionamento que o faça girar, podendo utilizar até mesmo um acionamento manual através de uma manivela. No caso deste trabalho, este acionamento será feito através de um pequeno motor de corrente contínua. Portanto, pode-se dizer que o inversor eletromecânico projetado neste trabalho é do tipo dinâmico por apresentar peças móveis em sua constituição.

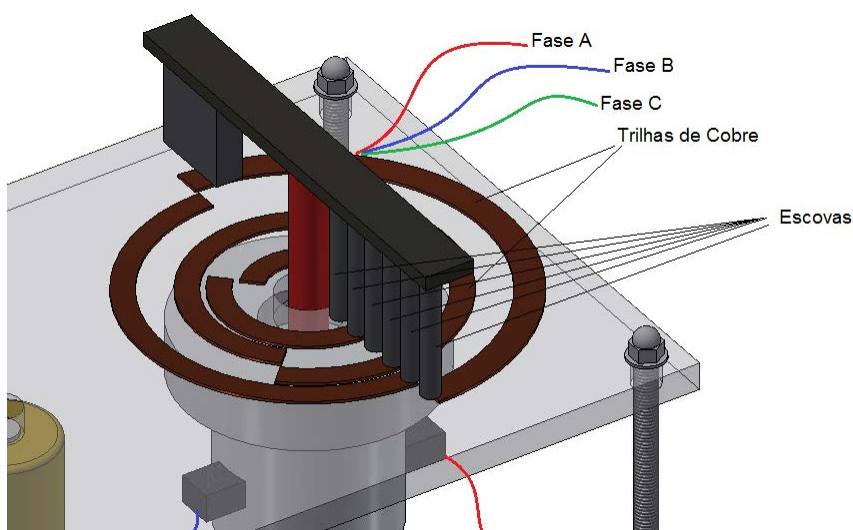
4.1. PARTES DO PROJETO

Para se projetar o inversor, dividiu-se o inversor eletromecânico em três partes: O circuito de chaveamento, o sistema rotativo e o sistema de acionamento.

4.1.1. O circuito de chaveamento

O circuito de chaveamento é composto pelas trilhas de cobre e pelas escovas, além de todo o cabeamento necessário para a conversão. Basicamente, o circuito é o próprio inversor, é onde toda a conversão da energia acontece. Na Figura 17 é apresentado o esquema em 3D. É formado pelos fios provenientes da fonte de tensão DC, que entram no sistema rotativo através de duas escovas uma delas recebe o fio negativo e a outra o fio positivo. As escovas transmitem a corrente para o eixo do sistema rotativo através de dois anéis, sendo um para cada escova. O sistema rotativo fornece a alimentação para as trilhas de cobre através de outras seis escovas - uma para cada trilha de cobre. As trilhas de cobre funcionam como chaves, tendo formato semelhante à meia coroa circular. Assim, quando a escova está tocando uma trilha, este conduz eletricidade, isto é, chave ligada. Quando a escova não está tocando a trilha, a mesma não conduz eletricidade, isto é, chave desligada.

Figura 17 – Detalhe das ligações elétricas do inversor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

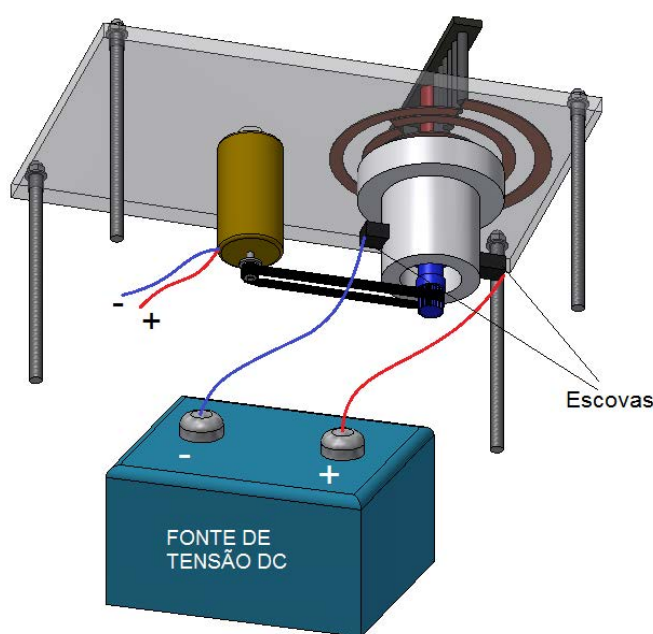
As trilhas de cobre são conectadas duas a duas para formar cada fase do sistema trifásico. Sendo assim as duas trilhas de cobre correspondentes a chave S1 e a chave S4

formam a fase A . Analogamente as trilhas correspondentes a chave S2 e a chave S5 são ligadas para formar a fase B. Finalmente as trilhas S3 e S6 juntas formam a fase C.

No caso deste projeto, o inversor alimenta um motor síncrono trifásico de pequena potência, neste caso o motor de HD de computador.

Na Figura 18 é apresentada a alimentação do circuito de chaveamento. A bateria representa a alimentação CC necessária para o funcionamento do inversor. No caso, esta alimentação pode vir de uma bateria propriamente dita ou por uma fonte retificadora, extraindo a energia da rede elétrica comercial.

Figura 18 – Alimentação CC para o inversor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

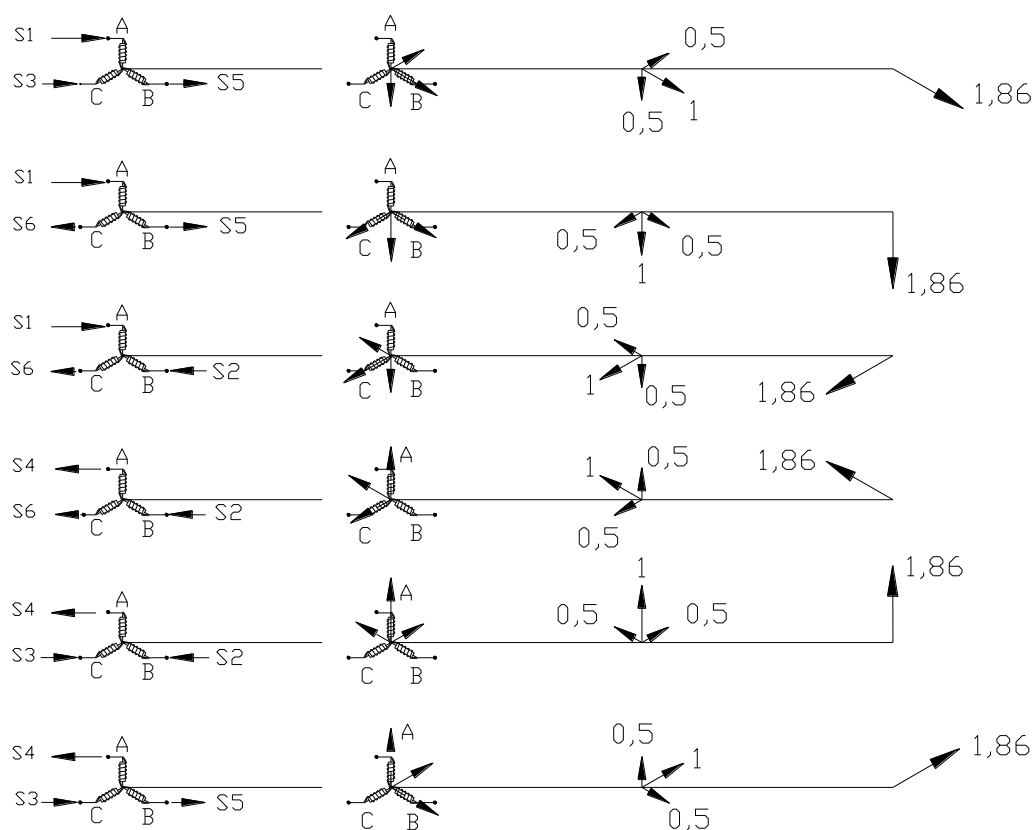
4.1.2. O sistema rotativo

Com respeito à eficácia do dispositivo, pode-se comprovar fisicamente a presença de um campo girante formado pelas três fases durante o funcionamento. A Figura 19 demonstra claramente a formação deste campo em um ciclo completo de 360 graus.

Seguindo a ordem do chaveamento, para completar a comutação pelos seis passos e acompanhando o sentido e módulo da corrente, pode-se determinar também o sentido e o valor do campo magnético em cada passo. Estabelecendo o valor máximo do campo magnético como sendo unitário, a soma vetorial dos três campos em cada passo é constante e

tem como resultante o valor 1,86. No entanto, a resultante muda em cada passo e completa uma volta a cada ciclo completo dos seis passos estabelecendo deste modo um campo magnético girante em um sistema trifásico.

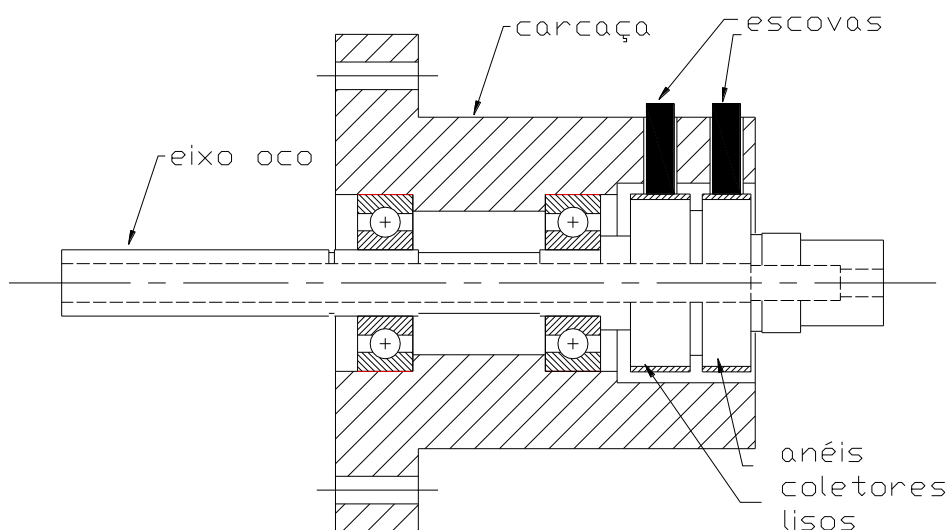
Figura 19 – Demonstração do campo girante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema rotativo é composto basicamente por um eixo, uma carcaça, dois rolamentos rígidos de esferas, um braço de fixação das escovas superiores. Na Figura 20 é apresentado o desenho de montagem do eixo na carcaça. Nesta montagem também dentro da carcaça pode-se observar os dois anéis coletores onde serão ligados os fios positivo e negativo que alimentarão as seis escovas da comutação.

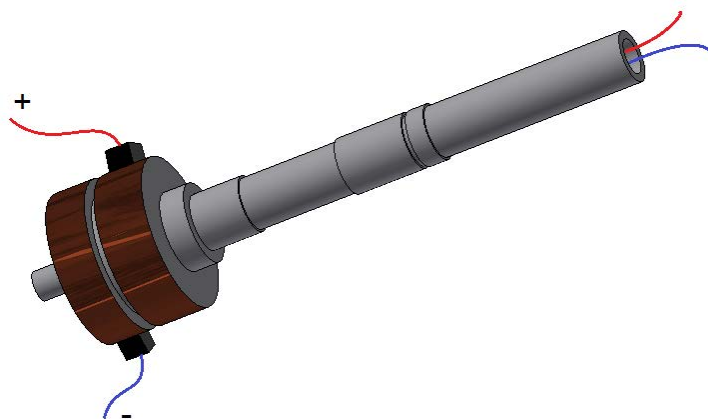
Figura 20 – Desenho de montagem do eixo na carcaça.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As escovas inferiores são fixadas na carcaça e deslizam nos dois anéis coletores lisos. Assim, a corrente vem dos fios, passa pelas escovas e chega aos anéis. Cada anel é responsável por conduzir uma polaridade. Após passar pelos anéis, a corrente entra novamente em dois fios, que estão na parte interna do eixo, que por esse motivo é oco. Os fios saem do eixo e são ligados no braço de fixação das escovas. Na Figura 21 é apresentada a modelagem em 3D do eixo oco junto com os anéis coletores, escovas e fios positivo e negativo.

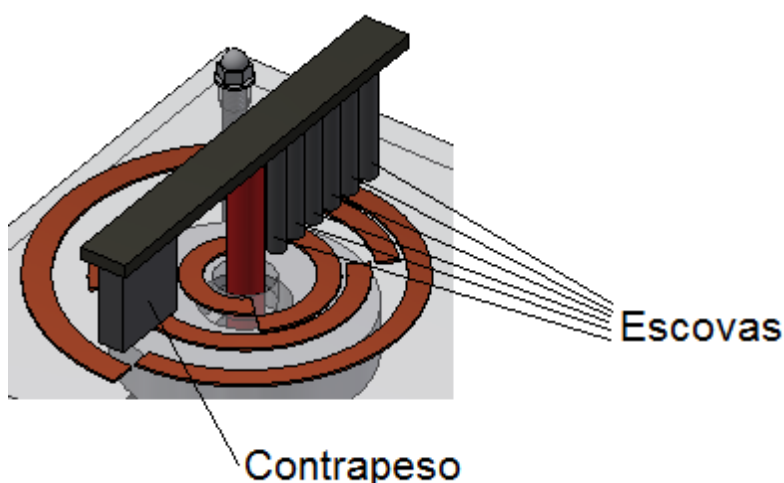
Figura 21 – Eixo com os anéis coletores, escovas e fios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dois fios que passam por dentro do eixo oco são ligados ao braço de fixação nas seis escovas. Três escovas são ligadas no fio positivo e três escovas no fio negativo. Mais especificamente as escovas de S1, S2 e S3 são ligadas no fio positivo. Já as escovas de S4, S5 e S6 são ligadas no fio negativo. Na Figura 22 é apresentada a parte superior do inversor, destacando-se as escovas fixadas na haste, que por sua vez está fixada no eixo rotativo.

Figura 22 – Sistema das escovas superiores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3. O sistema de acionamento

O sistema de acionamento é composto pelo motor elétrico DC, que aciona através de uma correia dentada todo o sistema rotativo, ditando a frequência de rotação do inversor, e com isso, ditando a frequência da corrente alternada. Para efeitos práticos, poderia ser utilizada até mesmo uma manivela como acionamento manual. Porém, para fornecer uma frequência maior para rodar o motor síncrono utilizou-se o motor elétrico DC.

Na Figura 23 é apresentado o modelo do motor em 3D. Este motor funciona com rotação constante, pois neste projeto a tensão de alimentação é constante e de valor 12 V. No entanto com um controle por PWM e uma fonte de tensão maior pode-se variar amplamente a rotação.

Figura 23 – Motor elétrico DC com a polia dentada.



Fonte: Adaptado de Franchi (2009).

4.2. MONTAGEM DO INVERSOR

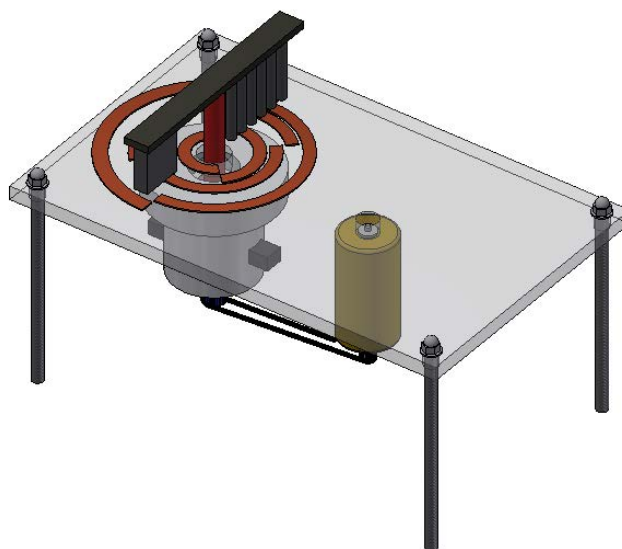
Após serem mostrados os sistemas em separado, a próxima etapa a ser vista é a de montagem do inversor. Na Figura 24 está representado o modelo em 3D do inversor.

Através deste modelo foi possível executar a montagem do modelo real, já havendo uma referência pré-definida. Por se tratar de um projeto ainda experimental, o modelo real necessitou de ajustes não previstos no modelo em 3D. Isto se deve ao fato de que as fixações necessárias não haviam sido previstas anteriormente, pois se optou por um modelo computadorizado simples, sem o total detalhamento das fixações, apenas os componentes em si.

Tendo sido visto primeiramente o modelo montado em 3D, a próxima etapa foi iniciar a construção do inversor propriamente dito. O primeiro passo foi reunir os materiais necessários e fazer as adaptações.

Como já foi dito anteriormente, o intuito do projeto do inversor é ser o mais simples e barato possível, atendendo a demanda exigida. Para ser um projeto barato, muito dos materiais utilizados são peças e material existente no laboratório do departamento de mecânica.

Figura 24 – O inversor modelado em 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, nota-se a utilização de diversos elementos normalizados, como rolamentos e anéis elásticos. Na tabela 3 está descrita a lista de componentes utilizados na construção do Inversor.

Para se construir a base do Inversor, utilizou-se a chapa de acrílico, além de quatro barras roscadas como pés. Tanto o motor elétrico DC quanto a carcaça do eixo de alternador foram fixados à chapa de acrílico através de parafusos do tipo Allen de cabeça externa.

Estando pronta a base, o próximo passo foi efetuar a fixação do eixo de alternador na carcaça. Para isso utilizou-se de anéis elásticos, além de contar com rolamentos rígidos de esferas para o eixo girar de forma suave durante o funcionamento.

Por fim, foram fixadas na carcaça do eixo as escovas assim como os fios passados por dentro do eixo e saindo na parte superior do mesmo.

Na Tabela 2 é apresentada a lista dos componentes utilizados e a quantidade utilizada de cada um deles.

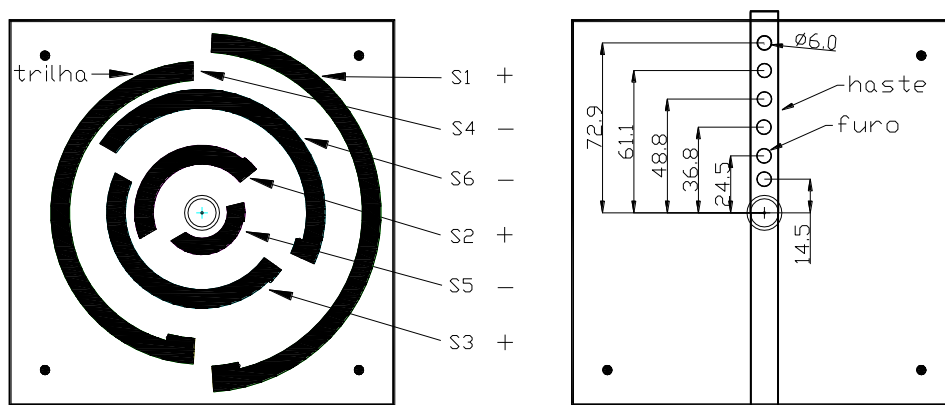
Tabela 2 – Lista de componentes.

Descrição	QTD
Anel elástico p/ furos 12mm	2
Arruela p/ M10	4
Arruela p/ M5	4
Barra roscada M10 X 220mm	4
Carcaça do eixo alternador	1
Correia dentada 500mm	1
Eixo de alternador (modificado)	1
Escova cilíndrica c/ mola	6
Escova prismática c/ mola	2
Fio de cobre 1,5mm ² - Amarelo	300mm
Fio de cobre 1,5mm ² - Azul	300mm
Fio de cobre 1,5mm ² - Laranja	300mm
Fio de cobre 1,5mm ² - Preto	100mm
Fio de cobre 1,5mm ² - Vermelho	100mm
Haste de celeron 20x20x170mm	1
Motor elétrico DC 19,5V	1
Parafuso M5 X 25mm	4
Placa acrílica transparente 318x200x10mm	1
Placa para circuito impresso 150x150mm	1
Porca de acabamento M10	4
Porca sextavada M10	4
Rolamento rígido de esferas cód. 6201	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

A etapa seguinte foi a confecção das trilhas de cobre e da haste para as escovas superiores. É considerada a mais complexa e mais trabalhosa a ser feita, exigindo maior habilidade do executor. A confecção das trilhas de cobre na placa de circuito impresso tem como ponto inicial o desenho da placa no papel. Utilizando-se o software AutoCAD, foi desenhado em escala **1:1** todas as trilhas com todos os detalhes. Na Figura 25 é mostrado o desenho da placa e as cotas para os furos da haste.

Figura 25 – Trilhas de cobre e cotas dos furos da haste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

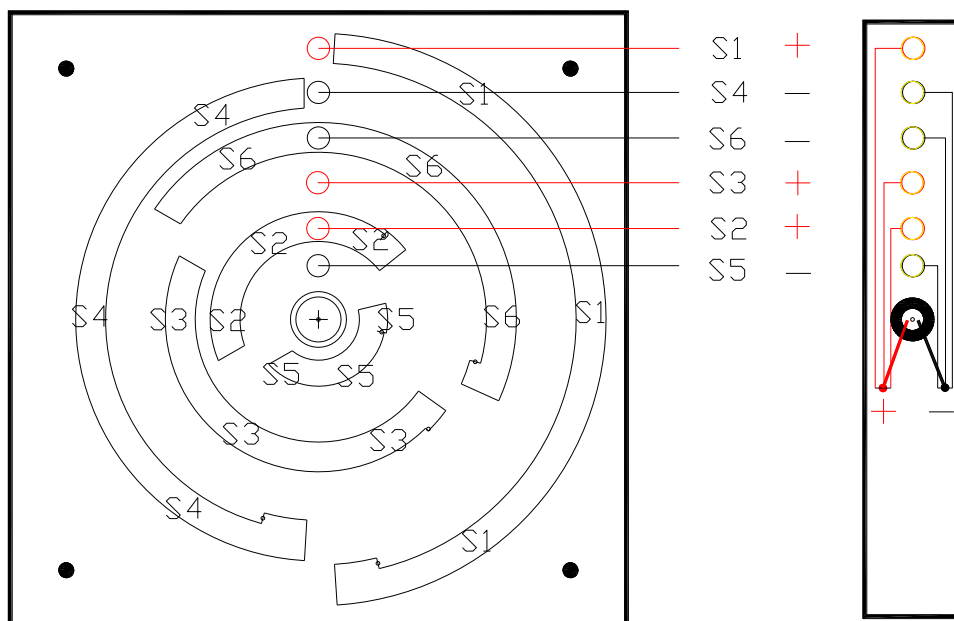
A impressão deve ser feita em impressora laser e em papel fotográfico. A figura à direita apresenta as cotas para os seis furos de diâmetro 6 mm da haste, levando em conta a posição de cada escova.

Assim nas trilhas de cobre a impressão papel ficou preta, e no restante do papel continuou branco. Com um ferro de passar roupas o pó da impressão a laser foi fixado na placa de cobre. Após aguardar algumas horas o papel foi facilmente retirado da placa ficando apenas o pó preto que estava no papel.

Em seguida a placa foi imersa em uma solução de percloroeto de ferro (FeCl_3). Onde estava o pó fixado, isto é, as trilhas, o cobre não sofreu o ataque químico, mas no restante da placa o cobre foi corroído. Para finalizar a confecção da placa, o pó que permaneceu sobre as trilhas é retirado com auxílio de uma linha d'água de granulometria 600 para finalmente as trilhas de cobre serem finalizadas.

Depois de ter sido confeccionada a placa com as trilhas foi furada a haste para fixação as escovas. As furações executadas na haste necessitaram de uma grande precisão, pois deveriam estar alinhadas completamente com as trilhas de cobre. Para isso utilizou-se o auxílio mais uma vez do AutoCAD®. O software pôde fornecer as medidas corretas e exatas para estas furações. Na Figura 26 são mostradas as trilhas de cobre, furos da haste e os fios positivos e negativos com respectivas ligações às escovas nos furos.

Figura 26 – Placa com trilhas, haste com furos e ligação das escovas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Estando a estrutura pronta, as seis escovas superiores foram fixadas, colocando-se uma mola em cima de cada uma das escovas, de forma a pressioná-las, garantindo o perfeito contato entre as escovas e as trilhas de cobre.

A fiação proveniente do eixo de alternador foi ligada nas respectivas escovas. O fio preto foi ligado às escovas que correspondem à parte negativa, e o fio vermelho foi ligado às escovas que correspondem à parte positiva.

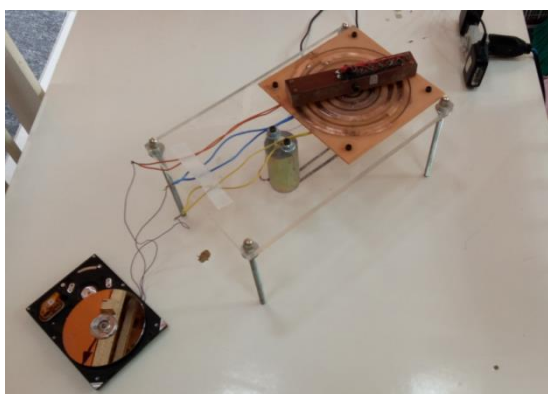
Abaixo da placa de cobre foi feito o cabeamento final, ou seja, em cada uma das trilhas de cobre foi soldado um fio condutor. Cada par de chaves, ou trilhas de cobre, foram ligados em fios da mesma cor, destacando, portanto, as três fases. Cada uma das fases é formada por dois fios de mesma cor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. TESTES NO INVERSOR

Após a fase de montagem do inversor, o mesmo passou por testes de funcionamento. Na Figura 27 é apresentada a fotografia do inversor de frequência eletromecânico completamente montado e pronto para a execução dos testes.

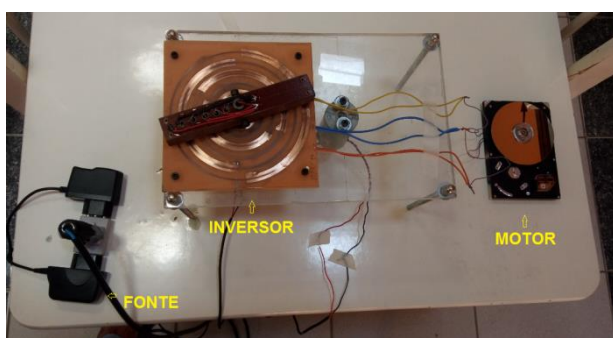
Figura 27 – Fotografia do inversor montado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 28, tem-se o esquema completo da conversão de energia: à esquerda estão as fontes de tensão utilizadas. Elas servem como retificadores, pois o dispositivo utiliza tensão da rede como fonte de energia. Deste modo, as fontes retificam a corrente alternada da rede, preparando-a para conectar ao inversor de frequência. Nesta figura nota-se que existem duas fontes, pois uma delas alimenta o circuito principal do inversor ao passo que a outra alimenta o motor elétrico DC.

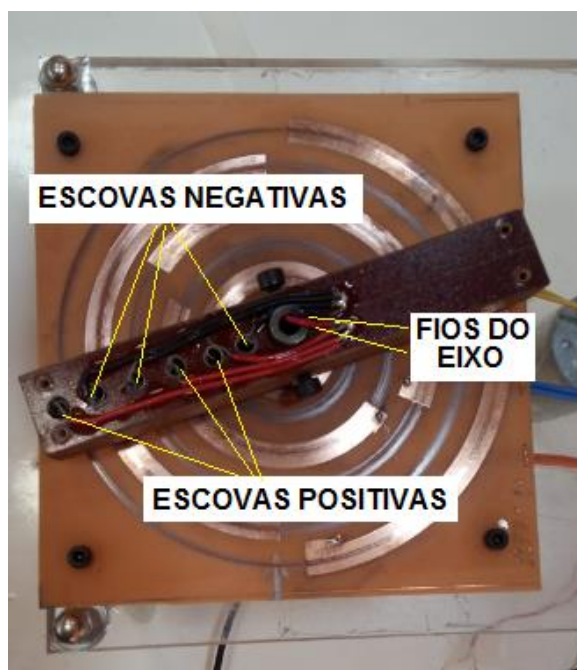
Figura 28 – Vista superior do inversor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29 é mostrado em detalhe como foram feitas as ligações dos fios do eixo, o positivo e o negativo, até as escovas. Nota-se que três destes fios estão ligados ao fio negativo proveniente do eixo e três estão ligados ao fio positivo.

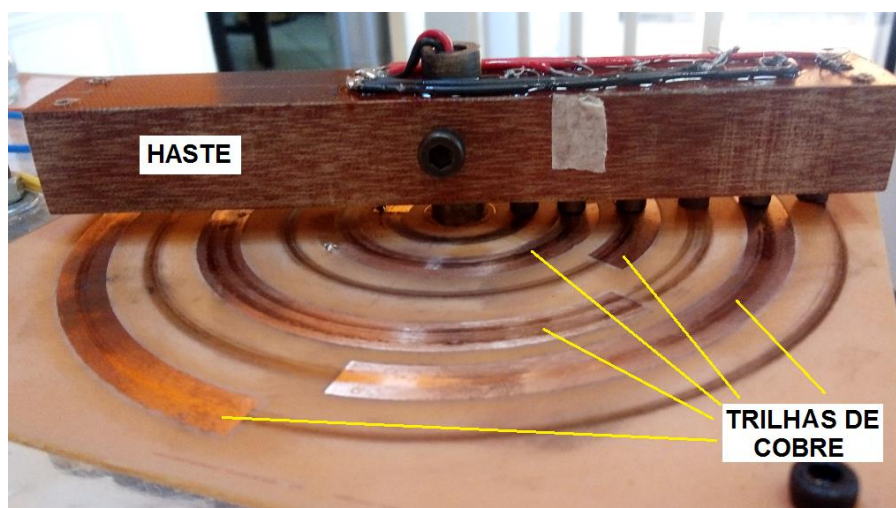
Figura 29 – Detalhe de posicionamento das escovas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 30 está detalhada a disposição da haste em relação as trilhas de cobre. Ao fundo a aparecem as seis escovas superiores responsáveis pela comutação no circuito.

Figura 30 – Detalhe da haste e dos trilhos de cobre.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 31, nota-se que entre uma chave e outra existe um espaço necessário, que serve de transição entre a saída de uma escova e entrada da seguinte. Isto porque na construção do inversor as chaves adjacentes são pares da mesma fase, ou seja, uma chave conduz positivamente e a outra negativamente. Assim, se não houvesse o espaço, existiria um curto circuito na fase durante a transição. Este espaçamento foi projetado para ser ligeiramente maior do que o diâmetro da escova.

Figura 31 – Detalhe da transição entre uma escova e outra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante os testes observou-se também que quando o dispositivo é colocado em funcionamento o motor de HD simplesmente sai da inércia e passa a oscilar, enquanto a haste do inversor gira normalmente. Isto se dá pelo fato de que o motor da HD é síncrono, e quando o inversor dá a partida de forma rápida e com baixa tensão de alimentação a sincronização não ocorre de forma correta, fazendo o motor não funcionar corretamente. Quando se utilizou uma fonte de maior tensão, o motor funcionou corretamente, sem haver oscilações. A sincronia no motor é obrigatória, pois diferente dos motores assíncronos, o motor síncrono não permite variações em termos de rotação. Assim, não há uma rampa de aceleração, e sim a partida já na rotação de trabalho. Por este motivo, se o motor não sincronizar às fases do inversor, ou seja, se não rotacionar na mesma velocidade que o inversor ele não funciona corretamente.

Por fim, o sentido de giro do motor depende do sentido de giro do inversor. Se o inversor gira no sentido anti-horário o motor girará num determinado sentido. Caso o inversor girar no sentido horário o motor também vai trocar o seu sentido de giro. Além disso, a

ligação da fiação do motor também possui efeito sobre o sentido de giro: ao se inverter duas fases, o motor também obrigatoriamente vai mudar seu sentido de giro.

5.2. TESTES COM O OSCILOSCÓPIO

Para efetuar estes testes, o inversor foi ligado em um osciloscópio, o qual exibia a forma de onda final gerada pelo dispositivo. Na Figura 32 é exibida a tela do osciloscópio utilizado, o qual mostra o formato de onda gerado pelo inversor. Assim como esperado, a onda é do tipo quadrada. Devido à limitação de aparelhagem para o osciloscópio, utilizou-se no exemplo somente uma das fases. As outras duas são semelhantes. Os picos apresentados entre as ondas provêm da comutação pura, sem filtros, de forma totalmente mecânica.

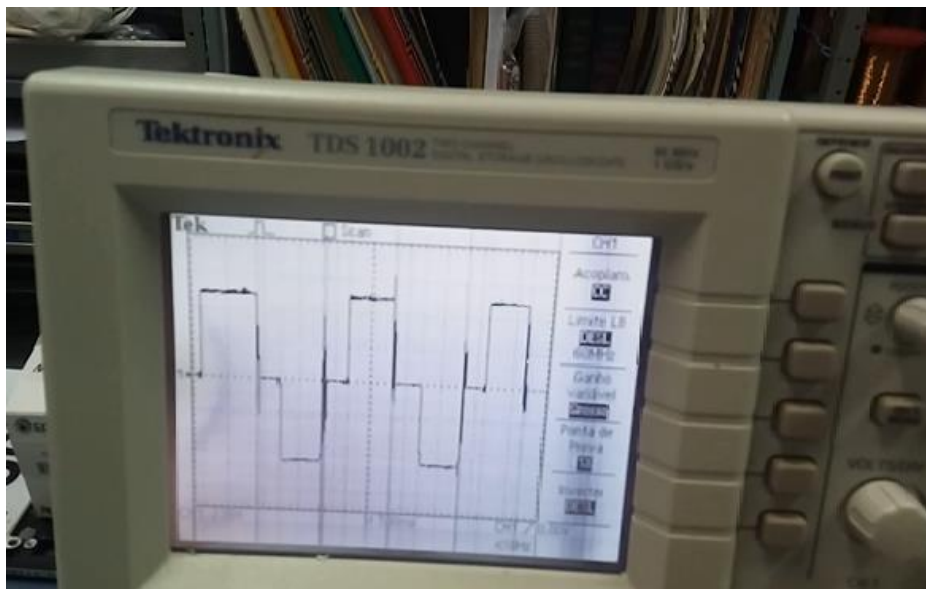
Figura 32 – Formato de onda gerado durante os testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro fato observado durante os testes foi que, conforme o esperado, a frequência da onda depende da rotação do inversor. Na Figura 33 é mostrada a tela do osciloscópio quando a rotação do inversor era mais baixa, feita manualmente. Nota-se que a onda possui formato mais alargado, apresentando maior período se comparada às ondas formadas em mais alta rotação.

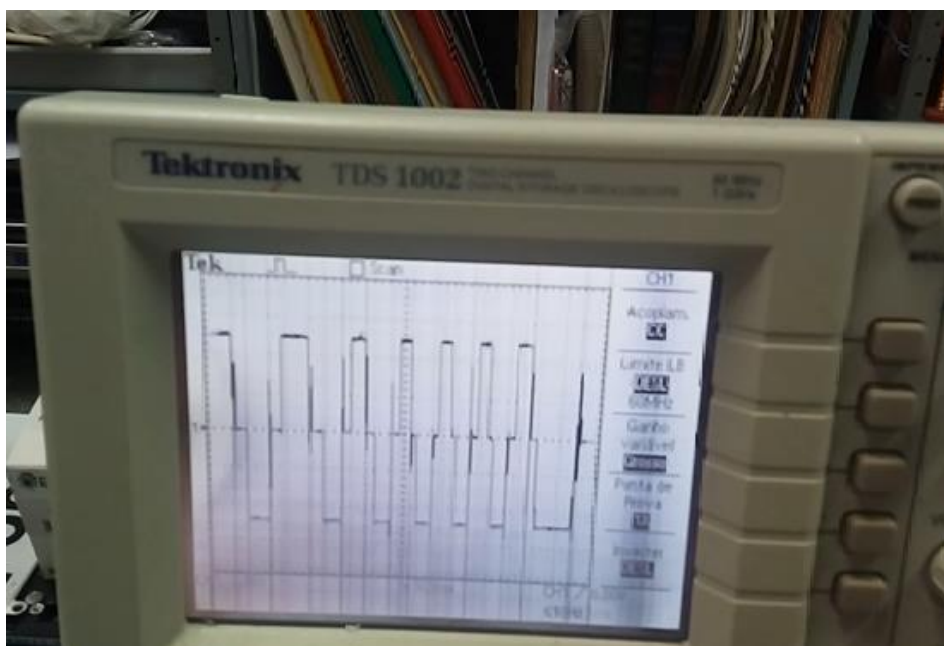
Figura 33 – Onda gerada em rotação mais baixa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 34 é mostrada a tela do osciloscópio no momento em que o inversor possui maior velocidade de rotação. Se comparada à figura anterior, nota-se um formato mais achatado, sendo que a onda possui, portanto, menor período.

Figura 34 – Onda gerada em rotação mais alta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo sido vistas todas as etapas de projeto e construção de um inversor de frequência eletromecânico, conclui-se que este trabalho obteve êxito diante do que foi proposto, atendendo o que foi inicialmente programado. O inversor ao final foi de fácil construção e principalmente, de fácil visualização de funcionamento do método de comutação por seis passos. E, será muito útil didaticamente.

Se comparado com o outro tipo de inversor eletromecânico anteriormente construído neste departamento, obteve-se o mesmo resultado final, porém de forma mais simples e direta.

Apesar de não ser um projeto futurista, mostra de forma clara e inovadora o funcionamento de um inversor de frequência. A inovação está no fato de que apesar de ser um modelo mecanicamente bastante simples, traz a capacidade de ilustrar facilmente como a comutação que acontece durante o processo de transformação de corrente DC para corrente AC trifásica de frequência controlada. Em termos de comparação, os modelos comerciais, que utilizam a eletrônica, possuem tecnologia muito superiores, porém impossibilitam que o processo seja observado por uma pessoa, devido o mesmo ocorrer de forma totalmente eletrônica, ou seja, não existem peças girantes ou movimentos aparentes. O que há é somente movimentação de elétrons.

Por fim, este trabalho pôde ainda demonstrar como múltiplas áreas da engenharia podem se complementar, unindo-se conhecimentos tanto da área da engenharia mecânica quanto da engenharia elétrica. Este dispositivo apesar de ser estritamente mecânico, reproduz de forma muito clara o comportamento de um sistema eletrônico simples.

Recomendam-se novos estudos envolvendo o inversor de frequência eletromecânico, englobando ao dispositivo um controlador de velocidade para o motor DC de acionamento, aprimorando o projeto ainda mais.

REFERÊNCIAS

PETRY, C. A. Introdução a eletrônica de potência. In:____. **Curso básico de eletrônica de potência**. 2013. cap 1, f. 1-21. Apostila da disciplina Eletrônica de Potência - IFSC, Santa Catarina, 2013. Disponível em: <http://professorpetry.com.br/Ensino/Eletronica_Potencia/Capitulo_1.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2018.

CANESIN, C. A. Teoria básica dos inversores. In:____. **Conversores CC-CA: inversores**. cap 1, f. 1-117. Apostila da disciplina Eletrônica de Potência 2 - UNESP, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lepnovo/materialdosaluno/s/inversores_sqw_e_pwm.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2018.

POMILIO, J. A. et al. Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. in:____. **Conversores CC-CA - Inversores**. cap 4, f. 1-15. Material didático da disciplina Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, 2012. Disponível em: < <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/CAP4.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2018.

WEG. **Guia de aplicação inversores de frequência**. 2. ed. Jaraguá do Sul: WEG, 2004. 192 p. Disponível em: <http://www.mundoeletrico.com/downloads/Guia_de_Aplicacao_de_Inversores_de_Frequencia.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2018.

GALLANTE, C.; MENDES, J. **Conversores CC-CA: inversores**. 2009. f. 1-15. Material didático da disciplina Eletrônica de Potência – Faculdade da Fundação Instituto Tecnológico de Osasco, Osasco, 2009. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/5270979/conversores_cc_ca>. Acesso em: 22 ago. 2018.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: MAKRON Books do Brasil Editora Ltda, 1999. 819 p.

AHMED, A. **Eletrônica de potência**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2000. 478 p.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Introdução ao estudo dos conversores CC-CA**. 1ª ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2005. 489 p.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M. **Power electronics: converters, applications and design**. 2. ed. Wiley India, 2007. 824 p.

HARTMANN, R. I.; MUNIZ, M. C. **Projeto e implementação de um conversor CC-CA trifásico para acionamento e controle escalar de um motor de indução trifásico utilizando DSP**. 2007. 132 f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em:

<http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/engenharia/tcc/monografia_conversor_escalar_2007.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2018.

GUEDES, S. D. **Projeto de inversor trifásico aplicado ao acionamento de motor de indução**. 2015. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014074.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2018.

FRANCHI, C. M. **Inversores de frequência: teoria e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009. 193p.

MAURO, V. **Pesquisa, projeto e Construção de um Inversor de frequência trifásico eletromecânico**. 2016. 41 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.