

# Circuito Oscilador para Tratamento Térmico de Ligas Aço-Carbono Através de Aquecimento Indutivo

Davi Fienni Barcellos, *Estudante, UFSCar*, Carlos Alberto De Francisco, *Orientador, UFSCar*

**Resumo**—O trabalho aqui descrito teve como objetivo o projeto de forno de aquecimento indutivo por meio de uma nova metodologia, utilizando-se de um circuito oscilador natural que, por meio de uma bobina de indução, gera o campo magnético que aquecerá a peça de trabalho inserida no seu interior. A peça de trabalho adotada para o tratamento térmico nesse trabalho é uma liga aço-carbono conhecida como Aço 5160. Para a realização da construção do sistema foi levada em consideração a dependência da composição do metal na temperatura de aquecimento e o comportamento das correntes parasitas induzidas no mesmo. São apresentados neste trabalho: a topologia do circuito utilizada; a metodologia de projeto proposta; o projeto da bobina de indução, onde o formato, números de espiras e o espaço entre a bobina e a peça são essenciais para operação eficiente do sistema; a curva de aquecimento obtida através da têmpera completa da ponta de uma chave e de um prego, e a eficiência do sistema, fazendo uma rápida comparação dos resultados obtidos em relação a outras pesquisas. O protótipo final montado foi de baixo custo; baixa complexidade e alta versatilidade, devido à flexibilidade da variação na tensão de entrada, regulando a temperatura final, e da capacitância do banco de capacitores do circuito tanque, ajustando a frequência de oscilação desejada.

**Palavras-chave**—Aço 5160, Aquecimento indutivo, bobina de indução, circuito oscilador, circuito tanque, frequência de oscilação, liga aço-carbono, têmpera completa, tratamento térmico.

## I. INTRODUÇÃO

O aquecimento indutivo ocorre através de dois mecanismos de dissipação de energia em forma de aquecimento. A energia é dissipada por efeito Joule e histereses magnéticas. Para os metais ferromagnéticos a perda de energia por efeito Joule é a principal forma de aquecimento [1].

A corrente passa pela bobina de indução induzindo um campo magnético no seu interior. O campo magnético gerado no interior da bobina de indução induzirá uma corrente no metal inserido na bobina de indução. O processo pode ser notado na Fig. 1.

Devido ao sistema ser oscilante na ordem de dezenas de kHz, o sentido que a corrente circula na bobina fica variando a cada momento, conseqüentemente o campo interno também varia fazendo com que os dipolos magnéticos dentro do metal

se alinhem a sentidos opostos a todo momento, assim parte da energia é dissipada por histereses magnéticas, também influenciando no aquecimento do metal.

O valor da frequência de oscilação influencia na capacidade do campo magnético gerado pela bobina de indução penetrar no metal. Oscilações com menores frequências fazem com que o campo magnético penetre mais no metal, fazendo com que correntes sejam induzidas mais profundas no metal.

As correntes induzidas no metal sofrem um fenômeno físico descrito como efeito pelicular (em inglês, “*skin effect*”), que causa uma diminuição na intensidade da corrente e defasagem entre elas à medida que aumenta a profundidade de penetração da corrente induzida [1]. O efeito é mostrado na Fig. 2.

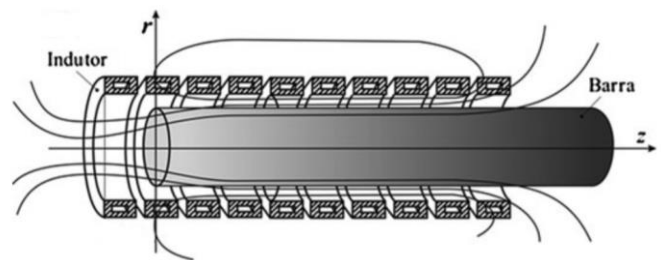


Fig. 1. Comportamento das linhas de campo magnético em uma bobina. A corrente elétrica fluindo pelo fio de uma bobina cilíndrica longitudinal gera um campo magnético em seu interior. Adaptado de [2].

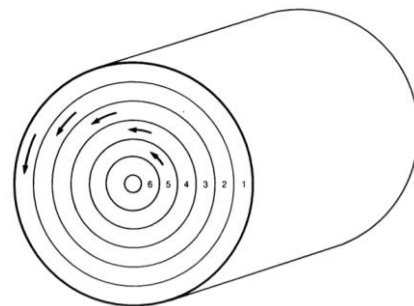


Fig. 2. Efeito pelicular em um cilindro. Quanto mais próximo do interior do cilindro as correntes vão diminuindo sua intensidade e ficam defasadas entre si. Adaptado de [1].

A profundidade de penetração das correntes induzidas são perpendiculares ao movimento das correntes na bobina de indução.

Essa profundidade de penetração da corrente induzida é relacionada diretamente com a frequência de oscilação do sistema, definida em [3] como:

$$d = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f_{osc}}} \quad (1)$$

onde,  $d$  é a profundidade de penetração, em metros;  $\rho$  é a resistividade do material, em ohms-metros;  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa do material, adimensional;  $f_{osc}$  é a frequência de oscilação do circuito, em Hertz, dada por:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

onde,  $L$  é o valor de indutância da bobina de indução, em Henry; e  $C$  é o valor da capacitância do banco de capacitores, em Farad.

Note também que devido as camadas mais externas serem mais quentes principalmente no início do aquecimento, parte do aquecimento ocorrerá por condução térmica das camadas mais externas para o centro do metal.

Assim, é importante garantir o tempo de aquecimento correto para cada aplicação desejada. Para alguns tratamentos térmicos é necessário aquecimento rápido para que a parte interna do metal não aqueça por condução, já para outros o aquecimento lento garante uma temperatura final homogênea em todo o metal.

O tratamento térmico é definido como um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento submetidos aos aços, sob condições controladas de temperatura e tempo visando modificar suas propriedades iniciais ou conferir-lhes características [4]. As principais características finais obtidas através dos tratamentos térmicos são: remoção de tensões, aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhora da ductibilidade, melhora da usinabilidade, melhora da resistência ao desgaste, melhora das propriedades de corte, melhora da resistência a corrosão, melhora da resistência ao calor, e modificação das propriedades elétricas e magnética [4].

Os principais tipos de tratamentos térmicos dos aços são: recozimento, normalização, têmpera e revenido [4].

Recozimento visa remover tensões internas, diminuir a dureza afim de melhorar a usinabilidade do aço. Consiste no aquecimento do aço 50 °C acima da “zona crítica” – também chamada de “linhas de transformação” são pontos que ao serem atingidos, quer no resfriamento ou aquecimento, se têm início ou terminam importantes transformações estruturais no estado sólido – seguido de resfriamento muito lento, geralmente feito dentro do próprio forno aquecido [4].

Normalização consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de resfriamento ao ar.

Têmpera consiste no aquecimento do aço superior ao “ponto de Curie”, que é o ponto onde o momento magnético intrínseco do material muda de direção, seguido de resfriamento em um meio como óleo, água, salmoura, ar comprimido ou polímeros líquidos. Abaixo do “ponto de Curie” os dipolos no metal ainda estão alinhados como ferromagnéticos, porém quando esse ponto é ultrapassado os dipolos ficam desalinhados como paramagnéticos [4].

Revenido consiste no aquecimento do aço a temperaturas

abaixo da zona crítica seguido de resfriamento lento. Normalmente sempre acompanha a têmpera, eliminando a maioria dos inconvenientes produzidos por esta; também corrige as excessivas durezas e fragilidade do material, aumentando a ductibilidade e resistência ao choque [4].

O tipo de metal adotado neste trabalho foi o aço-carbono 5160 com concentração de carbono entre 0,55 – 0,65 %, manganês entre 0,75 – 1,00 %, silício entre 0,15 – 0,30 %, cromo entre 0,70 – 0,90 %, fósforo 0,030 % e enxofre 0,25 % [4], escolhido devido a bons resultados de dureza obtidos através de sua têmpera. O aço 5160 tem grande utilização na indústria de molas para suspensão de veículos, para facas artesanais, em construção mecânica, como pregos e parafusos, e pequenas ferramentas [7], [8]. Cada material e sua concentração no aço modificam as propriedades da liga, descritas a seguir.

Maiores concentrações de carbono aumentam a dureza, resistência a tração e à temperabilidade do aço, mas diminui a tenacidade e soldabilidade. O manganês ajuda como desoxidante, aumenta a força da liga, diminui o tempo de resfriamento crítico, melhora a capacidade de endurecimento e melhora a resposta aos tratamentos térmicos. O silício ajuda como desoxidante, diminui a solubilidade de carbono no ferro e melhora o endurecimento. O Cromo aumenta o tempo e temperatura necessária para austenização; melhora o endurecimento; diminui a oxidação; melhora a resistência ao desgaste, a corrosão, a capacidade de corte e a resistência a abrasão. O fósforo aumenta a força e dureza, porém diminui a tenacidade e ductibilidade. O enxofre melhora a maquinabilidade, diminui a ductibilidade e resistência ao impacto. Sua presença nas ligas aço-carbono é frequentemente indesejada [3].

Na Tabela I é mostrado as temperaturas para cada tratamento térmico falado utilizando o aço 5160 [4].

TABELA I  
TEMPERATURAS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS PARA O AÇO 5160

Tratamento Térmico	Temperatura	Unidade
Recozimento	750 – 780	°C
Normalização	870	°C
Têmpera	802 – 843	°C
Revenido	500 – 600	°C

## II. TOPOLOGIA DO SISTEMA

O circuito da Fig.3 representa o sistema aquecedor indutivo completo.

A tensão da fonte,  $V_{in}$ , é responsável por entregar a potência ao circuito, com capacidade de 600 W.

O resistor  $R_1$ , indutor  $L_1$ , e capacitores  $C_1$  e  $C_2$  servem como proteção, evitando picos de corrente no transitório inicial e filtram oscilações na tensão.

Os diodos Zener  $D_3$  e  $D_4$  garantem que o potencial elétrico na porta de  $Q_1$  e  $Q_2$  seja no máximo 12 V.

O indutor  $L_4$  é a bobina de indução que produz o campo magnético responsável pelo aquecimento por indução da peça

de trabalho.

O capacitor  $C_3$  é o banco de capacitores, responsável por transferir a potência para  $L_4$ , onde parte dessa potência será dissipada para o aquecimento da peça inserida na bobina de indução. A energia armazenada pelo banco de capacitores em cada semiciclo é dada por  $0,5CV^2$ .

O banco de capacitores,  $C_3$ , e a bobina de indução,  $L_4$ , juntos são responsáveis pelo valor da frequência de oscilação do circuito, são chamados de circuito tanque.

Os transistores Mosfet  $Q_1$  e  $Q_2$  são responsáveis pelo chaveamento, permitindo que o banco de capacitores 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.

Os diodos de chaveamento rápido  $D_1$  e  $D_2$  são responsáveis por desencadear a mudança de chaveamento por  $Q_1$  e  $Q_2$ . Isso ocorre quando os diodos conduzem, proporcionando na porta de  $Q_1$  e  $Q_2$  recebimento da tensão do circuito tanque intercaladamente, assim o transistor que está conduzindo abre, parando sua condução e iniciando a condução do outro transistor.

Os resistores  $R_2$  e  $R_3$  limitam a corrente que vai para os diodos  $D_1, D_2, D_3, D_4$ , e garantem uma tensão na porta de  $Q_1$  e  $Q_2$ .

Os indutores  $L_2$  e  $L_3$  proporcionam alta impedância no laço de oscilação ( $C_3$  e  $L_4$ ).

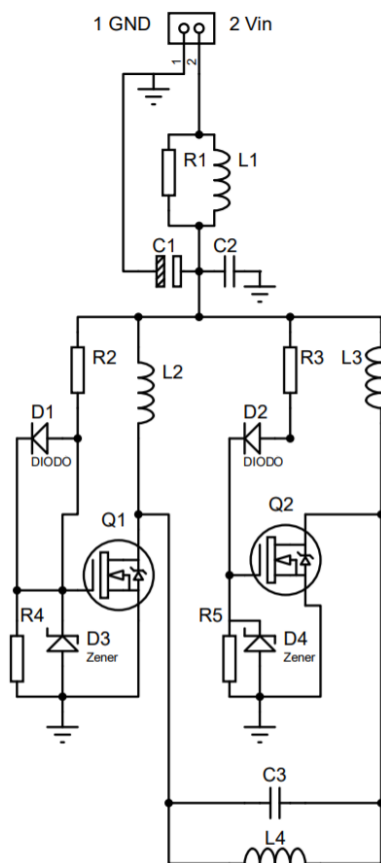


Fig.3. Visão geral do circuito oscilador para o aquecimento indutivo. Fonte: Própria Autoria.

### III. METODOLOGIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DA PEÇA DE TRABALHO

Não foi encontrado na bibliografia pesquisada uma metodologia clara para o dimensionamento do sistema, neste trabalho é proposto o seguinte procedimento para projeto:

#### 1) Indutância da Bobina de Indução

Existem diversas formas para o cálculo da indutância necessária para a bobina de indutância, podendo ser através da frequência de oscilação ou potência necessária para o aquecimento. Foi escolhido o projeto da bobina através das características físicas da peça de trabalho descritas nas Tabela II e Tabela IV. O projeto da bobina isolada, ou seja, sem utilizar a peça de trabalho como base para dimensionamento foge a proposta inicial deste trabalho, para mais informações utilizar as referências [11], [12] e [13].

Percebe-se que o comprimento da bobina de indução na Tabela III são maiores que o comprimento de aquecimento das aplicações 1 e 2 (descritas no tópico IV), isso ocorre porque à medida que o material vai sendo inserido na bobina de indução esta área vai sendo acoplada magneticamente entre os dois, fazendo com que a indutância naquele comprimento seja nula. Assim, numa bobina com comprimento próximo ou igual ao comprimento do material a ser aquecido, quando ocorre o acoplamento o sistema não oscilará, a corrente passando na bobina terá um surto altíssimo e provavelmente algum componente será danificado [1].

Em questão de eficiência, a maior importância para o projeto da bobina de indução é que o diâmetro interno seja o mais próximo possível do diâmetro da peça utilizada, para diminuir o espaço entre bobina de indução e a peça [1].

#### 2) Profundidade de Penetração Desejada

Para o aquecimento do metal a profundidade de penetração deve ser no máximo menor que a metade do diâmetro da peça de trabalho para que as correntes induzidas não se cancelem.

#### 3) Frequência de Oscilação do Sistema

À medida que a peça de trabalho vai aquecendo sua resistividade elétrica ( $\rho$ ) aumenta. Uma aproximação para resistividade elétrica para uma temperatura final de aquecimento de  $843^\circ\text{C}$  em [3] é  $\rho_{843} = 750 \eta\Omega\text{m}$ .

Ao contrário da resistividade elétrica, o valor da permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) diminui com o aumento da temperatura. Porém, seu valor só começa a diminuir consideravelmente quando está próximo da temperatura crítica. No entanto, esse fator é contrabalanceado naturalmente, pois o aumento da temperatura desencadeia aumento da resistividade do material, intensificando o *efeito Joule*, somado com a inserção do material na bobina de indução, devido ao acoplamento magnético, aumentam a corrente circulante nela, fazendo com que a intensidade de campo magnético fique mais forte aumentando a permeabilidade magnética no material. Como resultante final, tem-se uma pequena variação no valor final da permeabilidade magnética para o sistema [3].

Isolando  $f_{osc}$ , e atualizando  $\rho_{843}$  em (1), tem-se:

$$f_{osc} = 503^2 \frac{\rho_{843}}{\mu_r d^2} \quad (3)$$

#### 4) Capacitância do Banco de Capacitores

Com os valores da bobina de indução e frequência de oscilação já encontrada, isolou-se  $C_3$  em (2), obtendo o valor do banco de capacitores:

$$C_3 = \frac{1}{(2\pi)^2 L_4 f_{osc}^2} \quad (4)$$

onde,  $C_3$  é o banco de capacitores, em Farad; e  $L_4$  é a bobina de indução, em Henry.

#### 5) Potência Necessária para o Aquecimento

A potência necessária para o aquecimento da peça de trabalho é dada pela potência para a peça de trabalho atingir 843 °C e se manter nessa temperatura apesar das perdas por radiação e convecção.

A potência total necessária, em watts, será:

$$P_{total} = P_{perdida}^{rad} + P_{perdida}^{conv} \quad (5)$$

A potência perdida por radiação dada em [2], em watts, é:

$$P_{perdida}^{rad} = 5,67 \varepsilon_r S \left( \frac{T_f + 273}{100} \right)^4 \quad (6)$$

onde,  $\varepsilon_r$  é a emissividade da superfície da peça de trabalho, adimensional;  $S$  é a área lateral da peça de trabalho, em metros quadrados;  $T_f$  é a temperatura final de aquecimento, em graus Celsius.

O valor de  $\varepsilon_r$  pode ser encontrado em [2]. Para os aços carbonos não oxidados seu valor está entre 0,4 – 0,5. Adota-se  $\varepsilon_r = 0,5$ .

A potência perdida por convecção dada em [2], em watts, é:

$$P_{perdida}^{conv} = \alpha_c S (T_f - T_0) \quad (7)$$

onde,  $\alpha_c = 2,56 \cdot (T_f - T_0)^{1/4}$  é o valor médio do coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície da peça de trabalho, em Watts por metros quadrados–kelvin;  $T_0$  é a temperatura ambiente que circunda a peça de trabalho, em graus Celsius.

#### 6) Tensão Mínima de Entrada

A potência transmitida para a peça de trabalho ocorre através da transferência de potência reativa pelo banco de capacitores ( $C_3$ ), e esta varia com o valor da tensão de entrada.

O valor da potência reativa no banco capacitores é

$$q_C = V_{ef} I_{ef} \Rightarrow V_{ef} \left( \frac{V_{ef}}{|X_C|} \right) \Rightarrow \frac{V_{ef}^2}{|X_C|} \Rightarrow \frac{\left( \frac{V_{P_C}}{\sqrt{2}} \right)^2}{\frac{1}{2\pi f_{osc} C_3}} \Rightarrow q_C = V_{P_C}^2 \pi f_{osc} C_3 \quad (8)$$

onde,  $q_C$  é a potência reativa no banco de capacitores, em watts;  $V_{ef}$  é a tensão eficaz no banco de capacitores, em volts;  $I_{ef}$  a corrente eficaz no banco de capacitores, em amperes;  $|X_C|$  é o módulo da reatância capacitiva do banco de capacitores, em ohms;  $V_{P_C}$  é a tensão de pico no banco de capacitores, em volts.

A potência reativa no capacitor deve ser igual a  $P_{total}$ , assim:

$$q_C = P_{total} \quad (9)$$

Isolando  $V_{P_C}$  em (8), tem-se:

$$V_{P_C} = \sqrt{\frac{q_C}{\pi f_{osc} C_3}} \quad (10)$$

O valor de  $V_{in}$  deve ser suficiente para garantir uma tensão  $V_{GS} > 4,0 V$  (valor máximo da tensão de limiar da porta nos Mosfets), que é a tensão mínima  $V_{GS}$  para que eles conduzam. É razoável garantir um  $6,0 V < V_{GS} < 12,0 V$  para precaver que os mosfets não chaveiem incorretamente ou até mesmo queimem.

A tensão de pico na fonte ( $V_{in}$ ) é igual a tensão de pico no capacitor ( $V_{P_C}$ ), assim:

$$V_{in} = V_{P_C} \quad (11)$$

Um ponto muito importante dos tópicos 5 e 6 é que a potência transmitida para o aquecimento da peça de trabalho pode ser regulada através do valor da tensão de entrada, atendendo assim diversas temperaturas para tratamentos térmicos diferentes ou para a necessidade de aumentar a velocidade de aquecimento.

#### 7) Tempo de Aquecimento Necessário.

Com a potência necessária para que atinja a temperatura do tratamento térmico desejada é preciso ter certeza que a peça não será retirada da bobina de indução antes ou depois do tempo necessário.

A retirada precoce fará com que a chave não atinja a temperatura correta. Já a retirada tardia fará com que o tratamento térmico da têmpera atinja profundidades além do desejado.

O tempo de aquecimento necessária de acordo com a potência aplicada é dado por [2], como:

$$\Delta t = \frac{mc\Delta T}{q_C} = \frac{mc(T_f - T_0)}{q_C} \quad (12)$$

onde,  $\Delta t$  é o tempo necessário para a variação de temperatura, em segundos;  $m$  é a massa, em quilogramas;  $c$  é o calor específico, em joules por quilogramas–graus Celsius; e  $\Delta T$  é a variação de temperatura, em graus Celsius.

Neste trabalho foram propostas duas aplicações para a viabilização do tratamento térmico da têmpera, que serão feitas na ponta de uma chave e num prego, descritas a seguir.

## IV. PROJETO DAS APLICAÇÕES

### A. Aplicação 1: Têmpera para Ponta de Chaves

Para pontas chaves de fendas o tratamento térmico da têmpera é feito somente na ponta onde ocorre o contato físico na utilização, deixando-a mais dura e resistente ao desgaste.

Todas as características da chave utilizadas no projeto são mostradas da Tabela II.

TABELA II  
ESPECIFICAÇÕES DA CHAVE

Símbolo	Especificação	Valor	Unidade
–	Material	Aço 5160	–
–	Forma	Cilíndrico	–
m	Massa	6,7	g
c	Calor Específico	0,49	J/g°C
$\rho_{20}$	Resistividade	160,0(20 °C) <sup>1</sup>	$\eta\Omega m$
$\mu_r$	Permeabilidade Magnética Relativa	100,0(20 °C) <sup>2</sup>	Hm
–	Comprimento	15,3	cm
–	Comprimento para Aquecimento	3,03	cm
–	Diâmetro	6,0	mm
S	Área para Aquecimento	5,71	$\mu cm^2$
T <sub>0</sub>	Temperatura Ambiente	20,0	°C
T <sub>F</sub>	Temperatura Final	843,0	°C

<sup>1</sup>Valor obtido em [3].<sup>2</sup>Valor obtido em [5].

### 1) Indutância da Bobina de Indução

Na Tabela III estão os valores obtidos do projeto da bobina de indução.

TABELA III  
ESPECIFICAÇÕES DA BOBINA DE INDUÇÃO CILÍNDRICA

Símbolo	Especificação	Valor	Unidade
–	Material	Cobre	–
–	Forma	Cilíndrica	–
–	Número de Espiras	34,0	–
–	Diâmetro do Fio	3,35	mm
–	Diâmetro Interno	1,27	cm
–	Diâmetro Externo	1,57	cm
–	Passo entre Espiras	0,5	mm
–	Comprimento	14,0	cm
L <sub>4</sub>	Indutância	1,45	$\mu H$

### 2) Profundidade de Penetração

Foi escolhido o valor  $d = 200 \mu m$  para a profundidade de penetração na ponta da chave.

### 3) Frequência de Oscilação

Inserindo os valores de  $\rho_{843}$ ,  $\epsilon\mu_r$ , da Tabela II, e d em (3), obtém-se o valor da frequência de oscilação do sistema.

$$f_{osc} = 47,4 \text{ kHz}$$

### 4) Capacitância do Banco de Capacitores

Inserindo os valores de L<sub>4</sub>, da Tabela III, e f<sub>osc</sub> em (4), o valor do banco de capacitores.

$$C_3 = 7,8 \mu F$$

### 5) Potência Necessária para o Aquecimento

Inserindo os valores de  $\epsilon_r$  e S, da Tabela II, em (6), a potência perdida por radiação é:

$$P_{perdida}^{rad} = 25,1 \text{ W}$$

Inserido os valores de  $\alpha_c$  e S, da Tabela II, em (7), a potência perdida por convecção é:

$$P_{perdida}^{conv} = 6,5 \text{ W}$$

Por meio de (5), a potência total necessária é:

$$P_{total} = 31,6 \text{ W}$$

### 6) Tensão Mínima de Entrada

Por meio de (9), a potência reativa no capacitor deve ser igual a P<sub>total</sub>, assim:

$$q_C = 31,6 \text{ W}$$

Inserindo os valores de q<sub>C</sub>, f<sub>osc</sub> e C<sub>3</sub> em (10), a tensão de pico no banco de capacitores é:

$$V_{P_C} = 5,2 \text{ V}$$

Por meio de (11), tem-se que V<sub>in</sub> = 5,2 V, garantindo V<sub>GS</sub> > 4,0 V, porém fica próximo do valor mínimo de condução.

### 7) Tempo de Aquecimento

Inserindo os valores de m, c, T<sub>F</sub> e T<sub>0</sub>, da Tabela II, e q<sub>C</sub> em (12), o tempo de aquecimento será:

$$\Delta t = 85,6 \text{ s}$$

Então, com V<sub>in</sub> = 5,2 V, é obtida uma potência transferida para a chave de 31,6 W sendo preciso mantê-la dentro da bobina de indução durante 85,6 s para que seja atingida a temperatura da têmpera.

Porém, como V<sub>in</sub> = 12,0 V é preciso recalculer o valor da potência transferida e o tempo de aquecimento. Assim os novos valores da potência transferida para a chave e do tempo de aquecimento serão:

$$q_C = 166,6 \text{ W}$$

e

$$\Delta t = 16,2 \text{ s}$$

Para o projeto deste artigo, com V<sub>in</sub> = 12,0 V, é obtida uma potência transferida para a chave de 166,6 W sendo preciso mantê-la dentro da bobina de indução por 16,2 s para que seja atingida a temperatura da têmpera.

### B. Aplicação 2: Têmpera de Prego

Para os pregos o tratamento térmico da têmpera é feito em todo o prego, deixando-os mais duro e resistente ao desgaste.

Todas as características do prego utilizadas no projeto são mostradas da Tabela IV.

TABELA IV  
ESPECIFICAÇÕES DO PREGO

Símbolo	Especificação	Valor	Unidade
–	Material	Aço 5160	–
–	Forma	Retangular	–
m	Massa	4,5	g
c	Calor Específico	0,49	J/g°C
$\rho$	Resistividade	160,0 (20 °C) <sup>1</sup>	$\eta\Omega m$
$\mu_r$	Permeabilidade Relativa a 20 °C	100,0 (20 °C) <sup>2</sup>	Hm
–	Comprimento	5,62	cm
–	Diâmetro	3,4	mm
S	Área para Aquecimento	6,09	$\mu cm^2$
T <sub>0</sub>	Temperatura Ambiente	20,0	°C
T <sub>F</sub>	Temperatura Final	843,0	°C

<sup>1</sup>Valor obtido em [3].<sup>2</sup>Valor obtido em [5].

### 1) Indutância da Bobina de Indução

Para o prego, foi utilizada a mesma bobina de indução construída na aplicação 1, com seus valores descritos na

Tabela III.

### 2) Profundidade de Penetração

Foi escolhido o valor de  $d = 170 \mu\text{m}$  para a profundidade de penetração no prego.

### 3) Frequência de Oscilação

Inserindo os valores de  $\rho_{843}$ ,  $\mu_r$ , da Tabela IV, e  $d$  em (3), obtém-se o valor da frequência de oscilação do sistema.

$$f_{osc} = 65,7 \text{ kHz}$$

### 4) Capacitância do Banco de Capacitores

Inserindo os valores de  $L_4$ , da Tabela III, e  $f_{osc}$  em (4), tem-se o valor do banco de capacitores.

$$C_3 = 4,1 \mu\text{F}$$

### 5) Potência Necessária Para o Aquecimento

Inserido os valores de  $\epsilon_r$  e  $S$ , da Tabela IV, em (6), a potência perdida por radiação é

$$P_{perdida}^{rad} = 26,8 \text{ W}$$

Inserido o valor de  $\alpha_c$  e  $S$ , da Tabela IV, em (7), a potência perdida por convecção é

$$P_{perdida}^{conv} = 6,9 \text{ W}$$

Potência total necessária, por (5):

$$P_{total} = 33,7 \text{ W}$$

### 6) Tensão Mínima de Entrada

Por meio de (9), a potência reativa no capacitor deve ser igual a  $P_{total}$ , assim:

$$q_C = 33,7 \text{ W}$$

Inserindo os valores de  $q_C$ ,  $f_{osc}$  e  $C_3$  em (10), a tensão de pico no banco de capacitores é:

$$V_{pC} = 6,3 \text{ V}$$

Por meio de (11), tem-se que  $V_{in} = 6,3 \text{ V}$ , garantindo  $V_{GS} > 4,0 \text{ V}$ .

### 7) Tempo de Aquecimento

Inserindo os valores de  $m$ ,  $c$ ,  $T_f$ ,  $T_0$ , da Tabela IV, e  $q_C$  em (12), o tempo de aquecimento será:

$$\Delta t = 53,9 \text{ s}$$

como  $V_{in} = 12,0 \text{ V}$  é preciso recalculer o valor da potência transferida e o tempo de aquecimento. Assim o novo valor da potência transferida para a chave e o tempo de aquecimento serão:

$$q_C = 121,2 \text{ W}$$

e

$$\Delta t = 15,0 \text{ s}$$

Para o projeto deste artigo, com uma tensão de entrada  $V_{in} = 12,0 \text{ V}$ , é obtido uma potência transferida para o prego de  $121,2 \text{ W}$  sendo preciso mantê-la dentro da bobina de indução por  $15,0 \text{ s}$  para que seja atingida a temperatura da têmpera.

cada ( $V_{in}$ ), um resistor de  $1 \Omega$  ( $R_1$ ) em paralelo com um indutor de  $3 \mu\text{H}$  ( $L_1$ ), um capacitor de  $0,1 \mu\text{F}$  ( $C_1$ ), um capacitor de  $1000 \mu\text{F}$  ( $C_2$ ), dois indutores de  $60 \mu\text{H}$  ( $L_2$  e  $L_3$ ), dois transistores IRFZ44N ( $Q_1$  e  $Q_2$ ), dois diodos ultra fast UF4007 ( $D_1$  e  $D_2$ ), dois diodos zener IN4742 ( $D_3$  e  $D_4$ ), dois resistores de  $220 \Omega$  ( $R_2$  e  $R_3$ ), dois resistores de  $10 \text{ k}\Omega$  ( $R_4$  e  $R_5$ ), uma bobina de indução ( $L_4$ ) e um banco de capacitores com vinte espaços ( $C_3$ ).

O dimensionamento para  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $R_4$  e  $R_5$  foge a proposta inicial deste trabalho. Note somente que com os valores mencionados é atendido muitas aplicações para baixas potências.

### 1) Aplicação 1

O circuito completo montado na placa pode ser visto na Fig. 4.

Para o banco de capacitores foi utilizado 6 capacitores de  $0,10 \mu\text{F}$ , 2 capacitores de  $0,22 \mu\text{F}$ , 10 capacitores de  $0,47 \mu\text{F}$  e 2 capacitores de  $1 \mu\text{F}$ , totalizando  $7,74 \mu\text{F}$ .

Com o circuito ligado, a frequência de oscilação medida foi  $45,9 \text{ kHz}$ .

A curva de aquecimento da ponta da chave no tempo é vista na Fig. 5.

Podendo ser visto na Fig. 5 que o tempo de aquecimento até  $843 \text{ }^\circ\text{C}$  foi de  $22,46 \text{ s}$ ;  $38,6 \%$  acima do valor teórico. Essa diferença no tempo de aquecimento é devido a suposição feita de que toda a potência entregue pela fonte seria transferida para o aquecimento da peça de trabalho.

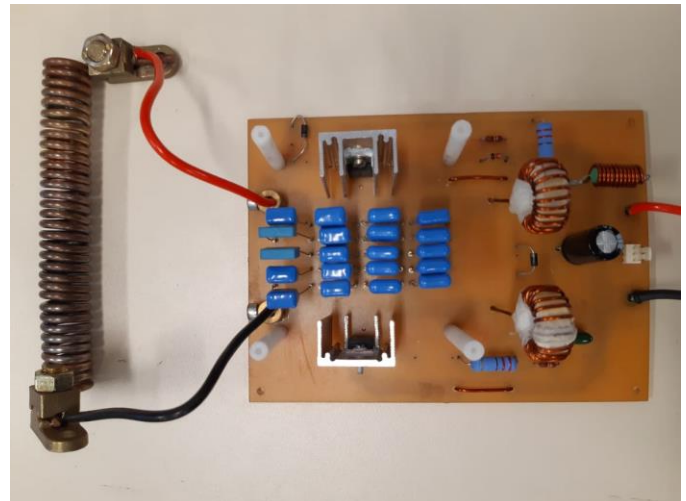


Fig. 4. Circuito oscilador completo montado na placa. Os transistores estão com dissipadores parafusados. As quatro hastes brancas de plásticos são os espaços para colocar o cooler. Os fios vermelho e preto da direita são os fios de alimentação que saem da fonte. Fonte: Autoria Própria.

## V. RESULTADOS

Seguem os itens utilizados no circuito: fonte CC12V / 50A



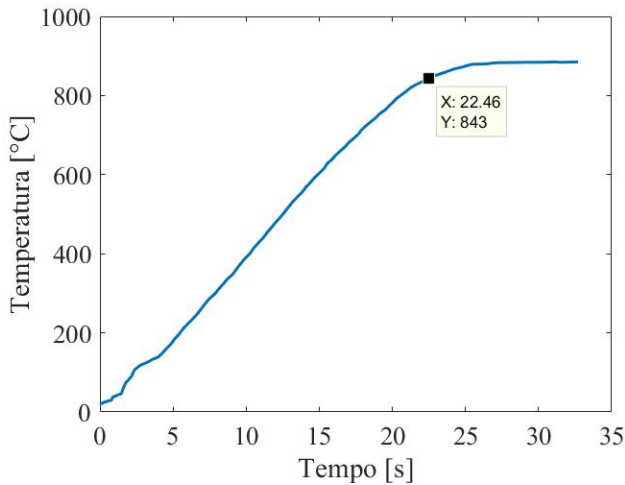


Fig. 5. Temperatura de aquecimento em função do tempo. Curva obtida por meio do aquecimento da ponta de uma chave por indução magnética. Fonte: Autoria Própria.

No entanto, somente parte da potência entregue pela fonte é realmente utilizada no aquecimento, devido a eficiência do circuito. A eficiência do circuito é avaliada como:

$$n = \frac{P_u}{P_F} \quad (13)$$

onde,  $n$  é a eficiência do circuito, adimensional;  $P_u$  é a potência efetivamente entregue à peça, em watts;  $P_F$  é a potência entregue pela fonte, em watts.

A potência entregue pela fonte foi calculada como:

$$P_F = V_{in} I_{in} \quad (14)$$

onde,  $V_{in}$  é a tensão da fonte, em volts; e  $I_{in}$  a corrente consumida pelo circuito, em amperes.

A tensão da fonte,  $V_{in}$ , é de 12,0 V, a corrente consumida pelo circuito,  $I_{in}$ , foi de 15,7 A e a potência efetivamente entregue a peça,  $P_u$ , foi de 166,6 W.

Inserindo o valor de  $V_{in}$  e  $I_{in}$  em (14), é obtido o valor da potência entregue pela fonte.

$$P_F = 188,4 \text{ W}$$

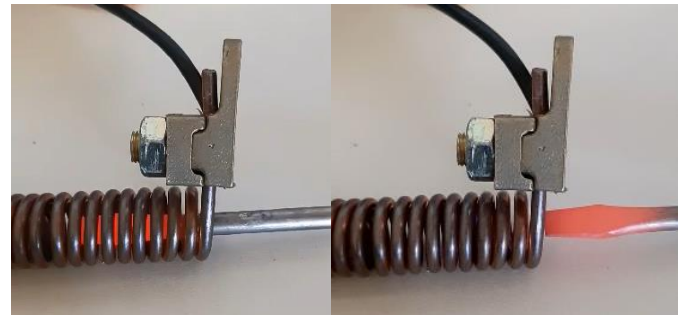
Inserindo  $P_F$  e  $q_C$  em (13), a eficiência do circuito é:

$$n = 0,88$$

Esse valor representa que 88,0 % da capacidade total de potência entregue ao circuito é utilizado para o aquecimento da chave.

Em outros estudos científicos para tratamento térmico de ligas metálicas utilizando aquecimento indutivo por meio de circuitos similares ao utilizado neste trabalho, as eficiências obtidas variaram entre 74% – 92% [9], [10].

A ponta da chave aquecida pode ser vista na Fig.6.



(a)(b)

Fig. 6. Ponta da chave aquecida. Em (a) pode ser visto o comprimento para aquecimento a 843 °C; Em (b) tem-se uma visão melhor da ponta da chave aquecida fora da bobina a 843 °C. Fonte: Autoria Própria.

Para a medição da temperatura, utilizou-se do termopar tipo K acoplado a um multímetro, porém existe correlação visual entre cor e temperatura da superfície aquecida e a temperatura. Para os aços-carbono a relação é: vermelho escuro representa uma temperatura entre 560 – 680 °C; vermelho cereja, 700 – 780 °C; cereja claro, 800 – 880 °C; laranja avermelhado, 900 – 980 °C; laranja amarelado, 980 – 1100 °C; amarelo claro, 1100 – 1250 °C; branco, 1280 °C [3]. Algo próximo a relação de cor e temperatura descrita em [3] é vista na Fig. 7.

Cor	°C
Branco	1200
Amarelo claro	1100
Amarelo	1050
Laranja claro	980
Laranja	930
Vermelho claro	870
Cereja claro	810
Cereja	760
Cereja escuro	700
Sangue claro	650
Sangue escuro	600

Fig.7. Relação de cores para aquecimento de ligas aço-carbono [6].

Da relação visual de cores da Fig. 7, pode-se dizer que a coloração da ponta da chave mostrada na Fig. 6 (a)–(b) está acima de cereja claro e abaixo de vermelho claro, entre os 810 – 870 °C. Em acordo com os resultados obtidos na medição.

## 2) Aplicação 2

Para o banco de capacitores foi utilizado 7 capacitores de 0,10  $\mu\text{F}$ , 11 capacitores de 0,22  $\mu\text{F}$  e 2 capacitores de 0,47  $\mu\text{F}$ , totalizando 4,06  $\mu\text{F}$ .

Com o circuito ligado, a frequência de oscilação medida foi 63,3 kHz.

A curva de aquecimento da ponta da chave no tempo é vista na Fig. 8.

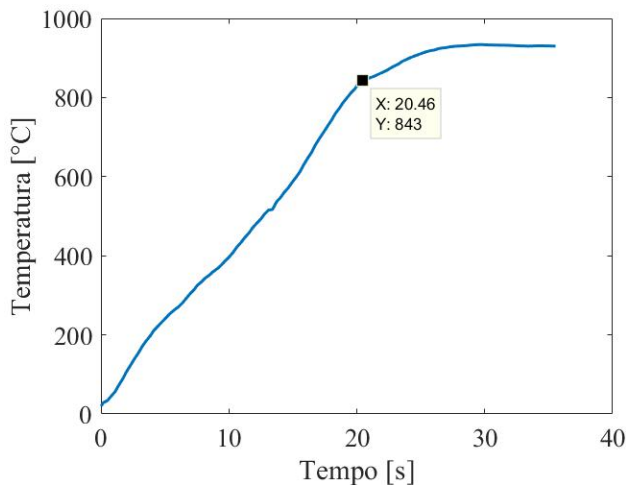


Fig. 8. Temperatura de aquecimento em função do tempo. Curva obtida por meio do aquecimento do prego por indução magnética. Fonte: Autoria Própria.

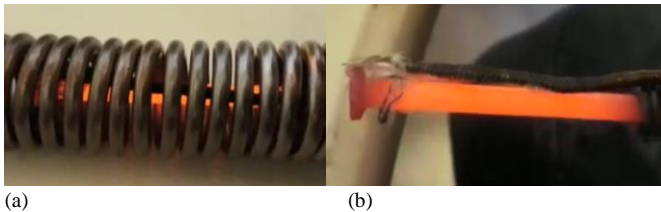


Fig. 9. Pregos aquecidos. Em (a) pode ser visto o aquecimento completo do prego a 843 °C; Em (b) tem-se uma visão melhor do prego aquecido fora da bobina a 843 °C. Fonte: Autoria Própria.

Pode ser visto na Fig. 8 que o tempo de aquecimento até 843 °C foi de 20,46 s; 36,4 % acima do valor teórico. Essa diferença do tempo de aquecimento se deu pelo mesmo motivo explicado anteriormente na aplicação 1.

A corrente consumida pelo circuito,  $I_{in}$ , foi de 15,3 A e a potência efetivamente entregue a peça,  $P_u$ , foi de 121,2 W.

Inserindo o valor de  $V_{in}$  e  $I_{in}$  em (14), é obtido o valor da potência entregue pela fonte.

$$P_F = 183,6 \text{ W}$$

Inserindo  $P_F$  e  $q_C$  em (13), a eficiência do circuito é:

$$n = 0,66$$

Esse valor representa que 66,0 % da capacidade total de potência entregue ao circuito é utilizado para o aquecimento do prego.

A eficiência obtida na aplicação 2 foi inferior à aplicação 1 e das pesquisadas nas literaturas [9], [10]. É interessante, neste caso, inserir um controle de temperatura com o objetivo de aumentar sua eficiência.

O prego aquecido é mostrado na Fig. 9.

Da relação visual de cores da Fig. 7, pode-se dizer que a coloração do prego mostrada na Fig. 9 (a)–(b) está acima de cereja claro e abaixo de vermelho claro, entre os 810 – 870 °C. Em acordo com os resultados obtidos na medição.

## VI. CONCLUSÃO

O circuito oscilador para aquecimento indutivo de topologia apresentada nesse trabalho mostra, de forma simples e de baixo custo, a viabilidade em exercer tratamentos térmicos em peças de pequeno porte com aplicações em cutelaria artesanal e produção industrial em pequena escala onde a utilização de grandes fornos para o aquecimento não é eficiente.

A capacidade do circuito em relação à variação de sua frequência de oscilação e temperatura final de aquecimento, através da mudança no banco de capacitores e da tensão de entrada, respectivamente, o tornam extremamente versátil fazendo que com pequenos ajustes seja possível realizar diferentes tratamentos térmicos para uma mesma aplicação.

Como extensão para este projeto, propõe-se a utilização de um sistema de controle automático a fim de obter curvas de aquecimento bem controladas assim como uma maior exatidão na temperatura final de aquecimento.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a UFSCar que nos proporcionou todos os equipamentos e espaço necessários para a realização do projeto e a equipe de técnicos do laboratório NuLEEn que estiveram ajudando desde o início.

Agradecimento especial aos meus colegas João Albolea, Guilherme Bueno, Leonardo Bueno e Rafael Borges Ferreira, que tiveram grande importância para a finalização desse trabalho, e a minha família que amo muito.

## REFERÊNCIA

- [1] Zinn, S.; Smiatin, L. *Elements of Induction Heating*. ASM International, 1988, pág. 9–198.
- [2] Lupi, S.; Forzan, M.; Aliferov, Aleksandr. *Induction and Direct Resistance Heating, Theory and Numerical Modeling*. Springer, 2015, pág. 336–339.
- [3] Rudnev, V.; Loveless, D.; Cook, R.; Black, M. *Handbook of Induction Heating*. INDUCTIONHEAT, Inc. Madison Heights, Michigan, U.S.A., 2002, pág. 19–186.
- [4] Chiaverini, V. *Aços e Ferros Fundidos*. ABM, 1988, pág. 32–227.
- [5] Engineering ToolBox, (2016). Permeability. Acessado em: Jun. 03, 2019, [Online] Disponível: [https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d\\_1923.html](https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d_1923.html).
- [6] *Mundos dos Aços Especiais*, Módulo 2 “Tratamento Térmico” GERDAU S.A., Porto Alegre, RS. Acesso em: Jun. 03, 2019, [Online] Disponível: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod\\_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf).
- [7] Teixeira, G.; Canale, L.; Mendonça, R. “INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE AUSTÊMPERA E TÊMPERA COM REVENIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURA DOS AÇOS SAE 5160 E SAE 9254.” IFSP, Dez., 2016. Apresentado no 7º CONICT.
- [8] *Aços para Construção Mecânica*, “Aços para Construção Mecânica Gerdau – 5160,” GERDAU S.A., Porto Alegre, RS. Acesso em: Jun. 03, 2019, [Online] Disponível: <https://www.passeidireto.com/arquivo/6317153/acos-para-construcao-mecanica>.
- [9] Egalon, J.; Caux, S.; Maussion, P.; Pateau, O. “Temperature and energy efficiency optimization in multi-phase induction heating systems,” *IEEE, Set.*, 2013, 10.1109/EPE.2013.6634625.
- [10] Choi, S.; Lee, C.; Kim, I.; Jung, J.; Seo, D. “New Induction Heating Power Supply for Forging Applications Using IGBT Current-Source



- PWM Rectifier and Inverter,” *IEEE, Out.*, 2018, 10.23919/ICEMS.2018.8549080.
- [11] Khazaal, M.; Abdulbaqi, I.; Thejel, R. “Modeling, design and analysis of an induction heating coil for brazing process using FEM,” *IEEE, Mai.*, 2016, 10.1109/AIC-MITCSA.2016.7759918.
- [12] Sabeeh, H.; Abdulbaqi, I.; Mahdi, S. “A 3D FEA Approach to Design an Induction Coil for Case Hardening of a Carbon Steel Gear,” *IEEE, Dez.*, 2018, 10.1109/SCEE.2018.8684208.
- [13] Iqbal, M.; Masud, N.; Aqil, M. “Design of induction coil of a coreless induction furnace to melt aluminum,” *IEEE, Dez.*, 2014, 10.1109/INMIC.2014.7097396.