

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS  
MAGNÉTICOS APLICADOS AO ACIONAMENTO DE  
LÂMPADAS FLUORESCENTES SEM ELETRODOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Natalia Braun Chagas**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**



**PPGEE / UFSM, RS**

**CHAGAS, Natalia Braun**

**Mestre**

**2014**



# **ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS MAGNÉTICOS APLICADOS AO ACIONAMENTO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES SEM ELETRODOS**

**Natalia Braun Chagas**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia: Eletrônica de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nederson do Prado**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pela autora.

Chagas, Natalia Braun

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS MAGNÉTICOS  
APLICADOS AO ACIONAMENTO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES  
SEM ELETRODO / Natalia Braun Chagas - 2014.

126 p.; 30 cm

Orientador: Ricardo Nederson do Prado

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2014.

1. Materiais Magnéticos 2. Lâmpadas fluorescentes sem eletrodos  
I. Nederson do Prado, Ricardo II. Título.

---

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Natalia Braun Chagas e Ricardo Nederson do Prado. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito da autora.

Endereço: Rua Valentin Farias de Lima, 350 / ap 202. CEP: 97110-670 Bairro: Camobi, Santa Maria, RS. Fone: (0xx)55 96307906; email: natalia.b.chagas@gedre.ufsm.br

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS MAGNÉTICOS  
APLICADOS AO ACIONAMENTO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES  
SEM ELETRODOS**

elaborada por  
**Natalia Braun Chagas**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Ricardo Nederson do Prado, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Adroaldo Raizer, Dr. (UFSC)**

---

**Marcelo Freitas da Silva, Dr. (UFSM)**

---

**Álysson Raniere Seidel, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 02 de abril de 2014





*Aos meus pais Juarez e Marli,  
pelo amor, companheirismo e formação.  
Aos meus irmãos Mauricio e Joana Aurora,  
pela rivalidade que sempre me fez querer melhorar.  
You are simple the BEST.*



*Ao meu amado noivo Paulo César  
pelo carinho,  
pela compreensão,  
pelo suporte técnico e moral,  
nestes seis anos de companheirismo.*



## **AGRADECIMENTOS**

---

Agradeço ao professor Ricardo Nederson do Prado pela confiança nas minhas capacidades, por ter me ensinado, orientado, sempre transmitindo segurança no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Marcelo Freitas da Silva, Tiago Bandeira Marchesan e Marco Antônio Dalla Costa pela troca de experiências e pelas orientações dadas dentro do GEDRE.

Ao Grupo de Inteligência em Iluminação – GEDRE e por todas as pessoas que se esforçaram para tornar este grupo referência no estudo de sistemas eletrônicos para iluminação.

Agradeço aos colegas engenheiros(as) Marson Eduardo Schlittler, Jeferson Fraytag, Veridiane Rosa, Ricardo Nunes Marchesan e Maikel Menke, pela dedicação no auxílio para o desenvolvimento deste trabalho. Aos demais alunos do GEDRE pelo apoio e amizade demonstrados.

Aos professores membros da banca pelas valiosas contribuições a este trabalho.

Aos servidores do NUPEDDEE e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelos ensinamentos e suporte para a realização deste trabalho. À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade da realização de um curso de pós-graduação e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.



## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS MAGNÉTICOS APLICADOS AO ACIONAMENTO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES SEM ELETRODOS**

AUTORA: NATALIA BRAUN CHAGAS

ORIENTADOR: RICARDO NEDERSON DO PRADO

Local da Defesa e Data: Santa Maria - RS, 02 de abril de 2014.

Este trabalho apresenta um estudo das características de materiais magnéticos. A aplicação deste estudo é o acionamento de uma lâmpada fluorescente sem eletrodos (LFSE). O acionamento deste tipo de lâmpada é realizado a partir de efeitos eletromagnéticos, sem a necessidade de eletrodos. Em virtude disso, as LFSE apresentam, dentre as demais lâmpadas de descarga, uma longa vida útil associada a uma baixa depreciação do fluxo luminoso, representando uma alternativa atraente para sistemas de iluminação. Devido as características magnéticas das LFSE, a frequência de operação desse tipo de sistema deve ser elevada, com o objetivo de reduzir o volume dos elementos indutivos, evitando o sombreamento causado pelos mesmos. Com isso, é proposto o estudo de diferentes materiais magnéticos capazes de operar sob estas circunstâncias. Foram realizadas experiências a fim de obter características de materiais, tais como, a curva de magnetização e as perdas de energia, e simulações para estudar características não acessíveis através de meios práticos. Quatro diferentes materiais são analisados, os ferrites N87 (da EPCOS) e IP12E (da THORNTON) e as ligas amorfas e nanocristalinas. No caso dos ferrites foi possível realizar experiências práticas e comprovar que os mesmos são capazes de suprir as necessidades de funcionamento da LFSE. Porém, não foi possível adquirir toroides de ligas, amorfas ou nanocristalinas, com o diâmetro interno necessário para acomodar o bulbo da LFSE, portanto, resultados de simulações são apresentados para os projetos destes núcleos. Ao final do trabalho são realizadas comparações entre os resultados adquiridos.

**Palavras-chave:** Materiais Magnéticos, Lâmpadas Fluorescentes sem Eletrodos, Elementos Finitos.





## **ABSTRACT**

Master Thesis

Post-Graduation Program in Electrical Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF MAGNETIC MATERIALS APPLIED TO DRIVE ELECTRODELESS FLUORESCENT LAMPS**

AUTHOR: NATALIA BRAUN CHAGAS

ADVISOR: RICARDO NEDERSON DO PRADO

Place and Date: Santa Maria - RS, April 02<sup>nd</sup>, 2014.

This paper presents a study of the characteristics of magnetic materials. The application of this study is the feeding of an electrodeless fluorescent lamp (EFL). This type of lamp is driven by electromagnetic effects and, because of this, the electrodes are eliminated. Thus, the EFL has longer lifetime associated with low lumen depreciation representing an alternative to lighting systems among other discharge lamps. Because of the EFL magnetic characteristics, the operation frequency of this type of system has to be high in order to reduce the size of inductive elements avoiding the shadowing. Thus, the study of different magnetic materials capable of operating under these circumstances is proposed. Experiments were performed in order to obtain material characteristics such as the magnetization curve and the energy losses, and simulations were used to study characteristics not available through practical means. Four different materials are analyzed, the ferrites N87 (from EPCOS) and IP12E (from THORNTON) and amorphous and nanocrystalline alloys. In the ferrites cases, it was possible to carry out practical experiments and prove that they are able to meet the operating needs of EFL. However, it was not possible to acquire toroids alloys, amorphous or nanocrystalline, with the internal diameter required to accommodate the bulb of the EFL therefore, results of simulations are presented for these cores projects. At the end of the work, comparisons are made between the results obtained.

**Keywords:** Magnetic Materials, Electrodeless Fluorescent lamps, Finite Elements.



## LISTA DE FIGURAS

---

### Capítulo 1

Figura 1.1 - Espectro de radiação eletromagnética. Em detalhe, a radiação visível ao olho humano.....	1
Figura 1.2 – Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos (Roberts, 2011).....	3
Figura 1.3 - Patentes históricas de lâmpadas sem eletrodos .....	4
Figura 1.4 – Philips QL.....	6
Figura 1.5 - GE Genura, LFSE de indução com bobina interna .....	6
Figura 1.6 - AMKO Solara 400 W – dimensões 15,8 x 104,9 cm (Solara,2012).....	7
Figura 1.7 - Osram Sylvania Endura.....	7
Figura 1.8 - Desenvolvimento dos materiais magnéticos macios (Shen, 2006) .....	9
Figura 1.9 - Gráfico das características dos materiais magnéticos (Datasheet FINEMET, 2005) .....	14
Figura 1.10 - Aplicações de materiais nanocristalinos e amorfos (Gavrila e Ionita, 2002)...	15

### Capítulo 2

Figura 2.1 - Gráfico iluminância (valores relativos) por tensão (Long et al, 2006) .....	3
Figura 2.2 - Laço de Histerese teórico .....	6
Figura 2.3 - (a) Fina chapa de material magnético inserida em um fluxo magnético variável. (b) Correntes induzidas na chapa.....	8
Figura 2.4 - Laço de Histerese para todas as perdas magnéticas do núcleo (Ribbenfjård, 2010) .....	10
Figura 2.5 - Laço de Histerese de um material nanocristalino para diversas frequências (Shen, 2006).....	10
Figura 2.6 - Energia da perda de um material magnético pela frequência (Ribbenfjård, 2010) .....	11
Figura 2.7 – Montagem experimental para obter os dados da curva BH.....	12
Figura 2.8 - Montagem experimental para obter os dados para determinar as perdas do núcleo .....	15
Figura 2.9 - Tensão e Corrente na Lâmpada antes da ignição da mesma, aquisição experimental .....	16

Figura 2.10 - Tensão e Corrente na Lâmpada após a ignição da mesma, aquisição experimental .....	16
--	----

### Capítulo 3

Figura 3.1 – Modelo 3D para simulação da curva de magnetização do núcleo .....	2
Figura 3.2 – Modelo 2D para simulação das perdas do núcleo .....	3
Figura 3.3 – Protótipo contruido para testes experimentais .....	3
Figura 3.4 – Laço BH e curva de magnetização do núcleo de ferrite N87 obtidas experimentalmente.....	4
Figura 3.5 – Curvas de perdas do material N87 (Datasheet EPCOS, 2006) .....	4
Figura 3.6 – Fotos do núcleo durante o experimento de levantamento de perdas.....	5
Figura 3.7 – Resultados experimentais da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização .....	6
Figura 3.8 – Resultados de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização .....	6
Figura 3.9 – Resultados experimentais e de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização no mesmo gráfico .....	7
Figura 3.10 – Comparação da curva de magnetização inserida no modelo de simulação e a curva gerada pela simulação .....	7
Figura 3.11 – Resultados experimentais da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente.....	8
Figura 3.12 – Resultados de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente.....	9
Figura 3.13 – Resultados experimentais e de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente no mesmo gráfico.....	9
Figura 3.14 – Valor da indutância do núcleo durante a simulação com a tensão nominal de operação .....	10
Figura 3.15 – Valor da indutância do núcleo medido experimentalmente .....	10
Figura 3.16 – Fotos da lâmpada (e do núcleo) em funcionamento.....	12
Figura 3.17 – Comparação gráfica dos dados das Tabelas 3.2 e 3.3 .....	13
Figura 3.18 – Variação das perdas do material N87 com a temperatura (Datasheet EPCOS, 2006) .....	14
Figura 3.19 – Luminária da LFSE Endura (Datasheet Endura, 2012) .....	15

Figura 3.20 – Eficiência luminosa da lâmpada com relação a temperatura do amálgama da mesma (Datasheet Endura, 2012).....	15
Figura 3.21 – Curvas de magnetização típicas do material N87 para 25°C e 100°C (Datasheet EPCOS, 2006).....	16
Figura 3.22 – Densidade de fluxo magnético no núcleo para o instante de tempo em que a corrente no mesmo é máxima.....	17

## Capítulo 4

Figura 4.1 – Montagem experimental para obter os dados do laço BH.....	2
Figura 4.2 – Modelo 3D para simulação da curva de magnetização do núcleo.....	3
Figura 4.3 – Modelo 2D para simulação das perdas do núcleo .....	3
Figura 4.4 – Protótipo para testes experimentais .....	4
Figura 4.5 – Curvas BH e de magnetização do núcleo de ferrite IP12E obtidas experimentalmente .....	4
Figura 4.6 – Curvas de perdas do material IP12E (Datasheet Thornton, 2008) .....	5
Figura 4.7 – Fotos do núcleo durante o experimento de levantamento de perdas .....	5
Figura 4.8 – Resultados experimentais da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização .....	6
Figura 4.9 – Resultados de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização .....	7
Figura 4.10 – Resultados experimentais e de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização no mesmo gráfico .....	7
Figura 4.11 – Comparação da curva de magnetização inserida no modelo de simulação (traço vermelho) e a curva gerada pela simulação (traço verde).....	8
Figura 4.12 – Resultados experimentais da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente .....	9
Figura 4.13 – Resultados de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente .....	9
Figura 4.14 – Resultados experimentais e de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente no mesmo gráfico .....	10
Figura 4.15 – Valor da indutância do núcleo durante a simulação com a tensão nominal de operação .....	11
Figura 4.16 – Valor da indutância do núcleo medido experimentalmente .....	11

Figura 4.17 – Fotos da lâmpada (e do núcleo) em funcionamento.....	13
Figura 4.18 – Comparação gráfica dos dados das Tabelas 3.2 e 3.3 .....	14
Figura 4.19 – Curvas de magnetização típicas do material IP12E para 23°C e 80°C (Datasheet THORNTON, 2008) .....	15
Figura 4.20 – Densidade de fluxo magnético no núcleo para o instante de tempo em que a corrente neste é máxima .....	16
Figura 4.21 – Fotos da lâmpada sem toróides e com os núcleos IP12E.....	17
Figura 4.22 – Circuito de alimentação da LFSE .....	18
Figura 4.23 – Formas de onda de tensão e corrente no instante de ignição da LFSE-IP12E. Tensão máxima: 1260V. Corrente máxima: 600 mA .....	18
Figura 4.24 – Ampliação das formas de onda de tensão e corrente no instante de ignição da LFSE-IP12E.....	19
Figura 4.25 – Formas de onda de tensão, corrente e potência para a potência nominal da LFSE-IP12E .....	19
Figura 4.26 – Densidade de fluxo magnético no núcleo para o instante de tempo em que a corrente neste é máxima .....	20
Figura 4.27 – LFSE-IP12E em funcionamento logo após sua ignição.....	21
Figura 4.28 – LFSE-IP12E em funcionamento 1 hora e 30 minutos após sua ignição.....	21

## Capítulo 5

Figura 5.1 – Representação da liga amorfa .....	2
Figura 5.2 – Representação Curvas de magnetização utilizadas para o ferrite N87 e para a liga amorfa .....	2
Figura 5.3 – Representação gráfica das perdas versus densidade de fluxo (BP) da liga amorfa (Datasheet Metglas, 2009) .....	3
Figura 5.4 – Representação da liga nanocristalina .....	4
Figura 5.5 – Comparação entre dados e equação de regressão do material N87 .....	6
Figura 5.6 – Comparação entre dados e equação de regressão do material IP12E .....	6
Figura 5.7 – Comparação entre dados e equação de regressão do material Amorfo.....	6
Figura 5.8 – Comparação entre dados e equação de regressão do material Nanocristalino.....	6
Figura 5.9 – Representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 5.2 .....	7

## LISTA DE TABELAS

---

### Capítulo 1

Tabela 1.1 – Vantagens e desvantagens do Ferrite (Magnetics, 2000) .....	11
--	----

### Capítulo 2

Tabela 2.1 – Parâmetros experimentais do filtro LCC .....	16
---	----

Tabela 2.2 – Dados Experimentais das Perdas de um núcleo N87.....	17
---	----

### Capítulo 3

Tabela 3.1 – Parâmetros das montagens experimentais .....	2
---	---

Tabela 3.2 – Perdas Experimentais e de Simulação para um núcleo magnético.....	11
--	----

Tabela 3.3 – Perdas Experimentais para 40°C e de Simulação para 100°C para um núcleo magnético.....	13
---	----

### Capítulo 4

Tabela 4.1 – Parâmetros da montagem experimental.....	2
---	---

Tabela 4.2 – Perdas Experimentais e de Simulação para um núcleo magnético.....	12
--	----

Tabela 4.3 – Perdas Experimentais para 50°C e de Simulação para 100°C para um núcleo magnético.....	14
---	----

### Capítulo 5

Tabela 5.1 – Coeficientes das equações que descrevem o comportamento das perdas em função da tensão eficaz aplicada sobre o material.....	5
---	---

Tabela 5.2 – Perdas Magnéticas apresentadas para os quatro materiais analisados.....	7
--	---

Tabela 5.3 – Aumento percentual das perdas magnéticas apresentadas para os quatro materiais analisados.....	8
---	---





## LISTA DE ABREVIATURAS

---

### Capítulo 1

LFSE	Lâmpada Fluorescente Sem Eletrodos (singular ou plural)
UV	Radiação Ultravioleta
LF	Lâmpada Fluorescente com eletrodos (singular ou plural)
RF	Radio Frequência
AC	Corrente Alternada ( <i>Alternative Current</i> )
EMI	Interferência Eletromagnética ( <i>Eletromagnetic Interference</i> )

### Capítulo 2

IRC	Índice de Reprodução de Cores
BH	Laço de histere

### Capítulo 3

3D	Três Dimensões
2D	Duas Dimensões
LCR	Equipamento capaz de medir indutância, capacitância e resistência

### Capítulo 4

LFSE-IP12E	Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos com núcleos de ferrite IP12E (singular ou plural)
------------	--

### Capítulo 5

BP	Curva de perdas <i>versus</i> densidade de fluxo magnético
----	--



## LISTA DE SÍMBOLOS

---

### Capítulo 1

$\gamma$	Gama
Nm	Nanômetros
Hz	Hertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
W	Watts
K	Kelvin
lm/W	Lúmens por Watts
FeSi	Ferro-Silício
FeNi	Ferro-Níquel
°C	Graus Celsius
kHz	Quilohertz
NiFe	Níquel-Ferro
T	Tesla
Fe	Ferro
Co	Cobalto
Ni	Níquel
B	Boro
C	Carbono
P	Fósforo
Si	Silício
kg/mm <sup>2</sup>	Quilograma por milímetro quadrado
$\mu\text{m}$	Micrômetro
FeSiB	Ferro, Silício e Boro
Nb	Nióbio
Cu	Cobre
A/m	Ampère por metro
$\mu_r$	Permeabilidade Relativa
$B_{SAT}$	Densidade de Fluxo Saturado
MnZn	Manganês-Zinco
FeAlSi	Ferro-Alumínio-Silício
Si-Aço	Silício-Aço

### Capítulo 2

$k$	Coefficiente de Acoplamento
$P_{HE}$	Perda de Histerese Estática
$P_d$	Perda por Corrente Parasita Dinâmica
$P_A$	Excesso de Perda por Corrente Parasita ou Perda Anômala

descarga H	Descarga do tipo indutiva
descarga E	Descarga do tipo capacitiva
lx	Lux
V	<i>Volts</i>
J/m <sup>3</sup>	<i>Joule</i> por metro cúbico
H	Intensidade de Campo magnético
H <sub>max</sub>	Valor de Máxima Intensidade de Campo
B	Densidade de Fluxo magnético
P <sub>H</sub>	Perda por histerese
k <sub>H</sub>	Constante Dependente das Características Intrínsecas do Material
α	Valor Genérico, do qual Depende da Indução Atingida na Saturação, Variando entre 1,5 e 2,5
f	Frequência do Campo Magnético
W/kg	Watts por quilograma
lx	Comprimento em x da chapa
ly	Comprimento em y da chapa
d	Espessura da chapa
J	Densidade de corrente (A/m <sup>2</sup> )
P <sub>F</sub>	Perdas por correntes parasitas
k <sub>F</sub>	Fator Numérico que Depende do Sistema de Unidades Utilizado
t	Espessura de Chapa(m)
B <sub>ef</sub>	Valor Eficaz da Indução
ρ	Resistividade do Material (Ω/m)
S	Área da Secção Transversal da Lâmina
G	Coefficiente Adimensional Dependente da Estrutura dos Domínios Magnéticos
V <sub>o</sub>	Parâmetro que Relaciona o Efeito que a Microestrutura tem na Criação de Regiões Ativas
Σ	Condutividade do Material
I <sub>1</sub> (t)	Corrente do enrolamento primário
V <sub>2</sub> (t)	Tensão do enrolamento secundário
N <sub>2</sub>	Número de espiras do enrolamento secundário
θ	Fluxo magnético
N <sub>1</sub>	Número de espiras do enrolamento primário
l <sub>M</sub>	Comprimento do Caminho Médio do Núcleo Toroidal
A <sub>T</sub>	Área Transversal do núcleo toroidal
V <sub>N</sub>	Volume do núcleo
W <sub>H</sub>	Energia dissipada pela perda por histerese
T <sub>S</sub>	Período da forma de onda
V <sub>DC</sub>	Tensão contínua, tensão de barramento
S1, S2	Interruptores do Inversor <i>Half-Bridge</i>
C <sub>S</sub>	Capacitor Série
L <sub>S</sub>	Indutor Série
C <sub>P</sub>	Capacitor Paralelo
R <sub>P</sub>	Resistor Paralelo

$P_T$	Potência Ativa Consumida
$V_I(t)$	Tensão do enrolamento primário
$V_{\text{eficaz}}$	Tensão eficaz ( <i>root mean square</i> (RMS) - valor quadrático médio)
A	Ampère

### Capítulo 3

$\text{kW/m}^3$	Quilowatts por metro cúbico
s	Segundos
H	Henry
$P_V$	Perdas

### Capítulo 5

$P_x(V_{\text{eficaz}})$	Função que apresenta as perdas em função da tensão eficaz sobre o núcleo
$P_{N87}$	Perdas do material ferrite N87
$P_{IP12E}$	Perdas do material ferrite IP12E
$P_{\text{amorfo}}$	Perdas do material amorfo
$P_{\text{nanocristalino}}$	Perdas do material nanocristalino



# SUMÁRIO

---

**Introdução.....**

## **Capítulo 1**

LFSE E MATERIAIS MAGNÉTICOS .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Geração de Luz .....	1
1.3 Histórico das LFSE.....	3
1.4 Materiais Magnéticos.....	8
1.4.1 Ferrite .....	10
1.4.2 Ligas amorfas .....	11
1.4.3 Materiais nanocristalinos .....	12
1.4.4 Comparativo entre os materiais magnéticos .....	13
1.5 Conclusão .....	16

## **Capítulo 2**

LÂMPADAS FLUORESCENTES SEM ELETRODOS.....	1
2.1 Introdução .....	1
2.2 Processo de partida, descarga, e operação em regime permanente .....	1
2.3 Tipos de Perdas em Núcleos Magnéticos .....	5
2.3.1 Perdas Estáticas.....	6
2.3.2 Perdas Dinâmicas .....	7
2.3.3 Perdas Totais .....	9
2.4 Aquisição das características do núcleo .....	11
2.4.1 Levantamento da curva de magnetização do núcleo da LFSE.....	12
2.4.2 Levantamento das perdas magnéticas experimentalmente .....	14
2.5 Conclusão .....	18

### **Capítulo 3**

NÚCLEO DA LFSE ENDURA/OSRAM DE MATERIAL FERRITE N87 .....	1
3.1 Introdução.....	1
3.2 Calibragem da simulação do núcleo N87 da LFSE.....	1
3.3 Comparação entre resultados experimentais e simulações .....	5
3.4 Conclusão .....	17

### **Capítulo 4**

NÚCLEO DE MATERIAL FERRITE IP12E .....	1
4.1 Introdução.....	1
4.2 Calibragem da simulação do núcleo IP12E.....	1
4.2.1 Levantamento da curva de magnetização do núcleo IP12E .....	1
4.3 Comparação entre resultados experimentais e simulações .....	6
4.4 LFSE com o núcleo IP12E.....	16
4.5 Conclusão .....	22

### **Capítulo 5**

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	1
5.1 Introdução.....	1
5.2 Material Amorfo.....	1
5.3 Material Nanocristalino.....	3
5.4 Comparação entre os resultados de simulação .....	4
5.5 Conclusão .....	9

**Conclusão Final.....**

**Trabalhos Futuros.....**

**Referências Bibliográficas.....**



# INTRODUÇÃO

---

Com o crescente uso de energia elétrica se torna cada vez mais necessário o uso de sistemas cada vez mais eficientes, econômicos e de reduzido impacto ambiental, a fim de reduzir-se o consumo de energia. Assim, a eficientização energética se torna uma pauta constante em nossa sociedade.

A pesquisa e o desenvolvimento contínuo resultaram na criação de diversos tipos de lâmpadas, com diferentes características e aplicações. Neste conceito é possível destacar-se os sistemas de iluminação que empregam Lâmpadas Fluorescentes Sem Eletrodos, no qual o estudo sobre a mesma é pouco difundido (Da Silva, 2011).

A Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos (LFSE) possui como principal característica a ausência de eletrodos, o que proporciona uma vida útil de até 100.000 horas, cerca de oito vezes maior que as lâmpadas fluorescentes tradicionais (*Datasheet* ENDURA, 2012). Outra importante característica desta lâmpada é a elevada potência que a mesma é capaz de fornecer. Este fato, combinado com a elevada eficiência luminosa da lâmpada, permite que a mesma seja utilizada em aplicações que demandem elevados níveis de luminosidade.

Como qualquer outra fluorescente a LFSE opera a partir de uma descarga elétrica, no entanto na LFSE a descarga é produzida a através de efeitos eletromagnéticos. Desta maneira, a frequência de operação desse tipo de lâmpada é elevada, a fim de que haja a redução do volume dos elementos indutivos.

Por se tratar de uma lâmpada de indução, a parte magnética desta lâmpada deve ser estudada. No entanto na literatura é encontrada uma maior quantidade de material sobre o modelo, circuito de acionamento, controle de potência e descarga da lâmpada. Havendo uma carência de estudos sobre os núcleos da lâmpada.

A transferência de energia na LFSE ocorre pelo mesmo princípio que a de um transformador. Considera-se que a lâmpada é representada por um primário e um secundário, onde o primário é o núcleo magnético e o secundário a descarga no interior da lâmpada (Statnic e Tanach, 2006). As perdas do núcleo magnético diminuem a eficiência de transferência de energia para a descarga. Estas perdas estão relacionadas com a tensão da

lâmpada e da frequência de operação da mesma, bem como o material do núcleo e formato da bobina empregada.

A lâmpada utilizada como foco deste estudo apresenta uma potência de 100 W sendo alimentada em 250 kHz, sendo esta considerada uma frequência, relativamente, baixa para este tipo de lâmpada que pode ser operada até mesmo em gigahertz. Devido a frequência de operação, o estudo do material magnético utilizado na lâmpada torna-se importante para a otimização do mesmo.

Com isso, este trabalho tem por objetivo maior aprofundamento nos estudos sobre as perdas por histerese e correntes parasitas que ocorrem nos núcleos. Assim, como o estudo de outros materiais magnéticos, a fim de elevar-se a eficiência da lâmpada. Desta maneira acrescentando-se também o fluxo luminoso produzida pela mesma.

O presente trabalho está dividido da seguinte forma:

- *Capítulo 1:* Apresenta um histórico sobre a geração de luz, apresentando também as principais diferenças entre três materiais magnéticos macios: ferrite, amorfo e nanocristalino;
- *Capítulo 2:* Este capítulo apresenta o princípio de funcionamento das lâmpadas fluorescente sem eletrodos. Além de uma abordagem simplificada dos tipos de perdas presentes nos núcleos magnéticos;
- *Capítulo 3:* Traz uma análise do núcleo magnético presente na lâmpada, por meio de simulações e experimentalmente;
- *Capítulo 4:* Este capítulo apresenta as mesmas análises realizadas no capítulo 3 para o material ferrite N87 efetuadas para o material ferrite IP12E. Núcleos toroidais deste material são utilizados para acionar a LFSE;
- *Capítulo 5:* Este capítulo apresenta o projeto de núcleos magnéticos para a lâmpada utilizando outros materiais, além de simulações e comparações entre os resultados alcançados com os diferentes materiais.

Em seguida apresenta-se uma conclusão geral do trabalho desenvolvido sintetizando resultados obtidos e dificuldades encontradas.

Por fim, são apresentadas propostas sugeridas para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 1

# LFSE E MATERIAIS MAGNÉTICOS

---

### 1.1 Introdução

Neste capítulo inicial é apresentado o processo de geração de luz da lâmpada fluorescente sem eletrodos, assim como breve histórico da mesma. Neste mesmo capítulo é também apresentada uma discussão sobre diversos materiais magnéticos.

### 1.2 Geração de Luz

Dentro do espectro de energia há uma pequena faixa que corresponde à luz visível ao olho humano. Esta é a radiação composta por fótons que são capazes de sensibilizar o olho de uma pessoa. O restante do espectro de energia é formado por raios Gama ( $\gamma$ ), raios X, ultravioletas, infravermelhos, micro-ondas e ondas de rádio. O olho é capaz de enxergar radiações com comprimentos de onda entre 380 nm (violeta) e 780 nm (vermelho). Um diagrama do espectro de radiação eletromagnético é apresentado na Figura 1.1 (Dangelo, 2002).

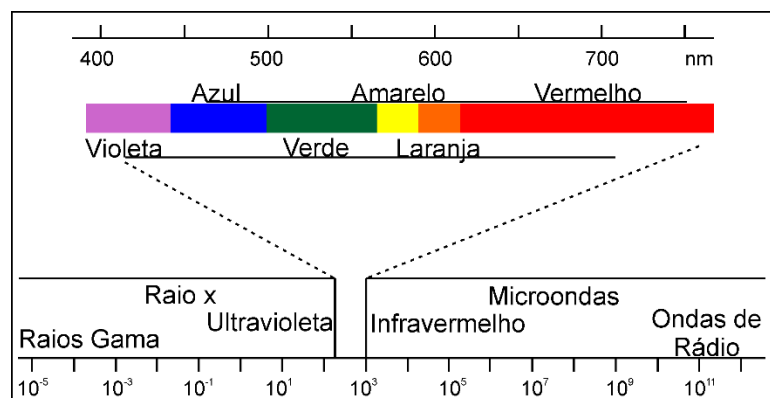


Figura 1.1 - Espectro de radiação eletromagnética. Em detalhe, a radiação visível ao olho humano

A LFSE é capaz de emitir radiação por toda a faixa de radiação visível ao olho humano. Isto faz com que seja possível identificar, corretamente, as cores dos objetos iluminados por esta lâmpada.

A geração de luz das LFSE ocorre basicamente da mesma forma que nas demais lâmpadas de descargas do tipo fluorescente, sendo a luz produzida através de dois fenômenos luminescentes. Primeiramente ocorre o choque de elétrons do gás e os átomos de mercúrio contidos na lâmpada, a luminescência. Seguido da conversão da radiação ultravioleta (UV) em luz visível, conversão essa feita pelo material que reveste a lâmpada.

Os elétrons livres presentes no interior da lâmpada fluorescente são acelerados e se chocam com átomos de mercúrio no interior da lâmpada, assim a energia cinética dos elétrons é transferida para o átomo que a absorve e libera um elétron. O átomo fica então desbalanceado, portanto, o elétron retorna para o átomo de mercúrio e este libera sua energia extra através de radiação ultravioleta e uma pequena quantidade de radiação visível. A radiação ultravioleta não é visível ao olho humano. A transformação de radiação invisível para visível é realizada pelo revestimento a base de fósforo utilizado na parede interna do no bulbo da lâmpada. Este possui a propriedade de absorver energia ultravioleta e voltar a irradiá-la em outros comprimentos de onda, que por sua vez, podem ser percebidos como luz visível. Ainda são introduzidos gases inertes no interior da lâmpada, a função destes gases é diminuir a possibilidade de que um elétron livre percorra toda a lâmpada sem se chocar com um átomo de mercúrio.

A diferença básica de funcionamento entre as lâmpadas fluorescentes com eletrodos (LF) e as do tipo indutivo é a forma com que ocorre a aceleração dos elétrons livres. Nas LF este fenômeno ocorre em decorrência da diferença de potencial aplicada entre as extremidades da lâmpada. Todavia, na LFSE, o campo magnético gerado pelas bobinas é responsável pela aceleração dos elétrons. Outra diferença é que nas LF existe a emissão termiônica de elétrons, pelos eletrodos, e não apenas a existência de elétrons livres. Por isso, alguns autores afirmam que a LFSE não teria capacidade de operar em locais sem nenhuma outra forma de radiação existente (Stanic and Tanach, 2004), isto é, um local negro sem a existência de elétrons livres.

A Figura 1.2 apresenta os componentes de uma lâmpada fluorescente sem eletrodos com bobina externa. Nela é possível identificar os elementos citados na explicação do funcionamento da lâmpada.

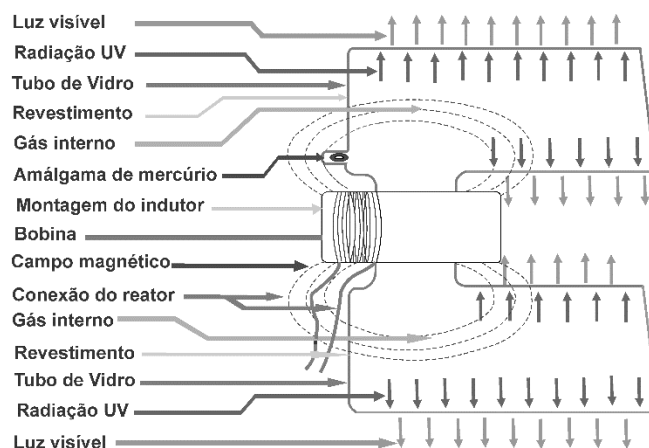


Figura 1.2 – Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos (Roberts, 2011)

### 1.3 Histórico das LFSE

Em 1884, Johann Wilhelm Hittorf descobriu a descarga sem eletrodos (*Electrodeless*) e no século XIX a mesma foi aperfeiçoada por Joseph John Thomson (Wharmby, 1993). A ideia de rádio frequência (RF) aplicada à iluminação surgiu pela primeira vez em uma patente no ano de 1907 por P.C. Hewitt (*“Method of producing electric light”*, U.S. Patente 843 533, 1907), a lâmpada desta patente é mostrada na Figura 1.3(a). A lâmpada proposta por Hewitt era composta por um bulbo esférico de vidro cheio de mercúrio em vapor sob baixa pressão. Uma corrente alternada (AC) entre 125 e 300 Hz percorria a bobina ao redor do bulbo, sendo esta produzida por meio de gerador mecânico (Godyak, 2002).

Na patente de Bethenod e Claude em 1936 (*“Electromagnetic apparatus”*, U.S. Patente 2 030 957, 1936) foi proposta uma lâmpada de indução com uma cavidade de reentrância, preenchida por uma bobina indutora com um núcleo de ar ou ferromagnético. Neste modelo de lâmpada a bobina de indução fica oculta pelo corpo da lâmpada, o que faz deste um modelo muito utilizado em LFSE compactas, Figura 1.3(b). Devido à bobina indutora estar localizada no interior da lâmpada o sombreamento da luz é evitado, além disso, é reduzida a interferência eletromagnética (*EMI – Eletromagnetic Interference*) da lâmpada, devido a blindagem do plasma (Godyak, 2002). Contudo, como será apresentado no próximo capítulo, o acoplamento desta descarga é menor que o daquelas que utilizam eletrodos externos, diminuindo assim a eficiência da mesma.

No ano de 1970, John M. Anderson propôs um novo experimento para iluminação sem eletrodos (*“Electrodeless gaseous electric discharge device utilizing ferrite cores”*, U.S. Patente 3 500 118, 1970). O princípio dessa proposta era de um anel de descarga indutivo,

geralmente utilizado para criar o plasma em dispositivos toroidais, lâmpadas fluorescentes sem eletrodos e fechadas em si mesmas. Um ou mais núcleos toroidais de ferrite envolveriam parte do bulbo tendo em si um enrolamento primário conectado a uma fonte de rádio frequência, formando um transformador sendo o plasma da lâmpada considerado o secundário, Figura 1.3(c).

Outro tipo de lâmpada sem eletrodos é fundamentado no acionamento através de micro-ondas. A elevada frequência do sistema, associada ao alto custo financeiro, faz com que a comercialização desta lâmpada seja improvável (Godyak, 2002), neste momento.

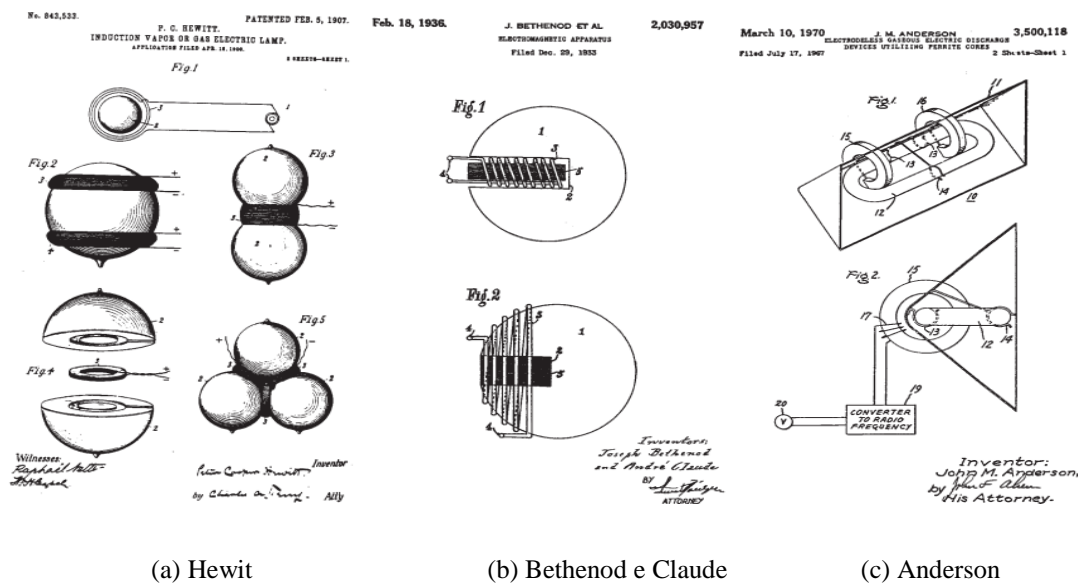


Figura 1.3 - Patentes históricas de lâmpadas sem eletrodos

Durante uma palestra realizada na Universidade de Columbia na cidade de Nova Iorque em 1891, Nikola Tesla demonstrou uma lâmpada sem eletrodos indiretamente energizada por um campo eletromagnético (Godyak, 2002). A lâmpada sem eletrodos proposta por Tesla operava em relativa baixa frequência, além disso, uma espécie de descarga capacitiva era mantida pelo fraco deslocamento de corrente que foram limitadas por grandes intervalos de ar. A declaração de Tesla publicada no *The World*, em 1929, afirmativa que as lâmpadas incandescentes eram excessivamente ineficientes e que ele acreditava que estas seriam substituídas em breve pelas lâmpadas fluorescentes sem eletrodos.

“Surely, my system is more important than the incandescent lamp, which is but one of the known electric illuminating devices and admittedly not the best.

Although greatly improved through chemical and metallurgical advance and skill of artisans it is still inefficient, and the glaring filament emits hurtful rays responsible for millions of baldheads and spoiled eyes. In my opinion, it will soon be superseded by the electrode less vacuum tube which I brought out thirty-eight years ago, a lamp much more economical and yielding a light of indescribable beauty and softness.”

A statement by Nicholas Tesla (1856 – 1943), inventor of induction lighting, published in “The World” in 1929. (Martin, 1981)

Entretanto, a declaração de Tesla se provou falsa, as lâmpadas que se desenvolveram comercialmente foram as fluorescentes com eletrodos (Martin, 1981). As LFSE demoraram quase um século a mais para chegar ao mercado do que as LF. Isto foi devido às características construtivas das LFSE, que exigem tecnologias mais avançadas. Assim como a dificuldade de projetar-se um sistema eletrônico de alta frequência para seu acionamento adequado que atendesse as normas, por exemplo, de interferência eletromagnética entre outras. Tais problemas foram resolvidos com o avanço tecnológico dos componentes e a utilização de diferentes composições de revestimentos e materiais magnéticos dos núcleos. Atualmente o desafio é quanto ao uso destas tecnologias, devido principalmente ao alto custo dos sistemas, qualidade e eficiência do circuito eletrônico e características luminotécnicas da lâmpada.

A produção de uma fonte de luz RF comercialmente viável deve observar diversos fatores como: eficiência do sistema, qualidade da iluminação, vida útil da lâmpada e custo. Além de parâmetros como níveis de frequência e de *EMI* que devem ser respeitados, prevenindo-se a interferência com sistemas de comunicação e limitando-se as frequências disponíveis para fontes de iluminação artificiais alimentadas por rádio frequência. Há poucas frequências alocadas para aplicações industriais como 13,56; 27,12; 40,68 MHz na banda de rádio frequência e 2,45 GHz na banda de micro-ondas, estas frequências também podem ser utilizadas para equipamentos de iluminação (Wharmby, 1993). O intervalo entre 2,2 - 3,0 MHz apresentam restrições reduzidas de *EMI* e foi especialmente alocado para dispositivos de iluminação de rádio frequência. Nos últimos anos grandes fabricantes de lâmpadas fluorescentes desenvolveram alguns modelos comerciais de LFSE.

No início dos anos 90 a Philips introduziu a lâmpada QL no mercado. Em 1992 a Intersource Technologies começou a fabricação a chamada E-lamp, porém quase 10 anos mais tarde poucos exemplares haviam sido comercializados. Em 1994, a GE, produziu a lâmpada de indução Genura com um reator integrado. Cerca de dois anos mais tarde a OSRAM passou a comercializar a Endura. A Amko Solara neste século desenvolveu

comercialmente lâmpadas de indução de até 400 W (Solara, 2012). A seguir são apresentadas algumas características das lâmpadas dos principais fabricantes.

**Philips QL:** Em 1990 a lâmpada foi lançada na Europa e em 1992 Estados Unidos. A QL é disponibilizada em três potências 55 W, 85 W e 165 W e em duas temperaturas de cor 3.000 K, 4.000 K e 5.000 K (Miller, 1992). A frequência de operação da QL é de 2.65 MHz, possuindo também elevada vida útil, com cerca de 60.000 horas e eficiência luminosa entre 65 e 70 lm/W (Lighting Research Center, 1998). Esta lâmpada é ilustrada na Figura 1.4.



Figura 1.4 – Philips QL

**GE Genura:** É uma lâmpada de 23 W com indução por bobina interna. Apresenta fluxo luminoso de 1.100 lúmens, o qual é considerado baixo, e uma vida útil de 15.000 horas. A Genura está disponível nas temperaturas de cor de 2.700 K e 3.000 K (Lighting Research Center, 1998). Esta lâmpada é ilustrada na Figura 1.5.



Figura 1.5 - GE Genura, LFSE de indução com bobina interna

**Intersources Technologies E-lamp:** Em 1992, uma campanha de mídia nos Estados Unidos cobriu o país divulgando a "Lâmpada do Futuro" - a chamada E-lamp da *Intersource*



*Technologies*. A E-lamp era uma lâmpada de indução que foi direcionada para o mercado *downlight*. Um *downlight* é basicamente um ponto de luz composto por um aro e respectiva ligação a uma lâmpada. No caso dos *downlights* é para emitir luz de cima para baixo. Infelizmente, a empresa parecia ter gasto mais de seus fundos em marketing do que em engenharia, e o produto nunca chegou ao mercado (Miller, 1992).

**AMKO Solara Lighting Co. Ltd:** A AMKO possui comercialmente LFSE de até 400 W. Com uma alta eficiência, superior a 90 lm/W e alta manutenção do fluxo luminoso > 70% em 60.000 horas e 65% para 100.000 horas. A LFSE da AMKO possui temperaturas de cor entre 2.100 K e 7.200 K (Solara, 2012). Esta lâmpada é ilustrada na Figura 1.6.



Figura 1.6 - AMKO Solara 400 W – dimensões 15,8 x 104,9 cm (Solara,2012)

**Osram Sylvania Endura:** A Osram colocou no mercado esse tipo de lâmpada fluorescente sem eletrodos de indução em 1996. A lâmpada Endura está disponível em potências de 70 W, 100 W e 150 W. Temperaturas de cor de 3.500 K e 4.100 K, e a manutenção do fluxo luminoso é de 70%, a 60.000 horas e cerca de 64%, a 100.000 horas (Datasheet Endura, 2012) e (Godyak et. al., 1998). A Figura 1.7 apresenta a lâmpada OSRAM Sylvania Endura.



Figura 1.7 - Osram Sylvania Endura

## 1.4 Materiais Magnéticos

Os materiais magnéticos são classificados com base em suas propriedades magnéticas e também aplicações. Um material magnético macio é um material que apresente a capacidade de ser facilmente magnetizado e desmagnetizado. Em contraste, os materiais magnéticos duros exigem campo magnético externo essencial para a sua magnetização e desmagnetização. Portanto, neste trabalho serão estudados apenas materiais magnéticos macios.

Materiais magnéticos macios são geralmente usados para fazer núcleos, que concentram e moldam o fluxo magnético. Para a escolha do material que melhor satisfaz as necessidades da aplicação estudada, as características do material magnético devem ser estudadas. Na realidade, visto que não há um material ideal para elevadas frequências proporcionando, baixas perdas, alta densidade de fluxo de saturação, alta permeabilidade e baixa magnetostricção, deve-se fazer alguns compromissos com base na aplicação particular (Bahmani, 2011).

As aplicações que utilizam materiais magnéticos macios são divididas em duas categorias (Gavrila e Ionita, 2002):

- A conversão da energia eletromagnética em energia mecânica ou inversamente (máquinas elétricas) e a modificação de parâmetros que caracterizam o uso de energia elétrica (transformadores elétricos). Para os materiais utilizados nestas aplicações, os parâmetros mais importantes são a permeabilidade, as perdas de energia e a magnetização de saturação. A liga de FeSi (Ferro-Silício) pode definitivamente ser considerada o material mais representativo para esta classe;
- O processamento de sinais - Na maioria destas aplicações, a quantidade de material usado para produzir uma unidade é pequena, mas o número de unidades é muito grande. São as aplicações: informática, controle e computadores, eletrônica, telecomunicações, com uma grande quantidade de materiais solicitados para televisão, telefonia, micromáquinas e pequenos transformadores com especial utilização, transdutores, cabeças de gravação magnética, periféricos de computador, instalações de micro-ondas etc. Como representativo desta categoria tem-se a liga FeNi.

Em aplicações de alta frequência, há quatro parâmetros principais que devem ser levados em consideração na análise das propriedades magnética, elétrica e mecânica, que são:

- Densidade de perda do núcleo;

- Densidade de fluxo máxima (ponto de saturação);
- Permeabilidade relativa;
- Variações das características com a temperatura.

Com base nesses parâmetros, diferentes tipos de materiais magnéticos podem cumprir as exigências de alta frequência. Nas últimas décadas, um progresso considerável foi obtido graças às novas tecnologias, especialmente a solidificação rápida que permitiu a obtenção de materiais com novas composições e microestruturas. A Figura 1.8 apresenta o desenvolvimento dos materiais magnéticos macios. A melhoria do desempenho destes materiais tem sido possível devido a mudanças em suas matérias-primas, maior controle de qualidade no processo de fabricação dos mesmos e as diferentes técnicas de fabricação aplicadas na obtenção destas ligas.

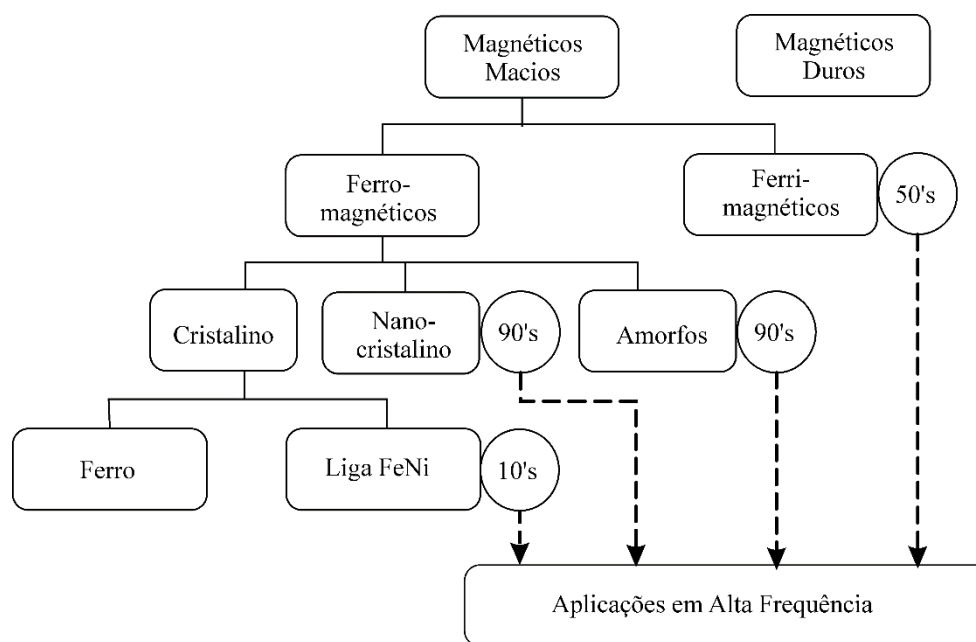


Figura 1.8 - Desenvolvimento dos materiais magnéticos macios (Shen, 2006)

Certos materiais, sendo os mais notáveis o ferro, o níquel, o cobalto e algumas de suas ligas e compostos são capazes de adquirir um alto e permanente momento magnético. Esse tipo de material é de suma importância para aplicações em circuitos eletrônicos e demais aplicações em engenharia elétrica. Na LFSE os núcleos magnéticos são empregados na formação da descarga de efeito indutivo.

As LFSE de efeito indutivo com bobinas externas podem ser modeladas como um transformador, onde o primário são as bobinas e o secundário o plasma no interior da lâmpada

(Statnic e Tanach, 2006). Sendo assim realizada a transferência de energia necessária para a descarga elétrica na lâmpada. Assim, o estudo do material do núcleo magnético se torna tão importante. Algumas das características magnéticas que se deve conhecer são: perdas, densidade de fluxo máxima e permeabilidade magnética.

A seguir será apresentada uma breve descrição dos três materiais magnéticos mais utilizados, sendo estes ferrite, ligas amorfas e ligas nanocristalinas. Serão apresentadas suas principais características sendo estas estruturais, elétricas, magnéticas, assim como um comparativo de perdas. As principais diferenças entre os três materiais são o ponto de saturação dos mesmos e suas perdas.

### **1.4.1 Ferrite**

O ferrite é o material magnético mais popular, sendo largamente encontrado no mercado. É um material produzido a partir da mistura química de diversos tipos de compostos, os principais são óxido de ferro, cobalto, níquel, manganês e zinco, o que varia de acordo com a aplicação. O uso de óxidos na composição faz com que os ferrites possuam menor condutividade do que os materiais magnéticos que utilizam metais na composição (Nassiri, 2003).

O ferrite foi denominado um material magnético do tipo cerâmico devido ao seu processo de fabricação ser semelhante ao da cerâmica tradicional. É o material mais utilizado em circuitos eletrônicos de potência, devido suas características magnéticas, tais como elevado ponto de saturação, ideal para aplicações em alta potência (Magnetics, 2000).

Estes são capazes de suportar altas temperaturas, tão elevada quanto 180° C, sem perder suas características magnéticas. O ferrite pode ser dividido em dois segmentos, os “macios” e os “duros”. O do tipo “duro” são os chamados ímãs permanentes, com materiais ferromagnéticos com largo ciclo de histerese. O do tipo “mole” é mais conhecido, devido suas aplicações. Por exemplo, transformadores, núcleos eletromagnéticos, indutores para circuitos eletrônicos, etc. O manual técnico do ferrite N87, utilizado na LFSE em estudo, afirma que algumas das características desse material são a alta resistividade e permeabilidade, possuindo também baixas perdas e capacidade de trabalhar em diversas faixas de frequência (*Datasheet* EPCOS, 2006). A Tabela 1.1 apresentada diversas faixas de frequência de operação do ferrite e suas vantagens e desvantagens.

Tabela 1.1 – Vantagens e desvantagens do Ferrite (Magnetics, 2000)

Aplicação	Vantagens	Desvantagens
Baixa frequência (< 1 kHz) e alto fluxo	Facilidade na modelagem o que o torna de baixo custo, aplicações de alta perda como relés.	Baixa densidade de fluxo; Alto custo relativo; Tamanho limitado.
Média frequência (1-100 kHz) e alto fluxo, não linear	Custo muito menor que NiFe; Alta permeabilidade; Baixas perdas; Boa resistência ao desgaste.	Densidade de fluxo menor que NiFe; Permeabilidade menor que NiFe; Baixa temperatura de Curie.
Média frequência (1-100 kHz) e baixo fluxo, linear	Permeabilidade maior que núcleos “ <i>powered iron</i> ” ou <i>Permalloy</i> ; Ampla faixa de escolha para Indutâncias e coeficientes de temperatura.	Baixo ponto de <i>Curie</i> ; Precisão no ajuste do entreferro.
Alta frequência (>200 kHz) e baixo fluxo, linear	Baixas perdas; Vantagens de média frequência.	Permeabilidade decresce com a frequência; Desvantagens de média frequência; Má transferência de calor.

Em aplicações de alta frequência, as perdas por corrente de *Foucault* são comuns e aumentam aproximadamente ao quadrado da frequência, perdas essas que são inversamente proporcionais à resistividade do material. Por conseguinte, a alta resistividade do ferrite é o fator que mais contribui para sua ampla aplicação em componentes magnéticos de alta frequência. Quando comparado ao material FeSi, outra característica que deve ser considerada é seu ponto de saturação de apenas 0,5 T, usualmente, enquanto o segundo material pode chegar a saturações de 1,7 T, aproximadamente.

#### 1.4.2 Ligas amorfas

Os materiais amorfos são mais conhecidos como vidros metálicos, podendo ser produzidos por diversos métodos e formados pelas mais diversas composições. Quase todas as composições que produzem estruturas amorfas estáveis na temperatura ambiente contêm alta fração de metais de transição ou elementos terras raras, e são na sua maioria ferromagnéticos. Geralmente produzidos a partir do rápido resfriamento dos metais fundidos. Uma grande

parcela das ligas amorfas é formada por, cerca de 80%, metais de transição tais como Fe (Ferro), Co (Cobalto) e Ni (Níquel) e 20% semimetais tais como B (Boro), C (Carbono), P (Fósforo) e Si (Silício). Sendo estas fortemente magnéticas na temperatura ambiente e oferecendo diversas aplicações para a engenharia (Graham e Egami, 1978).

Devido a composição dos amorfos, estes possuem como principal característica a elevada saturação magnética, possuem também resistividade relativamente alta e são poucos dependentes da temperatura. Para engenharia a característica mais importante dos amorfos é sua alta resistividade, pois diminui as perdas por correntes parasitas. Outra característica muito importante dos amorfos é a de seu ciclo de histerese ser mais estreito que os dos demais materiais, além de produzir uma alta indução magnética para uma baixa intensidade do campo magnético (Derlecki et. al., 2012).

A magnetostricção também deve ser levada em consideração na comparação na escolha de materiais magnéticos, magnetostricção é a alteração física do material quando aplicado sobre o mesmo um campo de magnético o que acaba por causar ruído e perdas no núcleo magnético. Em amorfos baseados em ferro a magnetostricção linear de saturação é semelhante a do ferro silício de grão orientado (Vieira et. al., 2000).

Uma das características negativas das ligas amorfas é o acréscimo na massa e volume dos dispositivos magnéticos, isso se deve ao aumento do fator de empilhamento causado pelo aumento da área transversal do núcleo. Porém, esta característica apresenta maior impacto quando se considera transformadores de elevada potência, não sendo tão nociva quando considera-se elementos magnéticos utilizado em eletrônica de alta frequência. A dureza da liga amorfa é alta, na faixa 700-1000 kg/mm<sup>2</sup>, tal característica dificulta a laminação das chapas (Graham e Egami, 1978).

### **1.4.3 Materiais nanocristalinos**

Os primeiros materiais nanocristalinos foram desenvolvidos por Yoshizawa, Oguma, e Yamauchi, em 1988 (Willard et. al., 2002). Os benefícios das ligas nanocristalinas resultam da composição química e as variações estruturais, que em nanoescala otimizam as propriedades magnéticas.

As ligas nanocristalinas tem atraído muita atenção devido às suas excelentes propriedades de magnéticas. Elas usualmente são produzidas a partir das ligas amorfas. O resultado do processo são grãos ferromagnéticos em nanoescala (Shen et. al, 2010). Os

materiais nanocristalinos combinam alta permeabilidade dos amorfos com as baixas perdas do ferrite. Os materiais nanocristalinos se caracterizam por uma alta saturação magnética e permeabilidade, assim uma baixa perda, cerca um quinto das perdas do amorfo (*Datasheet FINEMET*, 2005) dependendo da frequência de operação.

Na época, a cristalização de metais amorfos ficou conhecida por tornar muito pior suas propriedades magnéticas, resultando em uma microestrutura muito grossa (tamanhos de grãos de 0,1  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ ) que apenas conseguiu ser superada em 1988 (Herzer, 1995). Isto foi devido a utilização da precursora liga amorfa FeSiB (Ferro, Silício e Boro), com pequenas adições de Nb (Nióbio) e Cu (Cobre).

Materiais nanocristalinos são preparados com base em precursores amorfos, e o estado nanocristalino é atingido pelo recozimento a uma temperatura tipicamente entre 500 e 600°C, o que leva a cristalização primária. A microestrutura resultante é caracterizada por grãos de FeSi aleatoriamente orientados e ultrafinos, com um tamanho de grão típico de 10-15 nm de estrutura cúbica de corpo centrado. Estes compõem uma matriz amorfa residual, que ocupa cerca de 20-30% do volume e separa os cristais a uma distância de cerca 1-2 nm. Estas características são a base para as excelentes propriedades magnéticas indicadas pelos elevados valores de permeabilidade inicial, de cerca de 105, e correspondentemente baixa coercividade, menor que 1 A/m (Herzer, 1996).

Dentro da categoria de ligas nanocristalinas são encontradas mais três categorias que dependem do número de dimensões modulas pelo nanômetro, sendo estas:

- Uma dimensão – lamelar, sintetizada a partir da vapor deposição e da electrodeposição;
- Duas dimensões – filamentar, sintetizada através da deposição de vapor químico;
- Três dimensões – cristalina, sintetizada a partir da condensação de gás e liga mecânica/fresagem.

#### **1.4.4 Comparativo entre os materiais magnéticos**

O desenvolvimento de novos materiais magnéticos exige um estudo mais detalhado para determinar-se o material com melhor custo benefício para ser aplicado em determinado projeto.

Nesta dissertação é estudada uma lâmpada indutiva que fornece elevado nível de iluminação e elevada vida útil. Por estas razões, esta lâmpada usualmente é utilizada em

locais de difícil manutenção, por exemplo, túneis e iluminação pública. Contudo, o custo desta lâmpada é elevado o que ainda dificulta a difusão desta tecnologia no mercado. Portanto, a eficiência deste equipamento deve ser otimizada para diminuir o consumo energético do sistema, por isso, o material magnético utilizado nos núcleos deve ser estudado de forma a otimizar sua relação custo/benefício nesta aplicação.

A Figura 1.9 compara diferentes materiais magnéticos. São apresentadas as densidades de fluxo máximas e as permeabilidades relativas de diversas tecnologias. O material FINEMET apresentado na Figura 1.9 é um material nanocristalino, linha metglas, da fabricante Hitachi Metals. Este material é obtido pelas mais avançadas técnicas e apresenta boas características magnéticas. Porém, como o gráfico foi obtido do catálogo deste material, e não foram possíveis experimentos para determinar sua precisão, deve-se observar a comparação entre os materiais como uma aproximação da realidade.

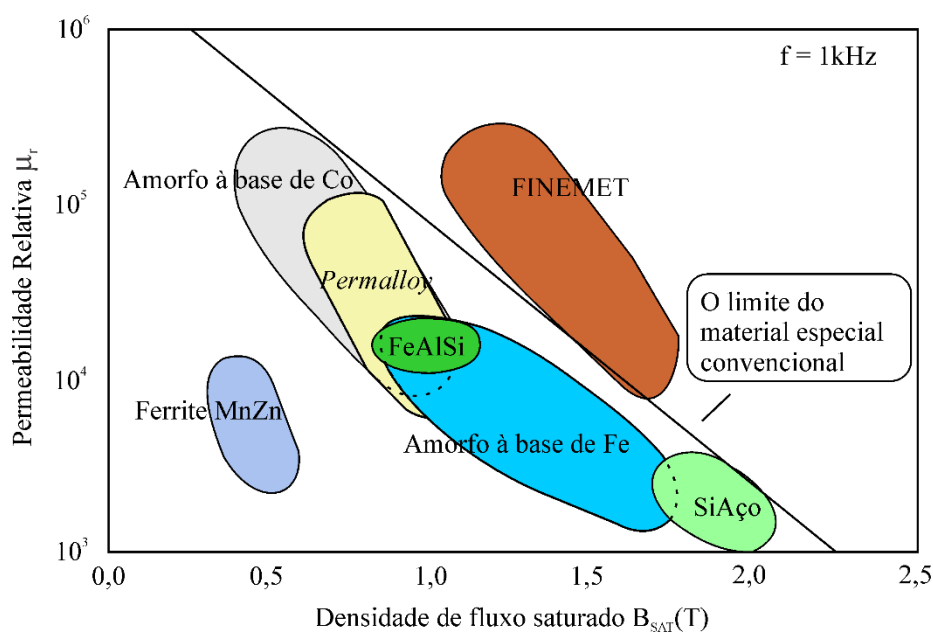


Figura 1.9 - Gráfico das características dos materiais magnéticos (*Datasheet* FINEMET, 2005)

Pela Figura 1.9 é possível verificar que o material ferrite apresenta a menor densidade de fluxo máxima. Isto significa que para a transferência da mesma potência um núcleo construído com este material necessita de uma maior área transversal. Enquanto que o material nanocristalino apresenta elevadas densidades de fluxo máximo. Em conclusão, um núcleo de ferrite terá de ser muito maior que um núcleo nanocristalino para a mesma



aplicação. As ligas amorfas apresentam características intermediárias entre os materiais ferrite e nanocristalino.

Tanto as ligas amorfas quanto as nanocristalinas possuem elevada permeabilidade para elevadas frequências, na faixa de algumas centenas de quilohertz. O comportamento dessas ligas em alta frequência faz também com que haja a redução das perdas por correntes parasitas devido ao aumento da resistividade de ambas. A diminuição das perdas ocorre devido à baixa coercividade de ambas as ligas o que faz que as perdas por histerese diminuam (Herzer, 1996). Com relação ao custo destes materiais, as ligas nanocristalinas, assim como as ligas de ferrite, tem um menor custo de matérias-primas pela utilização de materiais mais abundantes na terra. Em contraponto, as ligas amorfas tem uma maior variabilidade das propriedades magnéticas e dos formatos de construção, que mais especificamente no caso das ligas nanocristalinas ainda é muito restrito. Ou seja, a maior desvantagem dessas ligas é sua fragilidade final, o que restringe sua aplicação, problema também encontrado em núcleos de materiais amorfos de alta permeabilidade, devido a um tratamento de alívio de estresse realizado.

A Figura 1.10 mostra as principais tendências na utilização de materiais nanocristalinos e amorfos, devido às suas propriedades físicas e magnéticas. Devido às suas características únicas, foram descobertas diversas aplicações em diferentes áreas para os mesmos.

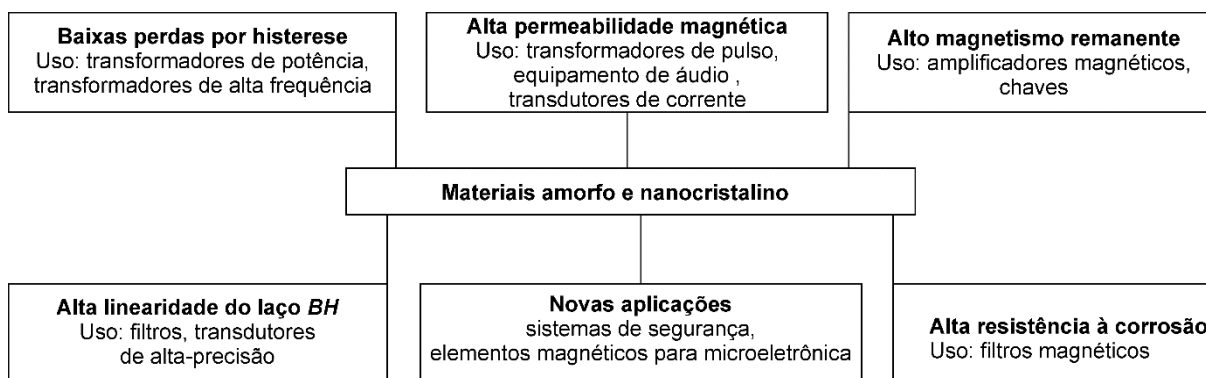


Figura 1.10 - Aplicações de materiais nanocristalinos e amorfos (Gavrila e Ionita, 2002)

## 1.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado um histórico sobre a lâmpada fluorescente sem eletrodos, pode-se assim notar que houve um avanço nas últimas décadas nas pesquisas sobre essa lâmpada. Avanço ocorrido devido ao desenvolvimento de componentes mais eficientes e de maior durabilidade.

Neste mesmo capítulo foi mostrada uma descrição de materiais magnéticos macios e suas principais características. Um comparativo foi efetuado dentre estes materiais que podem ser utilizados na aplicação estudada.

## CAPÍTULO 2

# LÂMPADAS FLUORESCENTES SEM ELETRODOS

---

### 2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as principais características elétricas da lâmpada fluorescente sem eletrodos. Tais como o processo de partida, descarga característica e operação em regime permanente. Assim como as perdas na LFSE e os métodos de cálculo das mesmas.

### 2.2 Processo de partida, descarga, e operação em regime permanente

Em lâmpadas fluorescentes, uma das etapas mais importantes é a formação do plasma, visto que este é o meio responsável pela condução dos elétrons que ocasionam a geração luz. Nas lâmpadas fluorescentes sem eletrodos o plasma pode ser formado a partir de diversos modos de descarga, devido ao agente associado à descarga sendo o mesmo independente da descarga, o campo eletromagnético. O campo eletromagnético é composto por duas partes principais, o campo elétrico e o campo magnético, sendo ambos capazes de originar uma descarga e assim produzir o plasma.

Em Babat (1946) foi realizado um estudo sobre as formas de excitações da descarga, onde houve a classificação em dois tipos de descargas. A classificação realizada por Babat levava em consideração a forma de oscilação eletromagnética utilizada na excitação dos átomos e a forma como a onda eletromagnética se propaga no interior do tubo de descarga. Desta maneira a descarga sem eletrodos foi dividida em dois tipos: descarga “E” e descarga “H”. A descarga “E” é caracterizada pela excitação através de um campo elétrico e por não possuir um caminho fechado da corrente no plasma. A descarga “H” tem como característica

a excitação por meio de um campo magnético e a corrente possui um caminho fechado no plasma. Na LFSE utilizada nesse trabalho ocorrem os dois tipos de descargas eletromagnéticas. Na partida ocorre a descarga do tipo E e em regime permanente a descarga do tipo H. Portanto, para operação em regime, a descarga dentro da lâmpada deve passar por uma transição entre os modos. Análises detalhadas das transições entre descargas foram realizadas por (Bowers et al, 1999), (Long et al, 2006), (Razzak et al, 2004), (Yoon et al, 1998).

A descarga do tipo E, também chamada de descarga capacitiva ou eletrostática, utiliza o campo elétrico como forma de excitação dos elétrons. Esta descarga é responsável pela ionização do gás presente no tubo. A descarga do tipo E possui baixas correntes e um baixo consumo de potência, sendo caracterizada por uma baixa eficiência luminosa e baixo índice de reprodução de cores (IRC), quando comparada a descarga H (Wharmby, 1993).

A descarga do tipo H também chamada de descarga indutiva ou eletromagnética utiliza o campo magnético como forma de excitação. Quando um campo magnético é aplicado sobre um tubo de descarga é possível a ionização do gás presente no tubo produzindo assim fótons (luz). A descarga do tipo H possui uma maior eficiência luminosa que a do tipo E. A lâmpada utilizada nesse trabalho, a LFSE da Endura, atinge um nível de eficiência próximo a 83 lm/W, em regime nominal e apresenta um alto IRC, sendo maior que 80 nas LFSE Endura (*Datasheet Endura*, 2012).

A descarga do tipo E é uma descarga estável, no entanto quando aplicada em lâmpadas, tornaria estas de baixa eficiência e de alto custo, sendo não aplicável nessa área. Na descarga do tipo H ocorre o oposto da descarga E, onde a descarga se torna mais potente à medida que a frequência é incrementada. A corrente na descarga H é menor à medida que a frequência de operação aumenta (Wharmby, 1993). A descarga H pode ser comparada com um transformador, onde a bobina do núcleo funciona como um primário e o plasma pode ser considerado um secundário. Sendo o coeficiente de acoplamento ( $k$ ) uma das diferenças de funcionamento entre as LFSE com bobina interna ou externa. O coeficiente de acoplamento das LFSE de bobina interna apresenta elevada variação com a modificação do nível de potência da lâmpada (Statnic e Tanach, 2006). O mesmo fenômeno não ocorre na lâmpada de bobina externa que apresenta um coeficiente de acoplamento com pouca variação e aproximadamente unitário (Statnic e Tanach, 2004) devido a aspectos construtivos e a presença de um circuito magnético de caminho fechado.

Inicialmente, o gás presente na descarga está eletricamente neutro, possuindo apenas uma pequena quantidade de pares elétron-íon produzido por radiação cósmica (Kaiser, 1988).

A aceleração dos elétrons ocorre através do campo elétrico (descarga do tipo E) o qual é gerado pela alta tensão aplicada sobre a lâmpada. Desta maneira ocorre a colisão dos átomos e as paredes do tubo de descarga, produzindo assim mais partículas carregadas. A ignição acaba se sucedendo devido a séries de colisões que ocorrem posteriores a primeira, gerando um efeito avalanche.

A Figura 2.1 apresenta o processo de transição dos modos, da descarga E para a descarga H. Ela compara os níveis de corrente e de iluminância destes modos de descarga.

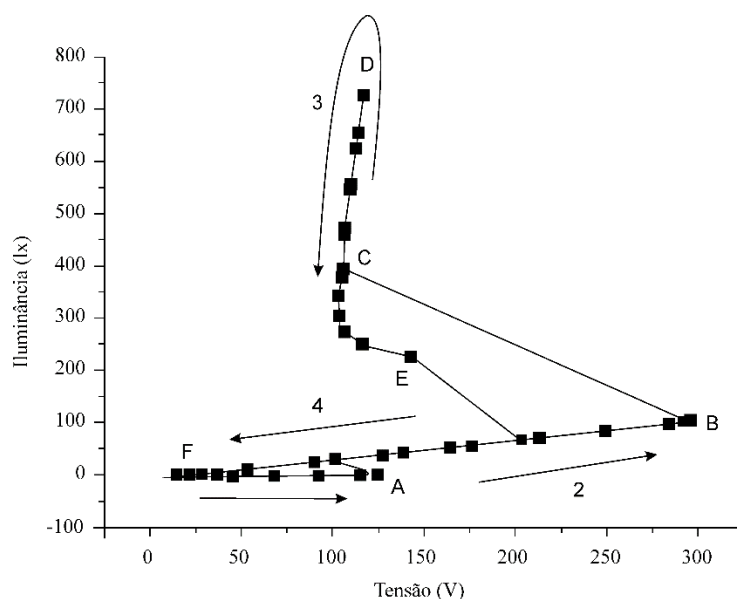


Figura 2.1 - Gráfico iluminância (valores relativos) por tensão (Long et al, 2006)

Inicialmente a tensão na bobina é muito baixa o que impossibilita o início da descarga E, caracterizando o estado 1. A primeira descarga no tubo ocorre somente em A, onde se inicia a descarga E fazendo com que uma fraca luminosidade seja emitida pela lâmpada. No estado 2, somente a descarga E continua dominante no plasma, e a iluminância aumenta devido à crescente tensão de entrada no indutor. O ponto B limita a transição entre as duas descargas. Esta transição é caracterizada pelo aumento da iluminância e drástica redução na tensão da descarga, como pode ser observado no ponto C. Posterior a este ponto, a descarga exibe linearidade entre o aumento de iluminância e tensão de entrada até a máxima iluminância no ponto D, no estado 3. Após D, a iluminância decresce linearmente com a redução da tensão de entrada até chegar ao ponto E, onde ocorre a transição reversa de H para E. Após a transição, a iluminância decresce linearmente com a tensão de entrada até o ponto F, caracterizando o estado 4. No ponto F a descarga inexistente pois o campo eletrostático não é

mais suficiente para mantê-la. Como pode ser observado o processo é cíclico e a eficiência luminosa da descarga H é maior que a da descarga E, julgando-se pela inclinação dos estados 3 e 2 respectivamente (Long et al 2006).

A relação entre corrente aplicada e geração do plasma no interior do tubo pode ser modelado como um transformador, sendo a bobina o primário e o plasma gerado o secundário. Assim, para a descarga E o acoplamento magnético criado entre primário e secundário é muito pequeno, havendo assim uma baixa eficiência nessa descarga. Já para a descarga H o acoplamento magnético criado é praticamente unitário, sendo a descarga H mais eficiente que a E (Wharmby, 1993). Assim, é necessária maior potência para a descarga E. Deste modo, com a diminuição da corrente no interior do tubo não haverá mudança de potência durante a descarga H. Alguns pesquisadores determinam que o ponto de transição entre descargas E e H é quando as mesmas possuem a mesma eficiência (Kadetov, 2004).

A reação responsável pela diferença entre os dois tipos de descargas ainda é desconhecida, no entanto há estudos que mencionam que tal diferença se deve a mudança da função de distribuição da energia dos elétrons na transição entre os modos (Yuming e Dahua, 2006).

A densidade do plasma é proporcional à potência dissipada durante determinada descarga (Kadetov, 2004), desta forma o plasma gerado a partir da descarga H é mais denso que o gerado na descarga E. A iluminância elevada da LFSE é dependente da densidade do plasma na descarga H, pois esta é responsável pela maior quantidade de colisões entre os átomos de mercúrio, o que acaba por contribuir para maior iluminância da lâmpada.

Em 1994 e 1999 Lester e Alexandrovich afirmaram que a escolha do material do núcleo deveria considerar que o ponto de saturação deste fosse tal que não ocorresse saturação do mesmo durante a partida. Porém, estudos afirmam que a partida da lâmpada ocorre devido pequenas descargas que ocorrem entre as espiras do enrolamento primário (da Silva, 2012). Estas descargas ionizam o interior da lâmpada diminuindo sua resistividade e assim permitindo a ignição do plasma. Portanto, a saturação ou não do núcleo, não influencia na ignição da lâmpada, provido que a fonte de alimentação seja capaz de alimentar a lâmpada com a tensão necessária para a partida mesmo ocorrendo a saturação do núcleo. Se o ganho máximo do circuito de alimentação da lâmpada for projetado considerando-se a indutância nominal do núcleo, há a possibilidade da saturação deste impedir a ignição da mesma, pois o circuito de alimentação não conseguirá prover a tensão de ignição para a lâmpada.

### 2.3 Tipos de Perdas em Núcleos Magnéticos

Em situações ideais, a única limitação para a dimensão do núcleo magnético é a densidade de fluxo de saturação do material, em LFSE também se deve considerar a ignição da mesma no projeto. No entanto, em casos reais, a densidade de fluxo alcançada no interior do núcleo é mais baixa que a de projeto, devido às perdas nos fios e no núcleo. Estas perdas levam ao aumento de temperatura no núcleo. Cada material magnético tem uma limitação de temperatura de trabalho especial que o projetista não pode ultrapassar. Assim, a perda tolerada para um particular projeto será limitada. Conseqüentemente, modelagem e compreensão das perdas dos enrolamento e dos núcleo são de grande importância. Estes são os conhecimentos básicos para o projeto ideal de um núcleo magnéticos especialmente em aplicações de alta frequência (Shen, 2006).

Em engenharia elétrica uma das características mais importantes é a eficiência energética, sendo assim necessário o estudo das perdas para qualquer tipo de sistema. A LFSE, como qualquer outro dispositivo elétrico, possui perdas, sendo estas concentradas principalmente nos núcleos da lâmpada.

Visto que a lâmpada opera como um transformador, a transferência de energia é realizada das bobinas para a descarga elétrica ocorrente dentro do bulbo lâmpada. Devido a essa característica magnética é importante o estudo aprofundado do núcleo da bobina. As perdas de um núcleo magnético são decréscimos na eficiência da transferência de energia no núcleo, sendo necessário seu conhecimento. As perdas magnéticas na literatura são divididas em duas formas: perdas estáticas e perdas dinâmicas.

A estimativa de perdas de um núcleo magnético é um problema multidisciplinar, que exige conhecimentos em engenharia elétrica, engenharia de materiais e física. Devido à falta de um modelo preciso para estudos da magnetização de forma microscópica, vários métodos empíricos e macroscópicos foram propostos na literatura (Bahmani, 2011).

Dentro desta abordagem, as perdas totais são divididas em três categorias: perda de histerese estática ( $P_{HE}$ ), perda por corrente parasita dinâmica ( $P_d$ ) e excesso de perda por corrente parasita ou perda anômala ( $P_A$ ). Esta separação tem uma razão física relacionadas com a origem da perda de histerese pelas características do processo de magnetização em escala microscópica (Shen, 2006). Isto é, o laço de histerese, também conhecido por laço  $BH$ , apresenta variações com relação a frequência na qual é obtido. Quando obtido em baixas frequências (considerado estático) a área interna deste gráfico representa a energia de histerese estática do material dada por unidade de volume ( $J/m^3$ ), enquanto que, se adquirido

em elevadas frequências a área interna no gráfico representa a energia total gasta pelo material (da Silva, 2012).

### 2.3.1 Perdas Estáticas

As perdas estáticas, também chamadas de perdas por histerese são resultantes da energia dissipada durante a movimentação e rotação dos domínios magnéticos. Todo material magnético quando submetido a um determinado campo magnético, passa pela denominada magnetização.

O ciclo de histerese é dado através da magnetização do material magnético por meio do aumento da intensidade de campo magnético ( $H$ ) até atingir um valor de máxima intensidade de campo ( $H_{max}$ ). Neste ponto ocorre a saturação do material e a partir deste valor de  $H$  não ocorrerá mudança no valor da densidade de fluxo ( $B$ ), sendo o ponto de saturação chamado  $B_{SAT}$ . Com a redução da intensidade de campo, o trajeto seguido pelo gráfico não é o mesmo, para um mesmo  $H$  o valor de  $B$  será diferente, no ponto que  $H=0$  tem-se o magnetismo residual do material, isto significa que alguns domínios magnéticos continuam polarizados na mesma direção. O valor de  $H$  continua decrescendo até que ocorre o ponto  $B=0$ , caracterizando o ponto de coercividade, isto é, a força necessária para retroceder os domínios magnéticos a posição de origem. Quando a intensidade de campo é  $-H_{max}$  o ciclo volta então a ser repetido criando-se assim uma área interna, ou o laço de histerese, observado na Figura 2.2.

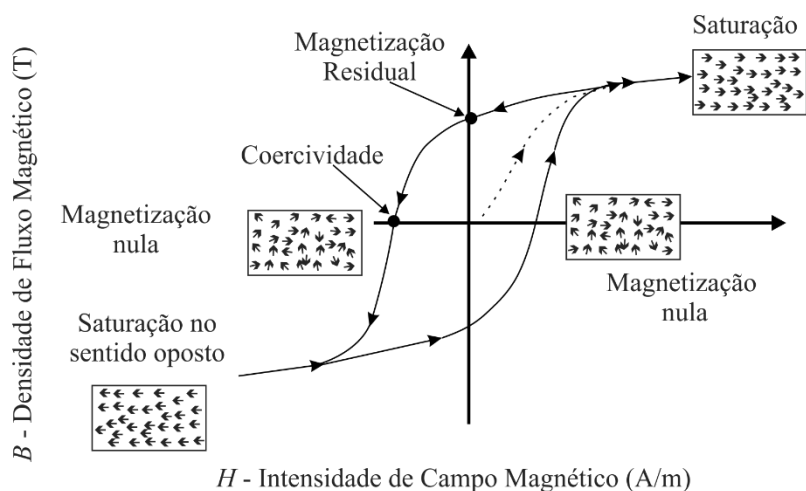


Figura 2.2 - Laço de Histerese teórico



Quando o material é magnetizado, o seu laço de histerese deve ser tão estreito quanto possível, visto que as perdas são proporcionais à área do ciclo de histerese. Por outro lado, um laço de histerese estreito significa um campo coercitivo muito baixo. Na verdade, a permeabilidade inicial e o campo coercitivo estão numa relação de proximidade, os materiais com alta permeabilidade apresentam coercividade reduzida. Para *permalloys*, com uma permeabilidade relativa inicial de cerca de 105, o campo coercivo é tão baixo quanto 0,4 A/m (Gavrila e Ionita, 2002).

Como foi descrito no tópico anterior, o laço de histerese é dependente da frequência em que o material está operando. Desta forma a perda de histerese estática deve ser adquirida através da área de um laço obtido há uma frequência tão baixa que as perdas causadas por correntes parasitas possam ser desprezadas. A perda por histerese pode ser calculada através da “Equação de Steinmetz” (Steinmetz, 1892) demonstrada em (2.1). Essa equação é empírica e possui um limitante de materiais em que pode ser utilizada, sendo essa somente para materiais do qual a densidade de fluxo magnético máxima esteja entre 0,2 e 1,8 T (Pires, 2008).

$$P_H = k_H \cdot f \cdot B_{SAT}^\alpha \left( \frac{W}{kg} \right) \quad (2.1)$$

Onde:

$k_H$  é uma constante dependente das características intrínsecas do material;

$\alpha$  é um valor genérico, do qual depende da indução atingida na saturação (Falcone, 1979), variando entre 1,5 e 2,5;

$B_{SAT}$  é a indução máxima, ou seja, ponto de saturação (T);

$f$  é a frequência do campo magnético (Hz).

### 2.3.2 Perdas Dinâmicas

As perdas dinâmicas em sua maioria são associadas às correntes induzidas no núcleo magnético, essas perdas podem também ser chamadas de perdas por correntes parasitas ou por *Foucault*. Essas correntes são originadas pelas correntes que circulam pelo material magnético do qual são geradas através da tensão induzida causada pela variação fluxo magnético que incide sobre o núcleo. Para ilustrar este fenômeno, observe a Figura 2.3. A

densidade de fluxo é aplicado na direção  $x$ . As dimensões  $l_x$  e  $l_y$  são consideradas muito maiores que a espessura da chapa, representada por  $d$ . Assim, a placa é fina e a amplitude da corrente induzida é baixa, portanto, não afetando de forma notável a densidade de fluxo externa. Com base nessas premissas, pode-se concluir que a densidade de corrente induzida varia apenas na direção  $y$ .

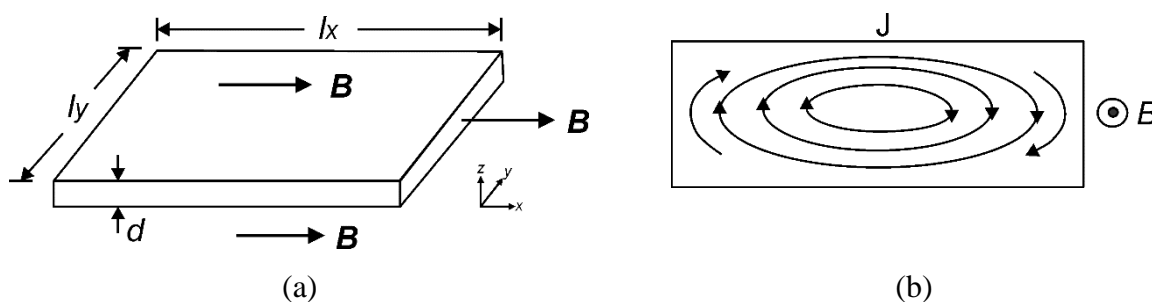


Figura 2.3 - (a) Fina chapa de material magnético inserida em um fluxo magnético variável. (b) Correntes induzidas na chapa

Para minimizar tais perdas são necessárias algumas técnicas, por exemplo, no núcleo da LFSE é utilizado um material de maior resistividade para diminuir as correntes parasitas.

As perdas por correntes parasitas podem ser calculadas de forma empírica através de (2.2) ou através da diferença entre as perdas totais e as perdas por histerese calculadas a partir do laço  $BH$ , considerando desta forma as perdas anômalas irrelevantes.

$$P_F = k_F \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot \frac{B_{ef}^2}{\rho} \left( \frac{W}{kg} \right) \quad (2.2)$$

Onde:

$k_F$  é uma constante dependente do sistema de unidades utilizado.

Contudo, na prática há uma diferença entre a perda magnética total medida e a soma das perdas de histerese e de corrente de Foucault clássica, especialmente em frequências altas. Essa diferença é considerada como perda em excesso ou anômala. Os estudos sobre as causas destas perdas ainda são inconclusivos.

Uma das propostas é de que esta perda é resultante dos movimentos das paredes dos domínios magnéticos que induz a perda por corrente parasita microscopicamente (Ribeiro, 2000) e (Bahmani, 2011).

Em 1983 e 1984, Bertotti propôs uma teoria para o cálculo destas perdas. Esta considera a existência de diversas regiões ativas correlacionadas distribuídas aleatoriamente no material. Estas são especificadas pela microestrutura do material, como o tamanho de grão. Através de (2.3) é possível calcular, aproximadamente, as perdas anômalas.

$$P_A = \sqrt{\sigma \cdot G \cdot S \cdot V_o} \left| \frac{dB}{dt} \right|^{\frac{3}{2}} \quad (2.3)$$

Onde:

$S$  é a área da secção transversal da lâmina;

$G$  é um coeficiente adimensional dependente da estrutura dos domínios magnéticos;

$V_o$  é o parâmetro que relaciona o efeito que a microestrutura tem na criação de regiões ativas;

$\sigma$  é a condutividade do material.

### 2.3.3 Perdas Totais

A resultante da soma das perdas estáticas e dinâmicas ocasiona a chamada perda total. As perdas anômalas, por representarem apenas uma pequena parcela das perdas dinâmicas, não são levadas em consideração na maioria dos casos, o que não impõe nenhum prejuízo no rendimento eletromagnético (Pires, 2008). As perdas por histerese podem ser calculadas através do gráfico do ciclo de histerese ou laço  $BH$ . A área interna deste gráfico representa a energia dissipada neste movimentos, em  $J/m^3$ .

Cada perda é responsável por parte do campo magnético total, como pode ser observado na Figura 2.4. A área do laço de histerese interno é referente apenas a energia gasta pela perda de histerese, ou perda estática. A área total do laço de histerese externo refere-se a toda energia gasta pelo núcleo, incluindo perdas estáticas e dinâmicas. Em 2006 Wei Shen publicou sua tese de doutorado na qual ele apresenta levantamentos experimentais que comprovam este fenômeno. Os levantamentos foram realizados para um núcleo de material nanocristalino com frequências de excitação variando entre 1 kHz e 300 kHz, a Figura 2.5 apresenta os resultados obtidos por Shen. Ele então concluiu, através de outro experimento, que a área interna do laço de histerese levantado a 60 Hz correspondia a energia, apenas, de histerese do material.

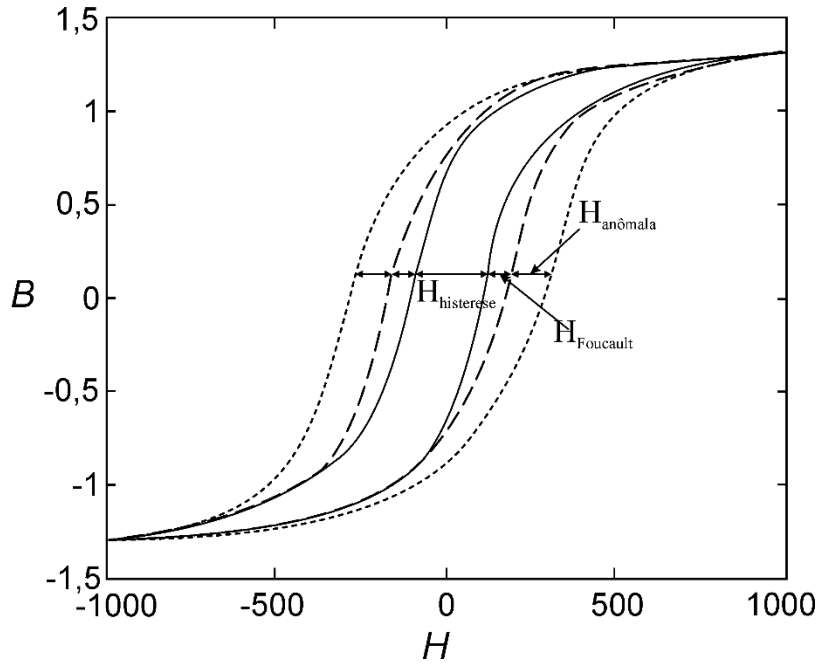


Figura 2.4 - Laço de Histerese para todas as perdas magnéticas do núcleo (Ribbenfjärd, 2010)

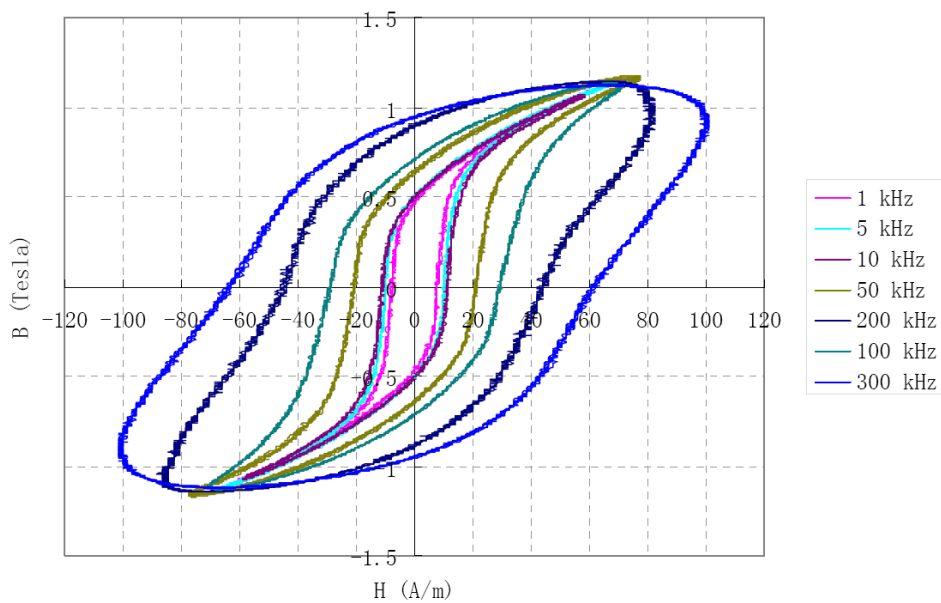


Figura 2.5 - Laço de Histerese de um material nanocristalino para diversas frequências (Shen, 2006)

Segundo Ribbenfjärd, a energia dispersa com perdas em um material magnético varia com a frequência como apresentado pela Figura 2.6. Para baixas frequências a energia de histerese é predominante, para frequências médias, a energia das perdas anômala domina o

maior percentual enquanto que para elevadas frequências a energia da perda clássica por correntes parasitas apresenta a maior parcela.

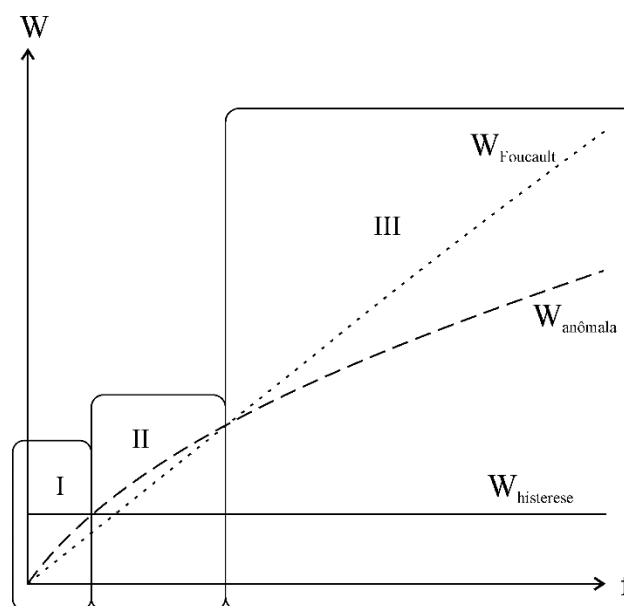


Figura 2.6 - Energia da perda de um material magnético pela frequência (Ribbenfjård, 2010)

## 2.4 Aquisição das características do núcleo

Com a finalidade de uma análise criteriosa sobre as características do núcleo original da lâmpada Endura foram necessários dados tanto de simulação quanto experimentais. O *software* utilizado nas simulações é o *Maxwell* da plataforma *Ansys*. Este é capaz de verificar perdas, densidade de fluxo e indutância, dentre outros. Porém, para que os resultados de simulação emulem corretamente os experimentos práticos, é necessário fornecer ao *software* as características magnéticas (curva de magnetização) e curvas de perdas do material em estudo. No caso da LFSE Endura da OSRAM o material dos núcleos é o ferrite N87 da EPCOS. Informações deste material podem ser encontradas no manual técnico fornecido pela fabricante em 2006.

Para a aquisição dos dados deste material, foram realizados dois experimentos. O primeiro, com o objetivo da determinação da curva de magnetização do material. O segundo para a obtenção das perdas em um núcleo sob diferentes tensões.

### 2.4.1 Levantamento da curva de magnetização do núcleo da LFSE

A primeira experiência foi realizada a fim de obter os dados relevantes para gerar a curva  $BH$  do material do núcleo, ferrite N87 (*Datasheet* EPCOS, 2006), e a partir desta extrair a curva de magnetização do material. A Figura 2.7 ilustra como essa experiência foi realizada. Uma corrente senoidal de amplitude controlada ( $I_1(t)$ ) foi injetada no enrolamento primário. A amplitude desta corrente foi de 1 A, o que foi suficiente para saturar o material do núcleo. Como mencionado anteriormente, para se obter das perdas histeréticas é necessária a aquisição do laço  $BH$  em baixa frequência, nesta experiência foi utilizada a frequência de 2 Hz. O estado de saturação pode ser observado a partir da distorção da forma de onda de tensão secundária ( $V_2(t)$ ). Uma vez que o ponto de saturação é atingido, não há mais variação de fluxo e, por (2.4), é possível observar que a tensão do secundário não varia, mesmo que a corrente de entrada o faça. A forma de onda da corrente primária é, então, adquirida simultaneamente a tensão na bobina secundária.

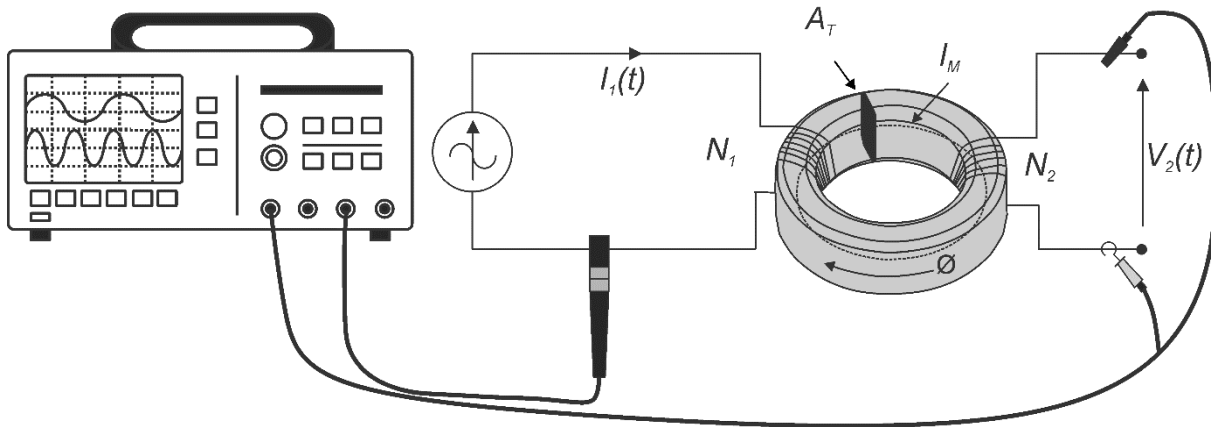


Figura 2.7 – Montagem experimental para obter os dados da curva  $BH$

$$V_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4)$$

O ciclo de histerese é uma relação de densidade de fluxo magnético  $B$  e intensidade de campo magnético  $H$ , como dito anteriormente. Sendo assim, através de equacionamentos

adquiriremos  $H$  e  $B$  a partir dos valores de corrente  $I_1(t)$  e da tensão induzida  $V_2(t)$ . A intensidade do campo magnético pode ser obtida a partir da corrente do primário por (2.5).

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot I_1(t)}{l_M} \quad (2.5)$$

Tendo obtido a intensidade de campo magnético, tem-se ainda que calcular a densidade de fluxo magnético. O fluxo pode ser calculado por (2.6), utilizando os dados da tensão secundária, de acordo com a Lei de Faraday. A integral de tensão foi realizada utilizando o *software* ORIGIN® (Origin Lab, 2013).

$$\theta(t) = \frac{1}{N_2} \cdot \int V_2(t) \cdot dt \quad (2.6)$$

Finalmente, a relação entre fluxo e densidade de fluxo é dada através da área transversal ( $A_T$ ), conforme (2.7).

$$B(t) = \frac{\theta(t)}{A_T} \quad (2.7)$$

Onde:

$l_M$  - É o comprimento do caminho médio do núcleo toroidal.

$N_1$  - Corresponde ao número de espiras da bobina primária.

$N_2$  - Corresponde ao número de espiras da bobina secundária.

$A_T$  - É a área transversal do núcleo toroidal.

A partir destes dados calculados é possível traçar o laço  $BH$  do ferrite N87 utilizado nos núcleos desta lâmpada. Deste ciclo calculado é possível obter a curva de magnetização, a qual é definida pela média entre a curva superior e a curva inferior do laço  $BH$ . Também é possível obter as perdas relacionadas ao ciclo de histerese do núcleo magnético. O valor da energia dissipada pode ser calculado a partir da integral de linha do laço  $BH$ , de acordo com (2.8). Onde  $V_N$  é o volume do núcleo, que pode ser encontrado pela multiplicação entre comprimento magnético e a área transversal.

$$W_H = V_N \oint B \cdot dH \quad (2.8)$$

Admitindo-se a “Equação de Steinmetz”, vista anteriormente, é possível se obter o coeficiente de *Steinmetz* relacionando-se potência  $P_H$  e energia  $W_H$ , a partir das equações (2.9), (2.10) e (2.11).

$$W_H = P_H \cdot T_S \quad (2.9)$$

$$W_H = k_H \cdot B_{SAT}^\alpha \quad (2.10)$$

$$k_H = \frac{W_H}{B_{SAT}^\alpha} \quad (2.11)$$

Até o momento todas as expressões utilizadas consideram valores de fluxo magnético e densidade magnética para a saturação do núcleo. Entretanto, o núcleo em funcionamento de regime permanente opera na região linear do ciclo de histerese, ocasionando a redução das perdas no núcleo. Contudo, durante a ignição da lâmpada, a tensão é elevada fazendo com que ocorram maiores perdas. Este fato não é relevante para a eficiência da lâmpada visto que o tempo de ignição é de aproximadamente 40  $\mu$ s (da Silva, 2012).

#### 2.4.2 Levantamento das perdas magnéticas experimentalmente

A segunda experiência realizada teve como objetivo a obtenção dos dados necessários para o cálculo das perdas dos núcleos. As equações (2.1) e (2.2) demonstram que as perdas de energia em um elemento magnético podem ser expressas como uma função da densidade de fluxo, que pode ser dada como uma função da tensão de núcleos.

Assim, estabelecido que as perdas no núcleo magnético são proporcionais à tensão aplicada sobre ele, a segunda experiência foi realizada. Este experimento é equivalente ao realizado no teste de transformador aberto, para determinar suas perdas no ferro. A tensão da



forma de onda senoidal, com a frequência nominal de funcionamento da lâmpada, foi aplicada ao núcleo, como mostrado na Figura 2.8.

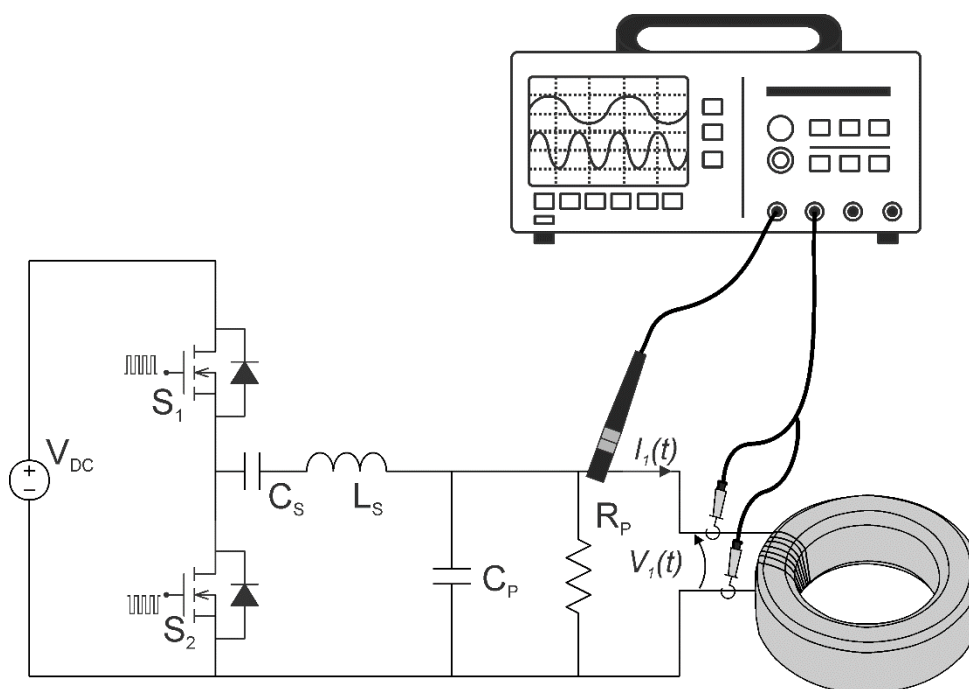


Figura 2.8 - Montagem experimental para obter os dados para determinar as perdas do núcleo

A amplitude da forma de onda da tensão é modificada através da variação da tensão de barramento ( $V_{DC}$ ), a fim de obter diversos pontos de funcionamento, que ocorrem quando o fluxo luminoso da lâmpada é modificado (da Silva, 2012).

O método para o projeto do filtro LC série C paralelo utilizado para as aquisições práticas é, detalhadamente, apresentado por da Silva em 2012 (Bisogno, 2002). Este projeto deve considerar a natureza da carga, esta comporta-se como uma reatância pura até o momento de sua ignição, posteriormente apresentando características de uma associação paralela entre uma reatância e uma resistência, como pode ser observado pelas Figura 2.9 e Figura 2.10, respectivamente. A Tabela 2.1 apresenta os componentes deste circuito e seus respectivos valores.

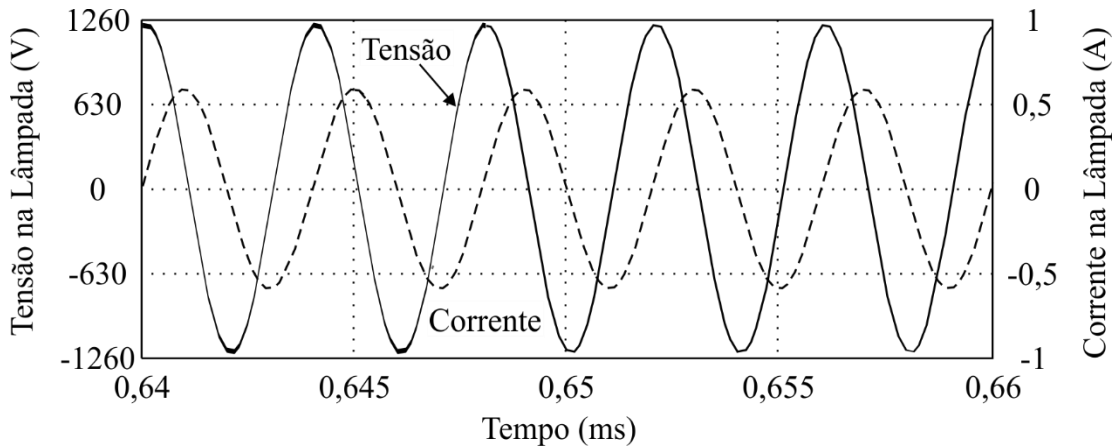


Figura 2.9 - Tensão e Corrente na Lâmpada antes da ignição da mesma, aquisição experimental

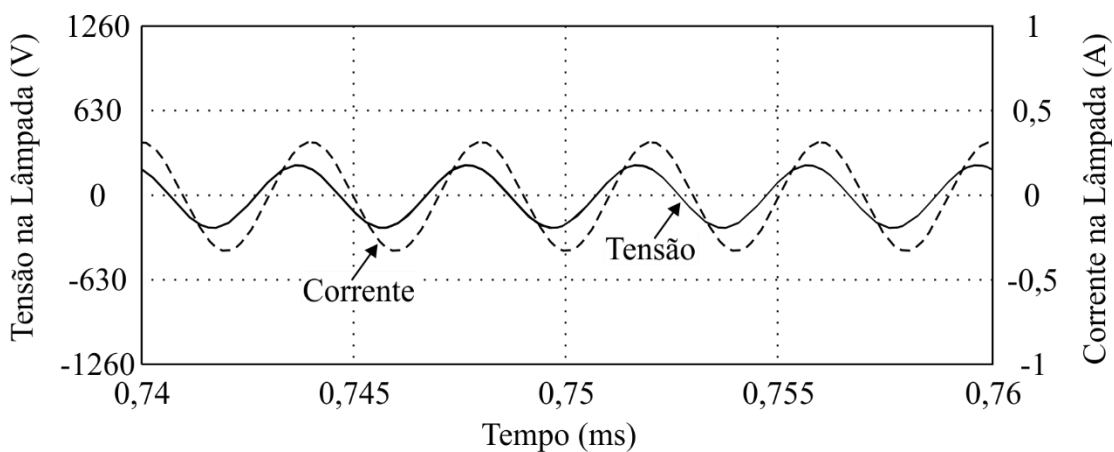


Figura 2.10 - Tensão e Corrente na Lâmpada após a ignição da mesma, aquisição experimental

Tabela 2.1 – Parâmetros experimentais do filtro LCC

Descrição	Valor
Interruptores – <i>Mosfets</i>	IRF740
Tensão de alimentação ( $V_{BUS}$ )	50 V
Frequência de comutação <sup>1</sup>	250 kHz
Indutância série ( $L_S$ )	150 $\mu$ H
Capacitância série ( $C_S$ )	47 nF
Capacitância paralela ( $C_P$ )	3,6 nF
Resistência paralela ( $R_P$ )	33,33 k $\Omega$

Para calcular a potência ativa consumida para cada tensão de operação, as formas de onda de tensão e corrente primárias são adquiridas. Estes dados são computados e as perdas do núcleo são calculadas através do *software* MathCad aplicando-se (2.12). Deve-se observar

que a sonda de corrente insere erro nesta medida devido aos baixos nível de corrente e devido a defasagem angular que a mesma pode vir a apresentar.

$$P_T = \frac{1}{T_s} \cdot \int V_1(t) \cdot I_1(t) \cdot dt \quad (2.12)$$

A Tabela 2.2 apresenta os valores de tensão, corrente e perdas adquiridos nesta experiência. A faixa de variação dos valores da primeira coluna, tensão, foram determinados através de outro experimento, relatado e apresentado em da Silva, 2012. Este experimento determinou que esta é a variação da tensão sobre a lâmpada quando esta passa por um processo de variação de fluxo luminoso pela variação da tensão de barramento do circuito de alimentação da lâmpada.

Tabela 2.2 – Dados Experimentais das Perdas de um núcleo N87

<b>Tensão sobre o núcleo (V<sub>eficaz</sub>)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Perdas (W)</b>
186,907	0,069	1,309
190,003	0,070	1,354
194,432	0,072	1,458
196,627	0,072	1,510
202,265	0,074	1,606
207,716	0,076	1,706
210,114	0,077	1,776
211,410	0,077	1,801
213,393	0,078	1,866
214,723	0,081	1,945
218,489	0,080	1,970
221,260	0,081	2,059
224,375	0,083	2,153

Pelos valores apresentados na Tabela 2.2, para uma variação de 20% da tensão sobre o núcleo, tem-se uma variação de, aproximadamente, 65% da potência dissipada no mesmo.

## 2.5 Conclusão

Neste capítulo é apresentado o processo de partida da LFSE. É explicado que, apesar do funcionamento da lâmpada ocorrer devido ao campo magnético da mesma, a ignição desta ocorre devido ao campo eletrostático criado entre as espiras das bobinas.

Depois de estudado o processo de partida da lâmpada, são estudados os núcleos da mesma. Uma vez que se conhecem as propriedades demandadas do núcleo pela lâmpada, é possível, efetivamente, estudar o material do mesmo de forma a otimizar seu desempenho. Para esta análise, são apresentadas as diferentes fontes de perdas em materiais magnéticos.

Os experimentos realizados para levantamento de dados do material do núcleo, N87, também são apresentados neste capítulo. Estes tem a finalidade de proporcionar os dados necessários para a calibração do modelo de simulação do núcleo.

## CAPÍTULO 3

# NÚCLEO DA LFSE ENDURA/OSRAM DE MATERIAL FERRITE N87

---

### 3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do levantamento da curva de magnetização e do levantamento das perdas do núcleo de ferrite N87 da LFSE Endura. Estes resultados são então utilizados para calibrar a simulação proposta. Através da simulação são encontrados os valores de perda do núcleo para a temperatura de funcionamento do mesmo quando a lâmpada encontra-se em regime permanente.

### 3.2 Calibragem da simulação do núcleo N87 da LFSE

Para calibrar a simulação serão utilizadas a curva de magnetização obtida experimentalmente e as curvas de perdas *versus* densidade de fluxo para diversas frequências fornecidas pelo fabricante (*Datasheet* EPCOS, 2006).

O material e o entreferro do núcleo original da LFSE são determinados pelo fabricante. Portanto, estes dados devem ser adquiridos e inseridos na simulação com o intuito de calibrar os parâmetros de simulação. Por isso, neste caso a simulação descende dos resultados experimentais e não contrariamente como usualmente acontece. Para verificar se a simulação esta emulando corretamente as características do núcleo são comparadas a curva de magnetização da simulação e as formas de onda da tensão e da corrente nominal com os resultados experimentais. Com a simulação calibrada, é possível se obter as perdas do núcleo, a densidade do fluxo e qualquer outro parâmetro de interesse.

A Tabela 3.1 apresenta os valores dos parâmetros experimentais. O método utilizado para obter o laço  $BH$  foi descrito no capítulo 2. A lâmpada utilizada neste trabalho é da OSRAM modelo Endura 100 W (*Datasheet* Endura, 2012).

Tabela 3.1 – Parâmetros das montagens experimentais

Símbolos	Descrição	Valor
$N_1$	Número de espiras da bobina primária	18
$N_2$	Número de espiras da bobina secundária	350
$V_{eficaz}$	Tensão eficaz na lâmpada para potência nominal	202 V
$f$	Frequência nominal da lâmpada	250 kHz
$A_T$	Área transversal do núcleo toroidal	228 mm <sup>2</sup>
$L_M$	Comprimento do caminho médio do núcleo toroidal	166 mm

A Figura 3.1 apresenta o núcleo 3D usado na simulação para comparar os resultados experimentais e verificar a precisão da simulação. A Figura 3.2 apresenta o núcleo 2D obtido a partir do modelo 3D. O modelo 2D foi utilizado para realizar simulações para comparar as perdas no núcleo, visto que a simulação de um modelo 2D ocorre mais rapidamente do que a do modelo 3D, economizando-se assim muito tempo de simulação.

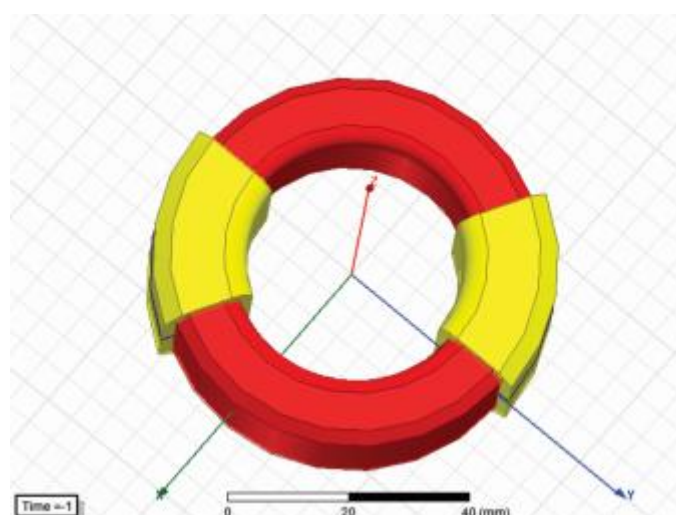


Figura 3.1 – Modelo 3D para simulação da curva de magnetização do núcleo

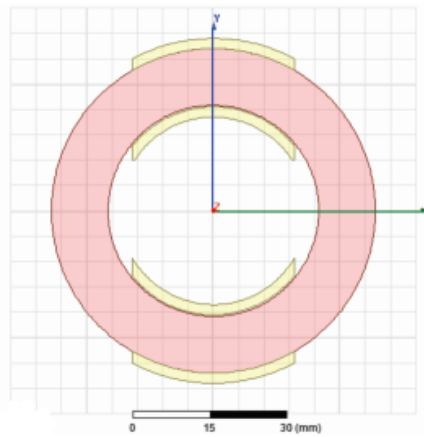
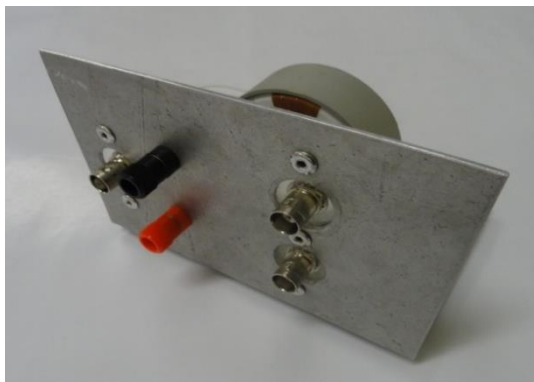


Figura 3.2 – Modelo 2D para simulação das perdas do núcleo

O primeiro passo é a aquisição da curva de magnetização do núcleo para utilizar na simulação. A forma com que a curva foi adquirida já foi explicada no capítulo 2.

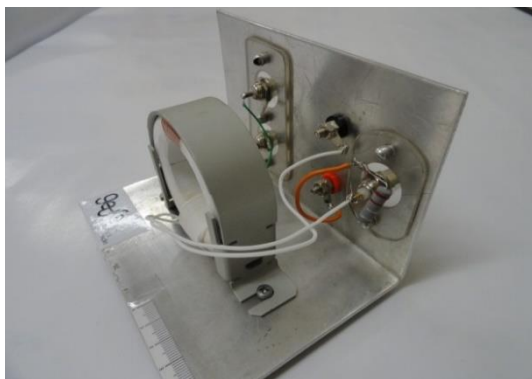
A Figura 3.3 mostra o protótipo montado para os testes. A Figura 3.4 apresenta o laço  $BH$  e a curva de magnetização, ambos obtidos a partir dos dados experimentais. A curva de magnetização é então introduzida no programa de simulação.



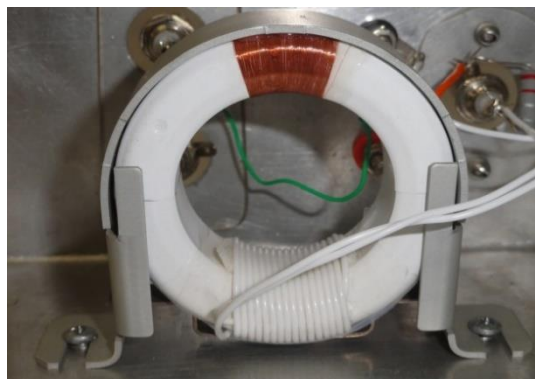
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.3 – Protótipo contruido para testes experimentais

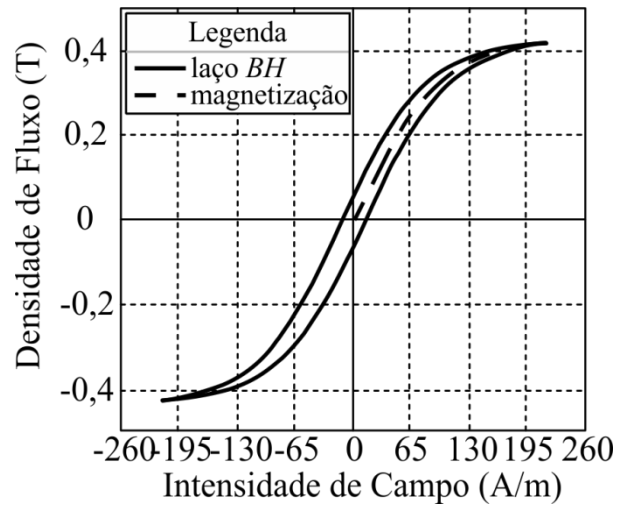


Figura 3.4 – Laço  $BH$  e curva de magnetização do núcleo de ferrite N87 obtidas experimentalmente

O segundo passo é a introdução das curvas de perda do núcleo N87 no programa de simulação. Porém, como pode ser observado pela Figura 3.5, as perdas variam de acordo com a densidade de fluxo, a frequência e a temperatura de operação do núcleo.

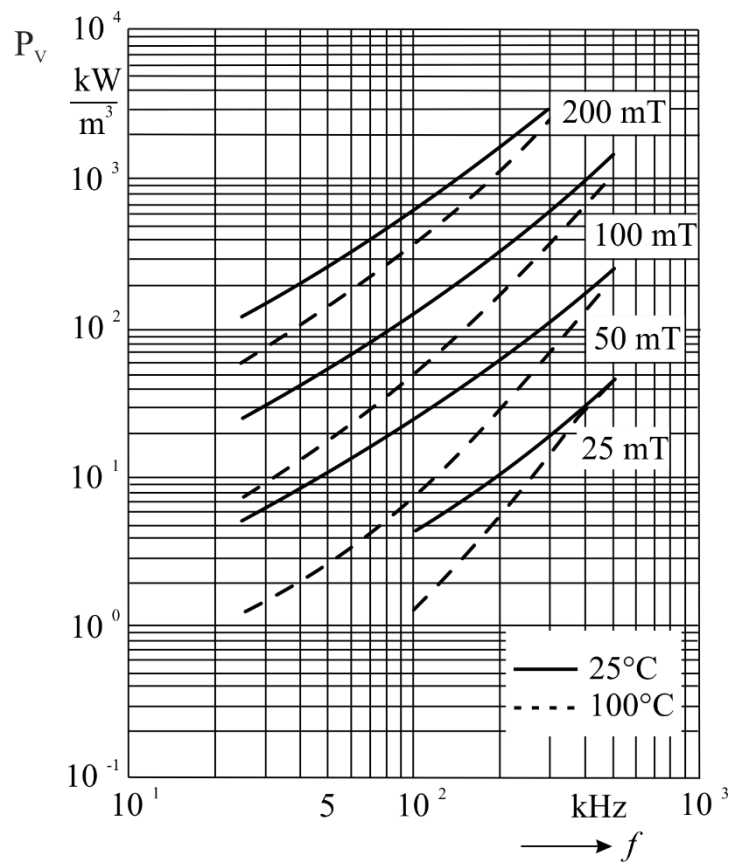


Figura 3.5 – Curvas de perdas do material N87 (*Datasheet* EPCOS, 2006)



Portanto, é necessário conhecer a temperatura do núcleo no momento da aquisição das perdas experimentais. Para isto, foram coletadas imagens térmicas do núcleo no decorrer do experimento com a câmera térmica modelo T132 produzida pela Fluke. Como pode ser observado pela Figura 3.6, o núcleo chega a temperaturas de até 40°C durante o levantamento das perdas, exatamente onde os núcleos são partidos ao meio.

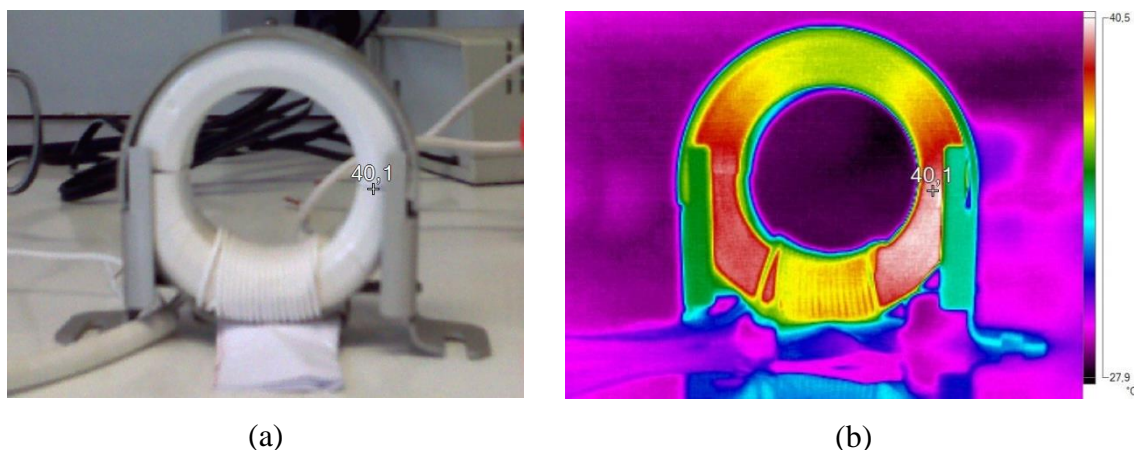


Figura 3.6 – Fotos do núcleo durante o experimento de levantamento de perdas

Sabendo-se a real temperatura do núcleo no momento das aquisições experimentais, as curvas de perdas introduzidas na simulação podem ser adequadas a temperatura, aumento a precisão da simulação. Isto fará com que a simulação tenha uma maior capacidade de emular corretamente as características do núcleo.

### 3.3 Comparação entre resultados experimentais e simulações

Como pode ser observado pela Figura 3.6, os núcleos da lâmpada são partidos ao meio. Portanto, na simulação os mesmos foram partidos e entrefeiros de 22  $\mu\text{m}$  foram considerados em cada junção dos núcleos. Este valor foi determinado para o ajuste da indutância do núcleo.

A Figura 3.7 ilustra as formas de onda experimentais da corrente primária ( $I_1(t)$ ) (traço azul claro) e da tensão secundária ( $V_2(t)$ ) (traço azul escuro) durante o ensaio de saturação. A partir destas é possível obter os dados necessários para determinar o laço  $BH$  do material. Como se pode observar, pela distorção da forma de

onda da tensão, a saturação ocorreu. O fluxo magnético foi obtido a partir dos dados da tensão induzida no enrolamento secundário, empregando-se (2.5). Com base em  $I_1(t)$  e  $\phi(t)$ , por (2.4) e (2.6), pode-se determinar o laço  $BH$ .

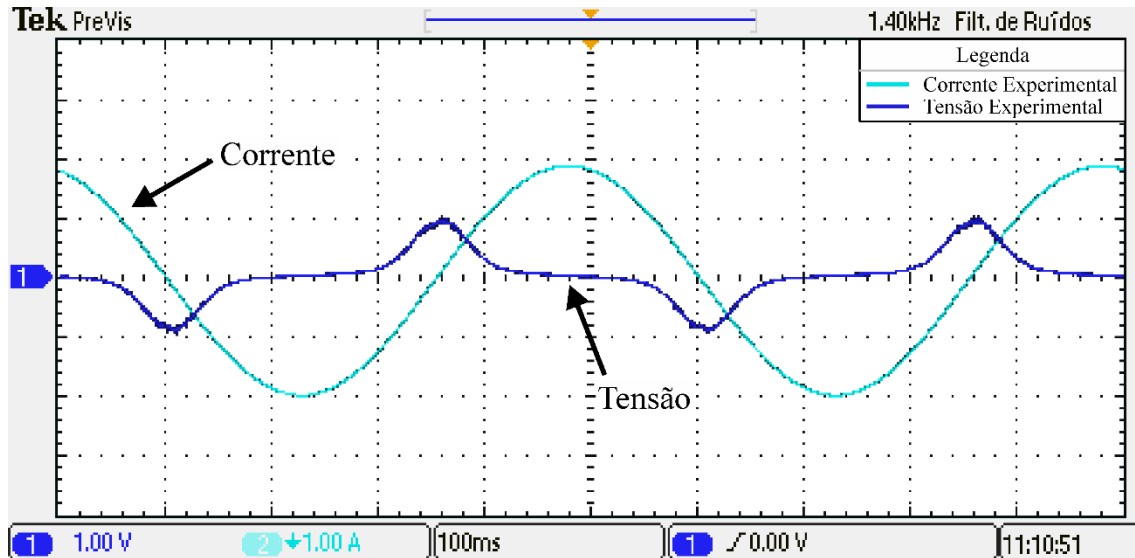


Figura 3.7 – Resultados experimentais da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização

A Figura 3.8 ilustra as formas de onda simuladas da corrente primária (traço verde) e da tensão secundária (traço vermelho), durante a saturação.

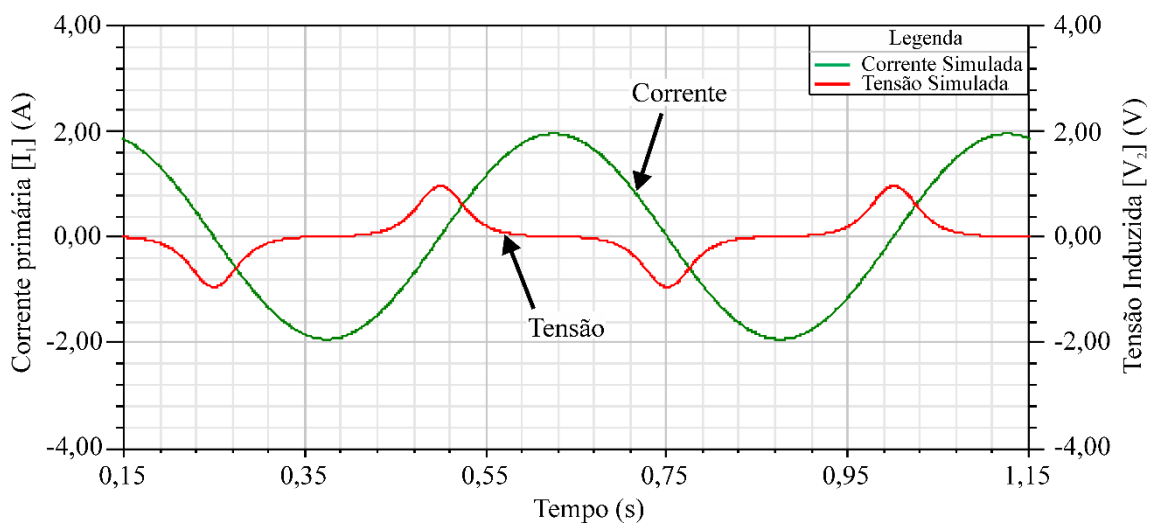


Figura 3.8 – Resultados de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização

Os resultados experimentais e de simulação são graficamente comparados na Figura 3.9.

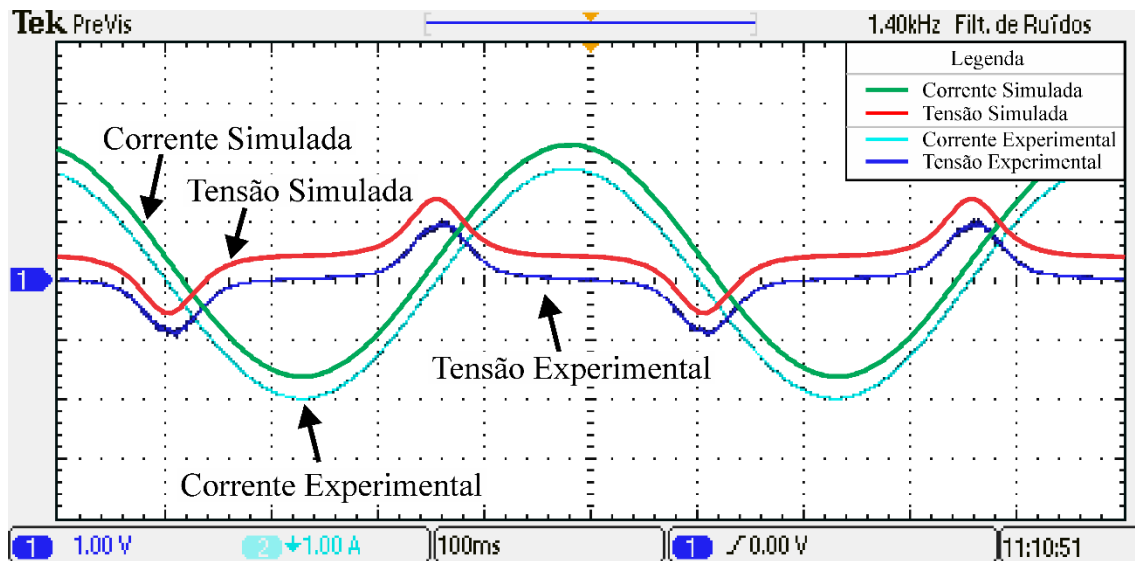


Figura 3.9 – Resultados experimentais e de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização no mesmo gráfico

A Figura 3.10 apresenta uma comparação entre a curva de magnetização inserida no modelo de simulação (traço vermelho) e a curva gerada pela simulação (traço verde). O laço de histerese foi comprovado pela Figura 3.9, portanto, ambas as curvas de magnetização e o laço  $BH$  da simulação foram verificados.

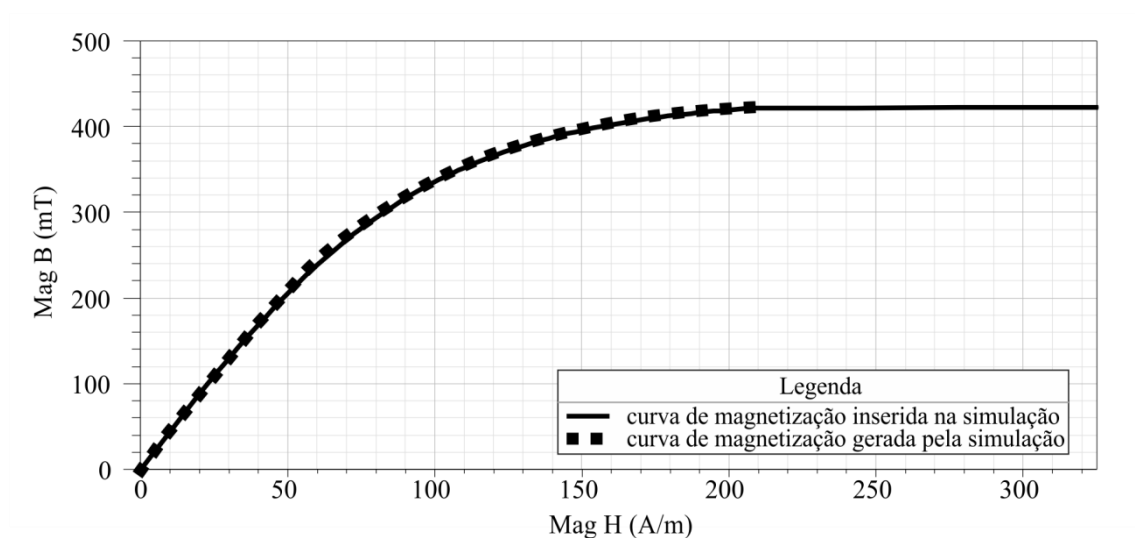


Figura 3.10 – Comparação da curva de magnetização inserida no modelo de simulação e a curva gerada pela simulação

Uma nova comparação pode ser realizada através da aquisição das formas de onda de tensão e de corrente para o ponto de operação nominal. Sendo estas aquisições semelhantes às adquiridas experimentalmente, é possível admitir-se que os dados obtidos através da simulação são confiáveis. Esta experiência é realizada como ilustrado pela Figura 2.8 e como já foi explicado no capítulo 2.

A Figura 3.11 ilustra as formas de onda experimentais da corrente primária ( $I_1(t)$ ) (traço azul claro) e da tensão primária ( $V_1(t)$ ) (traço azul escuro) durante a operação em regime permanente.

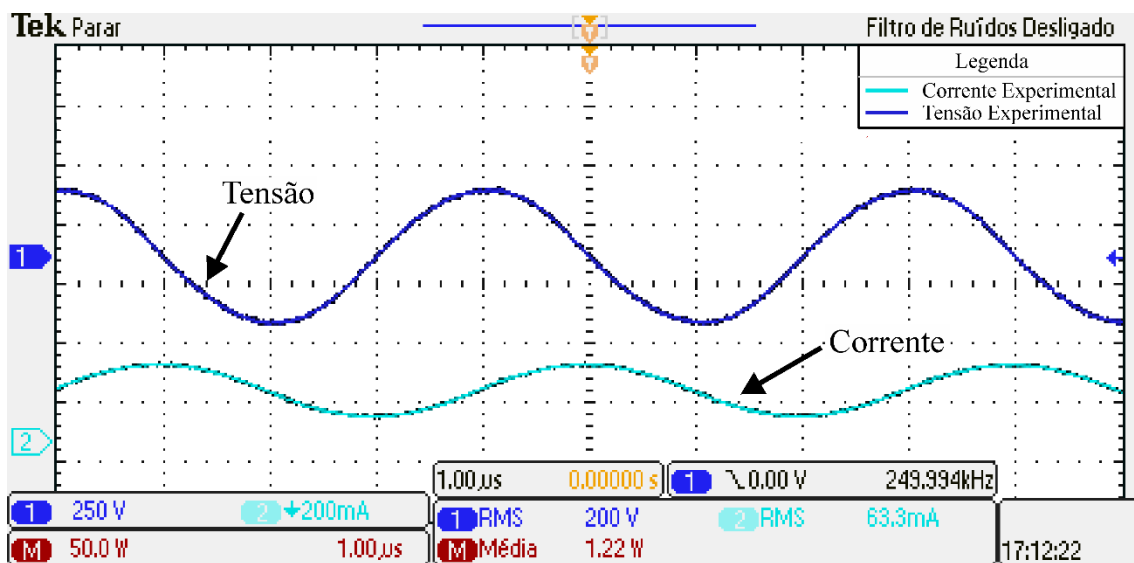


Figura 3.11 – Resultados experimentais da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente

A Figura 3.12 ilustra as formas de onda simuladas da corrente primária (traço verde) e da tensão primária (traço vermelho), durante a operação em regime permanente.

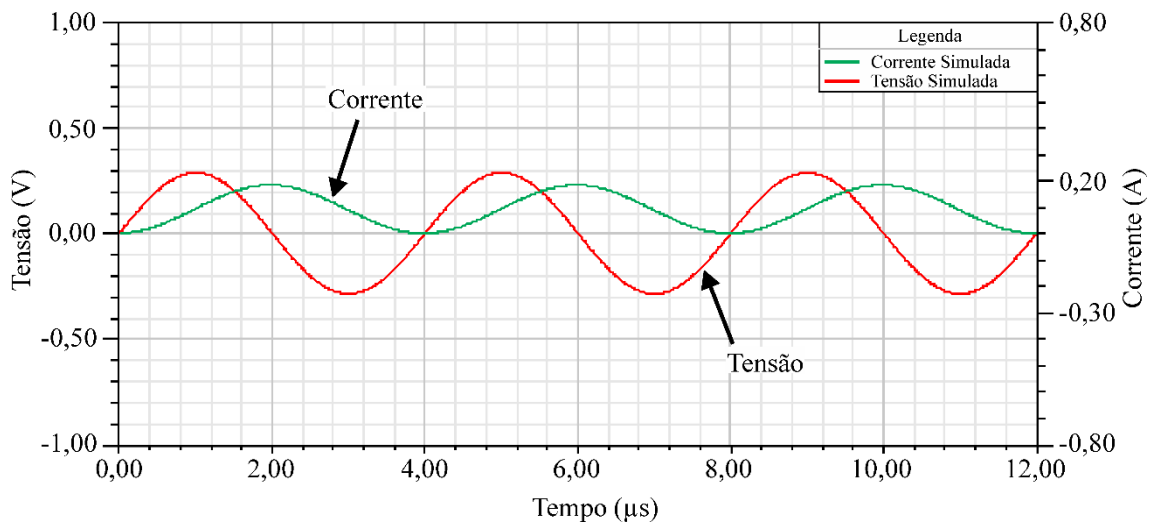


Figura 3.12 – Resultados de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente

Os resultados experimentais e de simulação são graficamente comparados na Figura 3.13.

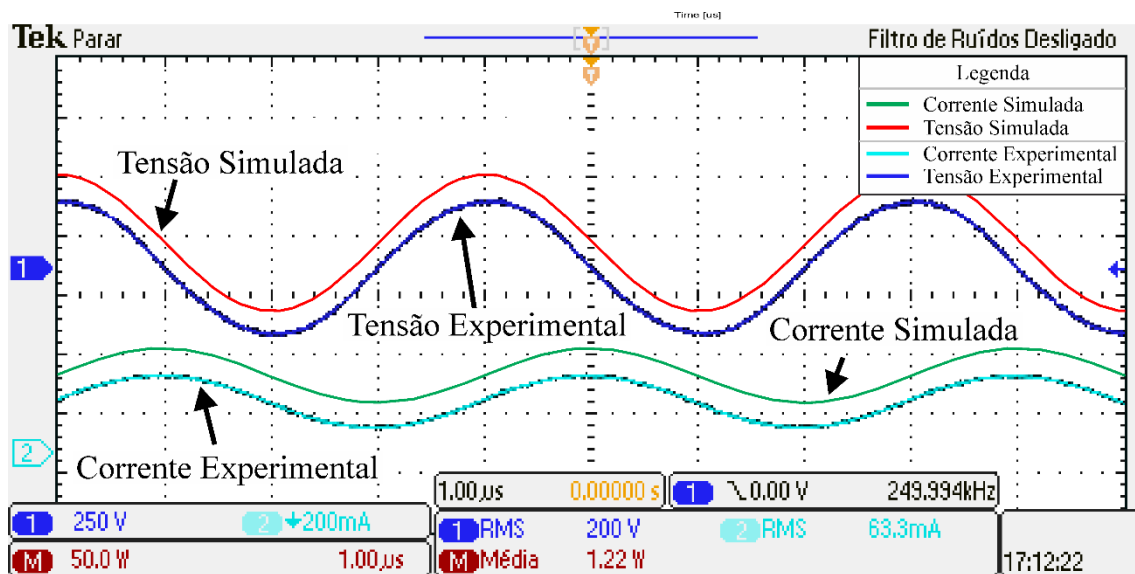


Figura 3.13 – Resultados experimentais e de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente no mesmo gráfico

Pelas Figura 3.9 e Figura 3.13 é possível concluir que a simulação está emulando corretamente as características magnéticas do núcleo da lâmpada. O último ponto a ser verificado é a potência dissipada pelo núcleo. As perdas foram experimentalmente medidas para diversas tensões primárias. Estas tensões foram adquiridas através de um

ensaio de variação do fluxo luminoso da lâmpada. A tensão eficaz da lâmpada em regime permanente é de 202 Volts, sendo que na mínima potência alcançada a tensão eficaz na lâmpada chegou a 224 Volts. Posteriormente foram realizadas simulações para cada uma destas tensões.

A Figura 3.14 apresenta o valor da indutância do núcleo durante a simulação com a tensão nominal de operação. A Figura 3.15 apresenta o valor da indutância do núcleo medido experimentalmente através do equipamento LCR modelo MXB-821 produzido pela empresa Minipa. Como pode-se observar, os valores de indutância são próximos a 1,1 mH, apresentando um erro menor que 0,5%.

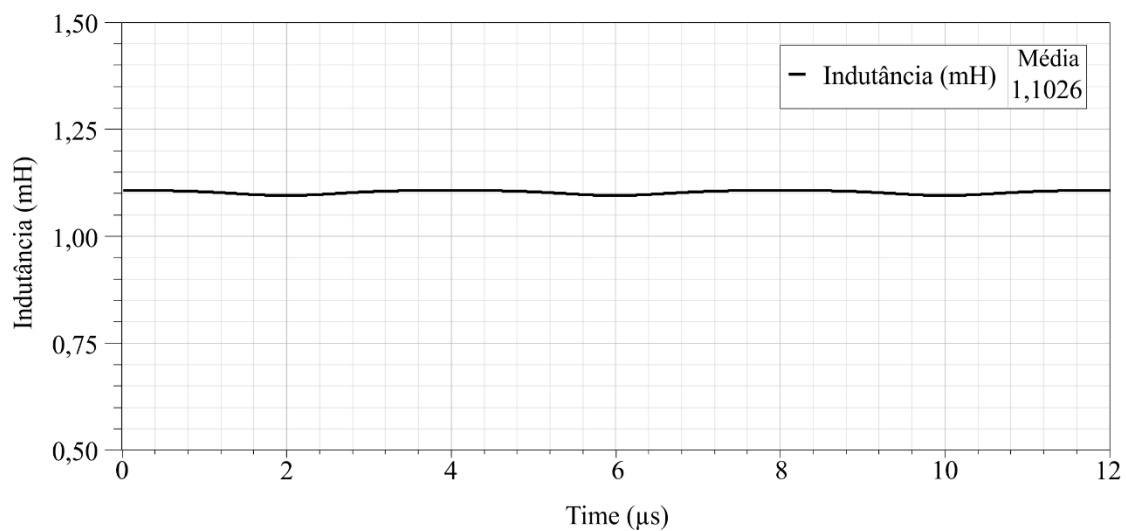


Figura 3.14 – Valor da indutância do núcleo durante a simulação com a tensão nominal de operação



Figura 3.15 – Valor da indutância do núcleo medido experimentalmente

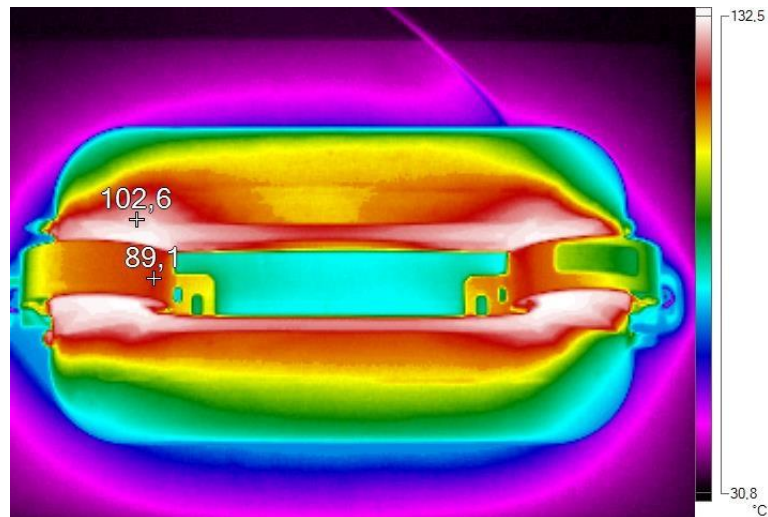
A Tabela 3.2 apresenta comparações entre as perdas experimentais e as calculadas através das simulações. É importante notar que a lâmpada possui dois núcleos, então as perdas apresentadas na Tabela 3.2 devem ser duplicadas para obtermos as perdas totais geradas no material magnético da lâmpada.

Tabela 3.2 – Perdas Experimentais e de Simulação para um núcleo magnético

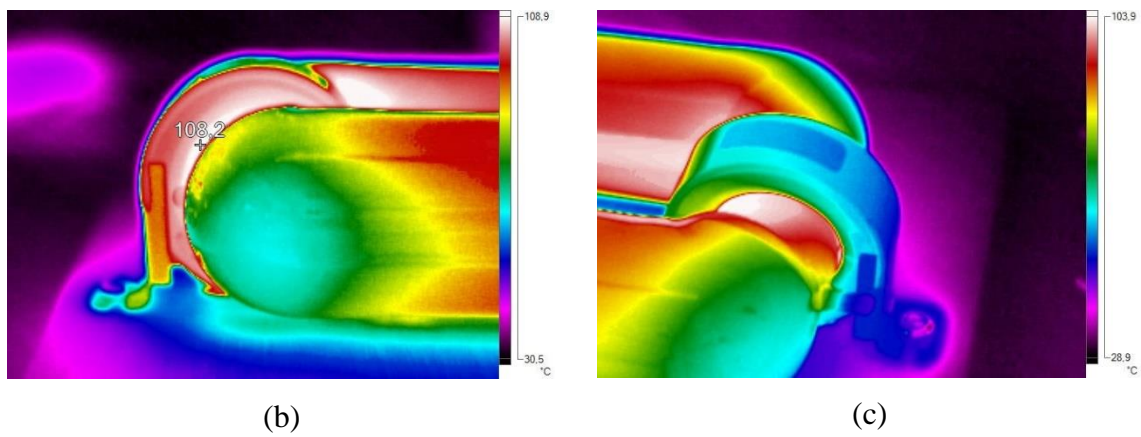
Tensão sobre o núcleo ( $V_{\text{eficaz}}$ )	Perdas (W)		Erro (%)
	Experimentais	Simulação	
186,907	1,309	1,320	0,838
190,003	1,354	1,375	1,509
194,432	1,458	1,456	-0,151
196,627	1,510	1,497	-0,893
202,265	1,606	1,606	-0,003
207,716	1,706	1,715	0,556
210,114	1,776	1,765	-0,612
211,410	1,801	1,792	-0,489
213,393	1,866	1,834	-1,735
214,723	1,945	1,866	-0,750
218,489	1,970	1,944	-1,317
221,260	2,059	2,006	-2,639
224,375	2,153	2,077	-3,685

Pelos resultados apresentados pode-se afirmar que a simulação está emulando com precisão de até 3,6% as características de perdas do núcleo da lâmpada.

Porém, já se determinou que as perdas variam com a temperatura do núcleo. Portanto, para determinar-se as reais perdas magnéticas da lâmpada em funcionamento é necessário determinar-se a temperatura do núcleo com a lâmpada em regime permanente. A Figura 3.16 demonstra a temperatura do núcleo e da lâmpada quando esta esteve em funcionamento por um período maior que 1 hora e 30 minutos.



(a)



(b)

(c)

Figura 3.16 – Fotos da lâmpada (e do núcleo) em funcionamento

Como pode ser observado na Figura 3.16 a temperatura do núcleo de ferrite N87 quando a lâmpada está funcionando em regime permanente chega a aproximadamente 100°C. Portanto, foram realizadas simulações para cada uma das tensões da Tabela 3.2 considerando a curva de perdas de 100°C. Os novos resultados de perdas em um núcleo são apresentados na Tabela 3.3. É possível afirmar que estes resultados devem ser próximos aos reais, pois a simulação foi corroborada pelas comparações realizadas neste capítulo.



Tabela 3.3 – Perdas Experimentais para 40°C e de Simulação para 100°C para um núcleo magnético

Tensão sobre o núcleo ( $V_{\text{eficaz}}$ )	Perdas (W)		Diferença (W)	Diferença (%)
	Experimentais	Simulação		
186,907	1,309	1,089	-0,220	-20,246
190,003	1,354	1,128	-0,226	-20,010
194,432	1,458	1,203	-0,255	-21,207
196,627	1,510	1,238	-0,273	-22,040
202,265	1,606	1,330	-0,276	-20,769
207,716	1,706	1,422	-0,284	-19,963
210,114	1,776	1,464	-0,312	-21,321
211,410	1,801	1,478	-0,323	-21,851
213,393	1,866	1,513	-0,352	-23,280
214,723	1,945	1,537	-0,343	-22,292
218,489	1,970	1,607	-0,363	-22,608
221,260	2,059	1,659	-0,400	-24,115
224,375	2,153	1,718	-0,435	-25,319

Pela Tabela 3.3 pode-se reparar que a potência dissipada em um núcleo, para a tensão eficaz nominal (202 V), diminuiu 0,276 W como a correção da temperatura de operação do núcleo. Pela quinta coluna da Tabela 3.3 pode-se reparar que, em média, a potência dissipada no núcleo diminui aproximadamente 21% quando se considera a real temperatura de operação do núcleo.

A Figura 3.17 permite uma visualização gráfica da diferença de potência que pode ser observada nos dados das Tabela 3.2 e Tabela 3.3.

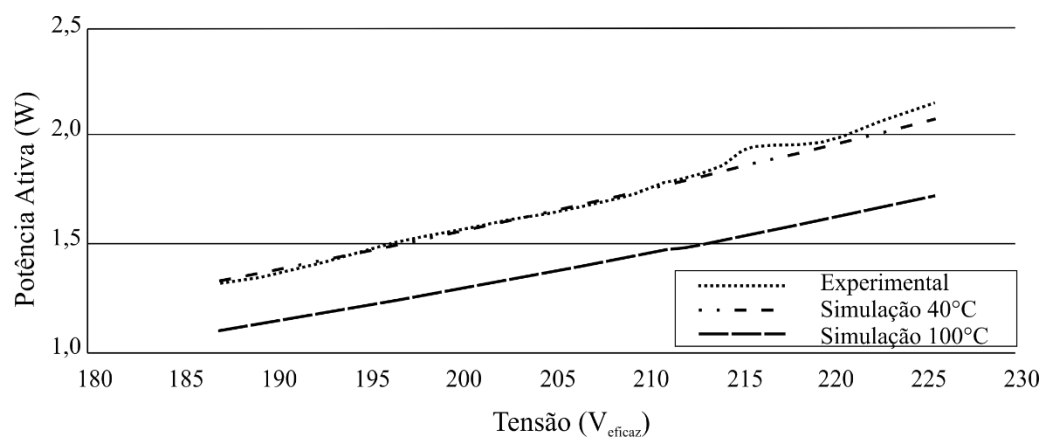


Figura 3.17 – Comparação gráfica dos dados das Tabelas 3.2 e 3.3

Com base nos resultados apresentados na Figura 3.17 se poderia concluir que o aumento da temperatura de funcionamento causa uma menor perda no material magnético. Porém, como pode ser observado pela Figura 3.18, retirada do manual técnico do material N87, as perdas são mínimas justamente na temperatura de aproximadamente 100°C.

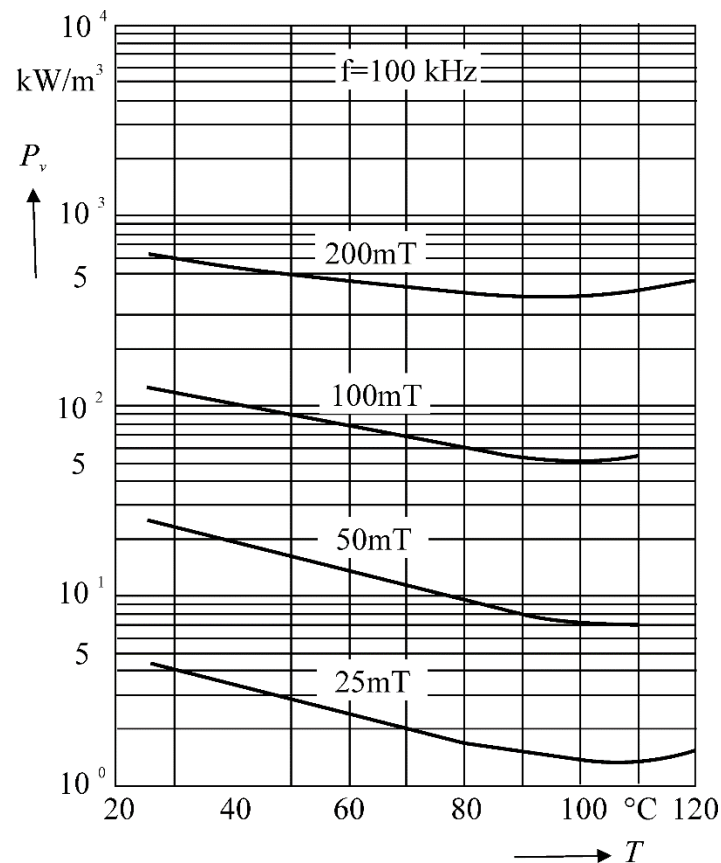


Figura 3.18 – Variação das perdas do material N87 com a temperatura (*Datasheet* EPCOS, 2006)

Contudo, a LFSE em estudo é alimentada à 250 kHz e, por conta disto, pode apresentar problemas com interferência eletromagnética. Por esta razão, o fabricante garante que a lâmpada não apresentará este problema apenas quando for utilizada em conjunto com a luminária projetada para a mesma. Esta luminária é apresentada na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Luminária da LFSE Endura (*Datasheet Endura, 2012*)

Pela Figura 3.19 repara-se que a lâmpada é colocada em um local confinado. Isto faria com que as perdas nos núcleos aumentassem, visto que o aumento de temperatura da lâmpada seria eminente. Porém, são utilizados sistemas de refrigeração e aquecimento para controlar a temperatura da lâmpada. Permitindo que a lâmpada funcione sempre na faixa de temperatura que lhe permite a melhor eficiência luminosa.

Esta faixa de temperatura não é definida apenas pelo material magnético, mas também pela eficiência do amálgama de mercúrio presente na lâmpada. A Figura 3.20 demonstra a variação da eficiência do amálgama em relação à temperatura.

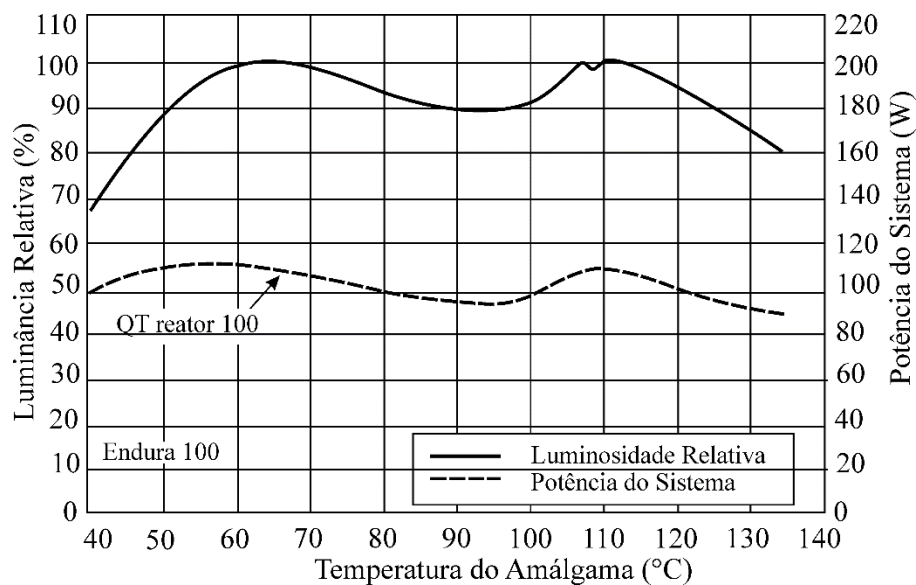


Figura 3.20 – Eficiência luminosa da lâmpada com relação a temperatura do amálgama da mesma (*Datasheet Endura, 2012*)

Os resultados de perdas apresentados para 100°C são ainda uma aproximação das reais perdas da lâmpada. Como pode ser observado pela Figura 3.21, a curva de magnetização do núcleo também varia com a temperatura. Contudo, não foi realizado o levantamento da curva de magnetização do material do núcleo da lâmpada Endura a 100°C.

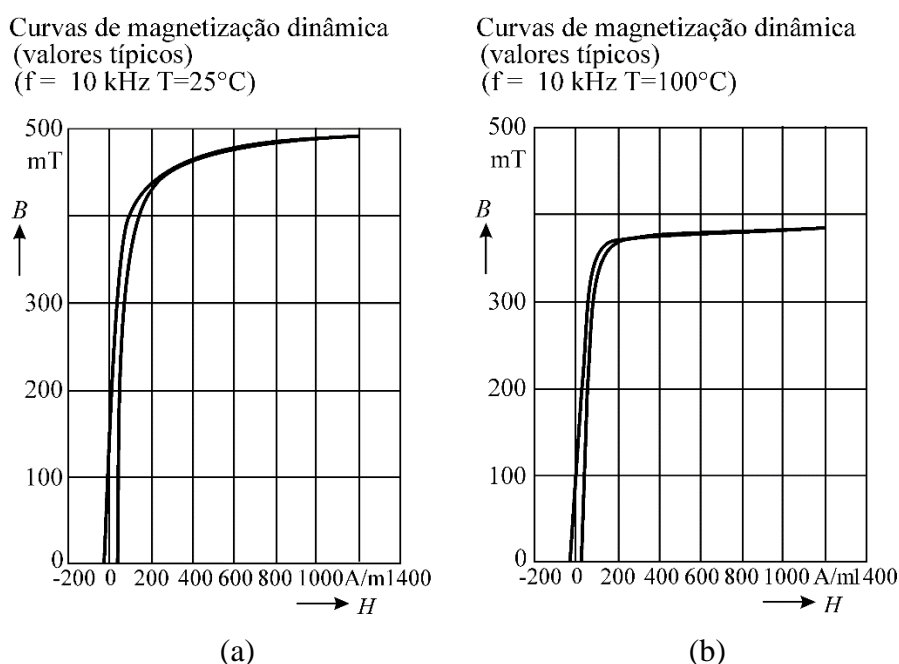


Figura 3.21 – Curvas de magnetização típicas do material N87 para 25°C e 100°C (*Datasheet EPCOS, 2006*)

Outra ferramenta da simulação que pode ser utilizada pelo projetista é análise de densidade de fluxo do núcleo. O núcleo deve ser projetado de tal forma que o material tenha seu melhor aproveitamento. Isto é, se a densidade de fluxo em regime permanente for muito baixa, pode ser um indicativo de que muito material foi utilizado, aumentando assim as perdas do núcleo seu volume e peso. Porém, o núcleo também deve ser projetado para que não ocorra a saturação do mesmo para tensões de funcionamento. Sendo que outro ponto a ser observado é o momento de ignição da lâmpada. Como foi apresentado, o núcleo pode saturar, mas para que os componentes do circuito de acionamento não sejam danificados, é interessante que o tempo no qual o núcleo fica saturado não seja elevado. A Figura 3.22 apresenta a densidade de fluxo no núcleo da lâmpada Endura para o instante de tempo que a corrente no núcleo é máxima, isto é, no

momento que a densidade de fluxo no núcleo é máxima, sendo esta 0,1138 T, aproximadamente.

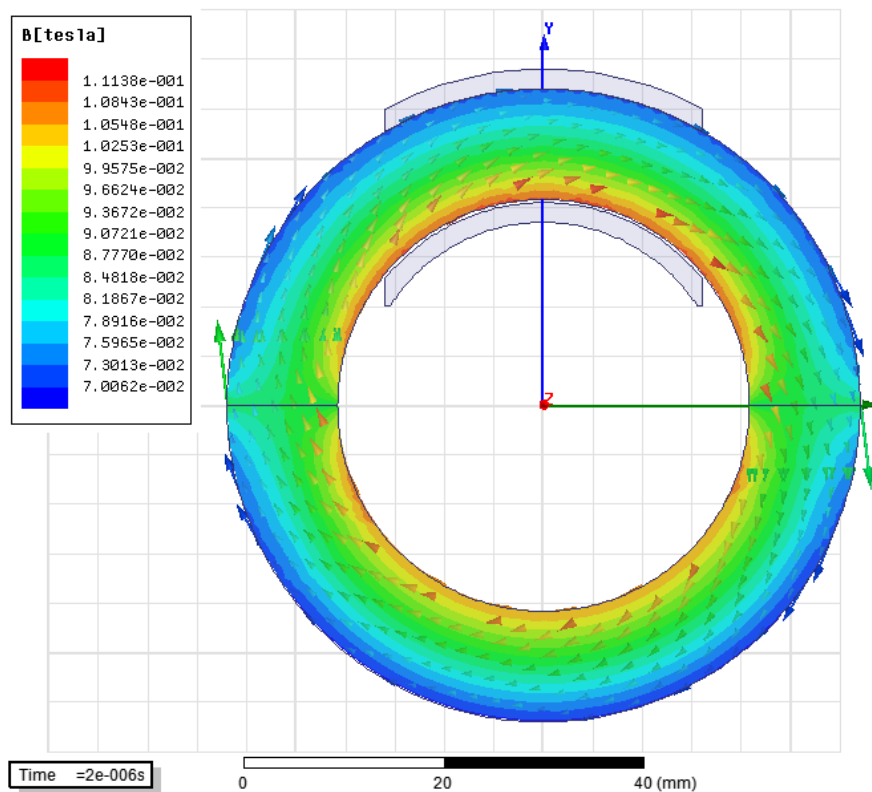


Figura 3.22 – Densidade de fluxo magnético no núcleo para o instante de tempo em que a corrente no mesmo é máxima

### 3.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais do levantamento da curva de magnetização e do levantamento das perdas do núcleo de ferrite N87 da LFSE Endura. A simulação foi então calibrada a partir destes dados.

A simulação do núcleo foi validada através da comparação das formas de onda de tensão e corrente, simuladas e experimentais, para os pontos de saturação e de funcionamento em regime permanente. Após a validação da simulação, esta foi utilizada para estimar as perdas do núcleo na temperatura de funcionamento da lâmpada, adquirida através de imagens térmicas como sendo 100°C.

A simulação foi ainda utilizada para comprovar o ponto de máxima densidade de fluxo no núcleo durante o funcionamento em regime permanente.



# NÚCLEO DE MATERIAL

## FERRITE IP12E

---

### 4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do levantamento da curva de magnetização e do levantamento das perdas do núcleo de ferrite IP12E. Estes resultados são então utilizados para calibrar a simulação proposta. Através da simulação são então encontrados os valores de perda do núcleo para a temperatura de funcionamento do mesmo quando a lâmpada encontra-se em regime permanente.

### 4.2 Calibragem da simulação do núcleo IP12E

A calibragem a simulação do núcleo do material IP12E foi realizada da mesma forma que a do núcleo N87 descrita no capítulo 3. A curva de magnetização foi obtida experimentalmente e as curvas de perdas *versus* densidade de fluxo para diversas frequências fornecidas pelo fabricante (*Datasheet* Thornton, 2008).

#### 4.2.1 Levantamento da curva de magnetização do núcleo IP12E

Devido a limitações de equipamentos no laboratório a aquisição dos dados de tensão e corrente para a determinação do laço *BH* foram realizadas diferentemente do método apresentado no capítulo 2. A Figura 4.1 ilustra como essa experiência foi realizada. Devido a indisponibilidade de uma fonte de corrente senoidal foi utilizada uma fonte de tensão senoidal em série com um resistor de resistência muito mais elevada que a reatância do núcleo a 45 Hz, frequência da forma de onda da tensão. Uma tensão senoidal de amplitude controlada e frequência de 45 Hz ( $V_1(t)$ ) foi injetada no

enrolamento primário. A amplitude desta forma de onda foi suficiente para saturar o material do núcleo.

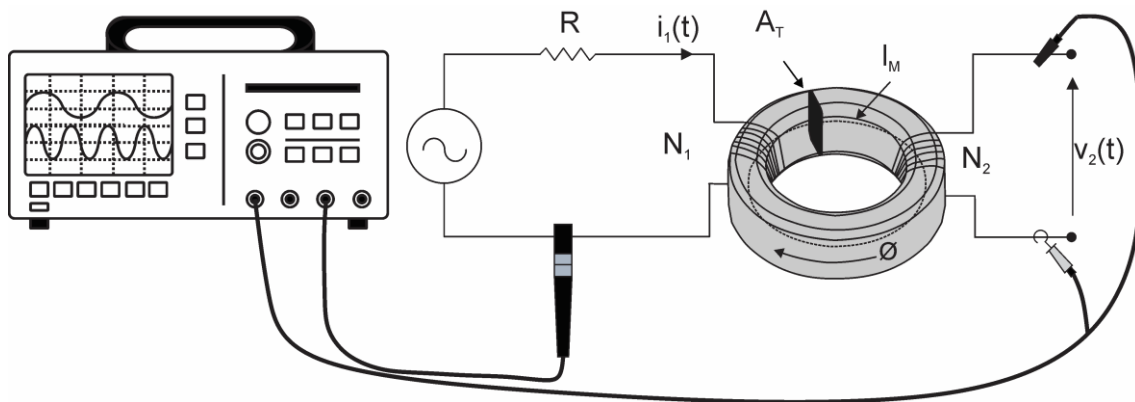


Figura 4.1 – Montagem experimental para obter os dados do laço  $BH$

A Tabela 4.1 apresenta os valores dos parâmetros experimentais na aquisição dos dados para a geração do laço  $BH$ .

Tabela 4.1 – Parâmetros da montagem experimental

Símbolos	Descrição	Valor
$N_1$	Número de espiras da bobina primária	20
$N_2$	Número de espiras da bobina secundária	100
$f_{BH}$	Frequência da forma de onda da tensão	45 Hz
$A_T$	Área transversal do núcleo	200 mm <sup>2</sup>
$L_M$	Comprimento do caminho médio do núcleo toroidal	163,36 mm

Como pode ser observado na Tabela 4.1, o número de espiras da bobina secundária no experimento do ferrite IP12E é menor que do ferrite N87, apresentado no capítulo 3. A variação do número de espiras irá impactar na amplitude da forma de onda de tensão adquirida no experimento. Como será apresentado, o número de 100 espiras foi suficiente para que a ponteira de tensão utilizada realizasse a aquisição precisa dos dados. Não foram utilizadas mais espiras pois o diâmetro do fio utilizado na bobina era maior que o utilizado no núcleo N87, o que fez com que a bobina ocupasse maior espaço no núcleo IP12E.



A Figura 4.2 apresenta o núcleo 3D usado na simulação para comparar os resultados experimentais e verificar a precisão da simulação. A Figura 4.3 apresenta o núcleo 2D obtida a partir do modelo 3D. O modelo 2D foi utilizado para a realização de simulações para comparação das perdas no núcleo, visto que a simulação de um modelo 2D ocorre mais rapidamente do que a do modelo 3D, economizando-se assim muito tempo de simulação.

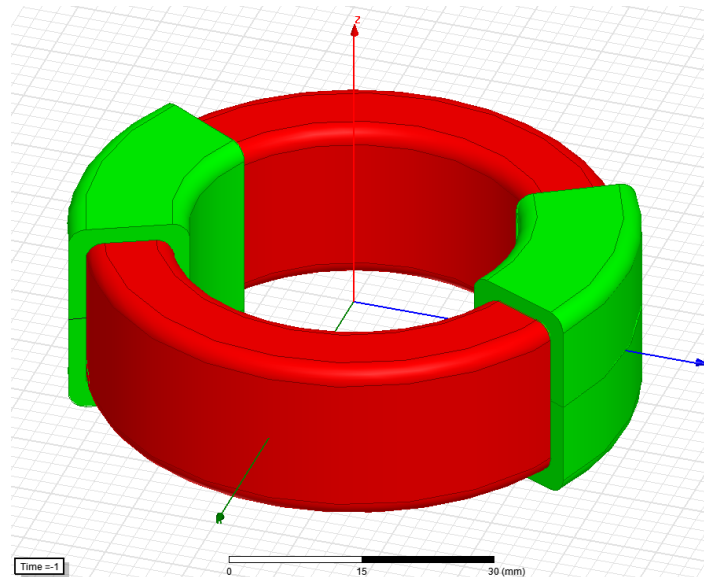


Figura 4.2 – Modelo 3D para simulação da curva de magnetização do núcleo

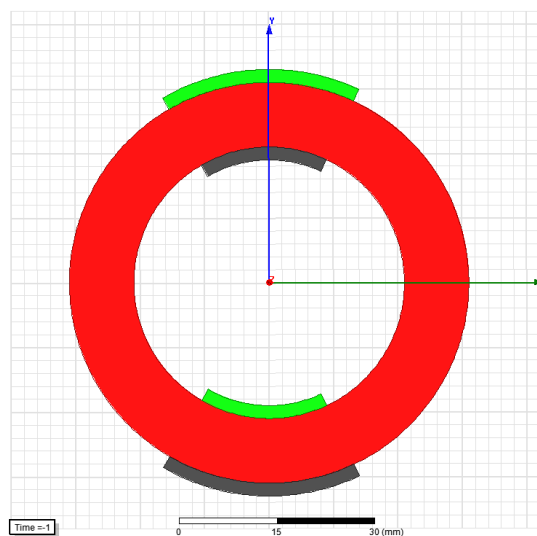


Figura 4.3 – Modelo 2D para simulação das perdas do núcleo

A Figura 4.4 mostra o protótipo montado para os testes. A Figura 4.5 apresenta o laço  $BH$  e a curva de magnetização, ambos obtidos a partir dos dados experimentais. A curva de magnetização é então utilizada no programa de simulação.

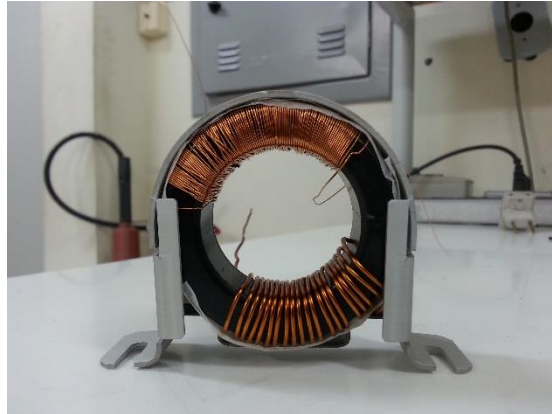


Figura 4.4 – Protótipo para testes experimentais

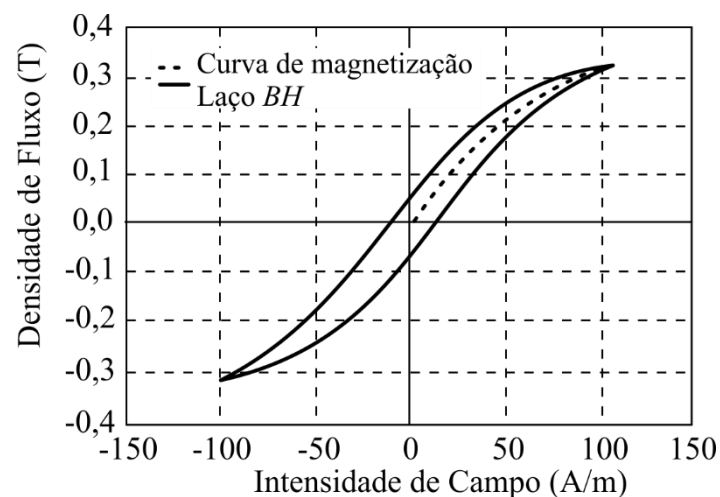


Figura 4.5 – Curvas  $BH$  e de magnetização do núcleo de ferrite IP12E obtidas experimentalmente

O segundo passo é a introdução das curvas de perda do núcleo IP12E no programa de simulação. A Figura 4.6 apresenta as curvas adquiridas do manual técnico do material, lembrando que as perdas variam de acordo com a densidade de fluxo, a frequência e a temperatura de operação do núcleo.

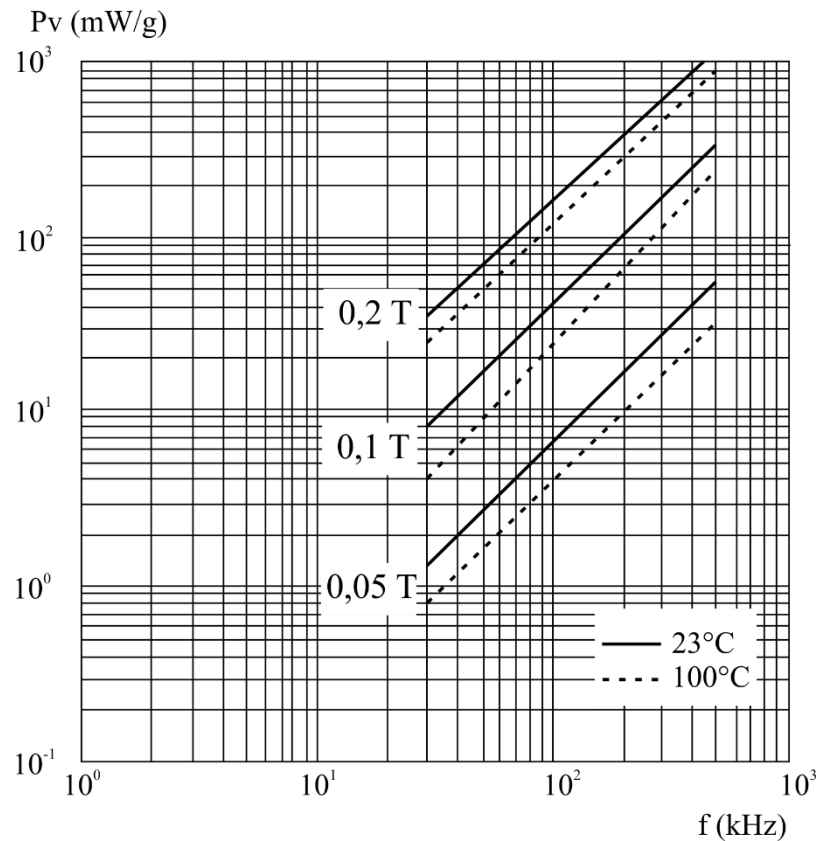
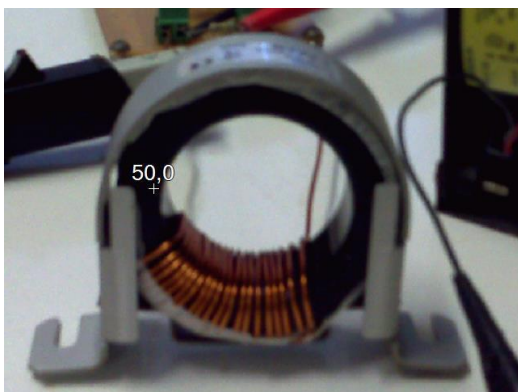
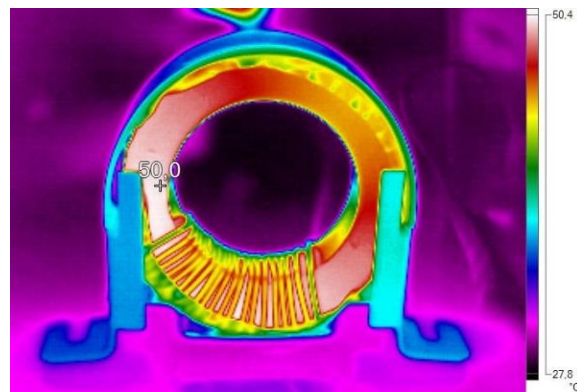


Figura 4.6 – Curvas de perdas do material IP12E (*Datasheet* Thornton, 2008)

Portanto, é necessário conhecer a temperatura do núcleo no momento da aquisição das perdas experimentais. Para isto, foram coletadas imagens térmicas do núcleo no decorrer do experimento com a câmera térmica. Como pode ser observado pela Figura 4.7, o núcleo chega a temperaturas de até 50°C durante o levantamento das perdas.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Fotos do núcleo durante o experimento de levantamento de perdas

Sabendo-se a real temperatura do núcleo no momento das aquisições experimentais, as curvas de perdas introduzidas na simulação podem ser adequadas a temperatura, aumento a precisão da simulação. Isto fará com que a simulação tenha uma maior capacidade de emular corretamente as características do núcleo.

### 4.3 Comparação entre resultados experimentais e simulações

A Figura 4.8 ilustra as formas de onda experimentais da corrente primária ( $I_1(t)$ ) (traço azul claro) e da tensão secundária ( $V_2(t)$ ) (traço azul escuro) durante o ensaio de saturação. A partir destas é possível obter os dados necessários para determinar o laço  $BH$  do material. Como se pode observar, pela distorção da forma de onda da tensão, a saturação ocorreu. O fluxo magnético foi obtido a partir dos dados da tensão induzida no enrolamento secundário, empregando-se (2.5). Com base em  $I_1(t)$  e  $\phi(t)$ , e por (2.4) e (2.6), pode-se determinar o laço  $BH$ .

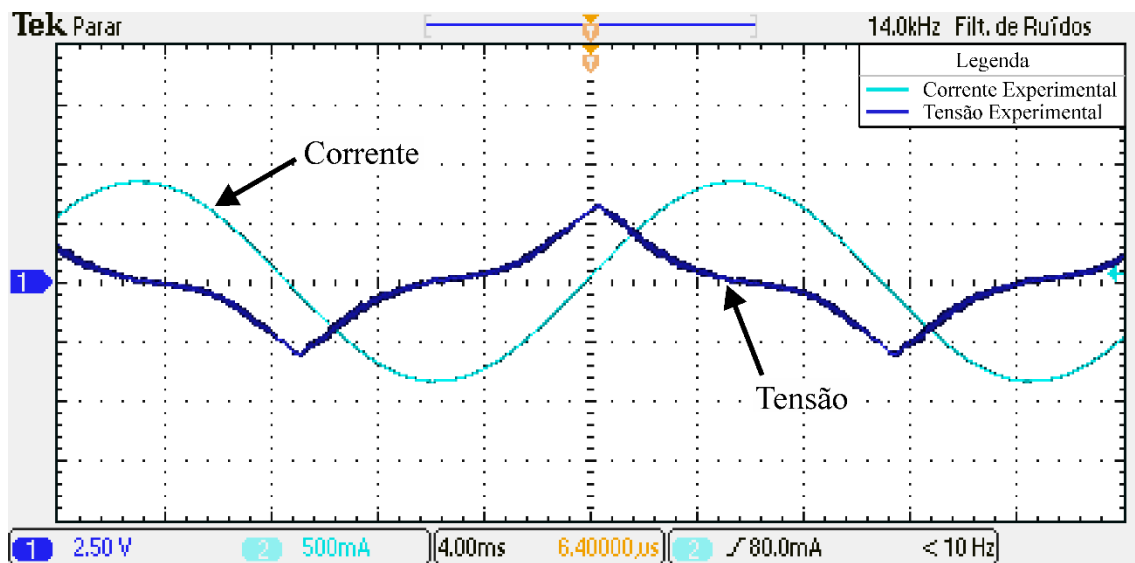


Figura 4.8 – Resultados experimentais da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização

A Figura 4.9 ilustra as formas de onda simuladas da corrente primária (traço verde) e da tensão secundária (traço vermelho), durante a saturação.

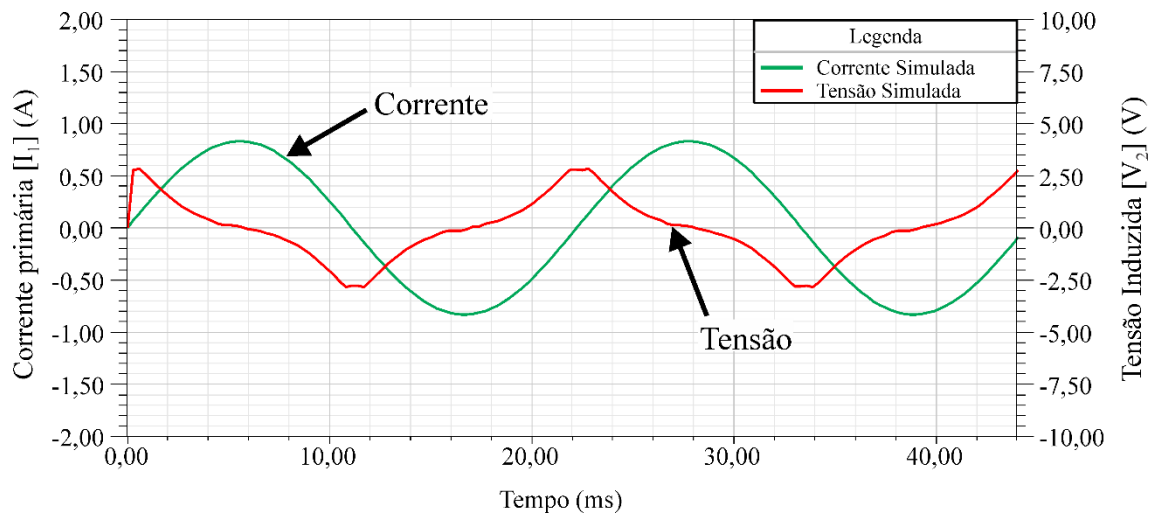


Figura 4.9 – Resultados de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização

Os resultados experimentais e de simulação são graficamente comparados na Figura 4.10.

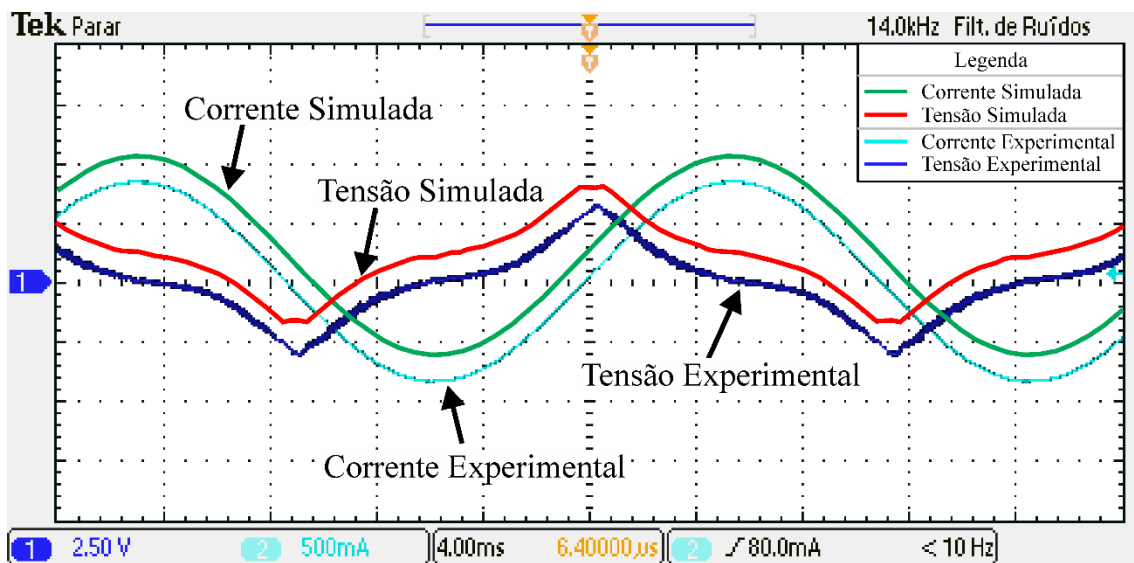


Figura 4.10 – Resultados experimentais e de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para a extração da curva de magnetização no mesmo gráfico

Como se pode observar pela Figura 4.10, a forma de onda da tensão simulada apresenta certo achatamento em seus picos, isto pode ter ocorrido pela falta de pontos que caracterizassem o limite de saturação do material IP12E. Porém, como o núcleo irá

trabalhar muito abaixo do ponto de saturação, esta falta de resolução não irá prejudicar as análises realizadas através da simulação deste núcleo.

A Figura 4.11 apresenta uma comparação entre a curva de magnetização inserida no modelo de simulação (traço vermelho) e a curva gerada pela simulação (traço verde). O laço de histerese foi comprovado pela Figura 4.10, portanto, ambas as curvas de magnetização e o laço  $BH$  da simulação foram certificados.

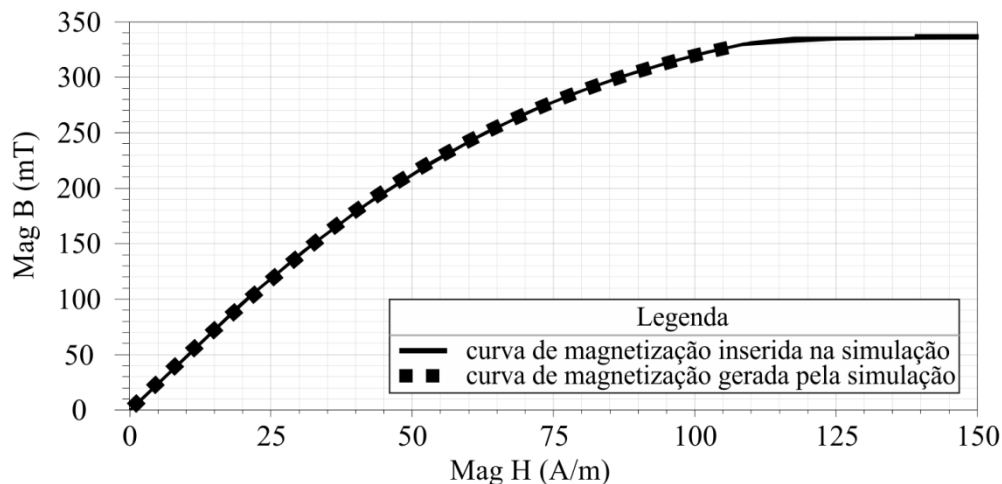


Figura 4.11 – Comparação da curva de magnetização inserida no modelo de simulação (traço vermelho) e a curva gerada pela simulação (traço verde)

Assim como no capítulo 3, outra comparação feita entre resultados experimentais e de simulação é efetuada para a tensão eficaz de operação nominal da lâmpada, 202 V. Esta experiência é realizada como ilustrado na Figura 2.8 e como já foi explicado no capítulo 2.

A Figura 4.12 ilustra as formas de onda experimentais da corrente primária ( $I_1(t)$ ) (traço azul claro) e da tensão primária ( $V_1(t)$ ) (traço azul escuro) durante a operação em regime permanente.

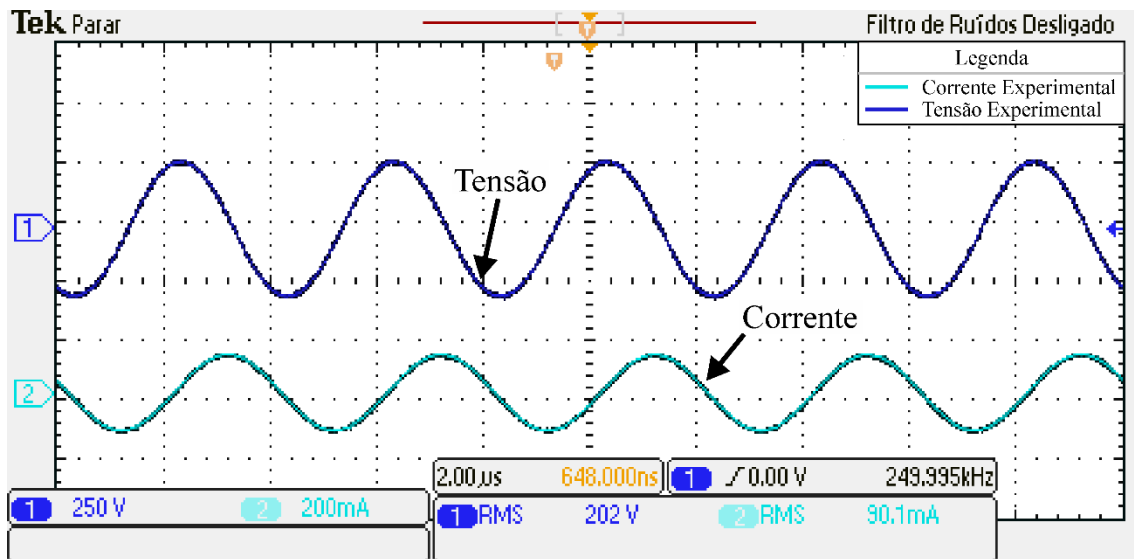


Figura 4.12 – Resultados experimentais da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente

A Figura 4.13 ilustra as formas de onda simuladas da corrente primária (traço verde) e da tensão primária (traço vermelho), durante a operação em regime permanente.

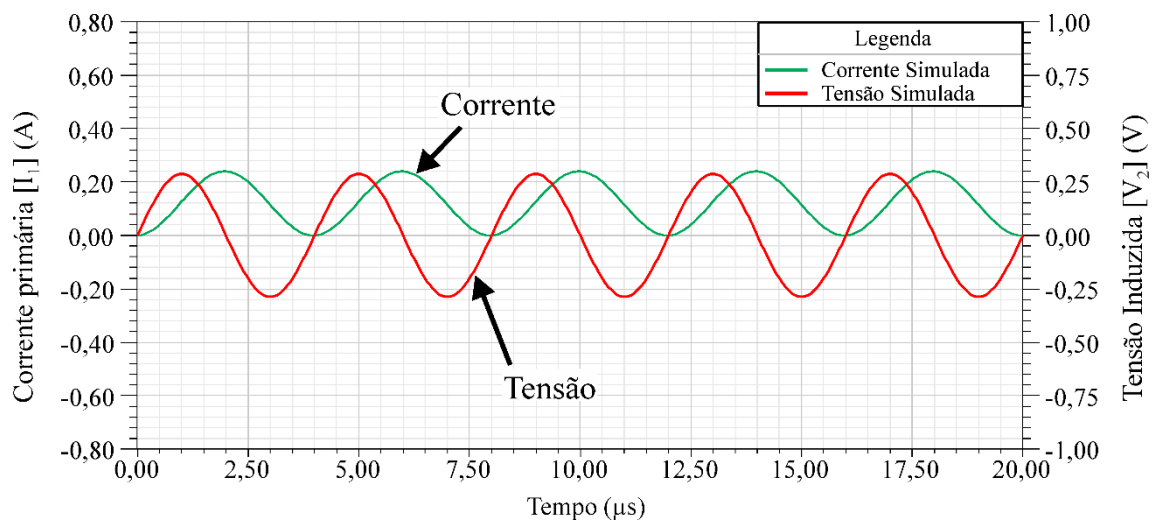


Figura 4.13 – Resultados de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente

Os resultados experimentais e de simulação são graficamente comparados na Figura 4.14.

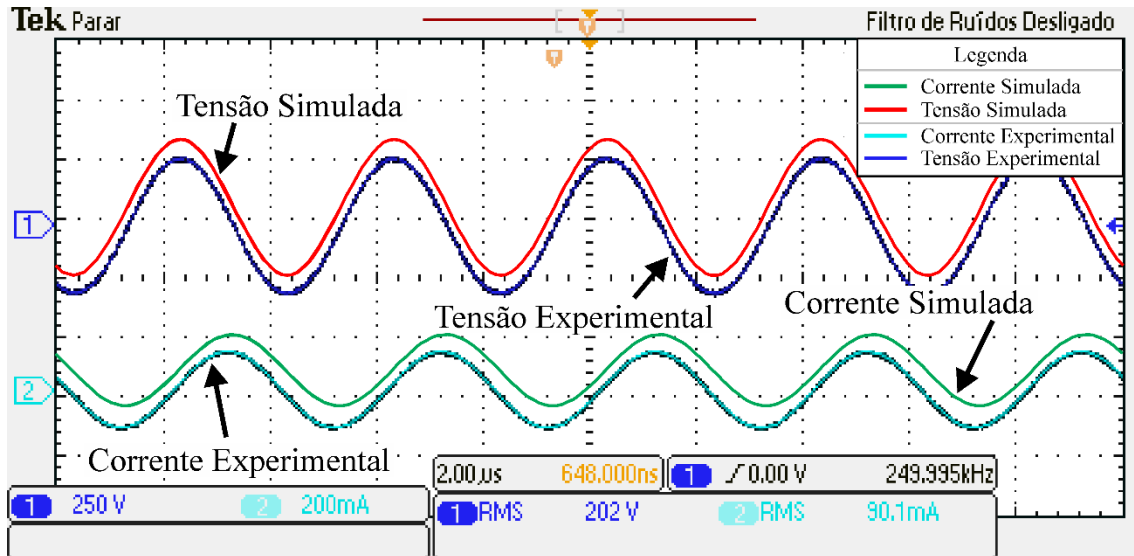


Figura 4.14 – Resultados experimentais e de simulação da forma de onda de tensão e de corrente para operação em regime permanente no mesmo gráfico

Pela Figura 4.14 é possível verificar que a forma de onda da corrente simulada apresenta certa defasagem angular quando comparada a forma de onda experimental. Porém, verificando a Figura 4.10 é possível perceber que a forma de onda da tensão simulada apresenta divergência da experimental para certos pontos. Esta pequena diferença é responsável pelas diferenças de ângulo da forma de onda da corrente simulada.

O último ponto a ser verificado é a potência dissipada pelo núcleo. As perdas foram experimentalmente medidas para diversas tensões primárias, sendo posteriormente realizadas simulações para cada uma destas tensões. Os valores destas tensões são próximos aos valores das tensões nas aquisições realizadas no capítulo 3, portanto será possível comparar os valores de perdas dos materiais N87 e IP12E.

A Figura 4.15 apresenta o valor da indutância do núcleo durante a simulação com a tensão nominal de operação. Já a Figura 4.16 apresenta o valor da indutância do núcleo medido experimentalmente através do equipamento LCR. Como pode-se observar, os valores de indutância são próximos a 1,1 mH, apresentando um erro de aproximadamente 6%.



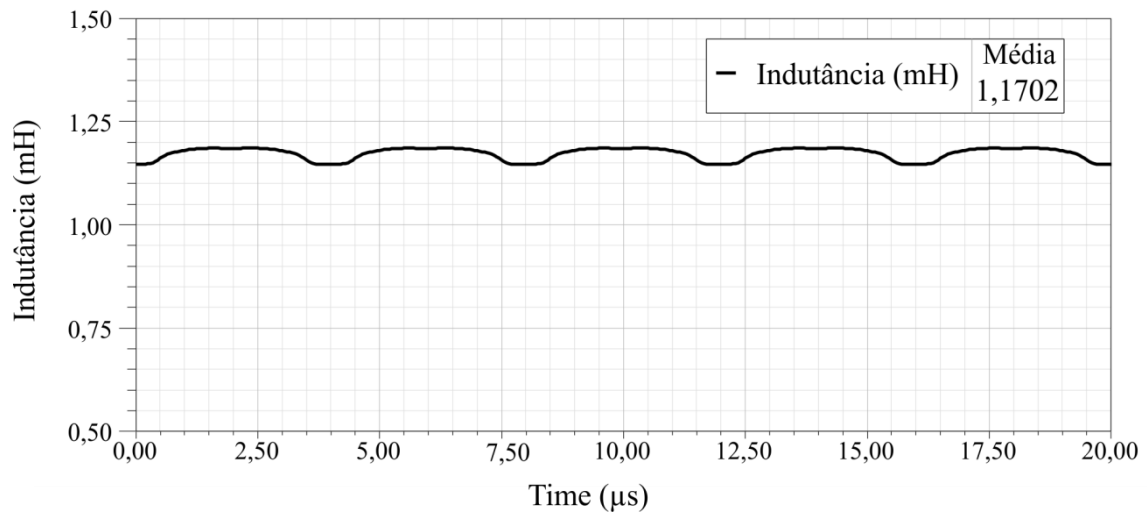


Figura 4.15 – Valor da indutância do núcleo durante a simulação com a tensão nominal de operação

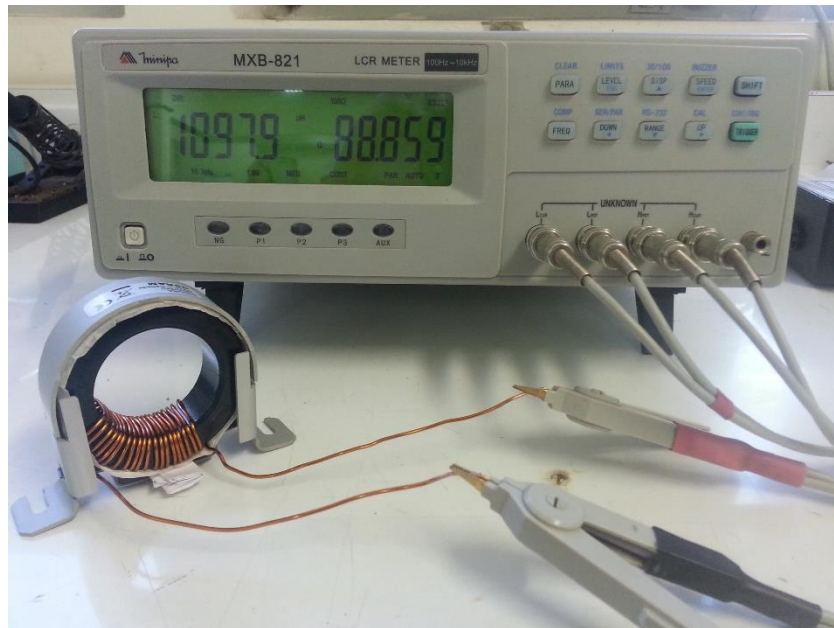


Figura 4.16 – Valor da indutância do núcleo medido experimentalmente

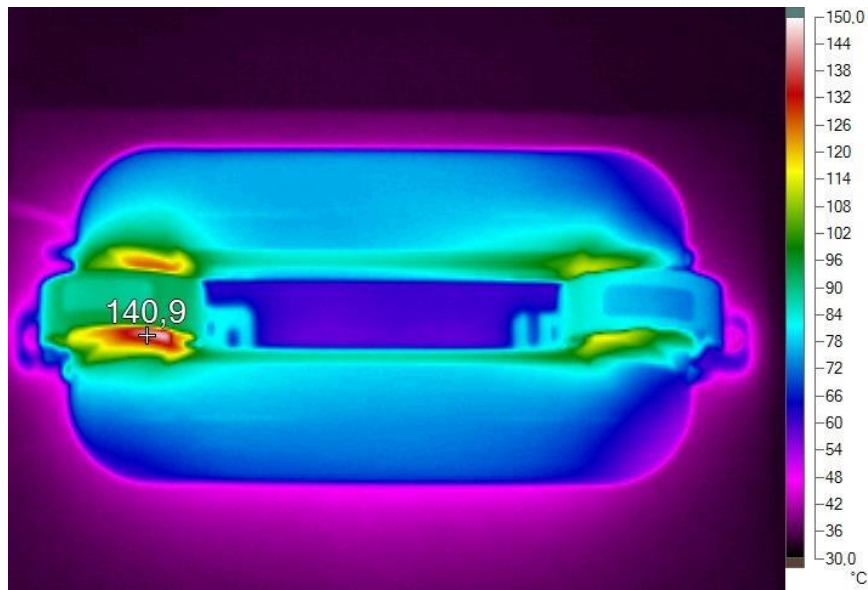
A Tabela 4.2 apresenta comparações entre as perdas experimentais e as calculadas através das simulações. É importante notar que a lâmpada possui dois núcleos, então as perdas apresentadas na Tabela 4.2 devem ser duplicadas para obtermos as perdas totais geradas no material magnético da lâmpada.

Tabela 4.2 – Perdas Experimentais e de Simulação para um núcleo magnético

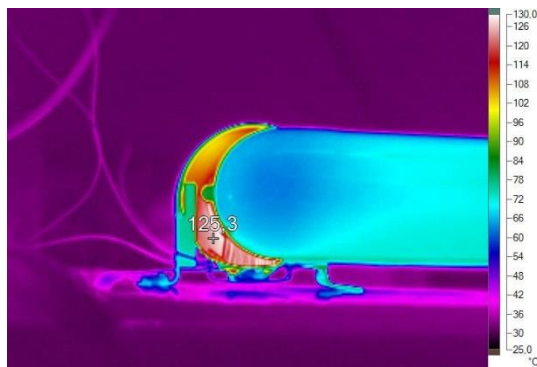
Tensão sobre o núcleo ( $V_{\text{eficaz}}$ )	Perdas (W)		Erro (%)
	Experimentais	Simulação	
187,347	2,912	2,949	1,266
190,557	3,021	3,062	1,344
198,731	3,370	3,357	-0,369
202,621	3,535	3,504	-0,888
205,892	3,684	3,632	-1,429
208,948	3,836	3,750	-2,275
209,523	3,868	3,773	-2,521
212,230	3,985	3,884	-2,605
213,437	4,037	3,932	-2,652
217,585	4,242	4,103	-3,378
219,243	4,305	4,172	-3,172
222,916	4,584	4,328	-5,909

Pelos resultados apresentados na Tabela 4.2 pode-se afirmar que a simulação está emulando com precisão de até 6% as características de perdas do núcleo da lâmpada.

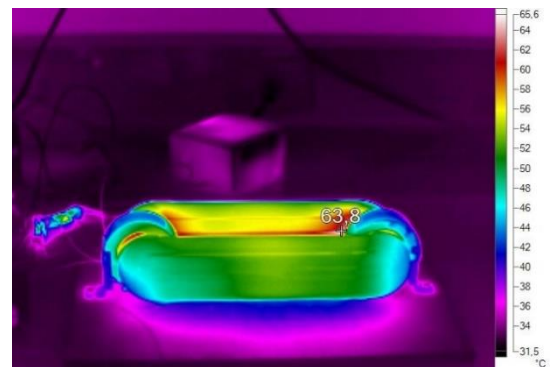
Assim como no capítulo 3, as perdas no núcleo foram estimadas através da simulação para a temperatura de funcionamento do núcleo quando a lâmpada encontra-se em regime permanente. A Figura 4.17 demonstra a temperatura do núcleo e da lâmpada quando esta esteve em funcionamento por um período maior que 1 hora e 30 minutos.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.17 – Fotos da lâmpada (e do núcleo) em funcionamento

Como pode ser observado na Figura 4.17 a temperatura do núcleo de ferrite IP12E quando a lâmpada está funcionando em regime permanente é de aproximadamente 125°C. Portanto, foram realizadas simulações para cada uma das tensões da Tabela 4.2 considerando a curva de perdas de 100°C, esta curva foi utilizada por ser a curva de maior temperatura fornecida pelo fabricante. Os novos resultados de perdas em um núcleo são apresentados na Tabela 4.3. É possível afirmar que estes resultados devem ser próximos aos reais, pois a simulação já foi corroborada pelas comparações realizadas neste capítulo.

Tabela 4.3 – Perdas Experimentais para 50°C e de Simulação para 100°C para um núcleo magnético

Tensão sobre o núcleo (V <sub>eficaz</sub> )	Perdas (W)		Diferença (W)	Diferença (%)
	Experimentais	Simulação		
187,347	2,912	1,891	-1,021	-53,993
190,557	3,021	1,967	-1,053	-53,548
198,731	3,370	2,171	-1,199	-55,239
202,621	3,535	2,272	-1,264	-55,633
205,892	3,684	2,358	-1,326	-56,219
208,948	3,836	2,441	-1,394	-57,123
209,523	3,868	2,457	-1,411	-57,439
212,230	3,985	2,532	-1,453	-57,382
213,437	4,037	2,566	-1,471	-57,332
217,585	4,242	2,684	-1,558	-58,032
219,243	4,305	2,732	-1,573	-57,557
222,916	4,584	2,841	-1,743	-61,374

Pela Tabela 4.2 pode-se observar que o menor erro foi encontrado para a tensão eficaz de 198,731 V, considerando a mesma tensão na Tabela 4.3 tem-se que a simulação com a curva de perdas de 100°C resultou em uma diminuição de perda de 55%.

A Figura 4.18 permite uma visualização gráfica da diferença de potência que pode ser observada nos dados das Tabelas 4.2 e Tabela 4.3.

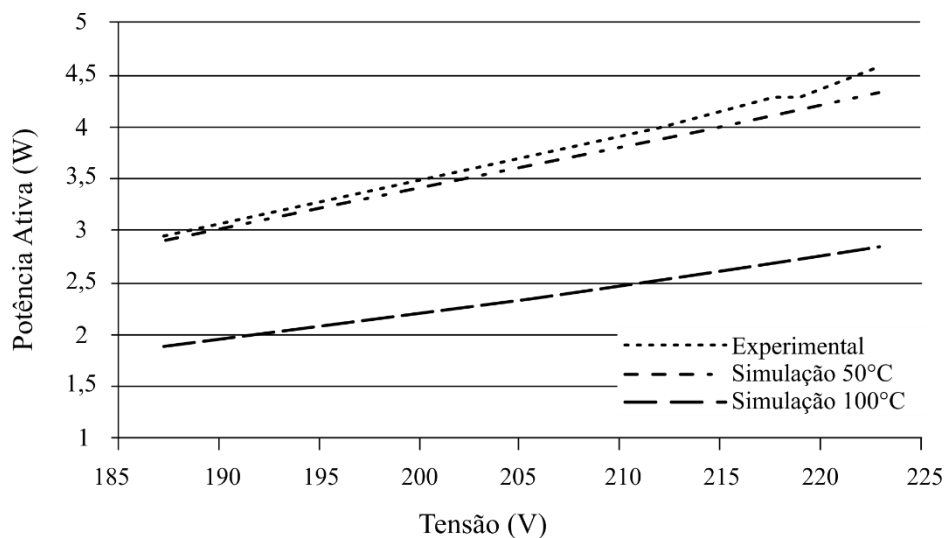


Figura 4.18 – Comparação gráfica dos dados das Tabelas 3.2 e 3.3

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.18 se poderia concluir que o aumento da temperatura de funcionamento causa menor perda no material magnético. Porém, assim como no material N87, a partir de certa temperatura as perdas no material IP12E passam a aumentar, não podendo-se concluir o real valor destas perdas através dos dados disponíveis.

Os resultados de perdas apresentados para 100°C são ainda uma aproximação das reais perdas da lâmpada. Como pode ser observada pela Figura 4.19, a curva de magnetização do núcleo também varia com a temperatura. Contudo, não foi possível realizar o levantamento da curva de magnetização do material IP12E a 100°C.

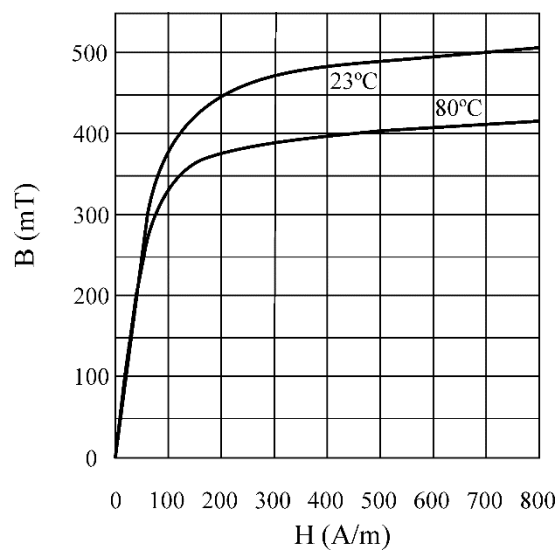


Figura 4.19 – Curvas de magnetização típicas do material IP12E para 23°C e 80°C (*Datasheet* THORNTON, 2008)

A Figura 4.20 apresenta a densidade de fluxo no núcleo IP12E para o instante de tempo que a corrente no núcleo é máxima, isto é, no momento que a densidade de fluxo no núcleo é máxima, sendo esta 0,1084 T, aproximadamente. É possível visualizar o efeito que o entreferro de 22  $\mu\text{m}$  apresenta sobre a distribuição do fluxo magnético, repara-se que justamente no entreferro linhas de densidade de fluxo são dispersas no ar enquanto que nos demais pontos o material magnético é capaz de manter o fluxo concatenado.

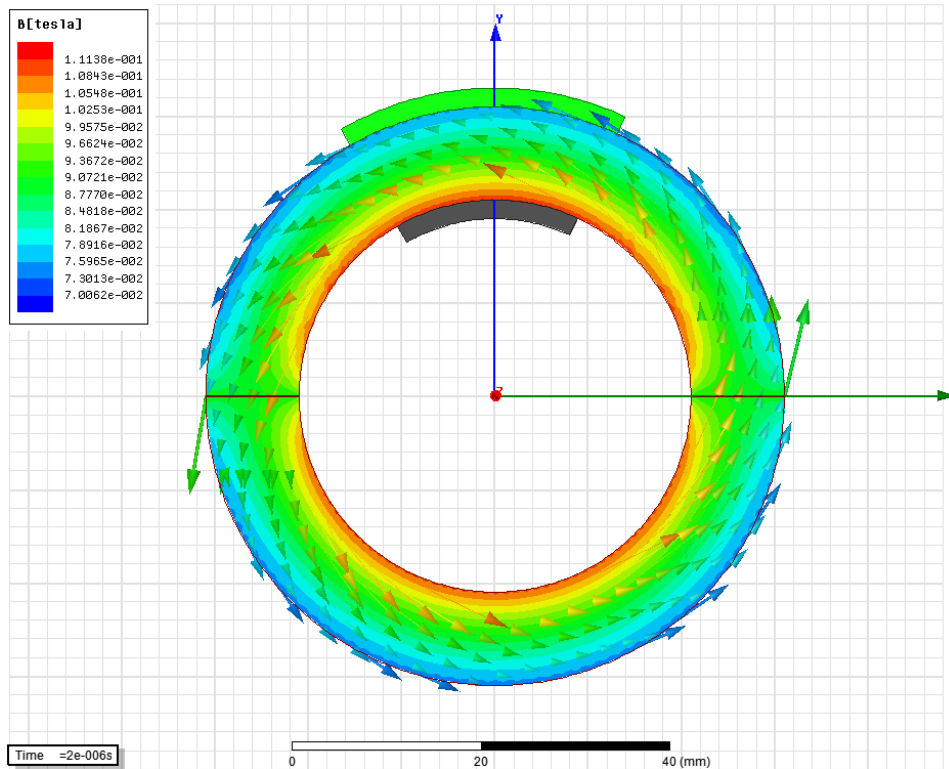


Figura 4.20 – Densidade de fluxo magnético no núcleo para o instante de tempo em que a corrente neste é máxima

#### 4.4 LFSE com o núcleo IP12E

Foi possível obter núcleos toroidais do material ferrite IP12E com o diâmetro interno necessário para que a LFSE pudesse ser colocada no interior destes. Portanto, foram efetuados testes para determinar se seria possível operar a LFSE com estes núcleos.

O primeiro desafio foi partir ao meio os núcleos de ferrite IP12E. O fornecedor apenas ofertava o toróide inteiro, porém para que a LFSE fosse colocada no interior do núcleo seria necessário a partição deste. Um dos núcleos foi quebrado corretamente, apenas em duas metades com perda de pouco material, porém o outro núcleo acabou por ser fracionado em três pedaços com pequenas perdas de material. Portanto, esperasse que na prática haja diferenças de funcionamento entre os núcleos, visto que um apresenta maior entreferro que o outro.

O segundo desafio foi retirar os núcleos originais da LFSE, de ferrite N87. Estes núcleos são partidos ao meio, porém, uma cinta metálica é utilizada para garantir que o entreferro entre as duas metades seja o mínimo possível. Foi necessário serrar a cinta

metálica de cada núcleo, conseguindo-se assim retirar os núcleos sem causar nenhuma avaria ao bulbo da lâmpada.

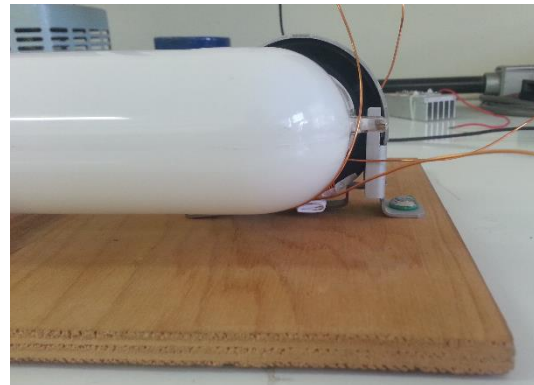
Em seguida foi necessária a colocação do núcleos de material IP12E, porém, para que a mesma indutância fosse alcançada, foram necessária mais espiras nestes indutores, 20 espiras no de menor entreferro e 25 espiras no de maior entreferro. A Figura 4.21 apresenta a LFSE sem núcleos e com os núcleos IP12E (LFSE-IP12E).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.21 – Fotos da lâmpada sem toróides e com os núcleos IP12E

A LFSE-IP12E foi então acionada com o circuito ilustrado na Figura 4.22. Este é o mesmo circuito de acionamento utilizado para a LFSE.

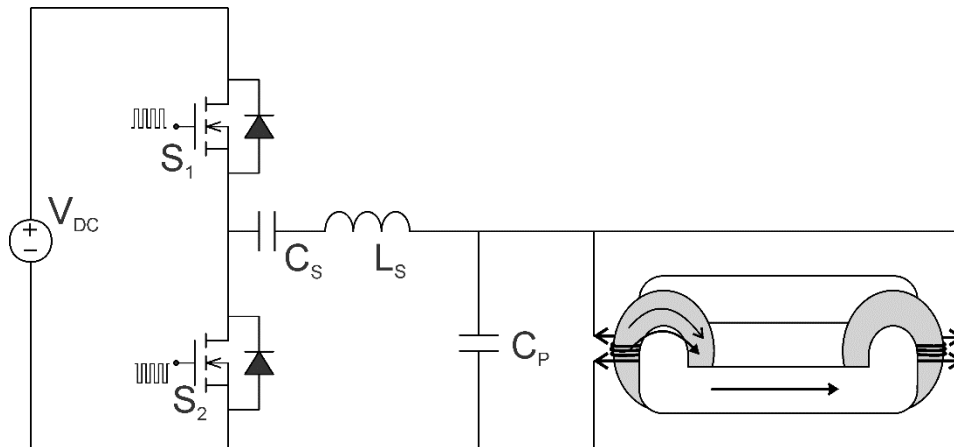


Figura 4.22 – Circuito de alimentação da LFSE

A Figura 4.23 apresenta as formas de onda de tensão e corrente no instante de ignição da LFSE-IP12E, como se pode observar o tempo de ignição é de aproximadamente 1,2 ms. Pela Figura 4.24 observa-se, claramente, que não ocorre saturação no núcleo no momento da ignição.

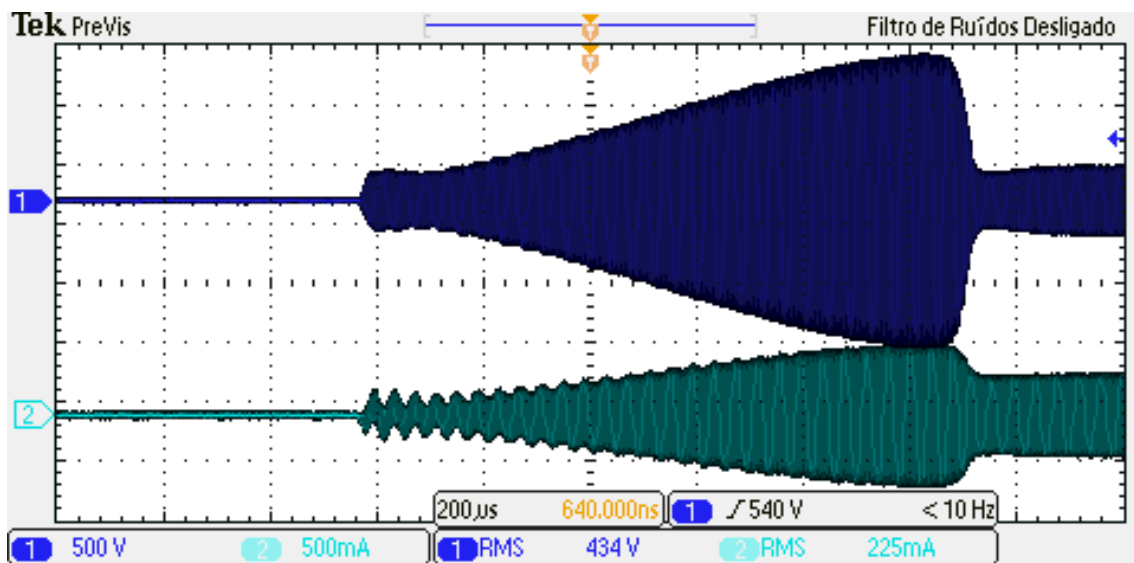


Figura 4.23 – Formas de onda de tensão e corrente no instante de ignição da LFSE-IP12E. Tensão máxima: 1260V. Corrente máxima: 600 mA



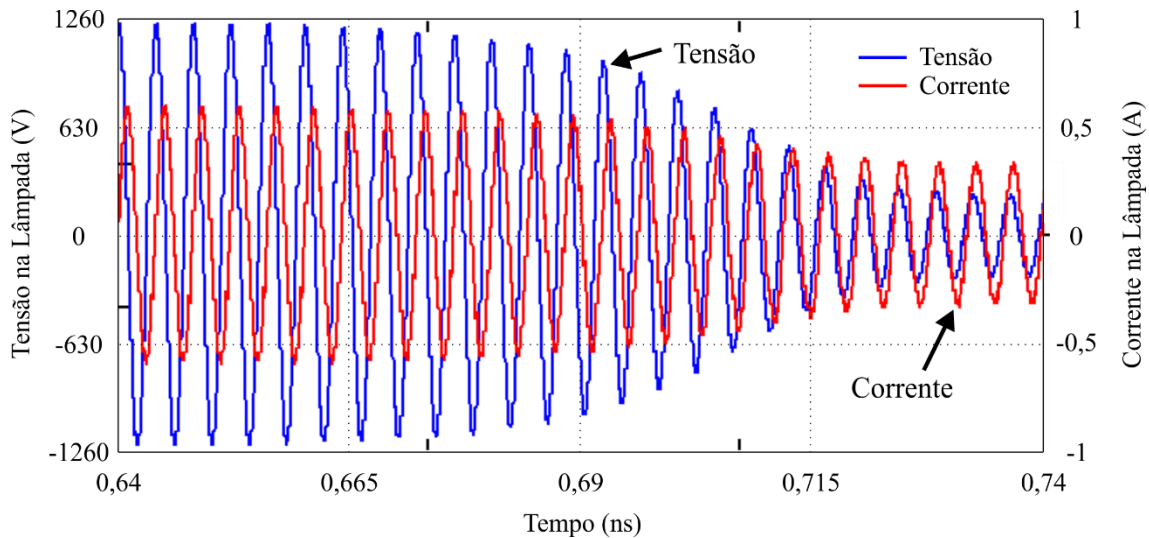


Figura 4.24 – Ampliação das formas de onda de tensão e corrente no instante de ignição da LFSE-IP12E

A Figura 4.25 apresenta as formas de onda de tensão, corrente e potência para a potência nominal (100 W). Como pode-se observar, a tensão eficaz da LFSE-IP12E para a potência nominal é de 284 V, em oposto a 202 V para a LFSE original. Isto deve-se ao maior entreferro dos toróides IP12E.

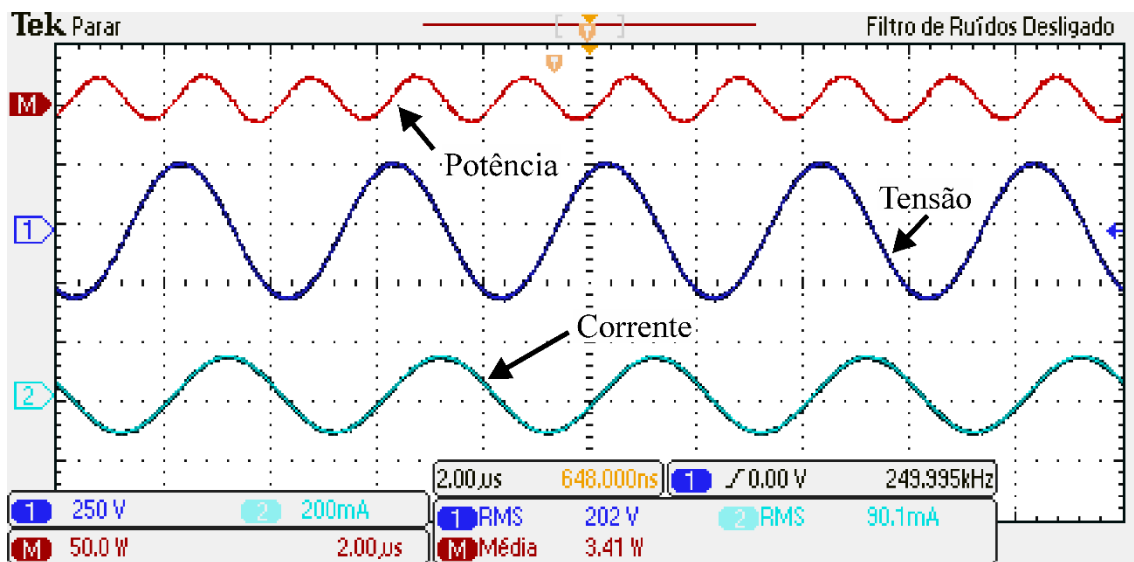


Figura 4.25 – Formas de onda de tensão, corrente e potência para a potência nominal da LFSE-IP12E

Devido a amplitude da forma de onda da tensão da LFSE-IP12E para a potência nominal ser diferente daquela da LFSE original, realizou-se nova simulação para a tensão nominal determinada a partir dos dados experimentais. A perda de cada núcleo,

para esta simulação foi encontrada como sendo de 7,32 W. A Figura 4.26 apresenta a distribuição da densidade de fluxo simulação para a tensão de 284 V<sub>eficaz</sub> demonstrando que ocorre um aumento da variável para aproximadamente 0,15 T.

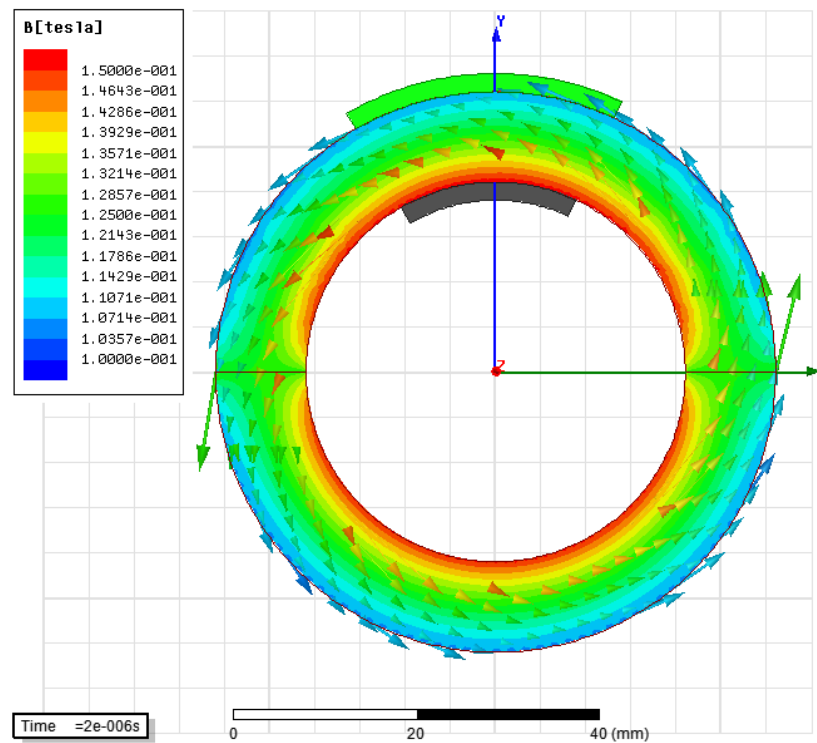


Figura 4.26 – Densidade de fluxo magnético no núcleo para o instante de tempo em que a corrente neste é máxima

A Figura 4.27 apresenta a lâmpada em funcionamento logo após sua ignição. Como pode-se observar a luminosidade da lâmpada é baixa logo após a sua ignição.

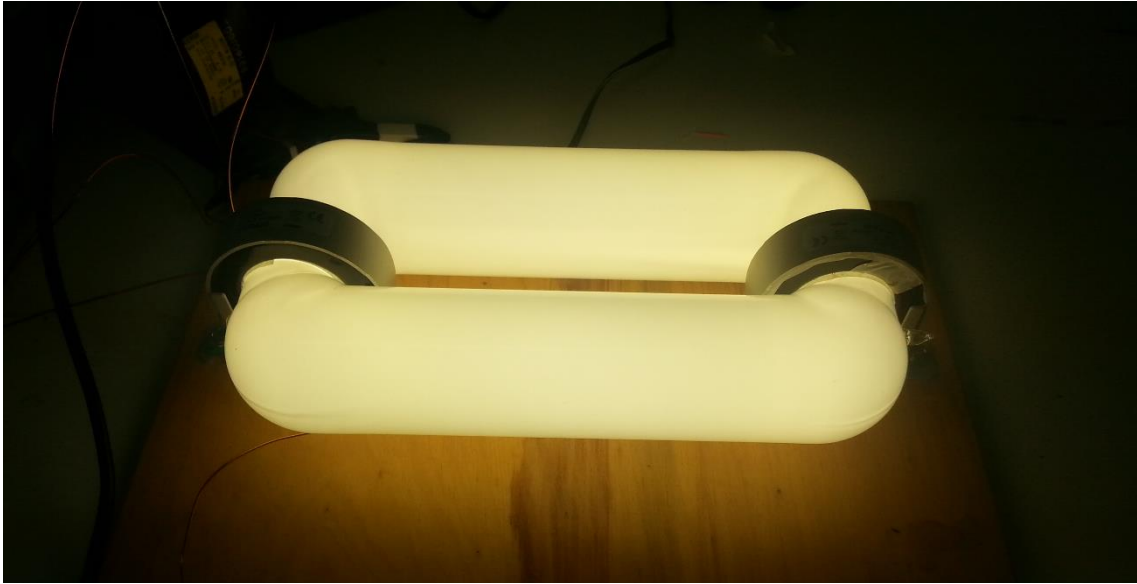
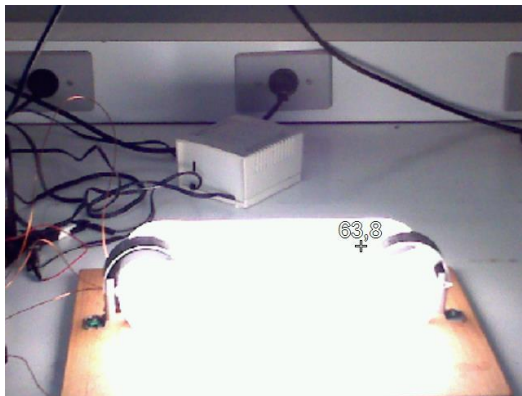


Figura 4.27 – LFSE-IP12E em funcionamento logo após sua ignição

A Figura 4.28 ilustra a lâmpada após 1 hora e 30 minutos de funcionamento. Como se pode observar a luminosidade da lâmpada é muito maior quando comparada a Figura 4.27.



(a)



(b)

Figura 4.28 – LFSE-IP12E em funcionamento 1 hora e 30 minutos após sua ignição

## 4.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais do levantamento da curva de magnetização e do levantamento das perdas do núcleo de ferrite IP12E da Thornton. A simulação foi então calibrada a partir destes dados.

A simulação do núcleo foi validada através da comparação das formas de onda de tensão e corrente, simuladas e experimentais, para os pontos de saturação e de funcionamento em regime permanente. Após a validação da simulação, esta foi utilizada para estimar as perdas do núcleo na temperatura de 100°C apesar de imagens térmicas da lâmpada em funcionamento indicarem que o núcleo encontra-se a 125°C para a potência nominal da lâmpada. Não foi possível estimar as perdas para a real temperatura de funcionamento do núcleo pois a máxima temperatura, para a qual o fabricante fornece curvas de perdas *versus* frequência, é de 100°C.

Os núcleos de material ferrite N87 da LFSE original foram então substituídos por toróides de ferrite IP12E. A LFSE-IP12E foi então acionada e dados do funcionamento prático da lâmpada com os novos núcleos puderam ser adquiridos.

Determinou-se que para a potência de 100 W na lâmpada foi necessária uma tensão eficaz de 284 V. Nova simulação foi realizada para determinar as perdas para esta tensão, que foram de 7,32 W, e para determinar a máxima densidade de fluxo, sendo que este valor ficou próximo a 0,15 T.

## CAPÍTULO 5

# COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

---

### 5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados de simulação para as ligas amorfas e nanocristalinas. São efetuadas então comparações entre os resultados apresentados pelos quatro materiais analisados neste trabalho.

### 5.2 Material Amorfo

O material amorfo utilizado neste estudo foi a liga amorfa 2605S3A produzida pela indústria Metglas (*Datasheet Metglas, 2009*). Este material foi utilizado pois foi um dos poucos encontrados que apresentava os dados necessários para simulações na frequência da aplicação, 250 kHz.

Não foi possível obter o núcleo físico deste material, portanto análises experimentais não puderam ser efetuadas. Como é ilustrado na Figura 5.1 o material amorfo é confeccionado em forma de uma tira de material e o núcleo é gerado através de sobreposições desta fita. O corte do material altera suas características magnéticas, portanto, no caso do uso de núcleos amorfos em LFSE de bobinas externas seria interessante a montagem do núcleo diretamente na lâmpada, não necessitando assim do corte do núcleo.



Figura 5.1 – Representação da liga amorfa

A curva de perda por densidade de fluxo foi obtida diretamente do catálogo do material, enquanto que a curva de magnetização do catálogo foi modificada para corresponder a necessidade de densidade de fluxo versus intensidade de campo magnético da lâmpada. Na prática isto consistiria na introdução de entreferro (ou impurezas) no material até que sua curva de magnetização condissesse com aquela apresentada pelo material ferrite N87. Isto é, para a condição nominal de operação da lâmpada, as curvas de magnetização dos materiais pouco se diferenciariam, enquanto que as diferenças entres os dois serão apresentadas no momento de ignição da lâmpada, visto que o ponto de saturação da liga amorfa é de 1,41 T, e nas perdas dos mesmos. A Figura 5.2 apresenta a curva de magnetização utilizada para a liga amorfa, como pode ser observado, a inclinação da curva de magnetização do ferrite N87 e da liga amorfa é a mesma para densidades de fluxo típicas para a operação em regime permanente da lâmpada.

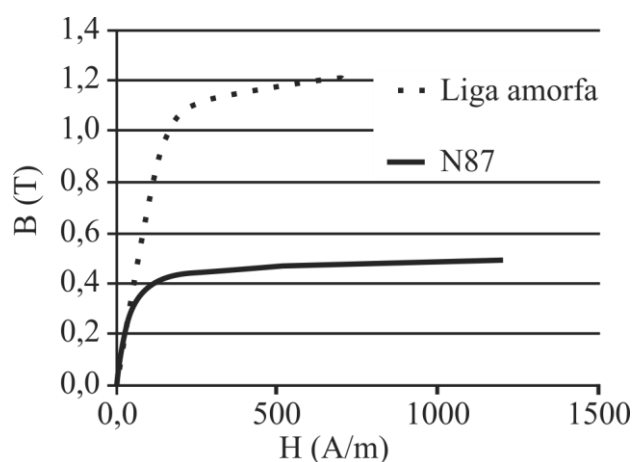


Figura 5.2 – Representação Curvas de magnetização utilizadas para o ferrite N87 e para a liga amorfa

Como foi discutido no capítulo 2, dependendo do projeto do circuito de acionamento da lâmpada, a saturação do núcleo poderia vir a causar problemas não ocorrendo a ignição da lâmpada. Utilizando o núcleo de liga amorfa este problema seria minimizado devido ao elevado ponto de saturação do material.

Contudo, as ligas amorfas ainda apresentam baixa eficiência para elevadas frequências. Como pode ser observado pela Figura 5.3, retirada do catálogo do material, para uma indução de 0,1 T, na frequência de 250 kHz, as perdas são maiores que 100 W/kg. Portanto, esperasse que a liga amorfa não apresente resultados de perdas menores que os ferrites.

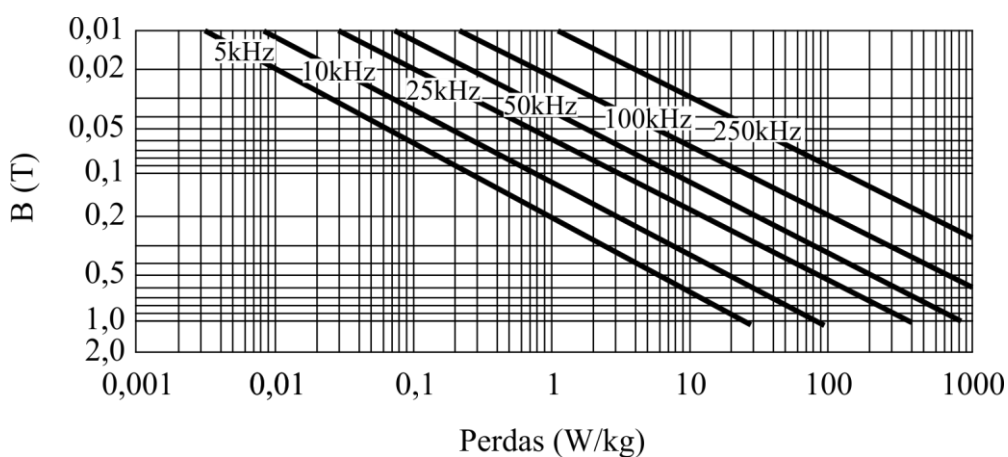


Figura 5.3 – Representação gráfica das perdas *versus* densidade de fluxo ( $BP$ ) da liga amorfa (*Datasheet* Metglas, 2009)

Utilizando-se então as curvas de magnetização e  $BP$  acima descritas, foram realizadas simulações com a liga amorfa para as mesmas tensões de operação apresentadas pelos ferrites. Os resultados serão apresentados a seguir em uma comparação realizada entre todos os materiais analisados.

### 5.3 Material Nanocristalino

A liga nanocristalina utilizada neste estudo foi desenvolvida pelo grupo *China Iron & Steel Research Institute Group*, é baseada em ferro e seu código é SKU:AM002 (*Datasheet* China Iron). Assim como no caso da liga amorfa, esta liga foi selecionada por apresentar os dados necessários para simulações na frequência da aplicação, 250 kHz. Seu ponto de saturação também é próximo ao da liga amorfa, sendo 1,25 T.

Segundo o manual técnico do material, suas características são:

- Elevado ponto de saturação;
- Alta permeabilidade e baixa coercividade;
- Baixas perdas;
- Custo relativamente baixo em comparação com *permalloys*.

Sendo que, dentre as aplicações sugeridas, destacam-se núcleos de transformadores de alta frequência e reatores. Portanto, este material é sugerido para operar em elevadas frequências. A Figura 5.4 apresenta uma imagem do material utilizado no estudo, como a material nanocristalino provem do amorfo, nota-se que a liga nanocristalina também é manufaturada como uma fita. Portanto, assim como no caso da liga amorfa, o núcleo de material nanocristalino deveria ser montado diretamente na lâmpada, para que não ocorram variações nas características magnéticas do material.

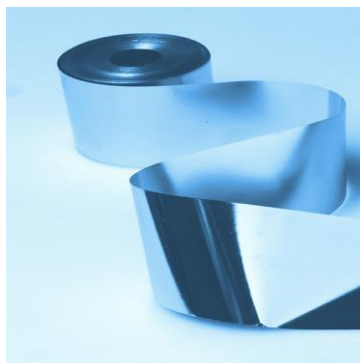


Figura 5.4 – Representação da liga nanocristalina

Assim como no caso do material amorfo, foi necessário ajustar a curva de magnetização para coincidir com a do ferrite N87, da mesma forma apresentada na Figura 5.2. Através da utilização deste laço  $BH$  e da curva  $BP$  disponível no manual técnico do material, foram realizadas as simulações deste material. Os resultados serão apresentados a seguir em uma comparação realizada entre todos os materiais analisados.

#### 5.4 Comparação entre os resultados de simulação

Para comparar os resultados de perdas obtidos através das simulações de todos os materiais foi realizada, primeiramente, a regressão de funções que pudessem representar o comportamento das perdas de cada material em relação a tensão eficaz aplicada sobre o mesmo.



A função utilizada para representar cada equação foi um polinômio de grau 12. A formação destas funções é representada em (5.1) e a Tabela 5.1 apresenta os coeficientes de cada função para cada material.

$$P_x(V_{eficaz}) = A_0 + A_1 \cdot V_{eficaz} + A_2 \cdot V_{eficaz}^2 + A_3 \cdot V_{eficaz}^3 + A_4 \cdot V_{eficaz}^4 + A_5 \cdot V_{eficaz}^5 + A_6 \cdot V_{eficaz}^6 + A_7 \cdot V_{eficaz}^7 + A_8 \cdot V_{eficaz}^8 + A_9 \cdot V_{eficaz}^9 + A_{10} \cdot V_{eficaz}^{10} + A_{11} \cdot V_{eficaz}^{11} + A_{12} \cdot V_{eficaz}^{12}(W) \quad (5.1)$$

Tabela 5.1 – Coeficientes das equações que descrevem o comportamento das perdas em função da tensão eficaz aplicada sobre o material

<b>Coeficientes</b>	<b>P<sub>N87</sub>(V<sub>eficaz</sub>)</b>	<b>P<sub>IP12E</sub>(V<sub>eficaz</sub>)</b>	<b>P<sub>Amorfo</sub>(V<sub>eficaz</sub>)</b>	<b>P<sub>nanocristalino</sub>(V<sub>eficaz</sub>)</b>
A <sub>0</sub>	1,196E+05	1,530E+04	3,772E+05	1,350E+05
A <sub>1</sub>	-1,884E+03	-3,121E+02	-7,688E+03	-2,750E+03
A <sub>2</sub>	3,463E+00	2,909E+00	7,203E+01	2,577E+01
A <sub>3</sub>	6,953E-02	-2,835E-02	-7,089E-01	-2,538E-01
A <sub>4</sub>	-1,817E-04	2,836E-04	7,080E-03	2,535E-03
A <sub>5</sub>	-1,534E-06	-1,524E-06	-3,783E-05	-1,353E-05
A <sub>6</sub>	1,255E-09	1,256E+08	3,003E+09	1,069E+09
A <sub>7</sub>	3,578E+06	2,636E+05	6,581E+07	2,356E+07
A <sub>8</sub>	-8,935E-15	-1,580E-13	-3,918E-12	-1,401E-12
A <sub>9</sub>	-2,574E-16	6,385E+01	3,918E+05	5,656E+02
A <sub>11</sub>	-2,303E-18	-2,353E-18	-5,845E-17	-2,091E-17
A <sub>12</sub>	1,297E-03	5,628E-05	1,401E-02	5,014E-03

As Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8 apresentam comparações entre os dados de perdas simulados para cada material e a regressão efetuada para cada um. Pode-se observar que as equações são capazes de representar com baixos erros os dados simulados.

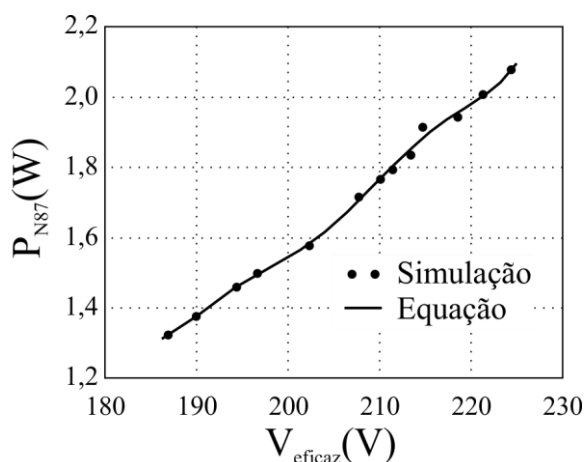


Figura 5.5 – Comparação entre dados e equação de regressão do material N87

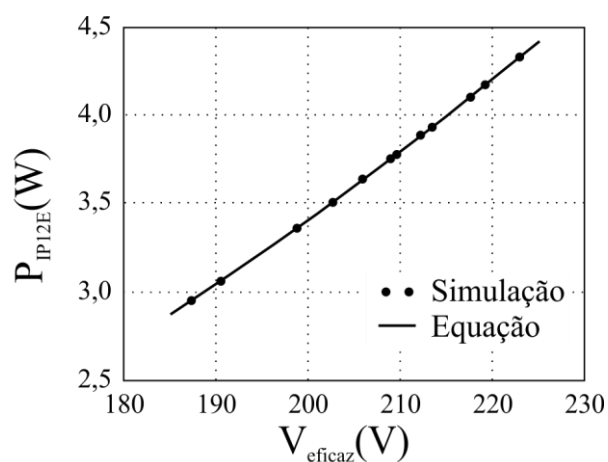


Figura 5.6 – Comparação entre dados e equação de regressão do material IP12E

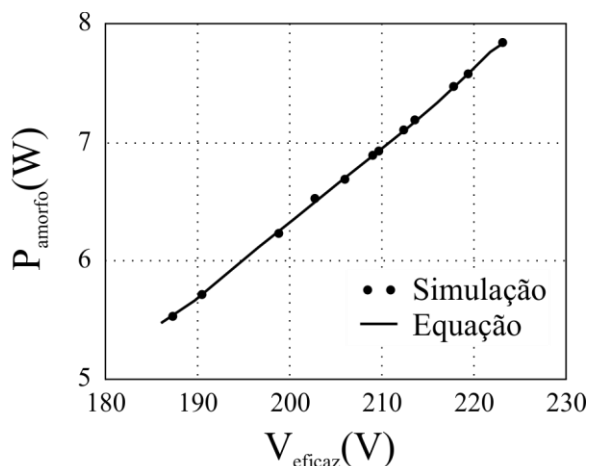


Figura 5.7 – Comparação entre dados e equação de regressão do material Amorfo

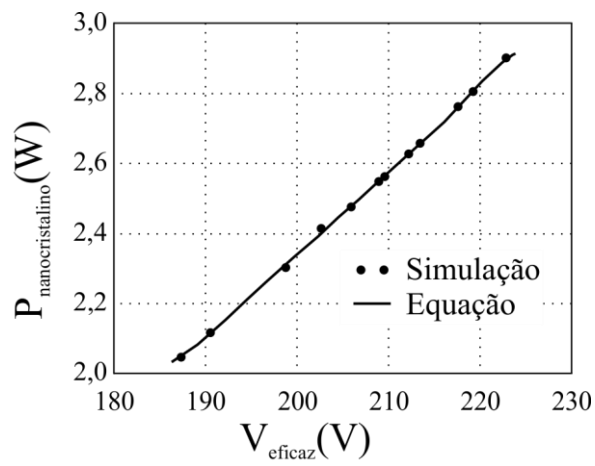


Figura 5.8 – Comparação entre dados e equação de regressão do material Nanocristalino

Através das expressões apresentadas por (5.1) em conjunto com a Tabela 5.1 é possível determinar a perda para cada material para cada dada tensão.

A Tabela 5.2 apresenta os valores de perdas magnéticas para os núcleos projetados com os quatro materiais analisados neste estudo. A Figura 5.9 apresenta a representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Perdas Magnéticas apresentadas para os quatro materiais analisados

Tensão sobre o núcleo ( $V_{\text{eficaz}}$ )	Perdas (W)			
	Ferrite N87	Ferrite IP12E	Liga Amorfa	Liga Nanocristalina
187,347	1,326	2,949	5,535	2,048
190,557	1,386	3,062	5,727	2,118
198,731	1,524	3,357	6,228	2,304
202,621	1,588	3,504	6,529	2,416
205,892	1,658	3,632	6,688	2,474
208,948	1,736	3,750	6,886	2,548
209,523	1,751	3,773	6,923	2,562
212,230	1,823	3,884	7,106	2,628
213,437	1,853	3,932	7,184	2,658
217,585	1,940	4,103	7,469	2,761
219,243	1,968	4,172	7,583	2,805
222,916	2,036	4,328	7,840	2,900

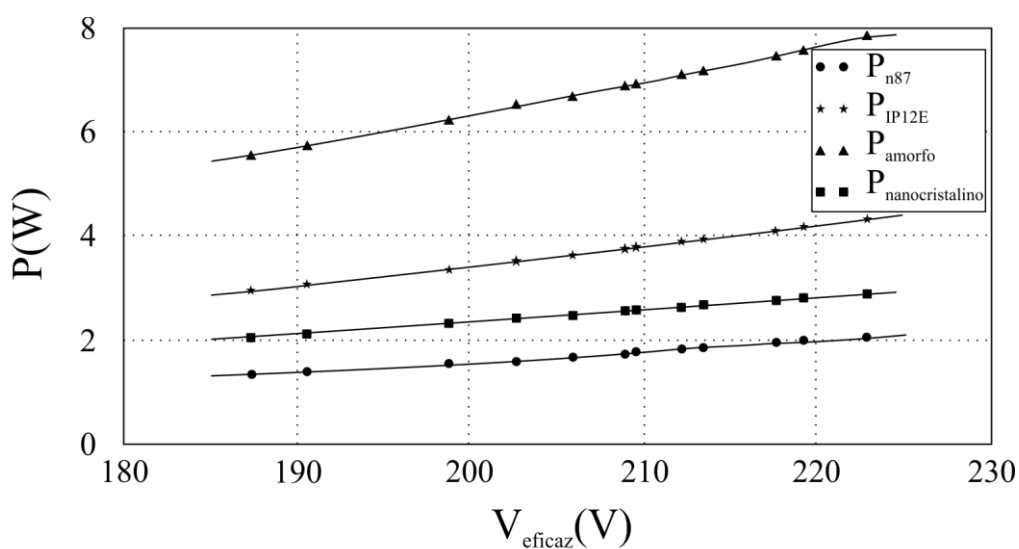


Figura 5.9 – Representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 5.2

Como pode ser observado pela Figura 5.9, a material que apresenta as menores perdas para a faixa de tensão utilizada na operação da lâmpada é o ferrite N87. Porém o fato das ligas amorfas e nanocristalinas apresentarem pontos de saturação mais elevados, facilita o projeto do circuito de acionamento da lâmpada.

Comparando os resultados dos materiais estudados com relação aos resultados de perdas do ferrite N87, tem-se os percentuais apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Aumento percentual das perdas magnéticas apresentadas para os quatro materiais analisados

Tensão sobre o núcleo ( $V_{eficaz}$ )	Perdas do Ferrite N87 (W)	Aumento Percentual das Perdas (%)		
		Ferrite IP12E	Liga Amorfa	Liga Nanocristalina
187,347	1,326	55,039	76,045	35,254
190,557	1,386	54,734	75,798	34,564
198,731	1,524	54,608	75,531	33,846
202,621	1,588	54,682	75,677	34,261
205,892	1,658	54,353	75,209	32,972
208,948	1,736	53,709	74,788	31,855
209,523	1,751	53,591	74,709	31,644
212,230	1,823	53,059	74,346	30,637
213,437	1,853	52,879	74,208	30,291
217,585	1,940	52,718	74,026	29,746
219,243	1,968	52,832	74,048	29,832
222,916	2,036	52,959	74,029	29,781

Como pode-se observar pela Tabela 5.3 o ferrite N87 aumentou em aproximadamente 54% as perdas magnéticas quando comparado ao material original utilizado nos núcleos da lâmpada, o ferrite N87. Já a liga nanocristalina apresentou uma elevação de 30% nas perdas. O material com o pior desempenho para as condições analisadas foi a liga amorfa com perdas até 76% mais elevadas. Esta é a análise para um núcleo, porém a lâmpada utiliza dois núcleos, isto é, no caso do ferrite IP12E, as perdas magnéticas corresponderiam a três núcleos do ferrite N87, aproximadamente.

Contudo, como o elemento em estudo é uma lâmpada, a variável de interesse nesta análise é a sua eficácia luminosa. A análise das perdas magnéticas do núcleo tem impacto nesta variável, porém não são definitivas para sua análise. Portanto, propõe-se avaliações da radiação luminosa, utilizando-se esferas integradoras, para determinar o melhor ponto de operação para cada material magnético.

## 5.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as análises das ligas amorfas e nanocristalinas. Também foram realizadas comparações entre os resultados obtidos para cada material. Estas análises levaram a conclusão de que o material com o melhor desempenho, com relação a perdas magnéticas, para a aplicação estudada, é o ferrite N87.

Dentre os resultados apresentados, observou-se que a liga amorfa foi a que apresentou o maior aumento nas perdas, chegando a 76%, enquanto que a liga nanocristalina teve um aumento de aproximadamente 30%. O ferrite IP12E apresentou o dobro de perdas quando comparado ao ferrite N87.



# CONCLUSÃO GERAL

---

Este estudo demonstrou que, dentre os sistemas de iluminação, as lâmpadas fluorescentes sem eletrodos apresentam elevada vida útil, associada a uma baixa depreciação do fluxo luminoso. Contudo, ainda são pouco difundidas técnica e comercialmente. Em uma análise comparativa entre esse tipo de iluminação e as lâmpadas fluorescentes convencionais, um fator importante a ser determinado são as perdas elétricas relacionadas nas LFSE.

Com esse intuito, este trabalho visou desenvolver uma metodologia de estudo de materiais magnéticos, especificamente estudos sobre as perdas por histerese e correntes parasitas que ocorrem nos núcleos. Foram apresentadas técnicas para obter características dos materiais bem como a possibilidade de simular o comportamento dos materiais através do emprego da técnica de elementos finitos.

Outro objetivo deste trabalho foi analisar materiais magnéticos capazes de trabalhar em frequência relativamente elevada (250 kHz). O desafio era encontrar um material, e metodologia de projeto, de tal forma que os núcleos fossem capazes de suprir as demandas da LFSE, tais como: frequência de operação, ignição e operação em regime permanente, além de baixas perdas.

Com esta meta, a LFSE foi analisada para o conhecimento de suas principais características e de seu comportamento. O modelo proposto de que a lâmpada opera com um transformador foi utilizado para o projeto dos núcleos de materiais diferentes do ferrite original, N87 da EPCOS. Além disso, determinou-se que o funcionamento da lâmpada ocorre devido ao campo magnético da mesma, já a ignição desta ocorre devido ao campo eletrostático criado entre as espiras das bobinas. A partir da definição das necessidades de operação da lâmpada foram estudados diferentes materiais magnéticos sendo realizada uma comparação entre aqueles que seriam utilizados para projetos de núcleos para alimentar a LFSE. São analisadas características como densidade de fluxo máxima e perdas.

Foi então realizado um estudo detalhado dos núcleos originais da LFSE, fabricados com o material ferrite N87. Através das curvas de magnetização e de perdas foi possível realizar simulações das quais outras características do núcleos puderam ser adquiridas. Além disso, foi possível simular as perdas de cada núcleo para a real temperatura de operação da lâmpada, estimando-se que as perdas diminuíssem cerca de 20% daquelas adquiridas

experimentalmente. A simulação foi ainda utilizada para comprovar o ponto de máxima densidade de fluxo no núcleo durante o funcionamento em regime permanente.

Este mesmo estudo foi realizado para os materiais ferrite IP12E, ligas amorfas e ligas nanocristalinas. Sendo apresentadas as simulações para os núcleos projetados com cada um destes materiais. Porém, apenas o núcleo de ferrite IP12E pode ser testado experimentalmente, visto que não foi possível obter núcleos com o diâmetro interno necessário dos outros materiais.

Os núcleos de material ferrite N87 da LFSE original foram então substituídos por toróides de ferrite IP12E. A LFSE-IP12E foi então acionada e dados do funcionamento prático da lâmpada com os novos núcleos puderam ser adquiridos.

Através dos experimentos práticos, determinou-se que para a potência de 100 W na lâmpada foi necessária uma tensão de 284 V. Nova simulação foi realizada para determinar as perdas para esta tensão, que foram de 7,32 W, e para determinar a máxima densidade de fluxo, sendo que este valor ficou próximo a 0,15 T.

Dentre os resultados apresentados, observou-se que a liga amorfa foi a que apresentou o maior aumento nas perdas, chegando a 76%, enquanto que a liga nanocristalina teve um aumento de aproximadamente 30%. O ferrite IP12E apresentou o dobro de perdas quando comparado ao ferrite N87. Dentre todos os materiais estudados, o ferrite N87 foi o que apresentou as menores perdas.

Por fim, conclui-se que contribuições foram apresentadas tanto na compreensão da ignição da LFSE quanto no projeto de núcleos, com materiais de diferentes características, que possam ser utilizados para alimentar esta lâmpada. Além disso, este estudo propiciou a difusão desse tipo de sistema de iluminação, alcançando assim os objetivos inicialmente pretendidos.



# TRABALHOS FUTUROS

---

Neste item estão listados alguns pontos que foram identificados como oportunidades de evolução do trabalho realizado nessa dissertação. Alguns dos tópicos têm como objetivo dar sequência nesse trabalho, explorando aspectos que não foram englobados no escopo inicial, outros representam sugestões que visam determinar o comportamento específico da LFSE.

- *Estudo térmico:* Visa realizar as aquisições de curvas de magnetização e curvas de perdas com os materiais magnéticos à temperatura que estes se encontram quando a lâmpada trabalha em regime permanente;
- *Análise experimental das ligas amorfas e nanocristalinas:* Devido ao tempo restrito no qual o trabalho desta dissertação foi desenvolvido, não foi possível obter amostras experimentais destes materiais com o diâmetro interno necessário para esta aplicação. Portanto, propõe-se a realização de práticas com base nos resultados de simulações apresentados no capítulo 5 desta dissertação para comprovar se estes projetos são capazes de adequadamente alimentar a LFSE;
- *Análise da saturação do material magnético:* Estudos podem ser realizados com o intuito de determinar, experimentalmente, se a saturação do núcleo magnético no instante de ignição da lâmpada impede, ou não, o correto funcionamento da mesma;
- *Análise espectral da radiação luminosa:* Como o elemento em estudo é uma lâmpada, a variável de interesse nesta análise é a eficácia luminosa desta. Através de avaliações da radiação luminosa, utilizando-se esferas integradoras, será possível determinar o melhor ponto de operação para cada material magnético;
- *Análise da radiação luminosa em relação à variação de potência:* Consiste na obtenção do fluxo luminoso emitido pela LFSE em diferentes potências de operação. Além disso, demais parâmetros luminotécnicos como, por exemplo, a temperatura de cor e o IRC, podem ser analisados.



# PUBLICAÇÕES REALIZADAS PELA MESTRANDA

---

## P.1 Introdução

Nesse item serão apresentadas as publicações em periódicos e congressos realizadas pela mestranda, junto a Universidade Federal de Santa Maria.

## P.2 Artigos de Periódicos

A Tabela P1.2 apresenta os artigos publicados em periódicos.

Tabela P1.2.- Lista de periódicos

Electric Equivalent Model for Induction Electrodeless Fluorescent Lamps	IEEE Transactions on Power Electronics	<b>Publicado</b>	2013
Modelo Elétrico Equivalente para Lâmpadas Fluorescentes sem Eletrodos De Indução	SOBRAEP	<b>Publicado</b>	2012
<b>TOTAL PUBLICADOS</b>			<b>2</b>

- [1] DA SILVA, M. F.; CHAGAS, N. B.; SCHLITTLER, M. E.; FRAYTAG, J.; MARCHESAN, T. B.; BISOGNO, F. E.; ALONSO, J. MARCOS; DO PRADO, R. N. “Electric Equivalent Model for Induction Electrodeless Fluorescent Lamps”, IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, p. 3603-3613, 2013.
- [2] DA SILVA, M. F.; CHAGAS, N. B.; SCHLITTLER, M. E.; FRAYTAG, J.; MARCHESAN, T. B.; BISOGNO, F. E.; ALONSO, J. MARCOS; DO PRADO, R. N. “Modelo Elétrico Equivalente para Lâmpadas Fluorescentes sem Eletrodos de Indução”, Revista Eletrônica de Potência – SOBRAEP – Vol. 17, n.1, p. 429-438, Dez. 2012 - Fev 2012.

### P.3 Artigos Publicados em Congressos Nacionais e Internacionais

A Tabela P1.3 apresenta os artigos publicados em congressos nacionais e internacionais pela mestranda.

Tabela P1.3.- Congressos nacionais e internacionais

<b>Congressos Nacionais</b>	
Efficient Lighting Systems Based on Photopic and Scotopic Visual Conditions	CBA 2010
Relação Custo Benefício da Partida de uma Lâmpada Fluorescente por um Pequeno Intervalo de Tempo	CBA 2010
Dimmable Lighting System for Electrodeless Fluorescent Lamp with High Power Factor	CBA 2010
<b>Sub-Total</b>	<b>3</b>
<b>Congressos Internacionais</b>	
Analysis of losses in the core of an electrodeless fluorescent lamp	IAS 2013
Comparison between Integrated and Non-Integrated SEPIC Half-Bridge Electronic Ballasts for Electrodeless Fluorescent Lamp Applications	COBEP 2013
A Study of the Cores of an Electrodeless Fluorescent Lamp	COBEP 2013
Model for electrical characteristics of Electrodeless Fluorescent Lamps	IAS 2012
Dimmable high power factor single-stage electronic ballast for electrodeless fluorescent lamps	IAS 2012
Single-stage high-power-factor dimmable lighting system for electrodeless fluorescent lamp	ISIE 2011
Electrodeless fluorescent lamps model operated at high frequency	ISIE 2011
Analysis and design of a high-power-factor single-stage buck-boost half-bridge electronic ballast for electrodeless fluorescent lamps	IECON 2011
High power factor dimmable lighting system for electrodeless fluorescent lamp	SPEEDAM 2010
Cost comparison between energy consumption and lifetime depreciation for different compact fluorescent lamps starting scenarios	Induscon 2010
Lighting systems energy efficiency based on different human visual conditions	Induscon 2010
<b>Sub-Total</b>	<b>11</b>
<b>TOTAL</b>	<b>14</b>

- [1] FRAYTAG, J.; da SILVA, M. F.; CHAGAS, N. B.; BARRIQUELLO, C. H.; SEIDEL, A. R.; PRADO, R. N.; DALLA COSTA, M. A. “Efficient Lighting Systems Based on Photopic and Scotopic Visual Conditions”, In: CBA 2010 - XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito-MS. ANAIS - CBA 2010, 2010..
- [2] da SILVA, M. F.; CHAGAS, N. B.; LOPES, J. P.; BORIN, V. P.; PRADO, R. N. “Relação Custo Benefício da Partida de uma Lâmpada Fluorescente por um Pequeno

- Intervalo de Tempo”, In: CBA 2010 - XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito-MS. ANAIS - CBA 2010, 2010.
- [3] da SILVA, M. F.; LOPES, J. P.; CHAGAS, N. B.; FRAYTAG, J.; SEIDEL, A. R.; DALLA COSTA, M. A.; PRADO, R. N. “Dimmable Lighting System for Electrodeless Fluorescent Lamp with High Power Factor”, In: CBA 2010 - XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito-MS. ANAIS - CBA 2010, 2010..
- [4] DA SILVA, M. F.; SCHLITTLER, M. E.; FRAYTAG, J.; CHAGAS, N. B.; SEIDEL, A. R.; DO PRADO, R. N. “Analysis of losses in the core of an electrodeless fluorescent lamp”, In: 2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2013, Lake Buena Vista. 2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2013. p. 1.
- [5] SCHLITTLER, M. E.; FRAYTAG, J.; SEIDEL, A. R.; ALONSO, J. M.; DO PRADO, R. N.; CHAGAS, N. B.; DA SILVA, M. F. “Comparison between Integrated and Non-Integrated SEPIC Half-Bridge Electronic Ballasts for Electrodeless Fluorescent Lamp Applications”, In: 12th Brazilian Power Electronics Conference - COBEP, 2013, Gramado - RS. Proceedings of the 12th Brazilian Power Electronics Conference, 2013. p. 1201-1206.
- [6] CHAGAS, N. B.; ROSA, V.; FERREIRA, A.; DA SILVA, M. F.; DO PRADO, R. N. “A Study of the Cores of an Electrodeless Fluorescent Lamp”, In: 12th Brazilian Power Electronics Conference - COBEP, 2013, Gramado - RS. Proceedings of the 12th Brazilian Power Electronics Conference, 2013. p. 1311-1316.
- [7] da SILVA, M. F.; CHAGAS, N. B.; FRAYTAG, J.; MARCHESAN, R. N.; BISOGNO, F. E.; PINTO, R. A.; DO PRADO, R. N. “Model for electrical characteristics of Electrodeless Fluorescent Lamps”, In: 2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON 2012, 2012, Fortaleza. 2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. p. 1.
- [8] da SILVA, M. F.; FRAYTAG, J.; SCHLITTLER, M. E.; CHAGAS, N. B.; MARCHESAN, T.; DALLA COSTA, M. A.; SEIDEL, A. R.; ALONSO, J. M.; DO PRADO, R. N. “Dimmable high power factor single-stage electronic ballast for electrodeless fluorescent lamps”, In: 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2012, Las Vegas. 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. p. 1.
- [9] da SILVA, M. F.; FRAYTAG, J.; CHAGAS, N. B.; SCHLITTLER, M. E.; DALLA COSTA, M. A.; PINTO, R. A.; SEIDEL, A. R.; DO PRADO, R. N. “Single-stage

- high-power-factor dimmable lighting system for electrodeless fluorescent lamp”, In: 2011 IEEE 20th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2011, Gdansk. 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. p. 390-395.
- [10] CHAGAS, N. B.; da SILVA, M. F.; SCHLITTLER, M. E.; FRAYTAG, J.; DO PRADO, R. N.; BISOGNO, F. E. “Electrodeless fluorescent lamps model operated at high frequency”, In: 2011 IEEE 20th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2011, Gdansk. 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. p. 245-250.
- [11] da SILVA, M. F.; FRAYTAG, J.; SCHLITTLER, M. E.; CHAGAS, N. B.; MARCHESAN, T.; DALLA COSTA, M. A.; SEIDEL, A. R.; ALONSO, J. M.; DO PRADO, R. N. “Analysis and design of a high-power-factor single-stage buck-boost half-bridge electronic ballast for electrodeless fluorescent lamps”, In: IECON 2011 37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2011, Melbourne. IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. p. 2958-2963.
- [12] da SILVA, M. F.; DE P. LOPES, J.; CHAGAS, N. B.; SEIDEL, A. R.; DALLA COSTA, M. A.; DO PRADO, R. N. “High power factor dimmable lighting system for electrodeless fluorescent lamp”, In: 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2010), 2010, Pisa. SPEEDAM 2010. p. 379-379.
- [13] da SILVA, M. F.; CHAGAS, N. B.; DE P. LOPES, J.; SCHLITTLER, M. E.; SEIDEL, A. R.; DALLA COSTA, M. A.; DO PRADO, R. N. “Cost comparison between energy consumption and lifetime depreciation for different compact fluorescent lamps starting scenarios”, In: 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON 2010, 2010, Sao Paulo. 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010. p. 1.
- [14] FRAYTAG, J.; da SILVA, M. F.; CHAGAS, N. B.; DO PRADO, R. N.; DALLA COSTA, M. A. “Lighting systems energy efficiency based on different human visual conditions”, In: 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON 2010, 2010, Sao Paulo. 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010. p. 1.

#### P.4 Artigos Publicados em Jornadas de Pesquisa e Mostras Científicas

A Tabela P1.6 apresenta os artigos Publicados em Jornadas de Pesquisa e Mostras Científicas.

Tabela P1.6.- Artigos de jornadas de pesquisa e mostras científicas

Sistema de iluminação dimerizável para lâmpadas fluorescentes compactas com compensação digital	CRICTE 2009 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - UDESC
Formas de acionamento de lâmpadas fluorescentes sem e com eletrodos	CRICTE 2009 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - UDESC
Acionamento eletrônico de lâmpadas fluorescentes com circuito de comando IR21531	CRICTE 2009 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - UDESC
Características de partida da lâmpada fluorescente e relação custo benefício de seu acendimento	CRICTE 2009 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - UDESC
Lâmpadas fluorescentes sem e com eletrodos, características e comparações	CRICTE 2009 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - UDESC
Características de partida da lâmpada fluorescente e relação custo benefício de seu acendimento	JAI 2009 - Jornada Acadêmica Integrada – UFSM
Características de partida e relação custo benefício da lâmpada fluorescente compacta	XIX - Mostra de Iniciação Científica UPF 2009
Reator eletrônico para acionamento de lâmpada fluorescente	XIV - Seminário de Iniciação Científica UNIJUÍ 2009
Eficiência visual de LEDs e fluorescentes sem eletrodos aplicadas a sistemas de iluminação	CICPG 2010 - Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil
Métodos de controle do fluxo luminoso em sistemas de iluminação fluorescente	CICPG 2010 - Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil
Consumo energético de reatores eletromagnéticos para fluorescentes 40 W	CICPG 2010 - Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil
Controle de fluxo luminoso com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes sem eletrodos	CICPG 2010 - Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil
Contribuição dos LEDs na melhoria do sistema de iluminação	CICPG 2010 - Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil
Metodologias para a variação do fluxo luminoso em sistemas de iluminação	CRICTE 2010 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – RIO GRANDE
Reator eletrônico para lâmpadas fluorescentes sem eletrodos com controle de fluxo luminoso e elevado fator de potência	CRICTE 2010 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – RIO GRANDE
Filtro ressonante LCC aplicado a lâmpada fluorescente sem eletrodos – electrodeless	CRICTE 2010 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – RIO GRANDE

Desperdício energético causado por reatores alimentando lâmpadas fluorescentes defeituosas	CRICTE 2010 - Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – RIO GRANDE
Sistemas de Iluminação Utilizando LEDs	JAI 2010 - Jornada Acadêmica Integrada – UFSM
Proposta de Utilização da Topologia Sepic Half-Bridge no Acionamento da Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos	JAI 2011 - Jornada Acadêmica Integrada – UFSM
Modelagem da Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos do Tipo Indutivo	JAI 2011 - Jornada Acadêmica Integrada – UFSM
Análise e Projeto da Topologia Integrada Buck-Boost Half-Bridge Aplicada ao Acionamento de uma Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos	JAI 2011 - Jornada Acadêmica Integrada – UFSM
Controle da Intensidade Luminosa de Lâmpadas Fluorescentes sem Eletrodos, baseado em Modulação PWM de Baixa Frequência Aplicada à Topologia Sepic Half-Bridge Integrada	JAI 2012 - Jornada Acadêmica Integrada – UFSM
<b>TOTAL</b>	<b>22</b>

- [1] da Silva, M. F.; Finamor, G. A.; Chagas, N. B.; Polonskii, M.; do Prado, R. N.; “Sistema de Iluminação Dimerizável para Lâmpadas Fluorescentes Compactas com Compensação Digital,” *XXIII Congresso Regional de Iniciação Científica, 2009. CRICTE 2009*. Joinville.
- [2] Schlittler, M. E.; Chagas, N. B.; da Silva, M. F.; de Lopes, J. P.; do Prado, R. N.; “Formas de Acionamento de Lâmpadas Fluorescentes sem e com Eletrodos,” *XXIII Congresso Regional de Iniciação Científica, 2009. CRICTE 2009*. Joinville.
- [3] Schlittler, M. E.; Chagas, N. B.; da Silva, M. F.; de Lopes, J. P.; do Prado, R. N.; “Acionamento eletrônico de lâmpadas fluorescentes com circuito de comando ir21531,” *XXIII Congresso Regional de Iniciação Científica, 2009. CRICTE 2009*. Joinville.
- [4] Chagas, N. B.; Borin, V. P.; da Silva, M. F.; de Lopes, J. P.; do Prado, R. N.; “Características de Partida da Lâmpada Fluorescente e Relação Custo Benefício de seu Acendimento,” *XXIII Congresso Regional de Iniciação Científica, 2009. CRICTE 2009*. Joinville.
- [5] Borin, V. P.; Chagas, N. B.; da Silva, M. F.; de Lopes, J. P.; do Prado, R. N.; “Lâmpadas Fluorescentes sem e com Eletrodos, Características e Comparações,” *XXIII Congresso Regional de Iniciação Científica, 2009. CRICTE 2009*. Joinville.



- [6] Chagas, N. B.; Borin, V. P.; da Silva, M. F.; de Lopes, J. P.; do Prado, R. N.; “Características de partida da lâmpada fluorescente e relação custo benefício de seu acendimento,” *Jornada Acadêmica Integrada, 2009. JAI 2009*. Santa Maria.
- [7] Borin, V. P.; Chagas, N. B.; da Silva, M. F.; de Lopes, J. P.; do Prado, R. N.; “Características de Partida e Relação Custo Benefício da Lâmpada Fluorescente Compacta,” *XIX Mostra de Iniciação Científica UPF, 2009*. Passo Fundo.
- [8] Schlittler, M. E.; Chagas, N. B.; da Silva, M. F.; de Lopes, J. P.; do Prado, R. N.; “Reator eletrônico para acionamento de lâmpada fluorescente,” *XVII Seminário de Iniciação Científica, 2009*. Unijuí.
- [9] Fraytag, J.; Chagas, N. B.; Schlittler, M. E.; da Silva, M. F.; do Prado, R. N.; “Eficiência visual de LEDs e fluorescentes sem eletrodos aplicadas a sistemas de iluminação,” *I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil, 2010. CICPG 2010*. Florianópolis.
- [10] Chagas, N. B.; Schlittler, M. E.; Fraytag, J.; da Silva, M. F.; do Prado, R. N.; “Métodos de controle do fluxo luminoso em sistemas de iluminação fluorescente,” *I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil, 2010. CICPG 2010*. Florianópolis.
- [11] Iaronka, O.; Chagas, N. B.; da Silva, M.F.; Bisogno, F. E.; do Prado, R.N.; “Consumo energético de reatores eletromagnéticos para fluorescentes 40 W,” *I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil, 2010. CICPG 2010*. Florianópolis.
- [12] Schlittler, M. E.; Chagas, N. B.; Fraytag, J.; da Silva, M.F.; do Prado, R.N.; “Controle de fluxo luminoso com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes sem eletrodos,” *I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil, 2010. CICPG 2010*. Florianópolis.
- [13] BOLZAN, P. E.; CHAGAS, N. B.; DALLA COSTA, M. A.; PRADO, R. N. “Contribuição dos LEDs na melhoria do sistema de iluminação,” *I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil, 2010. CICPG 2010*. Florianópolis.
- [14] Chagas, N. B.; Fraytag, J.; Schlittler, M. E.; da Silva, M.F.; do Prado, R.N.; “Metodologias para a variação do fluxo luminoso em sistemas de iluminação,” *XXIV Congresso Regional de Iniciação Científica, 2010. CRICTE 2010*. Rio Grande.
- [15] Schlittler, M. E.; Chagas, N. B.; Fraytag, J.; do Prado, R.N.; da Silva, M.F.; “Reator eletrônico para lâmpadas fluorescentes sem eletrodos com controle de fluxo luminoso e elevado fator de potência,” *XXIV Congresso Regional de Iniciação Científica, 2010. CRICTE 2010*. Rio Grande.

- [16] Fraytag, J.; Schlittler, M. E.; Chagas, N. B.; da Silva, M.F.; do Prado, R.N.; “Filtro ressonante LCC aplicado a lâmpada fluorescente sem eletrodos – electrodeless,” *XXIV Congresso Regional de Iniciação Científica, 2010. CRICTE 2010*. Rio Grande.
- [17] Iaronka, O.; Chagas, N. B.; da Silva, M.F.; Bisogno, F. E.; do Prado, R.N.; “Desperdício Energético Causado por Reatores Alimentando Lâmpadas Fluorescentes Danificadas” *XXIV Congresso Regional de Iniciação Científica, 2010. CRICTE 2010*. Rio Grande.
- [18] Chagas, N. B.; do Prado, R. N.; Cosetin, M. R.; da Silva, M. F.; Schlittler, M. E.; Fraytag, J.; “Sistemas de Iluminação Utilizando LEDs,” *Jornada Acadêmica Integrada, 2010. JAI 2010*. Santa Maria.
- [19] Fraytag, J.; do Prado, R. N.; Schlittler, M. E.; Chagas, N. B.; Marchesan, R. N.; da Silva, M. F., “Proposta de Utilização da Topologia Sepic Half-Bridge no Acionamento da Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos,” *Jornada Acadêmica Integrada, 2011. JAI 2011*. Santa Maria.
- [20] Chagas, N. B.; do Prado, R. N.; da Silva, M. F.; Schlittler, M. E.; Fraytag, J.; Bisogno, F. E.; “Modelagem da Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos do Tipo Indutivo,” *Jornada Acadêmica Integrada, 2011. JAI 2011*. Santa Maria.
- [21] Schlittler, M. E.; do Prado, R. N.; Fraytag, J.; Chagas, N. B.; Marchesan, R. N.; da Silva, M. F.; “Análise e Projeto da Topologia Integrada Buck-Boost Half-Bridge Aplicada ao Acionamento de uma Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos,” *Jornada Acadêmica Integrada, 2011 JAI 201*. Santa Maria.
- [22] Fraytag, J.; Schlittler, M. E.; Chagas, N. B.; Marchesan, R. N.; da Silva, M. F.; do Prado, R. N.; “Controle da Intensidade Luminosa de Lâmpadas Fluorescentes sem Eletrodos, Baseado em Modulação PWM de Baixa Frequência Aplicada à Topologia Sepic-Half-Brige Integrada,” *XXVII Jornada Acadêmica Integrada, 2012 JAI 2012*. Santa Maria.

# REFERÊNCIAS

## BIBLIOGRÁFICAS

---

Babat, G. **Electrodeless discharges and some allied problems, Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering**, Journal of the Institution of, v.94, n.27, p. 27-37, 16 de Fevereiro de 1946.

BAHMANI, M. A. **Core Loss Calculation in Amorphous High Frequency High Power Transformers with Different Topologies**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2011.

BERTOTTI, G. **Space-Time Correlation Properties of the Magnetization Process and Eddy Current Losses: Theory**. Journal of Applied Physics, v. 54, n. 9, p. 5293 - 5305, 1983.

BERTOTTI, G. **Space-Time Correlation Properties of the Magnetization Process and Eddy Current Losses: Applications. I. Fine wall spacing**. Journal of Applied Physics, v. 55, n. 12, pp. 4339 - 4355, 1984

BISOGLIO, F. E., SEIDEL, A. R., HOLSBACH, R., DO PRADO, R. N., **Resonant filter applications in electronic ballast**. Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, vol.1, pp.348,354, 13-18 Oct. 2002. doi: 10.1109/IAS.2002.1044111

BOWERS, K.J.; QIU, D.W.; BIRDSALL, C.K. **Resonant discharges: initiation and steady state; comparisons with theory, simulation and experiment**. Plasma Science, 1999. ICOPS '99. IEEE Conference Record - Abstracts. 1999 IEEE International Conference, p.138, 1999.

DA SILVA, M. F. **Desenvolvimento de uma Família de Reatores Eletrônicos para Lâmpadas Fluorescentes sem Eletrodos Empregando a Técnica de Integração de Conversores**. Tese de Doutorado, UFSM, Santa Maria, 2012.

DA SILVA, M.F., FRAYTAG, J., CHAGAS, N. B., SCHLITTLER, M. E., DALLA COSTA, M. A., PINTO, R. A., SEIDEL, A. R., DO PRADO, R. N., **Single-stage high-power-factor dimmable lighting system for electrodeless fluorescent lamp**. Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on, pp.390,395, 27-30 June 2011. doi: 10.1109/ISIE.2011.5984190

DANGELO; FATTINI. **Anatomia Humana Básica**. 2ª edição. Atheneu. p. 146 – 158, 2002.

DATASHEET CHINA IRON, **Fe-Based Nanocrystalline Ribbon**. <<http://www.cisri-int.com/product/fe-based-nanocrystalline-ribbon.html>> Acesso em: 1 de março de 2014.

DATASHEET ENDURA, **Osram, Endura 100W/840**, 2012. <[http://www.osram.com.br/osram\\_br/produtos/lampadas/lampadas-fluorescentes-](http://www.osram.com.br/osram_br/produtos/lampadas/lampadas-fluorescentes-)

compactas/osram-endura/index.jsp?productId=ZMP\_58391> Acesso em: 14 de janeiro de 2014.

DATASHEET EPCOS, **SIFERRIT N87 material**. 2006. Disponível em: <<http://www.epcos.com/blob/528882/download/3/pdf-n87.pdf> > Acesso em: 14 de janeiro de 2014.

DATASHEET FINEMET, **Hitachi Metals, Nanocrystalline soft magnetic material**. 2005. <<http://www.hilltech.com/pdf/hl-fm10-cFinemetIntro.pdf>> Acesso em: 14 janeiro de 2014.

DATASHEET METGLAS, **2605S3A Magnetic Alloy**. 2009. Disponível em: <[http://www.metglas.com/products/magnetic\\_materials/2605s3a.asp](http://www.metglas.com/products/magnetic_materials/2605s3a.asp)> Acesso em: 01 de março de 2014.

DATASHEET THORNTON, **Catálogo de Ferrite**. 2008. Disponível em: <<http://www.thornton.com.br/pdf/CATALOGO%20THORNTON.pdf>> Acesso em: 05 de fevereiro de 2014.

DERLECKI, S., KUSMIEREK, Z., DEMS, M., SZULAKOWSKI, J. **Magnetic properties of amorphous materials used as corps of electric machines**. Przegląd Elektrotechniczny. ISSN 0033-2097, p. 10 - 13, 2012.

FALCONE, A. G. Eletromecânica – vol. 1: **Transformadores e transdutores, conversão eletromecânica de energia**. Editora Edgar Blücher Ltda. São Paulo, 1979.

GAVRILA, H., IONITA, V. **Crystalline and Amorphous Soft Magnetic Materials and Their Applications – Status of Art and Challenges**. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, vol. 4, no. 2, pp. 173 – 192, 2002.

GODYAK, V., & SHAFFER, J. W. **Endura: A new high output electrodeless fluorescent light source**. Institute for Low-Temperature Plasma Physics Greifswald (INP). p. 14, 1998.

GODYAK, V.A. **Bright idea, radio-frequency light sources**. Industry Applications Magazine, IEEE , v. 8, n. 3, p.42-49, Maio/Junho de 2002.

GRAHAM, C. D., EGAMI, T. **Magnetic Properties of Amorphous Alloys. Annual Review of Materials Science**. p. 423 - 457, 1978.

HERZER, G. **Amorphous and Nanocrystalline Soft Magnets**. Proceedings of the NATO Advanced Study Insititute on Magnetic Hysteresis in Novel Materials, p. 711-730, Julho de 1996.

HERZER, G. **Soft Magnetic Nanocrystalline Materials**. Scripta Metallurgica et Materialia , v. 33, n. 10-11, p.1741-1756, 1995.

KADETOV, V. A. **Diagnostics and modeling of an inductively discharge in hydrogen**. Fakultät für Physik und Astronomie der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2004.

KAISER, W. **Conversor eletrônico de elevada eficiência para alimentação de lâmpadas fluorescentes tubulares - uma metodologia de projeto**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da USP - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

LESTER, J. N., ALEXANDROVICH, B. M., **Ballasting electrodeless fluorescent lamps (2)**. Beverly, Massachusetts. 06 de Janeiro de 1999.

LESTER, J. N., ALEXANDROVICH, B. M., **Ballasting Electrodeless Fluorescent Lamps**. Illuminating Engineering Society of North America, Vol: 2, Issue: 4, Pg: 51, 1994.

LIGHTING RESEARCH CENTER, **Electrodeless Lamps**, 1998. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/Futures/LF-Electrodeless/>> Acesso em: 17 de janeiro de 2014.

LONG, Q., YUMING, C., DAHUA, C. **Hysteresis and mode transitions in inductively coupled Ar-Hg plasma in the electrodeless induction lamp**. Institute of Physics Publishing, Journal of Physics D: Applied Physics, pp 3310 – 3316, 2006.

MAGNETICS. **A Critical Comparison of Ferrites with Other Magnetic Materials**. 2000. Disponível em: <<http://www.mag-inc.com/File%20Library/Product%20Literature/Ferrite%20Literature/cg-01.pdf>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2014.

MARTIN, T. C. **The Inventions, Researches and Writings of Nikola Tesla**, 1981.

MILLER, H. W. **The 20 year Light Bulb**. Industry Week, p. 41-44 Novembro, 1992.

NASSIRI, A. **Lecture 14 Ferrite Materials**. 2003. Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <<http://www.aps.anl.gov/asd/people/nassiri/USPAS2003/Lecture14.pdf>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2014.

ORIGIN LAB. **Origin 9.1 Data Analysis and Graphing Software**. 2013. Disponível em: <<http://www.originlab.com/>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2014.

PIRES, W. L. **Estudo do Comportamento das Perdas no Ferro em Motores de Indução Alimentados por Conversores de Frequência**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2008.

RAZZAK, M. A.; KONDO, K.; UESUGI, Y.; OHNO, N.; TAKAMURA, S. **Transition from electrostatic-to-electromagnetic mode in a radio-frequency Ar inductively coupled plasma in atmospheric pressure**. Journal of Applied Physics, v.95, n.2, p.427-433, Janeiro de 2004.

RIBBENFJÄRD, D. **Electromagnetic transformer modelling including the ferromagnetic core**. Tese de Doutorado, KTH Electrical Engineering, Stockholm - Sweden, 2010.

RIBEIRO, G. A. P. **As propriedades magnéticas da matéria: um primeiro contato**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 3, Setembro, 2000.

ROBERTS, L. M. **How Magnetic Induction Lampds Work.** 2011. Disponível em: <<http://www.sevengreenenergy.com/easysite1/images/files/Funzionamento.pdf>>. Acesso em: 14 janeiro 2014.

SHEN, B., KONG, F., ZHANG, M., XIE, G., KIMURA, H., MAKINO, A., INOUE, A. **Fe-based Nanocrystalline Soft-magnetic Alloys with Low Core Loss and High Curie Temperature.** Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, ISSN 1098-6189, p. 534 - 537, 2010.

SHEN, W. **Design of High-density Transformers for High-frequency High-power Converters.** Tese de Doutorado, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2006.

SOLARA. **Main Features of SOLARA Induction Lighting System.** 2012. Disponível em: <[http://www.amkosolara.com/en/product\\_content2.php?c2\\_id=22](http://www.amkosolara.com/en/product_content2.php?c2_id=22)>. Acesso em: 14 de janeiro de 2014.

STATNIC, E., TANACH, V. **Investigation of the electrical discharge parameters in electrodeless inductive lamps with a re-entrant coupler and magnetic core.** Plasma Sources Sci. Technol, v. 15,p. 465–473, 2006.

STATNIC, E.; TANACH, V. **A new approach to the evaluation of the discharge parameters of the electrodeless fluorescent lamps.** Plasma Sources Science Technology, v. 13, n. 3, p. 515-521, Julho de 2004.

STEINMETZ, C. P. **On the law of hysteresis.** Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. IX, pp 1 - 64. Janeiro, 1892.

VIEIRA, G. A.; PINTO, M. F.; TEIXEIRA, M. J.; FRAGA, B. L.; SILVEIRA, F. S. e OLIVEIRA, R. W. **Materiais Amorfos.** Universidade Federal de Minas Gerais, disciplina de Teoria dos Materiais, 4 p, 19 de junho de 2000.

WHARMBY, D. O. **Electrodeless lamps for lighting: a review.** Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A, v. 140, n. 6, p. 465 - 473, Novembro de 1993.

WILLARD, M. A., CLAASSEN, J. H., STROUD, R. M., HARRIS, V. G. **Structure and magnetic properties of (CoFe)-based nanocrystalline soft magnetic materials.** Journal of Applied Physics, v. 91, n° 10, p. 8420 - 8422, 2002. doi: 10.1063/1.1453946.

YOON, N.S.; KIM, B.C.; YANG, J.G.; HWANG, S.M. **A theoretical formula of E-H discharge transition power in a transformer-coupled discharge.** Plasma Science, IEEE Transactions, v.26, n.2, p.190-197, Abril de 1998.

YUMING, C., DAHUA, C. **Simulation the Impedance of Electrodeless Fluorescent Lamp.** Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, vol. 1, pp. 242-245, 8-12 Outubro 2006.