

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

SÍLVIO LUÍS VIEIRA

**FORNO DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM
TEMPERATURA CONTROLADA**

CURITIBA

2018

SÍLVIO LUÍS VIEIRA

**FORNO DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM
TEMPERATURA CONTROLADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de engenheiro eletricista da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Dartora

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

SÍLVIO LUÍS VIEIRA

FORNO DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM TEMPERATURA CONTROLADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de engenheiro eletricista da Universidade Federal do Paraná.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. César Augusto Dartora (Orientador)
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dra. Juliana Luísa Müller lamamura
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Armando Heillmann
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 26 de junho de 2018.

Dedico este trabalho aos meus pais,
André e Denise, por toda a ajuda que me
deram ao longo do curso.

AGRADECIMENTOS

Ao longo dessa caminhada no mundo da engenharia, foram muitas as pessoas que me ajudaram. Meu pai, André Vieira, sempre me dava (e ainda da) sábios conselhos, os quais eu tentei seguir fielmente. Minha mãe, Denise M. Vieira, além dos conselhos, muito me ajudou nas horas difíceis do curso, em que eu pensava em desistir. Ela me tranquilizava e com muita paciência, me fazia voltar para minha luta diária.

Meus avós Dionísio e Benilde também foram peças fundamentais nessa jornada. Após morar sozinho em Curitiba, muita coisa mudou, porém sempre que eu voltava para minha cidade Jaraguá do Sul, lá estavam eles de braços abertos, esperando para me receber e ouvir as novidades.

Os grandes amigos que fiz também merecem um espaço aqui. Sem eles o curso seria muito mais complicado. É sempre bom ter alguém junto com você em situações adversas, alguém que você possa confiar e mais que isso, traçar um plano para arrumar a bagunça, seja com as notas ou com algum problema pessoal. Foram incontáveis noites estudando pela madrugada via Skype, fazendo trabalhos, reuniões na casa dos amigos (que sempre acabavam com uma deliciosa pizza no final), e muitos outros bons momentos, os quais levarei para sempre em minhas memórias.

Ainda falando de amigos, gostaria de agradecer imensamente ao grande Gabriel Moscardi Pauka, mais conhecido como Mosca, por ter me ajudado a resolver inúmeros problemas que apareceram ao longo deste trabalho. Seus conhecimentos em eletrônica de potência e programação atrelados a uma boa didática, me permitiram compreender alguns conceitos não apenas relacionados com este projeto em si, mas também a diversas outras áreas da engenharia.

E em meio de tantos agradecimentos é claro que não poderia faltar o meu orientador, Prof. Dr. César Augusto Dartora, que além de um ótimo professor, é uma pessoa incrível.

"Que os vossos esforços desafiem as
impossibilidades, lembrai-vos de que as
grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível."
(Charles Chaplin)

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso tem a finalidade de projetar e entender o funcionamento de um forno de indução eletromagnética com temperatura controlada. A indução eletromagnética é um fenômeno que não necessita contato para aquecer os materiais, pois os mesmos estarão sob a presença de fortes campos magnéticos, que induzirão correntes parasitas aquecendo o material de dentro para fora. Para a escolha da frequência de operação leva-se em conta tanto o objetivo final (rápido aquecimento de peças condutoras) como também a limitação técnica dos componentes. O controle será digital, programado através de microcontrolador, o qual estará acoplado a um sensor de temperatura óptico, para que não haja demais interferências. Um painel de controle permitirá selecionar a temperatura desejada através de um display, e assim que um botão de ativação for pressionado, um relé receberá um pulso liberando corrente para o oscilador. Este oscilador é projetado utilizando uma técnica conhecida como Zero Voltage Switching (ZVS), onde transistores chaveiam rapidamente na frequência de um tanque LC passivo. Como resultado têm-se um campo magnético oscilando em uma bobina de trabalho, induzindo corrente em peças condutoras, colocadas no seu interior.

Palavras-chave: Forno de indução. Controle de temperatura. Correntes parasitas.

ABSTRACT

The present final paper research has the purpose of designing and understanding the operation of a temperature controlled electromagnetic induction furnace. Electromagnetic induction is a phenomenon that does not require contact to heat materials, because they will be under the presence of strong magnetic fields, which will induce eddy currents, heating the material from the inside to the outside. In order to choose the operating frequency, both the final objective (rapid heating of conductive parts) and the technical limitation of the components are taken into account. The control will be digital, programmed through microcontroller, which will be coupled to an optical temperature sensor, so that there is no further interference. A control panel will allow the user to select the desired temperature through a display, and as soon as an activation button is pressed, a relay will receive a pulse freeing current to the oscillator. This oscillator is made using a technique known as Zero Voltage Switching (ZVS), where transistors switch rapidly on the frequency of a passive LC tank. As a result there is a magnetic field in a working coil, inducing current in conductive parts, placed inside it.

Key-words: Induction furnace. Temperature control. Eddy currents.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Diagrama em bloco representando o funcionamento do forno | 19 |
| Figura 2 - Cronograma do TCC..... | 21 |
| Figura 3 - Forno resistivo de aquecimento direto | 22 |
| Figura 4 - Principais partes de um forno a arco..... | 24 |
| Figura 5 - Princípio de indução de correntes parasitas | 26 |
| Figura 6 - Três processos transferindo 1000 joules de energia | 27 |
| Figura 7 - Perdas totais dada em cada instante de tempo | 27 |
| Figura 8 - Sensor blindado | 29 |
| Figura 9 – Forno de indução de 2.5 MVA..... | 32 |
| Figura 10 – Oscilador ressonante para pequenas potências. | 33 |
| Figura 11 – Bobina de trabalho usada para o aquecimento..... | 36 |
| Figura 12 – Distribuição do fluxo de corrente em um condutor cilíndrico | 38 |
| Figura 13 – Esquemático utilizado para simulações no PSIM..... | 42 |
| Figura 14 – Corrente circulando na bobina com o forno sem carga..... | 43 |
| Figura 15 – Zoom na corrente da bobina em vazio, já em regime permanente | 43 |
| Figura 16 – Frequência de oscilação próxima a 101 kHz, conforme calculado..... | 44 |
| Figura 17 – Tensão (em azul) e corrente (em vermelho) oscilando na bobina | 44 |
| Figura 18 – Tensão nos gates dos dois MOSFETS. | 45 |
| Figura 19 – Representação básica do sistema de controle do forno de indução. | 47 |
| Figura 20 – Diagrama da lógica de programação. | 49 |
| Figura 21 – Esquemático do sistema de controle..... | 50 |
| Figura 22 – Protótipo final do forno de indução com temperatura controlada. | 52 |
| Figura 23 – Forno sem carga drenando 3.7 A da fonte..... | 53 |
| Figura 24 – Forno com carga, drenando 7.2 A ao final do aquecimento | 54 |
| Figura 25 – Objeto metálico incandescente após o aumento de temperatura | 55 |
| Figura 26 – Acionamento com potência máxima e controlada | 56 |
| Figura 27 – Ativação sem controle (sensor de temperatura desativado). | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Aplicações de fornos de indução..... | 14 |
| Tabela 2 - Comparativo de potência de fornos a arco industriais..... | 25 |
| Tabela 3 - Custos dos componentes envolvidos no projeto | 58 |
| Tabela 4 - Propriedades de alguns elementos estudados neste trabalho..... | 61 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------|---|
| PID | Proporcional, Integrador e Derivativo |
| UFPR | Universidade Federal do Paraná |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| CC | Corrente Contínua |
| DC | Direct Current |
| CA | Corrente Alternada |
| AC | Alternating Current |
| MOSFET | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| T | Temperatura medida |
| TD | Temperatura Desejada |
| V_{dc} | Tensão continua |
| R | Resistência |
| f | Frequência |
| f_0 | Frequência em vazio |
| ε | Tensão induzida |
| N | Número de espirras |
| ΔT | Variação de temperature |
| μ_0 | Permeabilidade do vácuo |
| Φ | Fluxo induzido |
| ρ | Resistividade do material |
| A | Área |
| D | Diâmetro |
| r | Raio |
| I_{ac} | Corrente alternada |
| RMS | Root mean square |
| Q | Calor |
| L | Calor latente |
| m | Massa |
| c | Calor específico |
| P | Potência |

| | |
|----------|---------------------------|
| L_0 | Indutância em vazio |
| C | Capacitância |
| δ | Comprimento de penetração |
| l | Distância |
| t | Tempo |
| ZVS | Zero Voltage Switching |
| s | Segundos |
| V | Volts |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | PROBLEMATIZAÇÃO | 16 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 17 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 17 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 17 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA..... | 17 |
| 1.4 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 18 |
| 1.5 | ESTRUTURA..... | 20 |
| 1.6 | CRONOGRAMA | 20 |
| 2 | TRANSFERÊNCIA DE CALOR ELETROMAGNÉTICA | 22 |
| 2.1 | TIPOS DE FORNO | 22 |
| 2.1.1 | Forno resistivo | 22 |
| 2.1.2 | Forno a arco | 23 |
| 2.1.3 | Forno de indução | 25 |
| 2.2 | SENSORES DE TEMPERATURA..... | 28 |
| 3 | PROJETO | 30 |
| 3.1 | ENTRADA DE ENERGIA | 30 |
| 3.2 | OSCILADOR RESSONANTE | 32 |
| 3.2.1 | Dimensionamento da bobina | 34 |
| 3.2.2 | Efeito pelicular, comprimento de penetração e frequência ressonante | 37 |
| 3.2.3 | Driver Zero Voltage Switching | 42 |
| 4 | CONTROLE | 46 |
| 4.1 | TIPOS DE CONTROLADORES | 46 |
| 4.1.1 | Controlador PID | 47 |
| 4.1.2 | Controlador liga desliga | 47 |
| 4.2 | MICROCONTROLADOR..... | 48 |
| 4.2.1 | Programação do Arduino | 48 |
| 4.3 | IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO | 50 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 53 |
| 5.1 | RESULTADOS GERAIS..... | 53 |
| 5.2 | CUSTOS ENVOLVIDOS | 57 |
| 5.3 | IMPLEMENTAÇÕES FUTURAS | 58 |

| | |
|--|-----------|
| REFERÊNCIAS..... | 60 |
| ANEXO A – PROPRIEDADES TÉRMICAS, ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS | 61 |

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento por indução eletromagnética é o tema central desse trabalho. Podendo ser chamada apenas de aquecimento por indução, esse processo é muito utilizado nos dias de hoje para o tratamento térmico de metais em geral. Está se tornando cada vez mais comum que em alguma parte de processos industriais, seja necessário utilizar esse método de aquecimento.

Foi no começo de 1900 que fornos de indução começaram a ser usados para aquecer metais, porém sua potência era muito limitada devido à falta de tecnologia na época. Em 1960, com o avanço da eletrônica de potência, dispositivos que operavam com alta tensão e alta corrente passaram a ser fabricados, melhorando a situação dos fornos de indução. (RUDNEV, 2017).

Alguns dos processos industriais que utilizam o forno de indução estão listados na tabela 1. Basicamente são quatro categorias principais: pré-aquecimento antes de metalurgia, tratamento de calor, soldagem e fusão.

Tabela 1 - Aplicações de fornos de indução (RUDNEV, 2017)

| Preheating prior to metalworking | Heat treating | Welding | Melting |
|---|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Forging | Surface Hardening, Tempering | Seam Welding | Air Melting of Steels |
| Gears | Gears | Oil-country tubular products | Ingots |
| Shafts | Shafts | Refrigeration tubing | Billets |
| Hand tools | Valves | Line pipe | Castings |
| Ordnance | Machine tools | | Vacuum Induction Melting |
| Extrusion | Hand tools | | Ingots |
| Structural members | Through Hardening, Tempering | | Billets |
| Shafts | Structural members | | Castings |
| Heading | Spring steel | | “Clean” steels |
| Bolts | Chain links | | Nickel-base superalloys |
| Other fasteners | | | Titanium alloys |
| Rolling | Annealing | | |
| Slab | Aluminum strip | | |
| Sheet (can, appliance, and automotive industries) | Steel strip | | |

As bases para o aquecimento por indução em metais foram descobertas por Michael Faraday em 1831, que descobriu em seu laboratório que quando se fechava o contato de uma bobina à alimentação, gerava-se um pequeno campo magnético que induzia energia elétrica em outra bobina, afastada e isolada da primeira (RUDNEV, 2017).

Assim como o nome sugere, o aquecimento se dá através da indução no material que se deseja aquecer. Essa indução gera correntes parasitas que dissipam energia na forma de calor.

Sempre que um material condutor está sob o efeito de um campo magnético variante no tempo, há o surgimento de correntes parasitas. Essas correntes surgem porque há uma diferença do potencial magnético no material. Para evitar esse fenômeno em transformadores e motores CA, são utilizadas lâminas separadas por camadas isolantes que limitam o caminho que a corrente induzida pode percorrer, diminuindo assim as perdas (DEL TORO, 1999). Nesse trabalho, esse fenômeno não será encarado como perdas, mas sim como potência útil, visto que o objetivo é gerar calor.

Outra forma de visualizar o mesmo efeito é através da lei de lenz, que diz que aparecerão correntes tentando diminuir a variação do fluxo magnético aplicado no material (HALLIDAY, 2016).

Outro ponto de interesse é o efeito pelicular. Em altas frequências, a condução de corrente passa a ser mais expressivas nas extremidades do condutor, não conduzindo no centro (HAYT, 2013). Dessa forma, como a frequência que será utilizada no projeto é impactante para o efeito pelicular, cuidados devem ser tomados na confecção da bobina e nas dimensões das peças que serão aquecidas.

O forno de indução possui uma série de vantagens sobre os demais. A principal delas sem dúvidas é a velocidade do aquecimento. É muito mais rápido aquecer um material condutor utilizando a indução de correntes do que os processos de radiação que ocorrem nas fornalhas. Essa vantagem acarreta em outra que é a redução de perdas pelo tempo de aquecimento, pois se o material aquece rápido, menos calor é transferido dele para o ar, durante o processo (RUDNEV, 2017).

Outra vantagem importante é o fato de que quando o forno não estiver sendo utilizado, ele pode ser rapidamente desligado sem consumir energia alguma, diferente de um sistema convencional em que se precisa um fornecimento contínuo de calor para a operação.

Além do forno de indução que é o foco do trabalho, serão discutidos também vários mecanismos de transferência de calor utilizando eletricidade, bem como uma rápida comparação com relação a outros fornos.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

São muitas as dificuldades encontradas em projetos de fornos em geral. O primeiro é a isolamento térmica. A área de aquecimento deve ser isolada para não comprometer o funcionamento do sistema. No caso do forno de indução em particular, alguns componentes eletrônicos necessitam atenção especial como os transistores que irão chavear a dezenas de quilo hertz, e precisam dissipadores de calor para não sobre aquece-los.

O sensor de temperatura escolhido para o projeto, deve ficar posicionado de tal forma que não comprometa a leitura de dados, visto que a bobina também esquenta e sua temperatura não é desejada nas medidas (apenas a da peça contida em seu interior).

O efeito pelicular citado anteriormente, causa uma diminuição da condução efetiva nas bobinas de cobre. Por isso, um fio oco poderá ser utilizado no sistema, e caso necessário, será possível forçar uma circulação de líquido interno para o resfriamento das bobinas. Note que o interesse está no aquecimento da peça no interior da bobina, e não no cobre.

O sistema de controle será realizado de forma digital através de microcontrolador. A linguagem utilizada para a programação do software será baseada em C. Devido à natureza lenta de variações de temperatura em geral, não se é esperado grandes dificuldades nessa parte. O controlador utilizado será o mais simples possível: liga-desliga. A escolha por esse modelo em relação ao tradicional PID, ou outros, será discutido na seção de controle.

Por fim, têm-se a otimização do projeto. Devido ao foco em portabilidade, não é possível que se atinjam grandes temperaturas, pois isso iria necessitar grande potência de entrada que talvez não seja fornecida por tomadas convencionais. Assim, toda perda deve ser minimizada para se atingir um resultado satisfatório.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é o projeto de um forno de indução, incluindo a montagem de um protótipo. Esse projeto inclui o dimensionamento de componentes, estudos referentes a isolamento térmica, escolha da potência e da frequência de operação, bem como a programação do microcontrolador para o controle digital. Um estudo a respeito dos materiais que podem ser aquecidos também faz parte do trabalho, e a variação de temperatura dos mesmos deverá ficar em torno 50 a 350 °C de forma controlada, e passando dos 500 °C caso o controlador seja desativado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar um estudo sobre os três tipos de fornos industriais mais comuns: resistivo, de indução e a arco.
- b) Estudar o comportamento de correntes parasitas em materiais condutores inseridos em campos magnéticos variantes;
- c) Analisar a oscilação passiva de elementos RLC em conjunto com a técnica ZVS;
- d) Dimensionar os componentes para que suportem as temperaturas desejadas;
- e) Discutir alguns tipos de controladores para elaborar a malha de controle;
- f) Montagem física do projeto.

1.3 JUSTIFICATIVA

Devido a necessidade crescente de realizar tratamentos térmicos em materiais, torna-se pertinente ter um pequeno forno que possa ser transportado facilmente. Esse tratamento pode ser dos mais diversos tipos. Por exemplo, caso se deseje curvar uma

barra de ferro, um procedimento comum é elevar a sua temperatura e então aplicar algum torque.

Outras aplicações seriam esquentar o material e resfria-lo com o intuito de endurece-lo ou fundi-lo e mudar seu formato. As possibilidades são muitas.

Não só as aplicações industriais são importantes, mas também as científicas. O forno de indução poderá ser utilizado para estudo de característica de materiais, analisando o comportamento dos mesmos sob efeito de um fluxo magnético variante no tempo.

O trabalho também fornecerá conhecimentos relacionados as formas de transferência de calor utilizando a eletricidade. Além disso, os estudos de sensores e controle podem ser úteis para se trabalhar não só com elementos térmicos, mas também em outras áreas.

Por fim, a abordagem sobre proteção utilizando diodos em roda livre, poderá ajudar no desenvolvimento de outros projetos. O forno de indução pequeno, se torna barato e portátil, ideal para aquecer pequenas peças metálicas de forma controlada, precisa e rápida.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este projeto visa abordar três grandes áreas da engenharia elétrica: eletrônica de potência, indução eletromagnética e sistemas de controle. Além disso, um estudo adicional referente a parte de termodinâmica será necessário, por se estar lidando com grandezas térmicas.

Para a construção do forno de indução, a primeira etapa consiste em dimensionar um conversor de energia que forneça a tensões e correntes adequadas. Se utilizará dos conhecimentos em eletrônica de potência para retificar a onda senoidal de 127~220V, com uma fonte chaveada em conjunto com um relé que servirá para controlar a corrente que flui para o sistema. O dimensionamento dos componentes será feito levando em consideração o caso mais estressante, pois assim, o sistema poderá operar tanto com carga leve ou pesada, independente do tempo.

Tendo as tensões e correntes de operação nominal, é possível projetar o circuito ressonante. É ele quem vai gerar o campo magnético variante no tempo com o objetivo de induzir correntes parasitas na peça a ser aquecida. Essa é uma parte crítica do projeto pois os componentes devem aguentar a frequência de oscilação, que será estabelecida ao decorrer do trabalho.

Tendo os elementos de entrada e o circuito oscilador, pode-se modelar as cargas do forno de indução, que não são fixas, afinal pode-se aquecer diversos tipos de ligas metálicas, ferro, aço, entre outros. Essa modelagem será feita através de software, e limitará o que pode ou não ser aquecido. Caso a carga puxe uma corrente não fornecida pela fonte, o sistema de proteção deverá atuar, eliminando o problema.

Com todas essas grandezas pré-estabelecidas, é possível trabalhar no controle do sistema bem como no código do microcontrolador. Também será necessário limitar o tempo de funcionamento para caso algum material não condutor seja inserido na bobina (o mesmo não irá aquecer e irá apenas gerar perdas), então o forno deverá reconhecer e ser desligado.

O controle da temperatura se dará comparando o valor de tensão em um potenciômetro, mostrado em um display LCD e enviado ao microcontrolador que irá tratar o sinal e mandar ao atuador. O diagrama em blocos da figura 1 a seguir, mostra como são as etapas do funcionamento do projeto:

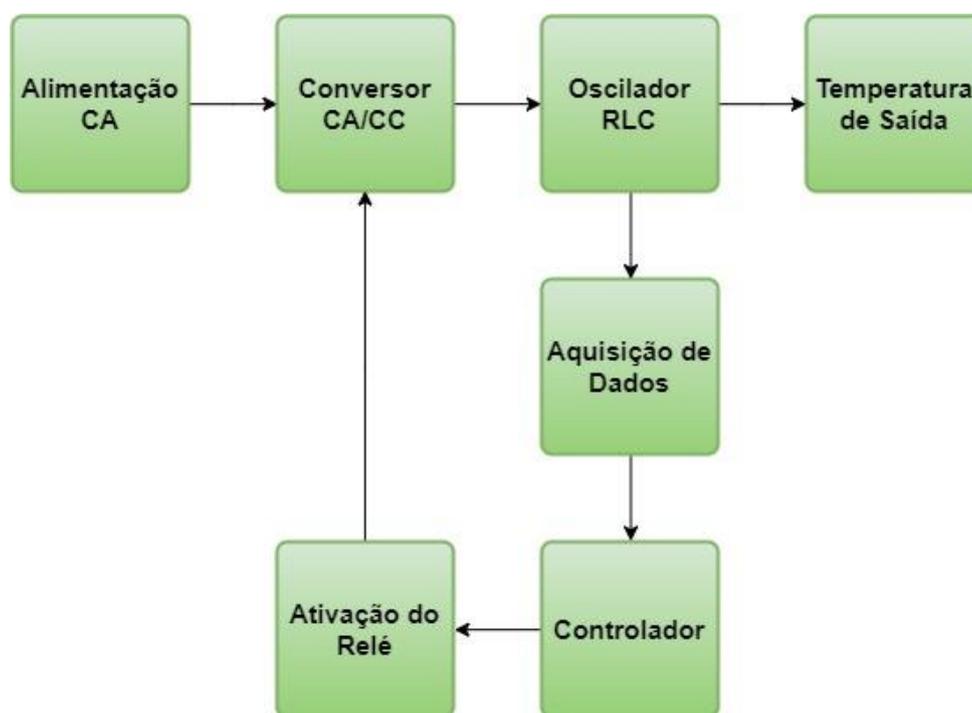


Figura 1 - Diagrama em bloco representando o funcionamento do forno
Fonte: O Autor, 2018

1.5 ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em cinco capítulos principais. Na primeira parte foram vistos os assuntos a serem abordados ao longo do texto, em uma breve introdução. Esses assuntos foram escritos de forma sucinta e serão estudados com maiores detalhes posteriormente.

Na segunda parte do trabalho, será realizado um estudo sobre três formas de transferência de calor através de eletricidade: resistiva, arco e indução. Além disso será estudado o comportamento de sensores de temperatura. Esse capítulo tem a finalidade de consolidar as bases teóricas necessárias para prosseguir com o protótipo.

Na terceira parte é que será de fato executado o projeto. Os componentes serão dimensionados de acordo com o comportamento desejado. Um estudo sobre osciladores será realizado para se obter a frequência de chaveamento necessária nos transistores e será projetado um sistema de dissipação de calor para preservar a integridade dos componentes.

A quarta parte do trabalho é destinada ao estudo de sistemas de controle. É nela que serão vistos os tipos de controladores, captura e conversão de dados, programação do microcontrolador, entre outros.

Na quinta e última parte serão estabelecidas as considerações finais. Ocorrerá também, uma análise dos resultados obtidos nas etapas anteriores. Serão levantados dados relevantes relacionados as condições de operação de circuitos bem como a geração do campo magnético.

1.6 CRONOGRAMA

O cronograma na figura 2 a seguir visa terminar o trabalho com uma boa folga, para caso ocorram problemas não previstos:

| Cronograma | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Etapa | Mês | | | | | | | | | | | |
| | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun |
| Pesquisa Bibliográfica | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| Elaboração do Trabalho | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| Revisão do Trabalho | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | |
| Montagem do Protótipo | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | |
| Análise de Dados | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | |
| Preparar Apresentação | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |

Figura 2 - Cronograma do TCC
 Fonte: O Autor, 2018

2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR ELETROMAGNÉTICA

2.1 TIPOS DE FORNO

Nas indústrias são encontrados três modelos de fornos distintos, cada um com suas aplicações específicas. Em geral são responsáveis por grande parte da potência consumida e por isso devem ser projetados tomando-se cuidado para que se obtenha o maior rendimento para a aplicação em questão (MAMEDE, 2017).

2.1.1 Forno resistivo

São chamados de fornos resistivos os que usam as perdas por efeito joule dissipados em uma resistência, quando esta é percorrida por uma corrente elétrica, em geral. Podem ser projetados para aquecimento direto ou indireto.

No aquecimento direto, o material a ser aquecido fica entre dois eletrodos carregados, geralmente com pequena tensão, e uma corrente elétrica percorre o material (a mesma do circuito externo), aquecendo-o. São fornos de uso muito específico (MAMEDE, 2017). A figura 3 mostra um esquemático representando a corrente percorrendo o material e retornando a fonte.

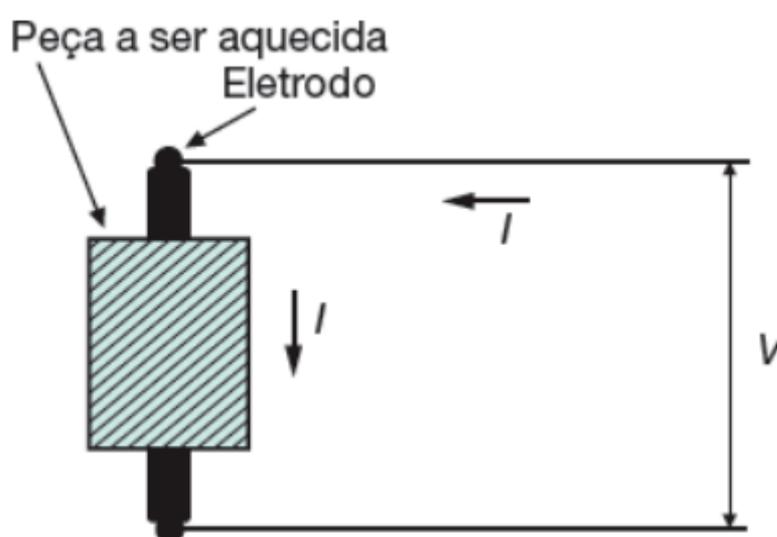


Figura 3 - Forno resistivo de aquecimento direto
Fonte: MAMEDE, 2017

Os fornos de resistência indireta, assim como o nome sugere, aquecem materiais através da transferência de calor de uma resistência percorrida por corrente, até o material que está em um local isolado (eletricamente falando). Essa forma de aquecimento é muito mais comum que a anterior, e é usada por exemplo, em processos de secagem de produtos farmacêuticos, no cozimento de produtos alimentícios, entre outros (MAMEDE, 2017).

As resistências desse tipo de forno podem ser conectadas de forma simples (fase-neutro e fase-fase), ou ainda de forma trifásico. Esta última forma é preferível por se utilizar menor quantidade de material resistivo para a mesma transferência de potência

Para se projetar um forno resistivo deve-se primeiramente escolher a potência consumida e com isso dimensionar os fios condutores (tipo do material e bitola) (MAMEDE, 2017).

2.1.2 Forno a arco

Nesse tipo de forno utiliza-se o arco elétrico para gerar calor. São largamente utilizados na indústria para a fusão de materiais diversos como ferro e aço. Não apenas estes, também são usados para fundir cobre, latão, bronze e ligas diversas

Para entender como acontece o aquecimento nesse tipo de forno, é necessário entender primeiro o fenômeno físico por trás do arco elétrico. O mesmo ocorre quando há a passagem de corrente por um meio isolante, geralmente o ar (MAMEDE, 2017). Eletrodos são carregados até que a tensão de ruptura do ar seja atingida. Chegando nesse ponto, a resistência elétrica encontrada pelo sistema cai abruptamente e é necessário manter uma elevada corrente para que haja o aquecimento.

Assim como nos fornos resistivos, existem algumas variações do forno a arco, diretamente relacionados com a forma a qual acontece a transferência de calor. Um deles é o forno a arco indireto. Nele a transferência de calor acontece por irradiação e convecção, estando isolados o arco e o material a ser aquecido.

Já no forno a arco direto, o material está submetido a descargas elétricas elevadas e o calor transferido provem do próprio arco elétrico formado entre os eletrodos (MAMEDE, 2017).

A figura 4 mostra um forno a arco direto visto lateralmente. Nela pode-se observar os esquemáticos das medições para o sistema de proteção de sobrecorrente

e sobretensão, o reator limitador, o transformador do forno, e os eletrodos onde ocorrerão arcos elétricos intensos.

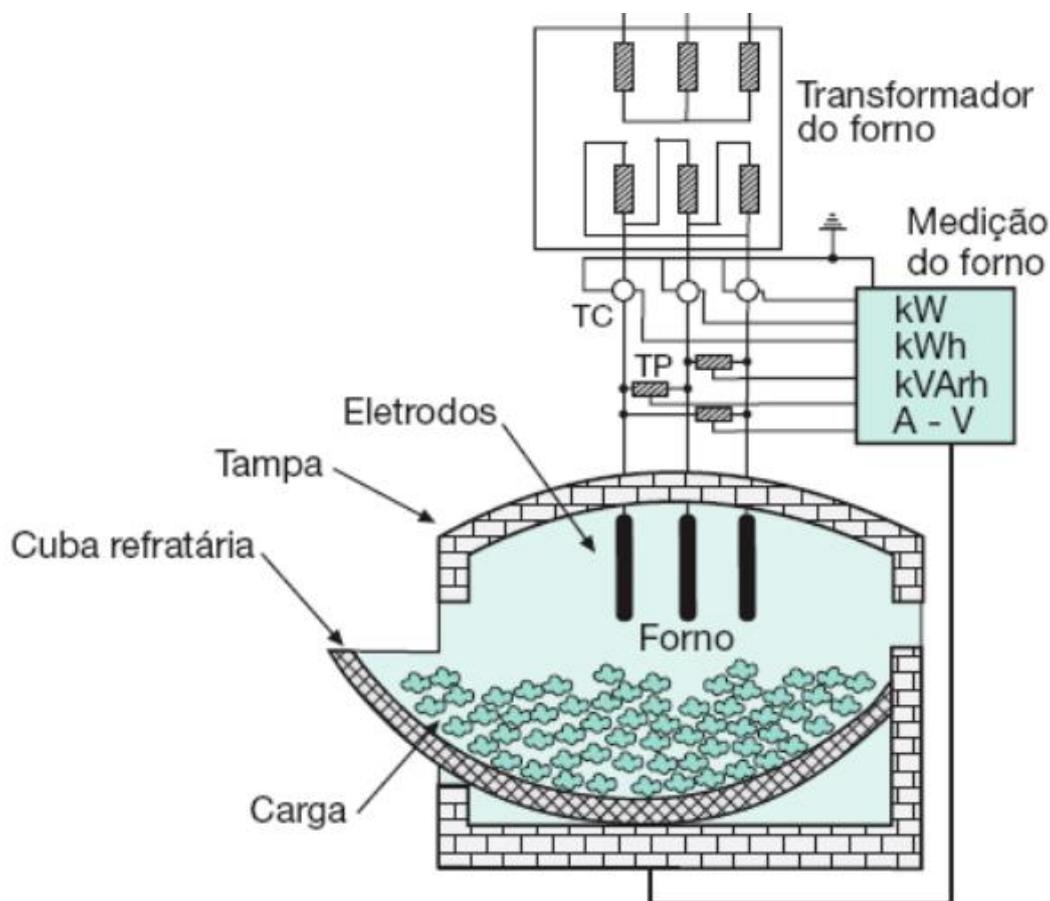


Figura 4 - Principais partes de um forno a arco
Fonte: MAMEDE, 2017

Esse tipo de forno geralmente é trifásico, e de grande potência. Para seu funcionamento, são usados transformadores especiais, que podem ter até vinte tapas para regular a tensão no secundário, que varia de 50 a 400 V. Normalmente o transformador acompanha o forno, pois é fabricado sobre condições específicas. A ligação do forno pode ser feita em diversas tensões. As mais comuns na indústria são 13.8 kV ou 69 kV, dependendo da carga (MAMEDE, 2017).

A tabela 2 mostra uma relação entre a potência do transformador e a capacidade de fusão do forno para aço ou ferro:

Tabela 2 - Comparativo de potência de fornos a arco industriais (MAMEDE, 2017)

| Potência (kVA) | Capacidade (t) | Produção t/h | Consumo (kWh/t) |
|----------------|----------------|--------------|-----------------|
| 600 | 0,7 | 0,70 | 550 |
| 1.500 | 3,0 | 1,80 | 545 |
| 3.000 | 7,0 | 2,80 | 625 |
| 5.000 | 10,0 | 6,30 | 480 |
| 7.000 | 20,0 | 9,23 | 460 |
| 10.000 | 35,0 | 14,48 | 440 |
| 12.500 | 40,0 | 17,14 | 435 |
| 17.500 | 65,0 | 26,00 | 420 |
| 20.000 | 80,0 | 30,00 | 420 |
| 25.000 | 100,0 | 37,50 | 420 |
| 31.500 | 110,0 | 49,80 | 440 |
| 35.000 | 120,0 | 53,30 | 420 |
| 40.000 | 150,0 | 62,10 | 420 |

2.1.3 Forno de indução

Os fornos de indução utilizam-se das correntes de Foucault para gerar calor em peças metálicas, dentro de um recipiente isolado termicamente, através de uma bobina envolvente. Em outras palavras, a bobina do forno serve como primária de um transformador, e a peça de trabalho forma um curto-circuito com ela mesmo, formando a bobina secundária (MAMEDE, 2017). A figura 5 a seguir, ilustra a indução de correntes, as quais produzem calor.

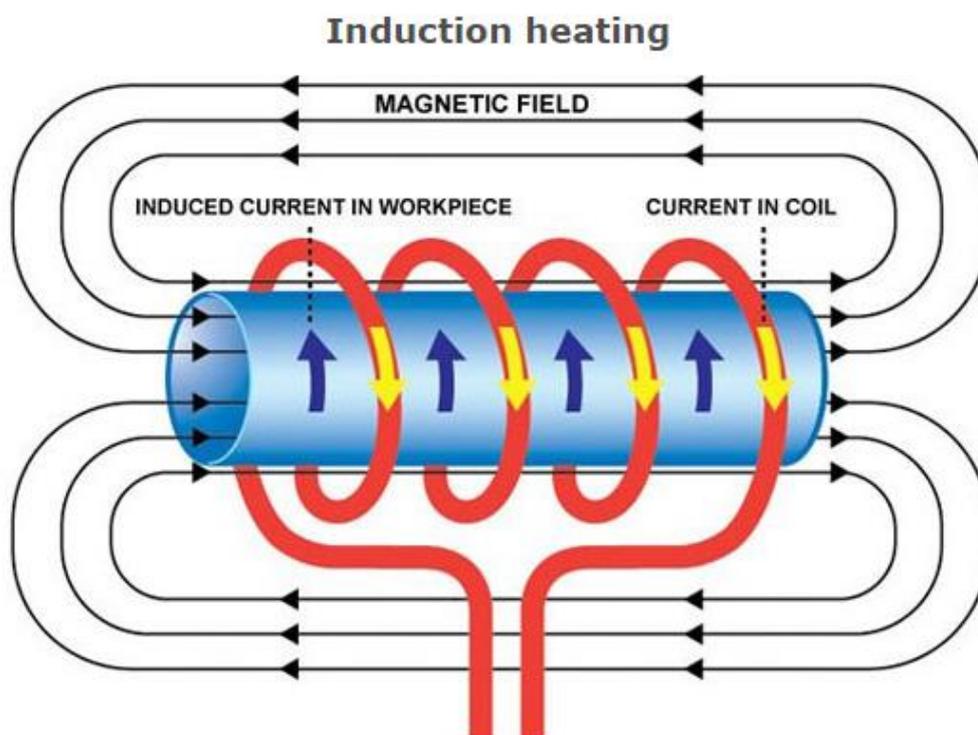


Figura 5 - Princípio de indução de correntes parasitas
 Fonte: www.duolin.com/induction_heating

O rendimento neste tipo de forno depende não só das características construtivas eletromecânicas, mas também das propriedades térmicas e elétricas das peças de trabalho a serem aquecidas. Materiais ferromagnéticos aquecem mais, tornando o processo mais eficiente devido as perdas magnéticas por histerese enquanto materiais paramagnéticos, como o alumínio por exemplo, não sofrem o mesmo efeito e o aquecimento é reduzido (MAMEDE, 2017).

Outro fator importante para o rendimento é a profundidade de penetração das correntes induzidas na carga, a qual varia exponencialmente com a frequência (MAMEDE, 2017).

Para cargas de grandes dimensões usa-se frequências baixas para o aquecimento, geralmente a própria frequência da rede. Já para cargas de dimensões pequenas, como é o caso deste projeto, usa-se frequências maiores (MAMEDE, 2017). Na seção referente ao projeto em si, será calculado a melhor frequência tendo em vista a análise teórica e componentes de valores comerciais, encontrados no mercado.

A grande vantagem desse forno é a velocidade de aquecimento, e suas reduzidas perdas relacionadas a isso. Supondo por exemplo que se deseje transferir 1000 joules para uma peça de forma linear, e que essa peça possua perdas médias de 1% da energia contida no corpo a cada segundo, devido ao contato com o meio externo. Utilizando o matlab pode-se plotar três processos de aquecimento distinto, um que demoraria 10s para a transferência da energia citada, outro para 50s e outro que demoraria 100s. A figura 6 é dada a seguir mostra esses gráficos:

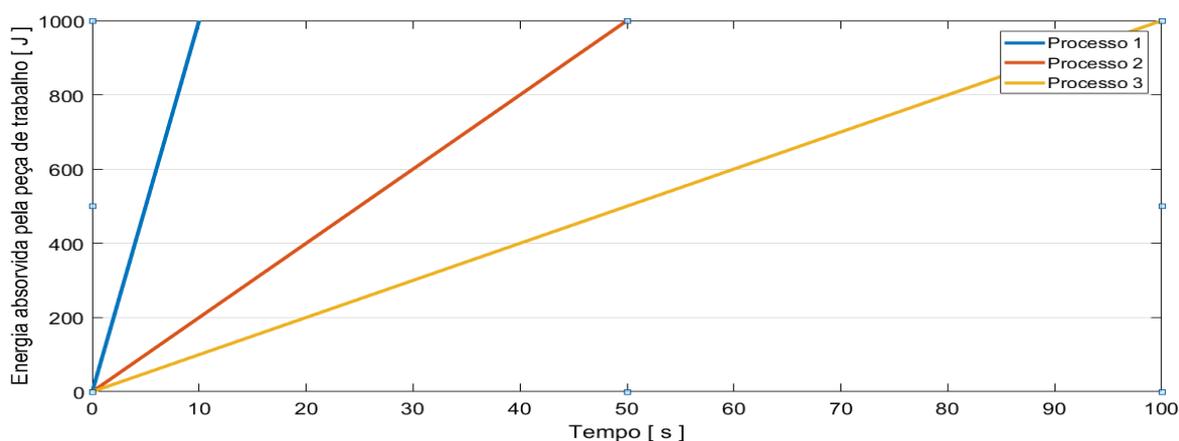


Figura 6 - Três processos transferindo 1000 joules de energia em tempos diferentes
Fonte: O Autor, 2018

Multiplicando as retas ideais do gráfico por 1% de perda (obtendo taxas de perdas hipotéticas) e integrando o resultado no tempo de operação de cada processo, é possível encontrar as perdas totais associadas, dado no gráfico da figura 7 a seguir:

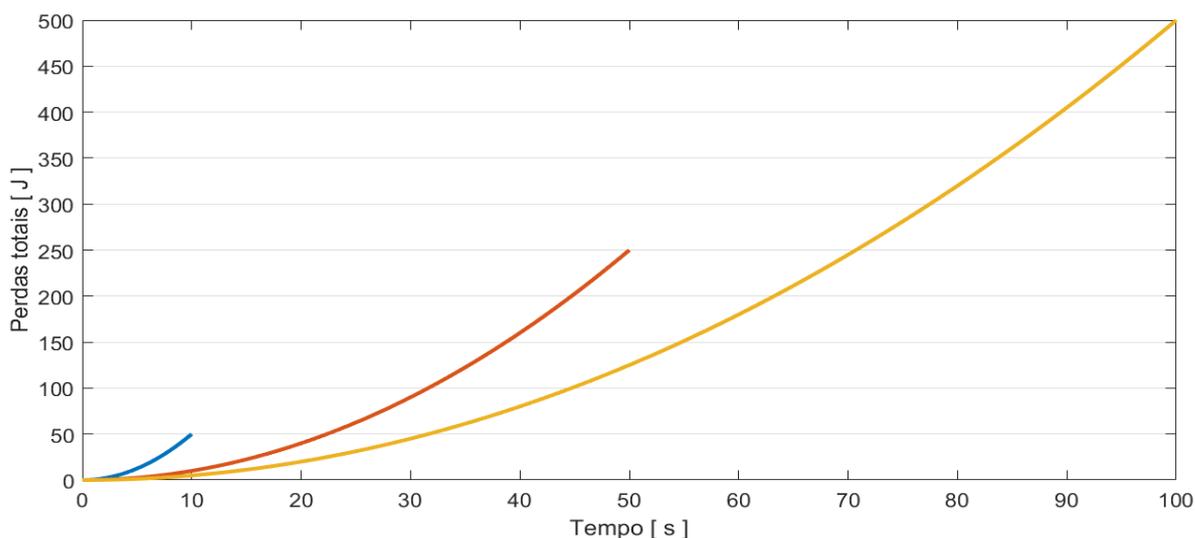


Figura 7 - Perdas totais dada em cada instante de tempo
Fonte: O Autor, 2018

Pelo gráfico da figura 7 pode-se perceber que as perdas totais do primeiro processo são de 50 joules, enquanto do segundo e terceiro processo são respectivamente 250 e 500 joules. O fato de se demorar mais nos outros processos, faz com que no final, as perdas totais sejam maiores.

Com 10 segundos por exemplo, as perdas do processo 1 são muito superiores aos processos 2 e 3, porém os 1000 joules de energia útil já foram transferidos para a peça de trabalho. Esse resultado está de acordo com o esperado e é uma das principais vantagens em se utilizar o forno de indução para aquecimentos rápidos.

2.2 SENSORES DE TEMPERATURA

Dispositivos usados para medição de temperaturas são de uso comum em processos industriais e de engenharia. Há uma vasta gama em que os sensores podem atuar, de forma simples, onde a temperatura é convertida em tensão de forma barata e resistente a fatores ambientais presentes nos mais variados meios.

Infelizmente o uso de sensores convencionais (os termopares por exemplo), não são resistentes a variação intensa de campos magnéticos, como as que ocorrem nos fornos de indução. Devido a necessidade de um controle preciso de temperatura, é necessário que se tenha um sensor adequado para a medição (SMALCERZ, 2013).

Quando o campo magnético é desativado, os sensores convencionais (que usam o efeito seebeck), podem medir corretamente a temperatura (SMALCERZ, 2013). Entretanto, devido a construção física do forno de indução neste projeto, se tornaria muito complexo desativar o circuito oscilador e medir a temperatura por contato (talvez utilizando-se um servo motor acoplado a um sensor), pois há uma margem de erro muito grande já que o tempo necessário para a medida seria considerável, enquanto a peça já estivesse perdendo calor para o meio, acarretando em uma medida incorreta.

Outro problema que aparece é a perda de potência máxima devido ao excessivo tempo de medição. Enquanto em um ambiente comum o termopar mediria a temperatura continuamente, num ambiente de fortes variações eletromagnéticas, os intervalos para medição necessários, implicariam em uma redução de potência do forno.

A literatura sugere a aquisição de dados com um termopar blindado e filtro digital, conforme ilustrado pela figura 8:

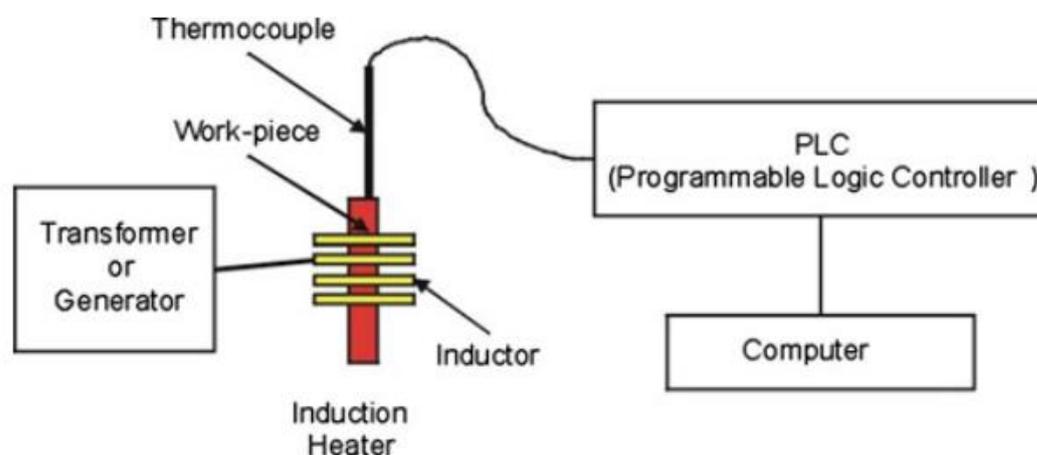


Figura 8 - Sensor blindado acoplado com programação para redução de ruído térmico
Fonte: SMALCERZ, 2013

Por mais que esse método resolvesse o problema, fugiria do escopo deste trabalho, que visa aplicar a teoria eletromagnética utilizando-se circuitos elétricos, deixando a parte computacional o mais simples e barata possível.

Em grandes indústrias que possuem fornos de indução, geralmente usa-se sensores precisos e robustos, impactando em um preço elevado. Neste projeto, o componente utilizado para realizar a medição é o mlx90614esf-bcc, cuja faixa de operação irá variar entre a 50 e 350 °C.

3 PROJETO

3.1 ENTRADA DE ENERGIA

Fornos de indução existem nos mais variados tamanhos e dessa forma, é preciso começar o projeto estipulando sua potência, bem como a sua aplicação.

Algo comum e muito procurado na indústria é a fusão de ligas metálicas. Como existem diversas ligas com características diferentes, é preciso restringir algumas opções para a execução do projeto. Em um primeiro momento utilizar-se-á o alumínio puro para os cálculos seguintes, bem como uma temperatura ambiente de 25°C. Algumas características do alumínio puro estão no anexo A.

Para a fusão do alumínio é necessário injetar calor na peça de trabalho até que a mesma atinja seu ponto de fusão e continuar até que ocorra a mudança de fase do estado sólido para líquido. A fórmula 1 a seguir é utilizada para saber quanto calor será necessário, desconsiderando qualquer perda (Hallyday, 2014).

$$Q = m * c * \Delta T + m * L \quad (1)$$

Q: Calor injetado

m: Massa do corpo

c: Calor específico

ΔT : Variação de temperatura

L: Calor latente

Como a fórmula depende da massa, e novamente reforçando que diversos formatos e materiais distintos serão inseridos no forno, pode-se arbitrar por exemplo um valor de 0.5 kg, que corresponderia a uma peça em alumínio puro de grandes dimensões para o forno aqui projetado. Sabendo disso, o calor total necessário para fundir 0.5 kg de alumínio a partir da temperatura ambiente é:

$$Q = 0.5 * 910 * (933 - 298) + 0.5 * 395000$$

$$Q = 486 \text{ kJ}$$

A potência do forno depende também do tempo necessário para aquecer a peça. Nesse trabalho, será adotado um tempo máximo de 60 segundos. Sabendo que a potência é a razão de energia por tempo, têm-se então a potência do forno como sendo:

$$P = \frac{486 \text{ kJ}}{60 \text{ s}} = 8.1 \text{ kW}$$

Sabendo que a alimentação disponível é de 127 V e que seria necessária uma retificação para se trabalhar com tensão contínua para alimentar o oscilador, afim de trabalhar com frequências maiores que 60 Hz, induzindo mais correntes parasitas, a corrente necessária circulando na rede seria então de:

$$I_{ac} = \frac{8.1 \text{ kW}}{127 \text{ V}} = 63,8 \text{ A}$$

E a tensão aplicada no circuito ressonante do forno seria de:

$$V_{dc} = 127 * \sqrt{2} = 179,6 \text{ V}$$

Os elevados valores de corrente e tensão comprometeriam os componentes disponíveis para a realização do projeto bem como a rede de alimentação disponível. A aquisição de novos componentes seria inviável do ponto de vista financeiro, portanto optou-se por pré-definir a potência de entrada, tentando manter a corrente nos limites nominais de operação do sistema, ou seja 20 A. Este valor foi estabelecido principalmente em função dos componentes eletrônicos como MOSFETS por exemplo.

Para isso utilizou-se uma fonte chaveada de 500 W, com saída de 24 V e 20 A em corrente contínua. Além de solucionar o problema referente a alta corrente, uma vantagem passa a ser incorporada: o sistema agora é bivolt e funciona tanto em 127 como 220 V com a corrente drenada da rede muito reduzida, devido as características construtivas das fontes chaveadas.

É claro que a redução de potência implica em redução de temperaturas obtidas, não sendo mais possível a fusão do alumínio na quantidade e tempo estabelecidos anteriormente.

3.2 OSCILADOR RESSONANTE

Existem diversos princípios de funcionamento de fornos de indução. Na indústria, os mais utilizados são os trifásicos utilizando IGBTs. Neste tipo é possível controlar a frequência de operação através do disparo nos gates.

São fornos extremamente robustos, que possuem transformadores próprios, muitas vezes com vários taps, estrutura mecânica para suportar a movimentação de metais fundidos em seu interior (visto que os intensos campos magnéticos aplicam forças nos mesmos), blindagem em torno da bobina para direcionar as linhas de campo, utilizando chapas de aço-silício laminadas para não induzir correntes parasitas fora da zona de operação, e diversos outros cuidados com resfriamentos, entre outros. É claro que um projeto como esse é, além de complexo, extremamente caro. A figura 9 foi fotografada pelo autor do trabalho, em uma visita técnica a WEG, e as



Figura 9 – Forno de indução de 2.5 MVA, WEG, Parque Fabril 1
Fonte: O Autor, 2018

informações deste parágrafo foram conseguidas com o engenheiro responsável da área.

O foco deste trabalho é um forno indutivo para pequenas peças, sem necessidade de cuidados adicionais com a rede elétrica. Por tanto, o circuito ressonante que melhor se adequa as características exigidas é dado na figura 10 a seguir e está dividido em três estágios:

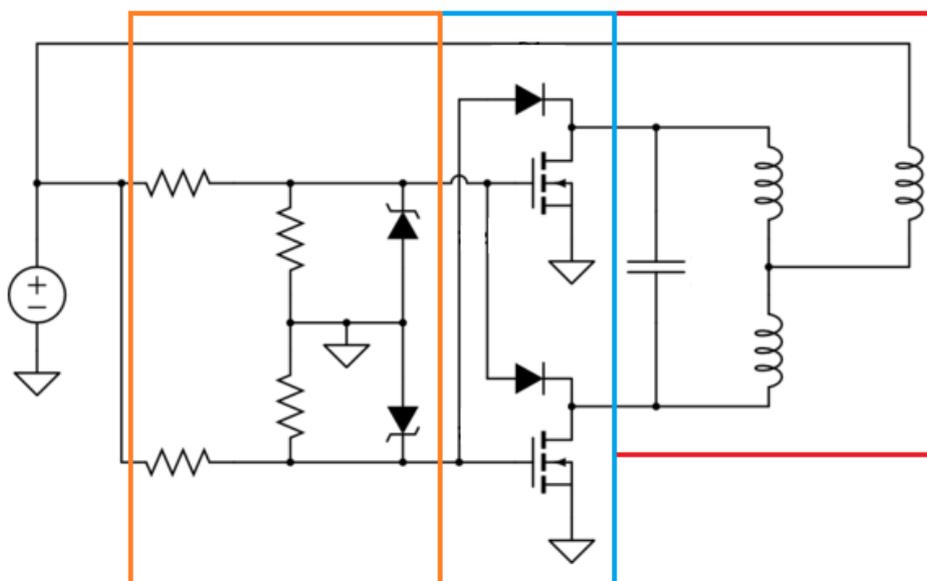


Figura 10 – Oscilador ressonante para pequenas potências de entrada (flyback)
Fonte: Adaptado de: www.rmcybernetics.com/science

Na parte em laranja, têm-se um sistema de proteção com diodos zeners, para que a corrente da alimentação não exceda os valores máximos permitidos pelos MOSFETs, danificando-os. Entretanto, um regulador de tensão poderá ser utilizado para essa função devido a maior confiabilidade e menor quantidade de espaço necessário na placa. Os resistores “horizontais” servem para limitar a corrente no gate dos transistores, e serão escolhidos de acordo com o datasheet dos mesmos. Por fim os resistores “verticais”, servem para descarregar possíveis cargas armazenadas por capacitâncias parasitas nos gates dos transistores.

A parte em azul é responsável pelo chaveamento do terra no sistema. Em um primeiro momento, pode parecer que ambos os MOSFETs estão igualmente polarizados e não haverá oscilação. Entretanto, a diferença construtiva dos componentes, mesmo que muito pequena, faz com que na hora que um MOSFET está conduzindo o outro se abra, até que o ciclo se inverta.

Após o começo da oscilação explicado anteriormente, o efeito é mantido pelos diodos schottky de resposta rápida conectados de forma cruzada, e será melhor explicado posteriormente com o auxílio de simulações.

Por fim, na parte vermelha observa-se o tanque ressonante. Este tanque será responsável pela frequência de oscilação do sistema. A grande desvantagem neste modelo de oscilador, é que a indutância é variável, pois vários metais diferentes serão introduzidos dentro da bobina responsável pelo aquecimento.

Como o presente trabalho não visa o aquecimento até temperaturas extremamente elevadas em que variações de frequências controladas seriam necessárias para um maior desempenho, pode-se utilizar elementos LC que forneçam uma frequência inferior a uma “frequência limite” que será estabelecida nos próximos tópicos.

O indutor mais a direita da figura, possui a função de suavizar a corrente de entrada, fazendo com que não voltem harmônicas do oscilador para a fonte. Em série com esse indutor será adicionado um relé. Esse componente será útil para se controlar o fluxo de corrente, logo, a temperatura de saída.

3.2.1 Dimensionamento da bobina

Quando se trata de fornos de indução, uma das partes mais críticas é a construção da bobina. A literatura é ampla neste assunto e existem dezenas de formatos e características que dependem exclusivamente da aplicação. Para fornos de indução de cozinha, usa-se um conjunto de bobinas planas que tem por objetivo aquecer a panela de forma simétrica ocupando pouco espaço. Já para aquecer uma pequena faixa de uma barra de ferro, usa-se apenas uma espira, ou ainda pode-se usar um solenoide para aquecer uma região maior, de forma uniforme (Zinn, 2002).

Para a potência de 500 W aqui estabelecida, pretende-se aquecer pequenos elementos condutores como parafusos, porcas, chapas finas, entre outros, de forma uniforme. Deve-se então usar um solenoide (bobina) com duas características principais a serem definidas: diâmetro e comprimento.

Quanto menor o diâmetro, mais concentrado estarão as linhas de campo e maior será o aquecimento (Zinn, 2002). Porém, é preciso colocar as peças de trabalho dentro da bobina com folga, para que não ocorra nenhum curto-circuito ao fechar

contato nas espiras. Fios isolados não são úteis pois as altas temperaturas derreteriam a camada isolante. Tendo isso em vista, optou-se por usar um diâmetro de 3 cm.

Para o comprimento, optou-se pelo dobro do diâmetro, sendo assim 6 cm. Este valor deve ser tal que a peça de trabalho seja facilmente colocada e retirada da bobina. Um solenoide muito comprido seria indicado para aquecer barras de ferro de forma uniforme, por exemplo, enquanto um solenoide mais curto seria indicado para aquecimentos pontuais (Zinn, 2002).

Um último fator desta bobina é o número de espiras. Como os fios precisam ser de dimensões consideráveis para suportar a corrente de 20 A em alta frequência, e as espiras devem estar afastadas afim de evitar curtos, optou-se por usar 10 voltas (que batem com os 6 cm estabelecidos anteriormente). Com estas medidas, é possível calcular o primeiro parâmetro do circuito ressonante: a indutância L_0 em vazio. Para isso, usa-se a fórmula 2. Está fórmula só é verdadeira nos casos em que o comprimento é maior que o diâmetro. Esta condição é respeitada neste projeto, então têm-se:

$$L_0 = \frac{\mu_0 * N^2 * A}{l} \quad (2)$$

L_0 : Indutância em vazio (H)

N: Número de espiras

A: Área do solenoide (m²)

l: Comprimento do solenoide (m)

$$L_0 = \frac{4 * \pi * 10^{-7} * 10^2 * \pi * (1,5 * 10^{-2})^2}{6 * 10^{-2}}$$

$$L_0 \approx 1,48 \mu H$$

Este é o valor de indutância do tanque LC em vazio. A figura 11 mostra como ficou a mesma na prática:

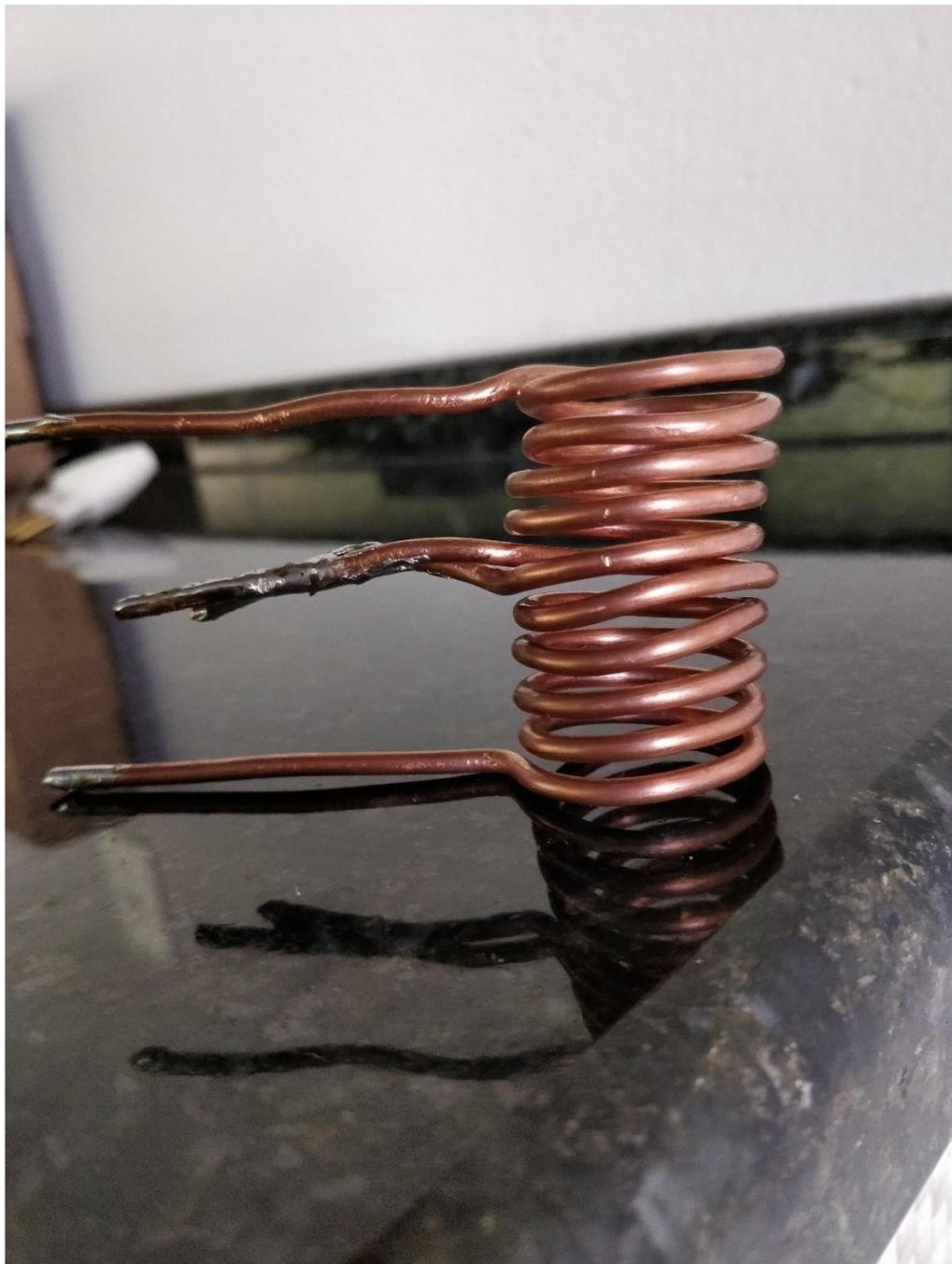


Figura 11 – Bobina de trabalho usada para o aquecimento
Fonte: O Autor, 2018

3.2.2 Efeito pelicular, comprimento de penetração e frequência ressonante

De acordo com a lei de Faraday, dada na fórmula 3 sabe-se que quanto, mais intensas forem as variações de fluxo magnético, maiores serão as tensões induzidas e conseqüentemente as correntes circulantes no material (Hayt, 2013).

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

ε : Tensão induzida

Φ : Fluxo magnético

t: Tempo

As peças de trabalho podem ser consideradas, assim como em qualquer forno de indução, uma única espira em curto com ela mesma. Poderia se pensar então que a melhor forma de transferir mais energia seria aumentar a variação de fluxo (com um aumento de frequência do sistema), induzindo assim mais correntes parasitas. Acontece que este procedimento aumenta também o efeito pelicular, que faz com que as correntes tendam a se distribuir na superfície do material. Isso gera dois problemas de imediato para este projeto.

O primeiro problema está na uniformidade do aquecimento da peça. Como as correntes circulam pela extremidade, é lá que irá ocorrer maior dissipação de energia por efeito joule, fazendo com que a superfície seja aquecida e o centro da peça não.

O segundo problema está associado a resistência do circuito ressonante. Não só as correntes induzidas estarão em alta frequência, mas também as correntes do sistema e isso faz com que o mesmo efeito deixe menos espaço útil para a circulação, gerando elevadas perdas no cobre da bobina de trabalho.

Para amenizar estes problemas deve-se levar em conta o comprimento de penetração, que é definido como sendo a distância em que a densidade de corrente corresponde a aproximadamente 37% do valor da superfície (HAYT, 2013). A figura 11 a seguir ajuda a ilustrar esta afirmação.

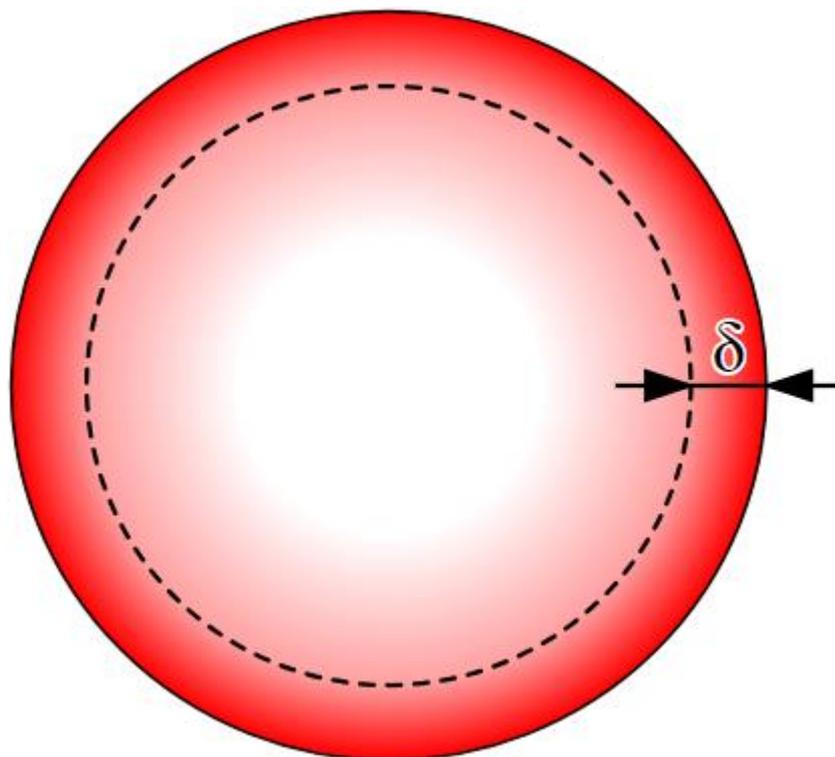


Figura 12 – Distribuição do fluxo de corrente em um condutor cilíndrico
Fonte: www.uniteng.com/index.php/2013/06/21/electromagnetic-shielding

Como regra geral, quanto mais elevada for a frequência, menor será a penetração e, portanto, menor poderão ser as peças aquecidas de forma eficiente e com aquecimento bem distribuído. A literatura sugere que para peças de 4 a 20 milímetros, sejam utilizadas frequências entre 10 a 100 kHz.

A escolha da frequência depende não só das dimensões da peça de trabalho como também da aplicação. Buscando neste projeto um aquecimento uniforme e sabendo que não será possível um controle preciso da frequência (pelo forno sempre atuar na ressonância, com o valor de indutância variando de acordo com a carga), optou-se por utilizar 100 kHz como limite máximo. Dessa forma, quando algum elemento não magnético (baixa permeabilidade) for inserido na bobina, esta frequência deverá se manter, e quando um objeto magnético for inserido, a mesma deverá cair.

Com isto em mente pode-se usar a fórmula 4 a seguir para encontrar o valor do banco de capacitores necessário para se atingir a ressonância em 100 kHz com o forno em vazio:

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_0 C}} \quad (4)$$

f_0 : Frequência em vazio

L_0 : Indutância do tanque em vazio

C : Capacitância do tanque fixa

$$100k = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{1,48\mu C}}$$

$$C = \frac{1}{(2 * \pi * 100k)^2 * 1,48\mu}$$

$$C = 1,69 \mu F$$

Escolheu-se então um banco de 5 capacitores do tipo MKP em paralelo de 0,33 μF , reforçados para lidar com as altas frequências e correntes, totalizando uma frequência máxima de circuito aberto, de acordo com a fórmula 4, de 101 kHz.

Para validar a frequência estabelecida, é preciso analisar se não houve um aumento muito significativo na resistência da bobina. Para amenizar o problema do aumento de resistência pode-se utilizar um cabo de bitola muito maior do que o necessário para a mesma corrente, caso fosse aplicado tensão contínua (Hayt, 2013). Cabos muito grossos são mais difíceis de dobrar, impossibilitando a confecção da bobina. Em fornos de grande porte, são fabricadas bobinas especiais com resfriamento interno, inviáveis para este projeto.

A bobina de trabalho foi confeccionada utilizando o condutor de maior bitola disponível no momento, em cobre, de 3.5 mm de diâmetro, já pensando em maximizar a frequência de operação. O comprimento total do circuito é próximo de 1,5 m. A

resistência DC pode então ser calculada para o cobre, através da fórmula 5, como sendo:

$$R = \frac{\rho * l}{A} \quad (5)$$

R: Resistência (Ω)

l: Distância (m)

A: Área (mm²)

ρ: Resistividade

$$R = \frac{0,0162 * 1,5}{\pi * 1,75^2}$$

$$R = 2,53 \text{ m}\Omega$$

Dado que a frequência máxima utilizada será de 101 kHz, utilizando o anexo A para obter dados do cobre e a fórmula 6 a seguir, pode-se encontrar o comprimento de penetração nos condutores do sistema:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma * \mu * \pi * f}} \quad (6)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{6.17 * 10^7 * 0.999 * 4 * 10^{-7} * \pi^2 * 101k}}$$

$$\delta = 0,203 \text{ mm}$$

Uma simplificação será adotada aqui. Toda a corrente irá circular no comprimento de penetração encontrada anteriormente. Isso dará um valor de resistência maior do que o real, dando certa folga ao projeto. Assim sendo, recalculando a resistência, descontando a área central não utilizada para a condução, tem-se:

$$R = \frac{0,0162 * 1,5}{\pi * 1,75^2 - \pi * (1,75 - 0,203)^2}$$

$$R = 11,6 \text{ m}\Omega$$

Apesar de um aumento de resistência de quase 5 vezes, a escolha da bitola do fio parece adequada e dissipará uma potência máxima de 4.6 W acordo com a fórmula 7.

$$P = R * i^2 \tag{7}$$

$$P = 11,6m * 20^2$$

$$P = 4,6 \text{ W}$$

Com isso, encerra-se a escolha da frequência de operação, o dimensionamento da bobina geradora de campos e o banco de capacitores necessário.

3.2.3 Driver Zero Voltage Switching

Tendo calculado os valores para o tanque LC e a frequência de ressonância para o circuito em vazio, pode-se agora trabalhar no circuito apresentado na figura 10. Para isso optou-se em usar transistores IRFP250N, que suportam uma corrente de 30 A de acordo com o datasheet. Este valor foi escolhido para dar bastante folga ao componente. Resistores de 10k foram colocados entre os gates e o terra, para descarregar possíveis cargas armazenadas. Um indutor choke de 2 mH se mostrou adequado para suavizar a corrente de entrada. Este valor foi obtido através de tentativa e erro, com várias simulações usando o PSIM, no circuito dado na figura 13 a seguir:

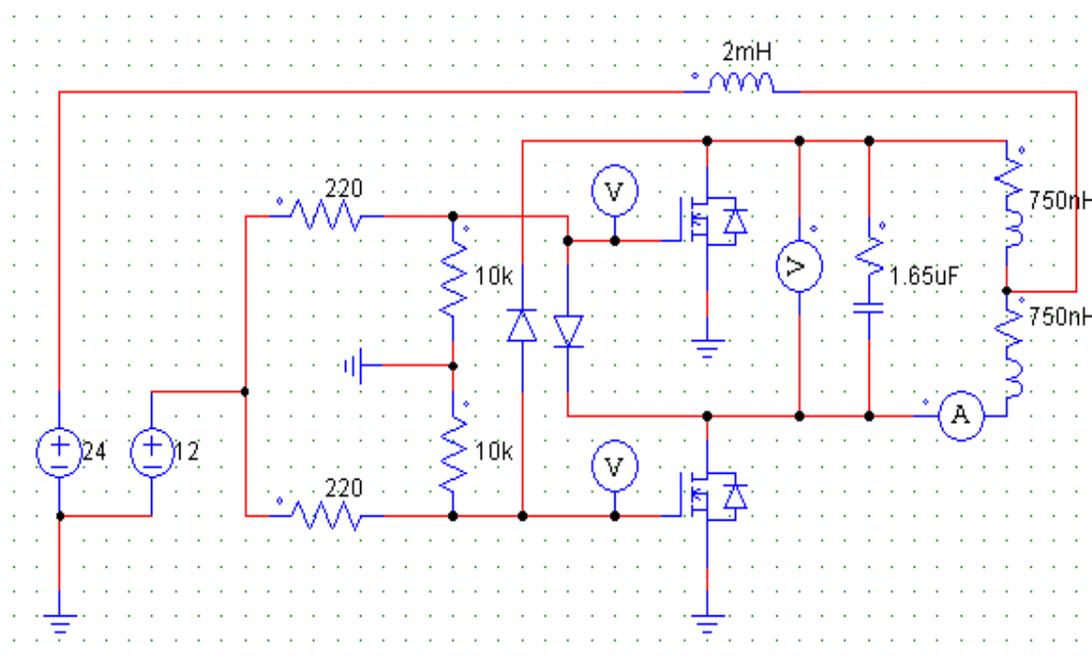


Figura 13 – Esquemático utilizado para simulações no PSIM
Fonte: O Autor, 2018

A corrente que passa pela bobina sem carga é dada no gráfico da figura 14. Na figura 15 têm-se uma imagem ampliada, dando ênfase a frequência de oscilação, que é de fato aproximadamente 100 kHz, conforme esperado e confirmado pela figura 16.

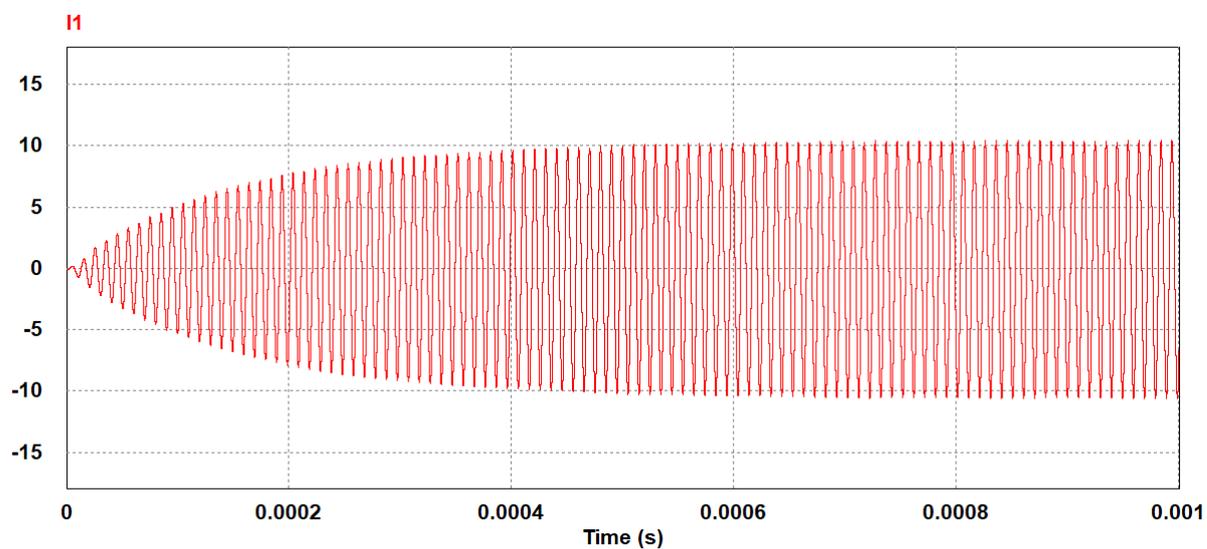


Figura 14 – Corrente circulando na bobina com o forno sem carga
Fonte: O Autor, 2018.

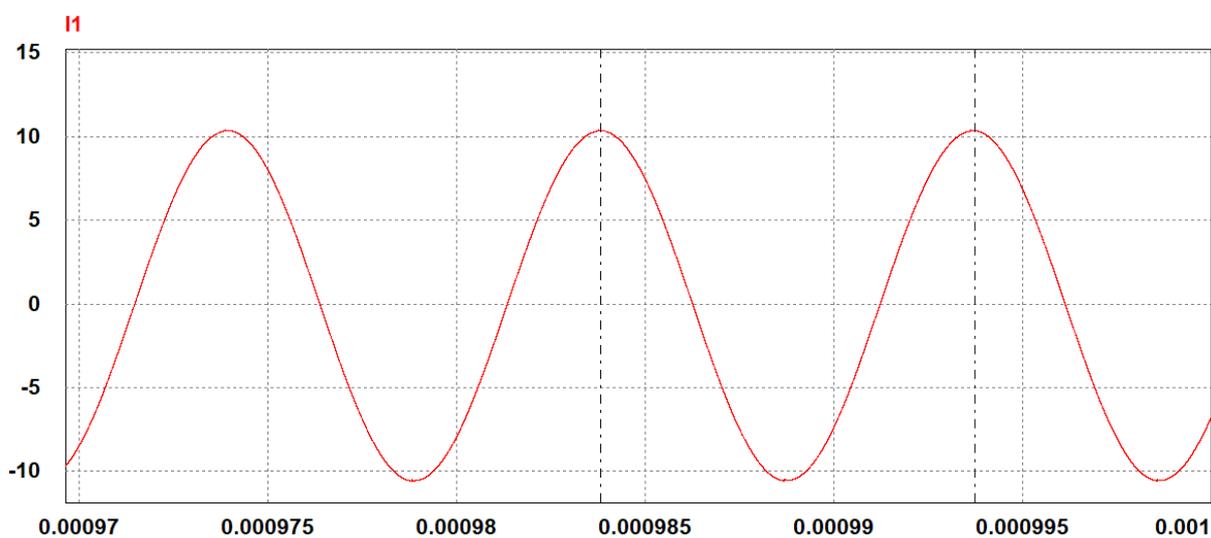


Figura 15 – Zoom na corrente da bobina em vazio, já em regime permanente
Fonte: O Autor, 2018.

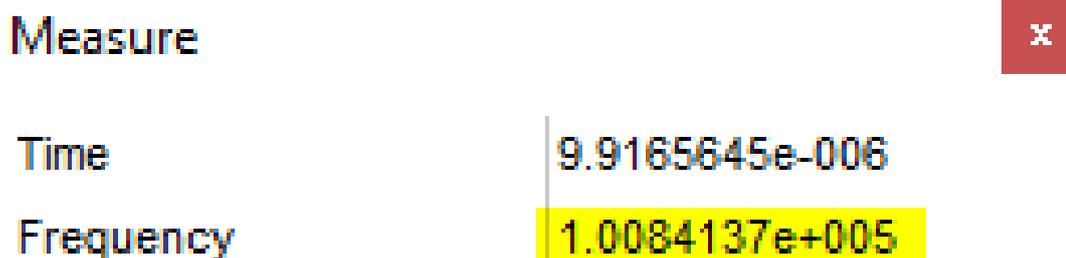


Figura 16 – Frequência de oscilação próxima a 101 kHz, conforme calculado
Fonte: O Autor, 2018

Apesar dos 7 A (RMS, sendo 10 A de pico) circulando pela bobina, pode-se ver na figura 17 que a tensão está bastante defasada, pois não há cargas (a não ser uma pequena resistência que simula o efeito pelicular calculado no tópico anterior).

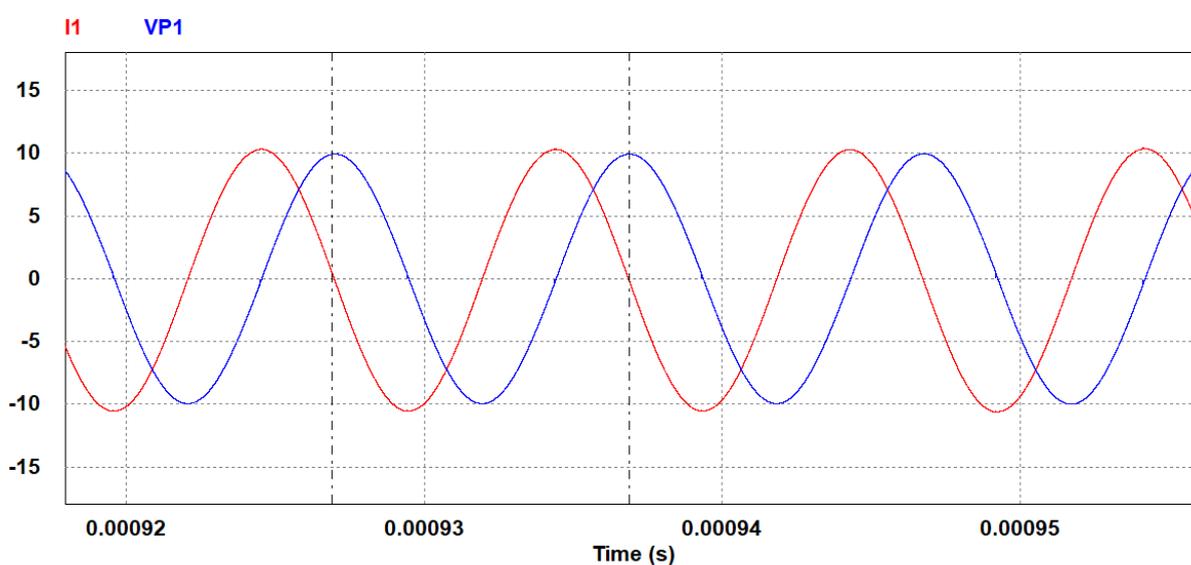


Figura 17 – Tensão (em azul) e corrente (em vermelho) oscilando na bobina
Fonte: O Autor, 2018

Estes valores de tensão e corrente irão variar conforme a carga colocada no forno. É muito difícil prever como estas curvas irão se comportar pois não depende apenas do tipo do material, mas também de sua geometria. Isso irá impactar na indutância do sistema, mudando a frequência. Além disso, conforme a peça de trabalho for esquentando, a resistência tende a ir aumentando, fazendo com que o

campo magnético variado induza menos tensões e correntes, impactando diretamente nos gráficos dados anteriormente.

Para finalizar, uma última simulação de interesse é a dos gates dos MOSFETs, que devem estar alternando entre aberto e fechados de forma contrária, ou seja, quando um estiver conduzindo, o outro deverá estar aberto. A figura 18 a seguir confirma esta hipótese:

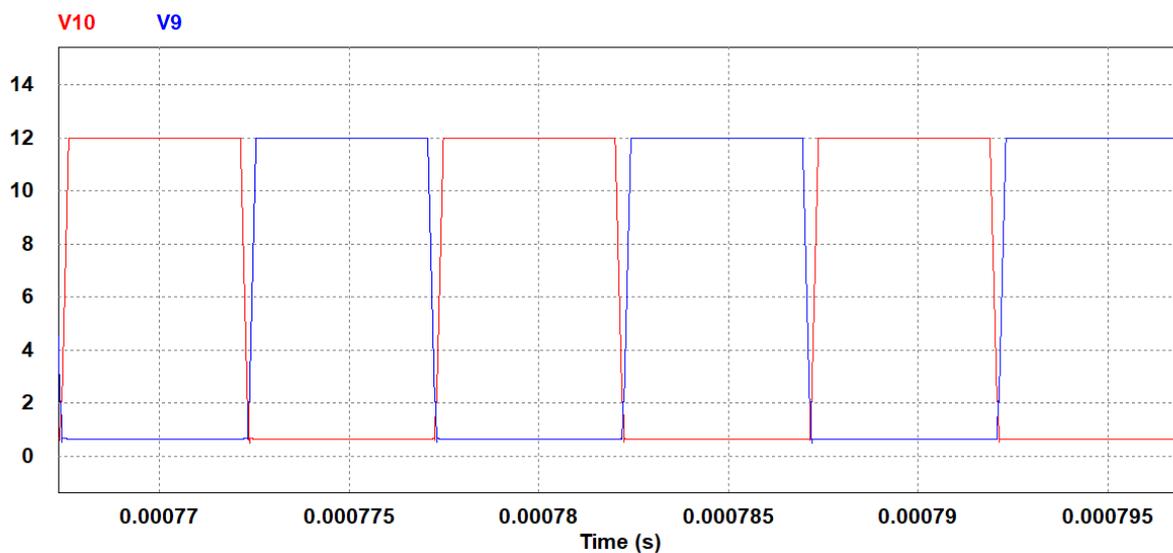


Figura 18 – Tensão nos gates dos dois MOSFETs responsáveis pelo chaveamento
Fonte: O Autor, 2018

4 CONTROLE

Os sistemas de controle estão presentes nas mais diversas aplicações da sociedade moderna. Lançamento de foguetes e veículos autônomos são bons exemplos. Até mesmo a própria natureza lida com este tipo de fenômeno. O corpo humano possui vários mecanismos de controle. O pâncreas regula açúcar em nosso sangue. Em situações de emergência, libera-se adrenalina enquanto o coração acelera levando mais oxigênio às células. Seguimos um objeto com nossos olhos, para mantê-lo em foco, e diversos outros exemplos poderiam ter sido dados (NISE, 2011).

Neste trabalho será projetado um sistema semelhante a estes, com um ponto de referência a ser escolhido (temperatura desejada) e uma forma de atingir a mesma através do conjunto do controlador, atuador e realimentação negativa.

4.1 TIPOS DE CONTROLADORES

Existem diversos tipos de controladores, sendo os mais comuns o PID e o liga-e-desliga. Como este trabalho lida com grandezas térmicas, não será necessário um controle extremamente robusto pois variações de temperatura geralmente são lentas se comparado com variação de grandezas elétricas. Desta forma, o controlador mais simples que se adeque às condições mínimas de operação será escolhido.

Na figura 19 a seguir, tem-se a representação visual do que foi discutido. “R” é a referência, ou seja, a temperatura que se deseja atingir. O microcontrolador fará o controle digital, que pode ser incluído na caixa “C”. “A” representa o forno em si que após receber o sinal de ativação, irá “atuar” sobre a temperatura de saída “S”. Ali também está o sensor, responsável por captar dados para serem transmitidos ao controlador, através da realimentação negativa. O item “X” faz a diferença entre a temperatura desejada, e a temperatura de saída.

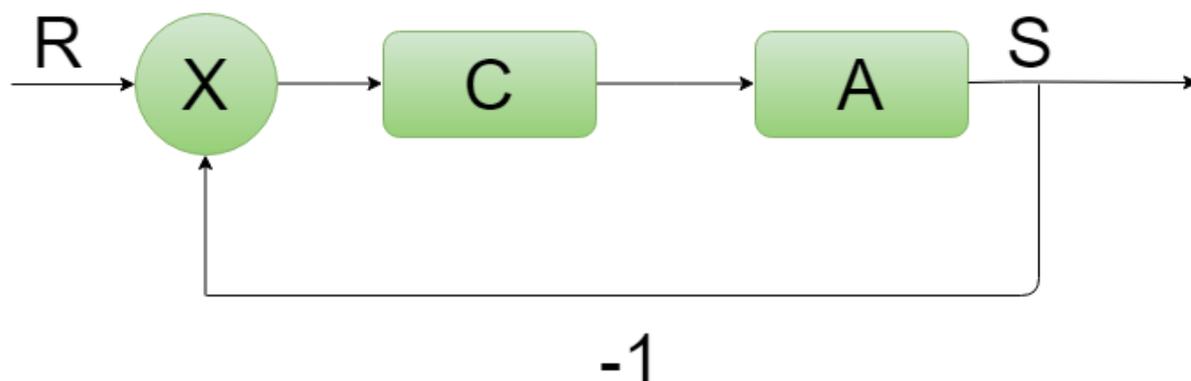


Figura 19 – Representação básica do sistema de controle do forno de indução
Fonte: O Autor, 2018

4.1.1 Controlador PID

O controlador PID é um dos mais utilizados nos dias de hoje. Ele permite controles robustos atrelados a um baixo custo (NISE, 2011). Entretanto, um fator determinante foi levado em conta para não se utilizar este meio: as cargas do forno são completamente variáveis. Por exemplo, a resposta do sistema aquecendo uma chapa de alumínio é completamente diferente da resposta do aquecimento de um prego ferroso (que conta também com as perdas por histerese). Estas duas respostas ainda, são completamente diferentes da resposta do aquecimento de um material isolante (que é nula, pois não há transferência de calor).

Assim sendo, seria impossível projetar um controlador capaz de lidar com todas as situações colocadas acima. Uma alternativa seria direcionar o forno para um único material, abrindo mão da variedade. Esta forma não se mostrou muito proveitosa e o método de controle escolhido foi o do próximo tópico.

4.1.2 Controlador liga desliga

O controle liga e desliga é o mais simples de todos, utilizado em projetos de baixo custo (NISE, 2011). Este foi o controlador utilizado, visando não uma redução de custo, mas sim o tratamento com maior precisão de uma grande variedade de materiais. Isso se deve ao fato de seu funcionamento ser muito simples, pois assim como o nome sugere, o sistema ou está ligado ou está desligado. No caso do forno

em particular, ou ele estará ativado e aquecendo, ou estará desativado, não transferindo energia.

Este controlador se mostrou funcional em testes preliminares pois a variação lenta de temperatura permite manter o aquecimento em potência nominal, e desativá-lo assim que a temperatura de referência for atingida.

4.2 MICROCONTROLADOR

O microcontrolador escolhido para se trabalhar neste projeto foi o Arduino UNO. Esta decisão foi baseada em dois fatores principais: familiaridade com a plataforma e a comunidade envolvida.

O Arduino apresenta interface simples (ideal para este projeto que não visa estudos complexos em programação), mas mais importante que isso, foram as muitas dúvidas que surgiram ao longo do projeto e que foram rapidamente sendo resolvidas por membros de uma comunidade ativa, que vinham sofrendo com as mesmas dificuldades.

Basta navegar na internet. Entusiastas, estudantes e até mesmos engenheiros “passam tempo” desenvolvendo projetos utilizando microcontroladores da marca Arduino. No site oficial consta a frase “A crescente comunidade Arduino é composta por todos”, que representa bem a situação atual não apenas da marca, mas de toda empresa bem-sucedida.

4.2.1 Programação do Arduino

Mesmo tendo interface simples, a lógica de programação pode muitas vezes ser desafiadora, como no caso deste projeto. Dado a restrição do controlador liga-desliga (ou o forno está ligado ou desligado), é preciso responder a uma importante pergunta: quando?

O raciocínio utilizado foi buscando otimizar o que pode ou não ser aquecido. Assim sendo, estipulou-se uma temperatura mínima de 40 °C. Se em 5 segundos esta temperatura não for atingida, trata-se de um material isolante. Estes valores foram estabelecidos tendo por base os resultados obtidos após a construção do forno conforme o capítulo 3 deste relatório.

Se a peça de trabalho inserida no forno passar rapidamente dos 40 °C, uma contagem de 15 segundos é iniciada e com isso, começa-se a verificar se a temperatura setada no começo do processo é atingida. O range de operação é de 50 °C a 350 °C, dada a limitação do sensor.

Se com 15 segundos a temperatura desejada ainda não foi atingida, mas houve variação de temperatura expressiva, pode se inferir que com mais um pouco de tempo, a temperatura setada será finalmente alcançada. Desta forma uma variável chamada Temperatura Final-Parcial foi criada, correspondendo a 75% do valor escolhido inicialmente. Caso a temperatura atual seja superior a este valor, o forno ficará ligado por mais 15 segundos. O diagrama da figura 20 logo abaixo ajuda a esclarecer esta ideia, onde T é igual a temperatura do objeto e TD é a temperatura desejada.

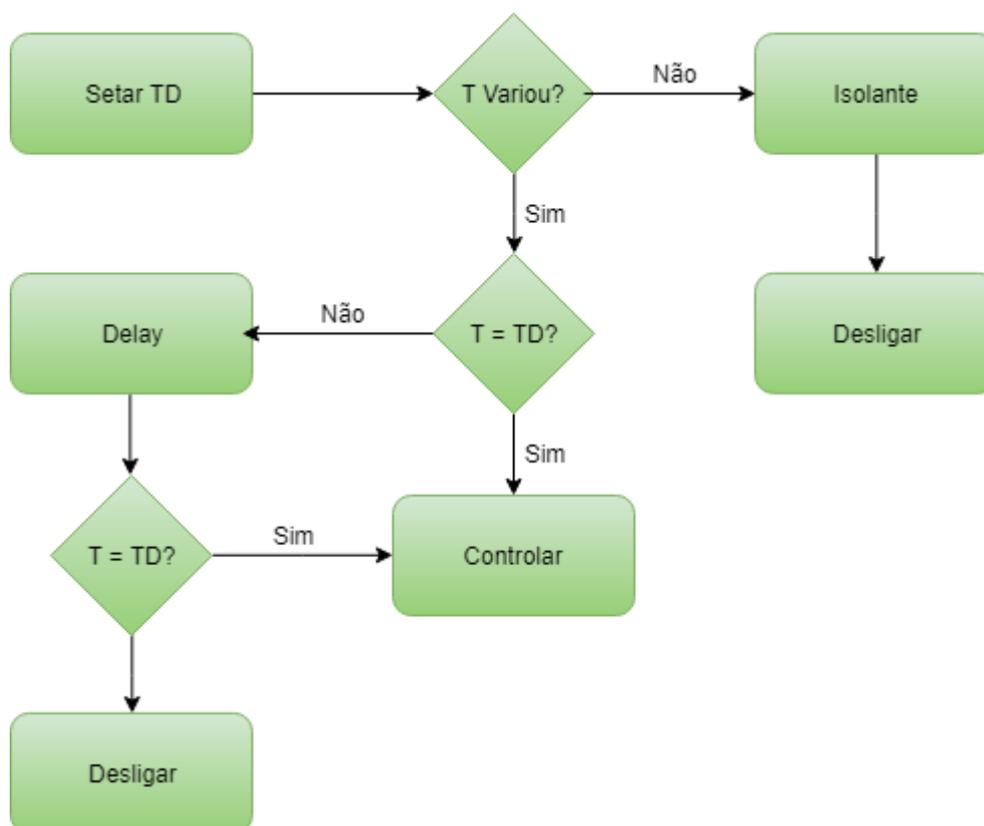


Figura 20 – Diagrama da lógica de programação
Fonte: O Autor, 2018

Caso a temperatura seja inferior a 40 °C após 5 segundos, o forno desliga mostrando uma mensagem ao usuário de que não foi possível atingir a temperatura. Se a temperatura medida for inferior a 75% da temperatura setada após 20 segundos,

a mesma situação acontece, bem como se a temperatura medida não for igual a temperatura setada ao final dos 35 segundos.

Apenas quanto a temperatura medida for igual a temperatura setada, o usuário recebe uma mensagem de que houve êxito no aumento de temperatura. Todas as mensagens foram escritas em inglês para que não houvessem problemas com acentuação (limitação do display utilizado).

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO

Utilizou-se o simulador easyEDA para o desenho do circuito referente ao controle. A alimentação de 24 V é destinada a uma das portas do relé, e também ao regulador de tensão LM7812, responsável por baixar esta tensão para 12 V. A figura 21 ajuda a visualizar.

Esta tensão de 12 V é utilizada para disparar o relé (valor nominal para ativação). O mesmo é controlado por um transistor bipolar. Além disto, a tensão está aplicada a um segundo regulador de tensão, o LM7805, responsável por alimentar o Arduino.

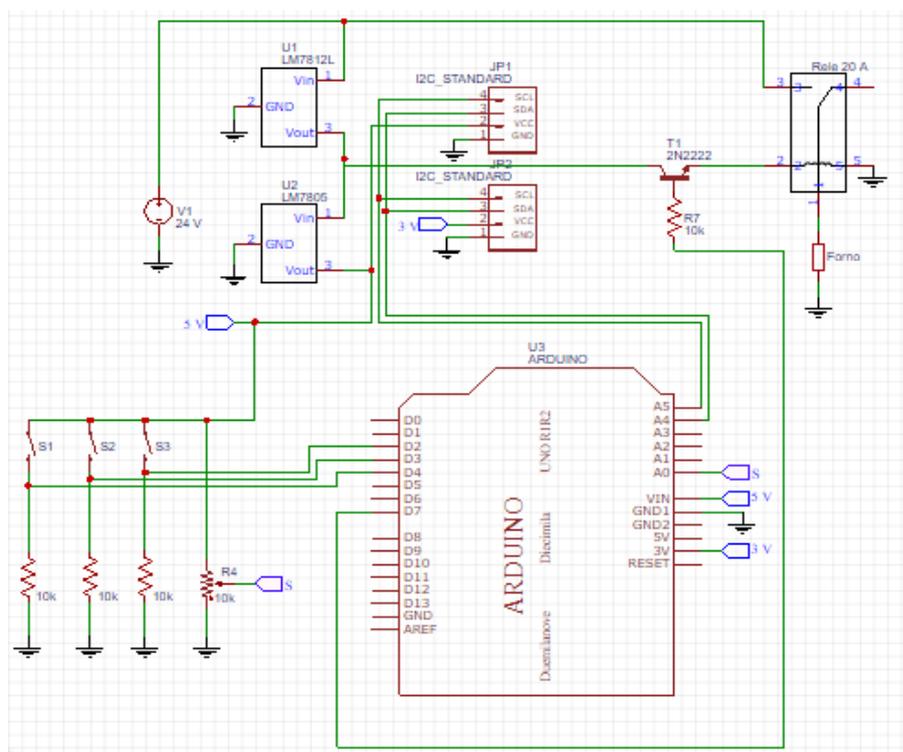


Figura 21 – Esquemático do sistema de controle
Fonte: O Autor, 2018

Alguns push buttons foram colocados, um verde, um vermelho e um amarelo. O verde é responsável pela ativação do forno enquanto o amarelo ativa os sistema de controle (sensores e software do Arduino que irá realizar a leitura, conforme as figuras 19 e 20. O botão vermelho é um botão de emergência, que para o forno, deixando em valor lógico 0 a porta do transistor bipolar (que ativa o relé, conseqüentemente o forno).

Um potenciômetro foi colocado para a seleção de temperatura. Todas as pinagens utilizadas podem ser conferidas na figura 21.

Achou-se melhor utilizar também um diodo de proteção nos terminais de acionamento do relé. Visto que o transistor bipolar utilizado é para pequenos sinais, e muito sensível, qualquer pico de tensão (gerado pela inércia de corrente na bobina do relé) poderia danificá-lo.

Os últimos elementos deste capítulo são o sensor de temperatura e o display. Ambos usam comunicação i2C, portanto os barramentos de clock e de dados podem ser comuns para ambos, no entanto aqui existe um detalhe: as alimentações são diferentes. Assim sendo, o display, cuja alimentação é de 5 V é ligado diretamente na saída do regulador de tensão de 5 V enquanto o sensor de temperatura cuja alimentação é 3.3 V, é conectado em uma das portas do Arduino, que possui este valor nominal de operação.

O projeto final, interligando o forno indutivo com o sistema de controle, ficou conforme a foto da figura 22:

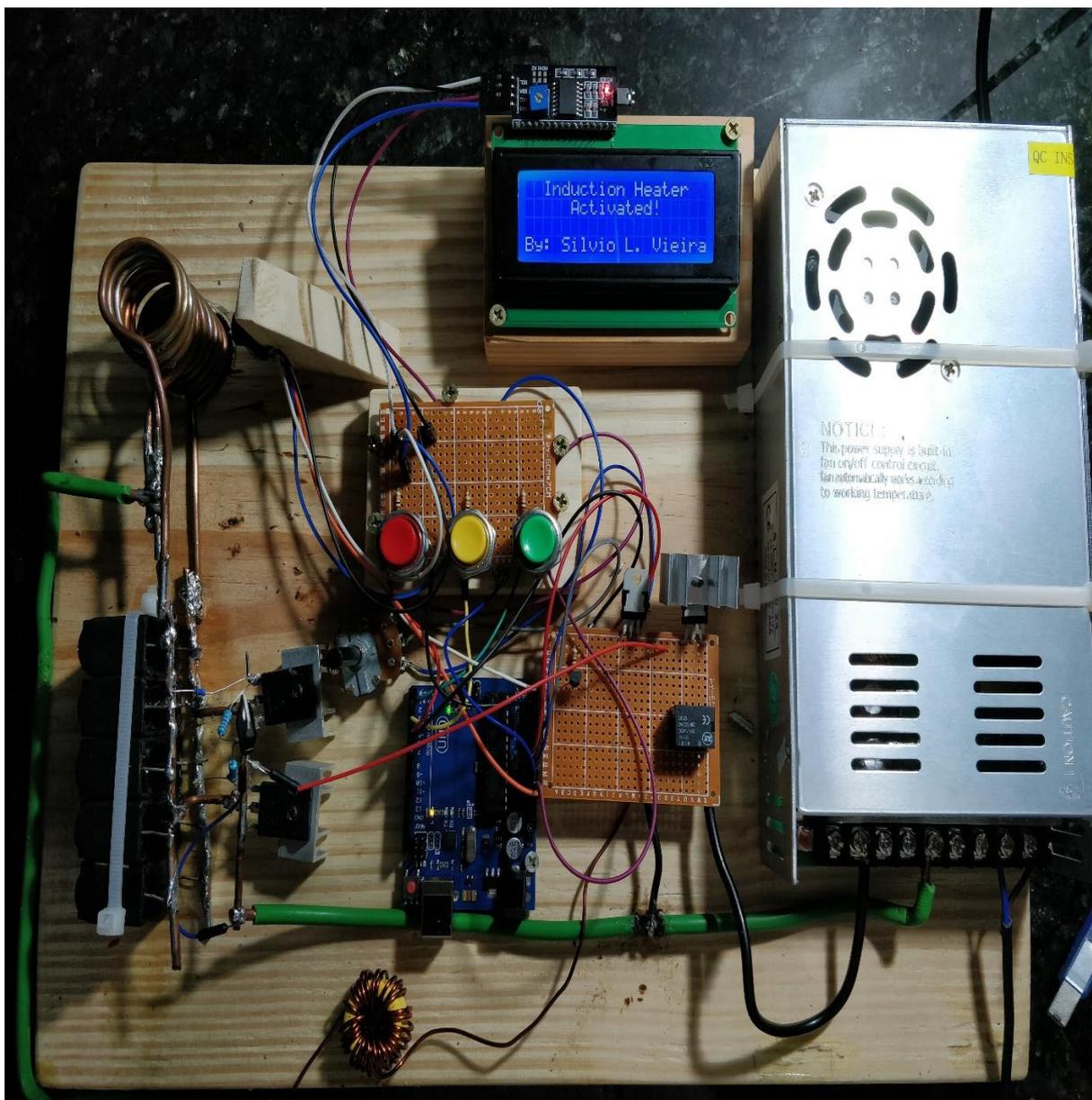


Figura 22 – Protótipo final do forno de indução com temperatura controlada
Fonte: O Autor, 2018

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 RESULTADOS GERAIS

Em uma primeira tentativa, o forno não funcionou pois não conseguia oscilar. Após várias observações, constatou-se que o problema estava no indutor choke.

Inicialmente tentou-se montar o sistema sem choke algum, confiando na fonte para suavizar a corrente de saída e evitar interferências. Após a falha, utilizou-se então um fio mais fino com 28 espiras ao redor de um núcleo de ferrite toroidal com 2 cm de diâmetro. Desta forma o forno se mostrou funcional, mesmo com um valor de indutância muito inferior ao conseguido por simulação. Esta mudança provavelmente impactou na corrente circulando em vazio, que foi de apenas 3.7 A, incluindo a pequena corrente drenada pelo sistema de controle. Este resultado pode ser conferido na figura 23 a seguir:

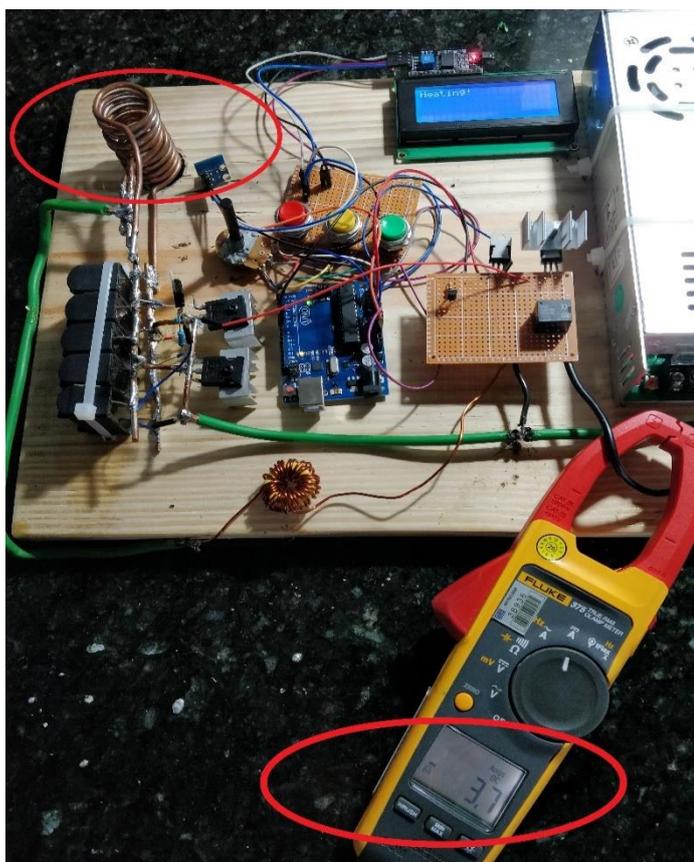


Figura 23 – Forno sem carga drenando 3.7 A da fonte
Fonte: O Autor, 2018

Diversos objetos foram colocados no forno. Constatou-se que quando objetos muito grandes eram inseridos, a corrente passava de 20 A e a fonte desligava. Este resultado era esperado pois o forno foi projetado para trabalhar com 20 A no máximo, mas apenas para pequenas peças como parafusos, chapas, etc.

No início do aquecimento percebeu-se que havia um grande consumo de corrente, e conforme o objeto aquecia, a corrente diminuía drasticamente ficando próxima dos 10 A no final do processo. Atribuiu-se a este resultado o aumento de resistência elétrica, causado pelo aumento de temperatura. A figura 24 ajuda a confirmar esta hipótese.

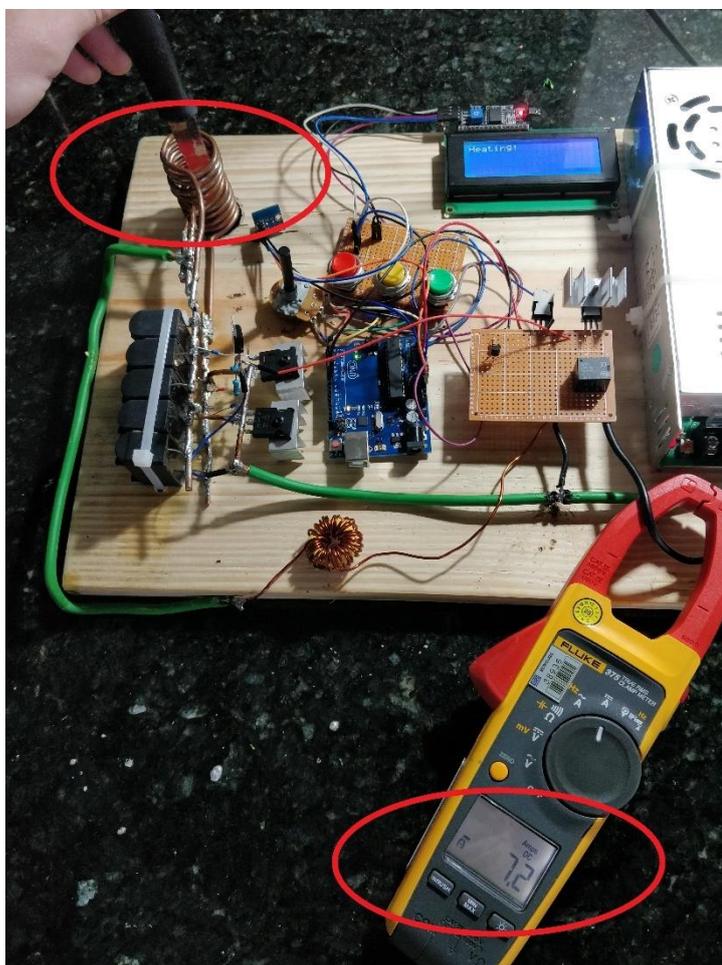


Figura 24 – Forno com carga, drenando 7.2 A ao final do aquecimento (passando de 600 °C).
Fonte: O Autor, 2018

Quanto ao aquecimento em si, não houve problemas e os resultados foram acima do esperado. Metais em geral chegaram a ficar incandescente, como mostra a figura 25 a seguir:



Figura 25 – Objeto metálico incandescente após o aumento de temperatura
Fonte: O Autor, 2018

O sistema de controle infelizmente não foi eficaz. O principal motivo para este resultado foi o sensor de temperatura óptico. Era necessário setar um grau de emissividade através de software, e este valor muda muito para os materiais envolvidos. Dessa forma, utilizou-se uma média de 0.15 levando em conta os principais materiais a serem aquecidos, porém os resultados foram extremamente imprecisos.

Outro fator determinante para a falha do sistema de controle foi que, apesar de ter havido muito esforço na redução de perdas do sistema com dissipadores de calor

e bitolas maiores de fios, houveram aquecimentos indevidos. Esses resultados eram lidos pelo sensor acarretando ainda mais imprecisão.

Por fim, uma última falha que pode de certa forma, ser considerada algo positivo. Devido a velocidade com que se gerava o aquecimento, o sensor lia com dificuldade as mudanças de temperatura. O range estabelecido ao final foi de 50 a 350 graus, e materiais como aço, ferro e alumínio facilmente passavam disso em questão de segundos.

A interface de comunicação por sua vez, ocorreu conforme o esperado. O botão verde ativava o gate do transistor bipolar, que acionava o relé liberando a corrente. Não houve qualquer dificuldade em mostrar os resultados no display (com exceção da temperatura medida, conforme comentado anteriormente). A seleção de temperatura através do potenciômetro funcionou perfeitamente e o microcontrolador mostrou-se eficaz para atender ao projeto, tanto pelos números de pinos e alimentação adequada como também pela forte comunidade envolvida na hora de dúvidas.

As figuras 26 e 27 a seguir, mostram respectivamente uma tela de seleção de ação e uma situação de aquecimento com contagem de tempo.



Figura 26 – Botão verde aciona o forno com potência máxima o amarelo aciona de forma controlada
Fonte: O Autor, 2018

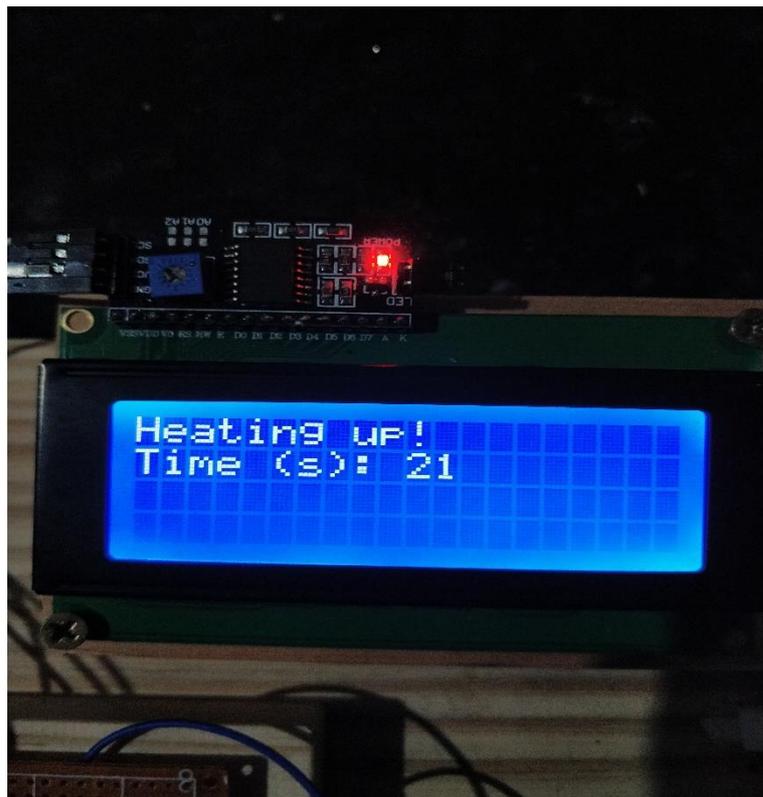


Figura 27 – Ativação sem controle (sensor de temperatura desativado)
Fonte: O Autor, 2018

Por fim, os demais componentes como capacitores e transistores se mostraram funcionais, e mesmo com certo grau de aquecimento funcionaram de acordo. A fonte chaveada também se mostrou muito bem escolhida, pois um valor de corrente menor não iria gerar os aquecimentos desejados, e um valor maior certamente iria agravar os problemas de sobreaquecimento, não só interferindo na leitura do sensor como também danificando componentes permanentemente.

5.2 CUSTOS ENVOLVIDOS

O fator determinante relacionado a custos neste projeto, foi o foco do trabalho. O objetivo era demonstrar alguns fenômenos físicos com o auxílio de um protótipo, para gerar aquecimentos em pequenas peças. Desta forma o principal ponto na redução de custos foi o sensor. Para leituras precisas usam-se sensores com valor superior a R\$ 2 mil reais, completamente inviáveis para este projeto. Desta forma, com um sensor de R\$ 40 reais, o resultado não poderia ser muito diferente e houveram

diversos problemas nesta parte. A tabela 3 a seguir, mostra o conjunto de todos os componentes utilizados bem como seus respectivos preços:

Tabela 3 - Custos dos componentes envolvidos no projeto (O Autor, 2018)

| Componentes e Orçamento | | | | |
|------------------------------|---|---|--------------|-------------------|
| Componente | Aplicação no projeto | Q | Unitário | Final |
| Transistor de potência | Chaveamento do oscilador ZVS | 2 | R\$ 8,00 | R\$ 16,00 |
| Dissipador de calor | Resfriamento dos transistores de potência | 3 | R\$ 2,00 | R\$ 6,00 |
| Relé 20 A | Ativação do circuito ressonante | 1 | R\$ 10,00 | R\$ 10,00 |
| Push button | Ativação de funções | 3 | R\$ 2,50 | R\$ 7,50 |
| Resistores 250Ω - 1W | Limitador de corrente no gate | 2 | R\$ 0,50 | R\$ 1,00 |
| Diodo Schottky | Chavear com velocidade | 2 | R\$ 1,00 | R\$ 2,00 |
| Potenciômetro 10kΩ | Selecionar o valor da temperatura no display | 1 | R\$ 3,00 | R\$ 3,00 |
| Display LCD Backlight | Mostrar opções ao usuário | 1 | R\$ 17,00 | R\$ 17,00 |
| Módulo para display | Utilizar menos conectores para a interface | 1 | R\$ 10,00 | R\$ 10,00 |
| Microcontrolador Arduino | Leitura e tratamento de dados para o controle | 1 | R\$ 40,00 | R\$ 40,00 |
| Capacitores de alta isolação | Circuito ressonante LC | 5 | R\$ 8,00 | R\$ 40,00 |
| Sensor MLX90614 | Leitura de temperatura | 1 | R\$ 40,00 | R\$ 40,00 |
| Resistores 10kΩ | Pullups e Pulldowns | 3 | R\$ 0,25 | R\$ 0,75 |
| Regulador 12V | Proteção dos transistores de potência | 2 | R\$ 2,00 | R\$ 4,00 |
| Regulador 5V | Alimentação do microcontrolador, entre outros | 1 | R\$ 2,00 | R\$ 2,00 |
| Bobina | Concentrar o campo magnético oscilante | 1 | R\$ 5,00 | R\$ 5,00 |
| Indutor Choke | Suavização da corrente DC | 1 | R\$ 5,00 | R\$ 5,00 |
| Diodo de roda livre | Evitar que componentes se danifiquem | 1 | R\$ 0,50 | R\$ 0,50 |
| Transistor bipolar | Acionar o relé | 1 | R\$ 0,50 | R\$ 0,50 |
| Fonte chaveada | Conversão CA/CC | 1 | R\$ 80,00 | R\$ 80,00 |
| Frete | Gastos com frete dos componentes | 1 | R\$ 50,00 | R\$ 50,00 |
| | | | Total | R\$ 340,25 |

5.3 IMPLEMENTAÇÕES FUTURAS

A principal implementação que pode ser feita num projeto futuro, é sem dúvidas a escolha de um melhor sensor de temperatura. Além da imprecisão, o range de temperaturas ficou muito limitado.

Além do problema citado anteriormente, algumas outras melhorias poderiam ser feitas para deixar o equipamento muito mais robustos, mas estas certamente demandariam muito mais tempo e dinheiro. As bobinas geradoras de campos por exemplo, poderiam ser feitas com fios ocos (já que o efeito pelicular faz com que a maior parte da corrente circule pelas extremidades), e dessa forma, forçar uma

circulação de líquido internamente. Desta forma, certamente seria possível obter temperaturas maiores.

No lugar do relé, poderia ter sido usado um transistor de potência com filtro LC. Isto permitiria o controle da corrente através da aplicação de PWM no gate. O principal motivo para este sistema não ter sido implementado foi que o forno de indução poderia não oscilar bem devido a forma como foi construído. Certamente com os equipamentos adequados (por exemplo, para fazer uma bobina perfeitamente simétrica), valeria a pena utilizar este meio devido as maiores possibilidades de controle.

Dando um passo mais largo, seria possível aumentar a potência do forno. Isso poderia ser feito retificando a onda senoidal em 60 Hz sem utilizar fonte chaveada, mas utilizando algum transformador com vários taps centrais, e selecionando a potência de acordo com o componente. O aumento de custos seria astronômico desta forma, e poderia impactar em um dos principais objetivos: portabilidade.

Existem outras melhorias que foram identificadas, mas que precisariam ser fortemente estudadas para que fosse possível propor uma solução, como por exemplo, um controle de frequência. O circuito utilizado muda a frequência de acordo com a carga e isto não é interessante. Utilizar uma ponte de transistores após a retificação seria uma boa saída, no entanto não se usaria mais a metodologia zero voltage switching, se tornando então um projeto completamente diferente do ponto de vista de funcionamento.

REFERÊNCIAS

1. RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK, R. **Handbook of Induction Heating**. [S.l.]: Taylor & Francis Group, 2017.
2. FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional, 2017.
3. HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional, 2016.
4. HAYT, W.; BUCK, J. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2013.
5. TORO, V. D. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999.
6. ZINN, S. **Elements of Induction Heating: Design, Control and Applications**. [S.l.]: [s.n.], 2002.
7. SMALCERZ, A.; PRZYLUCKI, R. Impact of Electromagnetic Field Upon Temperature Measurement of Induction Heated Charges. **International Journal of Thermophysics**, Katowice, v. 1, n. 1, p. 13, 2013.
8. Research Media e Cybernetics. **RM Cybernetics**. Disponível em: <<https://www.rmcybernetics.com/>>. Acesso em: 15 Abril 2018.
9. LEME, R. M. **CARACTERÍSTICAS DOS FORNOS A INDUÇÃO COM IGBTs**. UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO. Itatiba. 2011.
10. FRANEK,. On Induction Heating – Conductor Exited By External Field. **Journal of ELECTRICAL ENGINEERING**, v. 64, 2013.
11. **Wikipedia**. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_treating>. Acesso em: 26 Maio 2018.

ANEXO A – PROPRIEDADES TÉRMICAS, ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS

Tabela 4 - Propriedades de alguns elementos estudados neste trabalho (O Autor, 2018)

| Propriedades dos Materiais | | | |
|--|--------------|-----------------|--------------|
| | Cobre | Alumínio | Ferro |
| Permeabilidade Relativa | 0,99999 | 1,00002 | 5000 |
| Resistividade (Ωm) | 1,70E-08 | 2,50E-08 | 1,00E-07 |
| Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$) | 1084 | 660 | 1538 |
| Calor específico ($\text{cal}/^{\circ}\text{C.g}$) | 0,094 | 0,22 | 0,11 |
| Calor Latente (cal/g) | 49 | 95 | 64 |