



**CENTRO PAULA SOUZA
ETEC "PAULINO BOTELHO
TCC - Eletromecânica**

**Davi Soares Delello
Denison Souza de Paula
Igor Luis Portes**

AQUECEDOR POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

**SÃO CARLOS
2024**

Davi Soares Delello
Denison Souza de Paula
Igor Luis Portes

AQUECEDOR POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso em Eletromecânica Apresentado à Etec “Paulino Botelho”, São Carlos - SP, do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, como requisito parcial para a obtenção da habilitação profissional de técnico Eletromecânico.

Orientador: Prof. Cláudio Torres

SÃO CARLOS
2024

Folha de Aprovação

Davi Soares Delello
Denison Souza de Paula
Igor Luis Portes

Aquecedor por Indução Eletromagnética

Aprovado em: ____/____/____

Conceito: _____

Banca de Validação:

Prof. Cláudio Torres
Etec Paulino Botelho
Orientador

Profa. Evandra Maria Raymundo
Etec Paulino Botelho

Prof. Anderson Belluco
Etec Paulino Botelho

SÃO CARLOS
2024

RESUMO

Com este projeto temos como objetivo facilitar o aquecimento de metais, fazer têmpera de aço, fabricar projetos feitos em oficinas domésticas, como por exemplo, facas caseiras, etc. Uma das maneiras mais comuns de conseguir esse aquecimento é através do calor da chama produzida por um maçarico, porém, ter e manusear objetos como este em ambiente doméstico pode ser algo complicado e um tanto quanto perigoso. Nosso trabalho busca um meio alternativo de realizar a têmpera de metais utilizando a eletricidade, sendo voltado ao público “hobista”, devido as suas dimensões e potência. Neste projeto o aquecimento de metais funciona graças a indução eletromagnética, onde o campo magnético gerado por um indutor de núcleo vazio penetra o metal induzindo correntes elétricas parasitas dentro do condutor, que por sua vez, é capaz de se transformar em calor através do efeito joule ao se chocar com a resistência presente no material.

Palavras-chave: têmpera; doméstica; Indução Eletromagnética.

ABSTRACT

With this project, we aim to make it easier to heat metal, quench steel, and craft homemade projects, such as knives. One of the means of getting this done is through the heat created by the flame of a blowtorch; however, handling tool like this at home can be rather tricky and dangerous. This equipment aims for an alternative option for quenching metal using electricity, geared towards hobbyists due to its dimension and power. In this project, metal heating works thanks to Electromagnetic Induction, where the magnetic field generated by a coreless inductor penetrates the metal, inducing current inside the conductor, which, in turn, can transform itself into heat through the Joule effect as it encounters the resistance present in a metal.

Keywords: quench; homemade; Electromagnetic Induction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição do Circuito	12
Figura 2 - Indutor Center-tape Fabricado	13
Figura 3 - Interior do Aquecedor	14
Figura 4 - Aquecedor Finalizado	15
Figura 5 - Mosfet IRFP4668.....	16
Figura 6 - Resistor 220 Ω	17
Figura 7 - Diodo 1N4007.....	17
Figura 8 - Capacitor MKP 0.47 μ F.....	18
Figura 9 - Fonte Chaveada AC-DC 24V 20A	18
Figura 10 - Cano de Cobre Usado para Fabricar o Indutor	19
Figura 11 - Indutor de 130 μ H	20
Figura 12 - Placa de Fenolite	20
Figura 13 - Conector de Cabo Elétrico	21
Figura 14 - Dissipador de Alumínio	21
Figura 15 - Placa de Acrílico.....	22
Figura 16 - Cantoneira	22
Figura 17 - Disjuntor Bipolar 25A.....	23
Figura 18 - Sinaleiro Verde	23
Figura 19 - Ventoinha.....	24
Figura 20 - Grade de Proteção	24
Figura 21 - Diagrama Eletrônico (Protheus).....	25
Figura 22 - Senoide Criada Pelo Oscilador LC	26
Figura 23 - Tabela de Cores de Aquecimento.....	36
Figura 24 - Eletromagnetismo	38
Figura 25 - Indução Eletromagnética.....	39
Figura 26 - Michael Faraday	40
Figura 27 - Experimento Realizado por Faraday	41
Figura 28 - Direção do Fluxo Magnético.....	42
Figura 29 - Correntes Parasitas Induzidas	43

LISTA DE ABREVIATURAS

AC – Alternating Current (Corrente Alternada)
DC – Direct Current (Corrente Contínua)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 O que é um Aquecedor por Indução	9
1.2 História	9
2. OBJETIVO.....	11
3. METODOLOGIA.....	11
3.1 Desenvolvimento e Montagem	12
4. COMPONENTES.....	16
5. DIAGRAMA ELETRÔNICO.....	25
5.1 Funcionamento.....	25
6. PROCESSO DE AQUECIMENTO	36
7. REFERENCIAL TÓRICO E LEIS FUNDAMENTAIS.....	38
7.1 Eletromagnetismo	38
7.2 Indução Eletromagnética	39
7.3 Lei de Faraday-Neumann-Lenz.....	40
7.3.1 Michael Faraday.....	40
7.4 Força Eletromotriz Induzida	41
7.5 Fluxo Magnético de Indução	42
7.6 Lei de Lenz	43
7.7 Correntes de Foucault.....	43
7.8 Efeito Joule	44
8. CONCLUSÃO.....	45
9. TABELA DE ORÇAMENTO	46
REFERÊNCIAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento por indução eletromagnética se consiste em aquecer ou até mesmo derreter materiais condutores de eletricidade através da indução de correntes elétricas parasitas que dissipam sua energia em formato de calor através do efeito joule, sem a necessidade de qualquer contato direto. O calor é produzido de dentro para fora, tornando possível o aquecimento de metais sem a necessidade de uma fonte de calor ou da queima de combustíveis.

Inicialmente, em 1830 o americano Joseph Henry, e em 1831 o inglês Michael Faraday, simultaneamente, descobriram e realizaram experimentos sobre o eletromagnetismo de forma independente.

Há relatos de que Joseph Henry foi o primeiro a descobrir o fenômeno, porém apesar de ter realizado pesquisas não se aprofundou e não publicou seus estudos. Diferentemente de Joseph Henry, Michael Faraday realizou mais pesquisas, se aprofundou no assunto, publicando resultados que comprovassem seus estudos. Posteriormente, Faraday pode patentear sua descoberta e, conseqüentemente, formulou a lei que hoje conhecemos como a “Lei de Faraday”.

As formas de aquecimento mais comumente usadas anterior a descoberta do aquecimento por indução eram através de resistências elétricas, ou simplesmente pela troca de temperatura de uma fonte de calor como o fogo, tanto pelo ar, quanto por contato direto.

Até então, este processo de aquecimento começou a ser muito utilizado no século XX em indústrias para realizar a fundição, brasagem, tratamento térmico, soldagem, selamento e principalmente a têmpera de peças sem a utilização de maçaricos, chamas ou fornos. Além de também ser encontrado em ambientes domésticos, como em fogões por indução.

A indução eletromagnética permite isso de forma extremamente rápida sem a necessidade da queima de combustíveis como gás fóssil, gasolina, madeira, carvão e etc. O que torna o aquecimento por indução uma maneira limpa de produzir calor sem a emissão de gases ou fumaça, além de tornar o ambiente de trabalho em fábricas um local mais seguro e agradável para os trabalhadores.

Diversos aquecedores por indução de diferentes tamanhos e potência podem ser encontrados no mercado, tanto para uso domiciliar, comercial e industrial. Suas

faixas de preço variam de R\$ 200,00 até valores exorbitantes tal como R\$ 20.000, específicos para uso industrial.

1.1 O que é um Aquecedor por Indução

Um aquecedor por Indução Eletromagnética é capaz de criar um intenso campo magnético variável, criado com a ajuda de um circuito oscilador e um indutor ou espira de núcleo vazio em ao ter uma corrente elétrica alternante percorrida no mesmo. Quando este fluxo magnético oscilante entra em contato com um material condutor como metais, acaba por induzir correntes elétricas parasitas no interior deste material. Essa corrente, ao fluir dentro do condutor se encontra com uma certa resistência presente, que se transforma em calor através do efeito Joule. Além deste processo ser mais rápido e preciso, é possível aquecer metais do tipo: aço, cobre, alumínio ou bronze de maneira rápida e mais segura.

Uma vantagem deste tipo de aquecedor é que nenhum grande calor externo é dissipado pelo ar a sua volta, assim como em forno e forjas. Todo calor existente gerado exclusivamente dentro da peça a ser aquecida. O indutor também não é capaz de aquecer matérias não condutores de eletricidade, como a mão de uma pessoa. Ou seja, o risco de queimaduras é menor com um aquecedor por indução. Além disso, não fornece um grande risco de choque elétrico ao tocar o indutor em que as peças são introduzidas, pois a corrente necessária para o aquecimento não é muito alta.

1.2 História

O americano Joseph Henry, em 1830, foi o primeiro a fazer testes com eletroímãs e observar os fenômenos da Indução Eletromagnética. Apesar disso, em 1831, foi Michael Faraday o creditado a descoberta deste fenômeno, sendo o primeiro a publicar seus estudos e a patentear sua descoberta.

Entretanto Henry foi o primeiro a criar um motor elétrico prático baseado nos princípios de indução. Até hoje, a unidade de medida utilizada no Sistema

internacional de Unidades para a medição de indutância “H” foi estabelecida em nome de Joseph Henry.

Após a descoberta da Indução eletromagnética em 1830 e 1831, houveram grandes avanços tecnológicos principalmente no meio industrial.

No final do século IX, isto foi fundamental para o desenvolvimento dos geradores elétricos. Empresas como a *Siemens* e a *Westinghouse* usaram princípios de indução para construir geradores que transformavam energia mecânica em energia elétrica.

No começo do século XX, a capacidade de gerar eletricidade de forma eficiente através da indução impulsionou a Revolução Industrial e a eletrificação do mundo. A iluminação elétrica, motores elétricos e muitas outras aplicações industriais foram viabilizadas por esta tecnologia.

No século XX, a indução eletromagnética desempenhou um papel crucial no desenvolvimento da eletrônica. Transformadores foram fundamentais para a distribuição eficiente de energia elétrica, enquanto os princípios de indução foram aplicados em dispositivos como relés, bobinas de ignição e diversos sensores. Foi muito usada para telecomunicações em antenas para transmitir e receber sinais de rádio.

Na indústria, a Indução Eletromagnética começou a ser usada em meados de 1920 e, principalmente durante a segunda guerra mundial, devido a demanda de fundir metal para a fabricação de armamento e veículos militares a uma alta velocidade e eficiência energética.

Hoje, a indução continua a ser crucial para a geração de energia renovável, como em turbinas eólicas e sistemas de energia solar. Transformadores de alta eficiência e motores elétricos são essenciais para a conservação de energia e a redução de emissões.

Em suma, desde sua descoberta por Faraday, a indução eletromagnética tem sido um pilar fundamental da tecnologia moderna, permeando diversas áreas da ciência e da engenharia, desde a geração de energia até a comunicação e a eletrônica avançada.

2. OBJETIVO

Ao contrário da maioria dos aquecedores por indução projetados para o uso industrial em escala capazes de selar, endurecer ou amolecer metais, nosso objetivo em mente é produzir um protótipo de aquecedor por Indução Eletromagnética em escala reduzida, de fácil manuseio e que onde seja capaz de realizar o aquecimento de peças metálicas a ponto de temperatura (800°C ou acima) em pequenas oficinas ou ambientes domésticos. A principal ideia é reduzir o uso de fornos, forjas a gás e maçaricos oxiacetilenos, por serem de perigoso manuseio devido a sua chama e combustível causarem um alto índice de acidentes, provocando queimaduras, incêndios e causando até explosões. Além de que seu manuseio requer um certo nível de experiência e instrução para um aquecimento efetivo e seguro.

3. METODOLOGIA

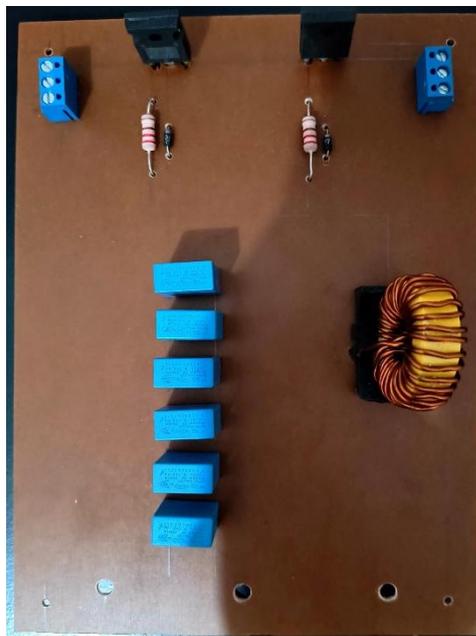
Com a ideia de montar o circuito em mão, pensamos de que maneira seria alimentado, via bateria, transformador com retificador ou com uma fonte AC-DC similar às de computador. No caso, optamos pela fonte DC para fornecer a energia necessária ao circuito, com uma tensão de saída de 24V e uma corrente de 20A. Em seguida, listamos os componentes eletrônicos que seriam necessários para a oscilação da corrente contínua, com o intuito de oscilar em centenas de milhares de vezes por segundo a polaridade dos terminais do indutor de núcleo vazio, tornando-a uma corrente com a característica alternada (AC). Isto é crucial para o funcionamento da Indução, pois uma corrente contínua (não variável) criaria apenas um eletroímã. Com objetivo de verificar e comprovar o funcionamento do circuito, realizamos algumas simulações nos programas de eletrônica “Protheus” (Figura 21) e “Falstad”. Depois foi necessário dimensionar o número de voltas, comprimento e diâmetro do indutor que realizaria a Indução Eletromagnética e, então, soldar todos os componentes em uma placa de fenolite. Para a proteção e parte estrutural do trabalho, instalamos chapas galvanizadas e placas de acrílico transparente nas laterais para facilitar a visualização e compreensão do funcionamento do circuito.

3.1 Desenvolvimento e Montagem

Adiante, tendo comprado os componentes necessários, iniciamos o processo de montagem na placa de fenolite. Os componentes foram dispostos na placa de uma maneira que seja mais didática na apresentação no dia do Workshop dos TCC's, com o intuito de que todos possam compreender o sentido da corrente elétrica.

A placa de fenolite foi perfurada com uma furadeira utilizando brocas de 2mm a 6mm no diâmetro dos pinos dos componentes usados nesse projeto. Para interligar cada componente, foram soldados cabos flexíveis anti-derretimento de bitola de 2,5mm².

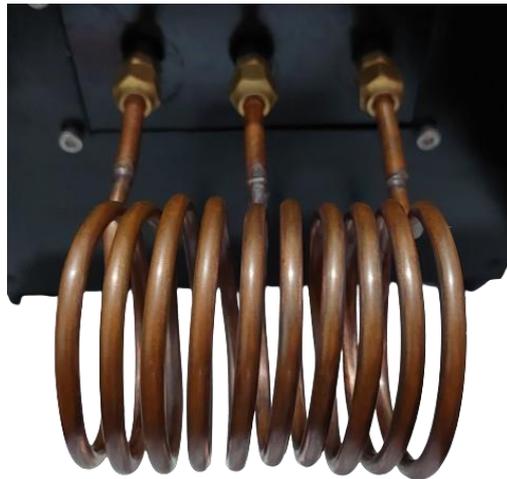
Figura 1 - Disposição do Circuito



Para fabricar o indutor que realiza o aquecimento dos metais, um tubo de cobre 3/16 foi enrolado em um cano de 2 polegadas externa, para que então, o indutor tivesse um diâmetro interno de 2 polegadas. Este seria dividido em duas partes de 5 voltas cada, totalizando dez voltas e três extremidades. Ou seja, no final teríamos um indutor com um *center-tape*, que nada mais é do que a presença de um terminal central que iria atuar como o positivo. Depois de fabricado, seria capaz de aquecer chapas com dimensões de no máximo até 15 centímetros de comprimento por 5 centímetros de largura. Também podem ser aquecidos tubos de paredes inferiores à 3mm, e que não ultrapassem um diâmetro limite de 1½"

(uma polegada e meia). Isto serve como medida de segurança para evitar que peças que excedam essas dimensões toquem no indutor de cobre, ocasionando um breve curto, circuito. Lembrando que a espessura do material a ser aquecido influencia no tempo que ele levará para atingir altas temperaturas. Quanto mais espesso, mais lento será o processo.

Figura 2 - Indutor *Center-tape* Fabricado

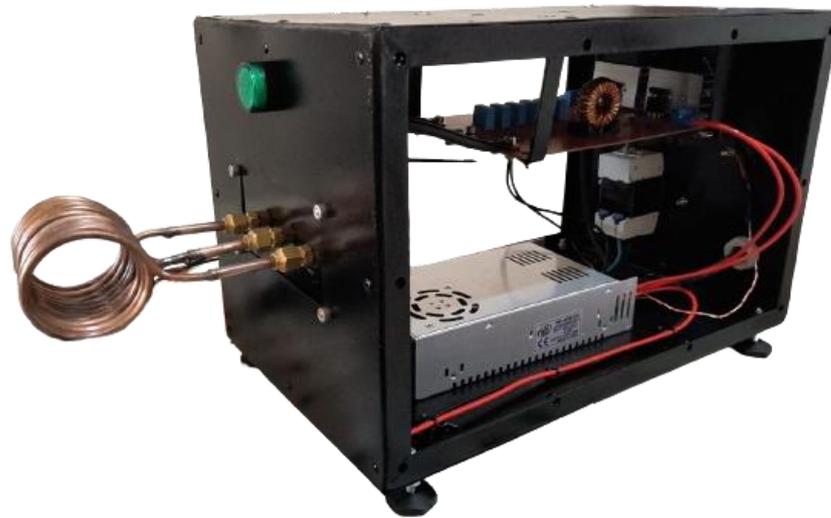


Já o indutor de núcleo toroidal, localizado na placa de fenolite (Figura 15), foi retirado de um circuito alheio, tendo seu número de voltas foi alterado com o intuito de diminuir o valor de indutância até chegar a aproximadamente $130\mu\text{H}$.

Para proteger os componentes, evitar problemas de humidade e poeira, todas as peças precisavam ser acomodadas dentro de uma caixa.

Esta caixa foi fabricada em uma pequena estrutura de 25cm de altura, 40cm de comprimento e 25cm de largura. A armação foi feita com cantoneiras de aço cortadas nas medidas e soldadas, com o intuito de deixa-las mais resistentes. Para as laterais, optamos por usar chapas galvanizadas na parte superior, inferior, na frente e na parte traseira. Em seguida, a placa de fenolite, já com os componentes, foi suspensa com a ajuda de uma alça de plástico na chapa superior, permitindo que a fonte de 24V ficasse abaixo.

Figura 3 - Interior do Aquecedor



Por fim, as placas galvanizadas foram arrebitadas nas cantoneiras com arrebitos *pop* (de repuxo) de alumínio, assim como o circuito na parte superior.

Para as laterais, utilizamos duas placas de acrílico transparente tornando possível observar o interior do equipamento e facilitando o entendimento de seu funcionamento. Para fixar o acrílico nas duas laterais, porcas de 5mm foram soldadas na parte interior das cantoneiras e, por fim, parafusadas com parafusos Allen Inox 5mm e arruelas de 3/8" a 1/2". Na parte traseira, foram cortadas três aberturas. Uma de 3,5x4,5cm para a instalação de um disjuntor que serviria como interruptor geral e proteção dos componentes, outra de 7,5x7,5cm para a ventoinha e uma para a passagem do cabo da tomada. Na parte frontal, um retângulo de 12x6cm foi feito para a instalação de uma placa de plástico com três furos de 1cm cada, permitindo a passagem dos terminais do indutor principal, sendo utilizados também parafusos Allen para a fixação. Esta peça de plástico tem o objetivo de isolar a carcaça de metal da corrente elétrica que virá do circuito. Outro furo de aproximadamente 2cm foi realizado para a acomodação de um sinalizador verde para a indicação de funcionamento.

Visando facilitar o transporte, adicionamos uma alça de mão na chapa superior. Também foram instalados alguns pés de apoio.

Para acabamento e estética, pintamos a caixa com esmalte sintético na cor preto brilhante.

Figura 4 - Aquecedor Finalizado



3.1.1 FERRAMENTAS UTILIZADAS

- Esmerilhadeira angular para corte e lixamento;
- Máquina de solda;
- Furadeira;
- Martelo;
- Arrebitadeira manual;
- Trena;
- Marcador;
- Esquadro 90°/45°;
- Chave Allen 5/32".

4. COMPONENTES

Equipamentos utilizados na construção do aquecedor por indução:

4.1 Mosfet IRFP4668 Canal N

Figura 5 - Mosfet IRFP4668

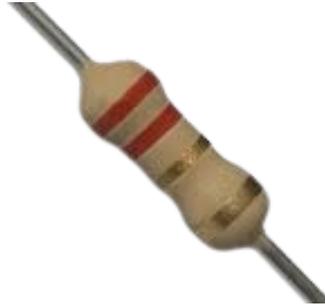


Um “Mosfet” é nada mais do que um transistor com uma alta capacidade de chaveamento, e uma tolerância máxima maior a corrente e a tensão do que um transistor bipolar comum. Devido a este motivo, alguns Mosfets podem esquentar muito durante seu funcionamento. Para diminuir isso, possuem uma parte de metal dissipadora de calor em sua parte traseira, juntamente com um orifício que serve para a fixação do mesmo em um dissipador de calor. Pode ser utilizado para amplificar o sinal enviado pela unidade principal de alimentação dos equipamentos eletrônicos.

Tem a função principal de controlar tanto a tensão quanto a corrente elétrica, reduzindo drasticamente o consumo da potência. Graças ao Mosfet, é possível chavear a corrente nos terminais do circuito do aquecedor por indução, fazendo com que o campo magnético variável da bobina seja gerado para realizar o aquecimento.

4.2 Resistor 220Ω 2W 5%

Figura 6 - Resistor 220Ω



É um componente que limita o fluxo da corrente elétrica em um circuito. Por meio do que é chamado de “Efeito Joule”, é capaz resistir e dificultar a passagem de corrente, conseqüentemente, transformando-a em energia térmica. Oferece uma resistência maior do que os cabos, por ser feito de um material não condutor. Este modelo usado possui uma capacidade de potência de até 2W, o que significa que não dissipará muito calor contanto que a potência do circuito não ultrapasse esse valor. O 5% significa que há uma margem de erro para mais ou para menos de 220Ω no valor de sua resistência.

4.3 Diodo Retificador 1N4007

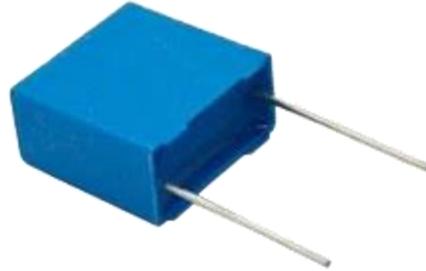
Figura 7 - Diodo 1N4007



É um componente utilizado em circuitos eletrônicos, permitindo o fluxo de corrente em apenas uma direção, do positivo (ânodo) para o negativo (cátodo). Suporta uma elevada tensão reversa e aceita picos de corrente de até 30A. Causa uma queda de tensão de 0,7V (por ser feito de um cristal de silício polarizado). Funcionando com o uma chave aberta para uma polaridade de tensão de entrada, e como uma chave fechada para a polaridade oposta.

4.4 Capacitor MKP X2 0.47 μ F MFX 305V

Figura 8 - Capacitor MKP 0.47 μ F



A função principal do capacitor é a de armazenar cargas elétricas em seu interior. Após ser carregado, inicia-se sua descarga (similar a uma bateria, porém com menor longevidade), sendo capaz de fornecer grandes quantidades de carga elétrica para um circuito. Os capacitores levam um pequeno tempo para serem carregados completamente, mas geralmente sua descarga é rápida, e depende do seu nível de capacitância medido em Farads (F).

4.5 Fonte Chaveada AC-DC 24V 20A

Figura 9 - Fonte Chaveada AC-DC 24V 20A



Uma fonte chaveada tem como função diminuir a corrente consumida pelos equipamentos a níveis mais confiáveis, atuando como chave que, em falhas elétricas, desliga automaticamente. Em alguns casos ela ainda pode armazenar a energia elétrica, funcionando temporariamente como bateria, caso ocorram quedas de energia. É capaz de manter a tensão na entrada e na saída bastante estabilizada, possui uma maior leveza e um menor tamanho do que em uma fonte linear.

4.6 Indutor com *Center-tape* Feito em Cano de Cobre 3/16"

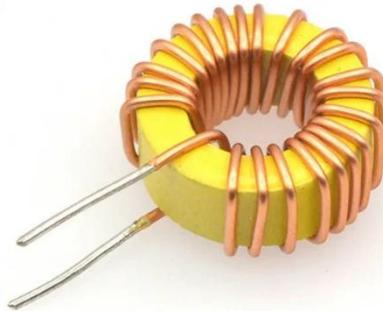
Figura 10 - Cano de Cobre Usado para Fabricar o Indutor



Neste projeto foram utilizadas duas bobinas de cinco voltas cada fabricadas com canos de 3/16", conectadas como um center tape, ou seja, havendo três terminas no total. Este componente é feito de um material condutor ou fio elétrico enrolado em forma de espiral. Também conhecido como indutor, reator ou *choke*, seu funcionamento parte do princípio de ser capaz de armazenar um campo magnético a partir da corrente elétrica presente em seus fios. Todo o campo magnético induzido pela corrente elétrica se soma sobre toda a extensão da bobina, criando um grande campo magnético. Quando este campo magnético é interrompido uma parte dessa energia é armazenada e liberada em forma de corrente elétrica assim que a fonte principal do circuito é desligada. Há vários tipos de bobinas, sua potência e capacidade de gerar um campo magnético depende da espessura, diâmetro, comprimento, material do núcleo e da quantidade de fio enrolada em si mesmo.

4.7 Indutor 130 μ H com Núcleo de Ferrite

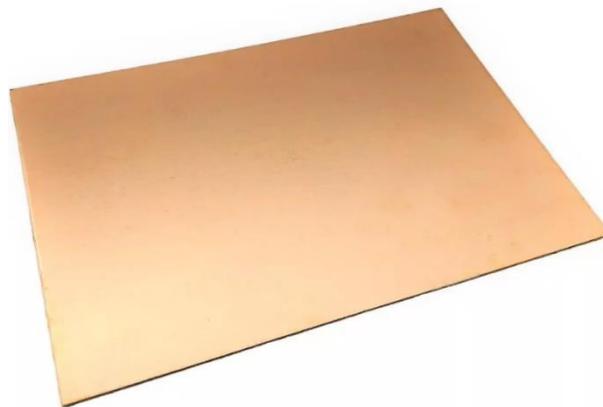
Figura 11 - Indutor de 130 μ H



Um indutor se constitui de vários loops de um material condutor, assim como uma bobina. É um dispositivo passivo utilizado como um filtro capaz armazenar energia na forma de um campo magnético e liberando sua energia de volta para o circuito de forma gradativa. O indutor também serve como um filtro de evitando retornos em altas frequências para a linha de alimentação do circuito.

4.8 Placa de Fenolite 20x20cm (Sem Trilhas de Cobre)

Figura 12 - Placa de Fenolite



Uma placa laminada rígida que possibilita a montagem de circuitos elétricos. Possui uma propriedade isolante por ser fabricado com um material feito de celulose impregnada com uma resina sintética fenólica.

4.9 Conector de Cabo

Figura 13 - Conector de Cabo Elétrico



Permite para realizar a conexão dos terminais positivos e negativos da fonte de alimentação ao circuito, fixando os cabos ao parafusá-los em seus bornes.

4.10 Dissipador de Alumínio

Figura 14 - Dissipador de Alumínio



Alguns componentes produzem uma grande quantidade de calor devido a presença de corrente elétrica e, por ter uma certa quantidade de resistência. Desta maneira, o dissipador tem como função impedir que um componente eletroeletrônico superaqueça. Sua superfície ajuda a dissipar a alta temperatura do componente para o dissipador e em seguida para o ar. Esta característica é essencialmente importante para que os componentes possam continuar funcionando em uma temperatura adequada, sem perda no desempenho ou sem que o componente seja comprometido.

4.11 Placa de Acrílico 50X50cm

Figura 15 - Placa de Acrílico



Duas placas de acrílico de 50x50cm foram cortadas nas dimensões 25x40mm para servirem como o chassi das paredes laterais servindo como proteção. A escolha do acrílico foi devido a sua propriedade transparente que possibilita a observação do interior do equipamento, facilitando o entendimento de seu funcionamento e os componentes presentes no circuito.

4.12 Cantoneira 3/4"x1/8"

Figura 16 - Cantoneira



Uma cantoneira é uma quina que é normalmente feita de metal para realizar a junção ou o acabamento nos vãos aparentes que surgem ao juntar duas chapas, por exemplo. Foi utilizada uma chapa de cantoneira com aço 1020 como junção das paredes frontais e dianteiras com o teto, assim como com o assoalho do projeto.

4.13 Disjuntor Bipolar Weg MDWP 25A Curva “C”

Figura 17 - Disjuntor Bipolar 25A



O disjuntor funciona como um interruptor e permite ligar e desligar um circuito inteiro, como uma chave geral. Além disso, tem a função de desligar automaticamente ao ser percorrido por pequenos surtos de corrente provenientes da rede elétrica que ultrapassem seu limite de funcionamento, evitando que cheguem a um equipamento através da tomada, danificando os componentes eletrônicos ou apresentando riscos de choque elétrico. Este modelo em específico, limita a corrente de funcionamento a 25A.

4.14 Sinaleiro Lukma 16-22 24V LED (verde)

Figura 18 - Sinaleiro Verde



Um sinaleiro funciona como uma luz indicadora de funcionamento, mostrando quando um comando, circuito ou equipamento está energizado.

4.15 Ventoinha 24V

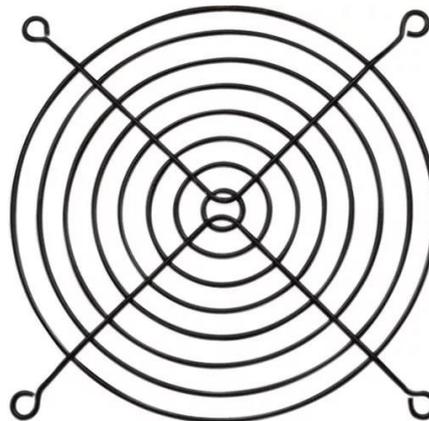
Figura 19 - Ventoinha



Utilizado para manter a circulação de ar no circuito de um equipamento, ajudando a arrefecer e dissipar o calor produzido. Funciona fazendo a exaustão de ar quente de dentro para fora ou na ventilação de ar fresco de fora para dentro.

4.16 Grade de proteção para ventoinha

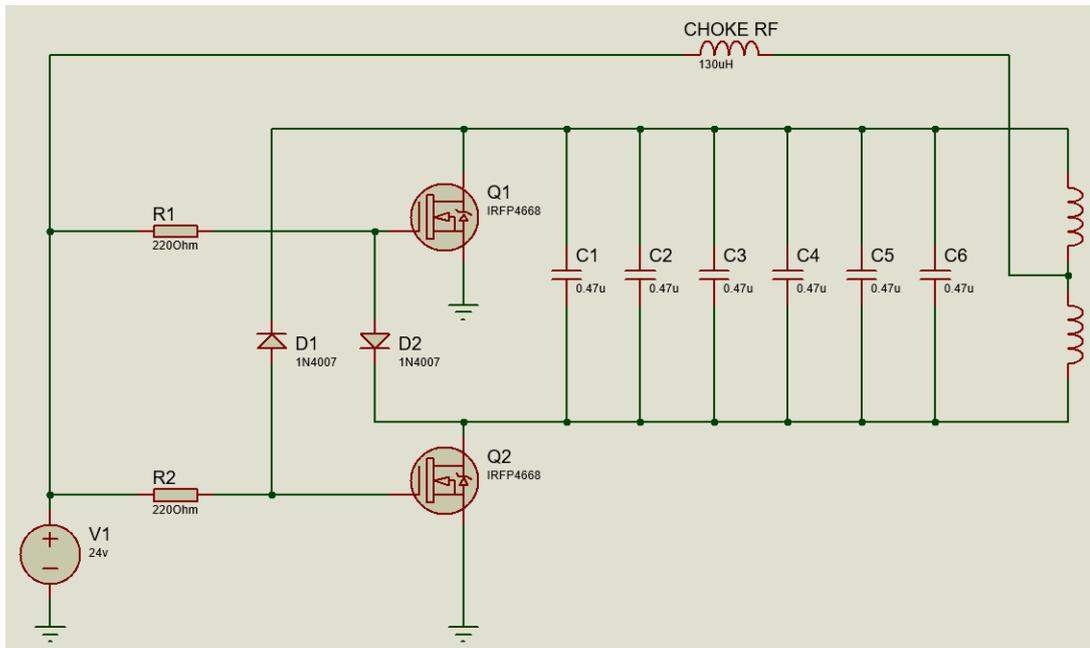
Figura 20 - Grade de Proteção



Serve como proteção de ventoinhas para evitar que algo atrapalhe seu funcionamento.

5. DIAGRAMA ELETRÔNICO

Figura 21 - Diagrama Eletrônico (Protheus)



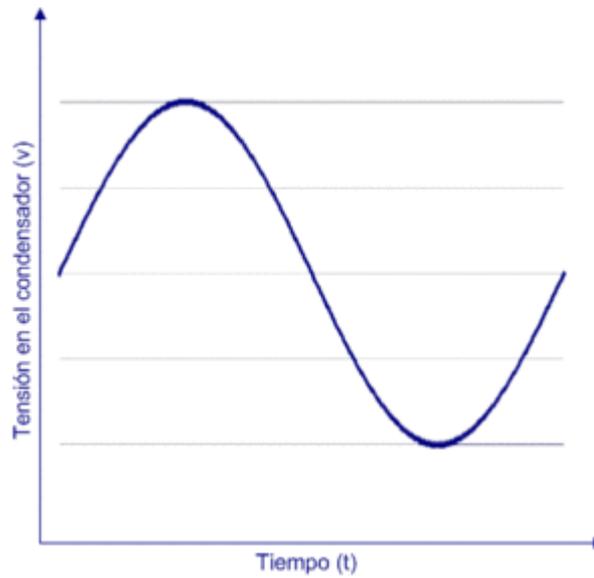
5.1 Funcionamento

Primeiramente, é válido pontuar que o princípio de funcionamento do circuito eletrônico do aquecedor é baseado em um Oscilador LC com a adição de uma amplificação básica feita pelos Mosfets.

Um oscilador LC é composto de no mínimo um indutor (L) e um capacitor (C) em paralelo. Quando o capacitor é carregado, uma corrente é liberada em direção ao indutor, sendo armazenada em forma de campo magnético, que por sua vez, oferece uma impedância contra a mesma. Uma vez que o capacitor é totalmente descarregado e sua corrente chega a zero, o campo magnético do indutor induz de volta ao capacitor uma corrente contrária ao sentido inicial, fazendo com que o capacitor se carregue novamente e o processo se repita. Como resultado, entre os capacitores e o indutor há o surgimento de uma onda senoidal. Estes dois componentes são os responsáveis por criar uma frequência de oscilação em uma corrente elétrica, transformando-a em alternada.

Já a amplificação ocorre quando há a soma das correntes recebidas em ambos os terminais Base e Coletor para o Emissor dos Mosfets.

Figura 22 - Senoide Criada Pelo Oscilador LC



Podemos calcular qual será a frequência de oscilação que estará presente no circuito com esta equação onde:

F – Frequência (Hz)

C – Valor total de capacitância (F)

L – Valor total de indutância (H)

Portanto, com os valores abaixo temos:

C = 2,8μF (2,8x10⁻⁶)

L = 3,92μH (1,11x10⁻⁶)

$$F = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{C \cdot L}}$$

$$F = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{0,0000028 \cdot 0,00000392}}$$

$$F = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{1,0976 \cdot 10^{-11}}}$$

$$F = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,000003313}$$

$$F = \frac{1}{0,000208162} = 48.039Hz$$

$$F = 48,03kHz$$

Com essa frequência, é possível calcular o período da onda senoidal criada:

$$T = \frac{1}{F} \rightarrow T = \frac{1}{48.039}$$

$$T = 0,000208164s \rightarrow 20,81\mu s$$

5.1.1 Fonte 24V (V1)

Primeiramente, o circuito é alimentado com uma fonte de corrente contínua com uma tensão de 24V. Para calcular a potência total fornecida pela fonte de alimentação podemos efetuar:

P – Potencia fornecida (W)

V – Tensão de saída (V)

I – Corrente de saída (A)

$$V = 24V$$

$$I = 20A$$

$$P = V.I \rightarrow P = 24 . 20$$

$$P = 480W$$

5.1.2 Resistores (R1 e R2)

Estes componentes “freiam” a corrente graças a sua resistência ôhmica, deixando-a sob um nível seguro para o restante do circuito. Utilizando a Lei de Ohm, podemos descobrir o quanto a corrente de 20A da fonte é resistida até chegar ao restante do circuito:

$$I = \frac{V}{R} \rightarrow \frac{24}{220} = 109,1mA$$

5.1.3 Diodos (D1 e D2)

Os diodos impedem que a corrente flua no sentido oposto, permitindo a passagem em apenas uma direção. Desta maneira, direcionam a corrente para os Coletores dos Mosfets e evitam que a corrente indo ao terminal negativo (terra) sendo chaveado pelo Mosfet (Q1) volte para a base do (Q2), e vice-versa. Da mesma maneira, também barram qualquer corrente que queira voltar ao positivo da fonte de alimentação.

Lembrando que, como são diodos de silício, há uma pequena queda de tensão de 0,7V, fazendo com que a tensão se encontre por volta de 23,93V após os diodos.

5.1.4 Transistores Mosfets (Q1 e Q2)

Possuem três contatos, o Coletor, a Base e o Emissor. No Coletor, recebem a corrente da fonte, porém, permitem a passagem da mesma para o Emissor apenas quando sua Base é energizada. Enquanto um permite a passagem da corrente em uma direção, o segundo está barrando na outra, e vice-versa. Em outras palavras, fazem com que o negativo do indutor fique alternado entre os dois terminais das extremidades, ora está de um lado, ora está do outro. Os Mosfets amplificam a corrente vinda dos diodos e dos resistores, principalmente, contribuem para que o campo magnético final produzido pelo indutor seja variável.

5.1.5 Indutor (“choke de RF”)

Tem como função evitar que qualquer corrente induzida pelo campo magnético do indutor *center-tape* retorne para o positivo da fonte de alimentação. Servindo como um filtro, é um componente eletrônico com uma alta impedância, em outras palavras, seu campo magnético se opõe a qualquer corrente, oferecendo resistência. Seu valor de 130 μ H foi obtido com ajuda de um medidor LCR.

5.1.6 Capacitores (C1 a C6)

Devido estarem em paralelo, a tensão fornecida a todos é de mesma, ou seja, mais ou menos 24V (considerando pequenas quedas de tensão). Como resultado, temos um banco de capacitores que se carregam com até a mesma tensão e somam sua capacitância final. Desta maneira, oferecem energia a uma

extremidade do indutor principal enquanto a outra está sendo chaveada pelo Mosfet. A capacitância equivalente pode ser calculada multiplicando a capacitância individual pelo total de capacitores:

C – Capacitância equivalente (F)

C (capacitância individual) = 0,47 μ F

$$C = 0,47 \times 6 = 2,82\mu F$$

5.1.7 Indutor com *center-tape*

Possui três terminais, dois negativos nas extremidades que são alternados pelos Mosfets, e um positivo ao meio, chamado de *center-tape*. Vale lembrar que, devido este *center-tape* e a frequência de oscilação de corrente criada pelos Mosfet nos dois terminas negativos, apenas metade do indutor funciona por vez.

Ao ter uma corrente elétrica percorrendo em si mesmo, todo o magnetismo induzido por suas voltas de cobre é somado em um forte campo magnético com um fluxo intenso em seu núcleo, induzindo um campo magnético que se soma, ganhando uma grande intensidade. Graças a esta frequência de oscilação na direção da corrente, o campo magnético criado é variável, mudando de polaridade quando o negativo é alterado pelos Mosfets.

Quando um material condutor, como uma peça metálica, é exposto a este intenso campo magnético ao ser introduzido em seu centro, correntes elétricas parasitas são induzidas neste material. Ao se encontrar com resistência ôhmica presente no material, estas correntes são “freadas” e transformam sua energia em calor, graças ao efeito joule.

O valor de Indutância pode ser calculado com a equação abaixo:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

Onde:

L – Valor da indutância (H)

μ_0 – Levando em consideração que o indutor não possui núcleo magnético, utilizamos a permeabilidade no vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

N – Número de voltas de condutor

A – Área da seção transversal (m²)

l – Comprimento total do indutor (m)

Para a equação será necessário primeiro obter a área da seção transversal (**A**), transformando as medidas em metros. Portanto, as dimensões de nosso indutor são:

Comprimento total: 8cm (0,08m)

Raio externo: 3cm (0,03m)

Espessura do condutor: 5mm (0,005)

$$A = \pi \cdot r^2$$

Onde:

r – Raio ($r = \frac{D}{2}$)

Utilizaremos o raio *interno* do indutor. Levando em conta que a espessura do condutor é de 5mm, basta subtrair este valor do raio *externo* (0,03m) para obter o *interno*:

t – Espessura do condutor (fio de cobre)

$$r^2_{\text{interno}} = r^2_{\text{externo}} - t = 0,03 - 0,005 = 0,025m$$

$$A = \pi \cdot 0,025^2 \rightarrow = \pi \cdot 0,000625$$

$$A = 0,0019635m^2$$

Finalmente temos um valor de indutância de aproximadamente:

$$L = \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 10^2 \cdot 0,0019635}{0,08} \rightarrow = \frac{0,00003927}{0,08}$$

$$L = 0,0000490875 \rightarrow 4,91\mu H$$

Também podemos tentar inferir a intensidade máxima que o campo magnético criado por esta indutância é capaz de gerar.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{l} \cdot N$$

Onde:

B – Intensidade do campo magnético (T)

μ_0 – Permeabilidade do vácuo

I – Corrente que percorre o indutor

l – Comprimento do indutor

N – Número de voltas do condutor

Valores:

I = 105mA

l = 0,08m

N = 10

$$B = \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 0,105}{0,08} \cdot N \rightarrow B = \frac{0,000000042}{0,08} \cdot N$$

$$B = 0,000000525 \cdot 10 \rightarrow B = 0,00000525T$$

$$B = 5,25\mu T$$

Com este valor em mãos, podemos calcular o fluxo magnético que flui do indutor:

$$\Phi = L \cdot I$$

Onde:

Φ – Fluxo magnético produzido (Wb - Weber)

L – Valor de indutância

I – Corrente que chega ao indutor

Valores:

$L = 3,92\mu H$

$I = 105mA$ (valor aproximado)

$$\Phi = 0,00000392 \cdot 0,105 \rightarrow 0,0000004116$$

$$\Phi = 411nWb$$

Pois bem, o valor obtido acima é o fluxo produzido pelo indutor, agora precisamos descobrir como este fluxo atinge uma peça sendo induzida:

$$\Phi = B \cdot A \cos \theta$$

Onde:

Φ – Fluxo magnético produzido (Wb - Weber)

B – Intensidade do campo magnético (T)

A – Área da peça sendo atingida pelo fluxo criado

Valores:

$$\mathbf{B} = 5,25\mu\text{T}$$

$\mathbf{A} = 0,006\text{m}$ (este valor representa apenas um exemplo da área de uma chapa de 3cm de largura por 2mm de espessura)

$\theta = 0^\circ$ (se introduzirmos esta chapa horizontalmente, o ângulo do fluxo magnético produzido no centro do indutor, também horizontal, em relação a área da peça que se encontra com este fluxo será de 0° , atingindo seu vetor máximo).

$$\Phi = 0,00000525 \cdot 0,006 \cdot \cos 0^\circ$$

$$\Phi = 0,000000315\text{Wb} \rightarrow \Phi = 31,5\text{nWb}$$

Com o valor desta variação, podemos estimar a Força Eletromotriz que o mesmo exerceria em uma peça ao introduzi-la no indutor, com a equação da Lei de Faraday durante um ciclo de variação da frequência obtida anteriormente:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Onde:

ε – Força Eletromotriz (V)

$d\Phi$ – Variação do fluxo magnético

dt – Variação de tempo

Valores:

$$d\Phi = 315\text{nWb}$$

$$dt = 20,81\mu\text{s} \text{ (frequência de oscilação por segundo)}$$

$$\varepsilon = - \frac{0,000000315}{0,00002081} \rightarrow \varepsilon = 0,01513\text{V}$$

$$\varepsilon = -15\text{mV}/20\mu\text{s}$$

Depois de revelar a tensão que a força Eletromotriz exerce, podemos tentar prever qual será a corrente de Foucault que percorrerá em uma peça a ser aquecida:

$$I = \frac{\varepsilon}{R}$$

Onde:

I – Corrente de Foucault induzida

ε – Força Eletromotriz induzida

R – Resistencia ôhmica do material

Porém, antes é preciso descobrir qual a resistência do material a ser aquecido:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Onde:

ρ – Resistividade do material

l – Comprimento do objeto

A – Área da secção transversal objeto

Valores (estes valores estão sendo baseados em uma faca de aço 308L que foi utilizada como teste para o aquecimento):

$\rho = 7 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ (aço 308L)

l = 15cm (comprimento da lâmina)

A = 0,00006m² (área da secção transversal da lâmina utilizada (3cmx2mm))

$$R = 7 \cdot 10^{-7} \frac{0,15}{0,00006} \rightarrow R = 0,0000007 \cdot 2500$$

$$R = 0,00175 \Omega$$

Valores:

$$\varepsilon = 15\text{mV}$$

$$R = 0,00175\Omega$$

$$I = \frac{0,015}{0,00175} \rightarrow I = 8,57A$$

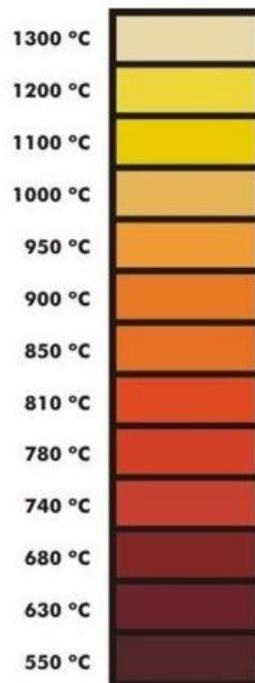
5.2 Observação Final

É importante frisar que o valor da corrente acima, assim como os valores de campo e fluxo magnético encontrados, não representam números fixos, podendo aumentar e diminuir dependendo do material posicionado dentro do indutor. Isso se deve, pois, a carga varia para mais ou para menos dependendo do tipo do material a ser aquecido pela indução. Fatores como, capacidade calorífica, magnetismo e resistência elétrica influenciam na potência dissipada, portanto nos picos de corrente demandados, dificultando a previsão dos valores. Os valores encontrados devem ser levados em consideração apenas como exemplo, em estado de repouso, quando não há objetos condutores introduzidos dentro do indutor, ou apenas no início de uma indução.

6. PROCESSO DE AQUECIMENTO

Na utilização de nosso projeto para o processo de aquecimento de metais, foi possível atingir uma temperatura aproximada de 800 a 900°C em cerca de um minuto ao aquecer a lâmina de 2mm de espessura de uma faca em aço inox 308L.

Figura 23 - Tabela de Cores de Aquecimento



Podemos calcular a energia térmica necessária para fazer com que a faca chegasse a 800°C foi:

$$Q = mc\Delta T$$

Onde:

Q – Energia térmica, ou calor (J)

m – Massa do objeto (densidade x volume)

c – Capacidade calorífica do objeto sendo aquecido (500J para o aço inoxidável 308L)

ΔT – variação de temperatura

Valores:

m = 0,0071kg ($m = \rho_m \cdot V \rightarrow 7900kg/m^3 \cdot 0,000009m^3 = 0,0711kg$)

c = 500J

$$\Delta T = 775((800^{\circ}\text{C} (\text{temperatura atingida}) - 25^{\circ}\text{C} (\text{temperatura ambiente inicial})))$$

$$Q = 0,0711 \cdot 500 \cdot 775$$

$$Q = 27551,25\text{J}$$

Levando em consideração que o aquecedor tem uma potência de saída de 480W, também é possível encontrar a potência que foi necessária para este processo de aquecimento da lâmina:

Onde:

P – Potencia (W)

Q – Energia térmica em Joules (J)

t – Tempo para o aquecimento

$$P = \frac{Q}{t} \rightarrow \frac{27.551,25}{60}$$

$$P = 459,18\text{W}$$

Para a corrente induzida necessária para o efeito Joule basta isolar o I da equação:

Onde:

P – Potência

R – Resistência do material

I - Corrente

$$P = I^2 R$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \rightarrow \sqrt{\frac{459,18}{0,00175}} \rightarrow \sqrt{262,38} \rightarrow 512,23\text{A}$$

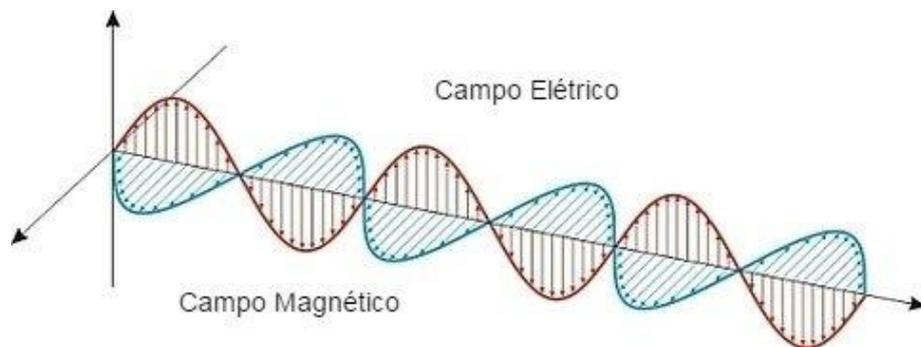
$$I = 512,23\text{A}$$

Ou seja, diferente do valor de corrente induzida encontrado anteriormente (8,33A e 199,92W) para aquecer a lâmina desta faca foi necessário uma demanda maior de corrente, portanto uma potência bem maior.

7. REFERENCIAL TEÓRICO E LEIS FUNDAMENTAIS

7.1 Eletromagnetismo

Figura 24 - Eletromagnetismo

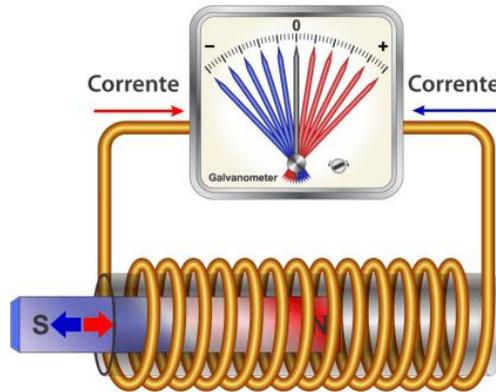


O Eletromagnetismo estuda como cargas elétricas e campos magnéticos influenciam um ao outro tendo uma relação entre si. É uma área da física que tem como objetivo estudar estes fenômenos de maneira unificada, com a ajuda dos estudos relacionados a Lei de Coulomb e as equações de Maxwell. Esta área tenta descrever e explicar como cargas elétricas (elétrons) ao fluírem em uma direção (corrente elétrica) provocam a sua volta o surgimento de um campo magnético, assim como um campo magnético variável também provoca a geração de eletricidade.

Primeiramente, foi Michael Faraday quem descobriu e explicou como um campo magnético que se move poderia induzir corrente elétrica em um fio.

7.2 Indução Eletromagnética

Figura 25 - Indução Eletromagnética



A indução eletromagnética é um fenômeno que ocorre quando um material condutor entra em contato com um campo magnético variável, ou seja, que se move ou muda de intensidade. Isso faz com que surja uma certa força, ou tensão, no objeto sujeito a variação este campo magnético. Naturalmente, devido a tensão, uma corrente elétrica é induzida no objeto condutor, que por sua vez, induzirá a sua volta um campo magnético que se oponha ao campo inicial.

Como consta na Figura 21, um ímã está sendo introduzido rapidamente dentro de uma bobina com várias espiras, e ao passo que isso ocorre, uma corrente é induzida na direção contrária a que o ímã foi introduzido. Caso o ímã se mova no sentido oposto, a corrente mudará de direção e criará um fluxo magnético a favor ao do ímã. É importante ressaltar que caso o ímã fique parado dentro da bobina, nenhuma corrente será induzida.

Geradores de energia, motores elétricos e transformadores funcionam graças ao princípio da Indução Eletromagnética.

7.3 Lei de Faraday-Neumann-Lenz

Lei de Faraday-Neumann-Lenz, Lei de Lenz, ou simplesmente Lei de Faraday, é uma lei proposta por diferentes cientistas, especialmente Faraday, que tenta prever, com equações, como um campo magnético influencia e interage com um circuito elétrico induzindo uma força que gera tensão, e portanto, correntes elétricas. A Lei de Faraday se relaciona ao fenômeno da Força Eletromotriz.

7.3.1 Michael Faraday

Figura 26 - Michael Faraday

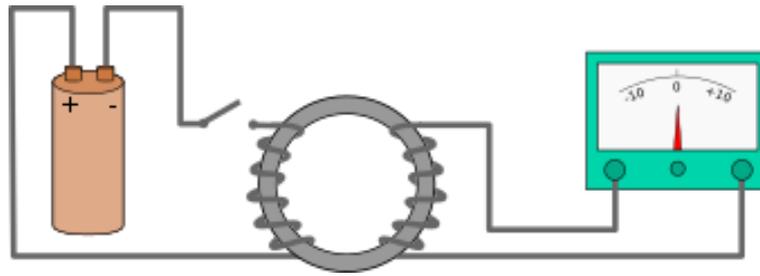


Michael Faraday foi um dos cientistas mais importante na descoberta da Indução eletromagnética ao executar pesquisas e cálculos com a finalidade de comprovar sua descoberta 1831.

Faraday demonstrou este fenômeno ao enrolar dois fios de cobre em ambos os lados de um anel de formato toroidal, conectando as extremidades de um dos lados dos fios em uma bateria e o outro a um galvanômetro, formando então dois circuitos diferentes não ligados diretamente. Ao fechar e abrir do circuito conectado a bateria, Michael pôde observar que ao fluir da corrente, era possível detectar outra corrente derivada transitória no outro setor do fio conectado ao galvanômetro. Faraday chamou esta corrente de “onda de eletricidade”.

Portanto, Michael Faraday concluiu que esta corrente transiente surgia devido ao campo magnético variável ao ligar e desligar da bateria.

Figura 27 - Experimento Realizado por Faraday



7.4 Força Eletromotriz Induzida

Para que ocorra o surgimento de uma corrente elétrica em um material condutor é necessário que haja um campo magnético variável. A variação de tempo que um fluxo magnético exerce sobre um condutor produz potencial elétrico, similar a tensão comum, chamado de Força Eletromotriz Induzida. É capaz de induzir correntes elétricas em uma direção sem a necessidade da diferença de potencial ou de contato direto com o setor primário que a induziu. A Força Eletromotriz é medida em Volts. Lembrando que a corrente sempre induzirá outro campo magnético contrário a este que a induziu.

É basicamente este o princípio de funcionamento que ocorre dentro de um transformador.

É importante ressaltar que o valor da tensão obtido pela equação abaixo será negativo, devido ao sentido oposto contrário ao campo que o induziu, como se prevê na lei de Lenz.

ε – Força eletromotriz induzida (V)

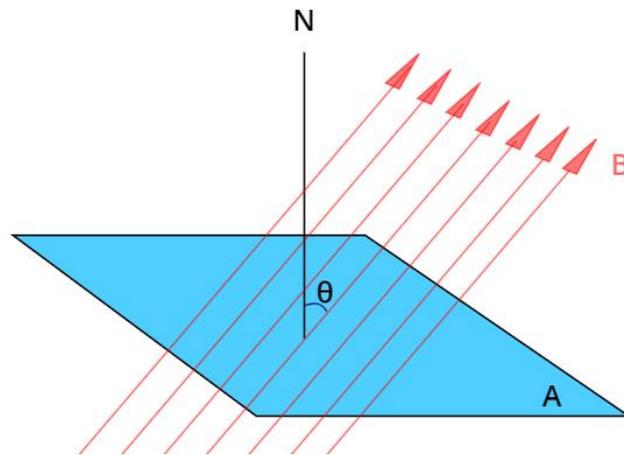
$\Delta\Phi = \Phi_f - \Phi_i$ – Variação do fluxo magnético (Wb)

Δt – Intervalo de tempo (S)

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

7.5 Fluxo Magnético de Indução

Figura 28 - Direção do Fluxo Magnético



O Fluxo magnético tem como finalidade medir a quantidade de linhas presente no campo magnético atravessam em uma determinada área. o Fluxo sempre dependerá do ângulo do campo magnético (θ) em relação a reta normal (\mathbf{N}) a um ângulo de 90° da superfície da área. Se θ está a 90° em relação a \mathbf{N} a intensidade do fluxo será de zero, pois a superfície plana estará alinhada com o fluxo. Já se θ estiver a 0° , a intensidade será máxima.

Φ – Fluxo magnético (Weber ou T.m²)

\mathbf{B} – Campo magnético (T - Tesla)

\mathbf{A} – Área da secção transversal (m²)

$$\Phi = B \cdot A \cos \theta$$

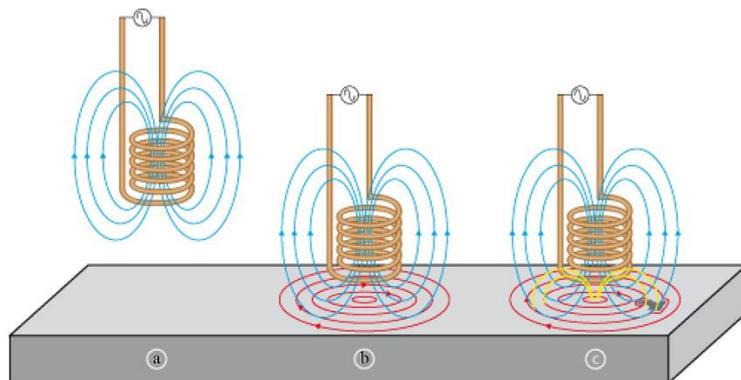
7.6 Lei de Lenz

A Lei criada por Heinrich Lenz afirma que toda corrente induzida em um objeto seguirá um sentido na qual seu campo magnético criado se oponha ao fluxo que a originou. “Havendo diminuição do fluxo magnético, a corrente criada gerará um campo magnético de mesmo sentido do fluxo magnético da fonte. Havendo aumento, a corrente criada gerará um campo magnético oposto ao sentido do fluxo magnético da fonte” (Wikipedia, 2022).

Lenz concluiu que seria impossível que um campo magnético induzido em um material condutor houvesse o mesmo fluxo do que o de origem, pois isso aumentaria ainda mais o fluxo, gerando energia infinita, o que viola o princípio fundamental da conservação da energia.

7.7 Correntes de Foucault

Figura 29 - Correntes Parasitas Induzidas



Correntes de Foucault, Correntes Parasitas ou *Eddy Currents*, é o nome dado as correntes induzidas em um material condutor de eletricidade por um fluxo magnético móvel em relação a um objeto, como de um eletroímã, de um transformador ou indutor. Estas correntes se movem em um sentido circular horizontal se em uma superfície plana, mas também podem fluir em um sentido circular vertical em um cano ou cilindro metálico, por exemplo. A intensidade e proporção deste movimento circular das correntes é proporcional ao campo magnético é proporcional ao campo magnético, já a área de sua volta e a variação do fluxo é inversamente proporcional ao nível de resistência do material.

I – Corrente que flui no material

ε – Força eletromotriz (V)

R – Resistencia do material (Ω)

$$I = \frac{\varepsilon}{R}$$

7.8 Efeito Joule

O efeito Joule é um fenômeno da física que ocorre quando a eletricidade que percorre um material é convertida em calor. Isso se dá pelo fato das cargas elétricas (elétrons) dos átomos que compõem o material terem uma certa força de ligação com seu núcleo, o que dificulta a movimentação e a troca de elétrons na camada mais exterior dos átomos. Ao fluir de uma corrente elétrica, a energia cinética do deslocamento dos elétrons ocasiona em uma agitação na ligação dos átomos, esta agitação causa uma serie de colisões nos mesmos, aumentando a temperatura de um material.

Lembrando que é necessário que um material tenha uma certa resistência ôhmica para que a energia elétrica presente seja transformada em energia térmica. Quanto maior a resistência de um objeto, mais calor será convertido ao se encontrarem com um fluxo de correntes elétricas. Quanto mais quente um material, mais difícil será para que os elétrons se movam de uma camada para a outra, portanto, maior é a resistência e mais calor será gerado.

Q – Quantidade de calor dissipado (Joule)

I – Corrente elétrica

R – Resistência do material

T – Tempo que a corrente ela para atravessar o material

$$Q = I^2 R . T$$

8. CONCLUSÃO

Após todos os testes feitos, podemos finalmente concluir que nosso objetivo de foi atingido satisfatoriamente, sendo possível aquecer facas e chapas comuns de aço a ponto de a têmpera (800°C a 900°C) em cerca de um minuto, utilizando apenas 480W de potência. Isso foi possível com a utilização de um simples circuito oscilador com poucos componentes eletrônicos de preço relativamente barato e de fácil acesso.

Adicionalmente, caso este projeto seja levado adiante, uma possível melhoria seria adicionar mais uma fonte de 24V com o intuito de aumentar a potência total do equipamento, e conseqüentemente, o tempo de aquecimento. Juntamente a uma atualização e redimensionamento dos componentes eletrônicos para que suportem tal aumento, obteríamos 860W. Outra interessante melhoria seria incluir um potenciômetro regulador de corrente ao circuito do aquecedor, tendo a função de ajustar a potência final de aquecimento ou a frequência de trabalho dos Mosfets.

9. TABELA DE ORÇAMENTO

MATERIAL	QUANTIDADE	VALOR
Alça para Transporte	1	R\$ 28,00
Cano de Cobre 3/16"	1	R\$ 70,00
Cantoneira 3/4"x1/8" Aço 1020	1	R\$ 36,00
Capacitor MKP 0.47 μ F 305V	6	R\$ 42,00
Chapa de Aço Galvanizado 1,3x0,50m	1	R\$ 55,00
Conector de Cabo	2	R\$ 09,00
Diodo Retificador 1N4007	2	R\$ 00,40
Disjuntor Bipolar Weg 25A Curva C	1	R\$ 35,00
Dissipador de Alumínio	1	R\$ 30,00
Fonte Chaveada AC-DC 24V 20A	1	R\$ 75,00
Grade de Proteção para Ventoinha	1	R\$ 11,00
Indutor "Choke RF" 130 μ H	1	R\$ 25,00
Mosfet IRFP4668 Canal N 250V 130A	2	R\$ 72,00
Parafuso Allen Inox Cabeça 5mm	20	R\$ 09,00
Pés de Apoio 1/4x3/4"	4	R\$ 10,00
Placa de Acrílico 50x50 cm	1	R\$ 50,00
Placa de Fenolite 20x20mm	1	R\$ 22,00
Porca Sextavada Inox 5mm	20	R\$ 03,00
Resistor 220 Ω 2W 5%	2	R\$ 02,40
Sinaleiro Verde 24V Lukma	1	R\$ 25,00
TOTAL: 609,80		

REFERÊNCIAS

Aquecimento por Indução: Bobinas de indução. **Ambrell: Precision Induction Heating**. Disponível em: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0168-18.pdf.

ASTH, C. R. Eletromagnetismo. **Toda Matéria**. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/eletromagnetismo/>.

Corrente de Foucault. **Wikipedia: A enciclopédia livre**, 2022. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Corrente_de_Foucault.

FERREIRA, A. N. A Descoberta da Indução Eletromagnética. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-descoberta-inducao-eletromagnetica.htm>.

Força Eletromotriz. **Wikipedia: A enciclopédia livre**, 2024. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a_eletromotriz.

HELERBROCK, R. Efeito Joule. **Mundo Educação**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/o-efeito-joule-suas-aplicacoes.htm>.

HELERBROCK, R. Lei de Faraday. **Mundo Educação**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/lei-faraday.htm>.

Lei de Faraday-Neumann-Lenz. **Wikipedia: A enciclopédia livre**, 2024. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Faraday-Neumann-Lenz.

Lei de Lenz. **Wikipedia: A enciclopédia livre**, 2020. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Lenz.

Oscilador LC. **Wikipedia: A enciclopédia livre**, 2020. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Oscilador_LC

SANTOS, S. A. M. Fluxo Magnético e a Lei de Faraday. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/fluxo-magnetico-lei-faraday.htm>.