

**UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO DE REATOR PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Área de Eletromagnetismo Aplicado

por

Luis Rafael Massaretto

Geraldo Peres Caixeta, Doutor  
Orientador

Alexandre Komar, Engenheiro  
Co-orientador

Itatiba (SP), Dezembro de 2009

**UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO DE REATOR PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Área de Eletromagnetismo Aplicado

por

Luis Rafael Massaretto

Monografia apresentada à Banca Examinadora  
do Trabalho de Conclusão do Curso de  
Engenharia Elétrica para análise e aprovação.  
Orientador: Geraldo Peres Caixeta, Doutor

Itatiba (SP), Dezembro de 2009

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2.3. METODOLOGIA.....	3
2.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>5</b>
3.1. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS.....	5
3.1.1. Corrente.....	5
3.1.2. Impedância.....	5
3.1.3. Reatância.....	6
3.1.4. Tensão.....	7
3.1.5. Potência Reativa.....	7
3.2. CAMPO ELETROMAGNÉTICO.....	8
3.2.1. Campo magnético.....	8
3.2.2. Fluxo magnético.....	9
3.2.3. Indução magnética, B ou densidade de fluxo magnético.....	9
3.2.4. Permeabilidade magnética.....	10
3.3. ENERGIA MAGNÉTICA.....	11
3.3.1. Densidade volumétrica de Energia magnética.....	12
3.3.2. Distância de isolamento entre o núcleo e a bobina.....	13
3.4. DADOS MECÂNICOS DA BOBINA.....	14
3.4.1. Altura da bobina.....	14
3.4.2. Largura da bobina.....	15
3.4.3. Volume interno da bobina.....	16
3.4.4. Comprimento do fio de cobre.....	16
3.4.5. Volume e massa de cobre utilizado.....	16
3.4.6. Perdas na bobina.....	17
3.4.7. Dados do fio de cobre circular.....	17
3.5. DADOS MECÂNICOS DA CHAPA.....	19
3.5.1. Dimensões padrão das chapas.....	19
3.5.2. Comprimento do circuito magnético.....	20

<b>3.5.3. Entreferro .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5.4. Seção da chapa .....</b>	<b>21</b>
<b>3.5.5. Seção da perna central.....</b>	<b>21</b>
<b>3.6. DADOS MECÂNICOS DO NÚCLEO .....</b>	<b>21</b>
<b>3.6.1. Núcleo de ar .....</b>	<b>21</b>
<b>3.6.2. Núcleo de silício .....</b>	<b>22</b>
<b>3.7. CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO.....</b>	<b>24</b>
<b>3.7.1. Campo magnético para reator.....</b>	<b>24</b>
<b>3.7.2. Campo magnético de dispersão .....</b>	<b>25</b>
<b>3.7.3. Energia para reator de núcleo de ar .....</b>	<b>25</b>
<b>3.7.4. Indutância de núcleo de ar .....</b>	<b>25</b>
<b>3.7.5. Indutância de dispersão.....</b>	<b>26</b>
<b>3.7.6. Indutância do núcleo.....</b>	<b>27</b>
<b>3.7.7. Indutância total .....</b>	<b>29</b>
<b>3.7.8. Reatância total.....</b>	<b>29</b>
<b>3.7.9. Impedância total.....</b>	<b>29</b>
<b>3.7.10. Cálculo da corrente do reator .....</b>	<b>29</b>
<b>4. MEDIÇÕES DE PROTÓTIPOS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1. MEDIÇÕES DO PROTÓTIPO PARA O LEVANTAMENTO CURVA DE MAGNETIZAÇÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2. MEDIÇÃO DE PARA VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS APLICADOS... </b>	<b>30</b>
<b>4.3. METODOLOGIA DO ENSAIO .....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.1. Plano de ensaio .....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.2. Realização do ensaio do protótipo.....</b>	<b>32</b>
<b>4.3.3. Realização do ensaio dos casos para validação do cálculo.....</b>	<b>34</b>
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>5.1. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO PROTÓTIPO .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE DO PROTÓTIPO COM NÚCLEO COM DE AR.....</b>	<b>38</b>
<b>5.3. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE PROJETOS DIVERSOS PARA VALIDAÇÃO DO CÁLCULO .....</b>	<b>39</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>40</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>41</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

Ame	Altura máxima do bobina [mm]
Bn	Indução magnética [T]
Br	Indução de referência para perdas no silício [T]
Ceb	Comprimento externa da bobina [mm]
Leb	Largura externa da bobina [mm]
Cf	Comprimento do fio [mm]
Cib	Comprimento interno da bobina [mm]
Cmb	Comprimento médio da bobina [mm]
Lmb	Largura média da bobina [mm]
Cmf	Comprimento médio do fio [mm]
D	Diâmetro do fio da bobina primária [mm]
e	Altura do entreferro [mm]
Esp/cam	Espiras por camada da bobina primária [esp./cam]
f	freqüência [Hz];
FP	Fator de Potência
H	Campo magnético do reator [A.e/m]
Hb	Altura da bobina [mm]
I	Corrente elétrica [A]
Ip	Corrente de pico [A]
l	Comprimento do circuito magnético [m]
L	Indutância [H];
Lar	Indutância de núcleo de ar [H]
Ld	Indutância de dispersão [H]
Lib	Largura interna da bobina [mm]
Lm	Comprimento magnético da chapa. [m]
Lme	Largura máxima do bobina [mm]
Lsi	Indutância do núcleo de silício [H]
Lt	Indutância total [H]
Mcu	Massa do cobre [g]
N	Número de espiras da bobina
Nc	Número de camadas da bobina
p	Comprimento do empilhamento das chapas [mm]
Pcu	Perdas no bobina [W]
Q	Potência reativa [VAR]
Rcu	Resistência do cobre à 20°C [Ω]
Rm	Resistência por metro [Ω/m]
S	Potência aparente [VA]
Sc	Seção da chapa [m <sup>2</sup> ]
Scu	Seção do fio de cobre [mm <sup>2</sup> ]
Sn	Seção do núcleo [m <sup>2</sup> ]
Sp	Seção da perna central [m <sup>2</sup> ]
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
td	Tempo de defasagem [s]
USF	Universidade São Francisco
V	Tensão Elétrica [V]
V	Queda de tensão no reator [V];

$V_{cu}$	Volume de cobre [m <sup>3</sup> ]
$V_d$	Volume do canal de dispersão [m <sup>3</sup> ]
$V_{ib}$	Volume interno da bobina [m <sup>3</sup> ]
$V_n$	Volume do núcleo [m <sup>3</sup> ]
$V_{pc}$	Volume de aço silício no núcleo [m <sup>3</sup> ]
$V_{si}$	Volume total de silício [m <sup>3</sup> ]
$W$	Energia magnética [J]
$W_{ar}$	Energia armazenada no reator de núcleo de ar [J]
$W_d$	Energia armazenada no canal de dispersão [J]
$W_{si}$	Energia armazenada no núcleo de silício [J/m <sup>3</sup> ]
$X_L$	Reatância Indutiva [ $\Omega$ ]
$Z$	Impedância do reator [ $\Omega$ ]
$\eta$	Densidade volumétrica de energia [J/m <sup>3</sup> ]
$M$	Permeabilidade magnética do núcleo [H/m]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo.
$\pi$	Constante
$\varphi$	Fluxo magnético [Wb]
$\omega_{fe}$	Perdas específicas totais do silício [W/kg];

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva típica de magnetização e permeabilidade.....	11
Figura 2. Distâncias de isolamento da chapa .....	13
Figura 3. Dimensões da bobina .....	14
Figura 4. Acomodação da bobina no núcleo .....	14
Figura 5. Acomodação dos condutores .....	15
Figura 6. Dimensões padronizadas da chapa .....	19
Figura 7. Comprimento do circuito magnético da chapa .....	20
Figura 8. Entreferro .....	21
Figura 9. Núcleo de silício montado .....	22
Figura 10. Canal de Dispersão .....	27
Figura 11. Circuito de ensaio do protótipo.....	33
Figura 12. Curva de magnetização BxH medida.....	37
Figura 13. Curva da permeabilidade do núcleo medido.....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tabela de condutor circular .....	18
Tabela 2. Tabela de dimensões padronizadas da chapa de aço silício .....	20
Tabela 3. Tabela de características magnéticas levantadas no ensaio.....	28
Tabela 4. Tabela de resultados de ensaio 1 .....	35
Tabela 5. Tabela de resultados de ensaio 2 .....	36
Tabela 6. Tabela de resultados de ensaio 3 .....	37
Tabela 7. Tabela de medições do reator com núcleo de ar .....	38
Tabela 8. Tabela de validação do cálculo .....	39



## RESUMO

Massaretto, Luis Rafael. **Projeto de Reator para Iluminação Pública**. Itatiba, 2009. no 41. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2009.

O grande desafio do engenheiro é prever qual será o custo e o desempenho do projeto que está desenvolvendo, para isto o engenheiro deve conhecer todos os fenômenos físicos que estão envolvidos no caso.

Este trabalho tem objetivo de desenvolver um modelo matemático dos fenômenos físicos envolvidos no projeto de reatores para iluminação pública através das teorias de eletromagnetismo, dados de catalogo dos materiais aplicados ao projeto ou utilizado dados de ensaios em protótipos para calcular outros projetos e validar os valores calculados com os resultados do ensaio destes projetos.

**Palavras-chave:** Reator. Eletromagnetismo. Projeto.

## **ABSTRACT**

The great challenge of the engineer is foresee the cost and the performance of the design that he is developing, to this the engineer should know all physical phenomenon that are involved in the case. The objective of this report is develop a mathematical model of the physical phenomenon involved in the design of the public lightning ballast based in electromagnetism theories, applied material catalogue data and validate the calculated values with measure data of this same design.

*Keywords: Ballast. Electromagnetism. Design.*

# 1. INTRODUÇÃO

Cargas reativas ideais armazenam energia sem realizar trabalho quando são energizadas. Em regime alternado, este tipo de carga apresenta uma tensão e uma corrente elétrica proporcional a sua impedância, porém não apresenta potência ativa (W) e sim uma potência reativa (VAr) que não dissipa calor como no caso dos resistores.

A carga reativa pode ser indesejada como, por exemplo, em linhas de transmissão onde este tipo de carga eleva os valores de tensão se for capacitiva ou de corrente se for indutiva, sem que em nenhum desses casos aumente também a potência ativa transmitida.

Cargas reativas também podem ser úteis principalmente por apresentar impedância sem consumir potência ativa, neste caso a carga reativa pode ser utilizada como limitador de corrente.

Reatores para iluminação pública funcionam deste modo, pois lâmpadas de descarga como lâmpadas de sódio, mercúrio, fluorescentes ou multivapores metálicos são cargas não lineares que apresentam uma queda de tensão entre seus terminais sem limitar a corrente devido ao arco voltaico entre seus catodos.

Os maiores consumidores de reatores são as concessionárias de energia elétrica. Cada uma destas possui especificações diferentes com suas particularidades no modo de funcionamento dos reatores. Ao abrir uma licitação para a compra dos reatores o engenheiro deve estar atento a especificação da concessionária e procurar qual a melhor opção de projeto tanto economicamente para ganhar a licitação quanto tecnicamente para atender as necessidades do cliente. Porém o desafio para oferecer melhor opção econômica está na variação do preço do fio de cobre e do aço silício, o ideal é ter o menor custo de cobre mais silício que atenda tecnicamente as especificações.

O modelamento matemático permite ao engenheiro prever o funcionamento e os custos envolvidos no projeto auxiliando-o a optar pela melhor opção de projeto para cada modelo de reator.

O modelamento matemático para o projeto de reatores também se faz necessário para a otimização do tempo de projeto, eliminando a necessidade da criação e vários protótipos para a verificação do comportamento do projeto, reduzindo os custos de projeto e permitindo que o engenheiro possa estudar qual é a melhor opção de projeto.

O conceito de modelamento matemático, com exceção do cálculo da impedância, já era de meu conhecimento desde que iniciei no ramo de transformadores e reatores. Com exceção do cálculo da corrente. O cálculo da corrente aplicados até então envolve fórmulas empíricas que só servem para casos muito específicos. Foi a partir dessa necessidade que optei por trabalhar no tema projeto de reator para iluminação focando principalmente o cálculo da impedância baseado nos conceitos da Física.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é modelar matematicamente baseado em conceitos da física envolvidos no projeto como, por exemplo, análise de circuitos elétricos em corrente alternada, eletromagnetismo e mecânica.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Aumentar o conhecimento sobre reatores e provar que é possível calcular os reatores e comparando os cálculos com casos produzidos. Alguns destes itens são:

- A corrente do reator;
- Perdas no cobre;
- Massa de cobre utilizado;
- Massa aço silício;

### **2.3. METODOLOGIA**

Pesquisa em livros, internet, conversa com professores da universidade, profissionais da área além de um pouco de conhecimento adquirido pela experiência ao longo dos anos.

Levantamento da curva de magnetização do núcleo de um modelo comprado em uma loja de material elétrico, através de medições realizadas no laboratório cedido pela USF.

Estudo dos dados medidos no laboratório e comparação com as teorias pesquisadas com o auxílio do software *Microsoft Excel*®.

Comparação dos cálculos de outros casos produzidos e ensaiados.

## **2.4. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Introdução: Foi apresentado de forma resumida o que é um reator, alguns tipos de aplicação e porque o modelamento matemático é importante na fase de projeto dos reatores.

Teoria: Apresenta as fórmulas e uma breve descrição de sua aplicação e importância no projeto.

Resultados: Foram apresentados os resultados das medições realizadas no protótipo e por fim a validação do cálculo de projetos diferentes do protótipo com seus valores ensaiados.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A teoria de reatores aplica vários conceitos de circuitos elétricos como reatância indutiva, campo magnético e indução eletromagnética. Para o cálculo das massas envolvidas será aplicado o conceito de peso específico. Todos estes conceitos teóricos serão explicados a seguir.

#### **3.1. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS**

Reatores são cargas indutivas que apresentam reatância (XL) quando aplicado em regime de corrente alternada. A reatância determinada por sua frequência de trabalho e indutância, tensão, corrente e sua potência aparente determinará o dimensionamento elétrico e mecânico do reator.

##### **3.1.1. Corrente**

A corrente de um reator é definida pela potência e tipo de lâmpada ao qual o reator será ligado essa corrente é determinada pela norma específica de cada reator.

##### **3.1.2. Impedância**

A impedância é um dos parâmetros mais importantes para o projeto, e também é definida por norma. Como o reator apresenta uma pequena parcela resistiva muito pequena em relação a sua impedância total, pode-se considerar a impedância é igual à reatância.

A impedância é dada por:

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R_{cu}^2} = \frac{V}{I}$$

Equação 1

### 3.1.3. Reatância

A reatância indutiva é determinada apenas pela indutância e pela frequência de trabalho do indutor.

A reatância indutiva é dada por:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Equação 2

Para efeito de projeto a reatância em um reator com núcleo de aço silício foi separada em cinco reatâncias distintas conforme os itens a seguir. Alguns dos termos, como reatância de dispersão e reatância de núcleo de ar, foram adotados dos livros da referência bibliográfica, as outras, por escassez de literatura, foram tomadas referência em pesquisa com profissionais da área de reatores.

#### 3.1.3.1. Reatância de projeto

O termo reatância de projeto foi designado como sendo a impedância total do reator desprezando a parcela resistiva da impedância, com a finalidade de facilitar o cálculo inicial já que as outras reatâncias ainda não foram calculadas. Desta forma já é possível determinar a indução e as perdas no núcleo de aço silício.

#### 3.1.3.2. Reatância de núcleo de ar

A reatância de núcleo de ar é a reatância da bobina sem núcleo de aço silício. Em reatores de núcleo de ar a energia magnética se concentra no volume de ar do núcleo da bobina. Neste projeto a reatância de núcleo de ar não é relevante e foi determinada apenas para comprovar os cálculos utilizados para a reatância de dispersão.

#### 3.1.3.3. Reatância de dispersão

Ao inserir o núcleo de aço silício sobram espaços de ar entre o núcleo e a bobina e nos entreferros. Esta reatância é menor do que a reatância de núcleo de ar, porém é importante para a determinação da reatância total do reator.



#### 3.1.3.4. Reatância do núcleo

A reatância de núcleo se refere à parte da energia magnética concentrada no núcleo de aço silício. Esta reatância se altera em função da saturação do núcleo, e diferentemente do reator de núcleo de ar, não apresenta linearidade em função do campo magnético aplicado.

#### 3.1.3.5. Reatância total

O termo reatância total foi designado à soma da reatância de dispersão com reatância de núcleo

### 3.1.4. Tensão

A tensão nos terminais do reator é encontrada multiplicando sua corrente por sua impedância.

### 3.1.5. Potência Reativa

Diferente de transformadores a potência do reator não é igual à potência da carga, neste caso a lâmpada. Devido à baixa parcela de componentes resistivos em relação à impedância total, potência reativa do reator está condicionada apenas à sua corrente e a sua reatância, ou seja:

$$S = X_L \cdot I^2 \cong Q$$

Equação 3

## 3.2. CAMPO ELETROMAGNÉTICO

O movimento ordenado de elétrons no condutor provocado pela corrente alternada na bobina produz um campo magnético variável com fluxo  $\phi$ . Estes parâmetros são fundamentais para a determinação da impedância e conseqüentemente da corrente do reator se considerar um valor determinado de tensão.

### 3.2.1. Campo magnético

Aplicando as equações de alguns conceitos estudados para bobina solenóide, obtêm-se as equações do campo magnético.

$$I_p = \int H \cdot dl \quad \text{Equação 4}$$
$$I_p = H \cdot l$$

Neste caso, considerando que H seja constante com relação ao dl, como a bobina possui várias espiras:

$$N \cdot I_p = H \cdot l \quad \text{Equação 5}$$

Desta forma o campo magnético será calculado com a seguinte equação:

$$H = \frac{N \cdot I_p}{l} \quad \text{Equação 6}$$

Para bobinas solenóides com núcleo de ar o comprimento do circuito magnético é apenas a altura da bobina, já para reator com núcleo de aço silício deve-se calcular a distância que as linhas de fluxo magnético irão percorrer.

### 3.2.2. Fluxo magnético

O fluxo magnético concatenado para um circuito fechado, ou seja, a malha por onde a corrente elétrica circula pode ser calculado da seguinte forma para o reator conforme notas de aula da matéria de Eletromagnetismo Aplicado Ministrado:

$$N \cdot \varphi = L \cdot I_p \quad \text{Equação 7}$$

Ou seja, o fluxo é dado por:

$$\varphi = \frac{L \cdot I_p}{N} \quad \text{Equação 8}$$

### 3.2.3. Indução magnética, B ou densidade de fluxo magnético

A indução magnética é utilizada para a definição das perdas no núcleo e utilizada para determinar a permeabilidade do material, aço silício ou ar, e por isso tem muita importância nos cálculos. Existem várias fórmulas para se determinar a indução, porém todas elas têm a mesma origem:

$$\varphi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad \text{Equação 9}$$

Que de uma forma simplificada para o caso de reator com núcleo de aço silício fica:

$$\varphi = B_N \cdot S_N \quad \text{Equação 10}$$

O fluxo magnético pode ser determinado como citado no item anterior e a indução pode ser determinada simplesmente por:

$$B_N = \frac{\varphi}{S_N} \quad \text{Equação 11}$$

Outra forma utilizada para determinar a Indução magnética quando a permeabilidade do meio é conhecida é:

$$B = \mu \cdot H \quad \text{Equação 12}$$

Ou ainda a indução pode ser determinada por:

$$B_n = \frac{V \cdot 10^4}{4,44 \cdot N \cdot S_n \cdot f} \quad \text{Equação 13}$$

### 3.2.4. Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética do ar é aproximadamente a mesma do vácuo.

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad \text{Equação 14}$$

Já a permeabilidade magnética do núcleo varia em função do campo magnético aplicado, por esta razão foi traçada a curva de magnetização do núcleo. Esta curva permitiu prever qual seria a impedância para o campo magnético escolhido no cálculo.

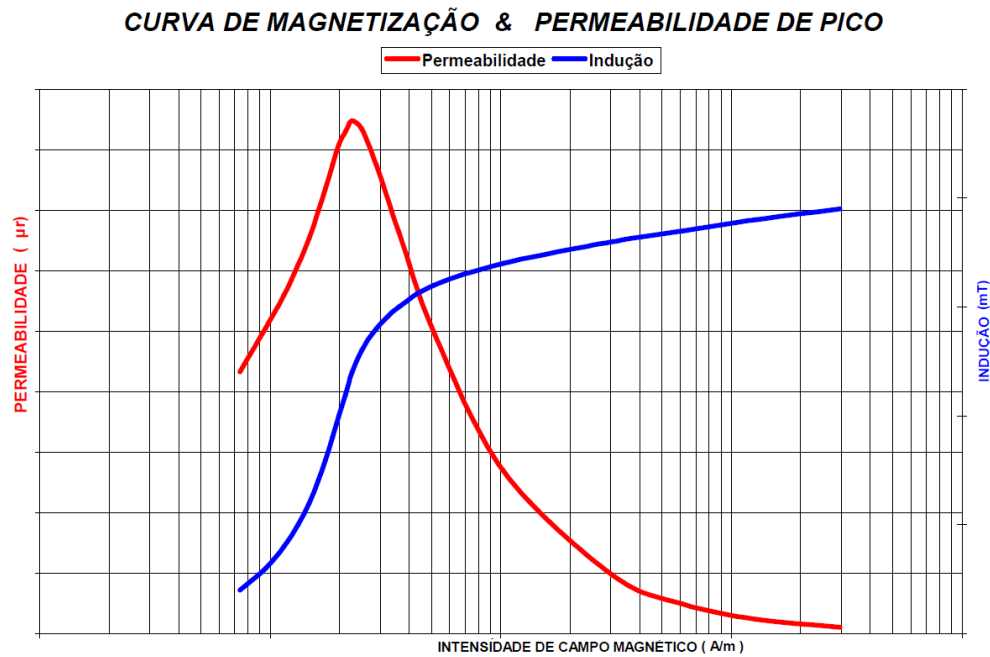


Figura 1. Curva típica de magnetização e permeabilidade

Esta figura foi cedida, gentilmente pela Arcelormittal Acesita.

A figura 1 mostra a curva de magnetização típica do núcleo, em azul, e a curva de sua derivada que determina a permeabilidade do núcleo em vermelho.

Ou seja:

$$\mu = \frac{\partial B}{\partial H} \quad \text{Equação 15}$$

### 3.3. ENERGIA MAGNÉTICA

Indutores armazenam energia em forma de campo magnético em seu núcleo, seja este de ar, aço silício ou qualquer outro material. A diferença na intensidade de energia armazenada em uma bobina com e sem núcleo aço silício está na permeabilidade magnética do material.

A energia magnética é dada por:

$$W = \frac{1}{2} \bullet L \bullet I^2 \quad \text{Equação 16}$$

O cálculo da indutância pelo método da densidade volumétrica de energia foi escolhido por se tornar mais apropriado do que o método da análise circuito magnético e suas relutâncias, já que o campo magnético é calculado desde o início e a indução magnética é usada para determinar as perdas e o volume do núcleo é mais fácil de ser calcular o comprimento e a seção de cada trecho do circuito magnético. Porém como a corrente que neste caso determinamos o campo magnético e a indução estão referenciadas à corrente de pico, a indutância também deve ser relacionada à corrente de pico como a equação abaixo:

$$L = \frac{2 \cdot W}{I_p^2} \quad \text{Equação 17}$$

### 3.3.1. Densidade volumétrica de Energia magnética

A densidade volumétrica de energia é a intensidade energia magnética armazenada por volume de núcleo. Ou seja:

$$\eta = \frac{W}{V_n} \quad \text{Equação 18}$$

A densidade volumétrica de energia também pode ser calculada em função da permeabilidade magnética do meio e pelo campo magnético de seguinte forma:

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot H^2 \quad \text{Equação 19}$$

Esta equação foi utilizada para calcular a energia do reator com núcleo de ar, a reatância de dispersão e posteriormente a reatância do núcleo com a permeabilidade determinada na curva de magnetização do núcleo.

Com a densidade volumétrica de energia e o volume do núcleo pode-se calcular a energia nominal do reator.

$$W = \eta \cdot V_n$$

Equação 20

### 3.3.2. Distância de isolamento entre o núcleo e a bobina

Para garantir um isolamento eficaz da bobina contra o núcleo, para este projeto com tensão máxima de 220 V, foi definida uma distância mínima de qualquer parte do núcleo contra a bobina de 2mm conforme a representação abaixo:

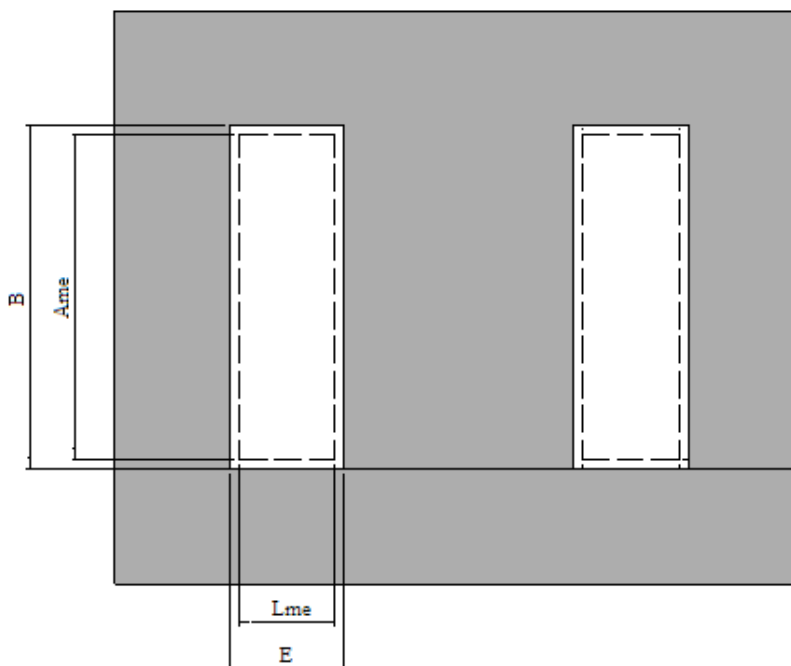


Figura 2. Distâncias de isolamento da chapa

Como visto na figura 2 será perdido 4 mm na altura e 4 mm na largura da janela da lâmina, reduzindo o espaço para montar a bobina dentro da janela

A largura máxima da bobina deve ser a largura da janela, descontado 2 mm de cada lado para garantir o isolamento.

O mesmo procedimento deve ser aplicado para a altura máxima da bobina, assim:

### 3.4. DADOS MECÂNICOS DA BOBINA

Para o cálculo do peso e da perda no cobre na bobina é necessário saber as dimensões da bobina. Os subitens abaixo mostram quais dimensões e são necessárias para determinar estes parâmetros.

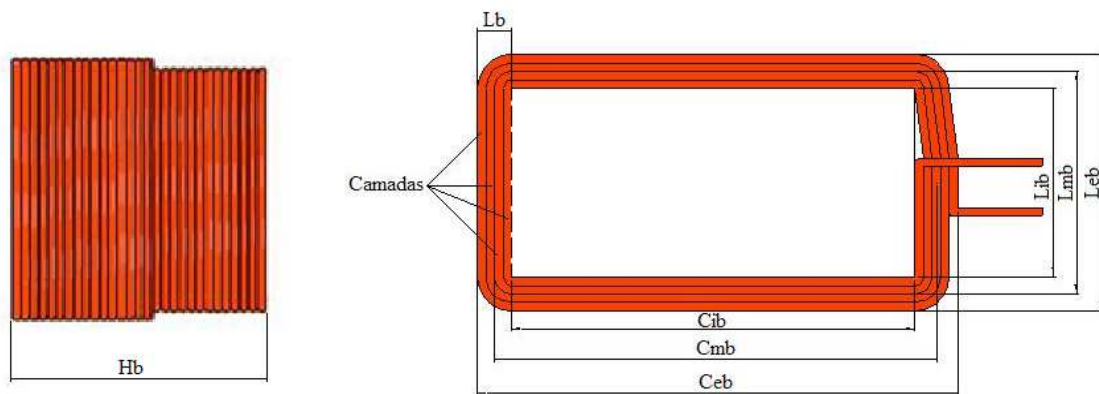


Figura 3. Dimensões da bobina

#### 3.4.1. Altura da bobina

A altura da bobina é utilizada no cálculo da reatância de núcleo de ar para determinar campo magnético e do volume de ar do núcleo.

Considerando que as espiras estão lado a lado uma da outra e que estão acomodadas em camadas dentro da janela com as distâncias de isolamento descontadas, conforme o desenho abaixo se determina o número de espiras por camada por:

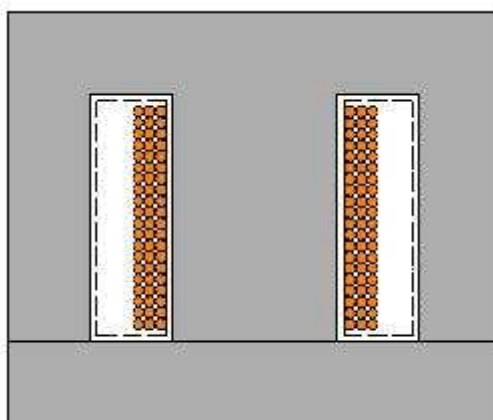


Figura 4. Acomodação da bobina no núcleo



Dessa forma é necessário calcular as dimensões da bobina passo a passo como segue abaixo.

Número de espiras por camada de espiras do primário:

$$\text{Esp / cam} = \text{Ame} / D \quad \text{Equação 21}$$

A altura da bobina deve ser menor do que “Ame” e é calculada da seguinte maneira:

$$\text{Ab} = (\text{Esp / cam}) \cdot D \quad \text{Equação 22}$$

### 3.4.2. Largura da bobina

Da mesma forma a largura da bobina é encontrada multiplicando o número de camadas pelo diâmetro do fio pelo cosseno de (30°), já que o fio da camada superior apresenta um deslocamento angular de 30° ao se acomodar sobre outros dois fios. O número de camadas da bobina de ser arredondado sempre para o próximo número inteiro para calcular a largura da bobina.

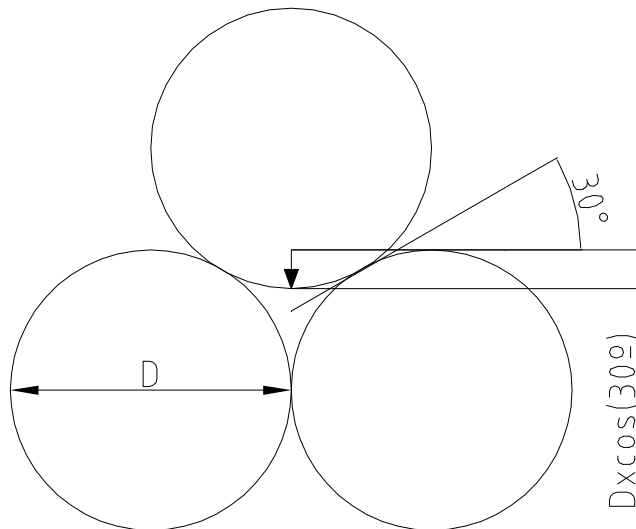


Figura 5. Acomodação dos condutores

$$\text{Lb} = \text{Nc} \cdot D \cdot \cos(30^\circ) \quad \text{Equação 23}$$

### 3.4.3. Volume interno da bobina

O volume interno da bobina é utilizado para calcular a reatância de núcleo de ar e também o volume de ar que sobra dentro da bobina quando é inserido o núcleo de silício.

$$V_{ib} = \frac{H_b \cdot L_{ib} \cdot C_{ib}}{10^9} \quad \text{Equação 24}$$

### 3.4.4. Comprimento do fio de cobre

O comprimento do fio de cobre é utilizado para determinar o volume de cobre utilizado e também a resistência da bobina. O comprimento médio do fio é dado por:

$$C_{mf} = L_{mi} + C_{mi} + L_{me} + C_{me} \quad \text{Equação 25}$$

O comprimento total do fio é dado encontrado multiplicando comprimento médio pelo número de espiras da bobina.

### 3.4.5. Volume e massa de cobre utilizado

O volume total do cobre utilizado é determinado pela multiplicação do comprimento total do fio de cobre pela seção do fio utilizado. Ou seja:

$$V_{cu} = \frac{N \cdot C_{mf} \cdot S_{cu}}{10^9} \quad \text{Equação 26}$$

A massa é determinada multiplicando o volume de cobre utilizado pelo peso específico do cobre que é de  $8,9 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]$

$$M_{cu} = V_{cu} \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} \quad \text{Equação 27}$$

### 3.4.6. Perdas na bobina

Para calcular a perda por na bobina é necessário determinar o comprimento de fio utilizado na bobina e aplicar a resistência em  $\Omega/m$  relativo ao diâmetro do fio, encontrada na tabela de dados do fio de cobre fornecida pelo fabricante. Como a tabela fornece os dados para a temperatura ambiente de 20°C essa perda pode variar se a temperatura for diferente, porém esta variação pode ser ignorada para efeito deste projeto.

As perdas no cobre são determinadas da seguinte maneira:

$$C_f = C_{mf} \cdot N \quad \text{Equação 28}$$

A resistência do cobre é dada:

$$R_{cu} = C_f \cdot R_m \cdot 10^3 \quad \text{Equação 29}$$

Com o valor da resistência total da bobina e a corrente nominal do reator é possível determinar a perda na bobina.

$$P_{cu} = R_{cu} \cdot I^2 \quad \text{Equação 30}$$

### 3.4.7. Dados do fio de cobre circular

O fio de cobre circular é referenciado na escala AWG e tem suas dimensões padronizadas por normas como ABNT, NEMA, IEC e DIN.

A tabela abaixo foi baseada em uma tabela fornecida pela São Marco S.A que fabrica os fios esmaltados. Esta tabela contém dados importantes para o projeto da bobina.

Tabela 1. Tabela de condutor circular

<b>Tabela (AWG) Para Fios de Cobre e Alumínio à 20° C</b>					
<b>Dados Dimensionais</b>				<b>Cobre</b>	<b>Alumínio</b>
<b>Tabela</b>	<b>Secção</b>	<b>Diâmetro</b>		<b>Resistencia</b>	<b>Resistencia</b>
<b>AWG</b>	<b>(mm²)</b>	<b>Nominal (Nú)</b>	<b>externo (G 2)</b>	<b>Ohm / m</b>	<b>Ohm / m</b>
2.5	29.94	7.175	*	0.005646	*
3.5	23.75	5.5	*	0.007186	*
4	21.14740	5.189	5.329	0.0008150	0.001254
4.5	18.84	4.897	5.037	0.000906	0.001408
5	16.76390	4.620	4.755	0.0010280	0.001582
5.5	14.94	4.361	4.496	0.001142	0.001775
6	13.29930	4.115	4.244	0.0012960	0.001994
6.5	11.85	3.884	4.013	0.00144	0.002238
7	10.54960	3.665	3.787	0.0016340	0.002514
7.5	9.4	3.459	3.579	0.001818	0.002822
8	8.36740	3.264	3.383	0.0020600	0.003170
8.5	7.443	3.078	3.195	0.002294	0.003564
9	6.63260	2.906	3.020	0.0025990	0.003999
9.5	5.91	2.743	2.855	0.00289	0.004488
10	5.26040	2.588	2.695	0.0032775	0.005042
10.5	4.689	2.443	2.548	0.003646	0.005657
11	4.16920	2.304	2.408	0.0041350	0.006362
11.5	3.713	2.174	2.276	0.004601	0.007144
12	3.30710	2.052	2.151	0.0052130	0.008021
12.5	2.95	1.938	2.037	0.005784	0.008992
13	2.62730	1.829	1.923	0.0065620	0.010096
13.5	2.336	1.725	1.816	0.007316	0.011355
14	2.08160	1.628	1.732	0.0082830	0.012743
14.5	1.855	1.537	1.641	0.009205	0.014299
15	1.65130	1.450	1.547	0.0104410	0.016063
15.5	1.472	1.369	1.466	0.01158	0.018020
16	1.30700	1.290	1.384	0.0131910	0.020295
16.5	1.167	1.219	1.311	0.01465	0.022729
17	1.04050	1.151	1.240	0.0165700	0.025493
17.5	0.9239	1.085	1.173	0.01849	0.028710
18	0.82350	1.024	1.110	0.0209350	0.032210
18.5	0.7317	0.965	1.054	0.0232	0.036251
19	0.65330	0.912	0.993	0.0263930	0.040602
19.5	0.5823	0.861	0.942	0.02926	0.045552
20	0.51910	0.813	0.892	0.0332120	0.051098
20.5	0.4621	0.767	0.843	0.03706	0.057401
21	0.41170	0.724	0.798	0.0418790	0.064428
21.5	0.3639	0.681	0.754	0.04668	0.072891
22	0.32470	0.643	0.714	0.0530950	0.081691
22.5	0.2894	0.607	0.681	0.05859	0.091656
23	0.25880	0.574	0.643	0.0666270	0.102493
23.5	0.2299	0.541	0.61	0.0743	0.115377
24	0.20510	0.511	0.577	0.0840680	0.129328
24.5	0.1829	0.483	0.549	0.09327	0.145026
25	0.16260	0.455	0.516	0.1060360	0.163132
25.5	0.1447	0.429	0.49	0.1177	0.183312
26	0.12820	0.404	0.462	0.1344970	0.206905
26.5	0.114	0.381	0.439	0.1492	0.232677
27	0.10240	0.361	0.417	0.1684460	0.259035
27.5	0.091	0.34	0.396	0.1867	0.291486
28	0.08040	0.320	0.373	0.2143750	0.329915
28.5	0.0718	0.302	0.356	0.2363	0.369432
29	0.06470	0.287	0.338	0.2665080	0.409972
29.5	0.0569	0.269	0.32	0.2972	0.466172
30	0.05070	0.254	0.302	0.3402570	0.523179

### 3.5. DADOS MECÂNICOS DA CHAPA

Foi utilizada a chapa “E I”, nome dado devido ao seu formato parecido com a letra E e I. Este tipo de lâmina é padrão na indústria de transformadores de baixa potência. Geralmente sua dimensão é referenciada ao tamanho da sua perna central na unidade inglesa polegada, que no diagrama abaixo está cotada com a letra D. Neste trabalho todas as dimensões serão mostradas em unidades do S.I, isto é metros.

Outra consideração importante está no tipo da chapa utilizada, pois cada tipo de chapa apresenta permeabilidade magnética e perdas específicas diferentes. As duas estudadas neste trabalho foram:

GNO: chapa de aço silício muito conhecida para transformadores que apresenta perdas mais baixas e permeabilidade mais elevada sua espessura é de aproximadamente 0,5mm.

GNO6: é laminada do mesmo material da chapa GNO, porém possui espessura de 0,65 mm, o que eleva um pouco as perdas específicas e reduz a permeabilidade.

#### 3.5.1. Dimensões padrão das chapas

A vantagem da chapa “EI” é que estas são padronizadas em todo o mundo e o preço delas pode variar de um fabricante de chapa para outro assim como de uma estamparia para outra. Segue abaixo uma tabela das dimensões mais comuns de chapa retirados do catalogo da Tessin estamparia de chapas de aços elétricos.

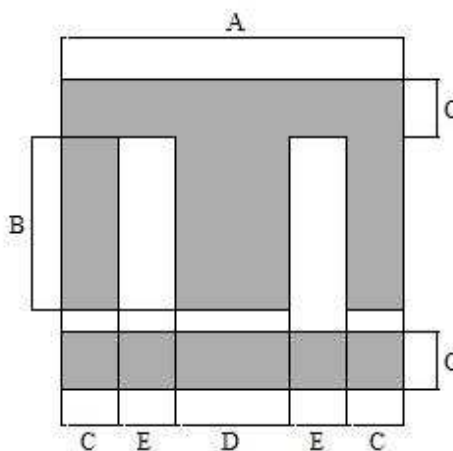


Figura 6. Dimensões padronizadas da chapa

Tabela 2. Tabela de dimensões padronizadas da chapa de aço silício

Lâmina Tipo "E I" em Unidade Inglesa					
Dim.	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)
3/16"				4.76	
1/4"	25.3	12.8	3.1	6.20	6.2
5/8"	47.63	23.81	7.94	15.88	7.94
3/4"	57.15	28.58	9.53	19.05	9.53
7/8"	66.68	33.34	11.11	22.22	11.11
1"	76.20	38.10	12.70	25.40	12.70
1 1/8"	85.73	42.86	14.29	28.58	14.29
1 1/4"	95.25	47.63	15.88	31.75	15.88
1 1/2"	113.00	57.15	19.05	38.10	19.05
1 3/4"	133.20	66.6	22.2	44.4	22.2

### 3.5.2. Comprimento do circuito magnético

O comprimento médio do circuito magnético do núcleo utilizando os dados da tabela acima é calculado pelo comprimento da linha vermelha representada na figura abaixo:

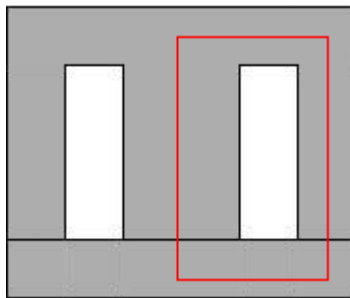


Figura 7. Comprimento do circuito magnético da chapa

Sua dimensão foi determinada pela fórmula:

$$L_m = \frac{B + 2 \cdot (C + E) + D}{1000} \quad \text{Equação 31}$$

### 3.5.3. Entreferro

O entreferro, ou *gap*, é um espaço de ar formado pela retirada de aço silício da perna central da lâmina "E", que serve para ajustar a energia total do núcleo permitindo o controle da impedância. A dimensão do entreferro é dada por quanto de material foi retirado da perna central da dimensão B. Assumindo que a corrente é constante, quanto maior o entreferro menor será a energia armazenada

no núcleo, isto é menor será a indutância total. Abaixo segue uma figura que representa o entreferro em vermelho.

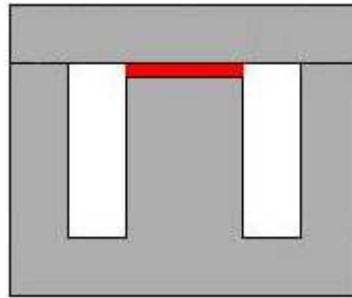


Figura 8. Entreferro

### 3.5.4. Seção da chapa

A seção da chapa é necessária para determinar a massa total do núcleo e é calculada da seguinte maneira:

$$S_c = \frac{2 \cdot (A + C) + [(B - e) \cdot D] + 2 \cdot (C \cdot B)}{10^6} \quad \text{Equação 32}$$

### 3.5.5. Seção da perna central

É importante calcular a seção da perna central, pois a energia magnética do reator fica concentrada no centro da bobina e qualquer alteração do volume de silício provocará alteração da reatância total. Desta forma a seção da perna central é:

$$S_p = \frac{[(B - e) \cdot D]}{10^6} \quad \text{Equação 33}$$

## 3.6. DADOS MECÂNICOS DO NÚCLEO

Neste trabalho foi designado como núcleo todo o volume de material predominante no centro da bobina, porém foi necessário distinguir o núcleo de ar do núcleo de silício para realizar os cálculos.

### 3.6.1. Núcleo de ar

Núcleo de ar é o termo designado, como o próprio nome sugere, quando a bobina possui apenas o ar em seu núcleo.

A reatância de núcleo de ar não tem outra aplicação neste trabalho a não ser comprovar que a reatância de dispersão pode ser determinada pela permeabilidade magnética do ar e o volume de ar que sobra ao inserir o núcleo dentro da bobina. Seu volume é calculado como “Vib”

### 3.6.2. Núcleo de silício

Para a determinação da Indução é necessário saber qual é a seção do núcleo. Esta seção é determinada pela dimensão “D” da chapa, pelo comprimento do pacote de chapas dispostas uma ao lado da outra e pelo fator de imperfeição da chapa.

O fator de imperfeição deve ser levado em conta, pois no processo de estampagem a chapa pode sofrer algum tipo de deformação ou formar rebarbas em seus cantos que não permitem que uma chapa fique rente a outra. Para este projeto considera-se um fator de 0,977.

O pacote é representado pela figura abaixo como a cota “p”

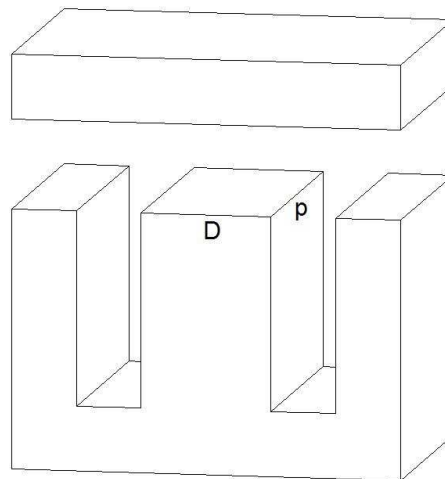


Figura 9. Núcleo de silício montado



### 3.6.2.1. Seção do núcleo

A seção do núcleo de silício é a área das cotas “D” e “p” descontado o fator de imperfeição da chapa.

$$S_n = \frac{D \cdot p \cdot 0,977}{10^6} \quad \text{Equação 34}$$

### 3.6.2.2. Volume de silício no núcleo do reator

O volume do núcleo do reator é determinado para permitir o cálculo da energia magnética do reator e é calculado da seguinte forma:

$$V_{pc} = S_p \cdot \left( \frac{p \cdot 0,977}{1000} \right) \quad \text{Equação 35}$$

### 3.6.2.3. Volume e massa do aço silício

Volume total é calculado para determinar a massa de aço silício utilizado é dado por:

$$V_{si} = \frac{S_c \cdot p \cdot 0,977}{10^9} \quad \text{Equação 36}$$

Massa total de silício assim como a massa de cobre é determinada pela massa multiplicada pelo peso específico do silício que é:

$$7,65 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Equação 37}$$

#### 3.6.2.4. Perdas no aço silício

A perda específica do aço silício é sempre fornecida para uma determinada frequência e Densidade de fluxo (Indução Eletromagnética). Isso porque ela varia com a frequência e a densidade fluxo aplicada no núcleo.

Como utilizaremos a lâmina do tipo GNO GNO6 m 60 Hz será considerada as perdas específicas totais [histerese + correntes parasitas) do silício para a indução de referencia de 1,7 T como:

$$\text{Chapa GNO} = 6,11 \text{ W/kg}$$

$$\text{Chapa GNO6} = 9,35 \text{ W/kg}$$

Estes valores foram baseados em dados estatísticos informados pelo fabricante da chapa.

Para a correção das perdas específicas do aço silício em função da Indução o livro do Alfonso Martignoni sugere o seguinte:

$$\omega_{fe} = \frac{W}{kg} \cdot \left( \frac{B_n}{B_r} \right)^2 \quad \text{Equação 38}$$

### 3.7. CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO

Esta parte do trabalho mostra diversas considerações que foram levadas em conta para chegar ao resultado esperado.

#### 3.7.1. Campo magnético para reator

O campo magnético para o reator foi calculado conforme o campo magnético de uma bobina solenóide, considerando o comprimento do circuito magnético a dimensão  $H_b$ . Assim:

$$H_{ar} = \frac{N \cdot I_p}{l} = \frac{N \cdot I_p}{H_b} \quad \text{Equação 39}$$

### 3.7.2. Campo magnético de dispersão

O campo magnético devido ao fluxo de dispersão foi considerado como o campo magnético do reator de núcleo de ar, pois o conceito de fluxo de dispersão diz que o fluxo não circula pelo núcleo de aço silício.

### 3.7.3. Energia para reator de núcleo de ar

A densidade de energia por volume do reator de núcleo de ar foi determinada pela intensidade do campo magnético e pela permeabilidade magnética do ar que não satura.

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot H^2 \quad \text{Equação 40}$$
$$\eta = \frac{1}{2} \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot H^2$$

E finalmente a energia do reator de núcleo de ar por:

$$W_{ar} = \eta \cdot V_{ib} \quad \text{Equação 41}$$

### 3.7.4. Indutância de núcleo de ar

A indutância de núcleo de ar foi calculada com base na energia armazenada no núcleo. Assim tem-se:

$$L_{ar} = \frac{2 \cdot W_{ar}}{I^2} \quad \text{Equação 42}$$

### 3.7.5. Indutância de dispersão

Existe um espaçamento de ar entre a bobina e o núcleo de silício para garantir o isolamento elétrico entre os dois. Essa distância geralmente é de dois milímetros unilateral entre empilhamento da chapa e a bobina e de três milímetros unilateral entre a perna central da chapa [D] e a bobina.

Este isolamento ocupa um determinado volume de ar no volume  $V_{ib}$  que não foi preenchido com aço silício. Ao ser energizado o reator armazena a maior parte da sua energia no núcleo de silício, porém existe uma parcela de energia armazenada neste volume de ar do isolamento que deve ser calculado para determinar a energia total do reator.

Outra consideração importante que facilita o cálculo é que como, neste caso, não há aplicação prática que justifique separar a energia do entreferro da energia do canal do isolamento, foi determinado que a energia de dispersão fosse toda a energia armazenada no volume  $V_{ib}$  que não for preenchido com aço silício, isto é toda a soma do volume de ar do isolamento e do entreferro. Ou seja:

$$V_d = V_{ib} - V_{pc} \quad \text{Equação 43}$$

Utilizando a mesma densidade volumétrica de energia que foi aplicado ao reator de núcleo de ar, determina-se a energia de dispersão e a indutância de dispersão.

$$W_d = \eta \cdot V_d \quad \text{Equação 44}$$

A indutância de dispersão é dada por:

$$L_d = \frac{2 \cdot W_d}{I^2} \quad \text{Equação 45}$$

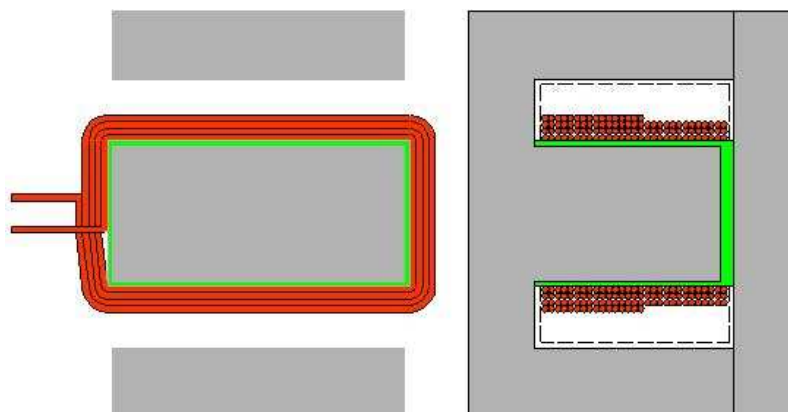


Figura 10. Canal de Dispersão

A área em verde representa o volume de ar do canal de dispersão.

### 3.7.6. Indutância do núcleo

A indutância do reator com núcleo de silício varia dependendo do campo magnético que é aplicado à bobina, isto devido ao comportamento da curva de magnetização  $B \times H$ . Portanto para determinar a reatância do núcleo de aço silício foi levantada a curva de magnetização do núcleo de um reator e determinada a permeabilidade do núcleo utilizado no projeto.

Com os dados da curva  $B \times H$  medida foi determinado a densidade de energia com o núcleo de silício, procurando a permeabilidade na tabela em função do campo magnético aplicado.

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot H^2 \quad \text{Equação 46}$$

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot [\mu(H)] \cdot H^2$$

Finalmente como a energia magnética do núcleo fica concentrada no volume de silício que fica dentro da bobina do reator como no caso do reator de núcleo de ar:

$$W_{si} = \eta \cdot V_{pc} \quad \text{Equação 47}$$

A tabela abaixo mostra os valores obtidos nas medições da lâmina tipo GNO de 0,6mm de espessura em 60 Hz:

Tabela 3. Tabela de características magnéticas levantadas no ensaio

Med.	H (Ae/m)	Θ (mWb)	B (T)	μ (H/m)	Med.	H (Ae/m)	Θ (mWb)	B (T)	μ (H/m)	Med.	H (Ae/m)	Θ (mWb)	B (T)	μ (H/m)
1	1688	0.064686	0.062	29.2	39	33770	1.258553	1.208	28.5	77	65851	1.969094	1.889	22.8
2	2533	0.095928	0.092	28.9	40	34614	1.276531	1.225	28.2	78	66696	1.986958	1.906	22.7
3	3377	0.12761	0.122	28.9	41	35458	1.31228	1.259	28.3	79	67540	1.987305	1.907	22.5
4	4221	0.160173	0.154	29.0	42	36303	1.339933	1.286	28.2	80	68384	1.995623	1.915	22.3
5	5065	0.19538	0.187	29.4	43	37147	1.375529	1.320	28.3	81	69228	2.013198	1.932	22.2
6	5910	0.221786	0.213	28.7	44	37991	1.40215	1.345	28.2	82	70073	2.013308	1.932	21.9
7	6754	0.259721	0.249	29.4	45	38835	1.417636	1.360	27.9	83	70917	2.022151	1.940	21.8
8	7598	0.287821	0.276	28.9	46	39680	1.453341	1.394	28.0	84	71761	2.021599	1.940	21.5
9	8442	0.323045	0.310	29.2	47	40524	1.473182	1.413	27.8	85	72605	2.03095	1.949	21.4
10	9287	0.355664	0.341	29.2	48	41368	1.499752	1.439	27.7	86	73450	2.048508	1.965	21.3
11	10131	0.394349	0.378	29.7	49	42212	1.526196	1.464	27.6	87	74294	2.048797	1.966	21.1
12	10975	0.42527	0.408	29.6	50	43057	1.552813	1.490	27.5	88	75138	2.057642	1.974	20.9
13	11819	0.454303	0.436	29.3	51	43901	1.570734	1.507	27.3	89	75982	2.066315	1.983	20.8
14	12664	0.486837	0.467	29.4	52	44745	1.597165	1.532	27.3	90	76827	2.07533	1.991	20.6
15	13508	0.52295	0.502	29.6	53	45589	1.615034	1.550	27.0	91	77671	2.083996	1.999	20.5
16	14352	0.552828	0.530	29.4	54	46434	1.641444	1.575	27.0	92	78515	2.084305	2.000	20.3
17	15196	0.583638	0.560	29.3	55	47278	1.667898	1.600	26.9	93	79359	2.092598	2.008	20.1
18	16041	0.612726	0.588	29.2	56	48122	1.676657	1.609	26.6	94	80204	2.093447	2.009	19.9
19	16885	0.649704	0.623	29.4	57	48966	1.694475	1.626	26.4	95	81048	2.110661	2.025	19.9
20	17729	0.681374	0.654	29.3	58	49811	1.712293	1.643	26.2	96	81892	2.119504	2.034	19.8
21	18573	0.713041	0.684	29.3	59	50655	1.738816	1.668	26.2	97	82736	2.119461	2.034	19.6
22	19418	0.742943	0.713	29.2	60	51499	1.76552	1.694	26.2	98	83580	2.119005	2.033	19.4
23	20262	0.773779	0.742	29.2	61	52343	1.774275	1.702	25.9	99	84425	2.136274	2.050	19.3
24	21106	0.808993	0.776	29.3	62	53188	1.7921	1.719	25.7	100	85269	2.145102	2.058	19.2
25	21950	0.839802	0.806	29.2	63	54032	1.809831	1.736	25.6	101	86113	2.15393	2.067	19.1
26	22795	0.869699	0.834	29.1	64	54876	1.818777	1.745	25.3	102	86957	2.153615	2.066	18.9
27	23639	0.897958	0.862	29.0	65	55720	1.827628	1.754	25.0	103	87802	2.162439	2.075	18.8
28	24483	0.933111	0.895	29.1	66	56565	1.854243	1.779	25.0	104	88646	2.163126	2.075	18.6
29	25327	0.959404	0.921	28.9	67	57409	1.854212	1.779	24.7	105	89490	2.162825	2.075	18.5
30	26172	0.985956	0.946	28.8	68	58253	1.871839	1.796	24.5	106	90334	2.171395	2.083	18.4
31	27016	1.021267	0.980	28.9	69	59097	1.872017	1.796	24.2	107	91179	2.188554	2.100	18.3
32	27860	1.056386	1.014	29.0	70	59942	1.898301	1.821	24.2	108	92023	2.197074	2.108	18.2
33	28704	1.082894	1.039	28.8	71	60786	1.907264	1.830	24.0	109	92867	2.179509	2.091	17.9
34	29549	1.109335	1.064	28.7	72	61630	1.907562	1.830	23.6	110	93711	2.197807	2.109	17.9
35	30393	1.144583	1.098	28.8	73	62474	1.933842	1.855	23.6	111	94556	2.205398	2.116	17.8
36	31237	1.179739	1.132	28.8	74	63319	1.942925	1.864	23.4	112	95400	2.207127	2.118	17.7
37	32081	1.197406	1.149	28.5	75	64163	1.951777	1.873	23.2	113	96244	2.214453	2.125	17.6
38	32926	1.233587	1.184	28.6	76	65007	1.969391	1.890	23.1	114	97088	2.214698	2.125	17.4

Com a densidade volumétrica de energia determinada pela permeabilidade magnética do silício em função do campo magnético desejado, determina-se a energia armazenada no núcleo de aço silício e a indutância do núcleo.

$$L_{si} = \frac{2 \cdot W_{si}}{I^2} \quad \text{Equação 48}$$

Deve-se observar que esta tabela está referenciada apenas ao tipo de lâmina e condições descrita acima, utilizar estes valores para outros tipos de lâminas pode provocar erros no cálculo da impedância devido à variações das características típicas do material.

### **3.7.7. Indutância total**

Por fim a indutância total do reator é a soma da indutância de dispersão com a indutância do núcleo de silício.

$$L_t = L_{si} + L_d$$

Equação 49

### **3.7.8. Reatância total**

A reatância total do reator é calculada em função da indutância total em função da frequência de trabalho do reator

O ideal é que a reatância total do reator seja igual à reatância de projeto.

### **3.7.9. Impedância total**

Uma vez definida a reatância total do reator e a resistência da bobina é possível calcular a impedância total do reator.

### **3.7.10. Cálculo da corrente do reator**

A tensão que é medida nos terminais do reator quando o reator opera com a reatância de projeto e a corrente nominal é chamada de tensão de calibração. Como é mais fácil medir a corrente e a tensão do que a impedância esta tensão é fixada por um transformador variável e é medida a corrente do reator.

Portanto para o cálculo da corrente foi determinada a tensão de calibração como referencia e com a impedância calculada baseado na Lei de Ohm determinado qual seria a corrente do projeto.

## **4. MEDIÇÕES DE PROTÓTIPOS**

As medições de protótipo foram divididas em duas fases. Na primeira fase foi medido um reator no laboratório da Universidade para traçar a curva de magnetização do núcleo e na segunda fase foram utilizados dados de medições em projetos diferentes ao medido para validar o cálculo baseado nos dados levantados na primeira fase.

### **4.1. MEDIÇÕES DO PROTÓTIPO PARA O LEVANTAMENTO CURVA DE MAGNETIZAÇÃO**

Nesta fase é importante medir todos os detalhes do reator e evitar influências externas nas medições, pois qualquer desvio na medição pode propagar o erro e alterar o cálculo final da corrente nos projetos posteriores.

### **4.2. MEDIÇÃO DE PARA VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS APLICADOS**

Para realizar a validação dos cálculos desenvolvidos para o modelamento matemático foi estudados alguns casos de reatores vendidos em lojas de materiais elétricos, nos quais foram realizados ensaios com a mesma metodologia utilizada para as medições no protótipo usado para levantar a curva de magnetização. Porém para estes casos não foi traçado a curva de magnetização do núcleo e os únicos dados que realmente eram interessantes para este trabalho eram:

- Bitola do condutor;
- Tipo do condutor;
- Número de espiras;
- Massa do condutor utilizado;
- Tipo de aço silício utilizado;
- Dimensão A da chapa;
- Massa de aço silício utilizada;



- Tipo de aço silício utilizado;
- Perda total medida, já que é impossível separar a perda da bobina e do silício nos ensaios de reatores;
- Corrente medida aplicando a tensão de calibração

Os valores medidos neste ensaio foram comparados com o calculado para a validação.

### **4.3. METODOLOGIA DO ENSAIO**

Os ensaios foram realizados em duas fases.

Na primeira fase o objetivo era ensaiar o protótipo e conseguir os resultados de forma precisa e sem interferências, já que estes resultados seriam a base dos cálculos.

Na segunda fase o ensaio era mais prático, pois seriam colhidas apenas as informações para comparar os valores calculados com os medidos.

#### **4.3.1. Plano de ensaio**

Para evitar as interferências foi traçado um plano de ensaio onde foram levantadas várias características do ambiente e do método de ensaio que seria aplicado para não ocorrer imprevistos.

As características foram:

Bancada de material não ferroso para não causar interferências eletromagnéticas. Por sugestão do professor foi reservada uma sala com bancada de pedra relativamente longe de armários de aço e colunas de sustentação estrutural da sala ou da própria bancada que poderiam conter aço;

Voltímetro instalado após o amperímetro para não medir uma possível queda de tensão no circuito do amperímetro e aumentar a impedância do reator erroneamente.

Sabendo que a resistência do condutor varia com a temperatura e a temperatura da bobina certamente se elevaria devido ao efeito joule causado pelas perdas do reator quando este estivesse energizado foi medida a resistência da bobina após cada uma das medições de tensão e corrente. Isto permitiria separar a parte resistiva da parte reativa na impedância total medida pelo amperímetro e pelo voltímetro.

Como seriam muitos os pontos a ser medido para traçar a curva, seria necessário um único aparelho que medisse a tensão e a corrente ao mesmo tempo para evitar o acúmulo de aparelhos sobre a bancada e se possível um aparelho que registrasse os dados medidos.

Para medir as perdas totais do reator seria necessário um Wattímetro onde fosse possível medir uma baixa potência com um baixo fator de potência.

#### **4.3.2. Realização do ensaio do protótipo.**

Após a determinação de qual sala seria utilizada foi realizada uma pesquisa para saber quais os aparelhos atenderiam os requisitos necessários para as medições e que estariam disponíveis no laboratório da USF para a realização dos ensaios.

O maior contratempo foi causado pelo wattímetro, já que os que existiam no laboratório não atendiam os requisitos devido às características típicas dos reatores como a baixa potência e o baixo fator de potência. Porém surgiu a idéia de se utilizar um cosifímetro e multiplicar o valor do fator de potência medido pela potência aparente do reator, porém a idéia não evoluiu, pois este é um aparelho muito difícil de encontrar atualmente. Outra forma de conseguir medir o fator de potência era utilizando um osciloscópio para mostrar as figuras de Lissajous com a finalidade de determinar a defasagem da tensão em relação à corrente, determinar o fator de potência e utilizá-lo para a determinação das perdas. Por fim o colega de classe Anderson Kiyoshi, sugeriu que transformasse o período do ciclo senoidal da tensão em graus elétricos e determinasse com o osciloscópio o tempo da defasagem da corrente em relação à tensão.

Como o osciloscópio também media informava dados medidos em RMS, foi inserido um resistor de  $0,1\Omega$ , denominado resistor derivação, em série com o reator e uma associação para medir a queda de tensão neste resistor em função da corrente aplicada no reator.

Outro artifício utilizado foi a aplicação de uma associação de resistores de 10 resistores de  $10k\Omega$ , denominada divisor de tensão, em série que seria conectado paralelamente ao reator para medir a tensão evitando que atingisse a tensão de fim de escala do osciloscópio conforme a representação a seguir:

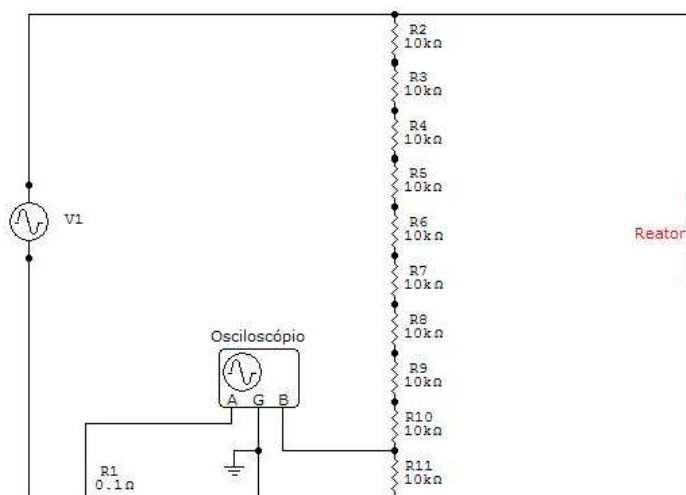


Figura 11. Circuito de ensaio do protótipo

Foi determinado como ponto de referencia do osciloscópio, que está representado como terra, a conexão entre o resistor derivação e a década resistiva, pois se este fosse trocado tanto pelo ponto B quanto A haveria a soma da tensão do resistor R1 com o resistor R11. A desvantagem desta escolha foi que a corrente do resistor R1 ficaria 180° defasado do que realmente deveria ser mostrado no osciloscópio. Assim o fator de potência foi calculado da seguinte forma:

$$FP = \cos \left[ 180^\circ - (360 \cdot f \cdot td) \right] \quad \text{Equação 50}$$

Para realizar a medição dos valores com esta configuração de ensaio foi verificado o erro de medição devido à tolerância no valor dos resistores. O erro de medição foi de +0,8% e todo valor informado pelo aparelho era corrigido matematicamente.

A possibilidade da medição da tensão, da corrente e do tempo de defasagem auxiliou nas muito as medições que eram registradas em uma planilha do *Microsoft Excel*® a qual realizava os cálculos do fator de potência automaticamente.

Além do cálculo do fator de potência a planilha também calculava:

- Perdas multiplicando a potência aparente pelo fator de potência;
- A impedância total medida, com a tensão e a corrente medida;
- A reatância indutiva, subtraindo a resistência medida da impedância;

- A indutância a partir da reatância indutiva;

E mais tarde após o levantamento dos dados de projeto do protótipo como número de espiras, altura da bobina, indutância medida, corrente de pico e seção do núcleo de silício foi calculado as seguintes grandezas aplicando as teorias citadas acima;

- O campo magnético, calculado com a corrente, altura da bobina  $H_b$  e o número de espiras;
- O fluxo magnético, com a indutância calculada pela reatância indutiva;
- A Indução, utilizando a área do núcleo de silício e o fluxo magnético;

A permeabilidade magnética relativa do núcleo de silício a partir do campo e da indução magnética:

#### **4.3.3. Realização do ensaio dos casos para validação do cálculo.**

Os ensaios para a validação dos cálculos aplicados foi realizado de forma objetiva e só as condições nominais de trabalho do reator foram verificados. As condições foram:

Corrente do reator quando energizado com a tensão de calibração;

Perdas totais do reator aplicando a corrente nominal;

Massa de silício utilizada;

Massa do condutor utilizado;

Os ensaios de perdas e corrente foram realizados com a mesma metodologia aplicada no ensaio de protótipo e as massas foram pesadas em uma balança de precisão.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO PROTÓTIPO

Os resultados das medições do protótipo foram organizados em uma tabela e dois gráficos, o primeiro mostra a curva de magnetização e o segundo o comportamento da permeabilidade relativa do núcleo em função do mesmo campo magnético aplicados para a curva de magnetização

Tabela 4. Tabela de resultados de ensaio 1

med.	Corrente (A)	Tensão (V)	R ( $\Omega$ )	tm (ms)	F.P. (COS $\phi$ )	S (W)	Z ( $\Omega$ )	XL ( $\Omega$ )	L (mH)	N (esp)	H (Ae/m)	$\Phi$ (mWb)	B (T)	$\mu_r$ (H/m)
1	0.10	7.35	2.5	4.6	0.1626	0.1	73.5	73.46	194.9	426	1688	0.0647	0.062	29.2
2	0.15	10.9	2.5	4.6	0.1626	0.3	72.7	72.62	192.6	426	2533	0.0959	0.092	28.9
3	0.20	14.5	2.5	4.6	0.1626	0.5	72.5	72.46	192.2	426	3377	0.1276	0.122	28.9
4	0.25	18.2	2.5	4.6	0.1626	0.7	72.8	72.76	193.0	426	4221	0.1602	0.154	29.0
5	0.30	22.2	2.5	4.6	0.1626	1.1	74.0	73.96	196.2	426	5065	0.1954	0.187	29.4
6	0.35	25.2	2.4	4.6	0.1626	1.4	72.0	71.96	190.9	426	5910	0.2218	0.213	28.7
7	0.40	29.5	1.5	4.6	0.1626	1.9	73.8	73.73	195.6	426	6754	0.2597	0.249	29.4
8	0.45	32.7	2.2	4.6	0.1626	2.4	72.7	72.63	192.7	426	7598	0.2878	0.276	28.9
9	0.50	36.7	2.1	4.6	0.1626	3.0	73.4	73.37	194.6	426	8442	0.3230	0.310	29.2
10	0.55	40.4	1.7	4.6	0.1626	3.6	73.5	73.43	194.8	426	9287	0.3557	0.341	29.2
11	0.60	44.8	2.1	4.6	0.1626	4.4	74.7	74.64	198.0	426	10131	0.3943	0.378	29.7
12	0.65	48.3	1.2	4.6	0.1626	5.1	74.3	74.30	197.1	426	10975	0.4253	0.408	29.6
13	0.70	51.6	1.4	4.6	0.1626	5.9	73.7	73.70	195.5	426	11819	0.4543	0.436	29.3
14	0.75	55.3	1.7	4.6	0.1626	6.7	73.7	73.71	195.5	426	12664	0.4868	0.467	29.4
15	0.80	59.4	1.6	4.6	0.1626	7.7	74.3	74.23	196.9	426	13508	0.5229	0.502	29.6
16	0.85	62.8	1.9	4.6	0.1626	8.7	73.9	73.86	195.9	426	14352	0.5528	0.530	29.4
17	0.90	66.3	1.9	4.6	0.1626	9.7	73.7	73.64	195.3	426	15196	0.5836	0.560	29.3
18	0.95	69.6	1.7	4.6	0.1626	10.8	73.3	73.24	194.3	426	16041	0.6127	0.588	29.2
19	1.00	73.8	1.7	4.6	0.1626	12.0	73.8	73.78	195.7	426	16885	0.6497	0.623	29.4
20	1.05	77.4	1.8	4.6	0.1626	13.2	73.7	73.69	195.5	426	17729	0.6814	0.654	29.3
21	1.10	81	1.9	4.6	0.1626	14.5	73.6	73.61	195.3	426	18573	0.7130	0.684	29.3
22	1.15	84.4	2.0	4.6	0.1626	15.8	73.4	73.36	194.6	426	19418	0.7429	0.713	29.2
23	1.20	87.9	1.9	4.6	0.1626	17.2	73.3	73.23	194.2	426	20262	0.7738	0.742	29.2
24	1.25	91.9	1.9	4.6	0.1626	18.7	73.5	73.50	195.0	426	21106	0.8090	0.776	29.3
25	1.30	95.4	1.9	4.6	0.1626	20.2	73.4	73.36	194.6	426	21950	0.8398	0.806	29.2
26	1.35	98.8	2.0	4.6	0.1626	21.7	73.2	73.16	194.1	426	22795	0.8697	0.834	29.1
27	1.40	102	1.7	4.6	0.1626	23.2	72.9	72.84	193.2	426	23639	0.8980	0.862	29.0
28	1.45	106	1.9	4.6	0.1626	25.0	73.1	73.08	193.8	426	24483	0.9331	0.895	29.1
29	1.50	109	2.2	4.6	0.1626	26.6	72.7	72.63	192.7	426	25327	0.9594	0.921	28.9
30	1.55	112	1.8	4.6	0.1626	28.2	72.3	72.24	191.6	426	26172	0.9860	0.946	28.8
31	1.60	116	1.5	4.6	0.1626	30.2	72.5	72.48	192.3	426	27016	1.0213	0.980	28.9
32	1.65	120	1.8	4.6	0.1626	32.2	72.7	72.70	192.9	426	27860	1.0564	1.014	29.0
33	1.70	123	1.5	4.6	0.1626	34.0	72.4	72.34	191.9	426	28704	1.0829	1.039	28.8
34	1.75	126	1.4	4.6	0.1626	35.9	72.0	71.99	190.9	426	29549	1.1093	1.064	28.7
35	1.80	130	1.3	4.6	0.1626	38.1	72.2	72.21	191.5	426	30393	1.1446	1.098	28.8
36	1.85	134	1.5	4.6	0.1626	40.3	72.4	72.42	192.1	426	31237	1.1797	1.132	28.8
37	1.90	136	1.3	4.6	0.1626	42.0	71.6	71.57	189.8	426	32081	1.1974	1.149	28.5
38	1.95	140	1.6	4.6	0.1626	44.4	71.9	71.84	190.6	426	32926	1.2336	1.184	28.6
39	2.00	143	4.0	4.6	0.1626	46.6	71.6	71.46	189.6	426	33770	1.2586	1.208	28.5
40	2.05	145	3.7	4.6	0.1626	48.4	70.8	70.71	187.6	426	34614	1.2765	1.225	28.2
41	2.10	149	3.4	4.6	0.1626	51.0	71.0	70.96	188.2	426	35458	1.3123	1.259	28.3
42	2.15	152	1.9	4.6	0.1626	53.2	70.8	70.77	187.7	426	36303	1.3399	1.286	28.2
43	2.20	156	1.7	4.6	0.1626	55.9	71.0	71.00	188.3	426	37147	1.3755	1.320	28.3
44	2.25	159	1.7	4.6	0.1626	58.3	70.8	70.77	187.7	426	37991	1.4021	1.345	28.2
45	2.30	161	4.3	4.6	0.1626	60.3	70.1	69.99	185.7	426	38835	1.4176	1.360	27.9
46	2.35	165	4.1	4.6	0.1626	63.2	70.4	70.23	186.3	426	39680	1.4533	1.394	28.0
47	2.40	167	1.6	4.6	0.1626	65.3	69.7	69.71	184.9	426	40524	1.4732	1.413	27.8
48	2.45	170	1.7	4.6	0.1626	67.9	69.5	69.52	184.4	426	41368	1.4998	1.439	27.7
49	2.50	173	2.0	4.6	0.1626	70.5	69.4	69.33	183.9	426	42212	1.5262	1.464	27.6
50	2.55	176	2.0	4.6	0.1626	73.2	69.2	69.15	183.4	426	43057	1.5528	1.490	27.5

Tabela 5. Tabela de resultados de ensaio 2

med.	Corrente (A)	Tensão (V)	R (Ω)	tm (ms)	F.P. (COSφ)	S (W)	Z (Ω)	XL (Ω)	L (mH)	N (esp)	H (Ae/m)	Φ (mWb)	B (T)	μr (H/m)
51	2.60	178	1.7	4.6	0.1626	75.4	68.6	68.60	182.0	426	43901	1.5707	1.507	27.3
52	2.65	181	2.0	4.6	0.1626	78.2	68.5	68.44	181.6	426	44745	1.5972	1.532	27.3
53	2.70	183	1.8	4.6	0.1626	80.6	68.0	67.93	180.2	426	45589	1.6150	1.550	27.0
54	2.75	186	2.1	4.6	0.1626	83.4	67.8	67.78	179.8	426	46434	1.6414	1.575	27.0
55	2.80	190	2.3	4.6	0.1626	86.3	67.7	67.65	179.4	426	47278	1.6679	1.600	26.9
56	2.85	191	2.4	4.6	0.1626	88.3	66.9	66.81	177.2	426	48122	1.6767	1.609	26.6
57	2.90	193	2.3	4.6	0.1626	90.8	66.4	66.35	176.0	426	48966	1.6945	1.626	26.4
58	2.95	195	2.2	4.6	0.1626	93.3	66.0	65.91	174.8	426	49811	1.7123	1.643	26.2
59	3.00	198	2.3	4.6	0.1626	96.4	65.9	65.82	174.6	426	50655	1.7388	1.668	26.2
60	3.05	201	2.2	4.6	0.1626	99.5	65.8	65.74	174.4	426	51499	1.7655	1.694	26.2
61	3.10	202	2.3	4.6	0.1626	101.6	65.0	65.00	172.4	426	52343	1.7743	1.702	25.9
62	3.15	204	2.2	4.6	0.1626	104.3	64.6	64.61	171.4	426	53188	1.7921	1.719	25.7
63	3.20	206	2.2	4.6	0.1626	107.0	64.3	64.23	170.4	426	54032	1.8098	1.736	25.6
64	3.25	207	2.1	4.6	0.1626	109.2	63.6	63.55	168.6	426	54876	1.8188	1.745	25.3
65	3.30	208	2.1	4.6	0.1626	111.5	62.9	62.89	166.8	426	55720	1.8276	1.754	25.0
66	3.35	211	2.1	4.6	0.1626	114.8	62.9	62.86	166.7	426	56565	1.8542	1.779	25.0
67	3.40	211	2.1	4.6	0.1626	116.5	62.0	61.93	164.3	426	57409	1.8542	1.779	24.7
68	3.45	213	2.2	4.6	0.1626	119.3	61.7	61.61	163.4	426	58253	1.8718	1.796	24.5
69	3.50	213	2.0	4.6	0.1626	121.1	60.8	60.74	161.1	426	59097	1.8720	1.796	24.2
70	3.55	216	2.3	4.6	0.1626	124.5	60.8	60.7	161.1	426	59942	1.8983	1.821	24.2
71	3.60	217	2.2	4.6	0.1626	126.9	60.2	60.2	159.6	426	60786	1.9073	1.830	24.0
72	3.65	217	1.9	4.6	0.1626	128.7	59.4	59.3	157.4	426	61630	1.9076	1.830	23.6
73	3.70	220	2.2	4.6	0.1626	132.2	59.4	59.4	157.4	426	62474	1.9338	1.855	23.6
74	3.75	221	2.0	4.6	0.1626	134.6	58.9	58.8	156.1	426	63319	1.9429	1.864	23.4
75	3.80	222	2.0	4.6	0.1626	137.1	58.4	58.3	154.7	426	64163	1.9518	1.873	23.2
76	3.85	224	2.1	4.6	0.1626	140.1	58.1	58.1	154.1	426	65007	1.9694	1.890	23.1
77	3.90	224	2.3	4.6	0.1626	141.9	57.4	57.3	152.1	426	65851	1.9691	1.889	22.8
78	3.95	226	2.2	4.6	0.1626	145.1	57.2	57.1	151.5	426	66696	1.9870	1.906	22.7
79	4.00	226	1.9	4.6	0.1626	146.9	56.5	56.4	149.7	426	67540	1.9873	1.907	22.5
80	4.05	227	2.3	4.6	0.1626	149.4	56.0	56.0	148.4	426	68384	1.9956	1.915	22.3
81	4.10	229	2.4	4.6	0.1626	152.6	55.8	55.8	147.9	426	69228	2.0132	1.932	22.2
82	4.15	229	2.3	4.6	0.1626	154.4	55.1	55.1	146.1	426	70073	2.0133	1.932	21.9
83	4.20	230	2.3	4.6	0.1626	157.0	54.7	54.7	145.0	426	70917	2.0222	1.940	21.8
84	4.25	230	2.6	4.6	0.1626	158.9	54.1	54.0	143.3	426	71761	2.0216	1.940	21.5
85	4.30	231	2.3	4.6	0.1626	161.4	53.7	53.6	142.3	426	72605	2.0309	1.949	21.4
86	4.35	233	2.4	4.6	0.1626	164.7	53.5	53.5	141.9	426	73450	2.0485	1.965	21.3
87	4.40	233	2.2	4.6	0.1626	166.6	52.9	52.9	140.3	426	74294	2.0488	1.966	21.1
88	4.45	234	2.2	4.6	0.1626	169.3	52.6	52.5	139.3	426	75138	2.0576	1.974	20.9
89	4.50	235	2.3	4.6	0.1626	171.9	52.2	52.1	138.3	426	75982	2.0663	1.983	20.8
90	4.55	236	2.2	4.6	0.1626	174.6	51.8	51.8	137.4	426	76827	2.0753	1.991	20.6
91	4.60	237	2.3	4.6	0.1626	177.2	51.5	51.4	136.5	426	77671	2.0840	1.999	20.5
92	4.65	237	2.1	4.6	0.1626	179.2	50.9	50.9	135.0	426	78515	2.0843	2.000	20.3
93	4.70	238	2.4	4.6	0.1626	181.8	50.6	50.6	134.1	426	79359	2.0926	2.008	20.1
94	4.75	238	1.9	4.6	0.1626	183.8	50.1	50.0	132.8	426	80204	2.0934	2.009	19.9
95	4.80	240	2.2	4.6	0.1626	187.3	50.0	49.9	132.5	426	81048	2.1107	2.025	19.9
96	4.85	241	2.2	4.6	0.1626	190.0	49.7	49.6	131.6	426	81892	2.1195	2.034	19.8
97	4.90	241	2.2	4.6	0.1626	192.0	49.2	49.1	130.3	426	82736	2.1195	2.034	19.6
98	4.95	241	2.4	4.6	0.1626	194.0	48.7	48.6	128.9	426	83580	2.1190	2.033	19.4
99	5.00	243	2.6	4.6	0.1626	197.6	48.6	48.5	128.7	426	84425	2.1363	2.050	19.3
100	5.05	244	2.6	4.6	0.1626	200.4	48.3	48.2	128.0	426	85269	2.1451	2.058	19.2

Tabela 6. Tabela de resultados de ensaio 3

med.	Corrente (A)	Tensão (V)	R ( $\Omega$ )	tm (ms)	F.P. (COS $\phi$ )	S (W)	Z ( $\Omega$ )	XL ( $\Omega$ )	L (mH)	N (esp)	H (Ae/m)	$\Phi$ (mWb)	B (T)	$\mu_r$ (H/m)
101	5.10	245	2.6	4.6	0.1626	203.2	48.0	48.0	127.2	426	86113	2.1539	2.067	19.1
102	5.15	245	2.7	4.6	0.1626	205.2	47.6	47.5	126.0	426	86957	2.1536	2.066	18.9
103	5.20	246	2.7	4.6	0.1626	208.0	47.3	47.2	125.3	426	87802	2.1624	2.075	18.8
104	5.25	246	2.4	4.6	0.1626	210.0	46.9	46.8	124.1	426	88646	2.1631	2.075	18.6
105	5.30	246	2.5	4.6	0.1626	212.0	46.4	46.3	122.9	426	89490	2.1628	2.075	18.5
106	5.35	247	2.6	4.6	0.1626	214.9	46.2	46.1	122.3	426	90334	2.1714	2.083	18.4
107	5.40	249	2.8	4.6	0.1626	218.7	46.1	46.0	122.1	426	91179	2.1886	2.100	18.3
108	5.45	250	2.9	4.6	0.1626	221.6	45.9	45.8	121.4	426	92023	2.1971	2.108	18.2
109	5.50	248	2.8	4.6	0.1626	221.8	45.1	45.0	119.4	426	92867	2.1795	2.091	17.9
110	5.55	250	2.6	4.6	0.1626	225.7	45.0	45.0	119.3	426	93711	2.1978	2.109	17.9
111	5.60	251	3.0	4.6	0.1626	228.6	44.8	44.7	118.6	426	94556	2.2054	2.116	17.8
112	5.65	251	2.4	4.6	0.1626	230.6	44.4	44.4	117.7	426	95400	2.2071	2.118	17.7
113	5.70	252	2.9	4.6	0.1626	233.6	44.2	44.1	117.0	426	96244	2.2145	2.125	17.6
114	5.75	252	2.8	4.6	0.1626	235.7	43.8	43.7	116.0	426	97088	2.2147	2.125	17.4
115	5.80	252	2.8	4.6	0.1626	237.7	43.5	43.4	115.0	426	97933	2.2146	2.125	17.3

O gráfico abaixo é foi traçado com base na tabela acima e representa a curva da Indução magnética em função do campo magnético, B(H), aplicado. Neste gráfico é possível observar que o a indução responde linearmente ao campo aplicado em até aproximadamente 1.5T. Após este ponto considera-se que o núcleo entrou em regime de saturação.

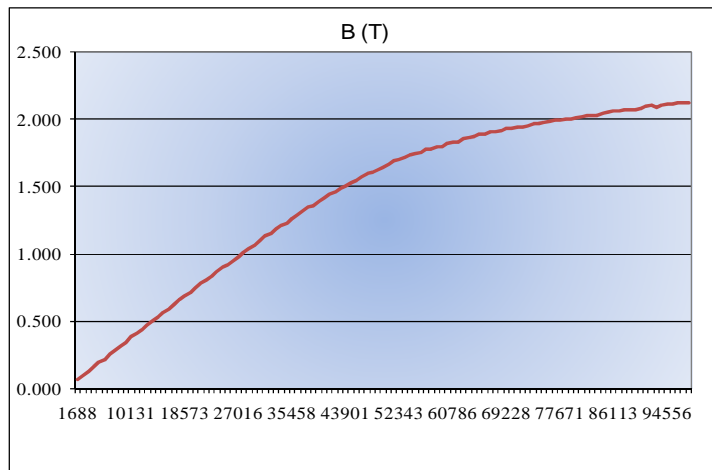


Figura 12. Curva de magnetização BxH medida

Segue abaixo a curva da permeabilidade magnética do núcleo de aço silício utilizada no protótipo, em função do campo magnético aplicado. Para calcular a densidade de energia por volume do núcleo de silício nos projetos utilizados para a validação dos cálculos foi utilizado estes valores de permeabilidade relativa, mesmo sabendo que poderia haver diferenças entre o valor calculado e o medido quando se utilizasse outro tipo de chapa de silício diferente do tipo utilizado no protótipo ensaiado, porém isso se fazia necessário já que a medição de vários protótipos consumiria muito tempo.

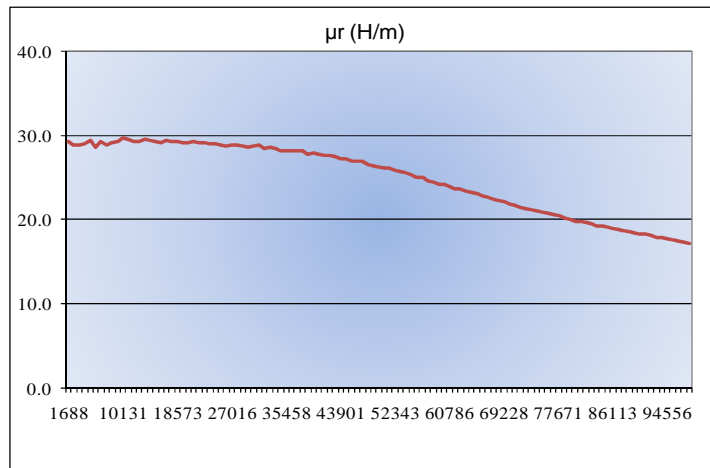


Figura 13. Curva da permeabilidade do núcleo medido

## 5.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE DO PROTÓTIPO COM NÚCLEO COM DE AR.

A medição da reatância de núcleo de ar foi realizada conforme as medições do protótipo. A resistência da bobina foi determinada pelo fator de potência medido, considerando que o reator não apresenta perdas no núcleo por histerese e correntes circulantes. A tabela abaixo apresenta os resultados medidos.

Tabela 7. Tabela de medições do reator com núcleo de ar

med.	Corrente (A)	Tensão (V)	R (Ω)	tm (ms)	F.P. (COSφ)	S (W)	Z (Ω)	XL (Ω)	L (mH)	N (esp)	H (Ae/m)	Φ (mWb)	B (T)	μr (H/m)
ar	1,96	9,65	3,598	6,34	0,7307	13,8	4,92	3,36	8,92	426	33094	0,0580	0,046	1,12

Calculando com a mesma metodologia aplicada às medições com o núcleo de aço silício foi reparado que a permeabilidade relativa do ar não foi 1 como esperado, isto se deve à imprecisão nas medições das dimensões, medições elétricas e até mesmo arredondamentos considerados nos cálculos, diante destas condições considero o resultado satisfatório.



### 5.3. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE PROJETOS DIVERSOS PARA VALIDAÇÃO DO CÁLCULO

A tabela abaixo mostra os resultados de ensaio do protótipo ensaiado em outro laboratório fora da USF e mais dois outros projetos sendo que o projeto 2 foi mantido a mesma impedância e alterado o projeto e o projeto 3 foi alterado desde a impedância e conseqüentemente todo o projeto. Note que nos dois casos a dimensão da chapa do núcleo foi alterada.

Tabela 8. Tabela de validação do cálculo

Dados de projeto									Corrente (A)	Perdas (W)	Massa enrolamento (kg)
N	426	Ip (A)	3.041	Hb (mm)	35.68	Chapa (")	1	Calculado	2.186	23.9	0.104
Bitola (AWG)	20	H (Ae/m)	36303	Cib (mm)	48	Tipo	gno6	Medido	2.09	27.1	0.108
Condutor	Alumínio	B (T)	1.284	Llb (mm)	26	Entreferro (mm)	2	Diferença	-0.096	3.2	0.004
I(A)	2.15	Vc (V)	152	Lb	9.81	Empilhamento (mm)	42	Erro (%)	-2.2	6.2	1.7

Dados de projeto									Corrente (A)	Perdas (W)	Massa enrolamento (kg)
N	424	Ip (A)	3.041	Hb (mm)	32.112	Chapa (")	7/8	Calculado	2.134	24.0	0.108
Bitola (AWG)	20	H (Ae/m)	40147	Cib (mm)	53	Tipo	gno6	Medido	1.991	28.1	0.1249
Condutor	Alumínio	B (T)	1.318	Llb (mm)	22.9	Entreferro (mm)	1.5	Diferença	-0.143	4.0	0.017
I(A)	2.15	Vc (V)	152	Lb	10.70	Empilhamento (mm)	47	Erro (%)	-3.5	7.7	7.1

Dados de projeto									Corrente (A)	Perdas (W)	Massa enrolamento (kg)
N	403	Ip (A)	4.243	Hb (mm)	41.07	Chapa (")	1 1/8	Calculado	3.218	34.7	0.172
Bitola (AWG)	18	H (Ae/m)	41631	Cib (mm)	47.7	Tipo	TC	Medido	2.940	41.8	0.1753
Condutor	Alumínio	B (T)	1.500	Llb (mm)	29.6	Entreferro (mm)	1.6	Diferença	-0.278	7.1	0.004
I(A)	3.00	Vc (V)	180	Lb	12.21	Empilhamento (mm)	40	Erro (%)	-4.5	9.2	1.1

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos observa-se que existe um erro muito pequeno dos valores calculados com os medidos, porém estes erros são causados por tolerâncias nas características dos materiais utilizados, imperfeições na montagem do projeto e até mesmo erros nas medições do protótipo devido às condições de ensaio ou arredondamentos utilizados na planilha de coleta de dados.

Este mesmo erro também mostra que a metodologia de cálculo e da aquisição dos dados estava é coerente. É evidente que com uma estatística melhor elaborada com mais dados de outros projetos e com melhores condições de ensaio fará com que o cálculo seja mais preciso.

Um caso que mostrou a importância de ir a fundo nas considerações do projeto foi que na prática ao comparar a massa calculada com a pesada havia um desvio de massa de aproximadamente 13,3% abaixo do calculado então foi aplicado um fator de 0,867 à massa calculada. Ao desenhar a figura 5 foi reparado que havia um ângulo de  $30^\circ$  entre as tangentes do condutor circular e que a dimensão  $L_b$  era de 0,867 em relação se fosse considerado um condutor sobre o outro. Ficou claro que o condutor cedia com a relação do  $\text{seno}(70^\circ)$  ou o  $\text{cos}(30^\circ)$  que é aproximadamente 0,8660 diminuindo na mesma proporção o comprimento médio do condutor e consequentemente sua massa.

Além de atingir os resultados esperados, mesmo com alguma imprecisão, este trabalho foi importante para mostrar que alguns fundamentos que são ignorados no projeto são percebidos na prática. Concluí que perceber e descobrir quais as causas destas imprecisões nos cálculos é a principal função do engenheiro.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Hayt, W. H. **Eletromagnetismo**: 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros técnicos e científicos, 1988

Fitzgerald, A. E.; Kingsley, C.; Kusko, A. **Máquinas elétricas**: 2. ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill do Brasil, Ltda.

Falcone, A. G. **Eletromecânica: transformadores e transdutores, conversão de eletromecânica de energia volume 1**: 1. ed. São Paulo, SP: Editora Edgard Blücher Ltda, 1992.

Oliveira, J. C. **Transformadores: teoria e ensaios**. 1. ed. São Paulo: E. Blüsher, 1984-1990.

Martignoni, A. **Transformadores volume 2**: 1. ed. Porto Alegre, RS: Editora Globo, 1973.