



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



GUILHERME SCHNEIDER LORO

SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA POR INDUÇÃO
ELETROMAGNÉTICA

Canoas, Dezembro de 2008



GUILHERME SCHNEIDER LORO

**SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA POR INDUÇÃO
ELETROMAGNÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica da ULBRA como um
dos requisitos obrigatórios para a obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista

Departamento:

Engenharia Elétrica

Área de Concentração

Área de Concentração

Professor Orientador:

[MSc.] Eng. Eletr. Luis Fernando Espinosa Cocian – CREA-RS: RS.088866-D

Local Canoas – Rio Grande do Sul - Brasil

2008



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome do Autor: Guilherme Schneider Loro

Matrícula: 052004902-0

Título: Sistema De Aquecimento De Água Por Indução Eletromagnética

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador:

MSc. Eng. Eletr. Luis Fernando Espinosa Cocian

CREA-RS: RS.088866-D

Banca Avaliadora:

Dr. Eng. Eletr. João Carlos Vernetti dos Santos

CREA-RS: RS.045852-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Dr. Eng. Eletr. Marilia Amaral da Silveira

CREA-RS: RS.050909-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Assinaturas:

Autor
Guilherme Schneider Loro

Orientador
Luis Fernando Espinosa Cocian

Avaliador
João Carlos Vernetti dos Santos
Relatório Aprovado em:

Avaliador
Marilia Amaral da Silveira



DEDICATÓRIA

Dedico a minha mãe Regina Portella Schneider...



AGRADECIMENTOS

A minha mãe pelo apoio humano e pela sustentação financeira a este trabalho.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao Professor Luis Fernando Espinosa Cocian pela atenção e esforços dedicados como orientador. Agradeço-lhe, também, pela realização das simulações para este trabalho.

Ao Professor Carlos Leonardo Mombach, da Engenharia Elétrica da Unisinos, pela idéia de se usar uma máquina de solda.

Ao Professor Miguel Afonso Flach, da Engenharia Mecânica desta universidade, pelo estímulo e apoio para o teste prático.

Ao colega Luiz Kermit e ao funcionário Basílio Oliveira, ambos desta universidade, pelo apoio para o teste prático.



EPÍGRAFE

Em verdade, em verdade vos digo que aquele que crê em mim fará também as obras que eu faço e outras maiores fará, porque eu vou para junto do Pai.

Jesus Cristo



RESUMO

SCHNEIDER-LORO, Guilherme. Sistema De Aquecimento de Água por Indução Eletromagnética. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2009.

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um sistema de aquecimento de água por indução eletromagnética. Embora ele tenha sido baseado na idéia de projetar um chuveiro elétrico a indução, sua teoria serve como base para outras aplicações como o fogão a indução, o forno a indução, o tratamento térmico de metais ou qualquer outra aplicação em que se use aquecimento por indução eletromagnética. Seu objetivo é projetar um sistema seguro sob o ponto de vista elétrico. Não necessita de trocas de resistências elétricas, uma vez que não as usa. Isto diminui a necessidade de manutenção. O dispositivo em desenvolvimento possui um núcleo metálico, aqui denominado de induzido. Foram estudados diferentes metais como induzido, visando comparações de performance. Para prever o comportamento do sistema do chuveiro, foi realizada uma programação de células com o programa Microsoft Excel. Para se estabelecer comparações entre os metais que foram adquiridos para o projeto, foram criados, através do Matlab, gráficos de: potência do indutor em função de sua corrente, em função do seu número de espiras e um gráfico deste número de espiras em função desta corrente. Para a obtenção dos resultados práticos foi usada uma máquina de solda, um termopar tipo K ligado a um multímetro para a leitura da temperatura, um multímetro alicate para a medição da corrente na entrada da bobina e um voltímetro para medir a tensão de entrada. A amostra que apresentou o melhor rendimento foi o aço-carbono 1020, no formato de tubo metálico.

Palavras chave: Indução. Sistema de Aquecimento de Água. Correntes de Foucault. Eddy Currents. Faraday.



ABSTRACT

SCHNEIDER LORO, Guilherme. Eletromagnetic Induction Water Heating System. 79 p. Work of Conclusion of Course in Electrical Engineering - Electrical Engineering Department. Lutheran University of Brazil. Canoas, RS. 2009.

This work is about the development of a system of heating of water for eletromagnetic induction. Though it has been a hemp in the idea of projecting an electric shower to induction, his theory serves like base for other applications like the stove the induction, the oven to induction, the thermal treatment from metal or any another application in which heating is in use for eletromagnetic induction. His objective is to project a safe system from the electric point of view. It does not need exchanges of electric resistances, as soon as it does not use them. This reduces the necessity of maintenance. The device in development has a metal nucleus, here called of induced. Different metals were studied when it was how induced, aiming at comparisons of performance. To predict the behaviour of the system of the shower, Microsoft software package Excel was carried out a planning of cells with the program. In order that comparisons were established between the metal that were acquired for the project, printers were raised, through the Matlab, of: power of the inductor in function of his current, in function of his number of spires and a printer of this number of spires in function of this current. For getting the practical results there was used a machine of solder, a termopar type K tied of a multimeter for the reading of the temperature, a multimeter pliers for the measurement of the current in the entry of the reel and a voltmeter to measure the tension of entry. The sample that presented the best profit was the steel-carbon 1020, in the format of metal tube. **Keywords:** Induction. Water Heating System. Foucault currents. Eddy currents. Faraday.



LISTA DE TABELAS

Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.
Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS



ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

SAE: Society of Automotive Engineers

AISI: American Iron and Steel Institute

P. A.: progressão aritmética

FEM: Força eletromotriz

S. I.: Sistema Internacional de Unidades

FMM: Força magnetomotriz

LISTA DE SÍMBOLOS



α - Coeficiente de temperatura de resistividade K^{-1} a $20^\circ C$

σ - Condutividade elétrica de um material $[\frac{1}{\Omega \cdot m}]$

ϕ - Fluxo magnético [Wb]

FEM- Força eletromotriz total [V]

μ - Permeabilidade magnética absoluta $[\frac{H}{m}]$

δ - Profundidade de penetração no induzido [m]

\mathfrak{R} - Relutância magnética [A.e / Wb]

ρ - Resistividade elétrica de um material em uma temperatura específica [$\Omega \cdot m$]

ϕ' - Diâmetro do fio esmaltado da bobina

ρ_0 - Resistividade elétrica de um material na temperatura de $20^\circ C$ [$\Omega \cdot m$]

\mathfrak{R}_{ar} - Relutância do ar [A.e / Wb]

ψ_m - Fluxo total [Wb]

\mathfrak{R}_n - Relutância do núcleo magnético [A.e / Wb]

μ_r - Permeabilidade relativa

Δt - Variação de temperatura da água [$^\circ C$]

A – Área da secção transversal do caminho das linhas de fluxo magnético [m^2]

a – O maior raio de uma elipse

B – Densidade de fluxo [T ou Wb/ m^2]

b – O menor raio de uma elipse

B_0 – Valor máximo da densidade de fluxo [T ou Wb/ m^2]

c - Calor específico de uma substância [cal/g $^\circ C$]

$\cos(\varphi)$ - Fator de potência

D - Diâmetro do induzido [m]

D_i - Diâmetro do indutor [m]

ds – Elemento de superfície [m^2]

E – Energia da onda eletromagnética [J]

e – Espessura da bobina [m]



- f - Freqüência da rede elétrica [Hz]
- h - Altura do indutor. Também é a altura do cilindro [m]
- H - Campo magnético [A / m]
- h - Constante de Planck [J s]
- h_c - Diâmetro da espira
- I - Corrente no indutor [A]
- L - Comprimento do cilindro do induzido [m]
- l - Comprimento médio do caminho magnético das linhas de fluxo magnético [m]
- m - Massa da água [g]
- N - Número de espiras do indutor
- n - Número de termos de uma progressão aritmética
- P - Perímetro da secção transversal do induzido [m]
- P - Potência ativa [W]
- Q - Quantidade de calor recebida pela água [cal]
- R - Raio do cilindro do induzido
- r - Razão da progressão aritmética
- r' - Raio do fio esmaltado da bobina
- R_i - O menor raio da bobina
- S - Área da secção transversal do induzido [m²]
- S_n - Somatório dos termos de uma progressão aritmética
- T - Temperatura qualquer [° C ou ° K]
- t - Tempo [s]
- T_0 - Temperatura de referência. Valor: 20 ° C
- V - Tensão [V]
- ω_{sc} - Freqüência angular de atalho [rad/s]
- X - Reatância [Ω]



SUMÁRIO



| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1. Visão Geral do Problema..... | 15 |
| 1.2. Definição do Escopo do Projeto | 16 |
| 1.3. Universo das Soluções..... | 16 |
| 1.4. Justificativa Técnica e Econômica para a Solução Escolhida | 17 |
| 1.5. Especificações Técnicas da Solução Escolhida | 17 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 19 |
| 2.1 Conceitos Básicos e Estudos Preliminares | 19 |
| 2.2 Estado da arte..... | 35 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 41 |
| 3.1 Descrição do Sistema..... | 41 |
| 3.4 Descrição dos Sistemas Informáticos e Computacionais | 47 |
| 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 53 |
| 4.4 Modelos..... | 60 |
| 4.5 Simulações | 60 |
| 4.6 Instrumentos Utilizados nos Testes Práticos | 70 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 71 |
| 5.1 Problemas Encontrados | 71 |
| 5.2 Avaliação dos Objetivos Propostos..... | 71 |
| 5.3 Avaliação do Cronograma Previsto e Executado | 71 |
| 5.4 Conclusões | 71 |
| 5.5 Sugestões para Trabalhos Futuros | 72 |
| 6 REFERÊNCIAS | 73 |
| OBRAS CONSULTADAS | 74 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Visão Geral do Problema

O uso dos chuveiros elétricos tradicionais traz riscos de choque elétrico para o usuário, caso seu aterramento esteja rompido. Os aterramentos comumente realizados, ligando eletricamente o fio terra do chuveiro elétrico ao seu fio neutro,



traz o perigo de choque elétrico ao ser humano e de queima do chuveiro, caso uma descarga atmosférica atinja a rede elétrica. [7]

Outra questão é a troca de resistências elétricas, que é uma necessidade nos chuveiros elétricos tradicionais.

Com este trabalho se busca a criação de um aparelho que não tenha estas desvantagens.

1.2. Definição do Escopo do Projeto

1.2.1 Objetivos Gerais

Elaborar uma metodologia de análise e projeto para um sistema de aquecimento de água por indução eletromagnética.

1.2.2 Objetivos Específicos

Elaborar um sistema de aquecimento de água.

Elaborar um metodologia de testes para sistemas de aquecimento indutivo.

1.2.3 Metas

Concluir o projeto em todos os seus detalhes, disponibilizando-o.

1.2.4 Resultados Previstos

A criação de um sistema de aquecimento de água seguro e econômico.

1.3 Universo das Soluções

Para o controle de potência do sistema, uma alternativa é o controle por PWM.

Se o sistema estiver em funcionamento com a ausência de água, haverá um aquecimento cada vez maior no induzido. Para evitar esta situação, é necessária a presença de um sistema de segurança, que abrirá, então, o circuito. Isto pode ser conseguido, por exemplo, com um sensor de temperatura em contato com o induzido. Também pode ser usado qualquer outro dispositivo sensível a temperatura e que sirva para abrir o circuito de alimentação: os relés foto-elétricos com bimetal têm seu acionamento controlado pelo efeito Joule, o qual provoca uma dilatação geométrica desigual dos metais que estão em contato entre si. Esta



dilatação desigual se deve ao fato de serem metais diferentes que estão em contato. Como cada metal tem seu próprio coeficiente de dilatação linear, uma vez estando presos entre si, seu aquecimento simultâneo provocará um envergamento da estrutura. Este envergamento é útil para o acionamento e desacionamento de circuitos. Há, então, um encurvamento das chapas metálicas e conseqüente abertura ou fechamento do circuito.

1.4 Justificativa Técnica e Econômica para a Solução Escolhida

1.4.1 Benchmark

No que se refere a não haver a troca de resistências, há soluções que também têm esta característica.

Há uma solução proposta por Antonio Marcelino dos Santos, cuja patente é a de número MU7502547-7, sob o título “SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA”, que também se baseia no princípio da indução eletromagnética para o aquecimento de água. A diferença é que esta solução usa um circuito magnético formado por um transformador que se apresenta em curto-circuito no secundário. O núcleo é de pó de ferro para que as correntes parasitas caiam ao mínimo. Afirma o inventor que este sistema gera o aquecimento necessário, equivalente ao aquecimento de um chuveiro elétrico tradicional, com apenas 5A em 110 V alternada, ou seja, 550 VA. Este secundário é atravessado, em seu interior, por um cano de alumínio por onde a água passa e recebe calor. O cano de alumínio é o secundário do transformador. O tipo de transformador descrito é de potencial, em curto-circuito.

Há um outro sistema inventado para aquecimento de água, onde a própria faz o papel de condutor do circuito. Não utiliza resistências elétricas. A autoria é de Adel Barreto, cuja patente é a de número PI0211681-2, sob o título de “CHUVEIRO E AQUECEDOR ELÉTRICO SEM RESISTOR”. O autor afirma que consegue uma economia de energia da ordem de 23%.

1.5 Especificações Técnicas da Solução Escolhida

Tabela 1 - Especificações Técnicas do Sistema

| |
|------------------------------|
| INFORMAÇÕES ELÉTRICAS |
|------------------------------|



| | |
|--|-------|
| f | 60 |
| N | 114 |
| Geometria do Sistema ⁽¹⁾ | |
| D _i | 5,40 |
| D | 4,45 |
| h | 10,23 |
| espessura da bobina ⁽²⁾ | 2,5 |
| espessura do poliacetal ⁽³⁾ | 2 |
| espaço de ar ⁽⁴⁾ | 2,75 |

(1) Os valores de D_i, D e h aqui estão exibidos em cm, mas nas fórmulas da ref. [1] as unidades são em metros. (2) Em cm. (3) Em mm. (4) Entre indutor e induzido [mm].

1.5.1 Orçamento do Projeto

Tabela 2 - Gastos do Projeto

| GASTOS COM | VALOR (R\$) |
|---|----------------|
| cilindros metálicos maciços de alumínio | 15,00 |
| barra de onde se extraíram os cilindros metálicos maciços de aço inoxidável austenítico | 60,00 |
| barra de onde se extraíram os cilindros metálicos maciços de latão | 87,00 |
| cilindros metálicos maciços de aço comum SAE1020 | ⁽²⁾ |
| usinagem dos cilindros de alumínio ⁽¹⁾ | 20,00 |
| usinagem dos cilindros de aço inoxidável ⁽¹⁾ | 30,00 |
| usinagem dos cilindros de latão e de aço comum SAE1020 ⁽¹⁾ | 50,00 |
| obtenção e usinagem do poliacetal ⁽¹⁾ | 60,00 |
| honorários da Elétrica Florida para a montagem da bobina indutora | 265,00 |
| galvanização eletrolítica dos cilindros maciços de SAE 1020 ^{(1) (3)} | 10,00 |
| tornar oco um dos cilindros de SAE 1020 ⁽¹⁾ | 10,00 |
| total de gastos | 607,00 |

(1) Honorários do torneiro mecânico (2) Foi cobrado juntamente com o valor da usinagem dos cilindros de latão. (3) A galvanização foi realizada em conjunto com outras peças, daí o motivo do valor baixo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos Básicos e Estudos Preliminares

2.1.1 Termologia

O primeiro passo foi determinar quanta energia tem que ser transferida para a água para que ela se aqueça. Adotou-se como referência a informação constante no rótulo do chuveiro elétrico da marca Lorenzetti, modelo Maxi Ducha, 127 V, 5.500 W: a variação de temperatura prevista para a água é de 25,6 ° C, na situação de maior consumo. Os cálculos que foram executados foram baseados nesta variação térmica, uma vez que, se o usuário necessitar de menos calor, bastará acionar o controle de potência.

Estudos de Termologia foram realizados em busca de uma forma de se converter variação de temperatura em watts equivalentes a ela.

Usando a equação térmica da quantidade de calor de um material:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \Rightarrow Q = m \cdot c \cdot (t_f - t_i) \quad (1)$$

O calor específico da água é $c = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$

Uma vez que 1Kg de água é igual a 1 dm³, e sabendo a vazão da água no chuveiro de referência, que é de 3 litros / min, de acordo com o rótulo, chegou-se a:

$$3 \text{ litros de água} = 3 \text{ Kg de água} = 3.000 \text{ gramas de água} \Rightarrow$$

$$m = 3.000$$

$$\Delta t = 25,6^\circ\text{C} \Rightarrow Q = 76.800 \text{ cal em 1 minuto}$$



Preferiu-se trabalhar com a quantidade de calor que tem que ser transferida por segundo. O motivo de se trabalhar nesta unidade de tempo é esclarecido na seqüência abaixo.

Para um segundo de transferência de calor, a quantidade de calor é:

$$Q = \frac{76800}{60} = 1280 \frac{\text{cal}}{\text{s}}$$

O equivalente mecânico da caloria é:

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ joules}$$

O trabalho em joules será, então, para um segundo:

$$1280 \cdot 4,18 = 5.350,4 \frac{\text{joules}}{\text{segundo}}$$

Como:

$$\text{Potência} = \frac{\text{trabalho}}{\text{segundo}} \text{ e } 1 \text{ watt} = \frac{1 \text{ joule}}{\text{segundo}} \Rightarrow$$

Chega-se a potência $P = 5.350,4 \text{ W}$ para o sistema.

Arbitrando-se o rendimento da transferência de energia do indutor para o induzido de 95 % e rendimento de 100 % do induzido para a água, chega-se a:

$$\frac{5350}{0,95} = 5631,5789 \text{ W}$$

Os 5 % de perda se dão na bobina do indutor.

Do induzido para a água a transmissão de calor se dá por todas as formas existentes: condução, convecção e irradiação. [8]

O valor acima calculado é, então, a potência total que o sistema consumirá.

Adotou-se a tensão elétrica alternada de 220 V como sendo a tensão no indutor.

O induzido fica dentro do indutor, localizado concentricamente no eixo central do mesmo. É um cilindro de metal.



2.1.2 Campo Magnético gerado por correntes elétricas estacionárias

O desenvolvimento a seguir em 2.1.2.1, de 2.1.3 até 2.1.5, 2.1.6.2, 2.1.7 e 2.1.9 é baseado em [4].

A carga elétrica estática produz um campo elétrico. Já uma corrente elétrica produz um campo magnético.

2.1.2.1 Campo Magnético de um Elemento Conduzindo Corrente; Lei Biot-Savart

Em uma pequena agulha magnética perfeita e arbitrariamente montada, será usado o torque de alinhamento para medir o campo B produzido por um elemento de comprimento incremental Δl , conduzindo corrente. Através de medições, chegou-se a: [4]

$$\Delta B = k \frac{I \Delta l \sin \theta}{r^2} \quad (2)$$

onde k é uma constante dada por:

$$K = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \quad (3)$$

onde μ é a permeabilidade do meio. Através de análise dimensional se concluiu que μ tem a dimensão de fluxo de corrente, dividida pelo comprimento. Como a indutância tem a dimensão de fluxo de corrente, então a permeabilidade tem a dimensão de indutância dividida pelo comprimento. Pelo S.I., [H/m].

No vácuo:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

Colocando a equação 2 na 1, tem-se que: [4]

$$dB = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \theta}{r^2} \quad (4)$$

2.1.3 Campo Magnético de um Anel Conduzindo Corrente

Para descrever a equação acima, imagina-se um anel no plano xy concêntrico com a origem. O eixo z coincide com o eixo do anel, o qual tem um raio R e uma corrente I . No ponto P , no eixo do anel, dB é a influência causada por um elemento de comprimento infinitesimal dl do anel. O ângulo θ é entre dl e o raio vetor de comprimento r . A direção de dB é perpendicular ao raio vetor de comprimento r . Forma, então, um ângulo ξ com o eixo z .

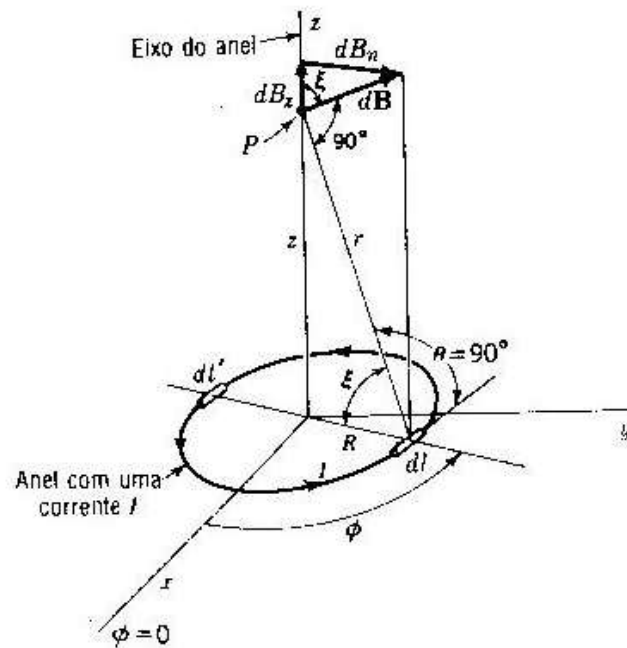


Figura 1 – Campo magnético de um anel conduzindo corrente (extraído de [4])

Componente de dB_z na direção do eixo z : [4]

$$dB_z = dB \cdot \cos \xi = dB \frac{R}{r} \quad (5)$$

De acordo com a figura 5-9 (livro colocar depois), $\theta=90^\circ$, $dl=Rd\phi$ e

$$r = \sqrt{R^2 + z^2}$$

Introduzindo estes valores na equação (4) e substituindo este valor de dB na equação (5), resulta em:



$$dB_z = \frac{\mu \cdot I \cdot R^2}{4 \cdot \pi \cdot R^2 + z^2} d\phi \quad (6)$$

A densidade de fluxo total B_z na direção z é a integral da equação acima ao longo de todo o anel. O componente $d\mathbf{l}$ produz uma componente dB_n perpendicular ao eixo do anel. Integrando esta componente para todos os elementos ao longo do anel, obtém-se um resultado nulo. Então B_z é igual a densidade de fluxo total B no ponto P , dada por: [4]

$$B = B_z = \frac{\mu \cdot I \cdot R^2}{4 \cdot \pi \cdot R^2 + z^2} \int_0^{2\pi} d\phi = \frac{\mu \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot R^2 + z^2} \quad (7)$$

2.1.4 O Solenóide

Uma bobina espiral, ou solenóide, é comumente usada para gerar campo magnético. A densidade de fluxo em tal bobina será vista adiante.

Supondo uma bobina com N espiras de fio fino conduzindo uma corrente I . Seu comprimento é L e o raio R . O espaçamento entre as espiras é pequeno comparado com o raio R da bobina. Supondo um fio de bobina de largura l/N a corrente na bobina gera uma lâmina de corrente com densidade [$A \cdot m^{-1}$]

$$K = \frac{N \cdot I}{l}$$

Considerando uma seção de bobina de comprimento dx vista como uma espira de uma só volta, fica:

$$K \cdot dx = \frac{N \cdot I}{l} dx \quad (8)$$

A densidade de fluxo total B no centro do solenóide, devida a esta espira de comprimento dx , a uma distância x do centro, fica



$$dB_z = \frac{\mu \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot l \cdot \sqrt{R^2 + x^2}} dx \quad (9)$$

A densidade de fluxo total B no centro desta bobina é então igual a esta expressão integrada sobre o comprimento da bobina. Assim

$$dB_z = \frac{\mu \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot l} \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{dx}{\sqrt{R^2 + x^2}} \quad (10)$$

Integrando resulta em

$$dB_z = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{\sqrt{4R^2 + l^2}} \quad (11)$$

Se o comprimento é muito maior do que o raio ($l \gg R$)

$$dB_z = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l} \quad (12)$$

2.1.5 Lei de Faraday

Em 1820 Oersted [13] descobriu que a corrente elétrica possui campo magnético. A partir deste trabalho, Faraday fez a sua descoberta, que é o efeito inverso.

Sua lei trata do fenômeno em que um campo magnético produz uma corrente em um circuito fechado. A condição para isto é a de que o fluxo magnético esteja variando.

Esta corrente é o resultado da FEM que surge durante o processo, no local que está sob a ação do campo.

Diz esta lei que a força eletromotriz total induzida FEM em um circuito fechado é igual a taxa de diminuição em relação ao tempo do fluxo magnético total ψ_m que enlaça o circuito. Ou seja,



$$FEM = -\frac{d\psi_m}{dt} \quad (13)$$

O sinal negativo indica que os sentidos da FEM e da corrente são positivos com relação ao sentido do campo quando este, e por conseguinte o fluxo, está diminuindo com o tempo.

O fluxo total ψ_m no circuito é igual a componente normal da densidade de fluxo B sobre a superfície limitada pelo circuito. É dado por

$$\psi_m = \iint B \cdot ds \quad (14)$$

Colocando a equação (14) em (13)

$$FEM = -\frac{d}{dt} \int_s B \cdot ds \quad (15)$$

Sendo a espira ou circuito fechado estacionário ou fixo, a equação acima fica

$$FEM = -\int_s \frac{dB}{dt} \cdot ds \quad (16)$$

Maxwell estudou a lei que Faraday havia descoberto e a teorizou, surgindo a equação acima. É a equação de Maxwell para o caso em que ocorre variação de B apenas, o que é o caso do assunto tratado.

2.1.6 Correntes de Foucault e Histerese Magnética

O aquecimento no induzido se dá por duas razões: através do efeito Joule e / ou como resultado da histerese magnética. Assim os dois fenômenos podem contribuir concomitantemente ou pode estar presente somente um deles, isto vai depender do tipo de material que forma o induzido.

2.1.6.1 Correntes de Foucault



O aquecimento por efeito Joule ocorre em consequência do aparecimento das correntes de Foucault, também conhecidas pelo nome de correntes parasitas, eddy currents ou, simplesmente, correntes induzidas. O surgimento destas correntes se explica pela Lei da Indução de Faraday.

Com a variação do fluxo magnético no indutor surge uma reação no induzido que procura anular seus efeitos sobre ele (Lei da Ação e Reação de Newton). Esta reação pode ser aproveitada para outras finalidades como certos tipos de freio (freios magnéticos), por exemplo.

Para uma densidade de fluxo magnético que oscila de forma senoidal, a fórmula que determina seu valor é

$$B = B_0 \cdot \sin \omega t \quad (17)$$

A potência dissipada em calor por correntes induzidas, para o caso específico em que sua geometria é cilíndrica, é, segundo [5]:

$$P = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot L}{16 \cdot \rho} \cdot B_0^2 \cdot \omega^2 \quad (18)$$

Desta fórmula se deduz que, para correntes de Foucault:

1) O calor gerado é diretamente proporcional a: a quarta potência do raio do cilindro, ao comprimento do cilindro, ao quadrado do campo magnético de pico e ao quadrado da frequência da energia elétrica.

2) O calor gerado é inversamente proporcional a resistividade do material que compõe o induzido.

Como a reação do induzido é de procurar anular o campo magnético do indutor, as correntes de Foucault terão um sentido tal que gere um campo magnético com sentido oposto ao do indutor (Lei de Lenz). E a situação se inverte cada vez que o sentido do fluxo magnético se inverte. A frequência da rede é 60 Hz, ou seja, 60 ciclos por segundo. Em cada ciclo a senóide descreve uma curva que é até a metade do ciclo positiva e na outra metade negativa. Portanto a polaridade da tensão muda 120 vezes por segundo. E, assim, o fluxo magnético inverte de sentido 120 vezes por segundo. Por causa disto as correntes de Foucault invertem seu sentido também nesta taxa. Estas correntes são circulares e, através do efeito skin,

também conhecido como efeito pelicular, elas serão tanto mais intensas quanto mais próximas estiverem da superfície do cilindro. Este efeito pode ser comprovado pela fórmula acima, da potência dissipada por Foucault. Por causa do efeito skin, não haverá circulação de corrente no centro do cilindro maciço.

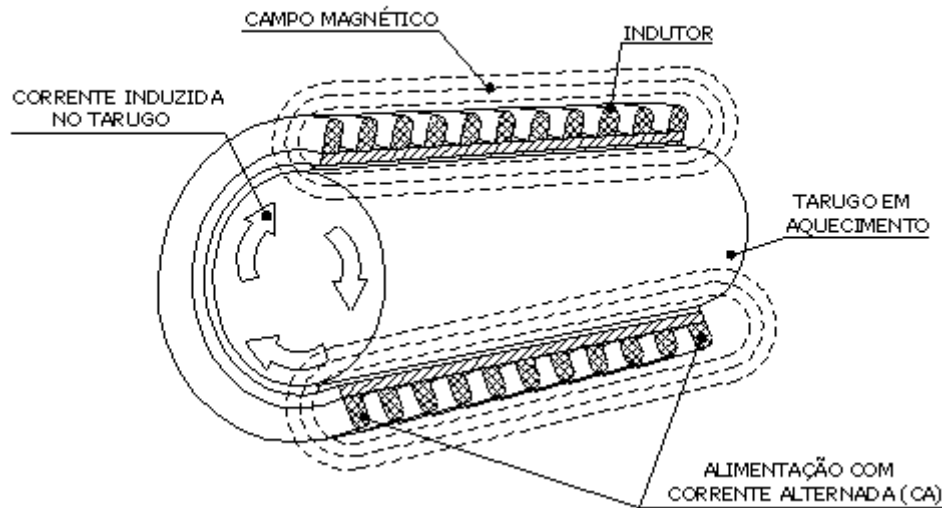


Figura 2 – Demonstração das correntes induzidas em um tarugo (extraído de [14])

2.1.6.2 Histerese Magnética

A palavra histerese vem do grego e significa atraso. Somente materiais magnéticos a possuem. Este atraso, em um material que está sob a ação de um fluxo magnético variável, forma um ciclo.

Este ciclo se forma da seguinte maneira:

- se o campo aplicado H a um espécime for aumentado até a saturação e em seguida for diminuído, a densidade de fluxo B diminui, mas não tão rapidamente quanto aumentou ao longo da curva de magnetização inicial. Assim, quando H chega a zero, há uma densidade de fluxo residual, ou remanência B_r .

- Aplicando-se um campo $-H$, B_r vai diminuindo até zerar. Se este campo $-H$ continuar a aumentar, o espécime fica magnetizado com polaridade oposta, sendo esta magnetização fácil no início e difícil depois, ao se aproximar da saturação negativa.



- A redução do campo H novamente a zero, deixa uma densidade de fluxo residual $-B_r$. Para que B diminua de valor e volta a ficar positivo aplica-se um campo magnético H até que o B volta ao valor original de saturação.

O processo de magnetização – desmagnetização força os fragmentos do cristal do material e aparece em forma de calor. Cada vez que muda o sentido do fluxo magnético, os domínios magnéticos do material passam a inverter de sentido de acordo com o sentido deste fluxo. Quanto mais a intensidade do fluxo aumenta, maior quantidade de domínios invertem sua orientação. Esta inversão é um movimento de rotação dos domínios que ocorre mediante atritos entre eles. Como atrito gera calor, daí é que surge o calor gerado na histerese.

A energia dissipada em calor na histerese magnética é proporcional a área do gráfico do ciclo de histerese de saturação, também conhecido como ciclo principal.

Há metais que apresentam uma maior área deste gráfico. São os materiais chamados de ferromagnéticos duros. Recebem este nome porque são dificilmente magnetizados, ou seja, seus domínios se atritam mais do que nos chamados materiais magnéticos macios, ao se movimentarem. Um material assim apresenta uma maior intensidade da histerese magnética e isto se percebe, fisicamente, quando ele, após ter sido envolvido por um campo magnético variável e já fora de sua influência, ainda apresenta propriedades magnéticas. É o caso do aço comum, que passa a atrair pequenos pedaços de prego.

Os materiais que apresentam uma pequena área deste ciclo são chamados de ferromagnéticos macios, como é o caso do ferro, que é um exemplo de material que possui pouca histerese magnética. Após sofrer a ação de um campo magnético, ele não se torna um ímã.

2.1.7 Permeabilidade Magnética

A permeabilidade magnética pode ser definida como a condutividade magnética de um material. Define o quanto ele facilita a passagem do fluxo magnético sobre si.

Do ciclo de histerese de saturação extrai-se o valor da permeabilidade magnética AC de um material. De seu gráfico [4], traça-se uma reta que sai da origem e intercepta o ponto onde, no 1º quadrante, a curva entra em saturação.

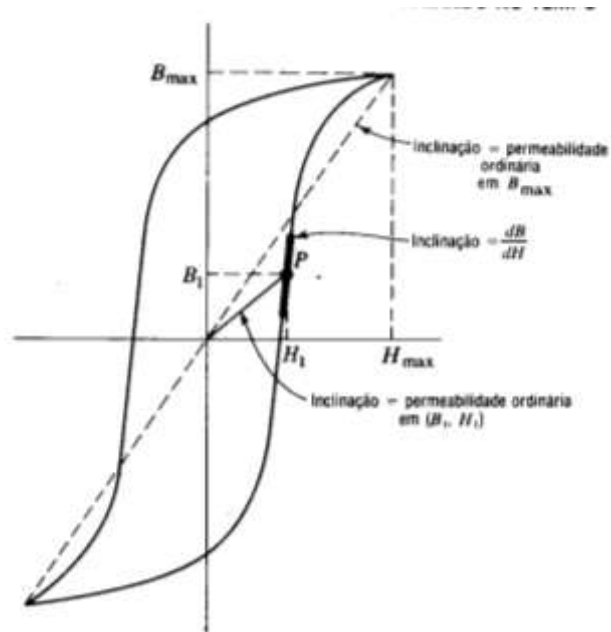


Figura 3 – Ciclo de histerese de saturação. Extração da permeabilidade AC de um material (extraído de [4])

Seu valor será

$$\mu = \frac{B_{\max}}{H_{\max}} \quad (19)$$

O valor da permeabilidade magnética em AC de um material sempre é menor que a permeabilidade em DC. Para as finalidades do aquecimento indutivo trabalha-se com seu valor em AC.

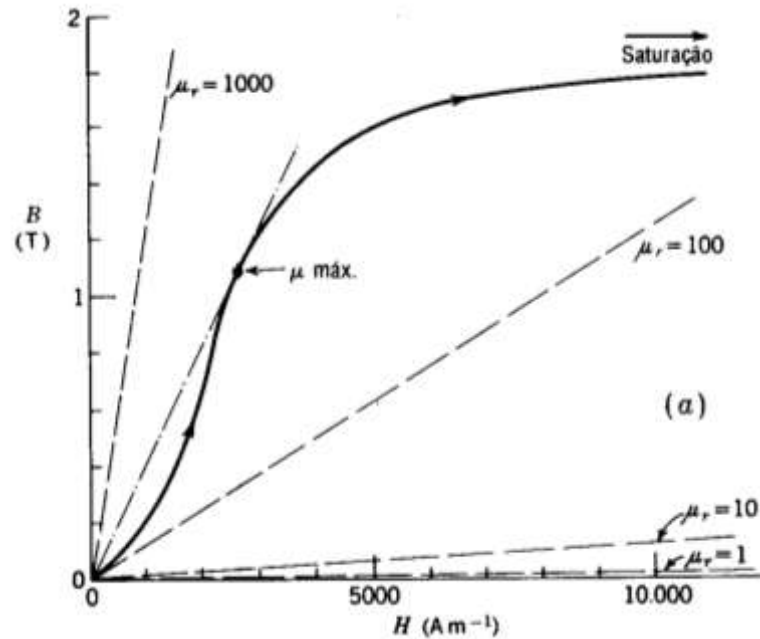


Figura 4 – Curva de magnetização inicial. Extração da permeabilidade DC de um material (extraído de [4])

Seu valor em um material magnético apresenta variações, em função da intensidade do campo magnético aplicado sobre ele e, também, da variação de temperatura. Porém, neste trabalho, foram usados valores de tabela, os quais representam os valores médios da permeabilidade relativa. Para materiais não magnéticos seu valor se mantém sempre constante.

Muitas vezes se usa o valor da permeabilidade relativa ao invés do seu valor absoluto. Sua fórmula é

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (20)$$

2.1.8 Tipos de Materiais

Os materiais sob o ponto de vista magnético, se dividem em:

-Paramagnéticos: são a maioria deles. Reagem fracamente a presença de um campo magnético. São, então, levemente atraídos pelos ímãs. Exemplos: alumínio, latão, aço inoxidável austenítico.



-Diamagnéticos: reagem contrariamente a presença de um campo magnético. Esta reação é de intensidade fraca. Desta maneira são levemente repelidos pelos ímãs. Exemplos: água, cobre, chumbo, prata e bismuto.

-Ferromagnéticos: reagem a presença do campo magnético com mais intensidade que os paramagnéticos sendo, desta maneira, mais fortemente atraídos pelos ímãs. Alguns exemplos: ferro, aço comum, aço inoxidável ferrítico, neodímio, alsife, mumetal, alnico, permalloy e supermalloy.

-Não-magnéticos: não interage com o campo magnético. Exemplo único existente: o vácuo.

Para as finalidades de aquecimento indutivo os materiais paramagnéticos e diamagnéticos são conhecidos como não-magnéticos [8].

2.1.9 Profundidade de Penetração δ

Uma onda eletromagnética sofre rápida atenuação em um meio condutor [4].

Da equação

$$E_y = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot e^{-j\left(\frac{x}{\delta}\right)} \quad (21)$$

A uma distância $x = \delta$ a amplitude do campo é

$$| E_y | = E_0 \cdot e^{-1} = E_0 \cdot \frac{1}{e} \quad (22)$$

Então a onda E_y diminui seu valor para $1/e$ ou 36,8 % do seu valor inicial, quando penetra a uma profundidade δ .

Onde δ é

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{f\pi\mu\sigma}} \quad (23)$$



Pela fórmula acima se conclui que quanto maior a frequência de operação do sistema, menor será a profundidade de penetração. A uma profundidade de penetração de $4,6 \cdot \delta$ se obtém 1% do valor inicial do campo magnético.

Para as finalidades da indução eletromagnética procura-se trabalhar com frequências elétricas altas. Quanto maior a frequência da onda eletromagnética mais energia ela consegue transferir ao sistema. Uma frequência maior significa que há mais ciclos ocorrendo por segundo.

A variação da tensão é o que causa a variação do fluxo magnético. Quanto mais ciclos a tensão possui por segundo, mais correntes induzidas e ciclos de histerese surgirão por segundo. Cada ciclo gera duas formações de correntes induzidas ao longo do tempo e separadas no tempo, uma em um sentido da corrente induzida, em um dos semi-ciclos, e outra no sentido inverso, no outro semi-ciclo. Um ciclo completo de histerese se forma a cada 1 e $\frac{1}{4}$ de ciclo de tensão elétrica. E assim aumentará o calor total gerado, o qual será o resultado do somatório dos calores individuais liberados cada vez que se formam as correntes induzidas e um ciclo de histerese.

Uma maneira de descrever teoricamente a energia liberada por uma onda eletromagnética é pela equação da teoria quântica para a energia:

$$E = h \cdot f \quad (24)$$

Por esta equação fica claro que quanto maior a frequência f , maior a energia da onda.

2.1.10 Quantização Teórica do Calor Gerado pela Histerese e pela Corrente Induzida

Na referência [3] desenvolveu-se um método para quantificar as perdas em função do tipo de material e da frequência com a qual se está trabalhando.

É definido o w_{sc} , cujos parâmetros se referem ao induzido



$$w_{sc} = \frac{P^2}{S^2 \mu \sigma} \quad (25)$$

É proposto um método para encontrar-se o ψ_0 . ψ_0 é o ângulo de defasagem entre B e H. Quanto mais magneticamente macio o material, menor é este ângulo. Nos materiais não-magnéticos este ângulo tem seu valor igual a zero.

Pelo método descrito o ψ_0 pode ser obtido através do gráfico de histerese de saturação do material. Traça-se uma elipse neste gráfico, cujos extremos do maior raio coincidem com o B_{\max} e o H_{\max} do gráfico. A área desta elipse tem que ter o mesmo valor da área do ciclo de histerese. A área do ciclo é

$$A = \pi \cdot B_{\max} \cdot H_{\max} \cdot \sin \psi_0 \quad (26)$$

A área de uma elipse é, pela geometria

$$A = \pi \cdot a \cdot b \quad (27)$$

O ponto onde esta elipse intercepta o eixo horizontal, no 1º quadrante, é o H'_c . Assim ψ_0 , em graus, será [3]

$$\psi_0 = \arcsin \frac{H'_c}{H_{\max}} \quad (28)$$

Através de uma análise em baixa frequência seguida de uma em alta, chegou-se a um modelo completo, cujas equações são [3]

$$P_h \approx \frac{w \sin \psi_0 B_{avg}^2}{2\mu} \cdot \sqrt{1 + \frac{w}{(1 + \sin \psi_0) 2w_{sc}}} \quad (29)$$

$$P_{ec} \approx \frac{w^2 B_{avg}^2}{4\mu \cdot w_{sc}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(1 + \sin \psi_0)w}{2w_{sc}}}} \quad (30)$$

$$H_0 = \frac{N \cdot I}{L} \approx \frac{B_{avg}}{\mu e^{-j\psi_0}} \cdot \sqrt{1 + \frac{jwe^{-j\psi_0}}{w_{sc}}} \quad (31)$$

A referência mostra que:

- se $w \gg w_{sc} \Rightarrow$ o calor gerado por correntes induzidas, P_{ec} , é mais intenso do que o gerado por histerese, P_h . Quanto mais macio o material, menor se torna P_h
- se $w \ll w_{sc} \Rightarrow P_h$ é mais intenso que P_{ec} .

O w_{sc} para o SAE 1020 resultou em 2,045 Hz. Portanto para a frequência w de 60 Hz, $w \gg w_{sc}$ e, portanto, P_{ec} é maior que P_h

Através de 3 contatos realizados com um dos autores deste artigo, o senhor César Rodríguez, foi possível esclarecerem-se algumas questões. As informações obtidas foram:

- as equações do artigo podem ser usadas para materiais paramagnéticos e para os magnéticos macios. Quanto aos magnéticos duros, somente testando-se se poderá saber sobre a validade dos valores.

- outra questão que foi esclarecida é a respeito do valor de P_{ec} e P_h . As fórmulas os fornecem em W / m^3 . Portanto os valores finais de aquecimento em W têm que ser adaptados para o volume do material do induzido.

Resumindo foram encontradas 2 fontes de pesquisa para o cálculo do calor gerado, sendo que uma delas só leva em consideração o aquecimento por Foucault [2] e a outra as duas formas de aquecimento [3].

2.1.11 O Projeto do Sistema

Para se projetar o sistema de aquecimento de água por indução foi realizada uma pesquisa em artigos científicos e livros que tratam sobre sistemas similares, dos quais se extraíram os cálculos.

2.1.12 Variação da Resistividade com a Temperatura

De acordo com [5] a resistividade dos materiais varia na medida em que sua temperatura se altera. Existe uma fórmula que descreve esta variação:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (32)$$

Cada material tem seu próprio α . Para se chegar ao valor da resistividade em uma dada temperatura, primeiro se necessita do valor Δt , que é fornecido pela equação 1.

Depois é só fazer uma média aritmética entre ρ e ρ_0 para se chegar a um valor médio de ρ .

Para o material do induzido, foram testados 4 metais diferentes. O metal que apresentou a melhor performance foi o aço carbono SAE 1020.

2.2 Estado da arte

A técnica de aquecimento por indução eletromagnética já é conhecida da ciência. Há no mercado diferentes aplicações como, por exemplo, os fornos de indução e os fogões de indução.

2.3 O Circuito Equivalente

O sistema em estudo pode ser tratado como um transformador com o secundário contendo uma só espira [9]. Deste circuito deduz-se um circuito equivalente RL. A bobina é um tipo de indutor, portanto seu fator de potência é indutivo. Ela possui também uma resistência ativa gerada pelo material que a compõe, no caso, o cobre. Assim o circuito equivalente fica

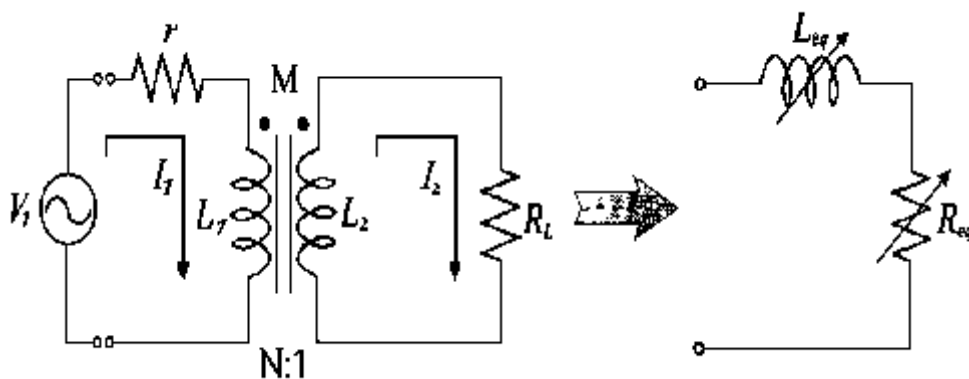


Figura 5 – Circuito equivalente (extraído de [9])

2.4 Ressonância

Através do valor da indutância equivalente do sistema, coloca-se um capacitor em série com o mesmo para que o fator de potência se torne unitário. Com isto melhora-se o rendimento do sistema, pois não haverá mais o consumo de potência reativa da carga.

Este capacitor chama-se capacitor ressonante. Este nome é porque ele fará o circuito RLC assim formado entrar em ressonância. A corrente elétrica aumenta na ressonância, pois como WL será igual a $1/WC$, no denominador sobrar apenas o R .

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{R + j\left(WL - \frac{1}{WC}\right)} \quad (33)$$

De acordo com [9] valores de I fora da ressonância não servirão só para o aquecimento indutivo, por isto devem ser evitados.

Um dos motivos de não se usar o alumínio como induzido é que ele apresenta uma maior sensibilidade [9] ao se chegar a ressonância do circuito, ou seja, produzirá um valor de corrente elétrica mais alto que o de outros materiais.

2.5 O Magnetismo e o Concentrador de Campo Magnético

É possível fazer-se uma analogia entre as leis da eletricidade e as do magnetismo.

Nesta analogia a corrente elétrica é equivalente ao fluxo magnético ϕ , a tensão elétrica à força magnetomotriz FMM e a resistência elétrica à relutância magnética.

As relutâncias magnéticas se comportam como resistências elétricas para efeitos de cálculo de relutância equivalente de relutâncias em série e em paralelo. As leis de Kirchoff adaptadas ao magnetismo também são válidas.

Algumas das equações que são usadas para a resolução de circuitos magnéticos são [13]:



$$FMM = N \cdot i = H \cdot l = \phi \cdot \mathcal{R}_{total} \quad (34)$$

$$\frac{1}{\mu} \cdot l = A \cdot \mathcal{R} \quad (35)$$

$$\phi = B \cdot A \quad (36)$$

Uma vez que a relutância do ar é alta, deve-se evitar fazer as linhas de fluxo magnético passarem através deste meio. Como mostram as simulações as linhas de fluxo passam através do ar, espalhando-se, na região externa à bobina. Para que isto não ocorra usa-se o concentrador de campo magnético [10]. Ele consiste em um material de alta permeabilidade magnética que circunda a bobina. O concentrador serve como um caminho mais fácil do que o ar para a passagem das linhas de fluxo. Elas passarão por um meio de menor relutância, o que está em concordância com a analogia com a eletricidade que diz que a corrente elétrica prefere os caminhos de menor resistência. Como a permeabilidade pode ser vista como uma “condutância magnética”, quanto maior é seu valor, mais condutor magneticamente é o meio.

Segundo [10] os fatores que determinam a escolha do material para o concentrador de campo magnético são :

“-permeabilidade magnética (quanto mais alta melhor, isto significa, menores perdas);

-nível máximo suportável da densidade do fluxo magnético (nível de saturação);

-perdas sobre excitação magnética;

-usinabilidade;

-facilidade para instalação e remoção;

-capacidade para suportar a temperatura gerada pelo aquecimento da peça e agressão do ambiente (fluido de tempera);

-fatores econômicos (custo do material, custo para fabricação, instalação e sua vida útil)”

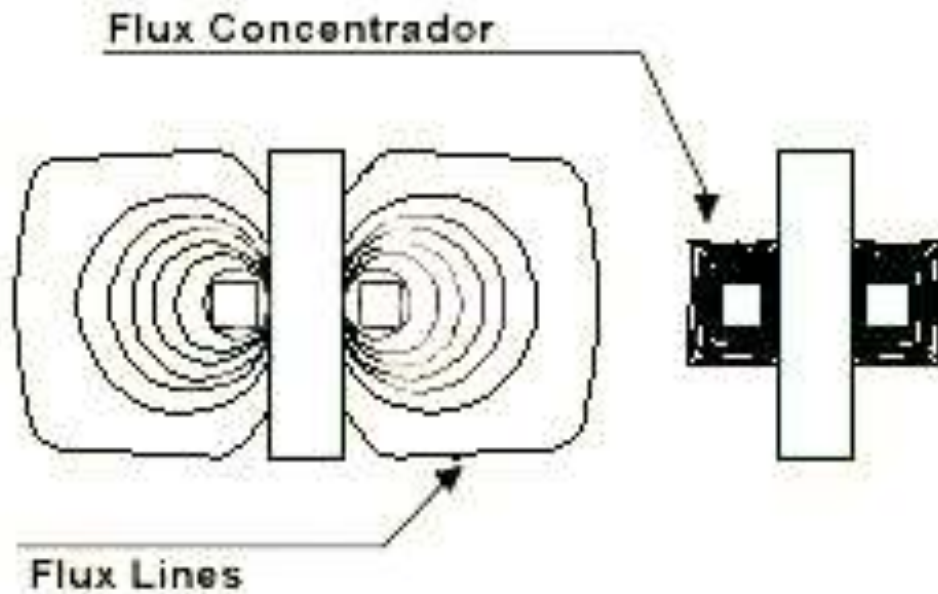


Figura 6 – Demonstração da utilidade do concentrador de campo (extraído de [10])

O circuito magnético equivalente do sistema montado, sem o uso do concentrador é :

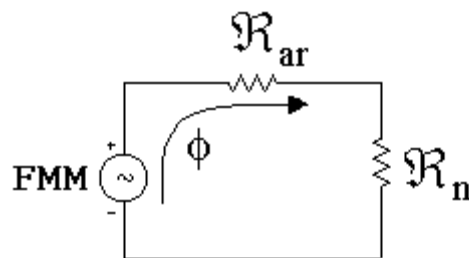


Figura 7 – Circuito magnético equivalente (extraído de [9])

Através da equação 32 chega-se a

$$\phi = \frac{FMM}{\mathfrak{R}_n + \mathfrak{R}_{ar}}$$

Colocando-se o concentrador de campo \mathfrak{R}_{ar} diminui ou desaparece, o que faz com que o ϕ aumente.

O que se chama de \mathfrak{R}_{ar} aqui é o espaço de ar que as linhas de fluxo atravessam por fora do indutor apenas. No lado de dentro, em se tratando do cilindro de SAE 1020, elas passarão todas pelo cilindro. Não haverá linhas no espaço de ar entre o cilindro e o indutor, pois elas preferem o caminho de menor relutância. Nos cilindros não-magnéticos elas passarão também por este espaço de



ar porque a permeabilidade deles é igual a do ar e, assim, não haverá caminho preferencial.

2.6 Máxima Transferência de Potência

Para melhorar o aproveitamento da energia do sistema iguala-se a sua impedância de entrada com a de saída. Para isto inserem-se componentes eletrônicos no circuito do sistema, entre o que vem antes da saída e a saída. Assim toda a energia do sistema será empregada apenas para as suas resistências ativas, como acontece em um chuveiro elétrico convencional.

2.7 A Elevação da Frequência Elétrica do Sistema

Para elevar-se a frequência do sistema há diversos meios. Depende de qual frequência se deseja atingir. Quanto maior a frequência, mais calor é gerado. Baseando-se apenas nesta idéia se poderia projetar um sistema com a mais alta frequência que a técnica atual permitisse. O que traz um limite é a questão da exposição humana. De acordo com [12] a frequência elétrica tem que estar abaixo de 1,2 MHz e o campo magnético tem que ser inferior a 15 KA/m.

Mas esta limitação é questionável uma vez que usando-se o concentrador de campo as linhas de fluxo permanecem confinadas em seu interior e, assim, não entram em contato com o usuário. Pode-se, então, elevar a frequência ao máximo possível.

Com as válvulas eletrônicas consegue-se atingir os mais altos valores de frequência, da ordem de 1 MHz para cima. Uma delas é o magnetron, o principal componente dos fornos de microondas. Sua frequência de trabalho é de 2450 MHz. A limitação para seu uso é o preço.

De acordo com [11], dependendo da frequência com a qual se quer trabalhar, há diferentes técnicas a serem usadas, que estão demonstradas na tabela a seguir.



tabela 3 – Diferentes Soluções Técnicas de Acordo com a Frequência a Ser Atingida (a tabela a seguir foi extraída de [11])

| ITÉM | DENOMINAÇÃO | FAIXA DE FREQUÊNCIA |
|------|---|--|
| A | Frequência de rede | 60 Hz |
| B | Multiplicador Magnético de Frequência (transformadores com núcleo saturado) ⁽¹⁾ | Entre 180 Hz e 540 Hz |
| C | Moto gerador (motor assíncrono em 3600 rpm, tendo o Gerador em corrente alternada (CA) montado em seu eixo, com alto número de pólos, para gerar a média frequência necessária MF) ⁽¹⁾ | Entre 960 Hz e 9.600 Hz |
| D | Gerador Tiristorizado | Até 20 kHz, existe a possibilidade de trabalhar com frequências mais altas em aplicações específicas, com baixa potência. |
| E | Gerador Transistorizado | Atualmente existem 02 (duas) possibilidades: IGBT com frequência de funcionamento entre 500 Hz e 150.000 Hz, (150 kHz). MOSFET com frequência de funcionamento entre 160.000 Hz e 500.000 Hz (500 kHz). |
| F | Gerador com válvula Osciladora Termo iônica | - Normalmente possui frequência de funcionamento entre 200.000 Hz (200 kHz) e 500.000 Hz (500 kHz), todavia pode funcionar em média frequência, ou então, em extra - alta frequência, por exemplo, 1.700.000 Hz (1.7 MHz). |

Fonte: empresa Albatherm. 2008.

(1) Atualmente não disponíveis como equipamentos novos.



3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do Sistema

Como material para o induzido foram usados 4 tipos de metais: o alumínio, o aço inoxidável austenítico, o latão e o aço carbono SAE 1020.

Destes materiais, somente o SAE 1020 é ferromagnético. Os demais são não-magnéticos.

Para o material SAE 1020 trabalhou-se com 2 geometrias: uma delas é a geometria dos demais cilindros maciços e a outra é um tubo cilíndrico com dimensões externas idênticas as dos cilindros maciços e com espessura da parede de 5,33 mm Este valor de espessura foi calculado e extraído da tabela x

Para a bobina do indutor, o material usado foi o cobre. Sua espessura é a AWG 5, o que lhe confere uma capacidade de suportar até 48 A. O número de voltas da bobina é 114. Este número foi alcançado com base nas equações em [1]. O suporte da bobina foi usinado com um material chamado poliacetal. O motivo desta escolha é porque ele resiste a temperaturas de até 100 ° C. Uma outra opção, que seria o PVC, não tem esta resistência térmica.

O poliacetal é um plástico de engenharia. Suas vantagens são o baixo custo e a leveza (1,42 g/cm³, fonte: fabricante Vick).

Com a espessura que foi usada para o condutor esmaltado da bobina indutora, não haverá aquecimento em demasia. Assim se fosse usado o PVC seus limites térmicos não seriam atingidos. Mas, por precaução, foi escolhido o poliacetal. Seu limite térmico de trabalho não será atingido em condições normais de funcionamento do sistema.

Foi usado um pedaço de madeira em MDF para servir como base física para a montagem. Sua espessura é de 6 mm. Suas dimensões são 49,2 cm por 27,65 cm

O comprimento do MDF na foto da montagem está maior do que o que o informado acima, que é o comprimento final.

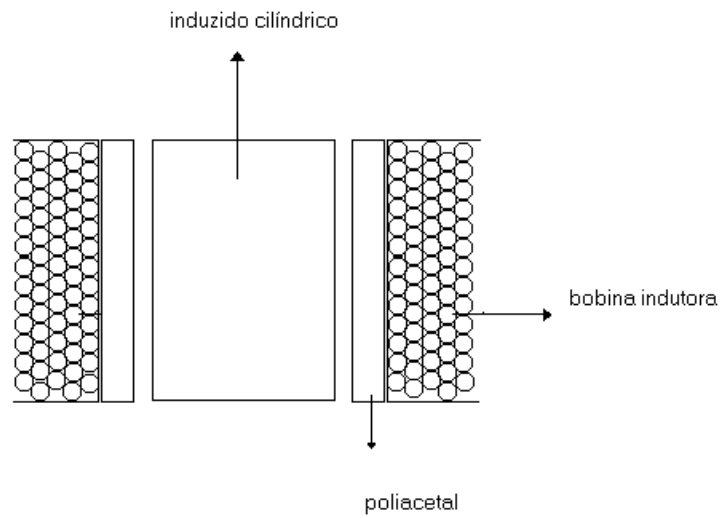


Figura 8 - Visão lateral do sistema

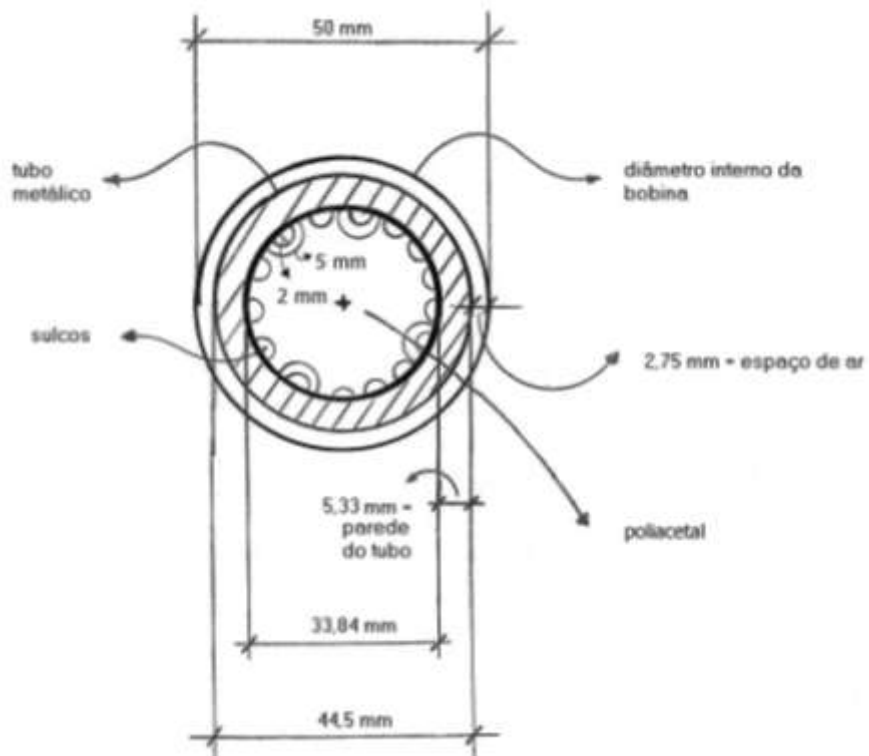


Figura 9 – Visão superior do sistema sem a representação da bobina. Projeto dos sulcos no poliacetal para o caminho da água. Escala reduzida.



Figura 10 – Foto 1 da montagem



Figura 11 – Foto 2 da montagem

As entradas da bobina, que na montagem são formadas pelos próprios fios que a compoem, foram ligadas a um conector sindal. Este foi fixado a uma base feita em madeira MDF. Para a realização da experiência, a este conector, no outro extremo, fixaram-se 2 pedaços de fios elétricos, um para o fase e outro para o neutro, em cujas extremidades, desencapadas, foram presos os 2 fios elétricos de saída da máquina de solda. O modelo de conector sindal que foi usado é o do tipo cerâmico, próprio para 50 A, 600V e capacidade física para até 16 mm² de fio.



Os fios da bobina possuem uma área de secção de 16,77 mm². Apesar desta área ser um tanto acima da área nominal do conector, foi possível usá-lo, o qual era o modelo para a maior secção de fio que a loja onde ele foi comprado possuía.

O motivo de se usar um conector sindal na montagem é para imobilizar os fios de entrada da bobina. Se estes fios ficassem soltos, com o sistema energizado, qualquer movimento seu poderia provocar o surgimento de faíscas elétricas na sala onde estava sendo realizada a experiência, o que traria riscos de choque elétrico para quem estivesse presente.

3.2 Método para Dimensionar o Peso e a Espessura da Bobina

A fim de prever o peso da bobina, foi desenvolvida uma rotina matemática que se aplica para qualquer bobina. Os passos para o seu desenvolvimento seguem abaixo. Parte-se do princípio que se sabe o número e a espessura das espiras.

Os valores da massa específica (densidade absoluta) de um material são tabelados e sua fórmula é:

$$d = \frac{m}{V} \quad (37)$$

Através do conhecimento deste valor do material do fio, aplica-se uma regra de três simples levando em conta seu volume e, assim, se chega a sua massa final. O cálculo deste volume será visto a seguir.

Os fios condutores são, na verdade, cilindros. Seu volume é obtido multiplicando a área de sua secção transversal (informada nas tabelas AWG) pelo seu comprimento.

Foi desenvolvida uma progressão aritmética (P. A.) que determina o comprimento total do condutor da bobina. Supondo que na montagem de cada camada da bobina se faça o aproveitamento dos espaços adjacentes que sobraram da camada logo abaixo, descobriu-se que a distância entre cada 2 camadas de espiras sofre um acréscimo constante, que é função do raio do condutor.

Através do desenho de 3 círculos, chegou-se ao valor da distância vertical entre o centro geométrico dos condutores de uma camada e o centro dos condutores da camada de baixo. Concluiu-se que ela é sempre o valor da distância de um raio somado a 69,6 % de raio.

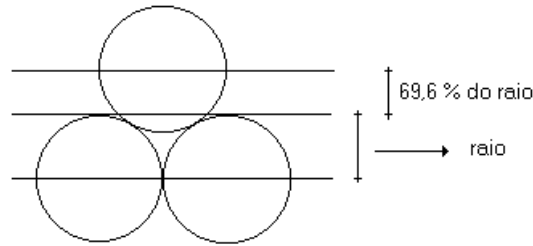


Figura 12 – Distância vertical entre a camada de cima e a de baixo de uma bobina

Usando a fórmula do perímetro de um círculo

$$2p = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (38)$$

O primeiro termo desta P. A., a_1 , vai ser o perímetro do círculo imaginário formado pela primeira camada de espiras multiplicado pelo número de espiras na camada. Este número é constante para cada camada da bobina.

O primeiro termo a_1 será

$$a_1 = 2 \cdot \pi \cdot \left(R_i + r' + \frac{h \cdot 10^3}{\phi'} \right) \quad (39)$$

Como a razão desta P. A. é o resultado de

$$r = a_2 - a_1 \quad (40)$$

precisa-se do segundo termo da P. A. para encontrá-la. Então

$$a_2 = 2\pi \cdot \left(R_i + r' + r' + 69,6\% \cdot r' + \frac{h \cdot 10^3}{\phi'} \right) = 2\pi \cdot \left(R_i + 2,696 \cdot r' + \frac{h \cdot 10^3}{\phi'} \right) \quad (41)$$

Agora aplica-se a equação 40.



O comprimento total do condutor da bobina se obtém através da fórmula da soma de termos de uma P. A., que é

$$S_n = \frac{a_1 + a_n \cdot n}{2} \quad (42)$$

Para usar esta fórmula precisa-se do valor do n , que é o número de camadas que terá a bobina.

$$\text{número de espiras por camada} = \frac{h}{\phi'} \quad (43)$$

Logo, o número de camadas n da bobina é

$$n = \frac{N}{\text{número de espiras por camada}} \quad (44)$$

Com o n em mãos agora é possível calcular o a_n da P. A. O a_n é o comprimento da camada n . Usa-se a fórmula geral de uma P. A., que é

$$a_n = a_1 + (n - 1) \cdot r \quad (45)$$

A espessura da bobina será [cm]:

$$e = (n - 1) \cdot 0,696 \cdot r' + r' \cdot 10^2 \quad (46)$$

O valor do peso da bobina será o resultado da operação de multiplicar o volume do fio elétrico que a compõe por sua respectiva massa específica.

3.3 A Busca do Melhor Material

Durante este trabalho testou-se o sistema com diferentes metais como induzido. Foram adquiridos 4 metais.

O melhor material para as metas deste trabalho é o que produza as maiores perdas por aquecimento.

O melhor material será aquele que tenha a maior área possível do ciclo de histerese (será, então, a princípio, um material magneticamente duro) e que, ao mesmo tempo, seja o melhor condutor elétrico possível. Os materiais com altíssima

permeabilidade possuem uma pequena área de histerese, o que não favorece para as finalidades de aquecimento. Assim deve-se buscar por um valor intermediário de permeabilidade. Este valor deve proporcionar um tamanho grande da área do retângulo que se traça dentro do gráfico do ciclo de histerese para representar o aquecimento gerado neste ciclo.

Não é somente o critério da performance que importa para a escolha de um material. Tem que se levar em consideração, também, o seguinte [4]:

“Critérios para seleção de materiais magnéticos

1. Funções eletromagnéticas principais.
2. Classificação dos materiais segundo as principais propriedades magnéticas.
3. “Efeitos eletromagnéticos colaterais”.
4. Propriedades magnéticas ligadas aos efeitos colaterais.
5. Comportamento mecânico em uso.
6. Comportamento mecânico no processamento final.
7. Alterações das propriedades com o tempo de uso.
8. Custo.
9. Condições de fornecimento.”

Foi projetada uma nova bobina, de alumínio esmaltado. O alumínio é aproximadamente 3 vezes mais leve que o cobre, o que tornará o sistema mais leve. E o custo do material é bem menor. Sua resistividade é um pouco maior, mas a bobina final, apesar desta diferença, resultou em um mesmo número de espiras e corrente no indutor que foram calculadas para o indutor de cobre (usando as equações da ref. [1]). Uma pequena diferença apareceu apenas nas casas decimais.

3.4 Descrição dos Sistemas Informáticos e Computacionais

3.4.1 Software

Foi usado o Microsoft Excel para acelerar os cálculos do projeto da bobina no que tange a corrente e número de espiras.

Foi usado o Matlab para o desenho dos gráficos de performance dos 4 metais estudados. Os gráficos gerados foram de potência P do indutor versus seu número de espiras N , P versus corrente elétrica I no indutor e N versus I . Nestes gráficos se trabalhou com o ferro ao invés do SAE 1020. Este metal tem um rendimento inferior ao do ferro, mas mais parecido com o dele que os demais metais da amostra. Por isto serve como comparação. Também foram obtidos os gráficos de performance térmica destes metais, agora trabalhando com o SAE 1020.

Para as simulações foi usado o programa FEMM 4.2, de autoria de David Meeker. A simulação do aço inoxidável austenítico não foi realizada devido ao fato de o simulador, na versão disponível no momento da realização deste trabalho, não possuir os dados necessários para esta simulação. Foi simulado o ferro como um exemplo a mais, embora este material não tenha sido usado nos testes práticos.

3.4.2 Interfaces Gráficas

Com o Matlab foram obtidas as seguintes figuras:

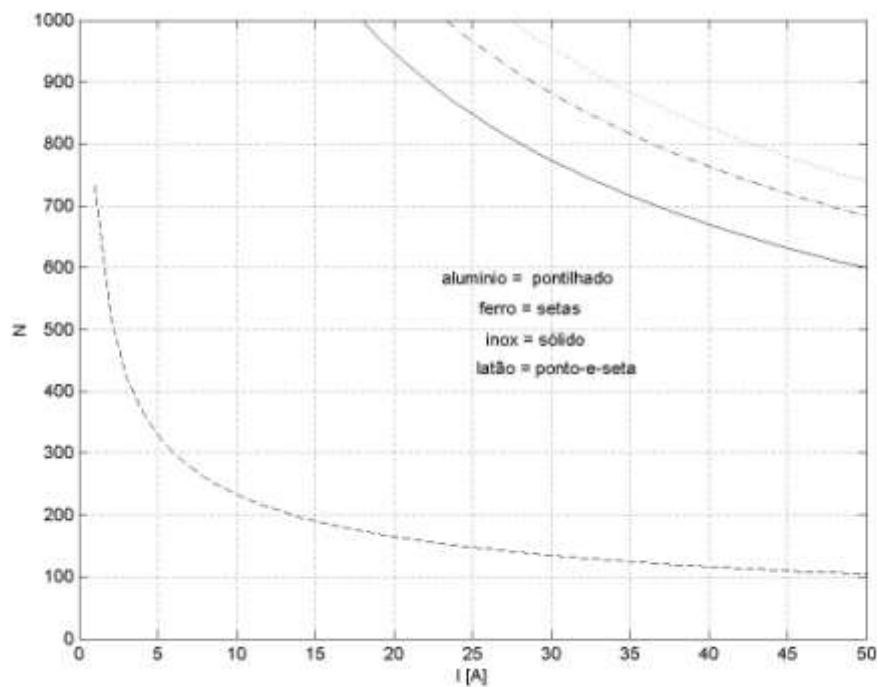


Figura 13 – Relação entre número de espiras N e corrente elétrica I na bobina

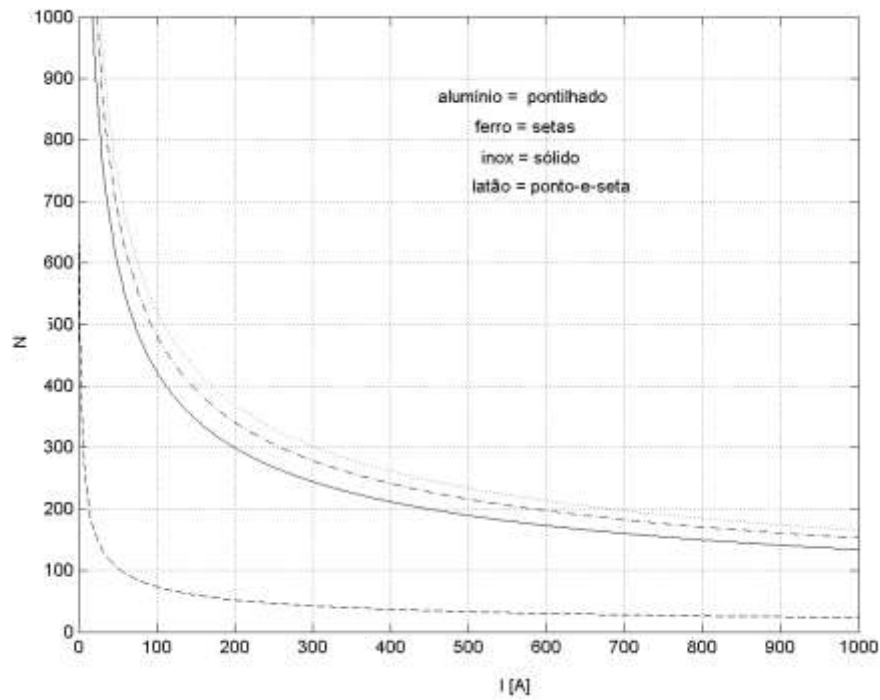


Figura 14 – Relação entre número de espiras N e corrente elétrica I em uma bobina com I variando até 1000 A

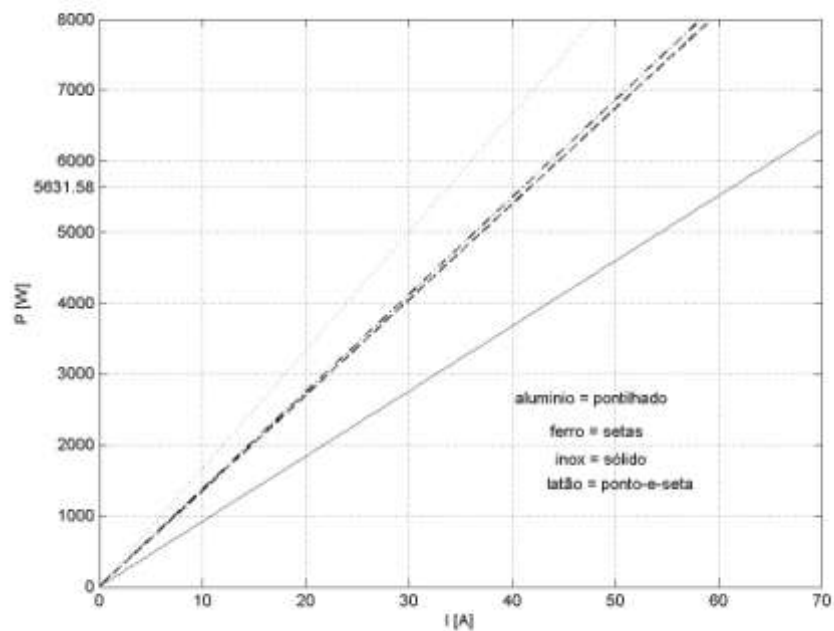


Figura 15 – Relação entre potência P e corrente elétrica I em uma bobina

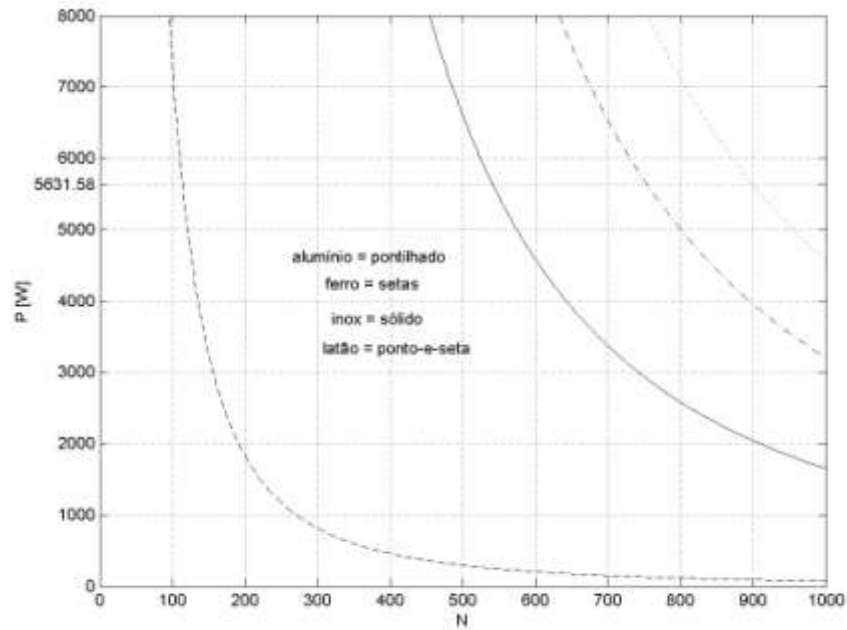


Figura 16 – Relação entre potência P e número de espiras N em uma bobina

As figuras acima, montadas a partir das equações em [1], indicam:

- a figura 3 indica que quanto mais magnético é um material, menos espiras necessita-se no indutor para gerar uma corrente desejada. Mostra também que o material que mais voltas necessita, dos amostrados, é o alumínio. Seguindo ele vem o latão, o inox e, em primeiro lugar, o ferro tecnicamente puro. A figura 4 mostra isto em uma escala maior.

- A figura 5, P versus I , mostra que o material que demanda a maior potência do sistema para funcionar é o alumínio, seguido do latão, depois o ferro e por último o inox.

- A figura 6, de P versus N , mostra que o ferro é o que menos necessita de voltas no indutor para atingir uma determinada potência do sistema. Ele é seguido do inox, depois o latão e depois o alumínio.

3.4.3 Obtenção dos Dados Práticos

Para obter-se os dados práticos ocorreram 2 situações.

Em uma primeira tentativa de obter-se aquecimento nos induzidos, se usou um dos varivolts da universidade. Esta tentativa se mostrou insatisfatória. Estes equipamentos suportam somente até 12,5 A, valor este que é facilmente



ultrapassado neste tipo de experiência, principalmente quando está se usando um induzido não magnético.

Em busca de aparelhos que trabalhassem com valores mais altos de corrente, descobriu-se uma máquina de solda no setor de Engenharia Mecânica da universidade. Ela suporta até 250 A, valor bem acima até do para o qual a bobina foi projetada. Assim, com valores de corrente o dobro do que os varivolts suportariam, obtiveram-se os dados práticos.

Para a medição de temperatura foi usado um termopar tipo K. O motivo desta escolha dentre outros tipos de termopares é que há multímetros na universidade que têm uma entrada para termopar tipo K. Assim a temperatura aparece direto na tela do multímetro, o que simplifica o processo de obtenção de temperatura, uma vez que não necessita-se recorrer às tabelas de conversão tensão-temperatura dos fabricantes de termopares.

Para as medições prendeu-se o terminal do termopar com fita isolante na lateral de cada cilindro que estava sendo experimentado.

Uma questão que surgiu é que os multímetros não estavam detectando a tensão do termopar, quando usados como voltímetros. Há um deles que talvez pudesse, mas não estava disponível naquele momento.

Para esta experiência, com exceção dos termopares B e J, todos os demais atendem às temperaturas que serão atingidas.

Com raras exceções as medições foram realizadas com marcação de tempo de 30 em 30 segundos.

Os testes foram realizados sem mover o tape da máquina de solda. Seus tapes possuem uma escala de corrente elétrica. Nesta escala a máquina estava no mínimo durante todas as experiências realizadas.

Um dos valores necessários para a realização dos cálculos térmicos é a massa de cada cilindro. Para se chegar até ele teoricamente, usa-se o valor da massa específica multiplicado pelo volume do cilindro. Não foram encontradas em tabela a massa específica do aço inoxidável austenítico, nem a do latão. Assim para encontrar a massa destes cilindros foi necessário pesá-los em uma balança eletrônica. Os valores medidos estão na tabela abaixo.

tabela 4 - Massas dos Materiais Pesados em Balança Eletrônica



| MATERIAL | MASSA ⁽¹⁾ |
|-----------------|-----------------------------|
| aço inox | 1270 |
| latão | 1350 |

(1) Em gramas.

O limite de corrente que o RIC-BT admite para consumo residencial é 50 A. A bobina foi construída com fio de cobre AWG 5, que é a espessura que suporta até 48 A, valor este bem próximo do limite da concessionária.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Resultados Teórico-Práticos do Peso e Espessura da Bobina

Com base no método descrito para o cálculo do peso e da espessura de uma bobina, os valores encontrados para a bobina de cobre foram

Tabela 5 – Comparação Teórico-Prática dos Cálculos da Bobina

| CÁLCULOS DA BOBINA | GEOMETRIA 1 ⁽¹⁾ | GEOMETRIA 2 ⁽²⁾ | MONTADA | COMPARAÇÃO ⁽³⁾ |
|---|----------------------------|----------------------------|---------|---------------------------|
| perímetro 1 [m] ⁽⁴⁾ | 0,184163 | 0,1842 | - | - |
| perímetro 2 [m] ⁽⁵⁾ | 0,312341 | 0,2132 | - | - |
| nº de esp. / camada | 22,13807 | 22,1381 | - | - |
| comp. camada 1 [m] ⁽⁶⁾ | 4,077019 | 4,0770 | - | - |
| comp. camada 2 [m] ⁽⁷⁾ | 4,622088 | 4,7198 | - | - |
| razão $r = a_2 - a_1$ | 0,545069 | 0,6428 | - | - |
| número de camadas n | 5,149501 | 5,1495 | - | - |
| comp. camada n [m] ⁽⁸⁾ | 6,338783 | 6,7442 | - | - |
| comp. tot. do fio: [m] ⁽⁹⁾ | 26,81809 | 27,8619 | - | - |
| volume do "cilindro" [m ³] | 0,0004 | 0,0005 | - | - |
| volume do "cilindro" [cm ³] | 449,7395 | 467,2445 | - | - |
| peso: [g] ^{(10) (11)} | 4029,665 | 4186,5107 | 4600 | 91,0111 |
| espessura [mm] ⁽¹²⁾ | 18,57077 | 23,7958 | - | - |
| espessura [cm] ⁽¹²⁾ | 1,857077 | 2,3796 | 2,5 | 95,1834 |

(1) Bobina projetada levando em consideração os aproveitamentos dos espaços adjacentes entre uma camada e outra da mesma. (2) Bobina projetada sem levar em consideração os aproveitamentos descritos na observação (1). (3) Comparação teórico-prática, em porcentagem, entre a bobina da geometria 2, que se mostrou mais próxima da prática do que a 1, e a bobina montada. (4) De uma espira da camada 1. (5) De uma espira da camada 2. (6) Termo a_1 da P. A. O cálculo foi realizado usando como valor do raio do fio 0,0023105 m (7) Termo a_2 da P. A. Mesma observação para o raio do fio dada em (6). (8) Termo $a_n = a_1 + (n-1) \cdot r$ da P. A. (9) É a altura do



cilindro imaginário que o fio forma. (10) Do cobre. O valor que foi usado para a massa específica do cobre é de $8,96 \text{ g / cm}^3$ (11) O peso da bobina montada foi informado levando em consideração o peso do poliacetal (umas poucas gramas) e alguns centímetros de fio esmaltado que estão por fora da bobina, então o peso real da bobina é um pouco menor. (12) Da bobina de cobre.

Da tabela acima se conclui que os resultados dos cálculos estão relativamente compatíveis com os valores medidos. Esta afinidade é maior comparando-se a geometria projetada sem aproveitamento de espaços adjacentes entre as camadas.

4.2 Resultados Teóricos da Profundidade de Penetração

Para a profundidade de penetração dos diferentes materiais os resultados a que se chegou estão na tabela a seguir.

Tabela 6 – Comparação das Profundidades de Penetração Teórico-simuladas dos Materiais da Amostra

| MATERIAL | PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO δ | | 4,6 * δ | | SIMULADO ⁽¹⁾ | COMPARADO ⁽²⁾ |
|----------|-------------------------------------|---------|----------------|--------|-------------------------|--------------------------|
| | em [m] | em [mm] | [mm] | [m] | [mm] | % |
| alumínio | 0,0109 | 10,9304 | 50,28 | 0,0503 | 6,8 | 62,2118 |
| aço inox | 0,0343 | 34,285 | 157,7108 | 0,1577 | - | - |
| latão | 0,0196 | 19,5906 | 90,1168 | 0,0901 | 16,1 | 82,1823 |
| SAE 1020 | 0,0012 | 1,1587 | 5,3299 | 0,0053 | 2,2 | 52,6682 |

(1) Profundidade de penetração δ simulada. (2) Valor comparado, em percentual, entre a profundidade de penetração δ teórica e a simulada.

Pela análise da tabela acima se conclui que não teria sentido tornar os cilindros de alumínio, de aço inoxidável e de latão ocos porque sua profundidade de penetração é tal que, na tentativa de se aproveitar até a 99 % de atenuação da densidade de fluxo B, ou seja, $4,6 * \delta$, seu valor supera o próprio diâmetro dos cilindros, que é de 44,5 mm. Da pior para a melhor situação ficam o aço inoxidável, o latão, o alumínio e depois o SAE 1020.

O valor simulado do δ para o SAE 1020 vem a confirmar que, na experiência prática, a espessura do cilindro oco ficou menor que o que deveria, o que causou uma quantidade Q de calor gerado menor do que a esperada com relação a seu correspondente maciço.



4.3 Resultados Práticos do Aquecimento dos Metais Amostrados

Através dos testes práticos realizados, foi possível a obtenção dos seguintes dados:

Tabela 7 – Dados de Temperatura da Casca Cilíndrica de SAE 1020 ⁽¹⁾

| MEDIÇÃO | V ₁ ⁽²⁾ | I ₁ ⁽³⁾ | TEMPO ⁽⁴⁾ | TEMPERATURA ⁽⁵⁾ |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|
| 1 ^a | 15,5 | 28,1 | 45 | 45 |
| 2 ^a | idem | idem | 110 | 55 |
| 3 ^a | idem | idem | 120 | 58 |
| 4 ^a | idem | idem | 150 | 63 |
| 5 ^a | idem | idem | 180 | 69 |
| 6 ^a | idem | idem | 210 | 75 |
| 7 ^a | idem | idem | 240 | 75 |
| 8 ^a | idem | idem | 270 | 84 |
| 9 ^a | idem | idem | 330 | 92 |
| 10 ^a | idem | idem | 360 | 96 |

(1) Temperatura inicial do material: 26° C. (2) Em volts. (3) Em amperes. (4) Cronometrado, em segundos. (5) Em °C.

Tabela 8 – Dados de Temperatura do Cilindro Maciço de SAE 1020

| MEDIÇÃO | V ₁ | I ₁ | TEMPO | TEMPERATURA |
|-----------------|----------------|----------------|-------|-------------|
| 1 ^a | 13 | 28 | 30 | 34 |
| 2 ^a | idem | 28,1 | 60 | 38 |
| 3 ^a | idem | - | 90 | 42 |
| 4 ^a | idem | 28 | 120 | 46 |
| 5 ^a | idem | 28 | 150 | 49 |
| 6 ^a | idem | 28 | 180 | 53 |
| 7 ^a | idem | 28,1 | 222 | 58 |
| 8 ^a | idem | 28,2 | 240 | 60 |
| 9 ^a | idem | 28 | 270 | 63 |
| 10 ^a | idem | 28,1 | 300 | 67 |

Tabela 9 – Dados de Temperatura do Cilindro Maciço de Alumínio

| MEDIÇÃO | V ₁ | I ₁ | TEMPO | TEMPERATURA |
|-----------------|----------------|----------------|-------|-------------|
| 1 ^a | 7,6 | 41 | 30 | 30 |
| 2 ^a | 7,5 | 40,8 | 60 | 34 |
| 3 ^a | 7,6 | 41 | 90 | 36 |
| 4 ^a | idem | idem | 120 | 38 |
| 5 ^a | idem | idem | 150 | 40 |
| 6 ^a | idem | idem | 180 | 43 |
| 7 ^a | idem | 41,2 | 210 | 45 |
| 8 ^a | idem | 41 | 240 | 48 |
| 9 ^a | idem | 41,1 | 270 | 51 |
| 10 ^a | 7,7 | 41,3 | 300 | 54 |

Tabela 10 – Dados de Temperatura do Cilindro Maciço de Aço Inoxidável

| MEDIÇÃO | V ₁ | I ₁ | TEMPO | TEMPERATURA |
|-----------------|----------------|----------------|-------|-------------|
| 1 ^a | 7 | 40 | - | 37 |
| 2 ^a | idem | - | 30 | 37 |
| 3 ^a | idem | 39,9 | 60 | 38 |
| 4 ^a | idem | idem | 90 | 38 |
| 5 ^a | idem | idem | 120 | 38 |
| 6 ^a | idem | 39,8 | 150 | 39 |
| 7 ^a | idem | 39,7 | 180 | 40 |
| 8 ^a | idem | 39,9 | 210 | 40 |
| 9 ^a | idem | 40 | 240 | 40 |
| 10 ^a | idem | 39,8 | 270 | 40 |
| 11 ^a | idem | 39,9 | 300 | 41 |

Tabela 11 – Dados de Temperatura do Cilindro Maciço de Latão

| MEDIÇÃO | V ₁ | I ₁ | TEMPO | TEMPERATURA |
|----------------|----------------|----------------|-------|-------------|
| 1 ^a | 8 | 41 | 30 | 32 |
| 2 ^a | idem | idem | 60 | 32 |
| 3 ^a | idem | idem | 90 | 34 |
| 4 ^a | idem | idem | 120 | 37 |
| 5 ^a | idem | 41,1 | 150 | 38 |
| 6 ^a | idem | 41 | 180 | 40 |
| 7 ^a | idem | 41,1 | 210 | 42 |
| 8 ^a | idem | 41 | 240 | 43 |
| 9 ^a | idem | 41 | 270 | 45 |

Pelo que as tabelas mostram se conclui que a amostra que teve o melhor desempenho térmico foi a do SAE 1020 em forma de tubo cilíndrico, como já era de se esperar. Quando em forma maciça o SAE 1020 também foi melhor que os demais materiais, somente sendo inferior a sua forma oca.

As tensões e correntes permaneceram praticamente constantes em cada material. As diferenças que surgiram entre tensão e corrente, de um material para o outro, na entrada do sistema, foram causadas pelos próprios materiais, uma vez que durante os testes práticos não se mexeu no tape da máquina de solda. O material magnético demanda menos corrente e mais tensão que os não magnéticos.

Com as informações das tabelas acima montaram-se 2 gráficos comparativos, os quais estão mostrados abaixo.

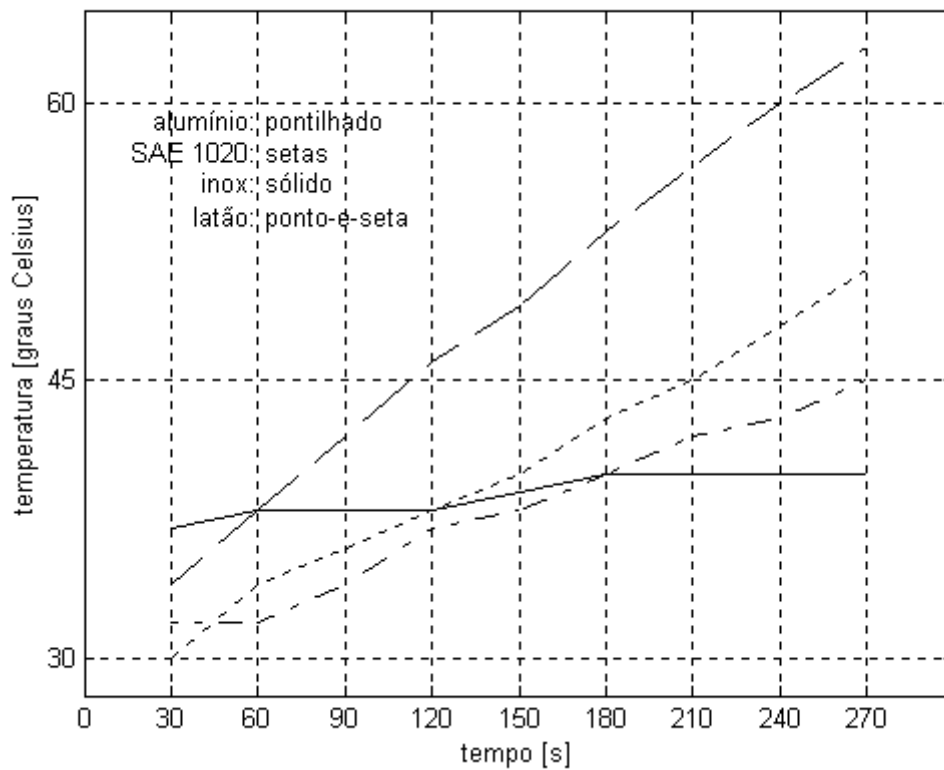


Figura 17 – Gráfico comparativo de aquecimento dos cilindros maciços de SAE 1020, alumínio, aço inoxidável austenítico e latão

Interpretando o gráfico acima se conclui que o desempenho dos materiais foi, do menor para o maior, o do aço inoxidável, o do latão, o do alumínio e o do SAE 1020 maciço.

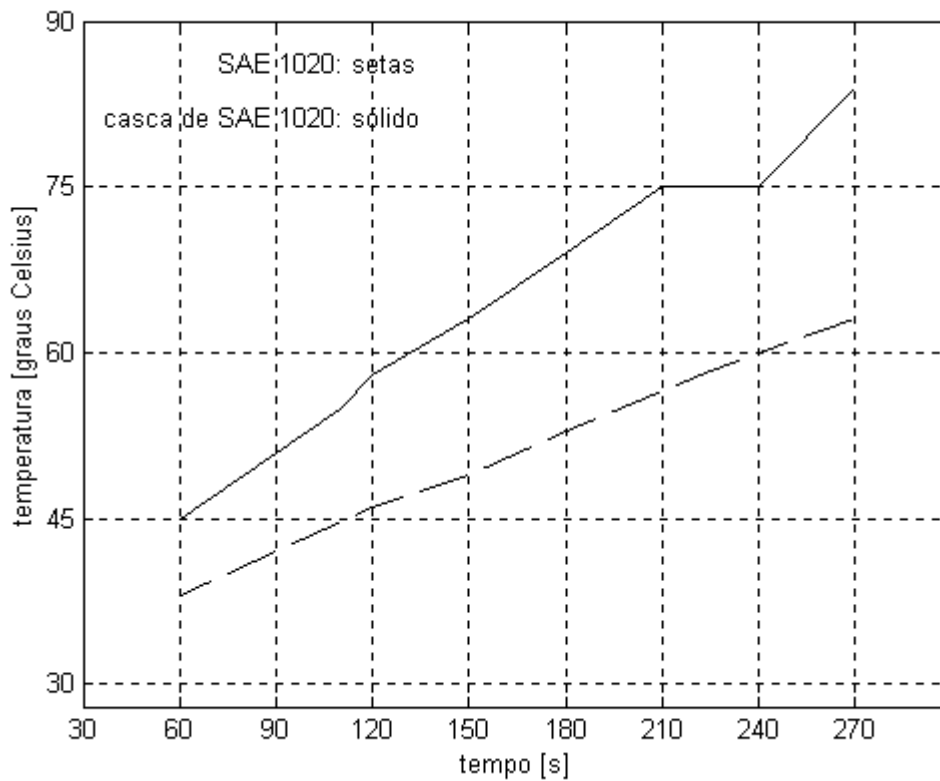


Figura 18 – Gráfico comparativo de aquecimento das amostras de SAE 1020 maciça e em forma de tubo metálico

Do gráfico acima se conclui que comparando-se o SAE 1020 em forma de cilindro maciço e o mesmo material em forma de tubo metálico, este último tem um maior aquecimento térmico.

Tabela 12 – Comparação Teórico-Prática do Aquecimento por Correntes de Foucault dos Metais Amostrados

| P_{ec} [W] | TEORIA | | PRÁTICA | | | | | |
|--------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| | Pot. térm. ⁽¹⁾ | Pot. térm. ⁽²⁾ | $\Delta^{\circ}C$ ⁽³⁾ | Q ⁽⁴⁾ | W ⁽⁵⁾ | W' ⁽⁶⁾ | Meta ⁽⁷⁾ | Melhorar ⁽⁸⁾ |
| alumínio | 18,62 | 26,57 | 14 | 1.292,59 | 5.410,77 | 30,06 | 5.350 | 178 |
| aço inox | 8,81 | 9,26 | 2 | 303,39 | 1270 | 7,06 | 5.350 | 758 |
| latão | 46,66 | 53,66 | 11 | 1.366,20 | 5.718,91 | 31,77 | 5.350 | 168 |
| SAE 1020 | - | - | 22 | 3.941,94 | 16.500,98 | 91,67 | 5.350 | 58 |
| casca 1020 | - | - | 30 | 2.253,76 | 9.434,25 | 52,41 | 5.350 | 102 |

(1) Gerada em [W] de acordo com a Referência [1]. (2) Gerada em [W] de acordo com a Referência [2]. (3) Variação de temperatura de 60 s a 240 s da contagem (durante 3 min). (4) Energia transferida neste tempo [cal]. (5) Energia transferida em W neste tempo. (6) Energia transferida em W em 1 s. (7) Meta a ser

alcançada [W]. (8) Quantas vezes a melhorar a transferência de energia até atingir a meta.

A corrente elétrica usada na bobina para se extraírem os dados práticos para o SAE 1020 oco e maciço girou em torno dos 28,1 A. Este valor poderia ter sido aumentado até o limite do AWG 5, que é de 48 A. Assim se produziria um aquecimento mais rápido do sistema. Concluindo, a última coluna da tabela acima não retrata o que o sistema tem de melhorar realmente, serve apenas como uma referência.

Na tabela acima os valores de calor gerado para o SAE 1020 não foram obtidos porque precisa-se do seu valor de ψ_0 para isto. Este valor, para ser obtido, necessita da obtenção do ciclo de histerese de saturação do material. Para isto é necessário que se faça uma experiência, a qual pode ser a do anel de Rowland [4]

Tabela 13 – Grau de Compatibilidade, em Porcentagem, entre Teoria e Prática para o Aquecimento por Correntes de Foucault

| Material | Pec [W] | |
|----------|----------|----------|
| | Ref. [2] | Ref. [3] |
| alumínio | 61,94 | 88,38 |
| aço inox | 80,11 | 76,20 |
| latão | 68,09 | 59,21 |

Pela análise da tabela acima se conclui que a compatibilidade varia. Em um momento é mais compatível uma referência, em outro, outra. Em um momento os dados de uma referência se mostraram ligeiramente superiores aos dados práticos, depois outro dado da mesma referência estava abaixo do seu valor prático correspondente. Com isto se conclui que não há uma relação linear entre os dados da teoria e os da prática, se bem que eles são relativamente próximos.

Tabela 14 – Rendimentos do Sistema para os Testes Práticos Realizados.

| AMOSTRA | S ⁽¹⁾ | CALOR ⁽²⁾ | n % ⁽³⁾ |
|------------|------------------|----------------------|--------------------|
| alumínio | 311,6 | 30,06 | 9,65 |
| aço inox | 280 | 7,06 | 2,52 |
| latão | 328 | 31,77 | 9,69 |
| SAE 1020 | 364 | 91,67 | 25,18 |
| casca 1020 | 435,55 | 52,41 | 12,03 |

(1) Potência aparente do sistema [V-A] para as tensões e correntes medidas.

(2) Gerado em W. (3) Rendimento obtido dividindo-se a coluna calor pela S e, depois, multiplicando por 100.

Pela análise da tabela acima se conclui que o rendimento do sistema é inferior ao de 95 % inicialmente arbitrados, para a frequência de 60 Hz..



Embora o SAE 1020 maciço tenha recebido mais calor e apresente melhor rendimento que seu correspondente oco, este último tem um rendimento melhor que o primeiro, levando em consideração que:

1 – a área de contato água – metal praticamente duplica com o cilindro oco, uma vez que a água pode passar por dentro e por fora da casca. Assim a troca de calor duplica. Com o cilindro maciço a água só tem uma parede externa por onde passar.

2 – o cilindro oco apresentou um maior aquecimento. Isto significa que ele aquece mais rápido, ou seja, tem uma “inércia térmica” menor a ser vencida. Esta é uma característica favorável quando se necessita de um aquecimento rápido.

3 – o cilindro oco possui 42,17 % da massa do maciço, o que o torna, portanto, mais leve. Assim o sistema fica mais leve, o que é importante caso ele seja usado de forma suspensa.

4 – a diferença da quantidade de calor gerado Q entre o cilindro maciço e o oco era para ser menor. O que ocorreu foi que havia mais de uma fonte de informação de onde se extraíram os valores de permeabilidade e resistividade do SAE 1020 e eles eram ligeiramente diferentes de uma para a outra. Foram adotados os valores de uma destas fontes para os cálculos e a prática mostrou que não eram estes os mais corretos. A espessura da casca cilíndrica deveria ter sido usinada de forma a possuir alguns décimos de milímetro a mais, o que resultaria em uma quantidade Q ainda inferior, mas mais parecida com a do maciço e um maior aquecimento.

4.4 Modelos

Para prever teoricamente o aquecimento dos cilindros foram realizados os cálculos previstos em [2] e [3].

4.5 Simulações

As simulações do aço inoxidável não foram realizadas pelo fato de o programa simulador não possuir os dados necessários para esta simulação.

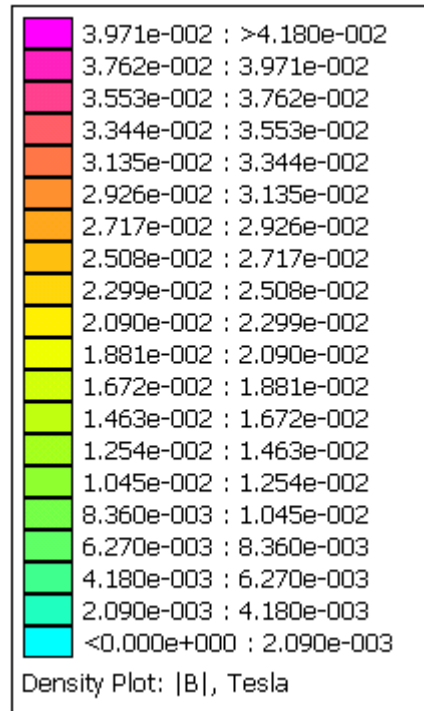


Figura 19 – Legenda das densidades de fluxo magnético para o núcleo de alumínio

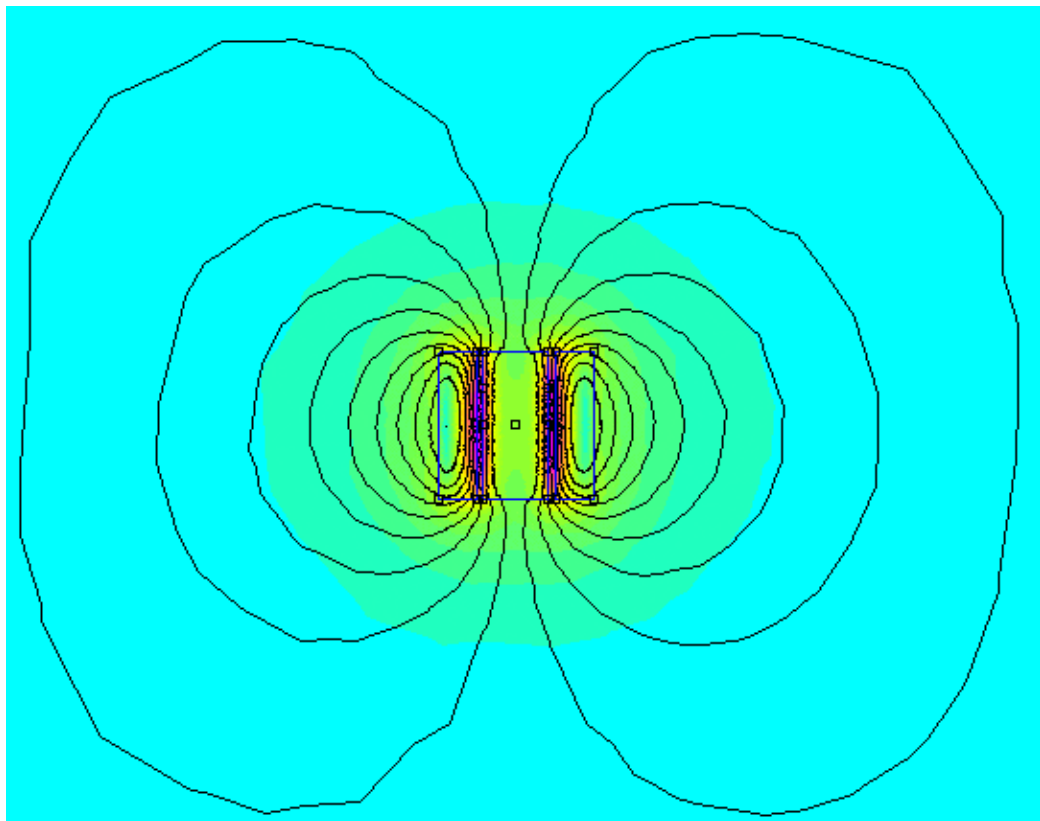


Figura 20 – Corte longitudinal mostrando as densidades de fluxo magnético e algumas linhas de fluxo magnético para o núcleo de alumínio. Os retângulos laterais representam o indutor e o retângulo central, o induzido

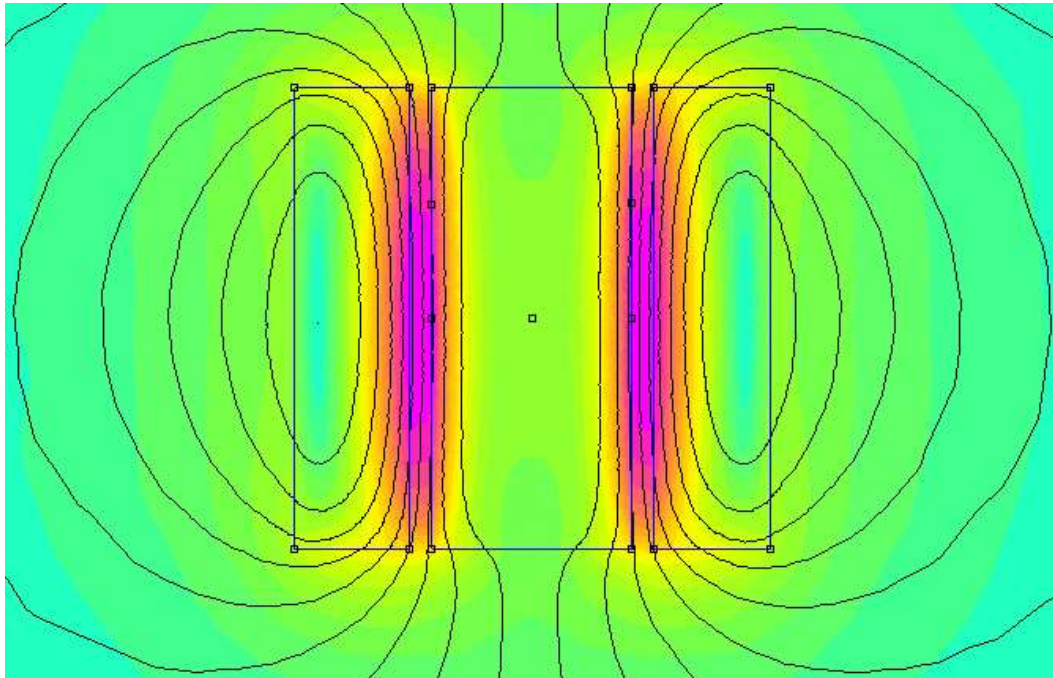


Figura 21 – Visão mais próxima do mesmo corte longitudinal para o núcleo de alumínio

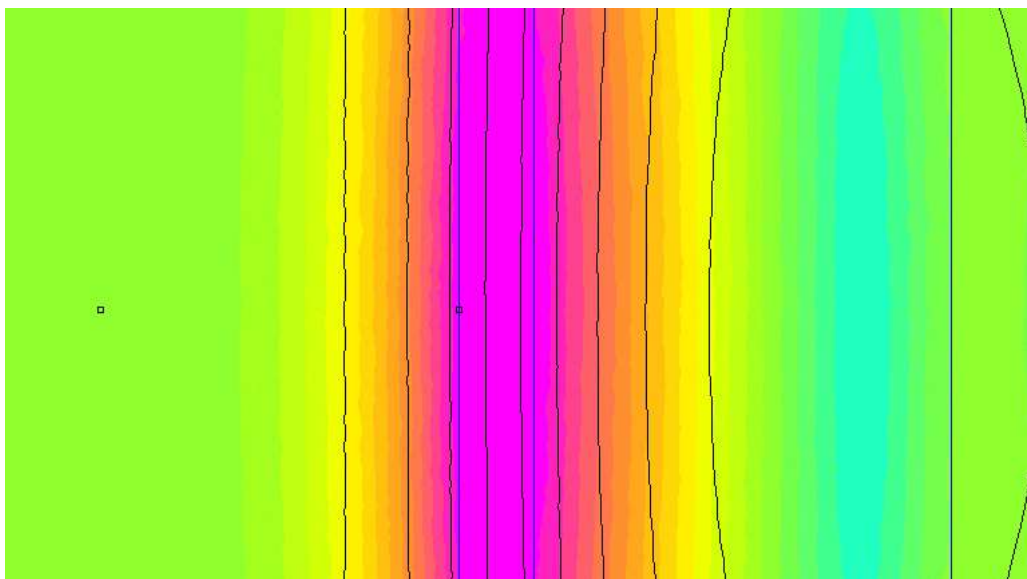


Figura 22 – Detalhe mostrando algumas linhas de fluxo magnético e algumas densidades de fluxo magnético no espaço direito entre o indutor e o induzido de alumínio

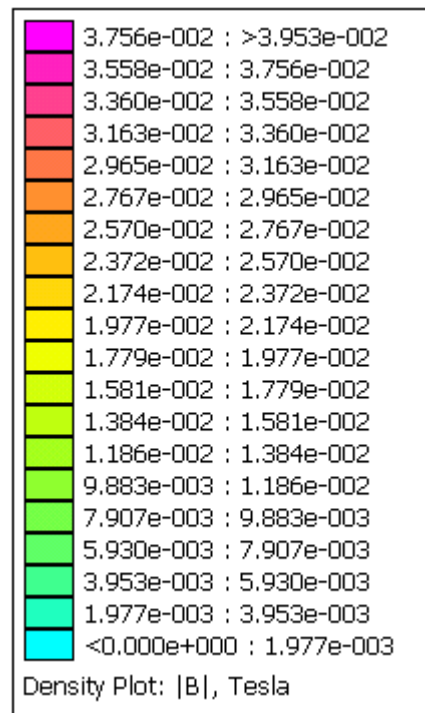


Figura 23 – Legenda das linhas de fluxo magnético no latão

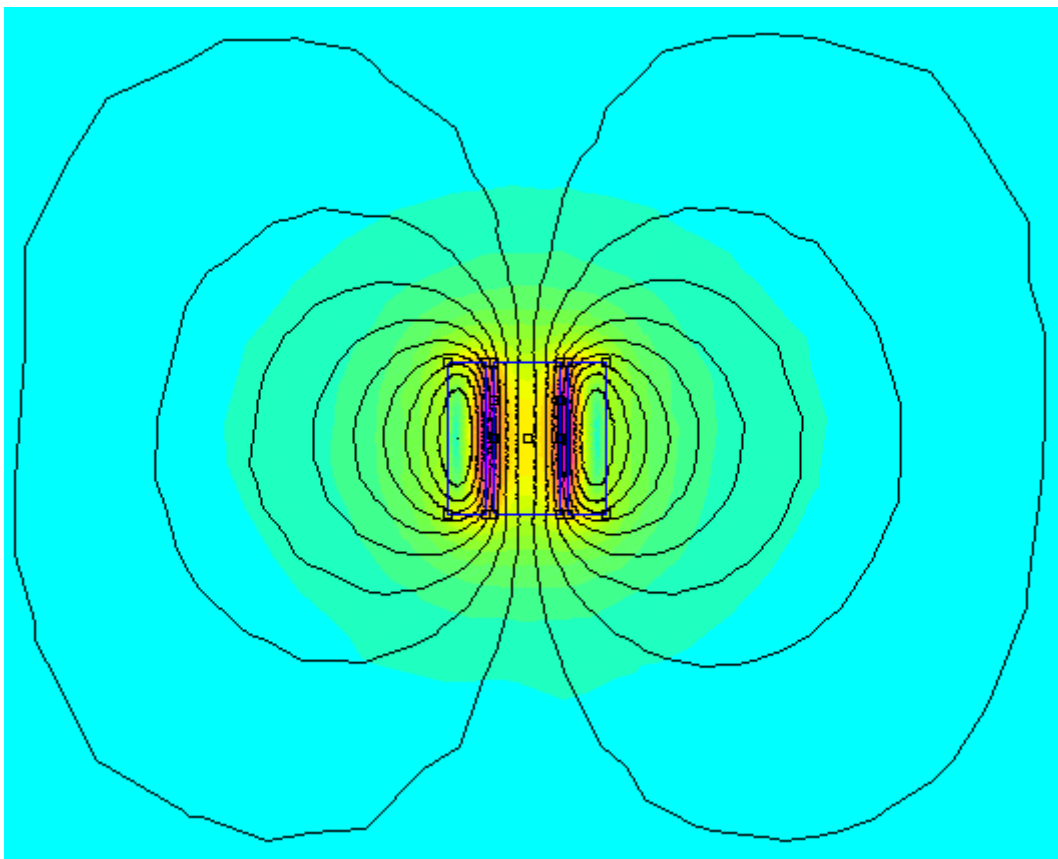


Figura 24 – Corte longitudinal mostrando as densidades de fluxo magnético e algumas linhas de fluxo magnético para o núcleo de latão. Os retângulos laterais representam o indutor e o retângulo central, o induzido

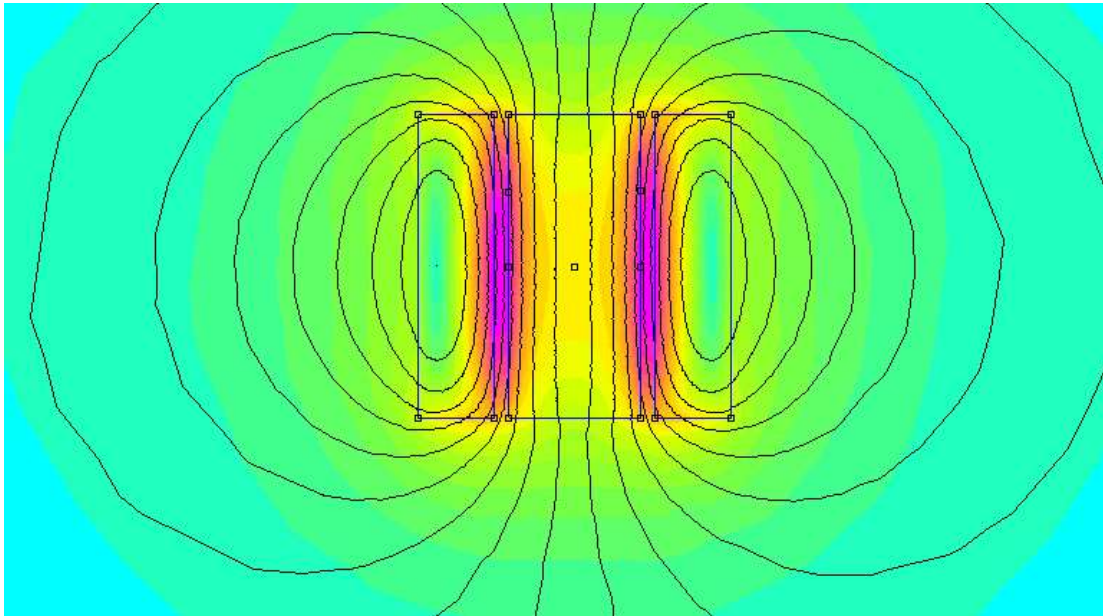


Figura 25 – Visão mais próxima do mesmo corte longitudinal

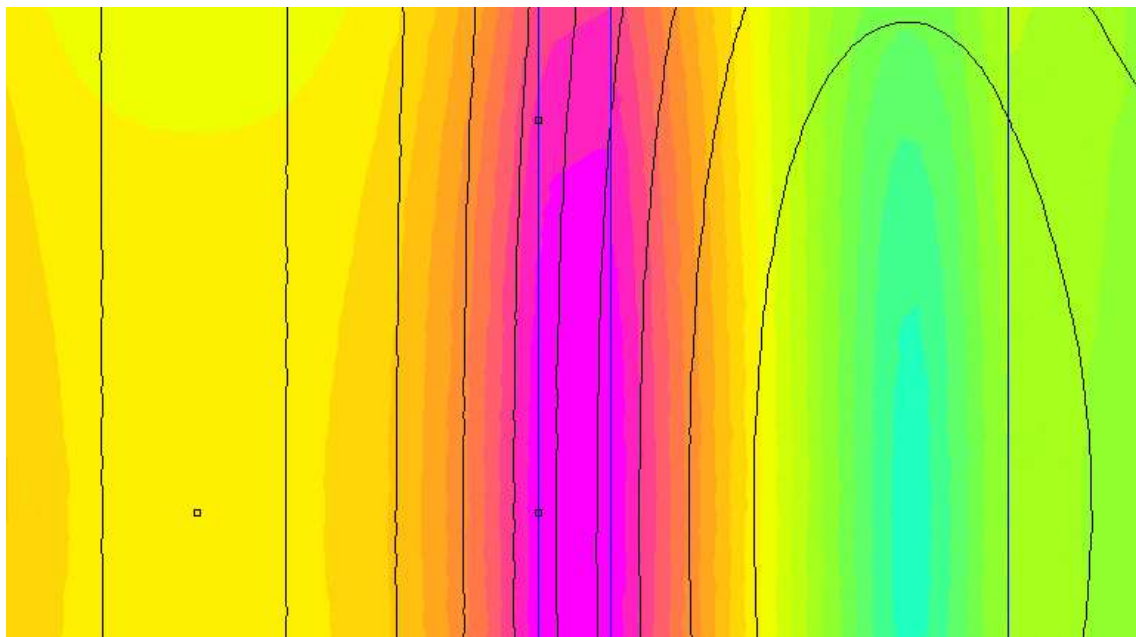


Figura 26 – Detalhe da borda direita do induzido de latão, onde estão visíveis diferentes densidades de fluxo magnético e algumas linhas de fluxo magnético

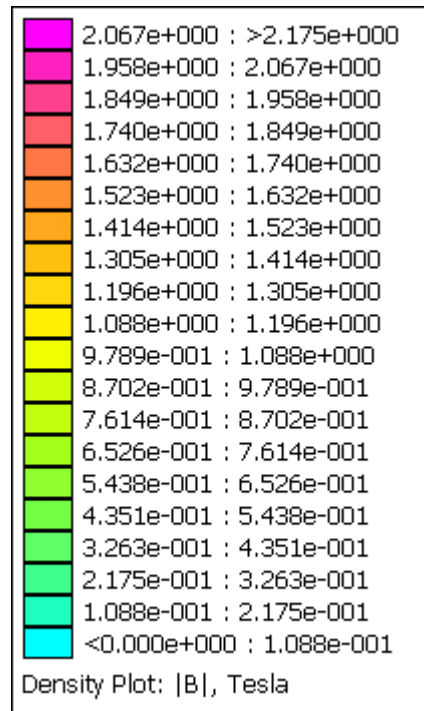


Figura 27 – Legenda das densidades de fluxo magnético no SAE 1020

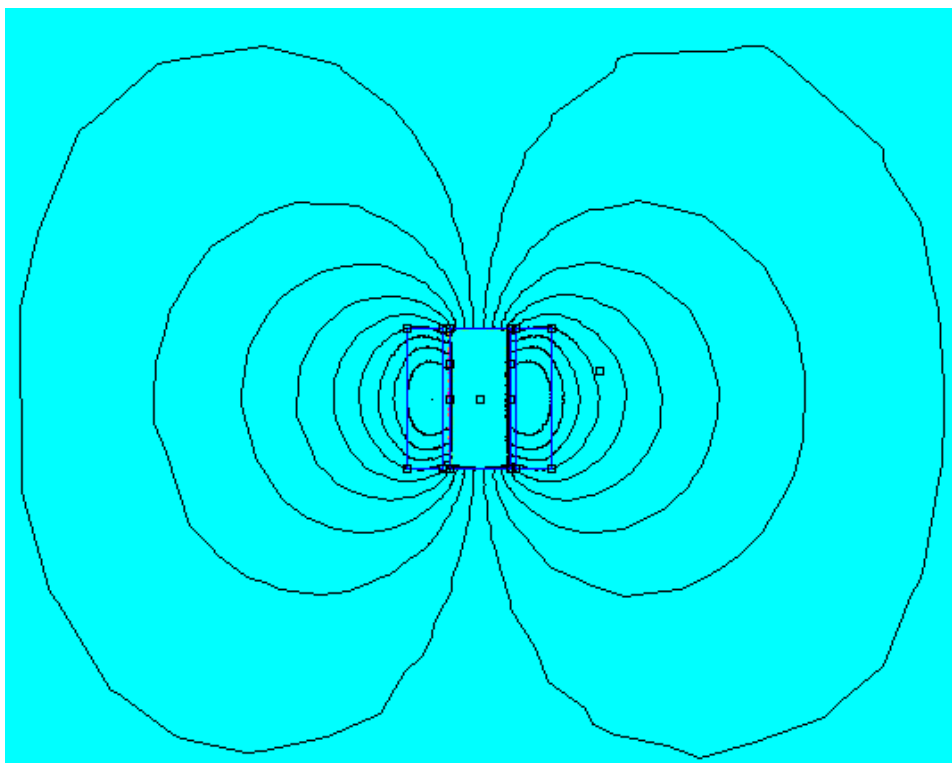


Figura 28 – Visão geral das linhas de fluxo magnético no SAE 1020

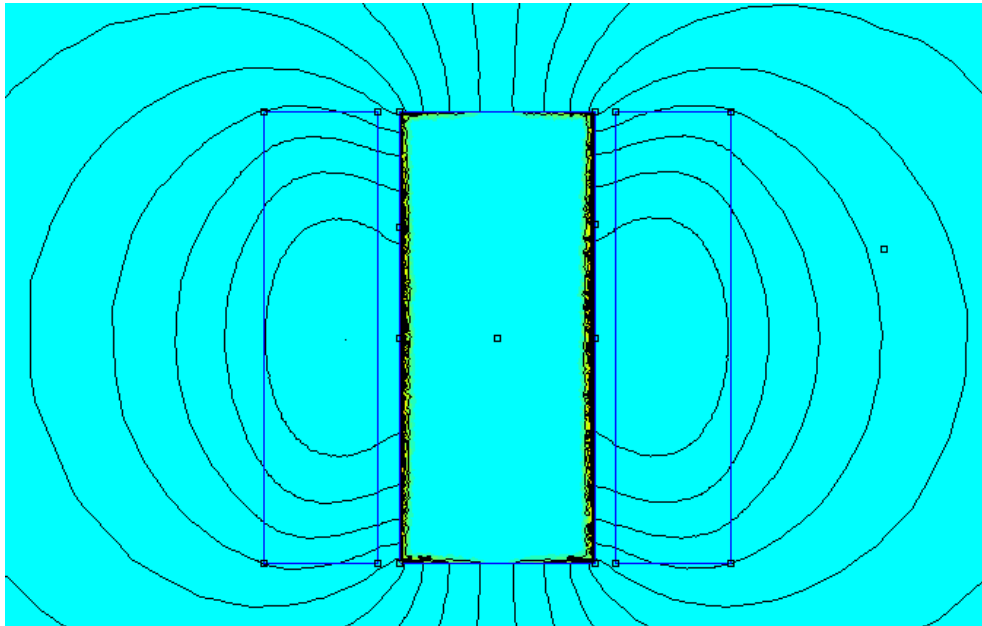


Figura 29 – Linhas de fluxo magnético no SAE 1020, salientando a pouca profundidade de penetração. Alguma visão das densidades de fluxo magnético

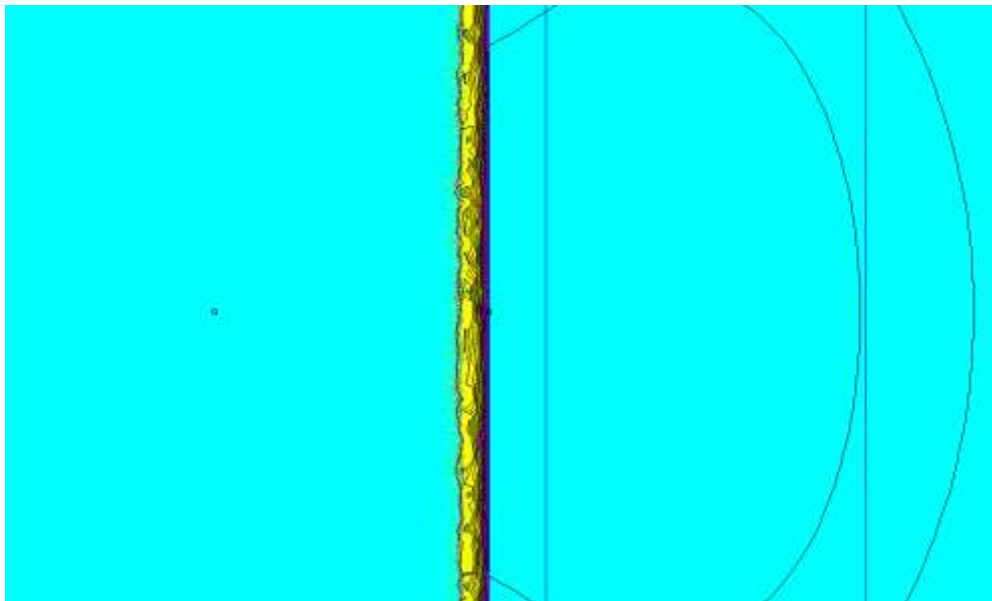


Figura 30 – Visão mais próxima de uma parte do lado direito do induzido de SAE 1020. Em preto algumas linhas de fluxo magnético. A linha azul é o começo do indutor. Visão um pouco melhor das densidades de fluxo magnético, em colorido

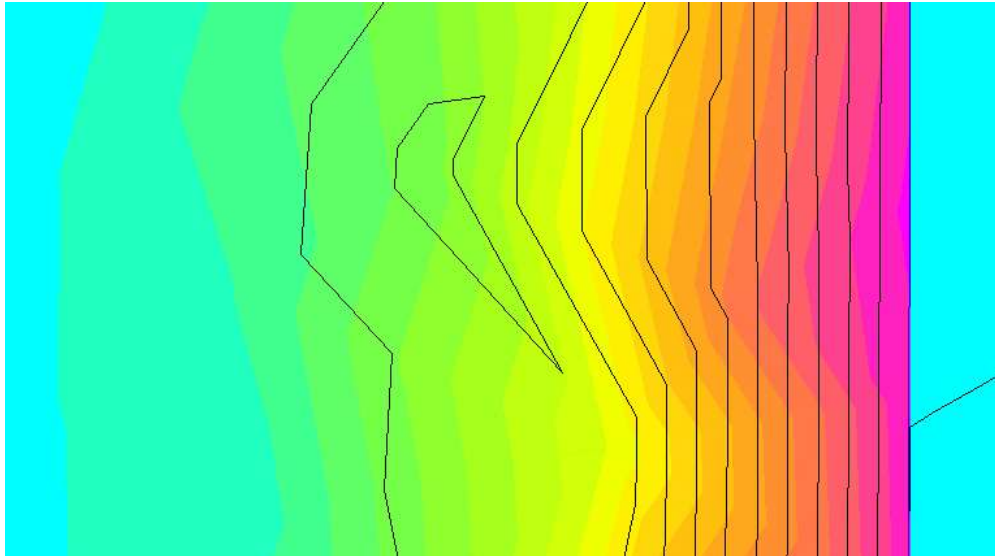


Figura 31 – Ampliação da figura anterior, mostrando o detalhe da borda direita do induzido de SAE 1020. Estão visíveis diferentes densidades de fluxo magnético e algumas linhas de fluxo magnético, em preto

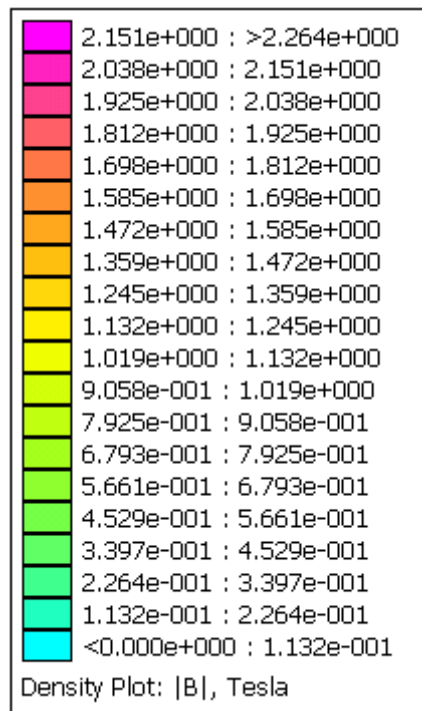


Figura 32 – Legenda das densidades de fluxo magnético no ferro

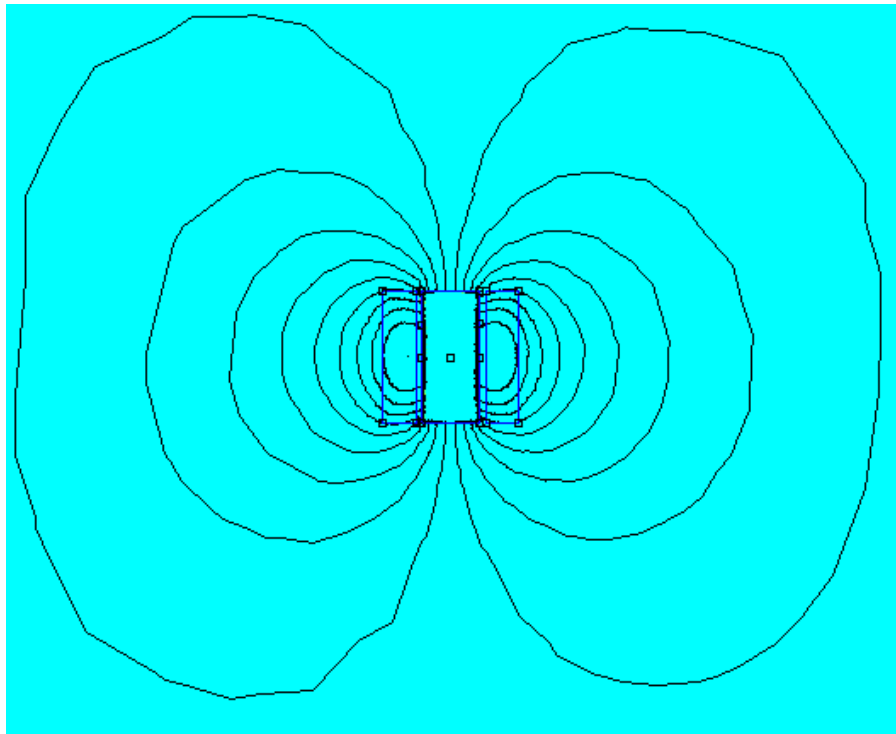


Figura 33 – Visão geral das linhas de fluxo magnético no ferro

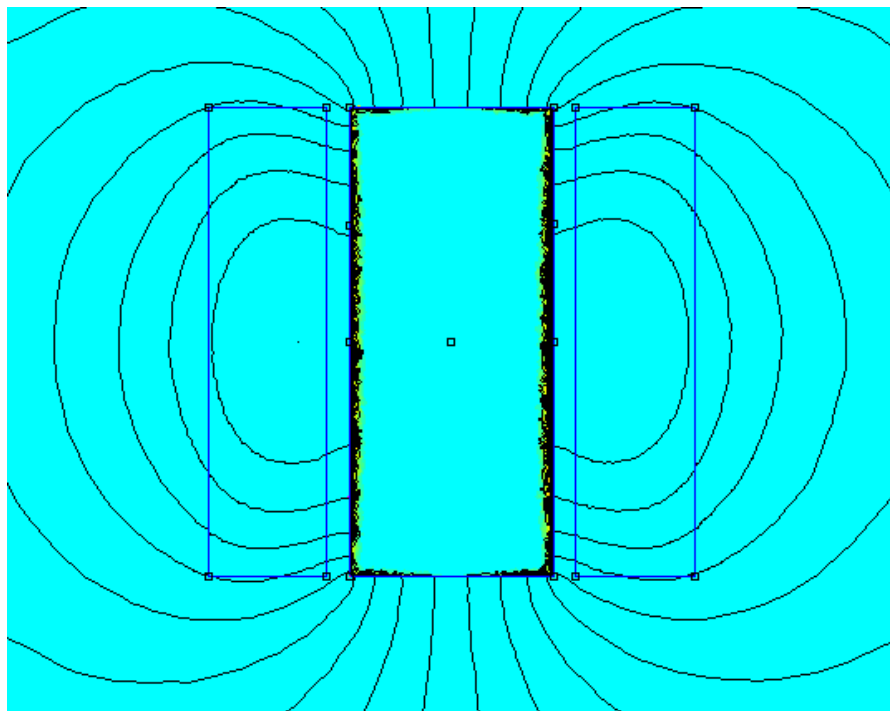


Figura 34 – Visão mais próxima das linhas de fluxo magnético no ferro, com alguma visão das densidades de fluxo magnético

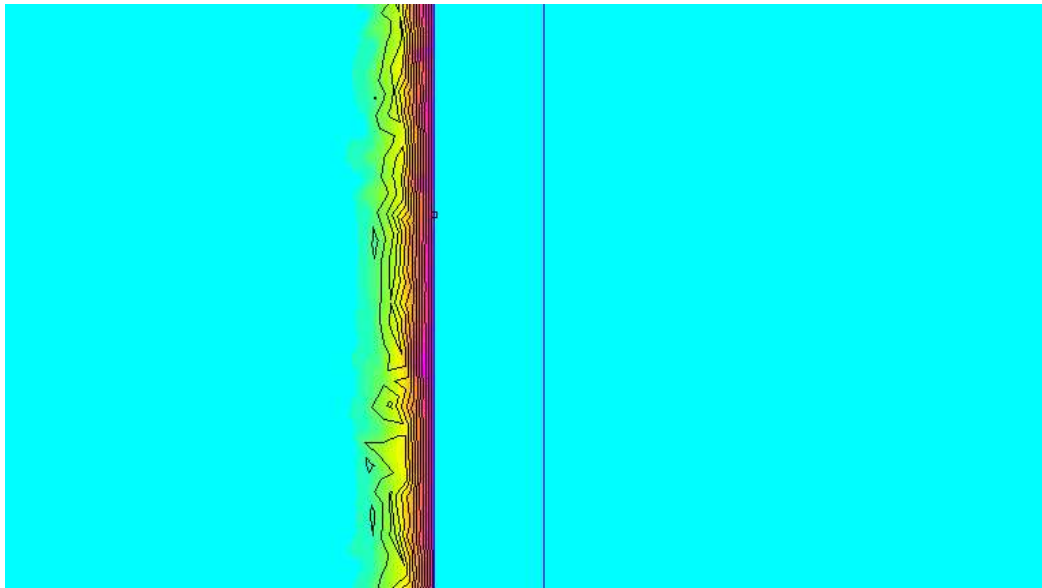


Figura 35 – Ampliação da figura anterior, mostrando uma parte da borda direita do induzido de ferro. Nota-se as diferentes densidades de fluxo magnético. A linha azul é o começo do indutor

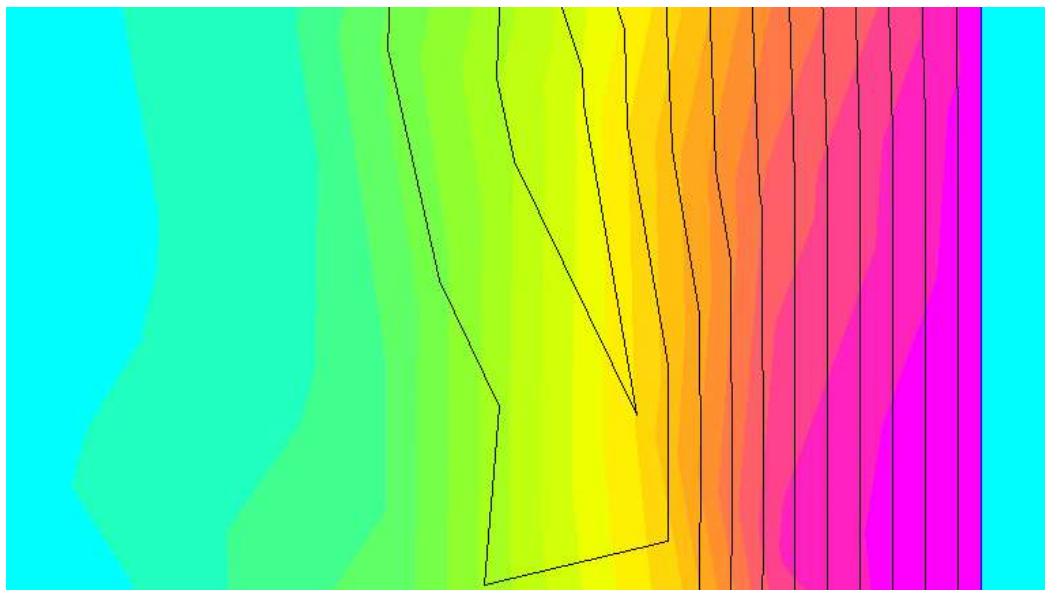


Figura 36 – Ampliação da figura anterior, mostrando o detalhe da borda direita do induzido de ferro. Estão visíveis diferentes densidades de fluxo magnético e algumas linhas de fluxo magnético, em preto

Ficou demonstrado que as linhas de fluxo magnético penetram menos no SAE 1020 e no ferro do que nos demais metais não-magnéticos.



4.6 Instrumentos Utilizados nos Testes Práticos

Máquina de solda, marca ESAB, modelo Super Bantam. Especificações: 30 A / 25 V a 250 A / 25 V. A máquina pertence a Engenharia Mecânica da ULBRA.

Multímetro alicate, marca Minipa, modelo ET – 3801. Com ele foram lidas a tensão e a corrente elétrica na saída da bobina.

Multímetros que foram usados para a leitura das temperaturas do termopar tipo K: Minipa – 2042 e Minipa ET – 1110. Ambos tinham uma entrada para o termopar tipo K.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Problemas Encontrados

Em geral a orientação das indústrias que produzem metais é de suprimir as perdas de calor nos mesmos. Encontrar um metal que aqueça o bastante significou interpretar as informações disponíveis ao contrário.

5.2 Avaliação dos Objetivos Propostos

Os objetivos propostos de desenvolver um sistema de aquecimento foram alcançados. Ressalva-se que o rendimento do sistema desenvolvido ainda está muito baixo. Faltam melhorias, as quais estão descritas em 4.5.

5.3 Avaliação do Cronograma Previsto e Executado

A entrega da monografia se atrasou por 2 motivos. Primeiro porque houve demora para se encontrar um equipamento que suportasse a intensidade de corrente elétrica necessária para as experiências. Segundo porque, depois de terem sido realizadas as experiências, os valores de corrente elétrica teóricos previstos de acordo com as fórmulas explicadas em [1] não correspondiam aos valores práticos de corrente encontrados. Assim foi necessário rever a teoria. A referência [1] estuda fornos de indução, cujas potências e dimensões podem ter proporções superiores as deste sistema, então a matemática não é totalmente compatível.

5.4 Conclusões

- Os materiais magnéticos da amostra aqueceram mais que os não-magnéticos. Isto ocorre porque nos magnéticos se formam dois fenômenos que produzem calor: as correntes induzidas e o ciclo de histerese. Nos não-magnéticos só surgem as correntes induzidas.

- Nos materiais magneticamente macios os valores do calor gerado por correntes induzidas e por histerese crescem na medida em que a frequência do



sistema vai aumentando. O que ocorre é que, dependendo do valor da frequência, se ela estiver acima ou abaixo da frequência de atalho do sistema, uma das duas fontes de calor será mais intensa que a outra.

- O aquecimento é superior em um induzido cilíndrico de material magnético cuja geometria seja oca, uma vez que haverá menos material para aquecer do que se o material fosse maciço. A parede do tubo deve ter somente a espessura necessária para que haja aquecimento. O cálculo da espessura se baseia na teoria da profundidade de penetração da onda.

- Quanto menor a quantidade de metal magnético no induzido, mais rápido é seu aquecimento.

- Para 60 Hz o rendimento é muito inferior ao de 95 % inicialmente arbitrado. Na amostra em que mais calorias se formaram ele foi de 1,71 %

5.5 Sugestões para Trabalhos Futuros

As providências a serem tomadas para a melhoria são:

- Tornando o fator de potência do sistema unitário. Para isto insere-se um capacitor de ressonância em paralelo com a indutância equivalente do sistema.

- Inserindo-se no circuito componentes eletrônicos que gerem o casamento de impedâncias entre entrada e saída (máxima transferência de potência).

- Eliminação ou redução ao máximo do caminho de ar externo à bobina que as linhas de fluxo trilham. Para isto deve-se inserir um concentrador de campo magnético.

- Encontrando-se um metal que aqueça mais por ter características mais favoráveis ao aquecimento indutivo.

- O aquecimento do induzido aumentará diversas vezes elevando-se a frequência elétrica do sistema.

- Projetar o circuito de segurança e o de controle de potência do sistema.



6 REFERÊNCIAS

1. Di Stasi, Luigi – Fornos Elétricos - 1a. Ed. - Brasil:Hemus, 1981
2. GARCÍA, A. F. Corrientes de Foucault. Disponível em: <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/foucault/foucault.htm>> Acesso em: 01 out. 2008
3. RODRÍGUEZ, C.M.; SANZ, C. – Simple Frequency Domain for Hysteresis and Eddy Currents in Cylindrical and Parallelepipedal Cores. Transactions on Magnetics. – Vol. 43, n. 5, p. 1912-1919, maio. 2007.
4. Kraus, John D., Carver, Keith R. – Eletromagnetismo - 2a. Ed. – Rio de Janeiro:Guanabara, 1978
5. Halliday et al. – Fundamentos de Física - 7a. Ed. –Rio de Janeiro:LTC, 2007
6. Miyagi, Helvio H. - <<http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/HelvioMiyagi.pdf>>
7. LORENZETTI. **Dúvidas Frequentes - Duchas e Chuveiros Elétricos.** Disponível em <http://www.lorenzetti.com.br/dica_faq.asp> Acesso em: 01 set. 2008
8. Rapoport, E.; Pleshivtseva, Y. - Optimal Control of Induction Heating Processes. NW: Taylor & Francis Group, 2007.
9. KWON, Y.-S.; YOO, S.-B.; HYUN, D.-S. - Half-Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Applications with Load-Adaptive PFM Control Strategy. IEEE.
10. ALBATHERM. **Concentrador de Campo Magnético Aplicado no Aquecimento de Peças por Indução.** Disponível em <<http://www.albatherm.com.br/informativo/concentrador.asp>> Acesso em: 17 dez. 2008
11. ALBATHERM. **Princípios Físicos do Aquecimento Indutivo.** Disponível em <http://www.albatherm.com.br/informativo/principios_basicos_aquecimento.asp> Acesso em: 17 dez. 2008
12. Instituto Ciência Hoje. **Histerese magnética: perdas e ganhos** Disponível em <<http://cienciahoje.uol.com.br/108049>> Acesso em: 19 dez. 2008
13. Gozzi, Giuseppe G. M.; - Circuitos Magnéticos- São Paulo: Érica, 1996
14. ALBATHERM. **Princípios Físicos Do Aquecimento Indutivo.** Disponível em <http://www.albatherm.com.br/informativo/principios_basicos_aquecimento.zip> Acesso em: 17 dez. 2008
15. Meeker, David - FEMM 4.2. Disponível em <<http://www.femm.info/wiki/ReadMe42>> Acesso em: 17 dez. 2008



OBRAS CONSULTADAS

1. WIEDERICK, H. D. et al. – Magnetic braking: Simple theory and experiment- American Journal of Physics- 55 (6) – june, 2007