



Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO  
ETEC “JORGE STREET”

## **Aquecimento por Indução Eletromagnética e sua Aplicação no Tratamento Térmico**

**São Caetano do Sul - SP  
2023**

# **ETEC JORGE STREET**

## **Aquecimento por Indução Eletromagnética e sua Aplicação no Tratamento Térmico**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como pré-requisito para obtenção do Diploma de Técnico em Eletrotécnica da ETEC Jorge Street. Prof. Orientador Sandra

**Fábio Silva Cano  
Fabrício da Silva Moreira  
Francisco Oliveira da Silva  
Leandro Francisco Ferreira  
Mariton Martins Oliveira  
Rodrigo Ferreira da Silva  
Wesley Barboza de Queiroz Cardoso**

**São Caetano do Sul - SP  
2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Às nossas famílias que, de maneira direta ou indireta, apoiaram nossos esforços.

Ao Prof<sup>o</sup> orientador Carlos Marcelo e Sandra Valéria que alicerçaram o ensino e a aprendizagem, a fim de que este projeto pudesse ser concretizado.

A todos os Professores que participaram da construção do conhecimento dos alunos, pois sem esse auxílio, possivelmente, este projeto não teria se transformado em realidade e edificado um sonho.

Aos colegas do curso com os quais tivemos oportunidade de conviver durante a aquisição da aprendizagem e repartir incertezas, na caminhada, em busca desta ascensão cultural.

## Epígrafe

“ Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende. ” - Leonardo da Vinci

## RESUMO

O estudo “Aquecimento por Indução Eletromagnética e sua Aplicação no Tratamento Térmico” se deu em vista da necessidade industrial de aquecer materiais metálicos visando alterar suas propriedades tribológicas. Este projeto ganha relevância por atender a demanda industrial enfatizando as vantagens de se utilizar uma corrente elétrica em prol do aquecimento da peça que será tratada. Adotou-se como objetivo a análise de um circuito de frequência ressonante encontrado em têmperas de indução, a fim de realizar a montagem, em escala, de um protótipo. Amparou-se em amplo suporte teórico, que versa desde o estudo do eletromagnetismo até as características de ondas senoidais. Tais estudos se encontraram muito presentes na disciplina de “Máquinas Elétricas”. O projeto foi concebido e realizado entre os meses de agosto de 2022 e junho de 2023. O estudo resultou na análise e utilização de um circuito-tanque, que associado à uma bobina longa produziu, com a passagem de corrente elétrica em si, correntes de Foucault no corpo de prova que precisava ser aquecido. Por Efeito Joule obteve-se o resultado requerido. Para a ampliação do projeto, sugere-se um estudo que desenvolva métodos de resfriamento para o corpo de prova aquecido pela têmpera em questão.

**Palavras-chave:** Têmpera por indução. Tratamento térmico. Indução eletromagnética.

## **ABSTRACT**

The study “Heating by Electromagnetic Induction and its Applications in Heat Treatment” took place in view of the industrial need to heat metallic materials to change their tribological properties. This project gains relevance for meeting the industrial demand, emphasizing the advantages of using an electric current in favor of heating the piece that needs to be treated. It was adopted as objective the analysis of a resonant frequency circuit (found in induction tempers) in order to carry out the assembly, in scale, of a prototype. It was supported by broad theoretical support, ranging from the study of electromagnetism to the characteristics of sine waves. Such studies were very present in the discipline of “Electrical Machines”. The project was conceived and carried out between the months of August 2022 and June 2023. The study resulted in the analysis and use of a tank circuit, which associated with a long coil produced currents of Foucault in the piece that needed to be heated. By the Joule Effect, the required result was obtained. For the expansion of the project, a study is suggested that develops cooling methods for the piece heated by the temper in question.

**Keywords:** Induction hardening. Heat treatment. Electromagnetic induction.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Diagrama de PERT
- Figura 2 - Equação A
- Figura 3 - Equação B
- Figura 4 - Equação C
- Figura 5 – Permeabilidade dos Materiais
- Figura 6 - Resistividade dos Materiais
- Figura 7 - Equação D
- Figura 8 – Diagrama Elétrico da Têmpera por Indução

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diagrama de PERT	16
Tabela 2 - Custo dos Materiais	18
Tabela 3 - Custo do Serviço	18

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Cronograma

19

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1 Problema	11
1.2 Objetivos	11
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b>	<b>11</b>
1.3 Delimitações do Tema	12
1.4 Relevância	12
1.5 Organização do TCC	13
<b>2 SUPORTE TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1 Efeitos Ocasionados pela Passagem da Corrente Elétrica	13
2.2 Características de Ondas Senoidais	14
2.3 Eletromagnetismo	
2.4 Conceito da tência indutiva	14
<b>3 MÉTODO DE EXECUÇÃO</b>	<b>14</b>
3.1 Área de Realização	17
3.2 Normas Técnicas, Normas de Segurança, Normas Ambientais	17
3.3 CUSTOS	17
<b>3.3.1 Custos de Materiais</b>	<b>17</b>
<b>3.3.2 Custo hora-homem</b>	<b>18</b>
<b>3.3.3 Custo total do Projeto</b>	<b>18</b>
<b>3.3.4 Custo para possível comercialização do produto final</b>	<b>18</b>
3.4 Cronograma	18
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>19</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>25</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>26</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A indústria metalmecânica apresenta entre as suas necessidades a de realizar o aquecimento de metais visando diferentes fins: realizar tratamento térmico, forjamento, pré-aquecimento de metais que passarão por soldas e outros mais.

A têmpera indutiva sobressai-se como uma alternativa viável e vantajosa em relação a essa demanda. Isto porque o processo de aquecimento vinculado a indução eletromagnética evita o risco de contaminação por contato a outros materiais na peça que será aquecida. Além disso, os custos para se obter o método de aquecimento por têmpera indutiva se fazem atrativos quando relacionados aos outros também utilizados na indústria.

## 1.1 Problema

Em observação à necessidade da execução de têmpera em produção elevada com controle da profundidade e área de aplicação: como fazer um tratamento térmico por indução?

## 1.2 Objetivos

Os objetivos aqui mencionados conduzem às finalidades e aos alvos a serem alcançados.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é analisar um circuito de frequência ressonante encontrado em têmperas de indução, a fim de realizar a montagem, em escala, de um protótipo.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Aferir o campo magnético gerado por corrente elétrica em condutores espiralados;
- Observar o comportamento de ondas senoidais, pela medição de sinais no osciloscópio;

- Avaliar circuitos de corrente alternada como os “circuitos-tanque”, dotados da presença de indutores e capacitores;
- Analisar a aplicabilidade da indução eletromagnética em processos de tratamento térmico;
- Constatar diferentes níveis de corrente elétrica na bobina e as suas respectivas implicações;
- Dimensionar os componentes de um circuito elétrico eficiente para o tratamento térmico por indução;
- Aferir os resultados quantitativos da prática e compará-los aos da expectativa teórica.

### **1.3 Delimitações do Tema**

Esta investigação se limitou a explicar a respeito de máquinas elétricas, especificamente, sobre campo magnético gerado por corrente elétrica em condutores em espiral (bobina e solenoide).

### **1.4 Relevância**

A indústria metalmeccânica demanda o uso de aços com propriedades mecânicas e tribológicas mais exigentes. É preciso combinar um custo baixo com um desempenho alto para que as aplicações sejam realizadas de forma adequada e com qualidade.

”Conforme Rodrigues e Silva (s.d.), após a descoberta de Michael Faraday sobre a indução eletromagnética, o setor industrial utilizou este fenômeno em diversas aplicações. Além da ampla utilização que faz importante o estudo deste evento, os autores revelam num caso específico – o do tratamento térmico por indução eletromagnética – que é possível e, por vezes, vantajoso o aquecimento de materiais ferrosos por meio da exposição a um campo eletromagnético:

“Uma vez que não ocorre o contato, o processo de aquecimento não deixa contaminantes no material a ser aquecido. Também é muito eficiente, devido ao calor realmente a ser gerado dentro da peça e/ou corpo de prova. Isso o distingue de outros métodos de aquecimento em que o calor é gerado numa chama ou elemento de aquecimento aplicado à peça. Por essas razões o aquecimento por indução necessita de algumas aplicações exclusivas na indústria.” (RODRIGUES E SILVA, s.d., p.2)

Ademais, Vieira (2018) aborda que no estudo do eletromagnetismo, há uma ideia de perda atrelada às chamadas correntes parasitas, uma vez que se averigua, neste evento, dissipação de energia em forma de calor. Entretanto, a costumeira perda apurada em transformadores e motores de corrente alternada ganha nova perspectiva quando constatado que o calor produzido por estas correntes pode ser controlado e aproveitado em determinadas aplicações tecnológicas.

Tendo isto em vista, revela-se a importância de estudar as formas de aproveitamento deste calor que se dão pela construção de determinados circuitos elétricos. Estes circuitos são denominados circuitos tanque ou circuitos ressonantes. Como ressalta Vieira (2018), é esse circuito quem vai originar um campo magnético com oscilações ao longo do tempo que terão o objetivo de induzir correntes parasitas no corpo de prova, isto é, a peça que será aquecida.

### **1.5 Organização do TCC**

A parte documental do TCC foi organizada em cinco etapas, sendo a primeira, reservada para apresentação do trabalho no que se refere ao problema, aos objetivos, à delimitação do tema, à relevância do estudo e a como foi organizado o documento; a segunda, indica os suportes teóricos que embasam a execução do projeto; a terceira, o desenvolvimento que engloba o método de execução, normas, custos e cronograma; o quarto, ao (s) resultado (s) discutido (s) com as teorias que serviram de alicerce para a execução do produto final e o quinto, e último, às considerações finais.

## **2 SUPORTE TEÓRICO**

### **2.1 EFEITOS OCACIONADOS PELA PASSAGEM DA CORRENTE ELÉTRICA**

No experimento proposto, a passagem da corrente elétrica se relaciona a efeitos de eletromagnetismo e dissipação de calor. Conforme Pereira et al. (2021), o campo eletromagnético que é originado no entorno das espiras da bobina tem a capacidade de gerar corrente elétrica em materiais ferromagnéticos. Os autores insistem que de acordo com a Lei de Faraday-Neumann-Lenz, o material ferromagnético apresentar correntes parasitas quando próximo ao campo da bobina.

Essas correntes, ao irem contra a resistividade elétrica do corpo de prova originam calor. Este fenômeno já é conhecido pela ciência e denominado Efeito Joule.

Além disto, Pereira et al. (2021) acrescentam que é possível constatar nesses fenômenos o fato de que eles apenas funcionam quando relacionados aos materiais ferromagnéticos. É por este motivo que não há grande perigo quando alguém introduz, ao invés de um corpo de prova ferromagnético, algum dedo ou material não condutor no meio da bobina. Isto porque o circuito não produzirá correntes parasitas e tampouco irá esquentar em altas temperaturas esse tipo de material.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DE ONDAS SENOIDAIS:**

Vieira (2018) revela que sob altas frequências, a corrente elétrica é conduzida de modo mais intenso nas superfícies externas do corpo de prova, conduzindo de forma muito menos expressiva no centro. A importância deste fato se dá uma vez através do maior ou menor aquecimento do centro e se consegue um material com maior ou menor dureza, de acordo com o que melhor se adequar a sua utilização final. Por isso, a análise da onda senoidal que envolve a percepção da frequência se faz muito importante.

## **2.3 ELETROMAGNETISMO:**

Vieira (2018) ressalta que as correntes parasitas aparecem em um sentido contrário às do fluxo magnético de modo a tentar diminuir a sua variação. Este fato confirma a Lei de Lenz e revela a importância de analisar o eletromagnetismo no experimento proposto.

## **2.4 CONCEITO DA TÊMPERA INDUTIVA:**

Processo caracterizado pelo aquecimento superficial ou total da peça, tem por objetivo modificar as propriedades dos aços e de outros materiais através de um conjunto de operações que incluem o aquecimento e o resfriamento em condições controladas. Processo muito utilizado na indústria em eixos, flanges, tubos, fusos, buchas, hastes de cilindros, facas industriais, engrenagens, pinos, garfos, êmbolos, ponteiros e uma infinidade de peças complexas. Processo que permite obter uma estrutura martensítica, que sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, é o aumento do limite de resistência a tração do aço e também da sua dureza

### 3 MÉTODO DE EXECUÇÃO

Neste capítulo foram expostos os procedimentos empregados para a realização da pesquisa.

Quanto à **abordagem**, este estudo foi apoiado em pesquisa qualitativa.

Para o **levantamento de informações**, o processo foi bibliográfico, baseado em fontes físicas (livros, revistas técnicas, dissertações de mestrado) e virtuais, encontradas em endereços eletrônicos.

No que se refere ao **registro da parte prática** do projeto (execução do produto ou serviço), a estrutura textual utilizada foi a **Descrição Técnica de Processo** com a exposição sequencial pormenorizada das fases de execução do produto ou do serviço, seguidas das respectivas figuras numeradas e nomeadas.

Assim sendo, a execução do (a) projeto foi efetuada em 4 etapas.

**A primeira etapa** consistiu em um dimensionamento básico dos componentes, baseado em um diagrama de têmpera e nas informações presentes em datasheet de cada componente eletrônico.

**A segunda etapa** consistiu na compra dos materiais necessários para compor o circuito estabelecido para a construção da têmpera e de toda a sua estrutura.

**A terceira etapa** consistiu na montagem de todo o aparato comprado para efetivamente construir o circuito e a têmpera indutiva como um todo.

**A quarta etapa** consistiu em realizar uma testagem prévia para confirmar a correta composição da máquina e fazer os reparos que se fizerem necessários, caso haja problemas visíveis relacionados ao aquecimento ou às conexões elétricas.

**A quinta etapa** consistiu em realizar uma aferição mais precisa, em uma testagem mais minuciosa da máquina, na qual haverá o uso de instrumentos de medição, sendo eles: multímetro, osciloscópio e termômetro.

**A sexta etapa** consistiu em explorar as possibilidades numéricas relativas aos componentes do circuito, de modo a constar se o dimensionado básico adotado foi, de fato, o melhor que se podia atingir em eficiência ou se havia possibilidade de otimização do maquinário.

**A sétima etapa** consistiu em avaliar, uma vez encontrado o melhor dimensionamento do circuito tal como disposto, se há melhores disposições, isto é, se

com a mudança, supressão ou adição de componentes consegue-se um melhor funcionamento para a máquina.

**A oitava etapa** consistiu em expor uma série de alternativas que visaram explorar os potenciais e limites da máquina e de seu funcionamento, de modo a perceber relações de proporcionalidade e condicionalidade entre todos os componentes.

As etapas foram transformadas em um Diagrama de PERT, como pode se ver a seguir:

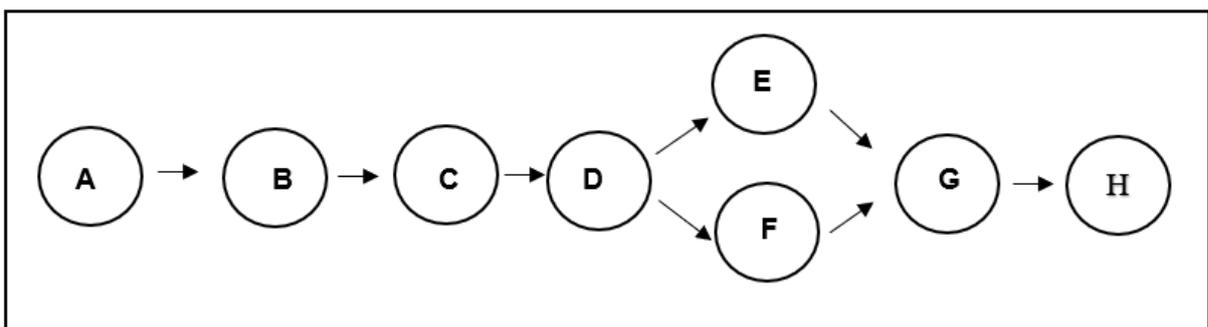


Figura 1 - Diagrama de PERT

Atividade	Descrição	Precedentes	Duração (semanas)
<b>A</b>	Dimensionamento Básico	-	2
<b>B</b>	Compra dos Materiais	A	1
<b>C</b>	Montagem da Máquina	B	1
<b>D</b>	Teste preliminar	C	1
<b>E</b>	Aferição com Instrumentos de Medição	D	2
<b>F</b>	Exploração do Potencial do Circuito	D	3
<b>G</b>	Exploração do Potencial de Reestruturações do Circuito	E, F	3

H	Análises dos Resultados e Manejos Matemáticos	G	3
---	--	---	---

*Tabela 1 - Diagrama de PERT*

### **3.1 Área de Realização**

Este estudo foi realizado na ETEC Jorge Street em São Caetano do Sul, São Paulo, no laboratório de elétrica, pelos alunos do Curso Técnico de Eletrotécnica.

#### **3.2 Normas Técnicas, Normas de Segurança, Normas Ambientais**

NR-10: esta norma se refere a segurança em instalações elétricas e serviços em eletricidade, sendo essencial à instalação e manutenção da máquina.

NR-12: esta norma diz respeito ao uso de equipamentos e máquinas que apresentam algum perigo em uma linha de produção. Portanto, sua observação se faz necessária para se estabelecer uma análise de riscos e desenvolver materiais que orientem os trabalhadores em seu uso.

CQI-9: os requisitos CQI-9 são avaliativos do tratamento térmico e procuram estabelecer melhorias nesse processo.

### 3.3 CUSTOS

Os custos para a confecção do produto final envolveram materiais e força de trabalho humana. Os valores atribuídos podem ser consultados nas tabelas a seguir.

#### 3.3.1 Custos de Materiais

Nome do material	Quantidade	Custo Unitário	Custo
<b>Total</b>			
.....			
<b>Fio Rígido 2,5mm<sup>2</sup></b>	<b>1 metro</b>	<b>R\$ 3, 00</b>	<b>R\$ 3, 00</b>
.....			
<b>Capacitor MKP</b>	<b>2 unidade</b>	<b>R\$ 5, 00</b>	<b>R\$ 5, 00</b>
<b>0.33 µF</b>			
.....			
<b>Capacitor MKP</b>	<b>5 unidade</b>	<b>R\$ 10, 00</b>	<b>R\$ 10, 00</b>
<b>1.0 µF</b>			
.....			
<b>Fonte Chaveada</b>	<b>1 unidade</b>	<b>R\$ 140, 00</b>	<b>R\$ 140, 00</b>
<b>500W 24V</b>			
.....			
<b>Resistor 220Ohms</b>	<b>2 unidades</b>	<b>R\$ 0, 50</b>	<b>R\$ 1, 00</b>
.....			
<b>Indutor de Choque RF</b>	<b>2 unidades</b>	<b>R\$ 10, 00</b>	<b>R\$ 10, 00</b>
<b>60µH</b>			
.....			
<b>Diodos Uf4007</b>	<b>2 unidades</b>	<b>R\$ 0, 90</b>	<b>R\$ 1, 80</b>
.....			
<b>Transistor IRFZ44N</b>	<b>2 unidades</b>	<b>R\$ 08, 00</b>	<b>R\$ 16, 00</b>
.....			
<b>Dissipador de calor</b>	<b>2 unidades</b>	<b>R\$ 15,00</b>	<b>R\$ 30,00</b>
.....			
<b>Custo total dos Materiais</b>	.....		<b>R\$ 256,80</b>
.....			
<b>Fonte: Elaborada pelos autores</b>			

Tabela 2 - Custo dos Materiais

### 3.3.2 Custo hora-homem

Preço da hora de serviço	Qde de horas de serviço	Qde de Trabalhadores	Custo Total
R\$ 100,00	40	1	R\$ 4 000,00
Fonte: Elaborada pelos autores			

*Tabela 3 - Custo do Serviço*

### 3.3.3 Custo total do Projeto

Custo total do projeto: R\$ 256,80 + R\$ 4 000,00 = 4 256,80.

### 3.3.4 Custo para possível comercialização do produto final

R\$ 4256,80 x 29,21% = R\$ 5 500,00

### 3.4 Cronograma

	JUL/22	AGO/22	SET/22	OUT/22	NOV/22	FEV/23	MAR/23	ABR/23	MAI/23	JUN/23
Determinação do problema	X									
Determinação dos objetivos	X	X								
Delimitação do Tema		X								
Relevância		X	X							
Organização do TCC		X	X							
Seleção da Base Teórica		X	X	X						
Custos			X	X	X	X				
Pesquisa de normas (téc; de segurança; ambiental)			X	X	X					
Cronograma	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Execução do Projeto						X	X	X		
Resultados e Discussão					X	X	X			
Considerações Finais					X	X	X	X		
Resumo					X	X	X	X		
Introdução					X	X	X	X		
Redação final do documento - TCC e Impressão									X	
Elaboração do power-point do TCC									X	
Elaboração do vídeo									X	
Apresentação do TCC à Banca									X	X

Quadro 1- Cronograma

**Legenda:**

	concluído		em andamento
	não iniciado		atrasado

Fonte: Elaborada pelos autores

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento do circuito para a criação de uma tâmara indutiva resultou na utilização de diversos componentes, estando entre eles: cabo rígido, fonte chaveada, mosfets, resistores, diodos, capacitores, transistores, indutores e dissipadores de calor.

Estes componentes foram dimensionados visando a produção do calor final que incidiria sobre o corpo de prova, isto é, a produção de calor que resultaria na incandescência do corpo de prova de modo a permitir seu tratamento térmico.

Este calor foi obtido pela utilização de um sistema indutivo. De acordo com Halliday e Resnick (2016), quando um material condutor é inserido em um campo

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

Onde:

$\varepsilon$ : Força eletromotriz induzida [V]  
 $d\phi$ : Variação do fluxo magnético [Wb]  
 $dt$ : Intervalo de tempo [s]

Figura 2 - Equação A magnético variante, nele incidirá uma corrente elétrica induzida de tamanho proporcional. Tal fenômeno ficou conhecido como Lei de Faraday-Lenz e pode se associar a seguinte equação:

O fenômeno da indução eletromagnética se relaciona a produção de correntes parasitas que, por Efeito Joule, aquecem o corpo de prova inserido no campo magnético. Visando manejar a quantidade da indutância envolvida nesse processo, utilizou-se a formulação matemática número 1:

$$L0 = \frac{\mu0 * N^2 * A}{L}$$

Onde:

L = indutância em Henry (H)

N = número de espiras

S = área da secção transversal da figura em m<sup>2</sup>

m = comprimento do enrolamento em m

Figura 3 - Equação B

Deve ficar claro que as grandezas elétricas e eletromagnéticas não foram os únicos fatores que influenciaram na determinação dos dimensionamentos do circuito. As características físicas do corpo de prova influenciaram, também, na escolha dos tamanhos do solenoide, uma vez que o corpo de prova deve ser introduzido no núcleo da bobina longa e sua incandescência se dá aproximadamente na mesma extensão que possui o comprimento espiralado.

Além disso, existe um fenômeno que torna importante, mais uma vez, as dimensões do corpo de prova. É o Efeito Peculiar. Segundo Machado (2007), Maxwell se tornou um dos pioneiros a estudar este fenômeno caracterizado pela falta de uniformidade, em corrente alternada, na distribuição de corrente elétrica induzida em um condutor cilíndrico. Há mais corrente (e conseqüente calor) nas extremidades de um condutor cilíndrico que em seu centro. A equação relativa à penetração de corrente a um condutor pode ser expressa na formulação matemática número 2:

$$\delta = 503 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu r * f}}$$

Onde:

δ: Profundidade de penetração da corrente elétrica [m]

ρ: Resistividade elétrica do material [Ω\*m]

f: Frequência da corrente elétrica [Hz]

μr: Permeabilidade magnética relativa do material [H/m]

Figura 3 - Equação C

Para a permeabilidade e resistividade do material, adotaram-se os seguintes valores encontrados e posteriormente referenciados na bibliografia:

<b>Os materiais e sua permeabilidade</b>	
Aqui estão alguns materiais, com sua permeabilidade magnética em H / me entre parênteses sua permeabilidade relativa:	
<b>Ferro:</b>	$6,3 \times 10^{-3}$ ( 5000)
<b>Ferro de cobalto :</b>	$2,3 \times 10^{-2}$ ( 18000)
<b>Níquel-ferro:</b>	$1,25 \times 10^{-1}$ ( 100.000)
<b>Zinco-manganês:</b>	$2,5 \times 10^{-2}$ ( 20000)
<b>Aço carbono:</b>	$1,26 \times 10^{-4}$ ( 100)
<b>Ímã de neodímio:</b>	$1,32 \times 10^{-5}$ ( 1,05)
<b>Platina:</b>	$1,26 \times 10^{-6}$ 1.0003

Figura 4 – Permeabilidade dos Materiais

Metal	$\rho (\times 10^{-8} \Omega m)$
Alumínio	2,65
Constantan	47
Cobre	1,7
Prata	1,6
Ouro	2,4
Ferro	10
Níquel	59
Platina	11
Aço	96
Zinco	5,9

Figura 6 - Resistividade dos Materiais

Deve-se atentar para a constatação de que visando o aquecimento do metal, a profundidade de penetração deve ser menor que o raio da peça a ser aquecida, uma vez que em caso contrário, haveria o cancelamento das correntes eletromagnéticas induzidas que se anulariam.

Além dos dimensionamentos relacionados ao tamanho do corpo de prova, constatou-se entre os modelos de têmpera a importância de arranjar os componentes visando originar um “circuito-tanque”, também denominado de circuito de frequência ressonante, no qual há uma significativa interação entre o funcionamento do indutor e do capacitor. Destaca-se o papel da frequência, pois como confirmam Barboza et al. (2001), a dissipação de energia que leva a produção de calor varia significativamente com a frequência, mesmo que a penetração da corrente no material se dê em proporção inversa ao tamanho dessa grandeza. Há uma relação importante entre esses fatores na equação número 3, que expressa a frequência ressonante:

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

Onde:

$f_0$ : Frequência Oscilante [Hz]

L: Indutância [H]

C: Capacitância [F]

Figura 5 - Equação D

Para a elaboração do circuito, além de capacitores e indutores acrescentaram-se outros componentes, conforme demonstra o diagrama abaixo, que serviu como modelo para a realização do projeto. A função dos seus componentes será descrita a

seguir:

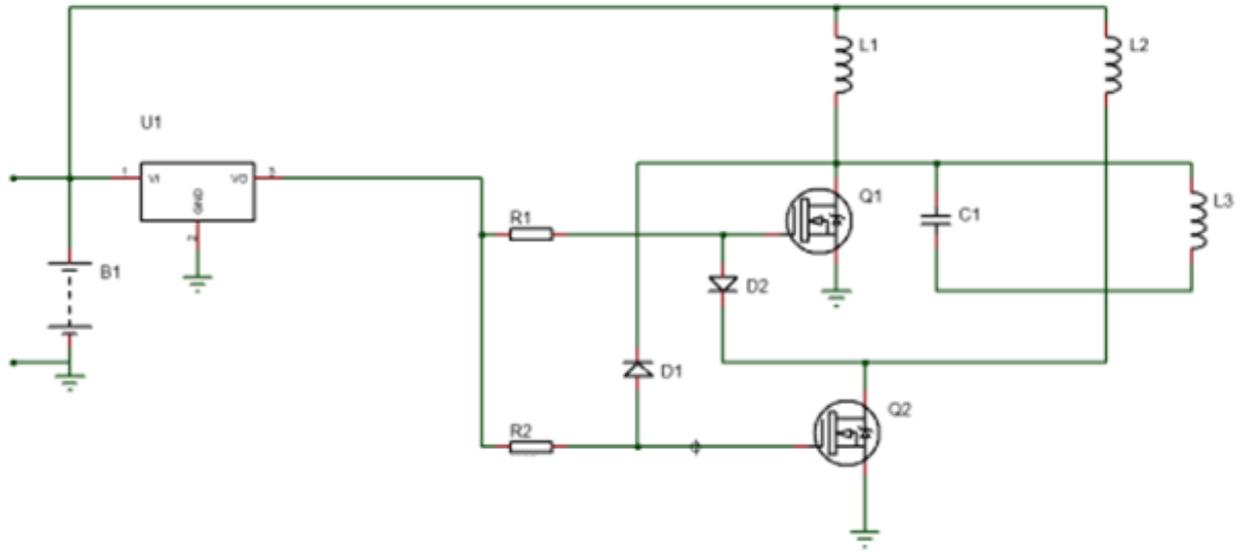


Figura 8 – Diagrama Elétrico da Têmpera por Indução

A fonte U1 é responsável pela entrega da potência exigida, limitando também a tensão e corrente. Seu valor é em torno de 500 watts de potência.

Os resistores R1 e R2 também desempenham o papel de limitar as correntes que os perpassarão chegando aos diodos.

Os indutores L1 e L2 de choque RF são responsáveis pela alta impedância na oscilação (circuito-tanque). Esses indutores apresentam, cada,  $60\mu$  Henry de indutância.

C1: banco de capacitor e L3 juntos atuam no circuito-tanque, produzindo o campo magnético responsável pelo aquecimento. A capacitância de C1 é de  $5,72\mu$  Farad e a indutância de L3 é de  $1,19\mu$  Henry.

Q1 e Q2 são os transistores Mosfet, responsáveis pelo chaveamento que permite ao banco de capacitores que descarregue nos dois sentidos da bobina de indução. Eles conduzem em ciclos diferentes na oscilação, quando um está conduzindo o outro está em estado de chave aberta.

D1 e D2 são diodos de chaveamento rápido responsáveis por desencadear a mudança de chaveamento dos mosfetes.

Os valores não expressos relativos aos componentes do circuito foram, em um primeiro momento, baseados nas informações de extensão das propriedades das peças obtidas em datasheet.

Utilizando-se os dados das figuras 5 e figura 6 na equação C (figura 4), obteve-se como resultado uma frequência de oscilação próxima a 61k Hertz.

**[Com a execução futura do projeto, pretende-se obter]:**

Em um primeiro momento, delimitou-se de modo estimado as dimensões dos componentes do circuito através de suas respectivas informações encontradas em datasheet. As informações precisas foram delimitadas por experimentação e aferição dos dados pelo uso de instrumentos de medição.

Obteve-se como resultados, também, uma série de cálculos que aferiram as grandezas eletromagnéticas envolvidas na utilização da têmpera, bem como uma série de alternativas que visaram explorar os potenciais e limites da máquina e de seu funcionamento. Utilizou-se instrumentos de medição como o osciloscópio para aferir as dimensões senoidais da onda produzida pelo equipamento. Utilizaram-se equipamentos como o multímetro e o termômetro. Constataram-se condições, proporções e necessidades para se atingir, adequadamente, a finalidade de aquecer, até a incandescência, o corpo de prova utilizado na têmpera.

Com o manuseio de instrumentos de medição, foram aferidos e fotografados os resultados obtidos com o uso do protótipo. Assim, pode-se comparar as previsões teóricas ao funcionamento da têmpera indutiva na prática, de forma que a experimentação empírica comprovou o que já se previa em decorrência dos cálculos e dos suportes teóricos.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O estudo teórico dos circuitos-tanque foi essencial para o desenvolvimento prático do projeto da têmpera, uma vez que através do estudo de suas características constatou-se como é possível atingir a finalidade de aquecer um corpo de prova com o manejo adequado da corrente elétrica.

Também ganhou com o respaldo teórico a utilização dos fenômenos eletromagnéticos, que possuem influência direta sobre a produção de calor no corpo de prova pela utilização de correntes parasita.

O manejo matemático dos valores de indutância, capacitância e outros substituíram incógnitas em equações bem estabelecidas, de modo a permitir observar

relações de proporção, condição e necessidade que oportunizaram explorar as possibilidades de construção da têmpera.

O projeto demonstrou ter pertinência social, uma vez que dentre os seus benefícios se encontram a utilização na indústria metalmeccânica, que demanda por tratamentos térmicos de custo acessível. Constatou-se, também, na literatura acadêmica, uma maior eficiência da têmpera indutiva em evitar contaminantes no material a ser aquecido, entre outras vantagens que fazem desta máquina um ganho social.

Para ampliar o projeto, sugere-se um posterior estudo que desenvolva métodos de resfriamento para o corpo de prova aquecido pela têmpera em questão.

## REFERÊNCIAS

BARBOZA, R. N.; CRUZ, C. V. S. M.; GRAZIANI, B. M.; LORENZETTI M. C. F., SABADINI, E. **Aquecimento em forno de microondas / desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais.** Campinas – SP. 2001.

HALLIDAY, D. **Fundamentos de física, volume 3: eletromagnetismo;** tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

LAGE, E. **Circuitos elétricos,** Rev. Ciência Elementar. Universidade do Porto. 2021.

MACHADO, R. P. **Medidas do efeito pelicular clássico em condutores de cobre – proposta de um novo modelo.** Curitiba, 2007.

PEREIRA, A.B.; FRAGOSO, V.; ALMADA, L.M.; GERON, L.C. **Fogões de Indução: montagem e testes de um circuito disponível.** [S. I.]. 2021

**Permeabilidade magnética: constante e tabela.** Maestrovirtuale.com. Disponível em: <<https://maestrovirtuale.com/permeabilidade-magnetica-constante-e-tabela/>> Acesso em 13/11/2022.

SILVA, E.R.; RODRIGUES, R.A. **Máquina de tratamento térmico por indução eletromagnética.** [S. I.].

SILVA, G.V.A.; **Caracterização de conversores em aplicações de aquecimento por indução.** Betim, MG. 2019.

SOARES, J.P.; TERRONES, L. A. H.; PARANHOS, R. **Efeito dos Tratamentos Térmicos de Normalização e de Solubilização na Microestrutura de uma Junta Dissimilar Soldada entre um Tubo de Aço API 5L X-52 e o Inconel 625.** [S. I.]. 2017.