

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS PONTA GROSSA**

**JHONATHAN JUNIO DE SOUZA  
RODRIGO FERREIRA SAMPAIO  
WELINTON SCHRAM**

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE UM AQUECEDOR DE ÁGUA INDUTIVO  
PARA RESERVATÓRIOS**

**Ponta Grossa, PR.  
2014**

**JHONATHAN JUNIO DE SOUZA  
RODRIGO FERREIRA SAMPAIO  
WELINTON SCHRAM**

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE UM AQUECEDOR DE ÁGUA INDUTIVO  
PARA RESERVATÓRIOS**

Trabalho de diplomação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial do Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Mendes Casaro.

**Ponta Grossa, PR  
2014**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE UM AQUECEDOR DE ÁGUA INDUTIVO PARA RESERVATÓRIOS**

JHONATHAN JUNIO DE SOUZA  
RODRIGO FERREIRA SAMPAIO  
WELINTON SCHRAM

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em **13 de agosto de 2014** como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerado o trabalho aprovado.

---

**Prof. Dr. Marcio Mendes Casaro**  
Prof. Orientador

---

**Prof. Me. Edison Luiz Salgado e Silva**  
Membro titular

---

**Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira**  
Membro titular

---

**Prof. Dr. Julio Cesar Guimarães**  
Responsável pelos Trabalhos de  
Conclusão de Curso

---

**Prof. Dr. Marcio Mendes Casaro**  
Coordenador do Curso  
UTFPR – Campus Ponta Grossa

- A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE ARQUIVADA NA  
SECRETARIA DO CURSO -

## RESUMO

SOUZA, Jhonathan Junio de; SAMPAIO, Rodrigo Ferreira; SCHRAM, Welinton. **Análise e desenvolvimento de um aquecedor de água indutivo para reservatórios.** 2014. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

Aquecimento de água é um processo que está presente em vários setores, como em residências, comércios e indústrias. Este item pode trazer conforto para ambientes residenciais ou ser uma necessidade com grande demanda para os outros setores. As fontes de energia utilizadas neste processo geralmente são: a elétrica, a gás ou solar, sendo a elétrica a mais utilizada. O fato principal se deve ao seu custo de investimento inicial ser baixo e a facilidade de instalação e operação. O presente trabalho aborda os sistemas de aquecimento de água armazenada em reservatórios térmicos conhecidos como *Boilers*. O objetivo desta pesquisa é construir e analisar um sistema de aquecimento de água por indução com menor consumo de energia que os sistemas de aquecimento por resistência. A pesquisa proposta é classificada como aplicada e exploratória, pois foi construído um sistema de aquecimento de água para servir de alternativa frente ao sistema de aquecimento por resistência. Como o estudo é feito em laboratório, pode-se catalogá-lo também como experimental.

**Palavras-chave:** Aquecedores de água. Reservatórios de água. Coletor solar. Inversores. Conversores.

## ABSTRACT

SOUZA, Jhonathan Junio de; SAMPAIO, Rodrigo Ferreira; SCHRAM, Welinton.  
**Analysis and development of an inductive water heater for reservoirs.** 2014. 59 p. Work Conclusion Course. (Technology in Industrial Automation) – Federal University of Technology - Paraná, Ponta Grossa, 2014.

Water heating is a process that is present in various industries such as in homes, businesses and industries. This item can bring comfort to residential environments or be a necessity with great demand for other sectors. The sources of energy used in this process are usually: the electric, the gas or the solar, with the electric being the most used. The main fact is due to its initial investment cost being low and ease of installation and operation. The present work deals with water heating systems stored in thermal reservoirs known as boilers. The objective of this research is to construct and analyze an induction water heating system with lower energy consumption than resistance heating systems. The proposed research is classified as applied and exploratory, since a water heating system was constructed to serve as an alternative to the resistance heating system. As the study is done in the laboratory, it can also be cataloged as experimental.

**Keywords:** Water heaters. Water reservoir. Solar collector. Investors. Converters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aquecedor a gás de passagem.....	15
Figura 2: Aquecedor a gás de acumulação.....	16
Figura 3: Aquecedor elétrico de acumulação.....	17
Figura 4: Coletor solar.....	18
Figura 5: Aquecedor Solar.....	19
Figura 6: Lavanderia Hospitalar.....	21
Figura 7: Pecuária Leiteira.....	21
Figura 8: Inversor Meia Ponte.....	23
Figura 9: Forma de onda da corrente para carga indutiva.....	23
Figura 10: Inversor Ponte Completa.....	24
Figura 11: Forma de onda para carga indutiva.....	24
Figura 12: Relação entre Corrente, Campo e Força.....	26
Figura 13: Indução eletromagnética.....	27
Figura 14: (a) Transformador Esquemático (b) Correntes de Foucault em núcleo maciço (c) correntes de Foucault em núcleo laminado.....	28
Figura 15: Comportamento magnético dos materiais ferromagnéticos.....	30
Figura 16: Topologia sugerida.....	32
Figura 17: Etapa 1 de operação.....	32
Figura 18: Etapa 2 de operação.....	33
Figura 19: Etapa 3 de operação.....	33
Figura 20: Etapa 4 de operação.....	34
Figura 21: Tensão média na carga e tensões nos capacitores.....	34
Figura 22: Pulsos de comando das chaves e Correntes nos capacitores.....	35
Figura 23: Circuito <i>Snubber</i> .....	36
Figura 24: Circuito grampeador RCD.....	37
Figura 25: Diagrama de Blocos do CI SG3524.....	38
Figura 26: Montagem Circuito SG3524.....	39
Figura 27: Diagrama interno do CI IR2183.....	40
Figura 28: Diagrama funcional do HCPL-2200.....	41
Figura 29: Relação entre pulsos no SG3524, optoacopladores e IR2183.....	41
Figura 30: Diagrama de blocos completo.....	42

Figura 31: (a) Pulsos na saída HO do IR2183, (b) Pulsos na saída LO do IR2183...	47
Figura 32: Forma de onda da tensão e corrente no indutor. ....	48
Figura 33: Potência na saída do conversor. ....	49
Figura 34: Circuito com resistência. ....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico1: Curva de aquecimento da água para o sistema indutivo. ....	50
Gráfico 2: Curva de aquecimento da água para o sistema resistivo. ....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWG -	<i>American WireGauge.</i>
CC-CA -	Corrente Contínua para Corrente Alternada.
CI -	Circuito Integrado.
CSI -	<i>Current Source Inverter.</i>
FEM -	Força Eletromotriz.
IGBTs -	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor.</i>
LED -	<i>Light Emitting Diode.</i>
MOSFET -	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.</i>
PWM -	<i>Pulse Width Modulation.</i>
RCD -	Resistor Capacitor Diodo.
SI	Sistema Internacional
VSI	<i>Voltage Source Inverter.</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_{o(avg)}$	-	Corrente Média.
$V_{o(avg)}$	-	Tensão Média.
$R$	-	Resistência.
$P_l$	-	Potência Absorvida pela Carga.
$d$	-	Razão Cíclica / Diâmetro dos Enrolamentos em Metros.
$E$	-	Energia.
$T_{on}$	-	Período da Chave Acionada.
$T$	-	Período Total.
$\varepsilon$	-	Força Eletromotriz.
$\varphi_B$	-	Fluxo Magnético.
$\vec{B}$	-	Campo Magnético.
$d\vec{A}$	-	Área Infinitesimal do Elemento.
$\vec{F}$	-	Força.
$P_f$	-	Perdas por Correntes de Foucault.
$K_f$	-	Constante de Proporcionalidade Dependente da Resistividade do Material.
$f$	-	Frequência.
$H$	-	Amplitude do Campo Magnético Aplicado Externamente.
$B$	-	Amplitude de Densidade de Fluxo Magnético Dentro do Material.
$\mu$	-	Permeabilidade Magnética.
$\mu_0$	-	Permeabilidade Magnética do Espaço Livre.
$\mu_r$	-	Permeabilidade Magnética Relativa do Material.
$P_h$	-	Perdas por Histerese.
$K_h$	-	Coeficiente de Steinmetz.
$F_s$	-	Frequência de Chaveamento.
$P$	-	Potência Dissipada pelo Resistor.
$V$	-	Tensão / Tensão Aplicada ao <i>Snubber</i> .

$\tau$ -	Constante de Tempo do Circuito RC.
$C$ -	Capacitância.
$i_{RLef}$ -	Corrente Eficaz na Carga.
$I_{RLP}$ -	Corrente de Pico na Carga.
$V_l$ -	Tensão no Indutor.
$L$ -	Indutância.
$V_c$ -	Tensão no Capacitor.
$i$ -	Corrente.
$i_{RL}$ -	Corrente na Carga.
$T_s$ -	Tempo de Chaveamento.
$N$ -	Número de Espiras.
$l$ -	Comprimento em Metros da Bobina.
$A$ -	Área de Seção Transversal do Solenóide.
$\Omega$ -	Unidade de Medida de Resistência Elétrica.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1 TEMA DA PESQUISA .....	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.3 PROBLEMA .....	12
1.4 HIPÓTESE .....	13
1.5 OBJETIVOS .....	13
1.5.1 Objetivo Geral .....	13
1.5.2 Objetivos Específicos .....	13
1.6 JUSTIFICATIVA .....	13
1.7 MÉTODO DA PESQUISA .....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	13
2.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	13
2.1.1 Aquecedor a Gás de Passagem.....	14
2.1.2 Aquecedor a Gás de Acumulação.....	15
2.1.3 Aquecedor Elétrico de Passagem .....	16
2.1.4 Aquecedor Elétrico de Acumulação .....	16
2.1.5 Aquecedor Solar.....	17
2.2 APLICAÇÕES PARA AQUECEDORES DE ÁGUA.....	19
2.2.1 Residencial.....	19
2.2.2 Comercial (ou Empresarial).....	20
2.2.3 Industrial.....	21
2.3 CONVERSORES CC-CA .....	22
2.3.1 Inversores.....	22
2.3.2 Topologias de Conversores CC-CA .....	22
2.3.2.1 Conversor CC-CA de meia ponte.....	22
2.3.2.2 Conversor CC-CA de ponte completa .....	24
2.4 CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS .....	25
2.4.1 Indução Eletromagnética.....	25
2.4.2 Lei de Faraday .....	25
2.4.3 Lei de Lenz.....	26
2.4.4 Correntes de Foucault.....	27
2.4.5 Efeito Joule.....	28
2.4.6 Magnetização.....	29

3. METODOLOGIA.....	31
3.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA .....	31
3.2 CONVERSOR .....	31
3.3 CIRCUITO DE CONTROLE .....	37
3.3.1 Circuito de Comando.....	39
3.3.2 Isolamento Galvânico.....	40
3.4 PROJETO DO INDUTOR.....	42
3.4.1 Especificação da Potência .....	42
3.4.2 Cálculo da Corrente Eficaz na Carga.....	43
3.4.3 Determinação da Resistência.....	43
3.4.4 Determinação da Indutância.....	43
3.4.5 Definição do Material Susceptor.....	44
3.4.6 Cálculo do Número de Espiras.....	45
3.4.7 Construção do Indutor.....	46
4 TESTES EXPERIMENTAIS .....	46
4.1 TESTE PLACA DE CONTROLE .....	46
4.3 TESTE COM INDUTOR .....	47
4.4 TESTE DE AQUECIMENTO .....	49
4.5 TESTE COM RESISTÊNCIA.....	50
5 CONCLUSÃO.....	52
REFERÊNCIAS.....	53
Apêndice 1 – Esquemático Placa de Potência.....	55
Apêndice 2 – Layout Placa de Potência.....	56
Apêndice 3 – Esquemático da Placa de Controle .....	57
Apêndice 4 – Layout da Placa de Controle .....	58
Anexo 1 – Tabela de Fios AWG .....	59

## 1. INTRODUÇÃO

Aquecimento de água é um processo que está presente em vários setores, como em residências, comércios e indústrias. Este item pode trazer conforto para ambientes residenciais ou ser uma necessidade com grande demanda para os outros setores.

As fontes de energia utilizadas neste processo geralmente são: a elétrica, a gás ou solar (MARQUES, 2006), sendo a elétrica a mais utilizada. O fato principal se deve ao seu custo de investimento inicial ser baixo e a facilidade de instalação e operação (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007). Após a escolha da fonte de energia o usuário seleciona o tipo de sistema de alimentação dos equipamentos, sendo o de passagem ou de acumulação, conhecido como *Boiler*.

Em função do crescimento da demanda de energia elétrica, surge a preocupação com o rendimento dos sistemas consumidores de energia. Buscar alternativas para diminuir o gasto de energia, não só minimiza o impacto ambiental, como também contribui para a economia e para geração de emprego.

Com base nestas afirmações será analisada neste trabalho a possibilidade de aquecer água através da dissipação de potência em um susceptor ferromagnético no qual serão induzidas correntes elétricas de alta frequência. Essas correntes serão geradas por um inversor chaveado. Uma vez que a potência dissipada depende da frequência, espera-se que seja obtido um desempenho semelhante ao de uma resistência elétrica, porém com menor consumo de energia.

### 1.1 TEMA DA PESQUISA

O presente trabalho aborda os sistemas de aquecimento de água armazenada em reservatórios térmicos conhecidos como *Boilers*.

### 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Análise e desenvolvimento de um sistema de aquecimento de água através da indução de correntes de Foucault em um susceptor ferromagnético.

### 1.3 PROBLEMA

A indução de correntes de Foucault em um susceptor através de um conversor de corrente contínua para corrente alternada (CC-CA) de alta frequência pode aquecer água de maneira mais eficiente que os sistemas à resistência?

## 1.4 HIPÓTESE

A utilização de um conversor CC-CA gerará um campo magnético de alta frequência em um material ferromagnético, induzindo correntes de Foucault em seu interior e aquecendo a água em contato com o mesmo.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é construir e analisar um sistema de aquecimento de água por indução com menor consumo de energia que os sistemas de aquecimento por resistência.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Projetar e construir um conversor CC-CA de alta frequência;
- Definir o material do susceptor e construir o indutor;
- Efetuar testes de aquecimento para validação do protótipo;
- Comparar as técnicas de aquecimento por resistência e por indução;

## 1.6 JUSTIFICATIVA

Os sistemas resistivos utilizados em reservatórios funcionam pela passagem de uma corrente elétrica através de uma resistência. O calor gerado nesta resistência é transferido para o meio. O circuito proposto visa substituir a resistência utilizada com menor consumo de energia e conseqüentemente menor custo.

## 1.7 MÉTODO DA PESQUISA

A pesquisa proposta é classificada como aplicada e exploratória, pois foi construído um sistema de aquecimento de água para servir de alternativa frente ao sistema de aquecimento por resistência. Como o estudo é feito em laboratório, pode-se catalogá-lo também como experimental.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA.

O projeto de um sistema de aquecimento de água deve partir primeiramente da escolha do tipo de energia responsável por esquentar a água, esta podendo ser elétrica, a gás ou solar (MARQUES, 2006). Em seguida é definido o sistema de

alimentação dos equipamentos, existem dois tipos: por acumulação ou de passagem.

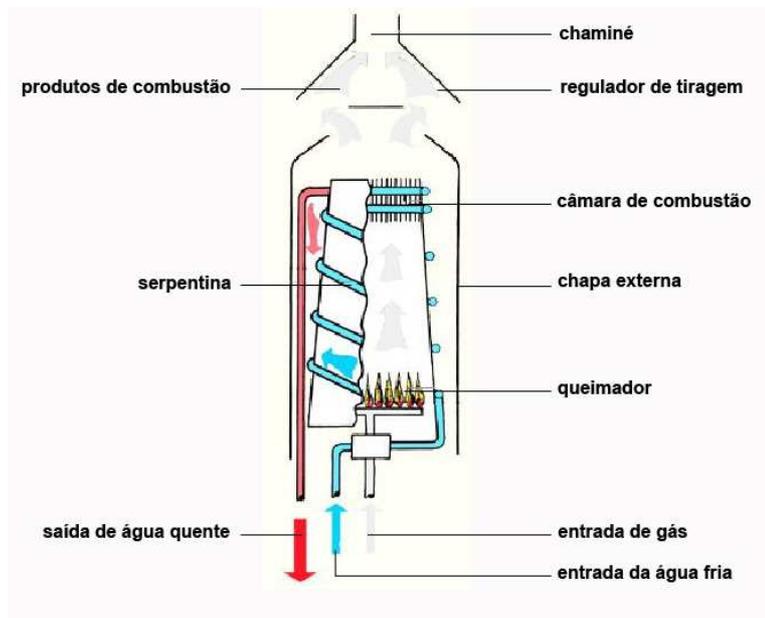
No sistema por acumulação, a água é aquecida e fica em um tanque isolado termicamente, a vantagem deste sistema é que sempre haverá um estoque de água quente em seu interior, outro fato é o de poder atender a vários pontos ou um ponto de grande consumo. Suas dimensões são muito maiores que o do sistema por passagem

Num sistema por passagem, a água é aquecida à medida que passa por um aparelho, normalmente o próprio fluxo de água aciona a fonte geradora de calor, estes tipos de equipamentos ocupam menos espaço comparado com equipamentos de acumulação.

#### 2.1.1 Aquecedor a Gás de Passagem.

Um sistema ainda pouco usado no Brasil, sendo uma alternativa para reduzir o consumo de energia em períodos de racionamento (CASAEIMÓVEIS, 2011). É um equipamento destinado para o aquecimento de água, para os mais diversos fins, principalmente para o banho.

O consumo é imediato, não existindo acumuladores, após acionado ocorre à circulação contínua da água em seu interior que vai se aquecendo gradualmente. Este fluxo que é acionado quando um ponto de consumo é aberto, movimenta um dispositivo no aparelho aquecedor liberando o gás, juntamente um sistema de faísca acende a chama, à medida que a água circula por serpentinas sua temperatura aumenta, na Figura 1 é apresentado o funcionamento interno deste tipo de aquecedor.



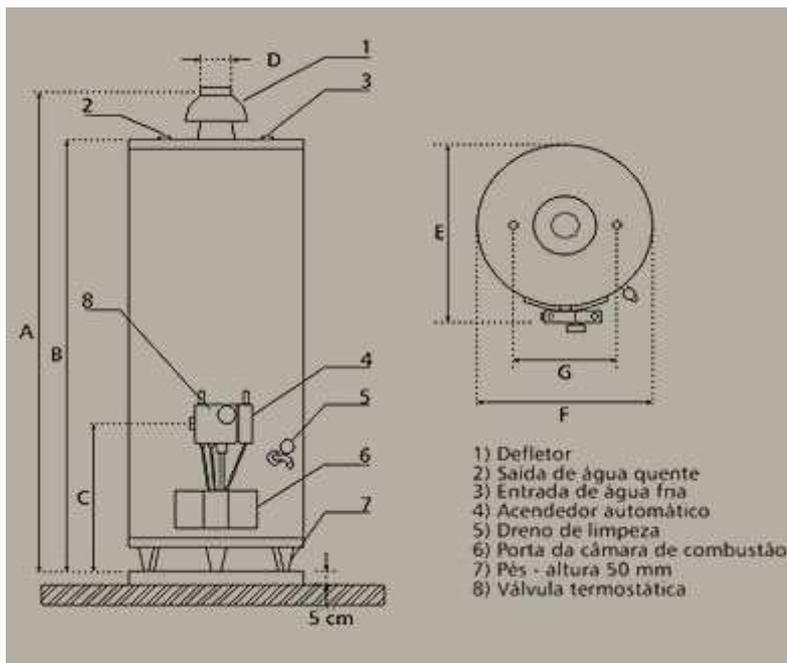
**Figura 1:** Aquecedor a gás de passagem.

Fonte: <http://www.soltecsolar.com.br>, 2013.

### 2.1.2 Aquecedor a Gás de Acumulação

Neste equipamento é necessário que exista um reservatório de acumulação, este reservatório geralmente é um cilindro com revestimento térmico, no centro é mantida acesa uma chama para o aquecimento da água. A temperatura é mantida nos valores desejados através de termostatos, o controle permite atingir valores para um consumo imediato ou posterior. A chama que permanece acesa o tempo todo é conhecida como chama piloto.

A Figura 2 exemplifica um sistema de aquecimento a gás de acumulação, é possível observar a localização central do queimador no interior do reservatório.



**Figura 2:** Aquecedor a gás de acumulação.

**Fonte:** <http://www.cumulus.com.br>, 2013.

### 2.1.3 Aquecedor Elétrico de Passagem

Este tipo é o mais comum e presente nas residências do Brasil (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2005). Exemplos de aquecedor elétrico de passagem são os chuveiros, aquecedores de torneiras e similares. Contém características compactas, e facilidade de instalação, uma vez que dispensam a passagem de tubulações de água quente.

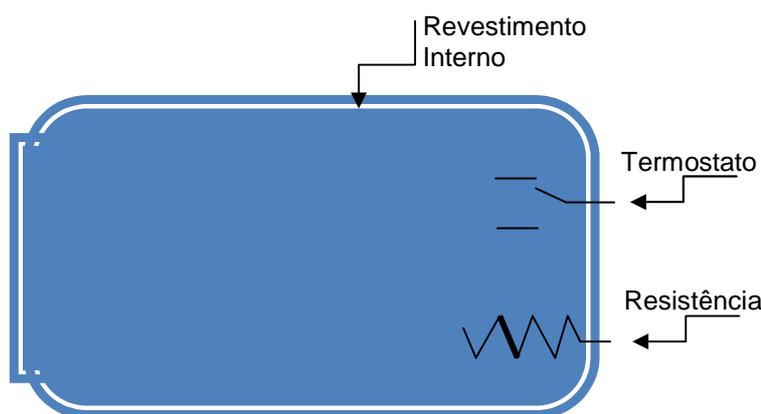
Da mesma forma que o aquecedor a gás de passagem, o princípio de acionamento da fonte de energia é o mesmo, sendo o próprio fluxo de água o responsável por tal.

Para a aplicação em chuveiro elétrico a desvantagem está em sobrecarregar o sistema elétrico nos horários de pico (das 18 às 21 horas), em que geralmente estes equipamentos são ligados (SOCIEDADE DO SOL, 2003). Em períodos de intenso frio a água não é aquecida suficientemente, o usuário tem a opção de diminuir o volume de passagem da água para compensar, o que se torna desconfortável.

### 2.1.4 Aquecedor Elétrico de Acumulação

Este equipamento é formado por um reservatório fechado e isolado termicamente, conhecido como *Boiler*, existe neste aquecedor uma resistência

elétrica interna para possibilitar o aquecimento da água e um sistema de controle através de termostato controlado pelo usuário, na Figura 3 tem-se a ilustração deste sistema, para um banho em geral este controle é de 55° a 65° Celsius, apesar de um banho não passar dos 40° Celsius (ALTOÉ, FILHO e CARLO, 2012), este acréscimo é necessário para manter a água aquecida frente ao volume do reservatório e ao tempo de uso.



**Figura 3:** Aquecedor elétrico de acumulação.

**Fonte:** Autoria Própria

Sua eficácia na geração de água quente permite que a água chegue mais rapidamente ao ponto de consumo e também o de atender vários pontos.

Apesar de sua potência ser menor que a de um chuveiro elétrico, neste sistema as resistências devem trabalhar ininterruptamente para manter a água aquecida. Para reduzir o consumo são instalados *timers* que ligam o sistema em um horário determinado, mantendo desligado o restante do dia.

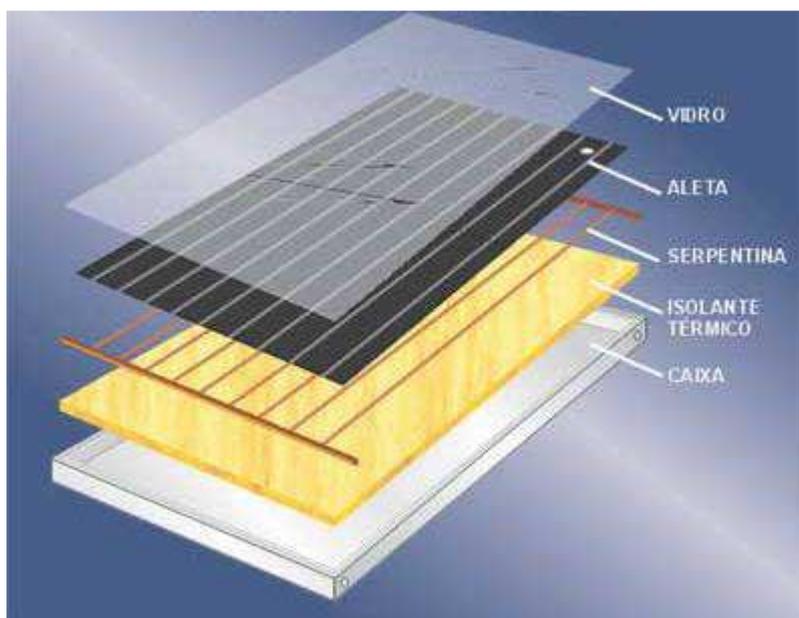
Ao contrário do aquecedor elétrico de passagem ao aumentar a vazão de água a temperatura não cai para uma pressão constante.

A eficiência térmica estimada neste tipo de aquecedor é em torno de 70%, não passando a ser maior pelo fato de perdas de calor pelos dutos até chegar ao usuário e também perda de calor pela superfície externa do reservatório (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

#### 2.1.5 Aquecedor Solar

Nos sistemas de aquecimento solar mais simples a estrutura é composta por coletores solares (placas) e um reservatório térmico (*Boiler*).

Os coletores que são responsáveis pela absorção da energia do sol são compostos por vidros, os raios de sol ao atravessarem esquentam pequenas aletas feitas de cobre ou alumínio, uma tintura escura favorece a absorção máxima da radiação, este calor é transferido das aletas para serpentinas onde circula a água na Figura 4 tem-se uma vista explodida de um coletor solar.



**Figura 4:** Coletor solar.

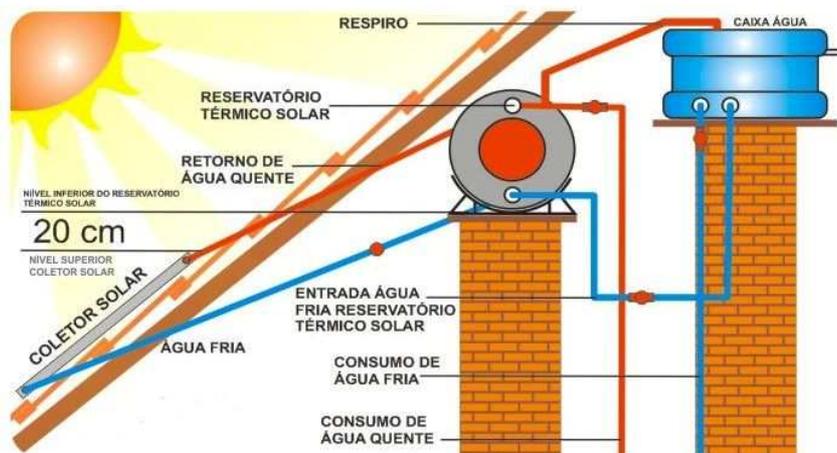
**Fonte:** <http://www.jmsaquecimento.com.br>, 2013.

A circulação da água pode acontecer de duas maneiras: circulação por termossifão ou circulação forçada ou bombeada.

Em um sistema natural a água circula entre os coletores e o reservatório térmico por um processo chamado de termossifão, seu funcionamento é baseado nas correntes de convecção naturais dos fluídos. A água nos coletores é mais quente, portanto menos densa que a água presente no reservatório, a água fria passa a empurrar a água quente criando a circulação.

O processo de circulação da água também pode ocorrer de forma forçada, através de bombas de sucção, geralmente esta técnica é utilizada onde a demanda de água é maior, por exemplo, em piscinas.

O armazenamento no reservatório segue os mesmos cuidados com isolamento térmica dos outros sistemas de aquecimentos por acumulação. Na Figura 5 está o sistema de aquecimento solar por termossifão com todas as partes envolvidas.



**Figura 5:** Aquecedor Solar.

Fonte: <http://www.pixmule.com>, 2013.

## 2.2 APLICAÇÕES PARA AQUECEDORES DE ÁGUA

Existe uma variedade de sistemas onde se pode utilizar a água aquecida: Para a melhora de processos industriais, para o lazer e o benefício das pessoas e para contribuir com algumas tarefas realizadas no dia-a-dia.

A disponibilidade de água quente sempre será imprescindível, como em restaurantes, hotéis, lavanderias, hospitais, motéis, etc. Houve também uma grande evolução nas exigências de conforto em prédios e residências próprias, conseqüentemente a instalação de água quente é fato corriqueiro na maioria dos locais.

As aplicações para água aquecida armazenada em *Boilers* podem ser divididas basicamente em três setores:

- Residencial
- Comercial (ou Empresarial)
- Industrial

### 2.2.1 Residencial

Casas e edifícios residenciais utilizam *Boilers* como reservatórios de água quente, tendo em média 25 litros de água como gasto por morador, a uma média de 70 graus Celsius. Assim, tem-se água quente o ano inteiro,

Ter uma piscina em casa é um luxo, mas que se utiliza muito pouco, principalmente em regiões frias. Com a utilização de aquecedores, pode-se ter a

piscina a 28 graus Celsius em média todos os dias do ano, proporcionando um aumento significativo na sua utilização.

### 2.2.2 Comercial (ou Empresarial)

- Hotéis/Motéis: utilização pelos hóspedes para banho e necessidades além da lavagem de louças, roupas de cama etc.
- Laboratórios: assepsia e esterilização de materiais diversos, em laboratórios de análises clínicas, hospitais, clínicas médicas, clínicas odontológicas, centros de pesquisa, dentre outros.
- Academias: a quantidade de banhos é grande pelo grande número de pessoas que fazem exercícios físicos. Água aquecida proporciona mais comodidade aos frequentadores.
- Cozinhas (restaurantes): lavagem de louças e utensílios utilizados, cozer dos alimentos.
- Lavanderias: utilizam quase 100% de água quente para seu funcionamento, o que melhora a qualidade da lavagem de alguns tecidos específicos.
- Clubes: com locais onde se procura lazer, conforto e prática de esportes, há sempre a necessidade de água aquecida para maior comodidade de seus frequentadores.
- Quartéis: pelo grande número de pessoas alojadas nos quartéis, a demanda por água aquecida é sempre alta.
- Hospitais: utiliza-se uma grande quantidade de água quente em hospitais, sendo um grande gerador de custos fixos. A economia na redução de gastos pode ser aplicada em outros locais para melhorar o atendimento aos pacientes. Água quente para lavar roupas e itens de cama como mostra a Figura 6.



**Figura 6:** Lavanderia Hospitalar

**Fonte:** <http://sol-lua.weebly.com>, 2013

### 2.2.3 Industrial

- Cozinha Industrial: a economia é garantida durante o preparo dos alimentos, que exige grande quantidade de água quente, também utilizada na limpeza dos utensílios e equipamentos.
- Pecuária leiteira: é demonstrado pela Figura 7 o fornecimento de água quente para a higienização de equipamentos de ordenha e para a limpeza das instalações de animais em regime de confinamento, assim trazendo economia e rendimento e mais produtividade.



**Figura 7:** Pecuária Leiteira

**Fonte:** <http://www.cpt.com.br>, 2013

Existe uma infinidade de processos industriais que se utilizam de água aquecida, por exemplo: petroquímica, fertilizantes, setor químico, farmacêutico, alimentício, autopeças, papel e celulose.

Uma vez que as indústrias necessitam de lucro, qualquer economia sempre é bem vinda e torna os processos industriais cada vez mais compatíveis com o desenvolvimento econômico.

## 2.3 CONVERSORES CC-CA

### 2.3.1 Inversores

Conversores CC-CA também são chamados de Inversores. São circuitos estáticos que convertem corrente e tensão contínua em uma saída alternada com frequência, corrente e tensão desejadas. Embora não-senoidal, a saída possui uma forma de onda periódica que pode ser considerada como tal (AHMED, 2000). Segundo Rashid (1999), o ganho do inversor é a relação entre a tensão de saída CA e a tensão de entrada CC. A variação do ganho do inversor normalmente é feita através de modulação da largura de pulso, em inglês *pulse width modulation*, (PWM).

Geralmente os inversores são classificados quanto ao número de fases e quanto aos dispositivos semicondutores utilizados.

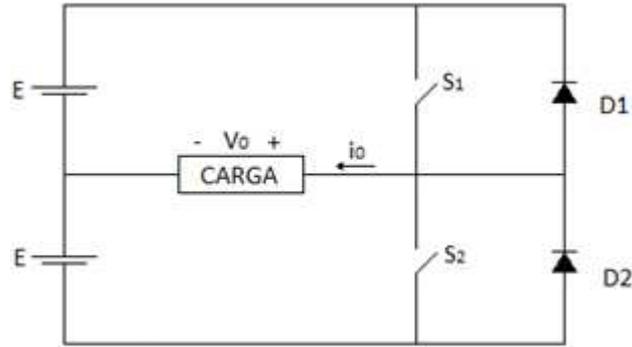
Quando o inversor é alimentado por uma fonte de corrente CC é chamado de inversor fonte de corrente (CSI). Inversor alimentado por fonte de tensão CC é chamado de inversor fonte de tensão (VSI).

### 2.3.2 Topologias de Conversores CC-CA

São diversas as topologias de conversores CC-CA, a escolha de determinada topologia é feita levando-se em conta as características da alimentação disponível e da carga utilizada. A seguir serão descritas duas topologias de conversores CC-CA, o conversor de meia ponte e o conversor de ponte completa.

#### 2.3.2.1 Conversor CC-CA de meia ponte

O inversor de meia ponte é constituído de dois interruptores que funcionam complementarmente. É necessário um barramento CC simétrico. A Figura 8 mostra um conversor CC-CA monofásico de meia ponte:



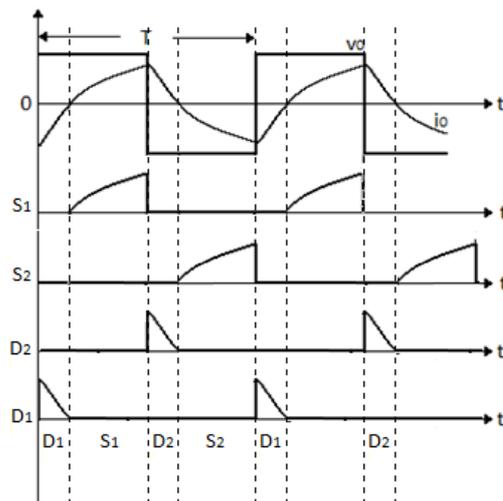
**Figura 8:** Inversor Meia Ponte

Fonte: Autoria Própria

Quando a chave  $S1$  é fechada a corrente flui da fonte superior para a carga, a tensão de saída  $V0$  é igual à  $+E$ . Ao inverter o estado das chaves, com  $S1$  aberta e  $S2$  fechada, a corrente passa a fluir da fonte inferior para a carga. A tensão de saída  $V0$  é igual à  $-E$ .

Deve-se considerar um retardo entre a comutação das duas chaves. Este retardo é chamado de tempo morto e serve para que as chaves não conduzam ao mesmo tempo, causando um curto-circuito na fonte.

Para o caso de carga indutiva, a corrente na saída flui no mesmo sentido mesmo após a inversão da polaridade da tensão. Os diodos de retorno fornecem um caminho para a corrente que varia exponencialmente. A Figura 9 mostra a forma de onda da corrente para carga indutiva.

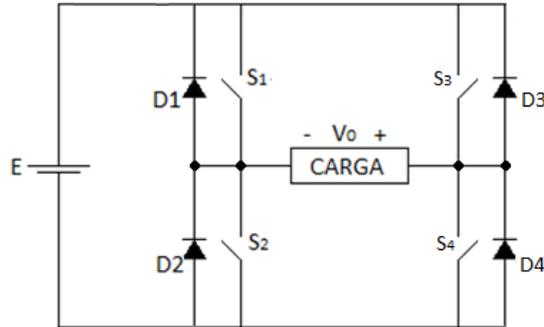


**Figura 9:** Forma de onda da corrente para carga indutiva

Fonte: Autoria Própria

### 2.3.2.2 Conversor CC-CA de ponte completa

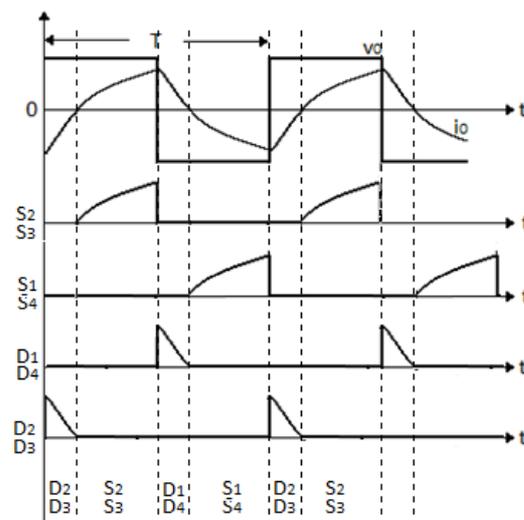
O conversor de ponte completa não necessita de uma alimentação simétrica, porém utiliza 4 interruptores realizando o chaveamento. A Figura 10 mostra um conversor CC-CA monofásico de ponte completa:



**Figura 10:** Inversor Ponte Completa

Fonte: Autoria Própria

Quando as chaves S3 e S2 são fechadas a corrente flui da fonte para a carga, a tensão de saída  $V_0$  é igual à  $+E$ . Após determinado tempo as chaves S3 e S2 entram em corte e as chaves S1 e S4 conduzem. A corrente então flui pela carga no sentido inverso sendo  $V_0$  igual a  $-E$ . Assim como na topologia de meia ponte, deve-se considerar um tempo morto entre a comutação das chaves para não causar um curto-circuito no braço. A Figura 11 demonstra as formas de onda para carga indutiva:



**Figura 11:** Forma de onda para carga indutiva

Fonte: Autoria Própria

A corrente média é dada por:

$$I_{o(avg)} = V_{o(avg)} / R \quad (1)$$

A potência absorvida pela carga é dada por:

$$P_l = V_{o(avg)}^2 / R = 2 d E^2 / R \quad (2)$$

Onde  $d$  é a razão cíclica que é dada por:

$$d = T_{on} / T \quad (3)$$

Onde  $T_{on}$  é o período em que a chave fica acionada e  $T$  o período total.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS

### 2.4.1 Indução Eletromagnética

O fenômeno da indução eletromagnética foi descoberto por Michel Faraday, através de suas pesquisas experimentais sobre eletricidade publicadas a partir de 1832 (NUSSENZVEIG, 1997).

Diversas aplicações utilizam a indução eletromagnética para seu funcionamento, destacando-se os transformadores e conversores de energia, como motores elétricos e alternadores.

### 2.4.2 Lei de Faraday

Anteriormente aos estudos de Faraday, utilizavam-se pilhas e baterias para geração de corrente elétrica em um circuito. Após experiências, Faraday notou que uma tensão elétrica é produzida em um solenóide quando o campo magnético que a atravessa é variado. A lei de Faraday afirma: “A força eletromotriz (FEM) induzida em uma espira fechada é dada pela taxa de variação de fluxo magnético, com sinal negativo, através da área delimitada pela espira”.

Matematicamente a lei de Faraday pode ser expressa por:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (4)$$

Onde  $\varphi_B$  é o fluxo magnético representado por:

$$\varphi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B dA \cos\theta \quad (5)$$

Onde:

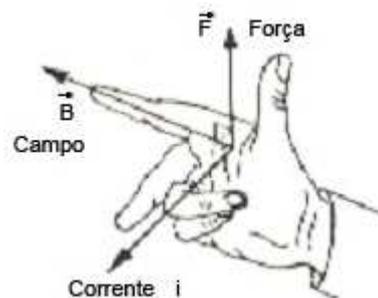
$d\vec{A}$  – área infinitesimal do elemento;

$\theta$  – ângulo entre  $\vec{B}$  e  $d\vec{A}$ ;

$\vec{B}$  - Campo magnético.

O campo magnético representado por  $\vec{B}$  é uma grandeza vetorial associada a cada ponto no espaço. O campo magnético é criado nas vizinhanças de uma carga elétrica em movimento e exerce uma força  $\vec{F}$  sobre outras cargas ou correntes que se movam no interior do campo (YOUNG, 2009).

Os sentidos da FEM induzida, do campo magnético e da força são relacionados pela regra da mão direita, como é visto na Figura 12.



**Figura 12:** Relação entre Corrente, Campo e Força.

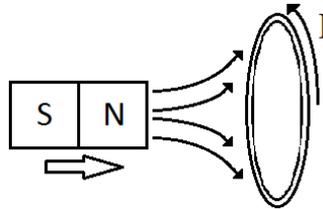
Fonte: <http://www.dombosco.sebsa.com.br>

#### 2.4.3 Lei de Lenz

Lenz foi um cientista alemão que reproduziu muitas das experiências feitas por Faraday. A lei de Lenz afirma: “O sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ela se opõe à causa que produz esse efeito”.

A corrente induzida no interior da espira gera um campo magnético em torno de si, este campo tende a se opor a variação do campo original. Ou seja, a corrente induzida não se opõe ao fluxo magnético, mas sim à variação do fluxo magnético através do circuito.

Na Figura 13, a aproximação do imã gera uma corrente na espira, esta corrente por sua vez gera um campo magnético contrário ao campo do imã, opondo-se ao movimento de aproximação.



**Figura 13:** Indução eletromagnética

Fonte: Autoria própria

A lei de Lenz fornece o sentido da corrente induzida, o módulo desta corrente depende da resistência do circuito. Considerando o princípio de conservação de energia, quanto maior a variação de campo magnético, maior será o campo criado pela corrente induzida e maior será a ação oposta ao campo original.

#### 2.4.4 Correntes de Foucault

Massas metálicas imersas em um campo magnético variante possuem correntes induzidas circulando internamente. Estas correntes são chamadas de correntes de Foucault, ou correntes parasitas.

As aplicações para as correntes de Foucault são inúmeras. Sistemas de frenagem, balanças, relógios contadores de energia elétrica, fornos de indução, detectores de metais entre outros exemplos.

Nos transformadores as correntes de Foucault são indesejáveis, pois dissipam energia térmica e produzem uma FEM não desejada contrária à FEM das bobinas.

Segundo Camargo (2010), as perdas por correntes de Foucault podem ser expressas pela equação 6.

$$P_f = K_f B^2 f^2 d^2 \quad (6)$$

Onde:

$P_f$  – perdas por correntes de Foucault;

$K_f$  – constante de proporcionalidade que depende da resistividade do material;

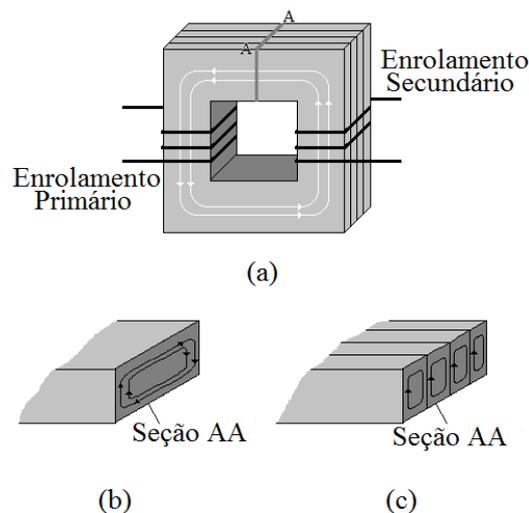
$B$ —amplitude de densidade de fluxo magnético dentro do material;

$f$ —frequência;

$d$ —diâmetro.

Onde  $K_f$  é uma constante de proporcionalidade dependente da resistividade do material.

Para minimizar os efeitos das correntes de Foucault nos núcleos dos transformadores, utilizam-se lâminas isoladas com óxido ou verniz. Esta técnica confina estas correntes nas lâminas individuais, diminuindo os caminhos possíveis. As correntes diminuem consideravelmente. A Figura 14(a) exemplifica esta técnica, a Figura 14(b) tem-se o caso de um núcleo maciço e a Figura 14(c) demonstra a redução das correntes de Foucault em um núcleo laminado.



**Figura 14:** (a) Transformador Esquemático (b) Correntes de Foucault em núcleo maciço (c) correntes de Foucault em núcleo laminado.

**Fonte:** Autoria Própria

#### 2.4.5 Efeito Joule

Quando um elétron da corrente elétrica colide com um átomo do condutor é transferida parte de sua energia cinética. Com a colisão o átomo do condutor aumenta seu estado de agitação e conseqüentemente sua temperatura. Este fenômeno é chamado de Efeito Joule.

Vários aparelhos se valem do efeito Joule para seu funcionamento, como chuveiros, ferros de passar, lâmpadas, secadores de cabelo, etc. Sistemas de

proteção de circuitos também utilizam este princípio. Os fusíveis possuem um filamento que é aquecido pela corrente através do efeito Joule, caso a corrente seja muito elevada o filamento derrete e o circuito é protegido.

#### 2.4.6 Magnetização

As linhas magnéticas que envolvem um ímã representam a existência de um campo magnético, denominado densidade de campo magnético (ULABY, 2007). Este campo também pode ser criado através de uma corrente elétrica. A densidade de campo magnético é representada pela letra B e sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o Tesla.

A densidade de campo magnético é relacionada à intensidade de campo magnético por meio de:

$$B = \mu H \quad (7)$$

Onde a letra H representa a amplitude do campo magnético aplicado externamente. A letra B determina a amplitude de densidade de fluxo magnético dentro do material.

A permeabilidade magnética é representada pelo símbolo  $\mu$  e esclarece atributos de magnetização do material. É definida como:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (8)$$

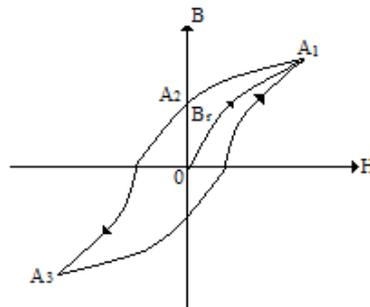
Onde  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa do material. Na maioria dos materiais a permeabilidade magnética é constante, exceto materiais ferromagnéticos (ULABY, 2007). O símbolo  $\mu_0$  representa a constante de permeabilidade magnética do espaço livre ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

A interação dos dipolos magnéticos de um material com o campo magnético externo define seu comportamento magnético. Este comportamento depende do arranjo dos átomos do material e é base para a classificação dos materiais como diamagnéticos, paramagnéticos ou ferromagnéticos.

Materiais paramagnéticos são fracamente atraídos por ímãs, como alumínio e magnésio. Substâncias diamagnéticas na presença de um campo magnético possuem dipolos orientados no sentido contrário ao campo aplicado, caracterizando uma ligeira repulsão. São exemplos de materiais diamagnéticos o cobre e a prata.

O grupo dos ferromagnéticos é formado apenas pelo ferro, cobalto, níquel e pelas ligas destes materiais. Os momentos magnéticos de materiais ferromagnéticos tendem a se alinhar quando um campo externo é aplicado. Para ferromagnéticos duros, mesmo após a remoção do campo externo o material permanece magnetizado.

O comportamento da magnetização de um material ferromagnético é demonstrado na Figura 15.



**Figura 15:** Comportamento magnético dos materiais ferromagnéticos.

**Fonte:** Autoria própria

Este processo é denominado histerese magnética. Primeiramente, com o aumento do campo H externo o fluxo B no material aumenta da origem até o ponto A1, que representa a saturação do material. Ao diminuir gradativamente o campo externo o fluxo B diminui seguindo a curva A1-A2, onde é representada a densidade de fluxo residual. Com a inversão do campo H, aumentando no sentido negativo, o fluxo B continua diminuindo até atingir a saturação negativa em A3. Com uma nova inversão no sentido do campo H o fluxo B volta a aumentar até atingir novamente o ponto A1.

Esta característica dos materiais ferromagnéticos é utilizada na fabricação de ímãs permanentes. Elementos ferromagnéticos moles são facilmente magnetizados e desmagnetizados, já os materiais ferromagnéticos duros possuem grande magnetização residual, o que torna difícil sua desmagnetização.

As perdas por histerese resultam da energia utilizada para orientar os dipolos magnéticos do material magnético (CAMARGO, 2010). As perdas por histerese são descritas pela equação 9:

$$P_h = K_h f B^n \quad (9)$$

Onde  $K_h$  é o coeficiente de Steinmetz que depende da natureza do material. O expoente do campo magnético geralmente é estipulado entre 1,5 e 2,5

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA**

Através de livros, dissertações e sites na internet foram coletadas informações necessárias para o alcance dos objetivos do projeto.

Após o levantamento das características do conversor e a definição do material utilizado, o mesmo foi construído e testes foram feitos.

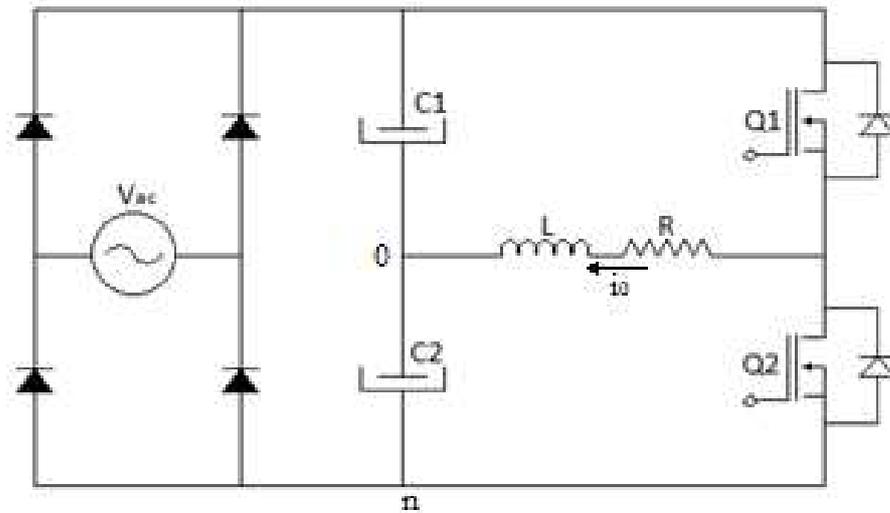
A seguir constam as definições do conversor escolhido, a forma de operação, o circuito de proteção e o circuito de controle. Também foi descrito o cálculo realizado para a definição da indutância necessária.

#### **3.2 CONVERSOR**

A topologia de conversor CC-CA escolhida foi de meia ponte, pois possuem menos componentes que o inversor de ponte completa além de uma operação mais simplificada de controle.

O inversor de ponte completa utiliza quatro transistores para o chaveamento. Outra desvantagem é o uso de um capacitor em série com o susceptor para evitar um nível médio de tensão, causando a saturação magnética do mesmo. Este capacitor deve ter características especiais sendo necessária a escolha de um capacitor de polipropileno.

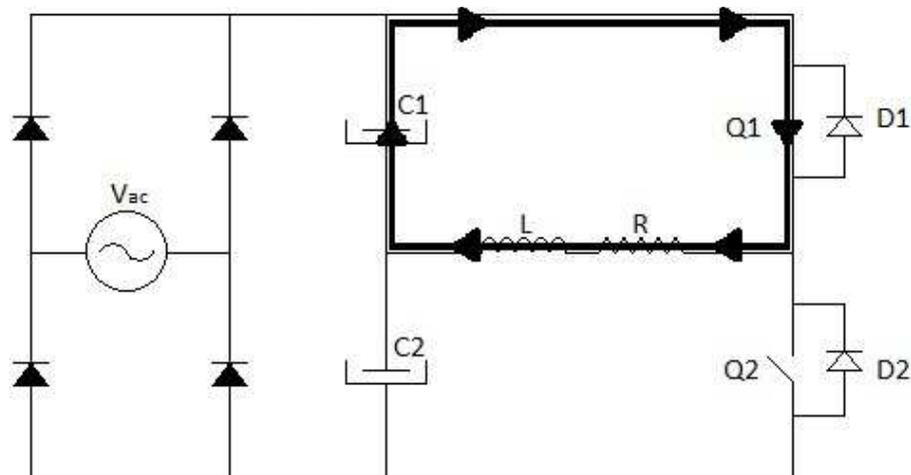
A topologia escolhida é mostrada na Figura 16. A tensão alternada da rede passa por um retificador de onda completa em ponte. Os dois capacitores criam uma simetria de tensão que será entregue a carga.



**Figura 16:** Topologia sugerida.

Fonte: Autoria Própria

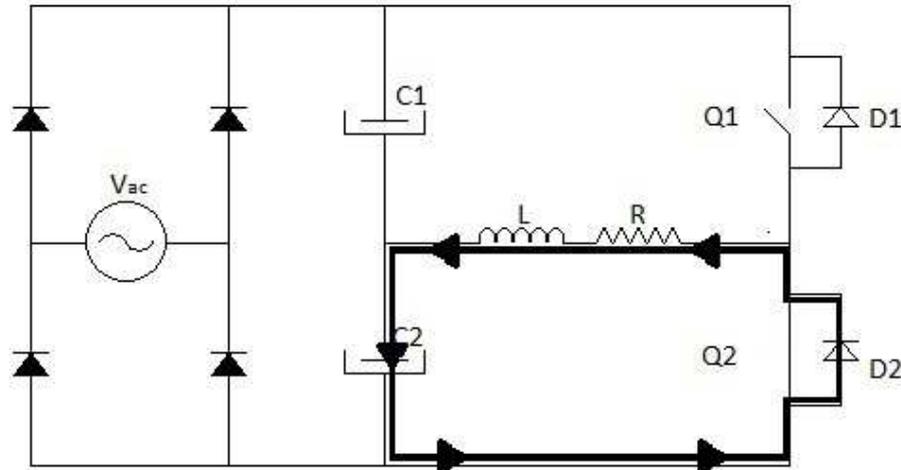
Quando o transistor Q1 é saturado a corrente flui do capacitor C1 para a carga, como é mostrado na Figura 17:



**Figura 17:** Etapa 1 de operação.

Fonte: Autoria própria

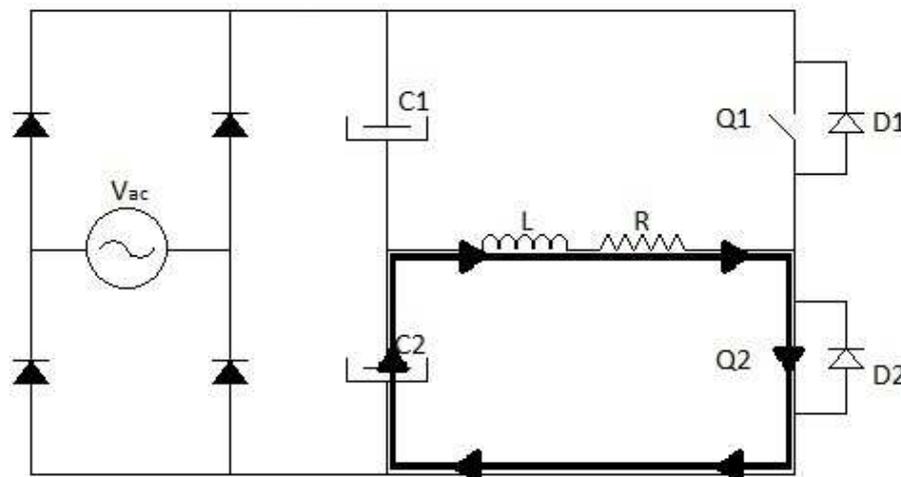
Após determinado tempo o estado dos transistores se inverte. Porém a corrente continua no mesmo sentido devido à ação do indutor. A corrente passa então a fluir pelo diodo D2, como é visto na Figura 18.



**Figura 18:** Etapa 2 de operação.

Fonte: Autoria própria

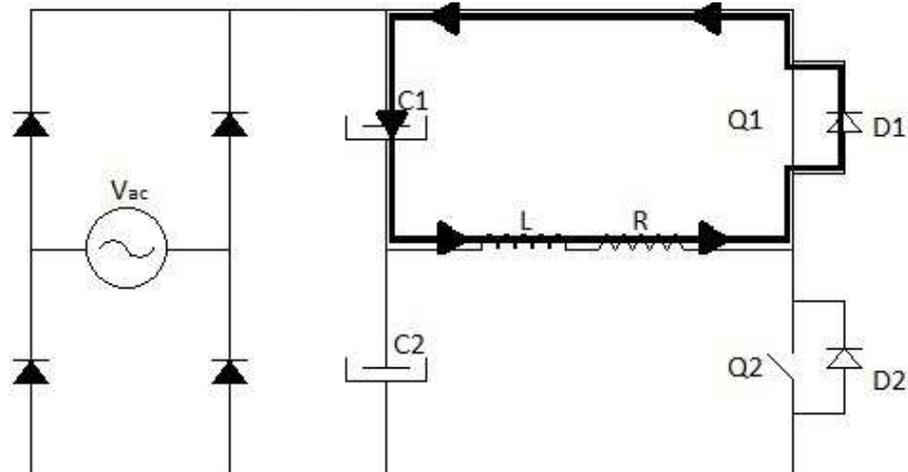
A corrente que passa pelo diodo D2 cai exponencialmente até inverter seu sentido passando então pelo transistor Q2, como na Figura 19.



**Figura 19:** Etapa 3 de operação.

Fonte: Autoria própria

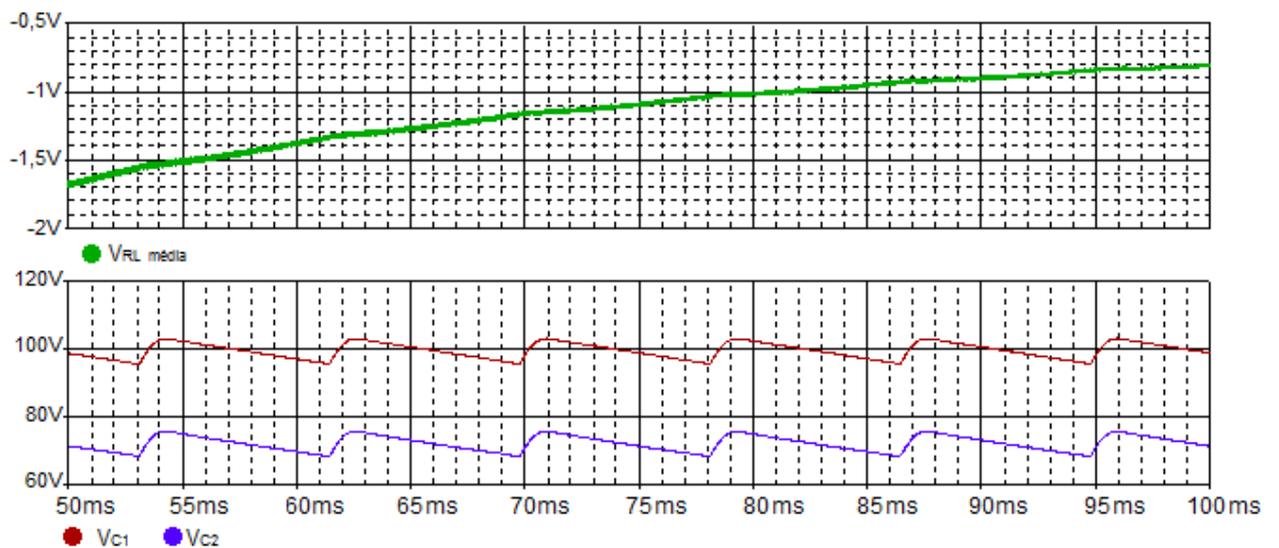
A Figura 20 demonstra uma nova comutação dos transistores. Quando Q1 satura Q2 é cortado. A corrente continua no mesmo sentido passando agora por D1, após certo tempo, o ciclo se repete.



**Figura 20:** Etapa 4 de operação.

Fonte: Autoria própria

Qualquer desbalanceamento no circuito, razões cíclicas, por exemplo, se reflete num desbalanceamento das tensões dos capacitores. Desta forma, os mesmos se compensam. Através de simulação observou-se que com um desequilíbrio nas tensões dos capacitores a tensão média na carga caminha para a estabilidade em zero volt, conforme é visto na figura 21.

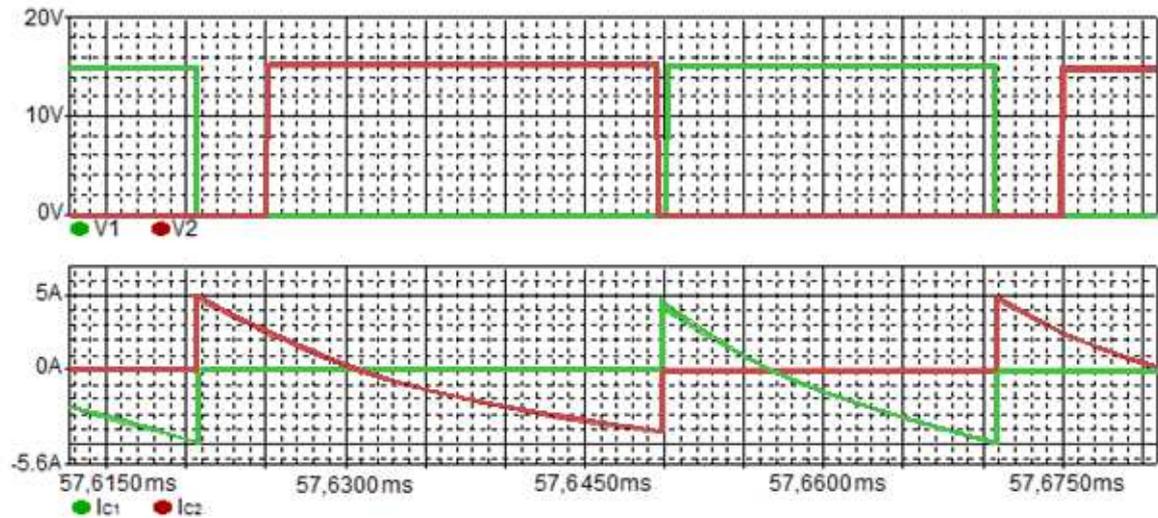


**Figura 21:** Tensão média na carga e tensões nos capacitores.

Fonte: Autoria Própria

Na simulação os tempos de chaveamento foram modificados resultando em um desbalanceamento entre as tensões dos capacitores. Porém pode-se notar que a tensão média na carga estabilizará em zero volt.

A figura 22 demonstra o desequilíbrio do chaveamento e o comportamento das correntes nos capacitores.



**Figura 22:** Pulsos de comando das chaves e Correntes nos capacitores.

**Fonte:** Autoria Própria

Observa-se que o capacitor C1 é conectado a carga por um tempo menor que o capacitor C2.

Os componentes para placa de potência foram escolhidos levando-se em consideração os requisitos do projeto e os materiais disponíveis. Foram utilizados 4 diodos MUR860 (FAIRCHILD, 2013), 2 MOSFETs IRF740 (VISHAY, 2012) e dois capacitores 470 $\mu$ F/ 400V.

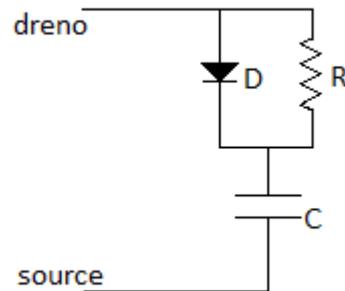
O esquemático da placa de potência e o layout criado são encontrados nos apêndices 1 e 2 respectivamente.

### 3.2.2 Circuito de Proteção dos Transistores

Uma tensão entre *dreno* e *source* é aplicada no momento em que o transistor é bloqueado. Se esta tensão for superior a tensão que o interruptor suporta, o mesmo será danificado.

Para a proteção do transistor geralmente são utilizados circuitos *snubber* ou circuitos grampeadores.

Grampeadores são utilizados quando existem indutâncias de dispersão presentes no circuito. Como neste projeto não existem indutâncias de dispersão, foi escolhido o *snubber* para a proteção dos transistores. O circuito *snubber* proposto é visto na figura 23.



**Figura 23:** Circuito *Snubber*.

**Fonte:** Autoria Própria

A equação 10, deduzida a partir da energia do capacitor, foi utilizada para o cálculo do mesmo.

$$C = \frac{2P}{V^2 F_s} \quad (10)$$

Onde P é a potência dissipada pelo resistor, V a tensão aplicada ao *snubber* e  $F_s$  a frequência de chaveamento. A frequência de chaveamento é 40kHz e a tensão aplicada ao *snubber* é 90 Volts.

Definindo a potência do resistor como 3W, encontra-se uma capacitância de 18,5nF. O valor comercial encontrado é 22nF.

Para o cálculo da resistência pode-se utilizar a equação 11:

$$\tau = RC \quad (11)$$

Onde  $\tau$  é a constante de tempo do circuito RC. Define-se um período de  $5\tau$  para a completa descarga de um capacitor. Este intervalo de tempo deve estar compreendido no período em que a chave está fechada, para que haja tempo suficiente para a descarga de energia do capacitor do *snubber*.

O período de saturação do transistor é de  $12\mu s$  ( $T_{on}$ ). Utilizando a definição acima:

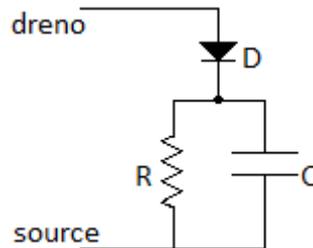
$$R = \frac{12 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot C} \quad (12)$$

A partir da equação 12 encontra-se uma resistência de 110  $\Omega$ . O valor comercial mais próximo é 120  $\Omega$ .

Porém, durante os testes foi constatado que o circuito *snubber* não protegia efetivamente os transistores, ou seja, picos de tensão continuaram a aparecer.

Decidiu-se converter o circuito em um grampeador para evitar os picos de tensão aplicados sobre as chaves. Devido ao número de componentes e simplicidade escolheu-se o circuito de grampeamento do tipo resistor capacitor diodo (RCD).

O circuito grampeador RCD utilizado é visto na figura 24.



**Figura 24:** Circuito grampeador RCD.

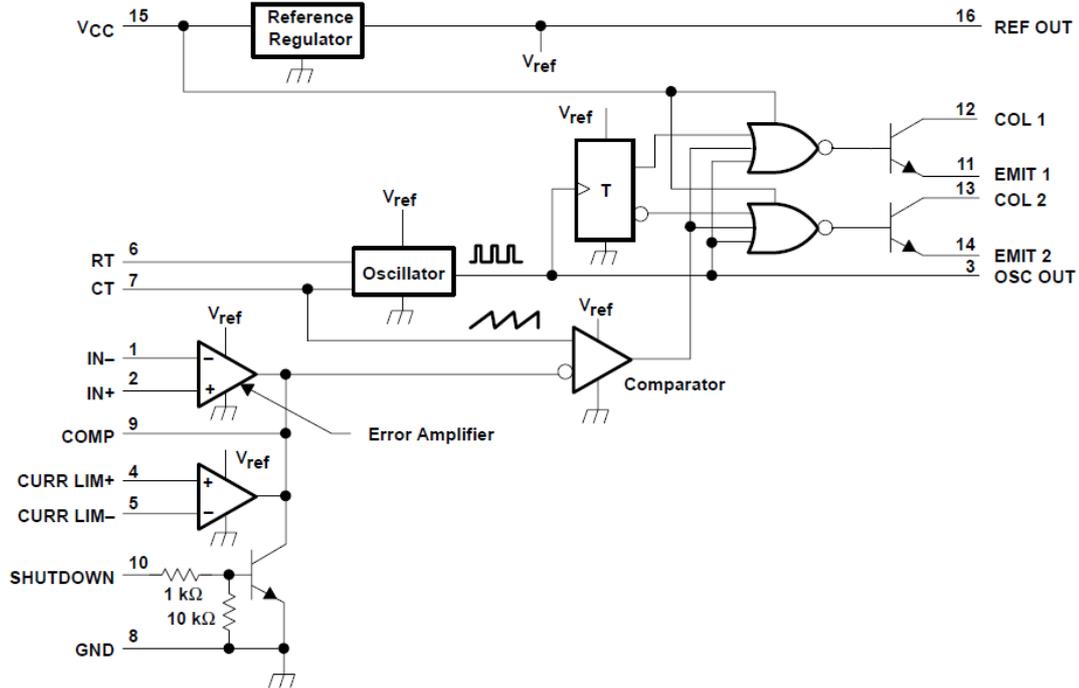
**Fonte:** Autoria Própria

Como constatação prática, as perdas do circuito de grampeamento do tipo RCD encontram-se entre 0.5% e 3% da potência de saída do conversor (ILLA FONT, 2003). Portanto a potência dissipada pelo circuito grampeador foi suficientemente baixa neste projeto.

O valor de resistência foi ajustado de forma prática, aumentado gradativamente até que os picos de tensão sobre as chaves desaparecessem.

### 3.3 CIRCUITO DE CONTROLE

Os pulsos de comando do inversor são gerados através do circuito integrado SG3524 (TEXAS INSTRUMENTS, 2003). Este CI é um modulador utilizado em várias aplicações de conversores chaveados, operando com frequência fixa ou com modulação PWM. A figura 25 demonstra o diagrama de blocos do SG3524:



**Figura 25:** Diagrama de Blocos do CI SG3524.

Fonte: Datasheet SG2524, SG3524

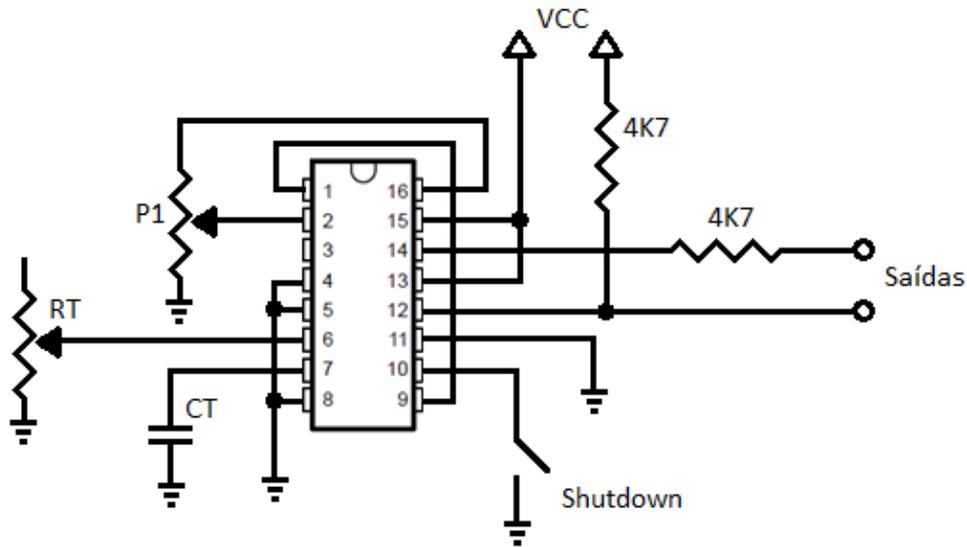
Através da resistência  $R_T$  e da capacitância  $C_T$  é possível configurar a frequência do oscilador interno do circuito integrado. A frequência pode ser calculada pela equação a seguir:

$$f = \frac{1,30}{R_T C_T} \quad (13)$$

Sendo a frequência em kHz,  $R_T$  em kΩ e  $C_T$  em μF. O valor da resistência deve estar entre 1,8kΩ e 100kΩ e a capacitância entre 0,001μF e 0,1μF. Pode operar em frequências de 130 Hz a 722 kHz.

O range de alimentação do SG3524 é de 8 a 40V. Os transistores de saída possuem emissores e coletores abertos, o que faz necessário o uso de resistores de *pull-up* ou *pull-down* ligados aos pinos de saída (pino 13 e pino 12).

A Figura 26 ilustra a montagem sugerida para este projeto:



**Figura 26:** Montagem Circuito SG3524.

Fonte: Autoria própria

A configuração dos resistores na saída do circuito será justificada adiante, no item 3.3.1 Circuito de Comando.

A frequência de funcionamento é configurada por RT e CT, conectados aos pinos 6 e 7. O potenciômetro P1 faz o ajuste do ciclo de trabalho do sinal de saída.

### 3.3.1 Circuito de Comando

Como o transistor superior do braço do conversor não está na referência, é necessária a técnica de *bootstrap* para seu acionamento. A técnica de *bootstrap* utiliza a tensão de um capacitor para acionar um transistor que não está conectado a referência. O capacitor de *bootstrap* é conectado entre *gate* e *source* do transistor quando se deseja saturá-lo. Para bloquear o transistor, deve-se conectar diretamente *gate* e *source*.

Foi utilizado o circuito integrado (CI) IR2183 (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2004) para o acionamento dos transistores. Este circuito integrado é um drive de alta velocidade e de alta tensão utilizado para acionamento de MOSFETs e IGBTs. Possui um canal flutuante para utilização da técnica de *bootstrap*.

O diagrama interno do IR2183 é demonstrado na figura 27:

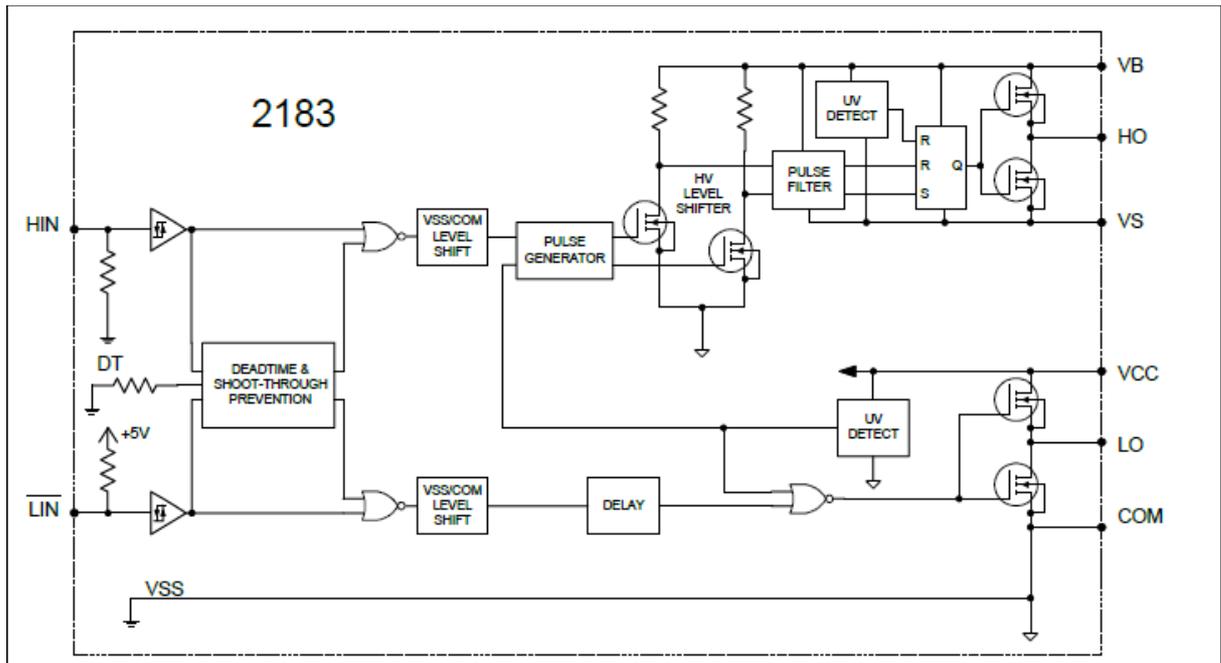


Figura 27: Diagrama interno do CI IR2183.

Fonte: Datasheet IR2183

O capacitor de *bootstrap* é conectado entre os pinos  $V_b$  e  $V_s$ . A saída HO é conectada a  $V_b$  ou  $V_s$  dependendo do nível imposto à entrada HIN. A saída LO é conectada a  $V_{cc}$  ou COM dependendo do nível imposto à entrada LIN.

Observa-se que a entrada LIN é invertida. Os pulsos de acionamento das entradas HIN e LIN devem ser iguais para que na saída do drive o chaveamento seja complementar. Por esse motivo a geração dos pulsos deve ser não complementar.

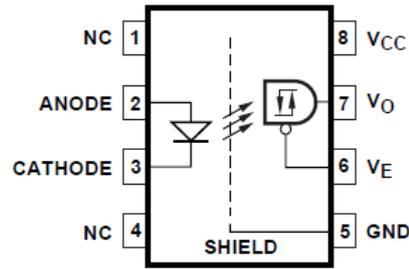
O tempo morto interno do IR2183 é 500ns. Por segurança este tempo foi aumentado através da calibração da razão cíclica dos pulsos gerados pelo circuito SG3524.

### 3.3.2 Isolamento Galvânico

Para a isolação entre circuito de comando e circuito de controle foi utilizado o optoacoplador HCPL-2200. Optoacopladores são utilizados quando se quer isolamento total entre entrada e saída, evitando risco de choque elétrico.

O CI HCPL-2200 é um optoacoplador com saída *tri-state* por histerese. Não há a necessidade de um resistor de *pull-up*, pois possui saída em tensão.

A alimentação do CI é de 4,5V a 20V e a corrente para o acionamento é de 1,6 mA. A Figura 28 ilustra o esquema do HCPL-2200

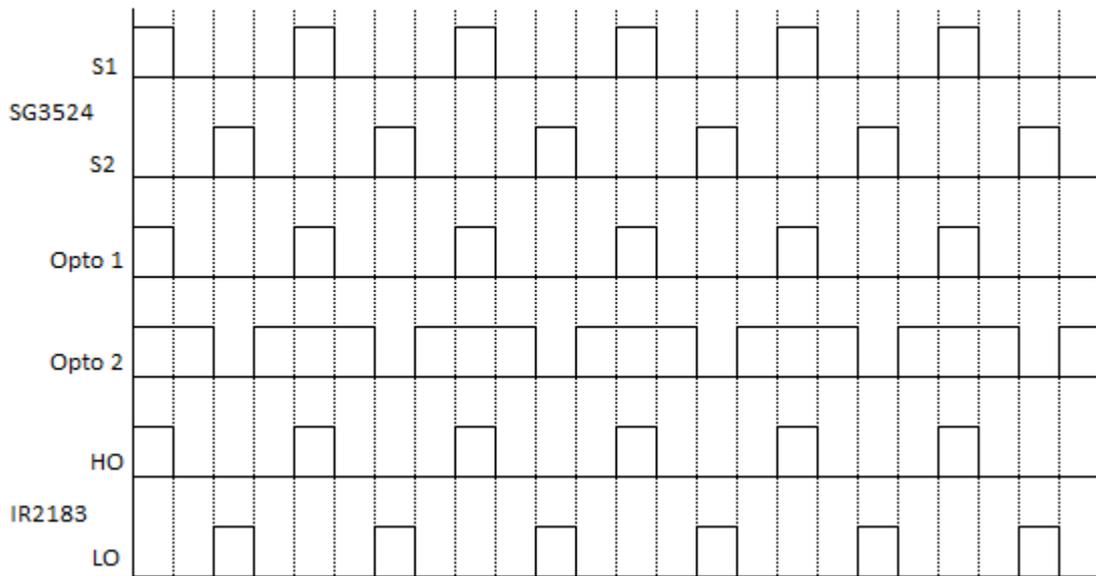


**Figura 28:** Diagrama funcional do HCPL-2200.

Fonte: *Datasheet* HCPL-2200

Quando o LED interno do optoacoplador é acionado a saída  $V_O$  adota nível alto, caso a entrada  $V_E$  esteja em nível alto, a saída assume estado de alta impedância.

A figura 29 demonstra a relação entre os pulsos gerados no SG3524, os pulsos de entrada dos optoacopladores e os pulsos de comando para os MOSFETs.

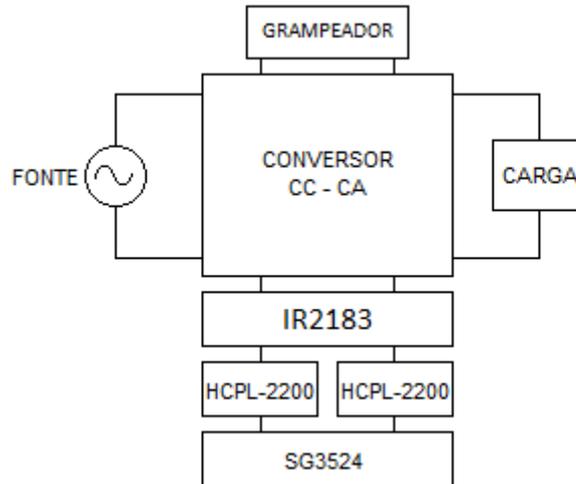


**Figura 29:** Relação entre pulsos no SG3524, optoacopladores e IR2183.

Fonte: Autoria Própria

Como explicado anteriormente, a entrada LIN do drive IR2183 é invertida. Devido a este fato a configuração dos resistores na saída do circuito gerador de pulsos foi projetada para acionar o optoacoplador 2 de forma complementar.

A figura 30 demonstra o diagrama de blocos completo do sistema:



**Figura 30:** Diagrama de blocos completo.

Fonte: Autoria Própria

O CI SG3524 gera os pulsos PWM na frequência e razão cíclica configuradas. Tais pulsos acionam os opto acopladores HCPL-2200 que estão conectados ao *drive bootstrap* IR2183. Este drive é conectado ao *gate* e ao *source* dos transistores do conversor. Os circuitos integrados IR2183 e HCPL-2200 compartilham a mesma alimentação de 15V e o SG3524 é alimentado por uma fonte independente também de 15V.

O esquemático da placa de controle está presente no apêndice 3. O layout da placa de controle é visto no apêndice 4

### 3.4 PROJETO DO INDUTOR

O núcleo do indutor foi construído com material ferromagnético, porém não foi seguido o procedimento convencional de projeto para indutores de alta frequência. Diferentemente das outras aplicações de indutores, perdas no núcleo são desejadas. O projeto do indutor seguiu os seguintes passos:

#### 3.4.1 Especificação da Potência

Por questão prática, a potência definida para este projeto foi 210W. Após a construção do conversor, os resultados obtidos com o sistema indutivo foram comparados aos resultados de um sistema resistivo de mesma potência.

### 3.4.2 Cálculo da Corrente Eficaz na Carga.

No caso de uma resistência elevada, a forma de onda da corrente no indutor aproxima-se de uma onda quadrada. Para uma baixa resistência a corrente tende a um formato triangular. Escolheu-se como opção mais adequada a aproximação a uma corrente senoidal, pois representa de forma satisfatória o formato da corrente no indutor.

A corrente eficaz na carga é calculada pela equação:

$$i_{RLef} = I_{RLP} / \sqrt{2} \quad (14)$$

### 3.4.3 Determinação da Resistência

A resistência responde pelas perdas que representam o aquecimento do susceptor. Seu valor pode ser calculado por:

$$R = \frac{P}{i_{RLef}^2} \quad (15)$$

### 3.4.4 Determinação da Indutância

O comportamento das tensões e correntes na carga está diretamente relacionado ao valor da indutância L. Sabe-se que a tensão no indutor é:

$$V_l = L \frac{di}{dt} \quad (16)$$

Sabe-se também que:

$$V_l = V_c - Ri \quad (17)$$

Trocando i por  $i - i_0$  obtém-se:

$$s i - i_0 = \frac{V_c}{sL} - \frac{Ri}{L} \quad (18)$$

Isolando i:

$$i = \frac{V_c}{s(sL+R)} + \frac{Li_0}{sL+R} \quad (19)$$

Voltando ao domínio do tempo:

$$i(t) = i_{RL} = \frac{V_c}{L} \frac{1}{R/L} \left(1 - e^{-R/Lt}\right) + i_0 e^{-R/Lt} \quad (20)$$

Ajustando a equação:

$$i_{RL} = \frac{V_c}{R} + \left(I_0 - \frac{V_c}{R}\right) e^{-R/Lt} \quad (21)$$

Sabe-se que quando  $t = T_s/2$ , a corrente  $i_0 = -i_{RLP}$ , assim:

$$i_{RLP} = \frac{V_c}{R} + \left(-I_{RLP} - \frac{V_c}{R}\right) e^{-R/L T_s/2} \quad (22)$$

Ajustando a equação:

$$i_{RLP} = \frac{V_c}{R} \left( \frac{1 - e^{-RT_s/2L}}{1 + e^{-RT_s/2L}} \right) \quad (23)$$

Isolando  $e^{-RT_s/2L}$  tem-se:

$$e^{RT_s/2L} = \frac{V_c + Ri_{RLP}}{V_c - Ri_{RLP}} \quad (24)$$

Finalmente isola-se L:

$$L = \frac{R}{2F_s \ln\left(\frac{V_c + Ri_{RLP}}{V_c - Ri_{RLP}}\right)} \quad (25)$$

Definindo-se a potência como 210W,  $F_s = 40\text{Khz}$ ,  $V_c = 90\text{V}$  e a corrente de pico como 5A obtém-se uma indutância de aproximadamente  $62\mu\text{H}$ .

### 3.4.5 Definição do Material Susceptor

O objetivo do trabalho é aquecer água através da indução de correntes de Foucault em um material susceptor. A escolha deste material deve considerar as

características magnéticas do mesmo e também sua resistência a corrosão, visto que o material será imerso na água para aquecê-la.

O elemento susceptor utilizado neste projeto deve possuir grande condutividade elétrica, para não limitar as correntes de Foucault geradas internamente.

Como visto na seção 2.4, os materiais são classificados em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Dentre estes três grupos, os ferromagnéticos que possuem as melhores características para este projeto.

Para que haja o aquecimento é necessário o contato entre o material e a água. Com uma bobina enrolada sobre o núcleo susceptor, a área de contato é reduzida. Para contornar este problema optou-se por um núcleo susceptor tubular, desta forma toda a extensão interna do tubo fica em contato com a água.

O material mais adequado encontrado comercialmente foi o ferro galvanizado. As características ferromagnéticas e a resistência a corrosão fazem do ferro galvanizado uma escolha adequada para esta aplicação.

#### 3.4.6 Cálculo do Número de Espiras

O material susceptor utilizado possui diâmetro de 3cm e 15cm de comprimento. Através da equação 26 é possível calcular o número de espiras.

$$N = \sqrt{\frac{L l}{\mu_0 A}} \quad (26)$$

Onde  $l$  é o comprimento em metros da bobina e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do espaço livre ( $4\pi 10^{-7}$  H/m). O símbolo  $A$  indica a área de seção transversal do solenóide e é dada por:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (27)$$

Onde  $d$  é o diâmetro do enrolamento em metros.

Considerando a indutância encontrada anteriormente encontrou-se o número de espiras. Por questão prática, considerou-se  $l = 0.13\text{m}$ , pois é necessária uma área livre de espiras nas extremidades do susceptor.

Na equação 26 o número de espiras do indutor foi calculado sem considerar a permeabilidade magnética do material. Isto é válido porque as linhas de fluxo geradas possuem um percurso onde a relutância magnética resultante é a soma das relutâncias do meio e do ar.

Como a relutância magnética do ar é muito maior que a relutância do meio, o campo magnético externo é nulo. Desta forma, para efeito de cálculo, é possível desprezar o meio.

### 3.4.7 Construção do Indutor

Através da equação 26 calculou-se 95 espiras. Devido à disponibilidade, utilizou-se o fio 21 AWG para a construção do indutor.

Na tabela de fios AWG, presente no anexo 1, é possível ver que a corrente suportada é de 1.2A. Por se tratar de uma corrente maior e de alta frequência, foi necessária a utilização do “fio de *Litz*”, que consiste de vários fios acoplados em paralelo.

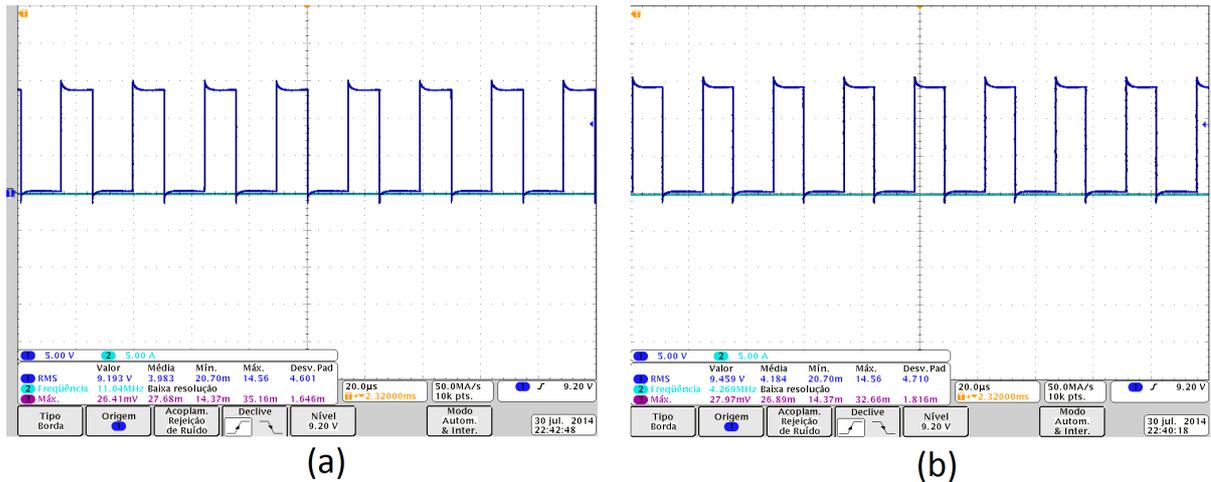
A utilização da técnica de *Litz* reduz as perdas nos enrolamentos devido ao efeito pelicular. O efeito pelicular ocorre em alta frequência e é a tendência da corrente em percorrer a periferia do condutor, aumentando a resistência efetiva.

## 4 TESTES EXPERIMENTAIS

Para os testes foi utilizada uma fonte modelo FA-3050 da *Instrutherm* para a alimentação do circuito de controle e a fonte ED-5219 da *ED laboratory* para a alimentação do circuito de potência. A medição foi feita com o osciloscópio modelo MSO 4054 do fabricante *Tektronix*. Nos testes de aquecimento utilizou-se o multímetro Minipa ET-997 como termômetro e um reservatório com 5L de água. A duração dos testes de aquecimento foi de 1 hora.

### 4.1 TESTE PLACA DE CONTROLE

Neste teste o objetivo é verificar a geração dos pulsos na saída da placa de controle. A figura 31 mostra os pulsos de saída do drive IR2183:



**Figura 31:** (a) Pulsos na saída HO do IR2183, (b) Pulsos na saída LO do IR2183.

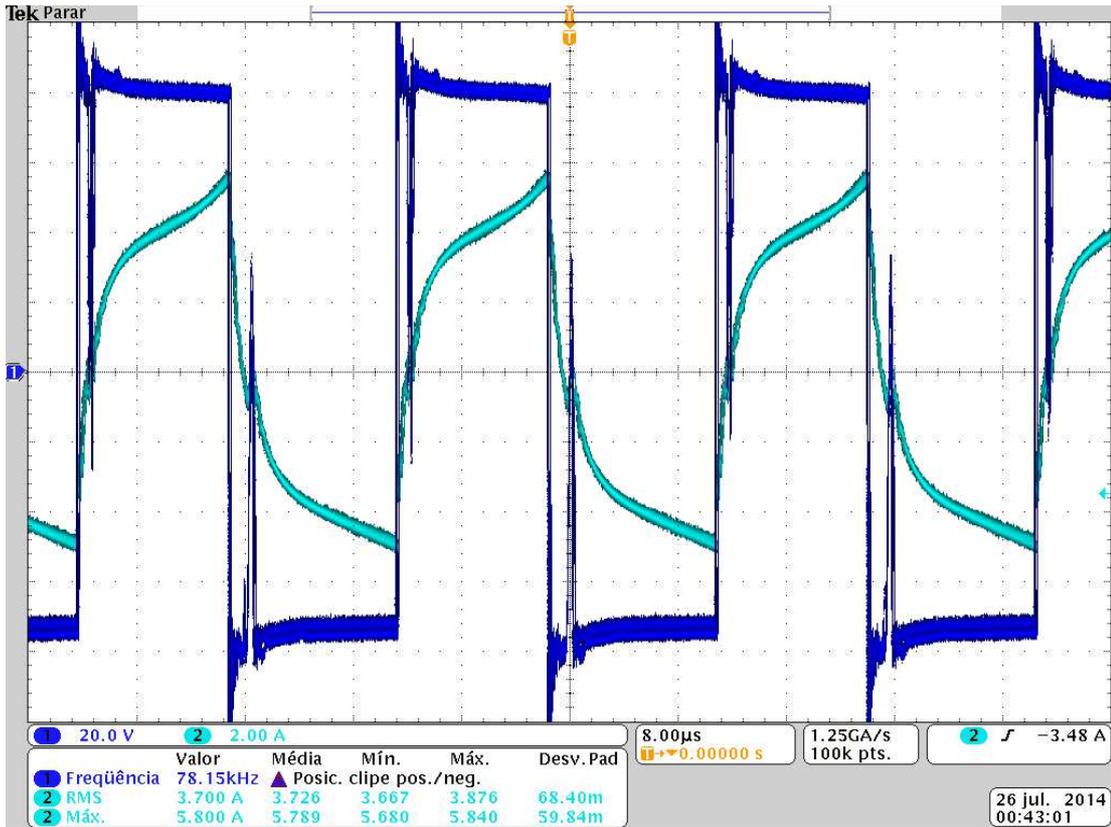
Fonte Autoria própria

Para a leitura dos pulsos de saída do circuito integrado IR2183 o pino  $V_s$  deve ser aterrado. Sem este aterramento o capacitor de *bootstrap* não carrega e os pulsos não aparecem no canal HO

#### 4.3 TESTE COM INDUTOR

Após a construção do indutor um teste foi feito com o intuito de verificar o comportamento do conversor com uma carga indutiva.

As formas de onda da corrente e da tensão no indutor são vistas na figura 32:

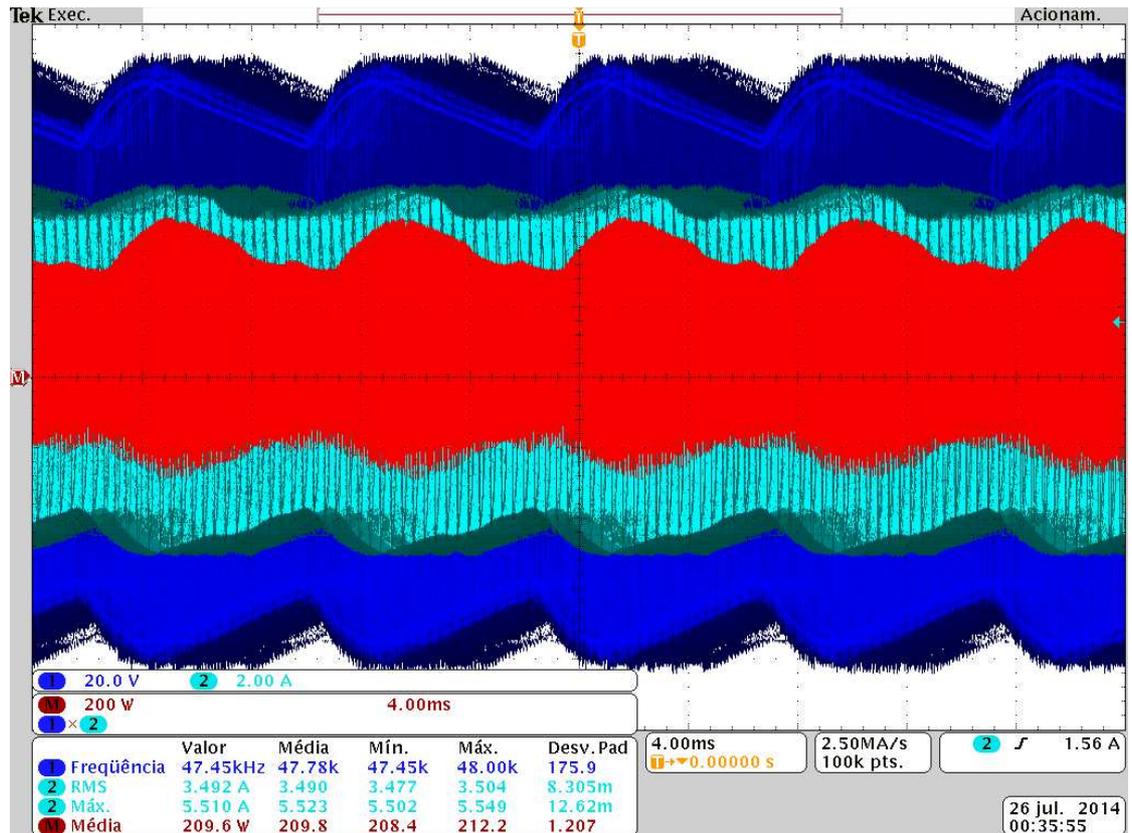


**Figura 32:** Forma de onda da tensão e corrente no indutor.

Fonte: Autoria própria

Nota-se que a corrente no indutor tem o formato esperado. Com o aumento da temperatura há o risco do material suscepto perder as características ferromagnéticas, causando o aumento da corrente e a danificação do conversor.

A figura 33 ilustra a forma de onda da potência do conversor em uma medição de baixa frequência:



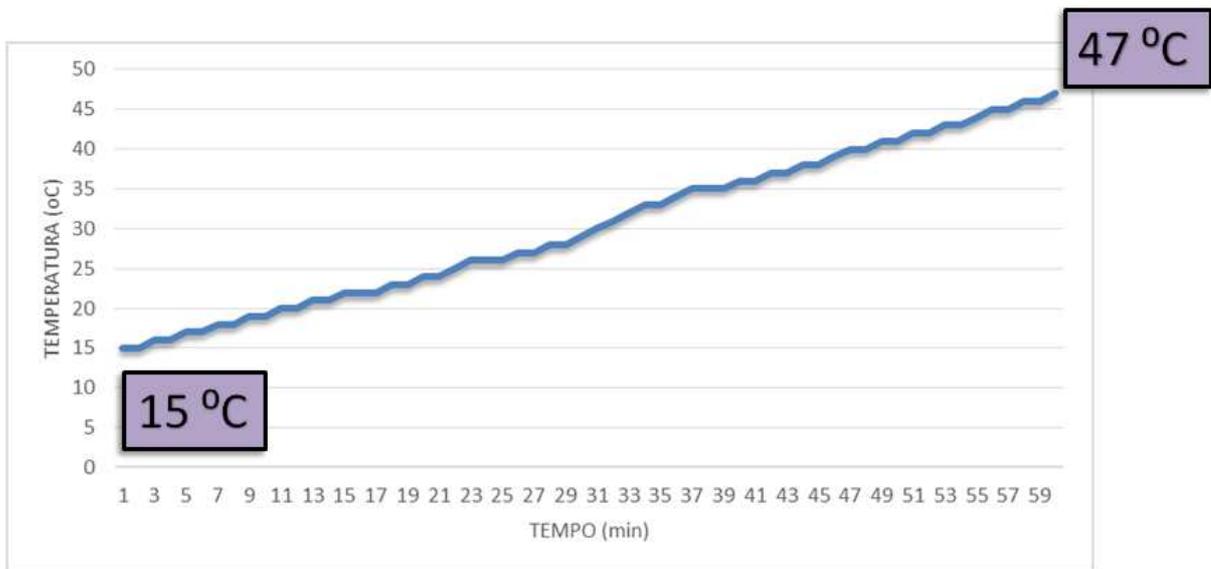
**Figura 33:** Potência na saída do conversor.

Fonte: Autoria própria

A forma de onda da potência foi conseguida através de uma função do osciloscópio onde é possível multiplicar sinais. A partir da multiplicação da corrente eficaz e da tensão eficaz obteve-se a potência.

#### 4.4 TESTE DE AQUECIMENTO

No teste de aquecimento o indutor foi mergulhado no aquário com água e a curva de aquecimento foi levantada. O gráfico 1 mostra a curva de aquecimento da água para o sistema indutivo.



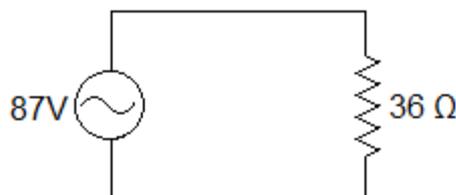
**Gráfico 1:** Curva de aquecimento da água para o sistema indutivo.

**Fonte:** Autoria própria

Nota-se que a temperatura aumentaria ainda mais caso o teste continuasse. A temperatura inicial para este teste foi 15°C e o último valor medido foi 47°C, logo, a variação de temperatura em 60 minutos foi de 32°C.

#### 4.5 TESTE COM RESISTÊNCIA

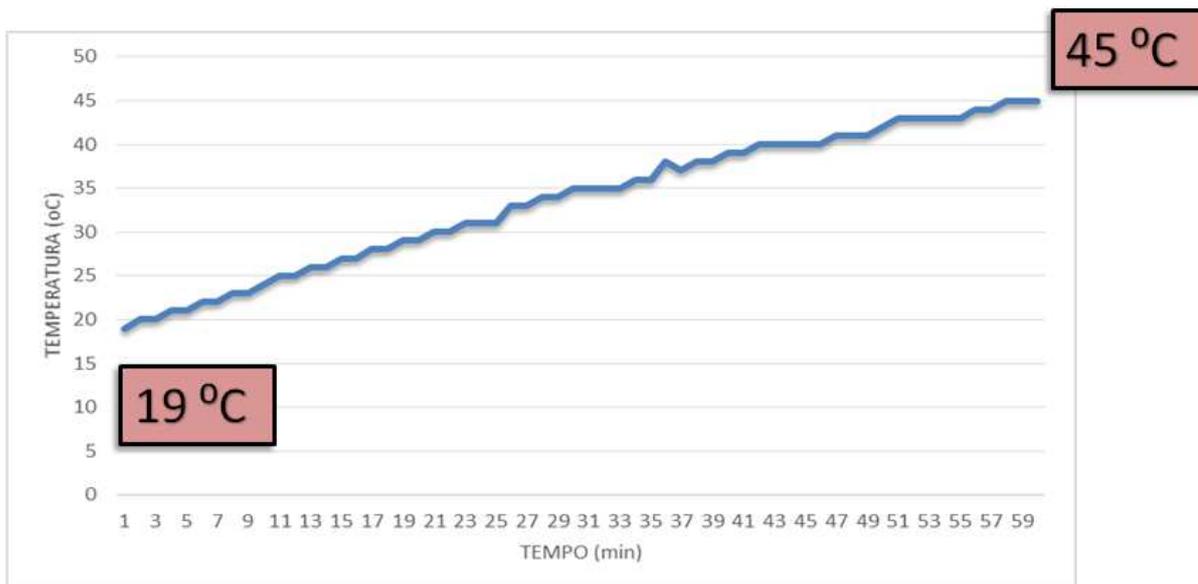
Neste teste utilizou-se uma resistência de 36 Ω. Através do ajuste da tensão de entrada pôde-se igualar a potência da resistência com a potência dissipada pelo sistema indutivo. Sabe-se que  $P = V^2/R$ , logo, para uma potência de 210W é necessária uma tensão de aproximadamente 87V. A figura 34 demonstra o circuito montado:



**Figura 34:** Circuito com resistência.

**Fonte:** Autoria Própria.

A curva de aquecimento para o sistema resistivo é demonstrada no gráfico 2:



**Gráfico 2:** Curva de aquecimento da água para o sistema resistivo.

**Fonte:** Autoria própria

A temperatura inicial da água foi 19°C. Pode-se notar que aos 60 minutos a temperatura está em 45°C, já próxima da estabilidade. A variação de temperatura durante o teste foi de 26°C.

## 5 CONCLUSÃO

Através da comparação dos resultados é possível ver que o sistema indutivo foi mais eficiente que a resistência elétrica, pois o aquecimento final foi superior ao aquecimento gerado pelo sistema convencional.

A variação de temperatura foi 32°C para o sistema indutivo e 26°C para o aquecedor à resistência. Logo, o sistema indutivo obteve um aquecimento 23% maior.

Acredita-se que para uma maior frequência a temperatura alcançada seria ainda maior, uma vez que as perdas geradas no núcleo são proporcionais ao quadrado da frequência, como visto nas equações 6 e 9.

Para trabalhos posteriores especula-se desenvolver um conversor capaz de operar com maior potência e frequência. Também se pretende experimentar outros materiais susceptores com o intuito de melhorar a transferência de calor para a água.

Os resultados deste trabalho demonstram que o sistema de aquecimento de água indutivo pode ser mais eficiente que a resistência elétrica. Outros fatos a serem considerados são a segurança do sistema indutivo, pois o elemento aquecedor é isolado eletricamente o que previne choques elétricos, e a robustez do susceptor que tem vida útil muito superior a da resistência elétrica.

Desta forma conclui-se que os objetivos deste trabalho foram alcançados, visto que o conversor construído funcionou da maneira esperada e se comportou adequadamente para a aplicação.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.
- ALTOÉ, Leandra; FILHO, Delly Oliveira; CARLO, Joyce Correna. **Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar**. 2012
- AVAGO TECHNOLOGIES. **HCPL-2200, HCPL-2200: Low Input Current Logic Gate Optocouplers**. Disponível em: <http://www.avagotech.com>. Acesso em 5nov, 2013.
- CASAEIMÓVEIS. **Quais os tipos de aquecedores de água existentes? Qual deles é o melhor**. Disponível em: <http://www.casaimoveis.oul.com.br>. Acesso em 25ago, 2013.
- CAMARGO, R. **Desempenho de motores de indução trifásicos alimentados por inversores de frequência**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- FAIRCHILD. **MUR840, MUR860, RURP840, RURP860**. Disponível em: <http://www.fairchildsemi.com>. Acesso em 30 jan. 2014.
- ILLA FONT, C. H. **Grampeamento ativo para estágios retificadores de saída de conversores CC-CC isolados**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- INTERNATIONAL RECTIFIER. **IR2183(4)(S) e PbF**. Disponível em: <http://www.hqew.com>. Acesso em 30jan., 2014.
- MARQUES, Maurício Nunes. **Aquecedores de água: Tipos, características e projeto básico**. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2003
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano nacional de energia**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 05set, 2013.
- NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: Eletromagnetismo**. São Paulo: Edgard Blucher, 1997
- RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.

SOCIEDADE DO SOL. **Aquecimento da água.** Disponível em: <http://www.sociedadedosol.com.br>. Acesso em 01 set, 2013.

TEXAS INSTRUMENTS. **SG2524, SG3524 Regulating Pulse-With Modulators.** Disponível em: <http://www.ti.com>. Acesso em 21 ago, 2013.

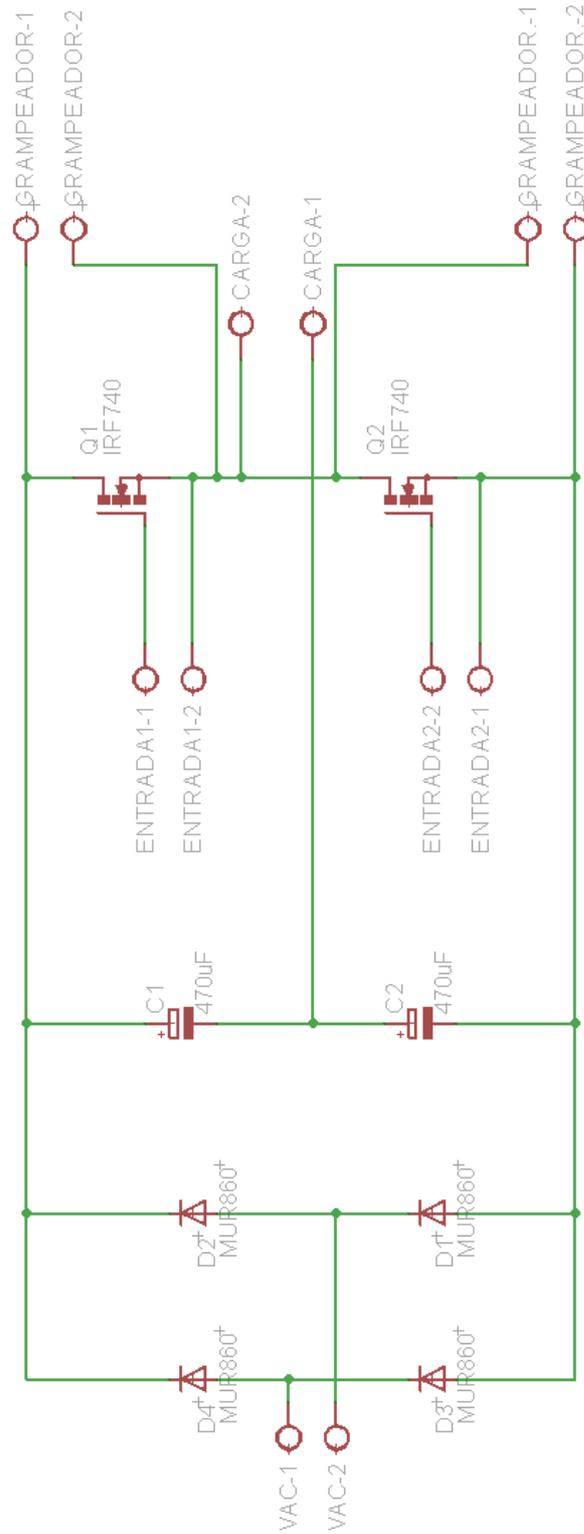
ULABY, Fawwaz. T. **Eletromagnetismo para Engenheiros.** Porto Alegre: Bookman, 2007

VISHAY. **IRF740, SiHF740.** Disponível em: <http://www.vishay.com>. Acesso em 30 jan. 2014

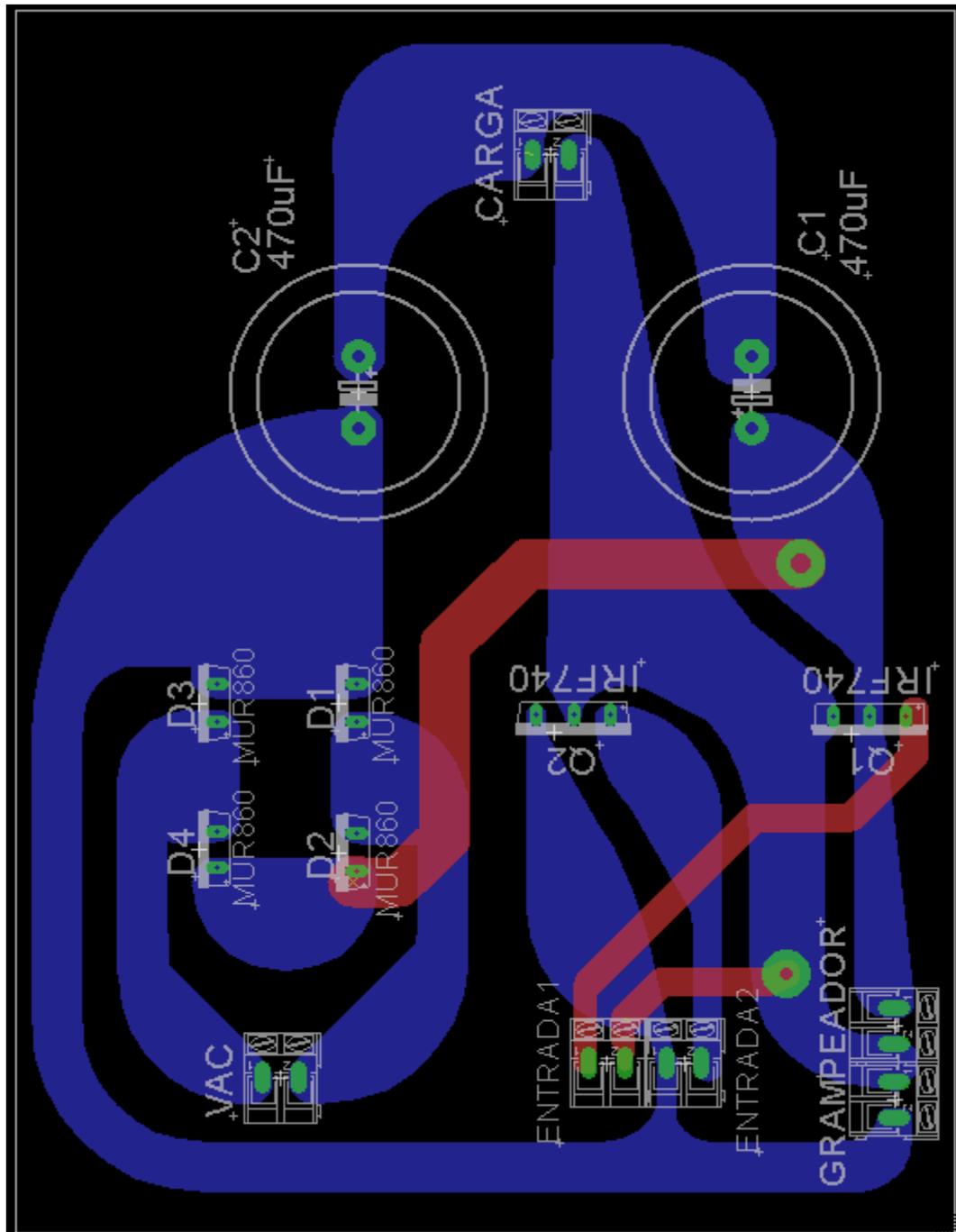
VISHAY. **MUR 160.** Disponível em: <http://www.vishay.com>. Acesso em 30 jan. 2014

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III: Eletromagnetismo.** São Paulo: Addison Wesley, 2009.

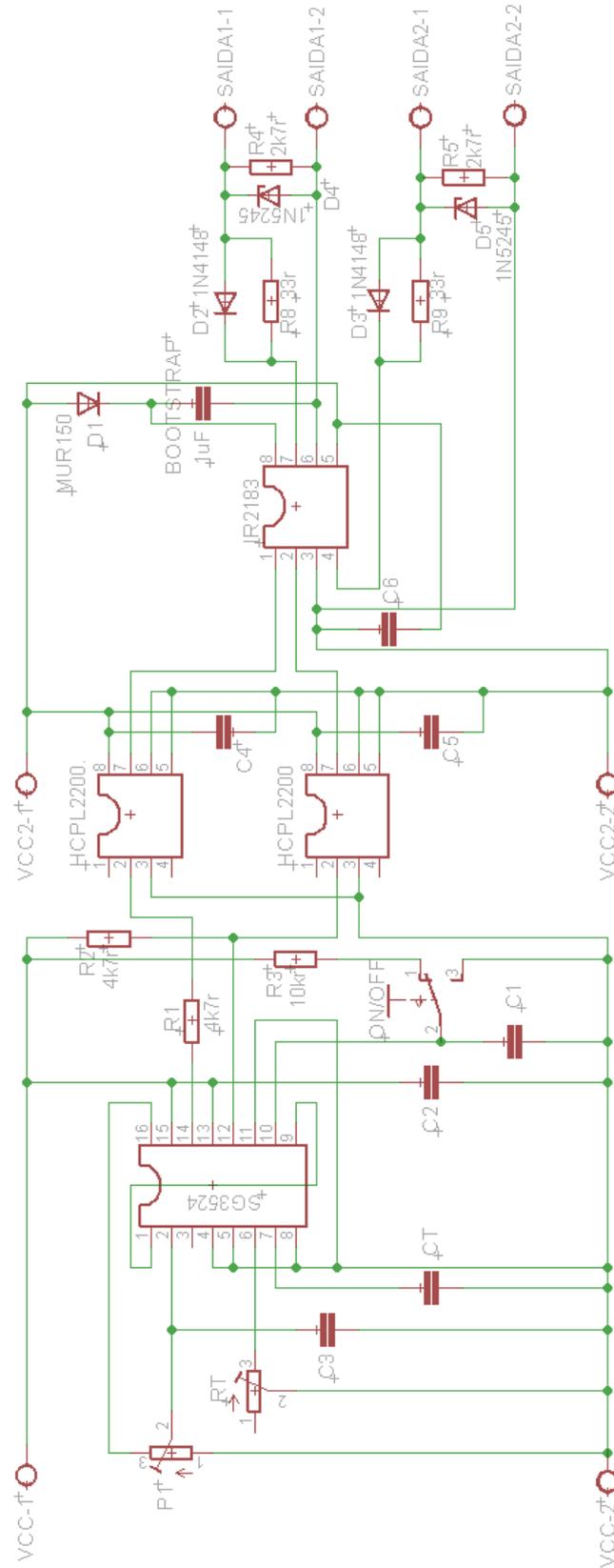
## Apêndice 1 – Esquemático Placa de Potência



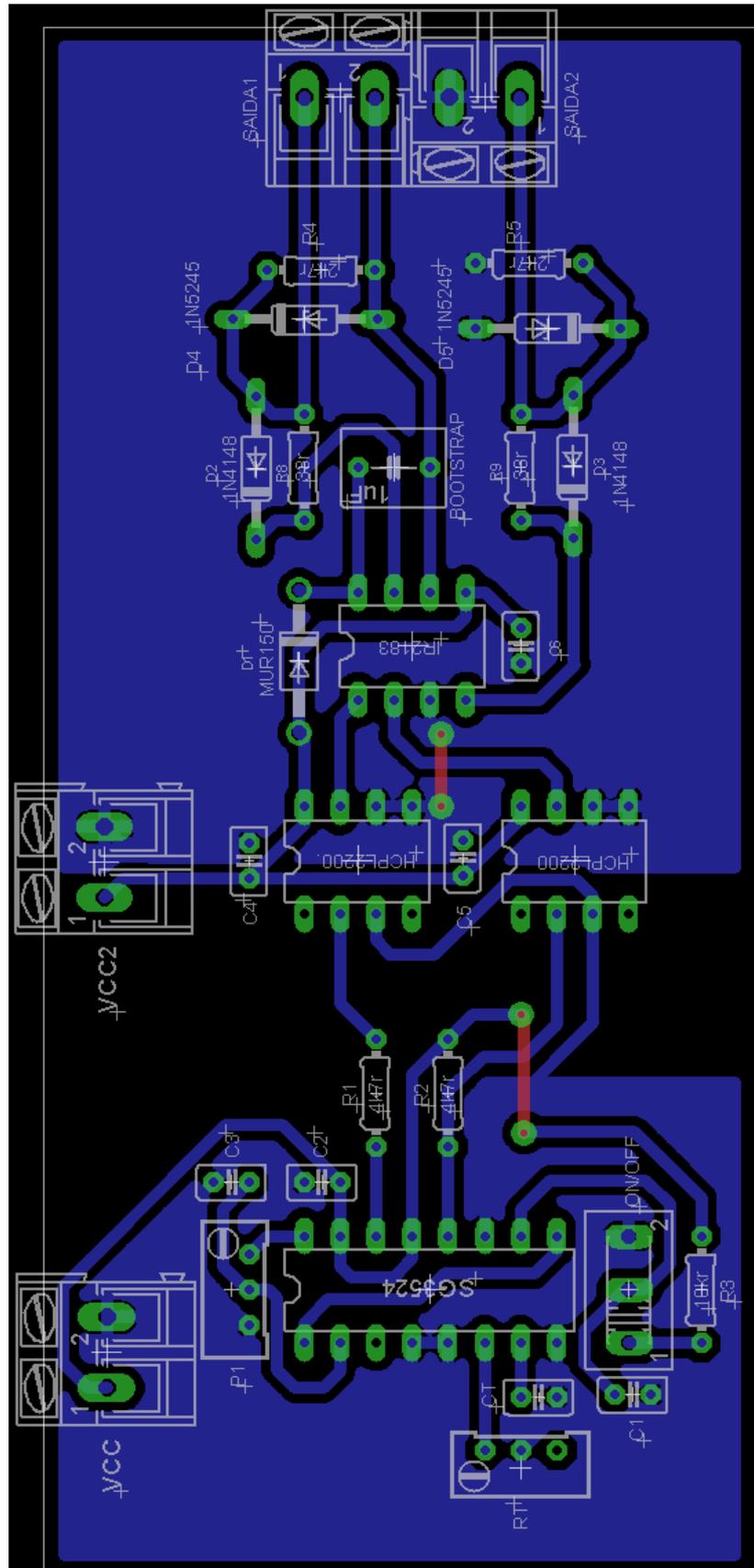
### Apêndice 2 – Layout Placa de Potência



### Apêndice 3 – Esquemático da Placa de Controle



## Apêndice 4 – Layout da Placa de Controle



### Anexo 1 – Tabela de Fios AWG

AWG	Diâmetro (mm)	Seção (mm <sup>2</sup> )	Corrente (A)	Kg por Km	Res. Ohms/Km
0000	11,86	107,2	319		0,158
000	10,40	85,3	240		0,197
00	9,226	67,43	290 x		0,252
0	8,252	53,48	150		0,317
1	7,348	42,41	120	375	0,40
2	6,544	33,63	96	295	0,50
3	5,189	26,67	78	237	0,63
04	5,189	21,147	60	188	0,80
05	4,620	16,764	48	149	1,01
06	4,115	13,229	38	118	1,27
07	3,665	10,55	30	94	1,70
08	3,264	8,367	24	74	2,03
09	2,906	6,633	19	58,9	2,56
10	2,588	5,260	15	46,8	3,23
11	2,304	4,169	12	32,1	4,07
12	2,052	3,307	9,5	29,4	5,13
13	1,829	2,627	7,5	23,3	6,49
14	1,628	2,081	6,0	18,5	8,17
15	1,450	1,651	4,8	14,7	10,3
16	1,290	1,307	3,7	11,6	12,9
17	1,151	1,040	3,2	9,26	16,34
18	1,024	0,8235	2,5	7,3	20,73
19	0,912	0,6533	2,0	5,79	26,15
20	0,813	0,5191	1,6	4,61	32,69
21	0,724	0,4117	1,2	3,64	41,46
22	0,643	0,3247	0,92	2,89	51,5
23	0,574	0,2588	0,73	2,29	56,4
24	0,511	0,2051	0,58	1,82	85,0
25	0,455	0,1626	0,46	1,44	106,2
26	0,404	0,1282	0,37	1,14	130,7
27	0,361	0,1024	0,29	0,91	170,0
28	0,320	0,0804	0,23	0,72	212,5