

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

CÁSSIA CRISTINA CHIAPETTI DOS SANTOS

**MODELOS NÃO LINEARES DE MATERIAIS MAGNÉTICOS PARA
DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CÁSSIA CRISTINA CHIAPETTI DOS SANTOS

**MODELOS NÃO LINEARES DE MATERIAIS MAGNÉTICOS PARA
DISPOSITIVOS ELÉTROMAGNÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Jorge Luis Roel Ortiz

Coorientador: Jonatas Policarpo Américo

PATO BRANCO

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**MODELOS NÃO LINEARES DE MATERIAIS MAGNÉTICOS PARA DISPOSITIVOS ELÉTROMAGNÉTICOS**”, da aluna “**CÁSSIA CRISTINA CHIAPETTI DOS SANTOS**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° 123 de 2016.

Fizeram parte da banca os professores:

Jorge Luis Roel Ortiz

Ana Cristina Alves Silveira Lima

Marcelo Flavio Guepfrih

Jonatas Policarpo Américo

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

A minha família, por ter sempre me apoiado e incentivado.

Agradecimento especial a minha mãe por ser minha melhor amiga, e ser um exemplo de mulher guerreira e de bom coração, que mesmo com todas as dificuldades enfrentadas nunca desiste.

Ao meu pai que sempre me deu autoestima e esperança, e que mesmo nas horas difíceis nunca perde o bom humor e vontade de lutar.

Aos meus irmãos Pedro e João, que além de irmãos, são meus melhores amigos, com eles sempre compartilhei meu sonho de me formar no ensino superior em uma universidade federal, privilegio cujo nossos pais não tiveram.

Ao meu namorado Bruno por todo amor, carinho, companheirismo, que nunca me deixou desistir, sempre me deu ajudou e me incentivou a melhorar.

Aos meus amigos pelas risadas, conselhos enoites de estudos.

A UTFPR e aos professores, que me ofereceram a oportunidade de estudar, aprender e crescer como pessoa e profissional. Especialmente aos meus orientadores Jorge Luis Roel Ortiz e Jonatas Policarpo Américo.

A todos que contribuíram de modo direto ou indireto para concretização deste trabalho.

RESUMO

SANTOS, C. C. C. Modelos de Curvas Não Lineares de Materiais Magnéticos para Dispositivos Eletromagnéticos. 2016. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Núcleos feitos de material magnético são amplamente utilizados em diversas áreas de aplicação da engenharia elétrica, entre elas as áreas de máquinas elétricas e eletrônica de potência. A análise de sistemas que contém estes núcleos magnéticos é complexa devido ao comportamento não linear do material magnético. Este comportamento não linear é representado por meio da curva de magnetização, que mostra a variação do fluxo ao variar o campo magnético. Para facilitar o estudo e a análise de sistemas com núcleos magnéticos considerando o seu comportamento não linear é importante o uso de modelos matemáticos que auxiliem a representação do efeito da saturação no núcleo. Partindo dessa premissa, o objetivo desse trabalho é modelar a curva de magnetização de materiais ferromagnéticos por meio de modelos matemáticos e mostrar o comportamento de indutores em um circuito elétrico. Para a implementação dos modelos fez-se necessário um ensaio experimental para obter as curvas de magnetização dos materiais estudados. Com os dados obtidos da curva de magnetização, cada modelo é implementado em um algoritmo computacional. Para testar o algoritmo e os modelos da curva de magnetização modelou-se um circuito elétrico contendo um resistor e um indutor. As equações do circuito elétrico, do fluxo magnético e do modelo do material são resolvidas, resultando nas formas de onda da corrente e tensão no indutor. Para validar e comprovar os resultados da simulação, implementou-se um circuito RL.

Palavras-chave: Núcleo de ferrite. Circuitos Magnéticos. Curva de Magnetização. Modelagem de curvas.

ABSTRACT

SANTOS, C. C. C. Non-linear Models of Magnetic Materials for Electromagnetic Devices.2016. 79 f. Monograph (Bachelors in Electrical Engineering) – Electrical Engineering course, Federal Technology University of Paraná. Pato Branco, 2016.

Cores made with magnetic materials are broadly use in several areas of application Electrical Engineering, such as electrical machines and power electronics. Analyzing systems containing these magnetic cores is complex due to the nonlinear behavior of the magnetic material. This non-linear behavior is represented by magnetization curve, showing flow variations by varying the magnetic field. To facilitate the study and analysis of systems with magnetic cores considering their non-linear behavior, it is important to use mathematical models that help to represent the effect of core's saturation. Based on this, the objective of this work is to model magnetization curve of ferromagnetic materials by means of mathematical models and to show the behavior of inductors in an electric circuit. For implementing these models, an experimental test was necessary to obtain the magnetization curves of the studied materials. With the data obtained from the magnetization curve, each model was implemented in a computational algorithm. For testing the algorithm and model of the magnetization, curve an electrical circuit was modeled having a resistor and an inductor. The equations of the electric circuit and the magnetic flux are solved, resulting in the waveforms of current and voltage in the inductor. To validate and verify the simulation results, an experimental RL circuit was used.

Keywords: Ferrite core. Magnetic circuits. Magnetization curve. Modeling curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Campo eletromagnético	4
Figura 2 – (a) Campo magnético criado em torno de um anel de corrente elétrica e (b) campo magnético criado por um ímã permanente.	5
Figura 3 – Indução elétrica criada por uma carga pontual dentro de uma superfície gaussiana.	6
Figura 4 – Campo elétrico criado por meio da aplicação de um campo magnético. ...	7
Figura 5 – Lei de Ampère.	8
Figura 6 – Regra da mão direita.	9
Figura 7 – Linhas de campo em uma bobina percorrida por uma corrente I.	9
Figura 8 – Núcleo retangular simples.	10
Figura 9 – Fluxo magnético através de um elemento de área dA.	11
Figura 10 – Comportamento do fluxo em um núcleo de ferrite a) não saturado e b) saturado.	13
Figura 11 – Curvas de magnetização típicas de um material (a) diamagnético; (b) paramagnético ou antiferromagnético; e (c) ferromagnético ou ferrimagnético.	14
Figura 12 – (a) Domínios Desmagnetizados (b) Domínios Magnetizados.	15
Figura 13 – Curva de magnetização típica de material ferromagnético.	16
Figura 14 – Laço de histerese.	17
Figura 15 – (a) circuito magnético (b) circuito elétrico (c) Análogo elétrico do circuito magnético.	18
Figura 16 – Forma típica de um indutor.	19
Figura 17 – Fluxo magnético em relação a geometria do núcleo.	21
Figura 18 – Modelo por aproximação segmentos lineares.	22
Figura 19 – Modelo polinomial	24
Figura 20 – Modelo hiperbólico	25
Figura 21 – (a) Núcleo EE, formado pela união de dois núcleos do tipo E;	27
Figura 22 – Curva de Magnetização Material IP12R.	28
Figura 23 – Formato núcleo pote	28
Figura 24 – Circuito do ensaio para obter as curvas de magnetização dos materiais.	29
Figura 25 – Circuito equivalente de um indutor	31
Figura 26 – Curva de magnetização do núcleo de material IP12R.	37

Figura 27 – Curva de magnetização do núcleo de material IP6.....	37
Figura 28 – Formas de onda obtidas do ensaio experimental para o indutor com núcleo IP12R.....	39
Figura 29 - Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo linearizado por segmentos para o núcleo IP12R.....	39
Figura 30 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo linearizado por segmentos para o núcleo IP12R.....	40
Figura 31 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo linearizado por segmentos.	41
Figura 32 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo polinomial para o núcleo IP12R.....	41
Figura 33 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo polinomial para o núcleo IP12R.....	42
Figura 34 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo polinomial.	43
Figura 35 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo hiperbólico para o núcleo IP12R.	43
Figura 36 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo hiperbólico para o núcleo IP12R.	44
Figura 37 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo hiperbólico para o indutor IP12R.	45
Figura 38 – Formas de onda do fluxo magnético do indutor IP12R dos modelos linear, polinomial e hiperbólico	45
Figura 39 – Formas de onda obtidas do ensaio experimental para o indutor com núcleo IP6.	46
Figura 40 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo linearizado por segmentos para o núcleo IP6.	47
Figura 41 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo linearizado por segmentos para o núcleo IP6.	48
Figura 42 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo linearizado por segmentos para o indutor IP6.	49
Figura 43 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo polinomial para o núcleo IP6.	49

Figura 44 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo polinomial para o núcleo IP6.	50
Figura 45 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo polinomial para o indutor IP6.....	51
Figura 46 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo hiperbólico para o núcleo IP6.	51
Figura 47 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo hiperbólico para o núcleo IP6.....	52
Figura 48 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo hiperbólico para o indutor IP6.....	53
Figura 49 – Formas de onda do fluxo magnético do indutor IP6 dos modelos linear, polinomial e hiperbólico.	53

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Indutores projetados (a) núcleo EE, (b) núcleo pote.34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados núcleos ferromagnéticos	26
Tabela 2 – Parâmetros efetivos.....	26
Tabela 3 – Correntes e tensões medidas dos indutores com núcleo EE e Pote	35
Tabela 4 – Valores de B e H obtidos.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- LTK Lei das Tensões de Kirchhoff
SI Sistema Internacional de Unidades
fem força magnetomotriz

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Intensidade de campo magnético [A/m]
B	Densidade de fluxo magnético [T]
I	Corrente [A]
N	Número de espiras
ℓ_m	Caminho médio do núcleo [m]
μ	Permeabilidade magnética [H/m]
Φ	Fluxo Magnético [Wb]
A	Área transversal [m ²]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa [H/m]
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]
M	Magnetização induzida [A/m]
χ_m	Susceptibilidade magnética
B_r	Densidade de fluxo magnético remanescente [T]
v	Tensão [V]
L	Indutância [H]
I_s	Corrente de saturação [A]
Φ_s	Fluxo de saturação [Wb]
L_s	Indutância de saturação [H]
L_0	Indutância Inicial [H]
a_1, a_2 e a_3	Coeficientes modelo polinomial
μ_i	Permeabilidade relativa inicial [H/m]
μ_e	Permeabilidade efetiva [H/m]
A_e	Área efetiva do núcleo [m ²]
A_l	Fator de Indutância [T]
f	Frequência [Hz]
V_p	Tensão de pico [V]
V_{IN}	Tensão de alimentação [V]
V_R	Tensão do resistor [V]
V_L	Tensão do indutor [V]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO GERAL	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	ELETROMAGNETISMO E CAMPO MAGNÉTICO	4
2.2	EQUAÇÕES DE MAXWELL.....	5
2.2.1	Lei de Gauss	6
2.2.2	Lei de Faraday	7
2.2.3	Lei de Ampère	8
2.3	DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO E FLUXO MAGNÉTICO	11
2.4	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA.....	12
2.5	MATERIAIS MAGNÉTICOS	13
2.5.1	Domínios magnéticos e magnetização.....	14
2.5.2	Curvas de magnetização.....	15
2.5.3	Histerese magnética.....	16
2.6	CIRCUITOS MAGNÉTICOS.....	17
2.7	INDUTORES	18
2.8	MODELAGEM NUMÉRICA	20
2.8.1	Modelagem indutor.....	20
2.8.2	Modelos não lineares da curva de magnetização	21
2.8.2.1	Modelo linearizado por segmentos.....	22
2.8.2.2	Modelo polinomial.....	23
2.8.2.3	Modelo hiperbólico	25
3	METODOLOGIA	26
3.1	CONTRUÇÃO DOS INDUTORES	26
3.1.1	Núcleo retangular NE 42/21/15	27

3.1.2 Núcleo pote NP 26/16	28
3.2 ENSAIO PARA OBTER AS CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO.....	29
3.3 ENSAIO PARA OBTER AS FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE DOS INDUTORES	30
3.4 MODELAGEM DO CIRCUITO elétrico RL	31
4 RESULTADOS	34
4.1 DADOS DO ENSAIO DAS CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO	34
4.2 VALORES DE B E H OBTIDOS	36
4.4 CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO OBTIDAS	37
4.5 FORMAS DE ONDA OBTIDAS NO ENSAIO EXPERIMENTAL E POR MEIO DA APLICAÇÃO DOS MODELOS	38
4.5.1 Formas de onda do indutor IP12R	38
4.5.1.1 Modelo linearizado por segmentos.....	39
4.5.1.2 Modelo polinomial.....	41
4.5.1.3 Modelo hiperbólico	43
4.5.2 Formas de onda do indutor IP6	46
4.5.2.1 Modelo linearizado por segmentos.....	47
4.5.2.2 Modelo polinomial.....	49
4.5.2.3 Modelo hiperbólico	51
5 CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS.....	56
ANEXO A – ALGORÍTMOS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Para o estudo e análise de dispositivos eletromagnéticos, deve-se conhecer os fenômenos eletromagnéticos que ocorrem nas regiões externa e interna dos dispositivos. Os dispositivos eletromagnéticos não trabalham de modo isolado, mas sim compondo outros sistemas e devido a sua não linearidade, além de influenciarem o seu próprio comportamento, influenciam fortemente os circuitos dos quais fazem parte. Para a análise das grandezas eletromagnéticas envolvidas usa-se as equações de Maxwell, que descrevem o comportamento temporal e espacial dos campos elétrico e magnético (ORTIZ, 2002; BASTOS, 2012).

Quando os dispositivos eletromagnéticos apresentam geometrias simples, a solução das equações de Maxwell pelo método analítico permite visualizar com exatidão os fenômenos eletromagnéticos, como a distribuição dos campos eletromagnéticos envolvidos. Para estruturas mais complexas o método analítico se torna inviável, pois a solução das equações de Maxwell torna-se difícil, sendo recomendável a solução destas equações por meio de métodos numéricos (ORTIZ, 2002; BASTOS, 2012).

Os materiais magnéticos, com os quais são fabricados os núcleos dos dispositivos eletromagnéticos, se caracterizam pela sua permeabilidade magnética. Ela expressa a capacidade ou facilidade com que este material permite a passagem de linhas de campo magnético. Ao ser aplicado um campo magnético externo no material, se estabelece uma densidade de fluxo magnético no núcleo, e a medida que a intensidade deste campo magnético aumenta, a densidade de fluxo também aumenta, mas a partir de uma certa intensidade de campo magnético o comportamento do fluxo magnético do material muda, fazendo com que a densidade de fluxo magnético aumente lentamente. Para elevadas intensidades de campo magnéticos o fluxo magnético praticamente não varia, indicando que o material está saturado (BASTOS, 2012; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Esta variação da densidade de fluxo magnético com a variação da intensidade de campo magnético representa-se por meio de uma curva com comportamento não-linear, chamada de curva de magnetização, ela é uma importante fonte de informação de um material magnético. Entender como o

dispositivo eletromagnético funciona na região não linear do material auxilia e melhora o projeto desses dispositivos (HAYT; BUCK, 2013).

Neste contexto, este trabalho propõe modelar a não linearidade de materiais ferromagnéticos e utilizar estes modelos para estudar o comportamento de um indutor em um circuito elétrico. Para isso será necessário acoplar as equações do circuito elétrico com as equações de campo magnético, e utilizar métodos numéricos para determinar a evolução das correntes e do fluxo magnético no domínio do tempo a partir da curva de magnetização do material ferromagnético. Com isto espera-se que o modelo possa auxiliar na escolha dos núcleos magnéticos na construção de dispositivos eletromagnéticos, facilitando o projeto de indutores e transformadores aplicados a conversores estáticos de potência.

Espera-se que os resultados obtidos neste trabalho, possam ser incluídos no processo de otimização de conversores, contribuindo na parte do projeto na qual se faz a escolha do núcleo magnético.

1.1 OBJETIVO GERAL

Implementar modelos não lineares de materiais magnéticos para dispositivos eletromagnéticos. Para isso irá se desenvolver algoritmos que mostrem o comportamento de materiais magnéticos próximos do seu comportamento real.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estudar os modelos de curvas não lineares de materiais magnéticos;
- b) Acoplar as equações do circuito elétrico com as equações do campo magnético;
- c) Aplicar métodos numéricos para resolução de equações diferenciais;
- d) Implementar os modelos de curva de magnetização no programa Matlab®;
- e) Realizar ensaio nos núcleos ferromagnéticos para se obter as curvas de magnetização experimentais;

f) Validar os modelos por meio da comparação dos resultados da simulação com os com valores experimentais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos do eletromagnetismo, as características dos materiais magnéticos, a configuração do circuito magnético e os tipos de modelos da curva de magnetização.

2.1 ELETROMAGNETISMO E CAMPO MAGNÉTICO

A teoria dos campos eletromagnéticos estuda cargas em repouso e em movimento que produzem correntes, campos elétricos e magnéticos. A interação entre os campos elétrico e magnéticos, variantes no tempo, criam o campo eletromagnético, conforme ilustra a Figura 1.

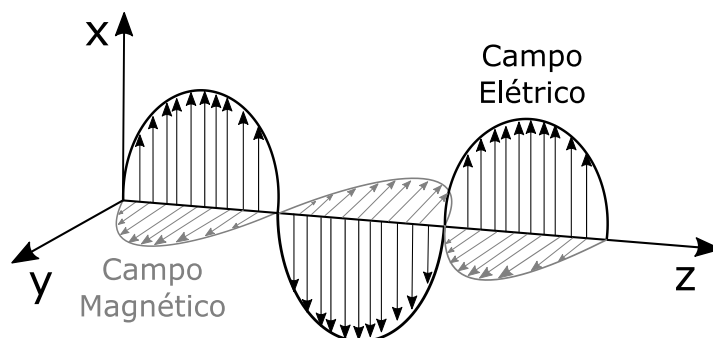


Figura 1 – Campo eletromagnético
Fonte: Adaptado (DPI - INPE, 2011)

Quando um material induz outro sem precisar de contato, ocorre um fenômeno físico chamado de magnetismo. Os fenômenos magnéticos têm sido aproveitados em diversas áreas da engenharia elétrica, principalmente nas áreas de máquinas elétricas e eletrônica de potência. De um modo simples, o magnetismo pode ser percebido na ação de um ímã permanente¹ ao atrair ou repelir objetos, até mesmo em materiais que não estão inicialmente imantados². Este campo magnético pode ser criado tanto por uma corrente elétrica como por um ímã permanente (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Essas duas formas de geração de campo magnético são ilustradas na Figura 2.

¹ Um ímã permanente é um material capaz de manter as propriedades magnéticas mesmo após cessar o processo de imantação

² Magnetizar; comunicar (a um metal) a propriedade do ímã.

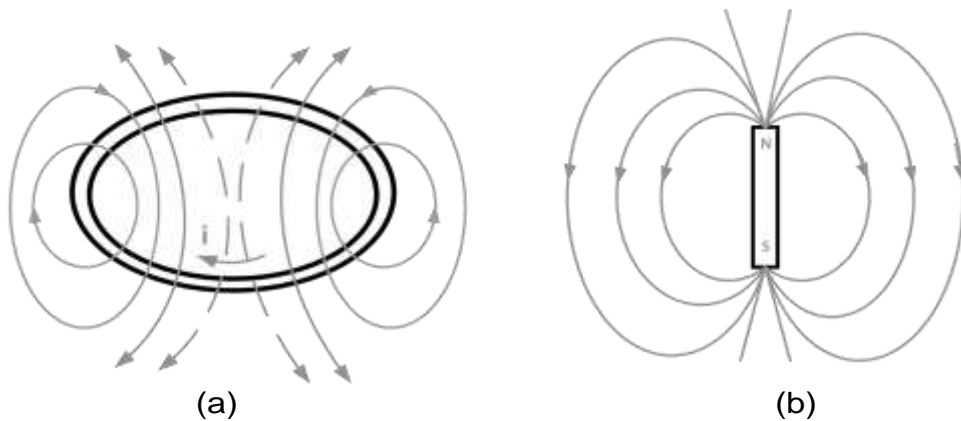


Figura 2 – (a) Campo magnético criado em torno de um anel de corrente elétrica e (b) campo magnético criado por um ímã permanente.
Fonte: Adaptado de (SHACKELFORD, 2008, p. 417).

O formalismo da teoria eletromagnética é extremamente simples e está baseado nas equações de Maxwell (BASTOS, 2012; SADIKU, 2004).

2.2 EQUAÇÕES DE MAXWELL

O físico e matemático James Clerk Maxwell (1831-1879) compilou as leis do eletromagnetismo em quatro equações, descritas no Quadro 1. Onde essas equações são apresentadas na sua forma local ou diferencial e integral (SADIKU, 2004).

Forma Diferencial	Forma Integral	
*Div $\vec{D} = \rho$	$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_v \rho \cdot dv$	Lei de Gauss Fluxo não conservativo
*Div $\vec{B} = 0$	$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	Lei de Gauss Campo conservativo
*Rot $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$V = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$	Lei de Faraday
*Rot $\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$I = \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$	Lei de Ampère

Quadro 1 – Forma geral das equações de Maxwell.

Fonte: Adaptado de (SADIKU, 2004, p. 348).

*O rotacional (Rot) e o divergente (Div) produzem, respectivamente, um campo vetorial e um campo escalar.

As grandezas eletromagnéticas envolvidas nas equações do Quadro 1 são: campo elétrico E ; indução elétrica D ; intensidade de campo magnético H ; densidade de campo magnético B ; densidade superficial de corrente J e densidade volumétrica de carga ρ . Nos tópicos a seguir serão tratados cada uma das leis envolvidas nas equações de Maxwell (SADIKU, 2004).

2.2.1 Lei de Gauss

A lei de Gauss estabelece que o fluxo do campo elétrico total através de qualquer superfície fechada, chamada de superfície gaussiana, é igual à carga total que está contida dentro desta superfície. A Figura 3 ilustra uma carga pontual q dentro de uma superfície gaussiana S (HAYT; BUCK, 2013).

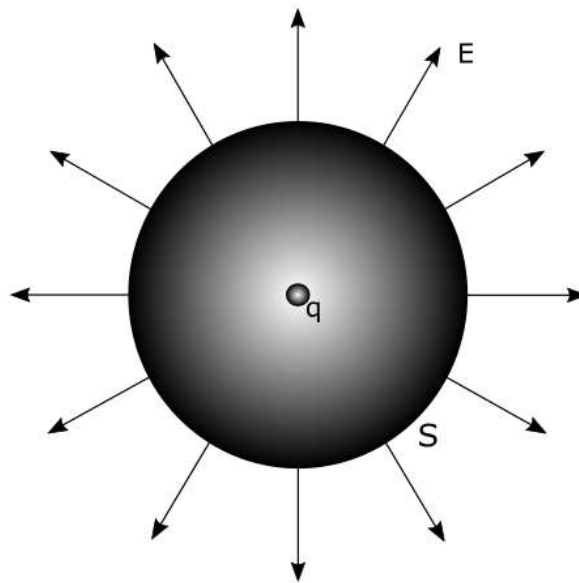


Figura 3 – Indução elétrica criada por uma carga pontual dentro de uma superfície gaussiana.
Fonte: Adaptado de (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p. 50)

A lei de Gauss permite visualizar a quantidade de carga que está no interior da superfície. Pois como mostra a equação (1), a indução elétrica D através da superfície S será igual a carga total envolvida pela superfície (ver Figura 3), ou seja, será igual à densidade volumétrica de carga ρ no interior da superfície (HAYT; BUCK, 2013; SADIKU, 2004).

$$\text{Div } \vec{D} = \rho \quad (1)$$

Aplicando a lei de Gauss para campos magnéticos, tem-se que não há divergência, conforme equação (2). Desse modo, o fluxo magnético através de uma superfície fechada qualquer é sempre nulo. Essa afirmativa constitui a Lei de Gauss para o magnetismo e indica que o fluxo magnético é conservativo (HAYT; BUCK, 2013).

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (2)$$

2.2.2 Lei de Faraday

A lei de Faraday estabelece que o campo magnético pode produzir uma corrente elétrica, conforme ilustra a Figura 4. Essa lei enuncia que um campo magnético variante no tempo produz uma força eletromotriz (fem) que pode estabelecer uma corrente em um circuito fechado. Se o caminho fechado for tomado por um condutor com N espiras, tem-se a equação (3) (SADIKU, 2004).

$$fem = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

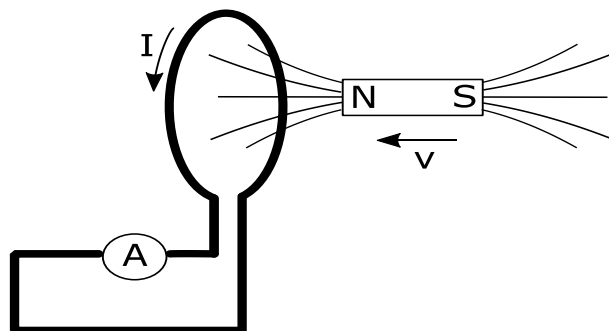


Figura 4 – Campo elétrico criado por meio da aplicação de um campo magnético.
 Fonte: Adaptado de (Electrônica, 2016)

Com isso a lei de Faraday pode ser expressa pela equação (4), em que um campo elétrico E rotacional é criado pela variação temporal da indução magnética (SADIKU, 2004).

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

2.2.3 Lei de Ampère

A lei de Ampère enuncia que a corrente I que circula por um fio retilíneo cria, em volta dele, linhas de campo magnético H rotacionais e que são perpendiculares a direção da corrente, conforme mostra a Figura 5. A lei de ampère é definida na equação (5) (SADIKU, 2004; HAYT; BUCK, 2013).

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (5)$$

Em que $d\vec{l}$ é um elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho de integração (CHAPMAN, 2012).

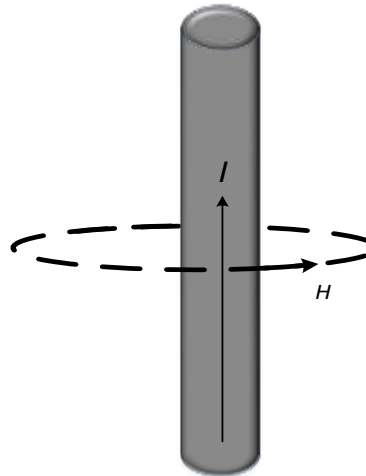


Figura 5 – Lei de Ampère.
Fonte: Autoria própria

A orientação de \vec{H} pode ser determinada pela regra da mão direita. Com o polegar apontado segundo a orientação da corrente e os outros dedos dobrados em torno do fio indicam a orientação de \vec{H} , conforme ilustra a Figura 6 (SADIKU, 2004).

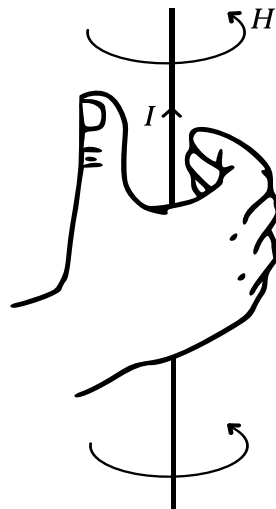


Figura 6 – Regra da mão direita.
 Fonte: Adaptado de (SADIKU, 2004, p. 245).

A intensidade de campo magnético é uma grandeza vetorial e é medida em ampère por metro (A/m). Alguns fabricantes utilizam o Oesterd (Oe) para o campo magnético (SADIKU, 2004).

Se o condutor da Figura 5 for enrolado formando uma espira, as linhas de campo terão a mesma direção e sentido no centro da espira. Se o mesmo condutor for enrolado de forma a ter uma bobina com N espiras, o campo magnético produzido terá um caminho contínuo em torno da bobina (ver Figura 7), cuja distribuição das linhas de campo da bobina se torna similar à de um ímã permanente.

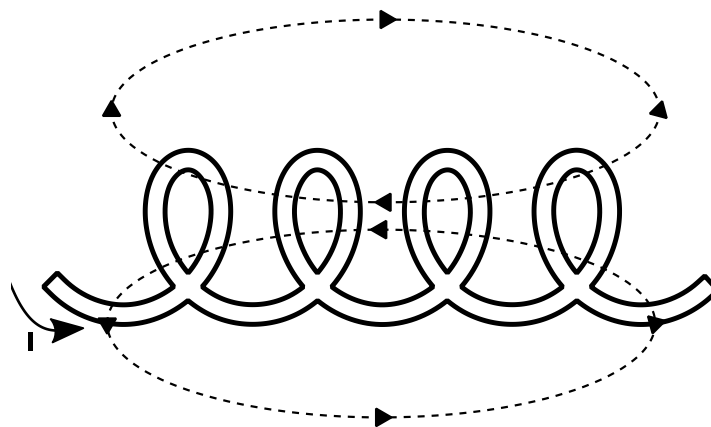


Figura 7 – Linhas de campo em uma bobina percorrida por uma corrente I .
 Fonte: Adaptado de (BOYLSTAD, 2010, p. 313)

Para melhor aproveitar e aumentar o fluxo magnético criado no interior da bobina, e poder direcionar o caminho pelo qual essas linhas irão passar, utiliza-se como núcleo um material ferromagnético, conforme ilustra a Figura 8. As linhas de campo seguem a trajetória descrita pela forma do material magnético, devido à permeabilidade do material ser muito maior do que a permeabilidade do ar, criando assim um caminho de fluxo magnético ϕ . Como, no circuito magnético da figura 7, não se pode determinar exatamente o caminho das linhas de fluxo magnético, considera-se então, o caminho médio desse fluxo ℓ_m passando no centro do núcleo.

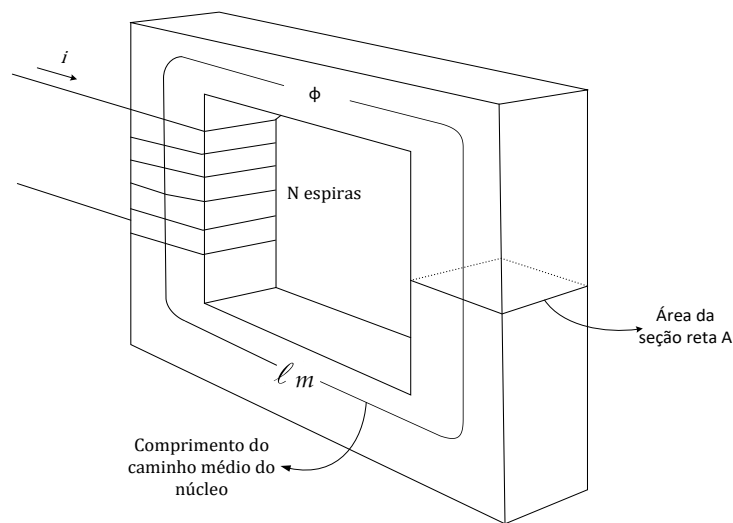


Figura 8 – Núcleo retangular simples.
Fonte: Adaptado de (CHAPMAN, 2012, p. 9).

Quando o caminho fechado for atravessado por uma bobina com N espiras, obtém-se a equação (6)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI. \quad (6)$$

Considerando que a intensidade de campo magnético é constante ao longo da trajetória, tem-se a equação (7)

$$H = \frac{NI}{\ell_m}. \quad (7)$$

2.3 DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO E FLUXO MAGNÉTICO

A densidade de fluxo magnético \vec{B} e a intensidade de campo magnético \vec{H} são relacionadas por meio da equação (8)

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (8)$$

na qual μ é a permeabilidade magnética, que será discutida na seção 2.4.1. A unidade de medida de \vec{B} é o weber por metro quadrado (Wb/m^2), ou em tesla (T) (HAYT; BUCK, 2013).

O fluxo magnético Φ é definido por meio de uma superfície qualquer, conforme mostra a Figura 9.

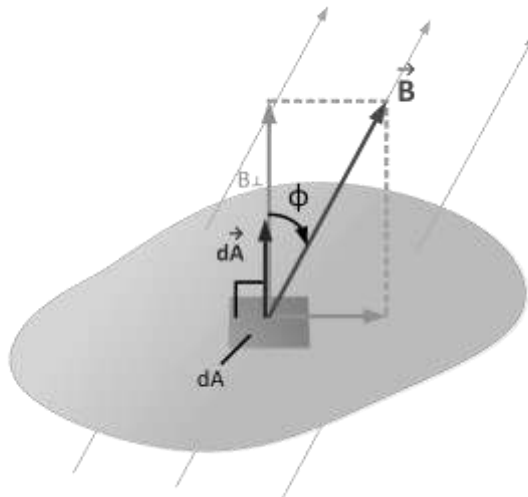


Figura 9 – Fluxo magnético através de um elemento de área dA .
Fonte: Adaptado de (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p. 210).

A superfície é dividida em elementos de área dA , para cada elemento determina-se a componente \vec{B} normal ao elemento de área, B_{\perp} . Pela Figura 9, $B_{\perp} = B \cos \phi$. Define-se então fluxo magnético conforme equação (9) (HAYT; BUCK, 2013).

$$d\Phi = (B \cos \phi) dA. \quad (9)$$

Assim o fluxo magnético total através da superfície é a integração de todas as contribuições dos elementos individuais de área, conforme equação (10) (HAYT; BUCK, 2013).

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (10)$$

Se \vec{B} for constante em toda a superfície e ortogonal a área transversal da superfície do núcleo, o fluxo magnético pode ser dado pela equação,

$$\Phi = B \cdot A. \quad (11)$$

A unidade do fluxo magnético no SI, é o weber (*Wb*), $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$ (YOUNG; FREEDMAN, 2009; ORTIZ; MENDES, 2011).

2.4 PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Os materiais magnéticos caracterizam-se pela sua permeabilidade magnética μ . A permeabilidade expressa a capacidade ou facilidade com que este material permite a passagem de linhas de campo magnético, sua unidade de medida é henry por metro (H/m). A facilidade com que o material pode ser magnetizado é atribuído a permeabilidade relativa μ_r , ela é dada pela relação da própria permeabilidade do material e a permeabilidade do ar, conforme a relação

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad (12)$$

na qual μ_0 é a permeabilidade do vácuo, e tem o valor de $4\pi \times 10^{-7}$.

Os materiais ferromagnéticos não possuem permeabilidade relativa constante, ela varia com a densidade de fluxo \vec{B} em que o material trabalha, ou seja, após o material atingir a região de saturação o valor da permeabilidade diminui, fazendo com que o fluxo magnético não contribua para o aumento de \vec{B} , isto

significa que o fluxo adicional se dispersa no ar, conforme ilustrado na Figura 10 (ORTIZ; MENDES, 2011).

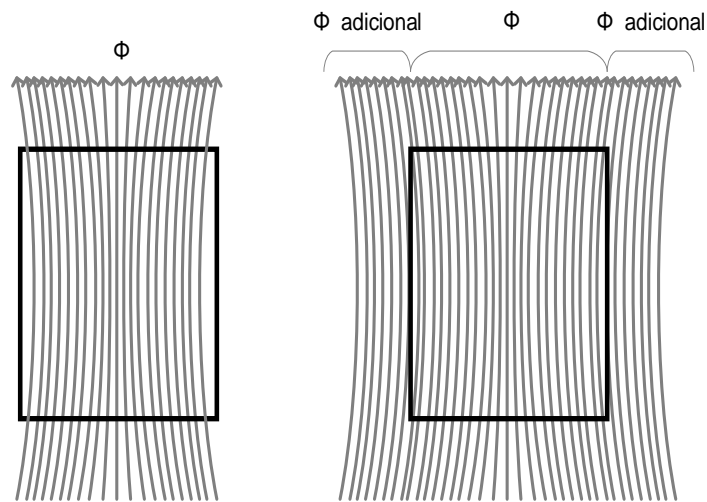


Figura 10 – Comportamento do fluxo em um núcleo de ferrite a) não saturado e b) saturado.
 Fonte: Adaptado de (ORTIZ; MENDES, 2011, p. 29).

2.5 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Os materiais magnéticos são separados conforme sua permeabilidade relativa. Nos casos em que se observa que a permeabilidade relativa do material é ligeiramente menor que 1 ($\mu_r < 1$), se enquadram os materiais diamagnéticos, tendo como exemplo de materiais diamagnéticos o cobre e o Hélio. Nos casos em que a permeabilidade magnética é ligeiramente maior que 1 ($\mu_r > 1$), tem-se os materiais paramagnéticos ou antiferromagnéticos, são exemplos de paramagnéticos o sódio e o alumínio e antiferromagnético óxido de manganês e óxido de ferro. E por último, nos casos que a permeabilidade magnética é muito maior que 1 ($\mu_r \gg 1$), são os materiais ferromagnéticos como o ferro, cobalto e níquel e ferrimagnéticos como magnetita sintética (CULLITY; GRAHAM, 2009).

Os materiais diamagnéticos, paramagnéticos e antiferromagnéticos apresentam baixo poder de magnetização, que até mesmo, são chamados de materiais não magnéticos. Já os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos apresentam alta densidade de fluxo magnético (CULLITY; GRAHAM, 2009).

As propriedades magnéticas de um material são caracterizadas também pela maneira em que a magnetização induzida M varia de acordo com H , a razão

entre essas duas grandezas é chamada de susceptibilidade magnética χ_m , esse comportamento é observado na curva de magnetização proveniente do material. Nos materiais diamagnéticos, paramagnéticos e antiferromagnéticos a curva de magnetização apresenta característica linear. Para os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos a curva é não-linear. Esses comportamentos são ilustrados na Figura 11 (CULLITY; GRAHAM, 2009; SADIKU, 2004).

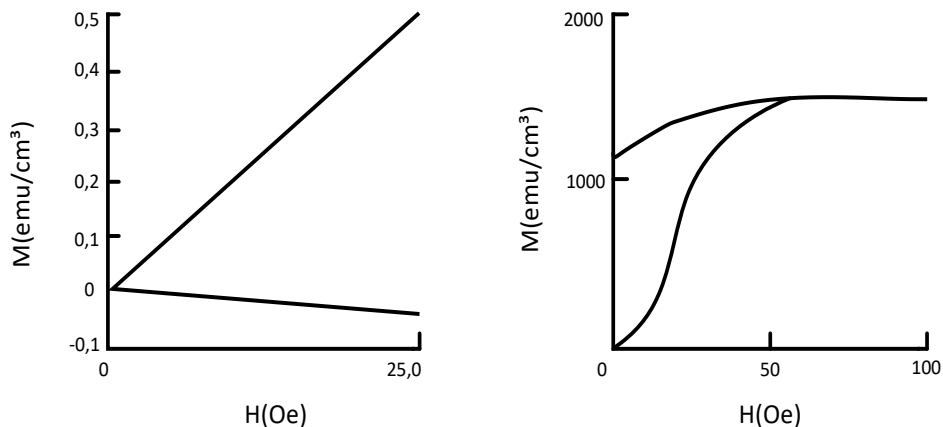


Figura 11 – Curvas de magnetização típicas de um material (a) diamagnético; (b) paramagnético ou antiferromagnético; e (c) ferromagnético ou ferrimagnético.

Fonte: (CULLITY; GRAHAM, 2009, p. 14).

2.5.1 Domínios magnéticos e magnetização

Materiais de propriedades magnéticas são compostos de pequenas regiões chamadas de domínios, cada um desses domínios possui um campo magnético único e cada um desses campos estão em sentidos aleatórios como ilustra a Figura 12(a). Assim o material não apresenta uma magnetização absoluta, ou seja, encontra-se desmagnetizado (VAN VLACK, 2000).

Um material se torna magnetizado quando seus campos magnéticos internos estão alinhados, conforme Figura 12(b), ou seja, na mesma direção. Isso só é possível na presença de um campo magnético externo aplicado no material. A medida que os domínios vão se alinhando torna-se cada vez mais difícil alinhar novos domínios. Quando todos já estiverem alinhados nenhum incremento de magnetização é permitido, significando que o material atingiu a saturação (VAN VLACK, 2000).

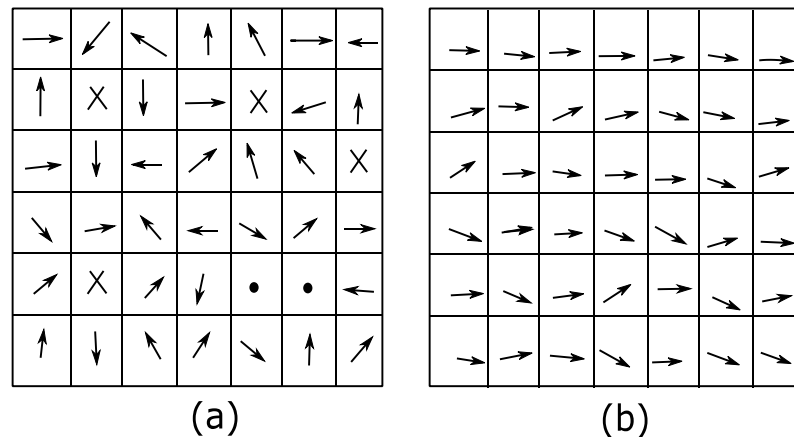


Figura 12 – (a) Domínios Desmagnetizados (b) Domínios Magnetizados.
Fonte: (CHAPMAN, 2012, p. 27).

2.5.2 Curvas de magnetização

O comportamento do material magnético e a representação das mudanças de direção dos seus domínios podem ser observados na curva de magnetização, também conhecida como curva de primeira magnetização, ela é a parte inicial do gráfico do laço de histerese. Ela fornece o resumo das informações a respeito do comportamento de um material magnético (BASTOS, 2012; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Em núcleos ferromagnéticos ao ser aplicado um campo magnético externo H a um material ferromagnético, se observa um aumento da densidade de fluxo magnético B , assim a medida que a intensidade de H aumenta, a densidade de fluxo B também aumenta, mas a partir de um certo valor de H (H_0) a densidade de fluxo aumenta lentamente. Chegando a valores altos de H (H_1), então a taxa de crescimento de B diminui significativamente embora o campo atinja valores muito elevados de campo magnético (H_x), neste ponto de operação se diz que o material satura. Ao ser alcançada a saturação (B_x, H_x) obtém-se a curva de magnetização. Esse comportamento da magnetização do material pode ser visto na Figura 13 (BASTOS, 2012; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

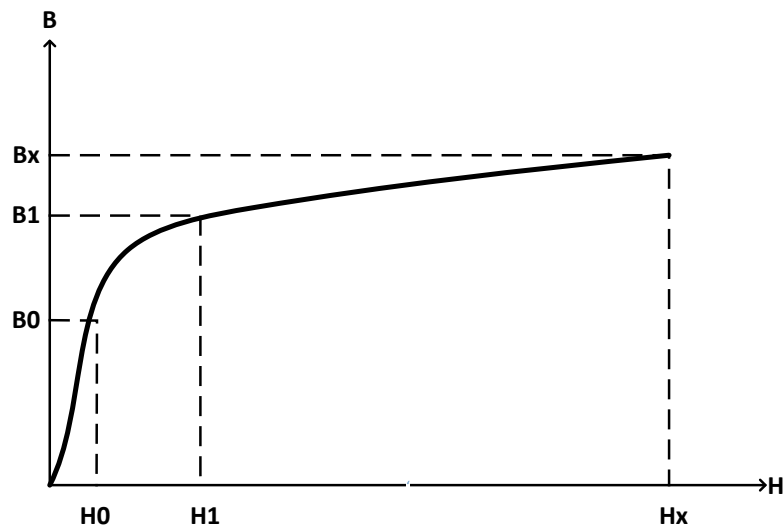


Figura 13 – Curva de magnetização típica de material ferromagnético.
Fonte: Autoria própria.

2.5.3 Histerese magnética

A histerese magnética é responsável pelo atraso entre a densidade de fluxo magnético B e a intensidade do campo magnético H aplicado no material ferromagnético. O fenômeno histerese é causado, porque ao cessar-se o campo magnético aplicado, nem todos os domínios ficam desorientados como a princípio, para que eles percam a orientação é necessário aplicar energia (HAYT; BUCK, 2013; ORTIZ; MENDES, 2011).

Ao ser alcançada a saturação parcial (B_x, H_x) ilustrado na Figura 13, os fenômenos de histerese começam a aparecer. Diminuindo a intensidade do campo magnético aplicado no material espera-se que a densidade de campo magnético regrida proporcionalmente, no entanto, não é isso que se observa. Mesmo zerando H existe uma densidade de fluxo remanescente B_r . Para anular a densidade de fluxo remanescente é necessário aplicar um campo magnético contrário, chamado de força coercitiva H_c . Em seguida aplica-se a força magnetizante máxima em sentido oposto $-H_{max}$ e se novamente diminuir a intensidade do campo até levar $H = 0$ irá aparecer a densidade de fluxo remanescente $-B_r$. Por fim B é levado a zero novamente. Esse processo é repetido várias vezes, até ser traçado o ciclo ilustrado na Figura 14, ele é chamado de laço de histerese (HAYT; BUCK, 2013; SHACKELFORD, 2008).

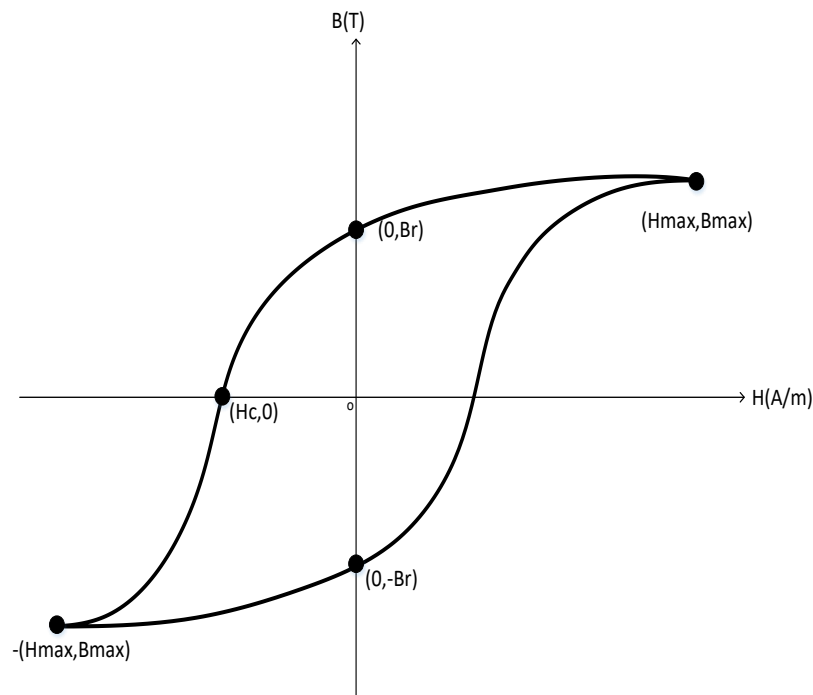


Figura 14 – Laço de histerese.
Fonte: Adaptado de (HAYT; BUCK, 2013, p. 259).

2.6 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Embora o material magnético tenha um comportamento não linear, devido a sua elevada permeabilidade, ele concentra o fluxo magnético em uma região dentro do espaço onde essa permeabilidade é elevada, permitindo o direcionamento do fluxo onde ele é necessário. Sistemas que envolvem um caminho, de material magnético de alta permeabilidade que conduz o fluxo magnético são chamados de circuitos magnéticos. Eles tem uma representação análoga aos circuitos elétricos.

Em circuitos elétricos quando uma tensão é aplicada cria-se uma corrente, onde sua circulação é dificultada por meio de uma resistência. Em circuitos magnéticos o fluxo magnético é correlacionado a corrente elétrica e o material magnético oferece uma certa dificuldade a passagem do fluxo, essa resiliência a passagem de fluxo magnético é denominada de relutância magnética \mathfrak{R} . A corrente total aplicada juntamente com o número de espiras cria e impulsiona o fluxo magnético, esse fenômeno é conhecido como força magnetomotriz. A Figura 15 ilustra a analogia entre circuitos elétricos e magnéticos (CHAPMAN, 2012; ALEXANDER; SADIKU, 2013).

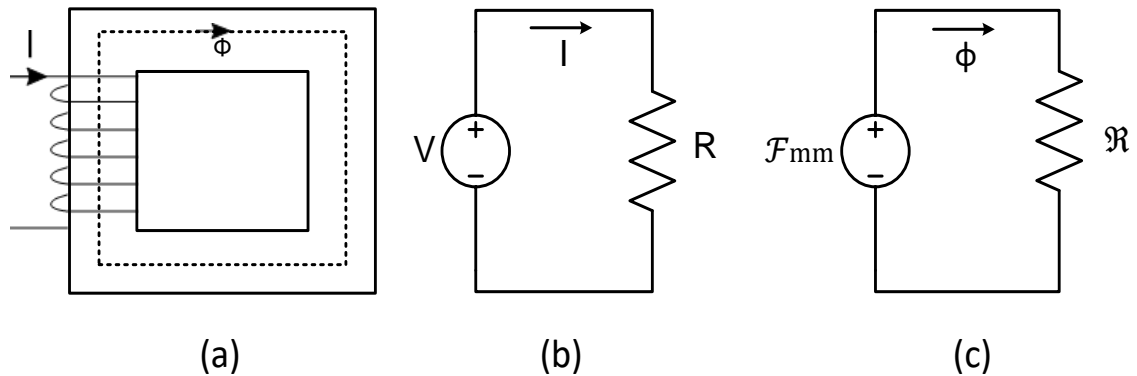


Figura 15 – (a) circuito magnético (b) circuito elétrico (c) Análogo elétrico do circuito magnético
Fonte: Adaptado de (CHAPMAN, 2012, p. 12)

O comportamento, dos circuitos magnéticos, é regido por equações equivalentes aos dos circuitos elétricos. Estas equações estão no Quadro 2.

Circuito Elétrico	Circuito Magnético
Resistência elétrica R	Relutância magnética \mathcal{R}
Condutância $G = \frac{1}{R}$	Permeância $P = \frac{1}{\mathcal{R}}$
Condutividade σ	Permeabilidade μ
Corrente I	Fluxo magnético Φ
Densidade de corrente $J = \frac{I}{S}$	Densidade de fluxo $B = \frac{\Phi}{S}$
Força eletromotriz V	Força magnetomotriz \mathcal{F}

Quadro 2 – Relação entre as equações do circuito elétrico e magnético.
Fonte: Autoria própria.

2.7 INDUTORES

Indutores são dispositivos eletromagnéticos passivos que armazenam energia em forma de campo magnético. Qualquer condutor de corrente elétrica possui efeito indutivo, conseqüentemente exerce o efeito de um indutor, entretanto para se obter uma indutância maior, o indutor típico é formado por várias espiras de

material condutor isolado que envolve um cilindro, como ilustra a Figura 16 (SADIKU, 2004).

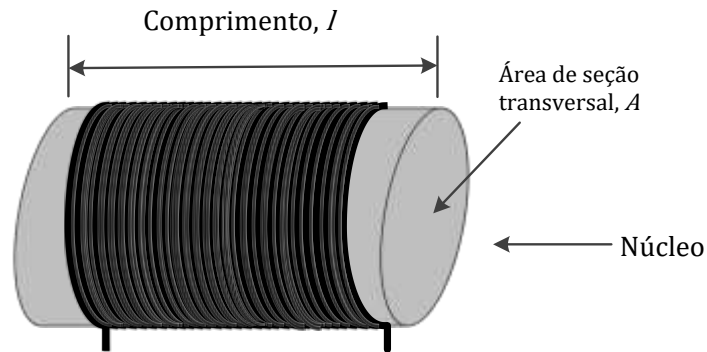


Figura 16 – Forma típica de um indutor.
Fonte: Adaptado de (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p. 198).

A tensão de um indutor é diretamente proporcional à variação de corrente e sua constante de proporcionalidade é a indutância, sua unidade de medida é o henry (H) (SADIKU, 2004). A relação entre a tensão e a variação de corrente no indutor é mostrada na equação(13)

$$V = L \frac{di}{dt}. \quad (13)$$

A indutância de um indutor depende de suas dimensões físicas e de aspectos construtivos, que envolvem o número de espiras e geometria do núcleo. Normalmente as indutâncias ficam na escala de mH. As fórmulas para o cálculo da indutância variam de acordo com suas dimensões físicas e construção (SADIKU, 2004). Para um indutor em formato de solenoide, por exemplo, a indutância pode ser calculada por meio da equação (14),

$$L = \frac{N^2 \mu A_e}{\ell_m} \quad (14)$$

Sendo, N o número de espiras, μ é a permeabilidade do núcleo, A_e é a área da seção transversal do núcleo e ℓ_m é o comprimento da bobina. Pela equação (14) conclui-se que para obter uma indutância elevada, pode-se aumentar o número de espiras, usar um material de permeabilidade maior, expandindo a área

transversal ou diminuir o comprimento da bobina. A energia armazenada em um indutor é definida pela equação (15) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad (15)$$

2.8 MODELAGEM NUMÉRICA

A maioria dos problemas encontrados na engenharia derivam de fenômenos físicos reais, onde a resposta e análise desses fenômenos pode ser complexa. Faz-se então necessário obter um modelo matemático, que consiga representar de maneira conveniente o fenômeno físico real a ser analisado. Modelos são representações idealizadas das características físicas de um processo natural, ele pode representar fielmente o fenômeno real, como também representar de forma parcial ou aproximada, desde que a resposta a esse modelo seja considerada satisfatória (QUADROS; BORTOLI, 2009).

A modelagem numérica, disponibiliza de um maior número de variáveis, tornando possível o estudo do sistema em várias situações sem precisar de protótipos, diminuindo o tempo e os custos de um projeto. Ao contrário do método analítico, o método numérico não é limitado a modelos simples, mas a modelos que levam em conta a complexidade geométrica e a não linearidade.

Sendo assim, a modelagem pode ser utilizada como meio intermediário para se obter o melhor projeto possível, com a intervenção ou não do projetista. A modelagem fornece maior entendimento dos fenômenos e grandezas envolvidas e possibilita previsões e análises em diversas situações de funcionamento, isso otimiza a produção e diminui custos e erros.

2.8.1 Modelagem indutor

A modelagem do indutor se baseia na geometria do núcleo, número de espiras e o tipo do material do núcleo ferromagnético. A Figura 17 ilustra a distribuição do fluxo magnético em relação a geometria do núcleo.

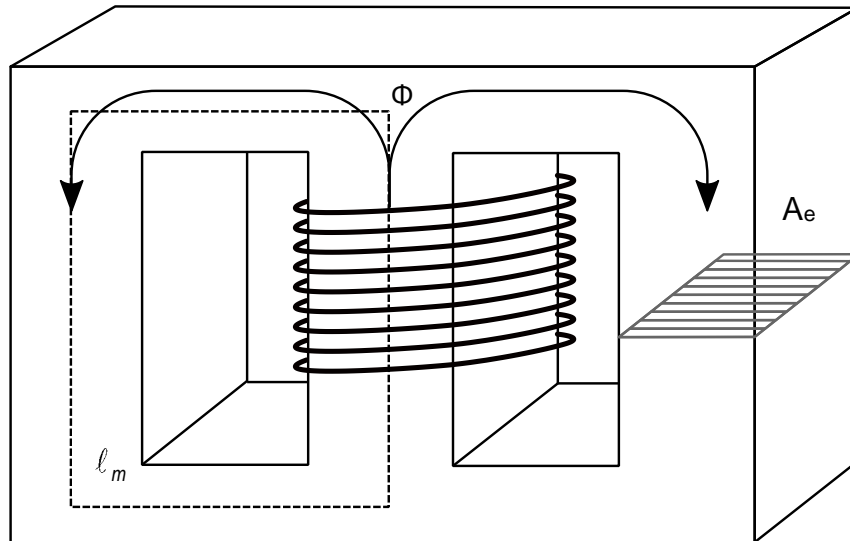


Figura 17 – Fluxo magnético em relação a geometria do núcleo.
Fonte: Autoria própria.

O fluxo magnético gerado está diretamente ligado a geometria, esta relação está demonstrada na equação da indutância (16).

$$L = \frac{N}{l} \cdot \Phi \quad (16)$$

Substituindo a equação (11) na equação (16), obtém-se a equação (17)

$$L = \frac{N}{l} (B \cdot A). \quad (17)$$

2.8.2 Modelos não lineares da curva de magnetização

Serão apresentados os três modelos utilizados para a representação do comportamento não linear do indutor. Escolheu-se esses modelos por utilizarem-se de equações simples que podem ser facilmente implementadas computacionalmente. Eles fornecem resultados com precisão adequada para o estudo e pela sua facilidade implementação permitem um resultado rápido dos circuitos magnéticos de interesse. (MARTINS; TORTELLI, 1991).

2.8.2.1 Modelo linearizado por segmentos

O modelo linearizado por segmentos aproxima a curva de magnetização do material magnético, por diversos segmentos lineares, conforme ilustra a Figura 18. Cada segmento de reta terá um valor de permeabilidade magnética diferente, conforme o comportamento da curva (ORTIZ, 2000)

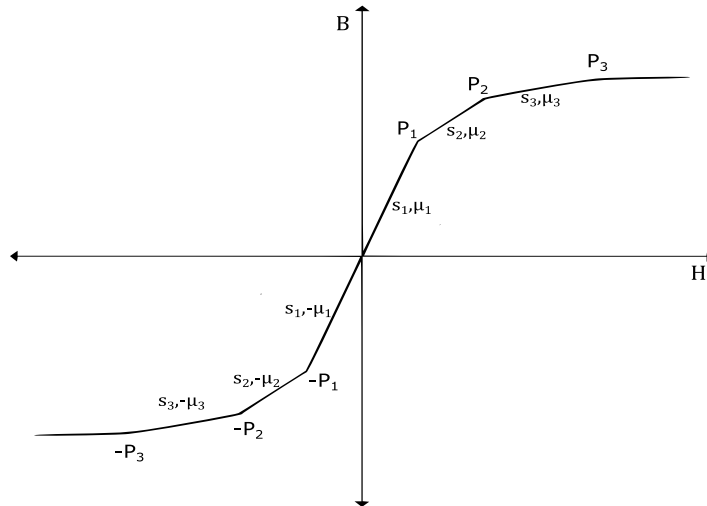


Figura 18 – Modelo por aproximação segmentos lineares.
Fonte: Adaptado de (ORTIZ, 2000, p. 43)

Para aplicação deste modelo utilizou-se a forma inclinação-intercepto da equação (18) da reta,

$$y = ax + b, \quad (18)$$

em que, a é o coeficiente da inclinação da reta e b o coeficiente da ordenada do ponto onde a reta intercepta o eixo y (LEITHOLD, 1994).

Condicinando a equação (18), de coordenadas x e y para H e B , tem-se a equação(19),

$$B = aH + b \quad (19)$$

Assim, a equação (19) é inserida no Matlab®, em que a representa a densidade de fluxo magnético, já que esse fluxo muda conforme a inclinação da reta.

2.8.2.2 Modelo polinomial

O modelo polinomial aproxima a curva de magnetização por duas equações. A primeira equação (20) é um polinômio de terceiro grau que abrange a curva de magnetização da sua origem até a sua corrente de saturação I_s ,

$$\Phi(I) = a_1 \cdot I + a_2 \cdot I^2 + a_3 \cdot I^3, \quad p / 0 \leq I \leq I_s. \quad (20)$$

A segunda equação abrange a região já saturada da curva de magnetização. Para a parte não linear da curva, a equação (21) é utilizada

$$\Phi(I) = \Phi_s + L_s \cdot (I - I_s), \quad p / I \geq I_s. \quad (21)$$

Sendo L_s e Φ_s os valores da indutância e do fluxo saturados (MARTINS; TORTELLI, 1991; BARILI, *et al.*, 1988).

Considerando que a corrente é alternada, há um ciclo positivo e negativo, sendo assim, as equações (20) e (21) abrangem o ciclo positivo da corrente. Já para o ciclo negativo essas mesmas equações são utilizadas, só que com o sinal contrário, deste modo tem-se as equações (22) e (23),

$$\Phi(-I) = -(a_1 \cdot I + a_2 \cdot I^2 + a_3 \cdot I^3), \quad p / -I_s > I > 0 \quad (22)$$

$$\Phi(-I) = -(\Phi_s + L_s \cdot (I - I_s)), \quad p / I \geq I_s. \quad (23)$$

Os coeficientes das equações (20) e (22), são constantes, que dependem somente dos parâmetros do indutor (MARTINS; TORTELLI, 1991; BARILI, *et al.*, 1988),

$$a_1 = L_0 \quad (24)$$

$$a_2 = \frac{3 \cdot \Phi_s}{I_s^2} - \frac{2 \cdot L_0 + L_s}{I_s} \quad (25)$$

$$a_3 = \frac{L_s + L_o}{I_s^2} - \frac{2 \cdot \Phi_s}{I_s^3}. \quad (26)$$

Em que L_o é o valor de indutância inicial, que compreende a parte não saturada da curva de magnetização, e pode ser obtido pela equação(27),

$$L_o = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e}{\ell_m}, \quad (27)$$

em que μ_o é a o valor de permeabilidade que compreende a região não saturada da curva de magnetização.

E L_s é o valor da indutância da região saturada, e pode ser obtido pela equação (28),

$$L_s = \frac{N^2 \cdot \mu_s \cdot A_e}{\ell_m}. \quad (28)$$

em que μ_s é a o valor de permeabilidade que compreende a região saturada da curva de magnetização.

O gráfico que representa o modelo polinomial está ilustrado na Figura 19. Ele mostra a relação entre a densidade de fluxo magnético e a corrente aplicada (MARTINS; TORTELLI, 1991; BARILI, *et al.*, 1988).

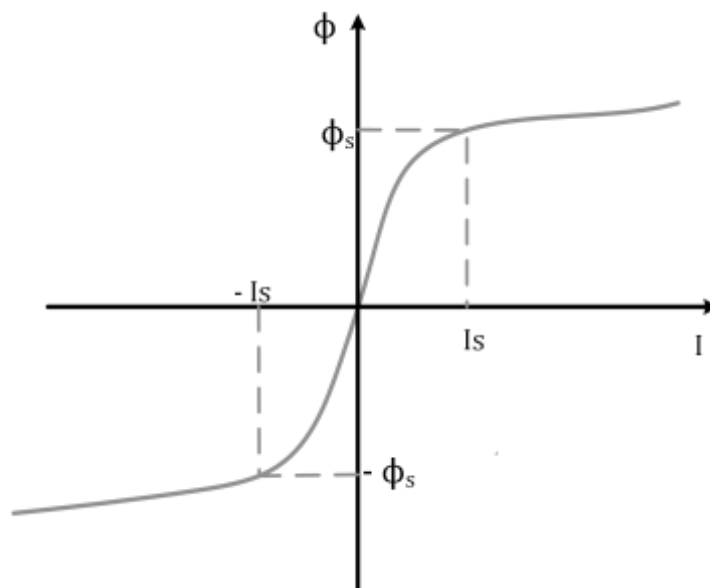


Figura 19 – Modelo polinomial
Fonte: (MARTINS; TORTELLI, 1991, p. 335)

Derivando-se as equações (20) e (21) do fluxo em relação a corrente, obtém-se as relações de indutâncias do modelo polinomial, as equações (29) e (30),

$$L(I) = a_1 + 2a_2 |I| + 3a_3 I^2, \quad p/ \ 0 \leq |I| < |I_s| \quad (29)$$

$$L(I) = L_s, \quad p/ \ |I| \geq |I_s|. \quad (30)$$

2.8.2.3 Modelo hiperbólico

Este modelo aproxima a curva de magnetização por uma tangente hiperbólica, ele é caracterizado por uma curva suave, ilustrada na Figura 20, e definido pela equação (31),

$$\Phi(I) = L_s \cdot I + \tanh\left(\frac{L_o - L_s}{\Phi_s} \cdot I\right). \quad (31)$$

Derivando-se a equação (31) do fluxo em relação a corrente, obtém-se a equação (32) para a indutância do modelo hiperbólico (MARTINS; TORTELLI, 1991; BARILI, *et al.*, 1988).

$$L(I) = L_s + (L_o - L_s) \cdot \cosh^{-2}\left(\frac{L_o - L_s}{\Phi_s} \cdot I\right) \quad (32)$$

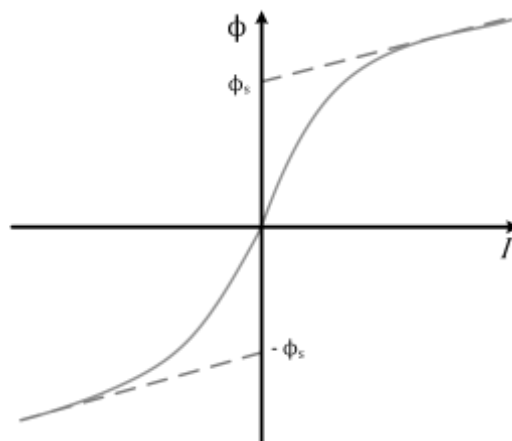


Figura 20 – Modelo hiperbólico
Fonte: (MARTINS; TORTELLI, 1991, p. 335).

3 METODOLOGIA

Fez-se um ensaio experimental para obtenção das curvas de magnetização, sendo necessário realizar a construção dos indutores utilizados nos ensaios. Nos tópicos a seguir será explicado como foram projetados os indutores, como foi realizado o ensaio de magnetização dos indutores e os materiais utilizados. Para comprovar a eficácia dos modelos realizou-se também um ensaio a fim de obter as formas e onda de corrente e tensão do indutor, podendo então compará-las com as formas de onda produzidas pelas simulações computacionais, em que foram aplicados os modelos apresentados na seção anterior.

3.1 CONTRUÇÃO DOS INDUTORES

Para cada geometria de núcleo, há uma maneira diferente de se projetar o indutor. Na maioria das literaturas o projeto de indutores se detém ao projeto para altas frequências que faz o uso apenas da região não saturada do núcleo, não se aproxima da região de B_{max} . Isso porque é nesta região que ocorrem menos perdas, mas como consequência o indutor tem um volume maior.

Para este trabalho, construiu-se indutores por meio apenas de sua geometria. Utilizou-se dois tipos de núcleos magnéticos, conforme Tabela 1, ambos os materiais de ferrite.

Tabela 1 – Dados núcleos ferromagnéticos

Material	Tipo	Referência	Fabricante
IP12R	E (maior)	NEE 42/21/15	Thornton
IP6	Pote	NP 26/16	Thornton

Fonte: Adaptado de (THORNTON, p. 11)

Os parâmetros efetivos do núcleo, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros efetivos

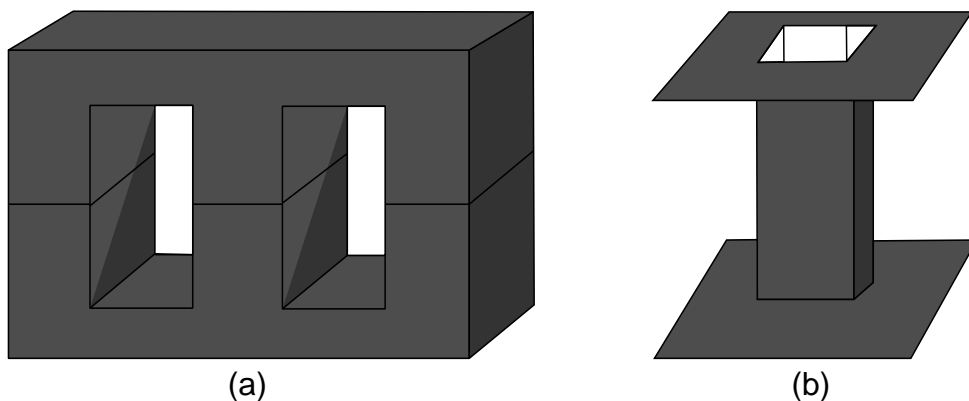
Geometria	ℓ_m (mm)	A_e (mm ²)	A_l (nH)	μ_e	μ_i
NEE 42/21/15	97	181	4000	1719	2100
NP 26/16	37	94	4900	1560	2000

Fonte: Adaptado de (THORNTON, p. 50)

Sendo ℓ_m o comprimento efetivo do núcleo, A_e área transversal ou área efetiva do núcleo, Al fator de indutância, μ_e permeabilidade efetiva e μ_i permeabilidade relativa inicial, quando a intensidade do campo magnético tende a zero. Os parâmetros efetivos dos núcleos magnéticos são utilizados na construção dos indutores, como também para a obtenção das curvas de magnetização (THORNTON).

3.1.1 Núcleo retangular NE 42/21/15

O núcleo do tipo E não costuma ser utilizado sozinho, mas sim, em conjunto de outro núcleo do tipo E, formando então um núcleo EE, conforme ilustra a Figura 21 (a). Como apoio para o núcleo EE é utilizado um carretel, conforme ilustra a Figura 21 (b) (BARBOSA, 2012).



**Figura 21 – (a) Núcleo EE, formado pela união de dois núcleos do tipo E; (b) carretel de apoio para o núcleo EE.
Fonte: Adaptado de (BARBI, 2007, p. 79).**

Como visto, em um núcleo retangular de material ferromagnético, com N espiras, praticamente todo o fluxo magnético produzido vai permanecer dentro do núcleo, de tal forma que a trajetória fechada da integral de H será o caminho médio do núcleo ℓ_m . Então por meio da equação (7), o indutor poderá ser projetado.

Como o objetivo é obter a curva BH incluindo a região de saturação do material. Pelo gráfico BH fornecido pelo fabricante Thornton, visualiza-se que em 9 Oe o material IP12R está saturado, conforme ilustra a Figura 22, e utilizando uma corrente de 1 A arbitrária, tem-se um indutor de 70 espiras, que remete a uma indutância de 17 mH, mas a indutância medida do indutor, com núcleo já bobinado foi de 16,84 mH.

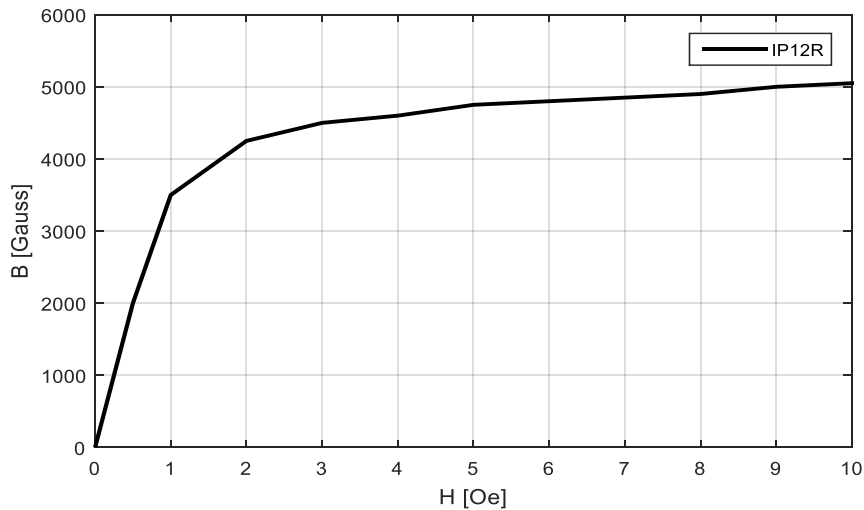


Figura 22 – Curva de Magnetização Material IP12R
Fonte: Adaptado de (THORNTON, p. 11)

3.1.2 Núcleo pote NP 26/16

O formato típico de um núcleo pote é ilustrado na Figura 23.

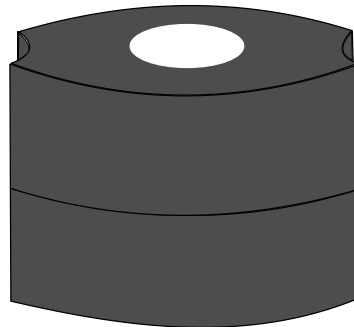


Figura 23 – Formato núcleo pote
Fonte: Adaptado de (ORTIZ, et al., 2002, p. 80).

Para a construção do indutor com o núcleo do tipo pote, fixa-se um valor de indutância L , para se calcular o número de espiras necessário para alcançar a indutância pré-determinada, utiliza-se a equação(33) (EPUSP, 1996).

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad (33)$$

Sendo A_L o coeficiente de indutância, o seu valor é disponibilizado pelo fabricante do núcleo magnético. Enrolou-se o fio formando 45 espiras, que pela equação (33) daria uma indutância de 9,92 mH, mas como o processo de

bobinagem do indutor não é preciso, a indutância medida do indutor com núcleo já bobinado foi de 8,3 mH.

Para a bobinagem dos dois indutores escolheu-se fio de cobre esmaltado de 20 AWG, que corresponde a 0,8118 mm de diâmetro. Ele foi escolhido, pois tem uma capacidade de corrente de 1,6 A, suportando as correntes aplicadas nos circuitos dos ensaios experimentais.

3.2 ENSAIO PARA OBTER AS CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO

Para a realização do ensaio, foram necessários os seguintes materiais: 1 varivolt; 1 resistor de 5,79 Ω ; 2 multímetros; 2 Indutores com núcleo de ferrite apresentados na seção anterior e cabos para as conexões. Montou-se um circuito típico RL, em que a tensão de alimentação é controlada pelo varivolt. Colocou-se em paralelo com o indutor um multímetro para medir a tensão, e em série um amperímetro para medir a corrente do indutor, como ilustra o esquema Figura 24.

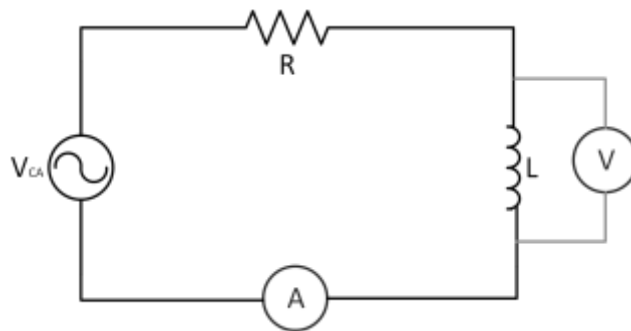


Figura 24 – Circuito do ensaio para obter as curvas de magnetização dos materiais.
Fonte: Autoria própria

Após obter o conjunto de pontos de tensão e corrente, os valores de B e H podem ser obtidos diretamente pelas equações (34) e (35),

$$B = \frac{V}{4,44 \cdot N \cdot f \cdot A_e} \quad (34)$$

$$H = \frac{\sqrt{2} \cdot N \cdot I}{\ell_m} \quad (35)$$

que relacionam os valores eficazes de tensão e corrente medidos, a frequência e os parâmetros efetivos dos núcleos magnéticos. Em seguida os parâmetros B e H são ajustados em uma curva, concedendo então a curva de magnetização dos materiais (THORNTON).

3.3 ENSAIO PARA OBTER AS FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE DOS INDUTORES

Para esse ensaio, foram necessários os seguintes materiais: 1 varivolt; 1 resistor; 1 osciloscópio, 2 Indutores com núcleo de ferrite e sem entreferro e cabos para as conexões. Montou-se o mesmo circuito da Figura 24, ele é alimentado com uma tensão de pico (V_p) e com o auxílio do osciloscópio, obtém-se as formas de onda da tensão no indutor, da tensão no resistor e da tensão de alimentação. A partir da forma de onda da tensão do resistor consegue-se a forma de onda da corrente no circuito, esse procedimento faz-se necessário já que as ponteiros do osciloscópio utilizadas não conseguem medir diretamente a corrente, elas conseguem medir apenas as grandezas de tensão.

3.4 MODELAGEM DO CIRCUITO ELÉTRICO RL

Para observar o comportamento do indutor, considerando a não linearidade do material modela-se um circuito RL, conforme ilustra a Figura 25, de onde obtém-se as variações da corrente, das tensões e do fluxo magnético, no indutor e nos outros elementos do circuito.

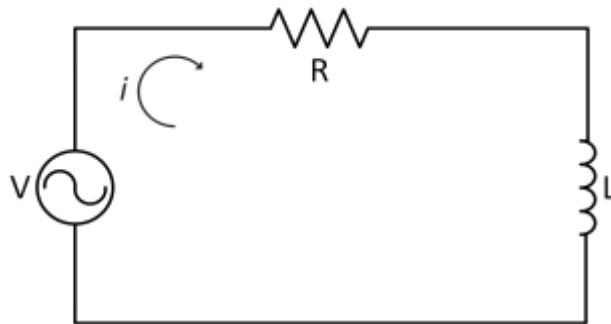


Figura 25 – Circuito equivalente de um indutor
Fonte: Autoria própria.

Analisa-se o circuito utilizando a Lei das Tensões de Kirchhoff (LTK), que enuncia que a soma algébrica de todas as tensões em torno de um caminho fechado é igual a zero, juntamente com a lei de Faraday que enuncia que o valor da força eletromotriz induzida em um condutor de N espiras é igual à taxa de variação do fluxo magnético através do total de espiras. Obtém-se então a expressão (36),

$$v = Ri + N \frac{d\Phi}{dt} . \quad (36)$$

Sendo, o fluxo magnético, dado pela equação (37),

$$\Phi = \frac{Li}{N} \quad (37)$$

Substituindo a equação (37) na equação (36), obtém-se a equação (38),

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} . \quad (38)$$

Discretizando no tempo a equação (38), ela torna-se a (39),

$$V = Ri + \frac{L(i - i_0)}{\Delta t}. \quad (39)$$

Resolvendo para a corrente no circuito, tem-se a equação (40),

$$i = \frac{V + \frac{Li_0}{\Delta t}}{R + \frac{L}{\Delta t}}. \quad (40)$$

Em que a corrente i será calculada no programa de simulação.

O cálculo do fluxo é feito de acordo ao tipo de modelo. Para o modelo polinomial é feito de acordo com as equações (20) a (26) e para o modelo hiperbólico é de acordo com as equações (31) e (32). Sendo assim, o $L(I)$ e o $\Phi(I)$ serão calculados de acordo com o modelo matemático utilizado, hiperbólico ou polinomial.

Para o modelo linearizado por segmentos, os valores de H e B obtidos por meio dos ensaios para obtenção das curvas de magnetização são utilizados para o cálculo dos coeficientes da equação (19).

$$a = \frac{B - B_0}{H - H_0} \quad (41)$$

$$b = B - aH \quad (42)$$

Como o programa de simulação é baseado em passos discretos de tempo, então os coeficientes a e b são calculados a cada iteração do algoritmo. Esses coeficientes são usados no cálculo da corrente, fluxo magnético e tensão no indutor.

A equação (36) do modelo do indutor, juntamente com as equações de Maxwell na sua forma integral, torna-se a equação (43),

$$v = Ri + \frac{N^2 A_e a}{l_m} \cdot \frac{di}{dt} \quad (43)$$

Como se trata de uma equação diferencial ordinária, é necessário um método numérico para resolver a equação, para este caso foi utilizado o método de Euler, isolando o termo i tem-se a corrente definida pela equação(44),

$$i = v + \frac{\frac{i_o \cdot N^2 \cdot A_e \cdot a}{\Delta t \cdot l_m}}{R + \frac{N^2 \cdot A_e \cdot a}{\Delta t \cdot l_m}} \quad (44)$$

Para o modelo linearizado por segmentos obtém-se o fluxo da seguinte maneira, onde B é obtida da curva do material.

$$\Phi = N \cdot B \cdot A_e \quad (45)$$

Com a corrente calculada obtém-se a tensão no resistor, por meio da equação (46),

$$V_R = R \cdot i \quad (46)$$

E calcula-se a tensão no indutor, pela equação (47) obtida da aplicação da LTK no circuito da Figura 25,

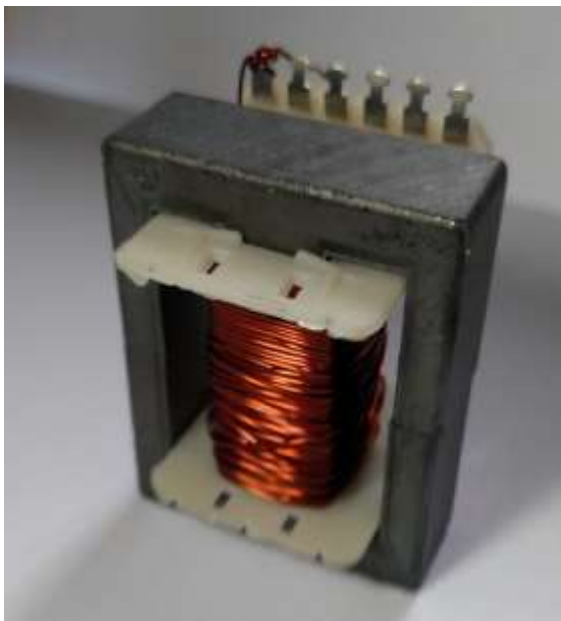
$$V_L = V - V_R \quad (47)$$

4 RESULTADOS

4.1 DADOS DO ENSAIO DAS CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO

A tensão de entrada do circuito é controlada pelo varivolt (variador de tensão alternada). Desta forma, pode-se controlar a corrente que circula pelo circuito. A tensão resultante sobre o indutor V e a corrente que circula pelo circuito RL são medidos.

Para cada um dos indutores, varia-se a tensão, partindo de zero, ajustando o varivolt para que a corrente seja incrementada. Conforme varia-se a tensão aplicada no circuito anota-se os valores das grandezas de corrente e tensão sobre o indutor. Utilizou-se os dois indutores projetados, o indutor com núcleo EE de $16,84\text{ mH}$ e o indutor com núcleo pote de $8,3\text{ mH}$, ilustrados na Fotografia 1.



(a)



(b)

Fotografia 1 – Indutores projetados (a) núcleo EE, (b) núcleo pote.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3 apresenta as grandezas medidas.

Tabela 3 – Correntes e tensões medidas dos indutores com núcleo EE e Pote

EE		Pote	
Corrente Indutor (A)	Tensão no indutor (V)	Corrente Indutor (A)	Tensão no indutor (V)
0,00	0	0	0
0,02	0,51	0,01	0,106
0,04	0,94	0,02	0,227
0,06	1,19	0,04	0,305
0,10	1,34	0,06	0,374
0,16	1,41	0,08	0,410
0,20	1,44	0,14	0,440
0,23	1,47	0,19	0,458
0,26	1,50	0,28	0,479
0,31	1,53	0,30	0,482
0,37	1,57	0,35	0,491
0,42	1,61	0,43	0,507
0,48	1,65	0,52	0,521
0,52	1,67	0,65	0,542
0,64	1,75	0,78	0,561
0,69	1,78	0,82	0,568
0,73	1,80	0,95	0,588
0,83	1,87	1,06	0,604
0,86	1,88	1,19	0,622
0,90	1,91	--	--
0,96	1,94	--	--
1,01	1,97	--	--
1,07	2,01	--	--
1,12	2,03	--	--
1,16	2,06	--	--
1,20	2,09	--	--
1,26	2,12	--	--
1,29	2,15	--	--
1,34	2,18	--	--
1,43	2,22	--	--
1,50	2,26	--	--

Fonte: Autoria própria.

Para o indutor pote as medições foram interrompidas primeiro em relação ao indutor com núcleo EE, pois ele tem dimensões menores e indutância menor saturando mais rápido. A potência máxima para o circuito desse ensaio é de 13,028 W.

4.2 VALORES DE B E H OBTIDOS

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de B e H obtidos por meio das equações (34) e (35) e dos valores de corrente e tensão medidos apresentados na Tabela 3.

Tabela 4 – Valores de B e H obtidos

EE		Pote	
H (A/m)	B (T)	H (A/m)	B (T)
0	0	0	0
20,3505	0,1511	13,2943	0,1283
40,7010	0,2785	26,5886	0,2747
61,0515	0,3526	53,1771	0,3691
101,7526	0,3970	79,7657	0,4526
162,8041	0,4177	106,3543	0,4961
203,5052	0,4266	186,1200	0,5324
234,0309	0,4355	252,5914	0,5542
264,5567	0,4444	372,2400	0,5796
315,4330	0,4533	398,8286	0,5833
376,4845	0,4651	465,3000	0,5942
427,3608	0,4770	571,6543	0,6135
488,4124	0,4888	691,3029	0,6305
529,1134	0,4948	864,1286	0,6559
651,2165	0,5185	1036,9543	0,6789
702,0928	0,5274	1090,1314	0,6873
742,7938	0,5333	1262,9571	0,7115
844,5464	0,5540	1409,1943	0,7309
875,0722	0,5570	1582,0200	0,7527
915,7732	0,5659	--	--
976,8247	0,5748	--	--
1027,7010	0,5837	--	--
1088,7526	0,5955	--	--
1139,6289	0,6014	--	--
1180,3299	0,6103	--	--
1221,0309	0,6192	--	--
1282,0825	0,6281	--	--
1312,6082	0,6370	--	--
1363,4845	0,6459	--	--
1455,0619	0,6577	--	--
1526,2887	0,6696	--	--

Fonte: Autoria própria.

4.4 CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO OBTIDAS

As curvas de magnetização construídas por meio dos valores de B e H exibidos na Tabela 4 para os dois indutores ensaiados, são apresentadas individualmente na Figura 26 e Figura 27.

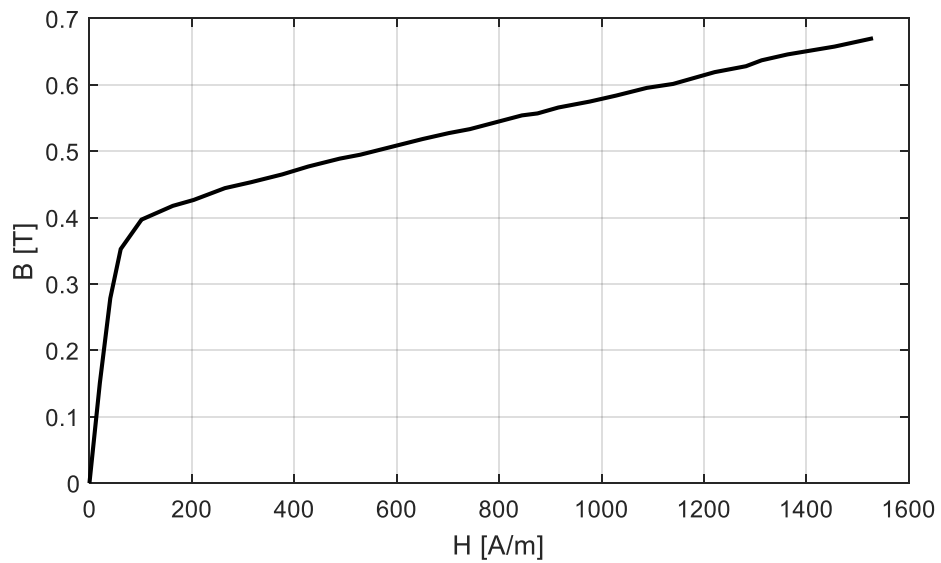


Figura 26 – Curva de magnetização do núcleo de material IP12R.
Fonte: Autoria própria.

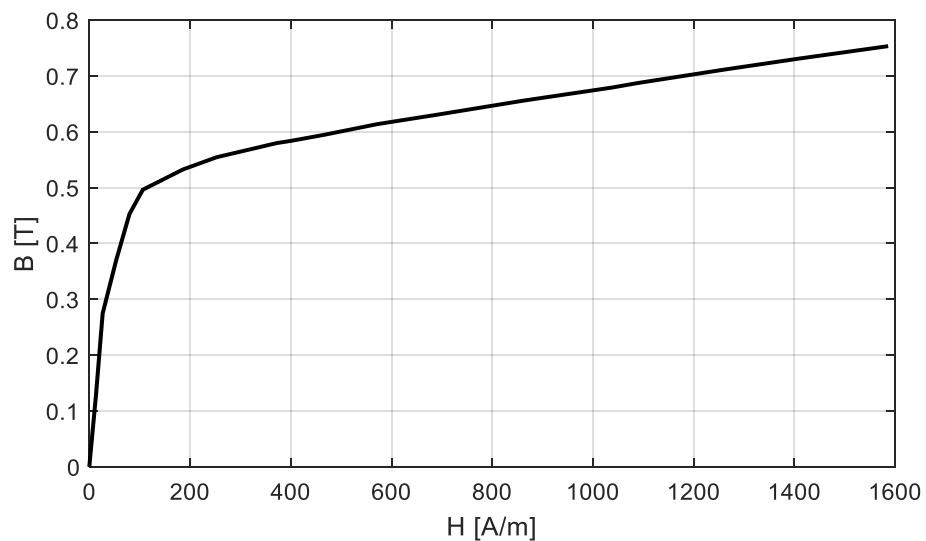


Figura 27 – Curva de magnetização do núcleo de material IP6
Fonte: Autoria própria.

4.5 FORMAS DE ONDA OBTIDAS NO ENSAIO EXPERIMENTAL E POR MEIO DA APLICAÇÃO DOS MODELOS

Serão apresentadas as formas de onda de tensão, corrente, e fluxo magnético obtidas das simulações dos algoritmos criados para os modelos apresentados na seção 2.8.2. Juntamente com as formas de onda provenientes das simulações, serão apresentadas também apresentados na seção 3.3, a fim de observar as formas de onda obtidas por meio dos ensaios experimentais se os resultados obtidos com os modelos foram satisfatórios. Primeiramente serão apresentados os resultados para o indutor com núcleo de ferrite IP12R e em seguida os resultados para o indutor com núcleo de ferrite IP6.

4.5.1 Formas de onda do indutor IP12R

No ensaio com o indutor IP12R, aplicou-se uma tensão de alimentação de 5,8 V eficazes. Como o valor de corrente que corresponde a parte saturada da curva do material IP12R, após o joelho da curva, é de 0,23 A, pela lei de ohm resulta-se em uma resistência de 25,23 Ω . Utilizou-se então um resistor de fio enrolado com tubo cerâmico no valor de 27,3 Ω , com potência de 10 W.

A Figura 28 ilustra as formas de ondas da tensão de alimentação (V_{IN}), da tensão no resistor (V_R) e da tensão no indutor (V_L), obtidas do ensaio experimental 3.3.

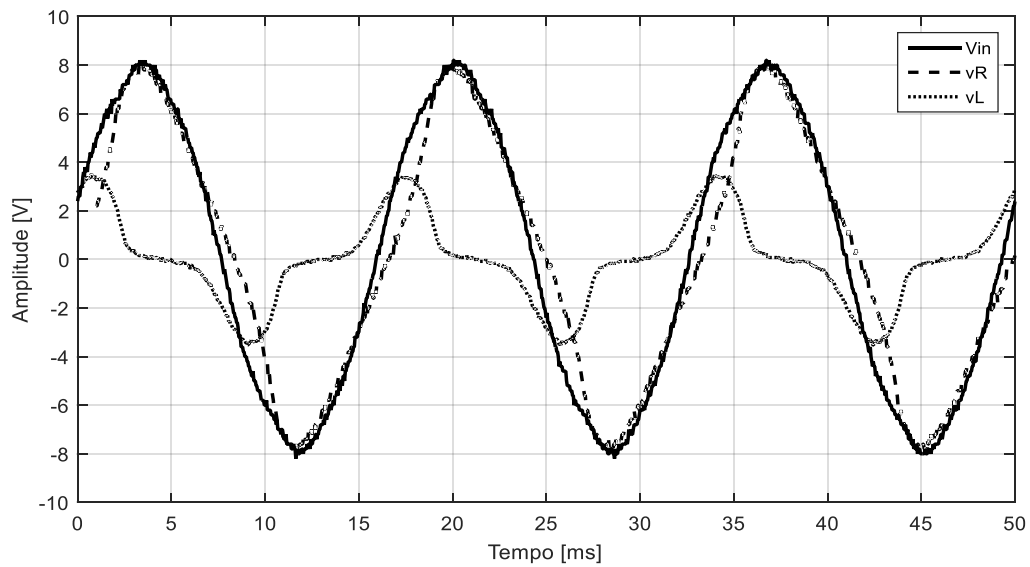


Figura 28 – Formas de onda obtidas do ensaio experimental para o indutor com núcleo IP12R.

Fonte: Autoria própria.

4.5.1.1 Modelo linearizado por segmentos

A Figura 29, ilustra as formas de onda da corrente experimental e simulada no indutor. A forma de onda simulada resultou da aplicação do modelo linearizado por segmentos e a experimental obteve-se indiretamente da forma de onda da tensão no resistor, pela aplicação da lei de Ohm $I=V/R$.

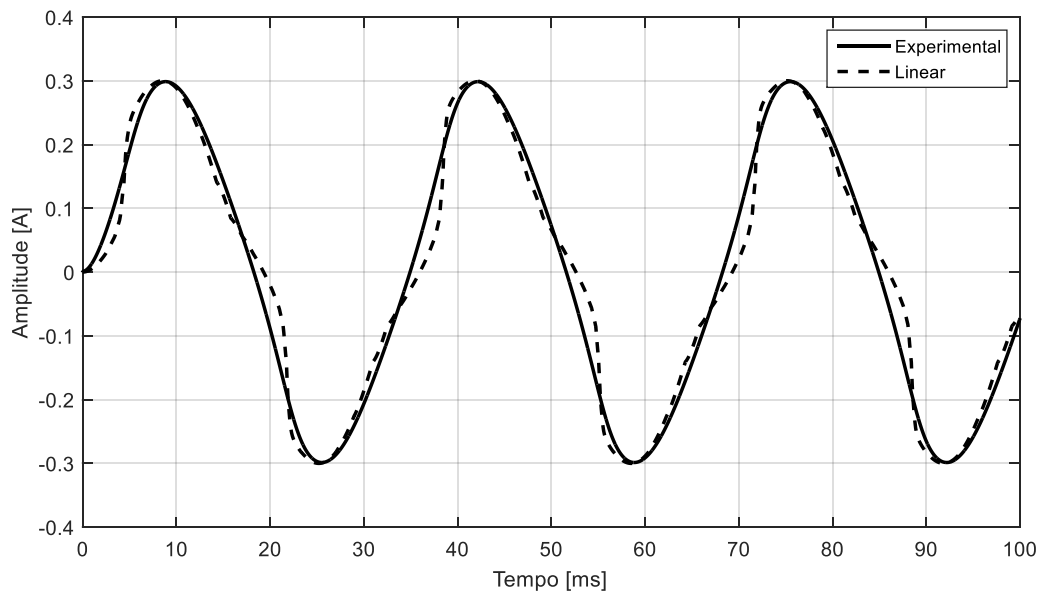


Figura 29 - Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo linearizado por segmentos para o núcleo IP12R.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 29, observa-se que a curva da corrente simulada segue a forma de onda da corrente obtida no ensaio experimental. As amplitudes máximas das formas de onda de corrente experimental e simulada são de 0,22988 A e 0,3002 A respectivamente. Na Figura 29 nota-se também que com o núcleo já saturado (ao redor de 20 ms) a tensão simulada no resistor diminui em relação ao valor experimental, produzindo um aumento na tensão no indutor, como pode ser visto na Figura 30.

A Figura 30, ilustra as formas de onda da tensão no indutor experimental e simulada. Em que a forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo linearizado por segmentos.

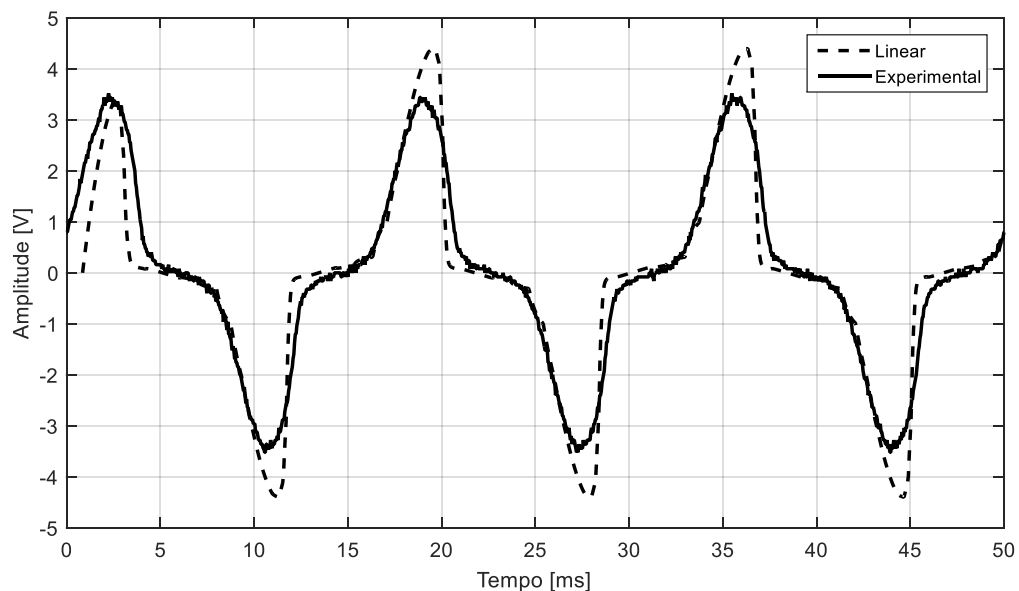


Figura 30 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo linearizado por segmentos para o núcleo IP12R
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 30, observa-se que as amplitudes máximas da forma de onda da tensão experimental e simulada são de 3,44 V e 4,39 V respectivamente.

A diferença entre os valores máximos de corrente resulta em um erro de 0,47% de amplitude e a diferença entre os valores máximos de tensão resulta em um erro de 21,77% de amplitude.

A Figura 31 relaciona a tensão de alimentação do circuito (V_{IN}) com as formas e onda da tensão no resistor (V_R) e no indutor (V_L), obtidas pelo modelo linearizado por segmentos.

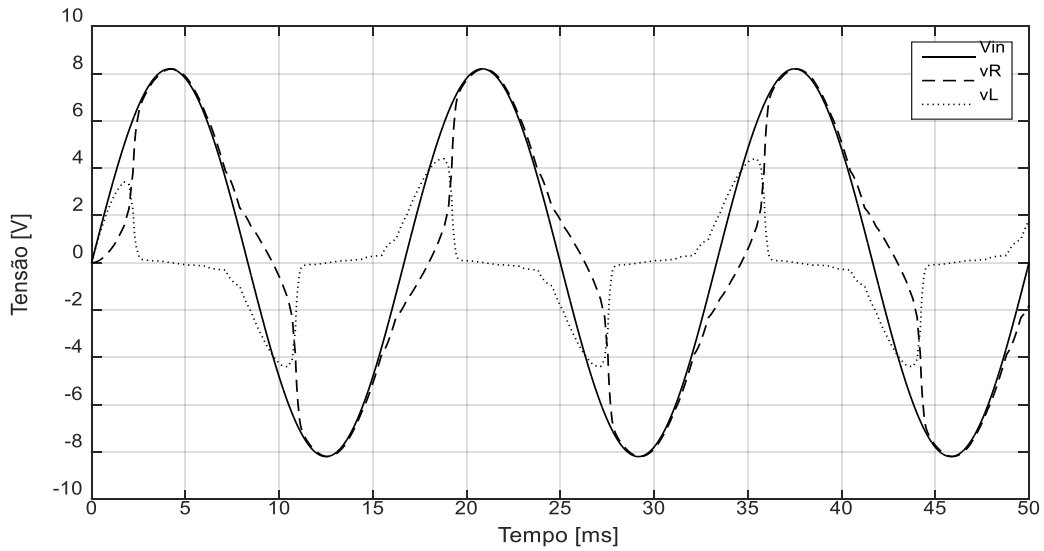


Figura 31 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo linearizado por segmentos.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 31, pode-se observar a deformação da forma de onda do indutor causada pela deformação da forma de onda da tensão no resistor para modelo linearizado por segmentos.

4.5.1.2 Modelo polinomial

A Figura 32, ilustra as formas de onda da corrente experimental e simulada, no indutor. A forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo polinomial.

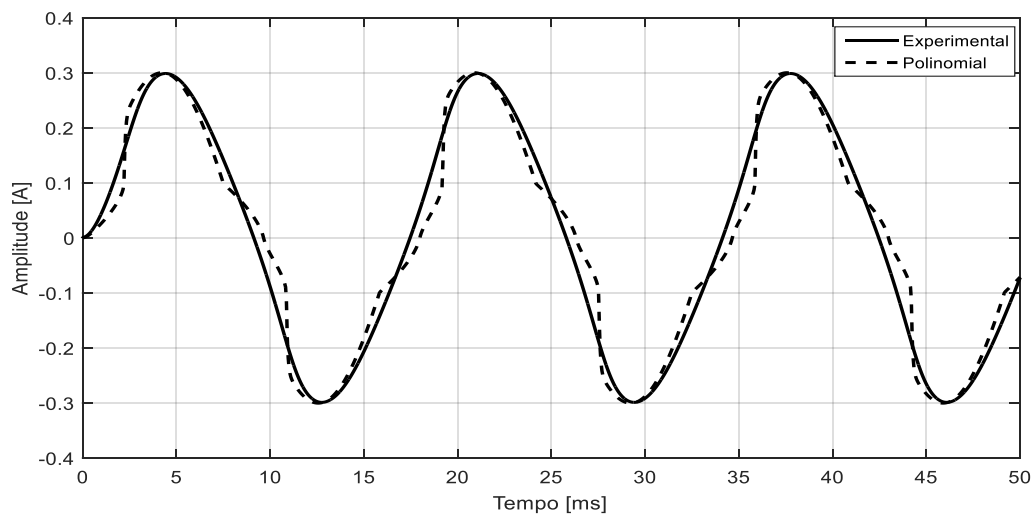


Figura 32 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo polinomial para o núcleo IP12R.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 32, observa-se que a curva da corrente simulada segue a forma de onda da corrente obtida no ensaio experimental. A amplitude máxima da forma de onda da corrente simulada é 0,3003 A. Por meio da Figura 32 observa-se também que próximo de 20 ms, há uma diminuição da tensão no resistor, superior em relação ao modelo linearizado por segmentos. Isto acontece com o núcleo já saturado.

A Figura 33, ilustra as formas de onda da tensão no indutor experimental e simulada, em que a simulada resulta da aplicação do modelo polinomial.

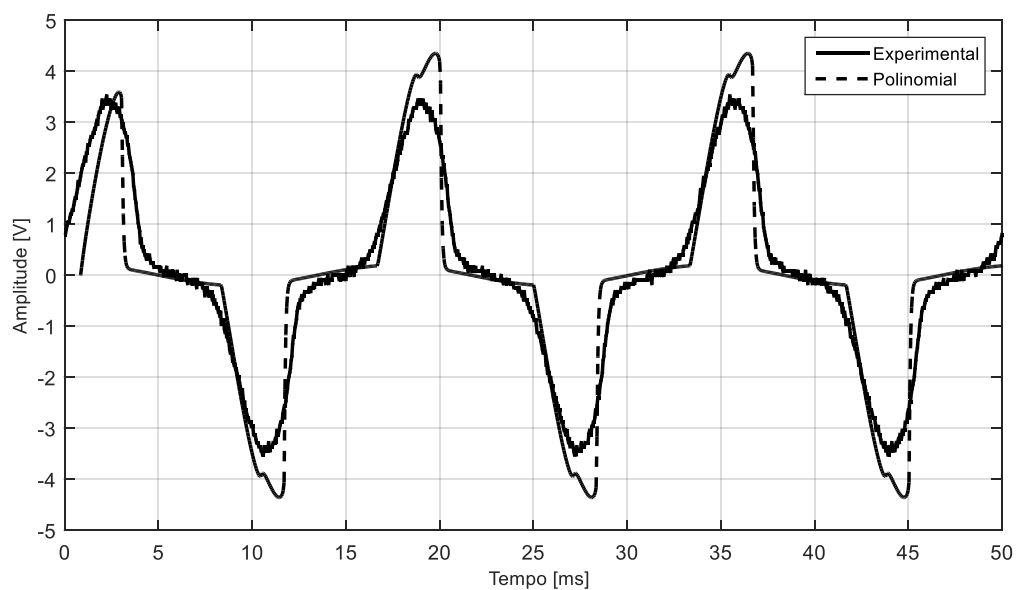


Figura 33 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo polinomial para o núcleo IP12R.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 mostra a tensão no indutor com uma amplitude de 4,36 V, que é maior que o valor da tensão obtida no ensaio experimental. O modelo polinomial é dependente da definição do valor do fluxo Φ_s e da corrente I_s para representar o início e o efeito da saturação, e como não tem uma metodologia específica para a escolha desses valores, isso pode ter prejudicado a resposta para esse modelo.

A diferença entre os valores máximos de corrente resulta em um erro de 0,50% de amplitude e a diferença entre os valores máximos de tensão resulta em um erro de 21,03% de amplitude.

A Figura 34, relaciona a tensão de alimentação do circuito (V_{IN}) com as formas e onda da tensão no resistor (V_R) e no indutor (V_L), obtidas pelo modelo polinomial.

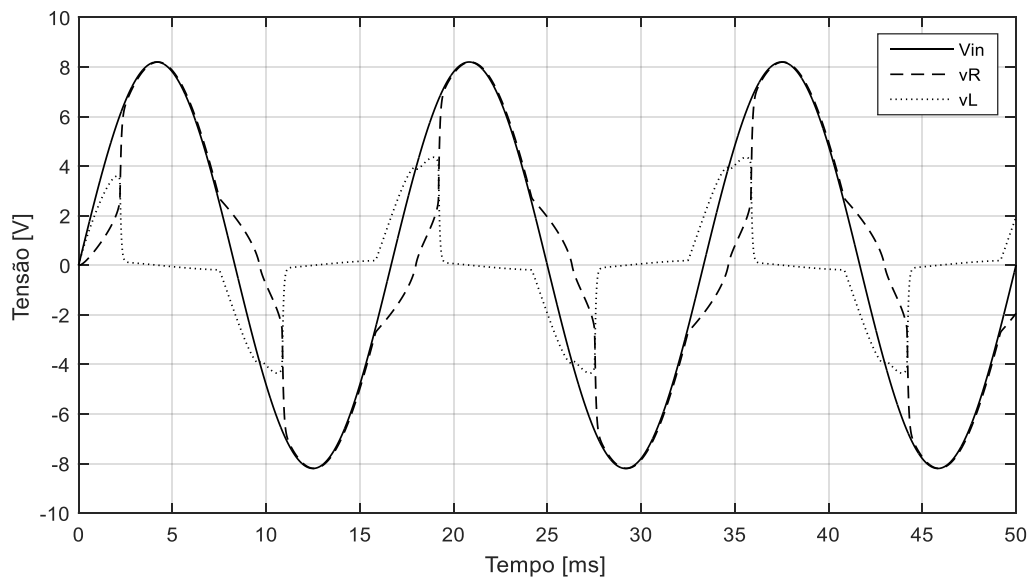


Figura 34 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo polinomial.
Fonte: Autoria própria.

4.5.1.3 Modelo hiperbólico

A Figura 35, ilustra as formas de onda da corrente experimental e simulada do indutor, em que a simulada resulta da aplicação do modelo hiperbólico.

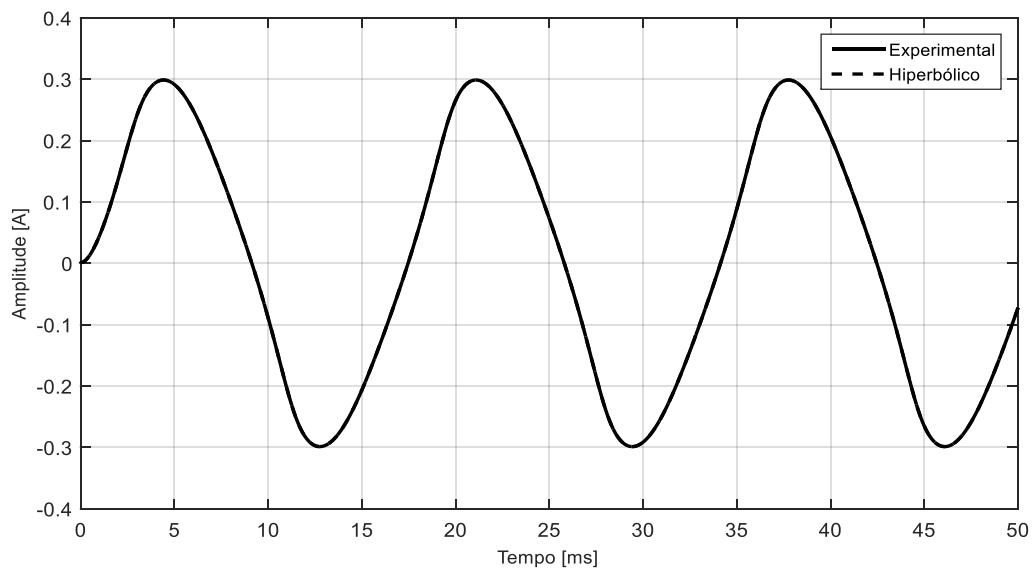


Figura 35 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo hiperbólico para o núcleo IP12R.
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 35, observa-se que a corrente simulada e experimental são coincidentes, sendo que o valor de amplitude máxima de corrente simulada é de 0,2988.

A Figura 36, ilustra as formas de onda da tensão no indutor experimental e simulada, em que a forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo hiperbólico.

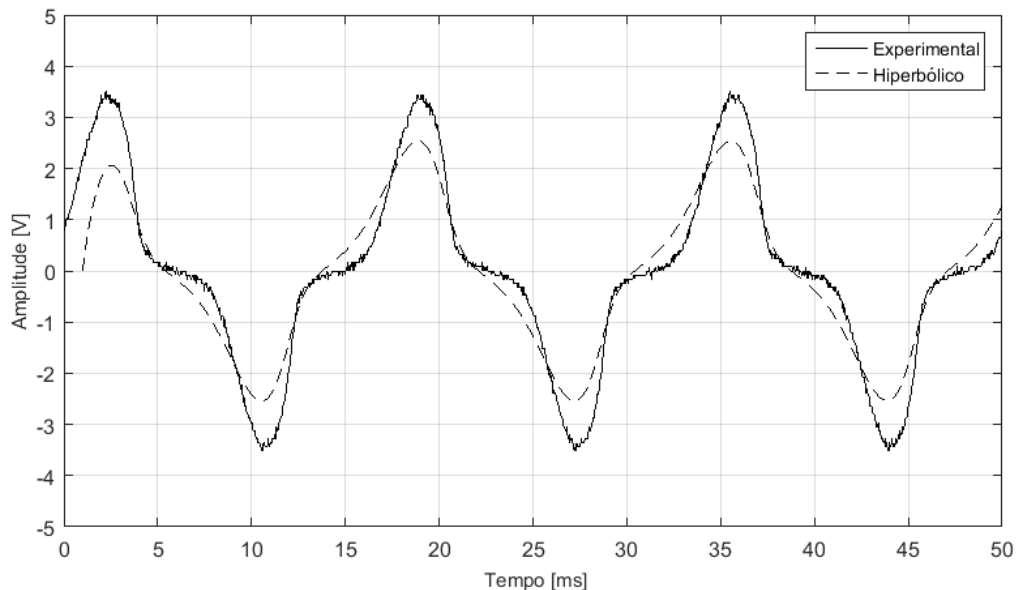


Figura 36 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo hiperbólico para o núcleo IP12R.
Fonte: Autoria própria.

Apesar das formas de onda de corrente serem coincidentes nesse modelo, ele não consegue representar o efeito da saturação na tensão do indutor (Figura 36). Este modelo apresenta bastante dificuldade na representação do comportamento do material saturado, pois somente utiliza a equação (31) e a curva resultante desta equação não consegue atingir os níveis de saturação da curva do material. Assim a curva da tensão difere da curva experimental.

A Figura 37 relaciona a tensão de alimentação do circuito (V_{IN}) com as formas e onda da tensão no resistor (V_R) e no indutor (V_L), obtidas do modelo hiperbólico.

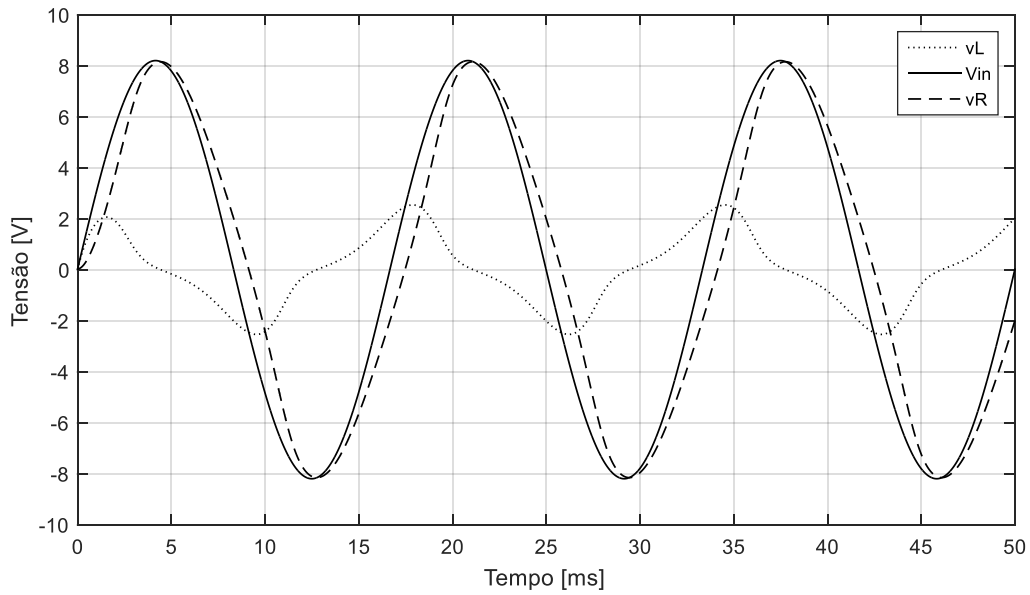


Figura 37 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo hiperbólico para o indutor IP12R.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 38, ilustra as formas de onda do fluxo magnéticos, dos modelos linear, polinomial e hiperbólico. Como foi comentado anteriormente, o fluxo obtido pelo modelo hiperbólico é o que mais se afasta do comportamento do núcleo saturado. O modelo linearizado por segmentos e o modelo polinomial representam melhor o efeito da saturação.

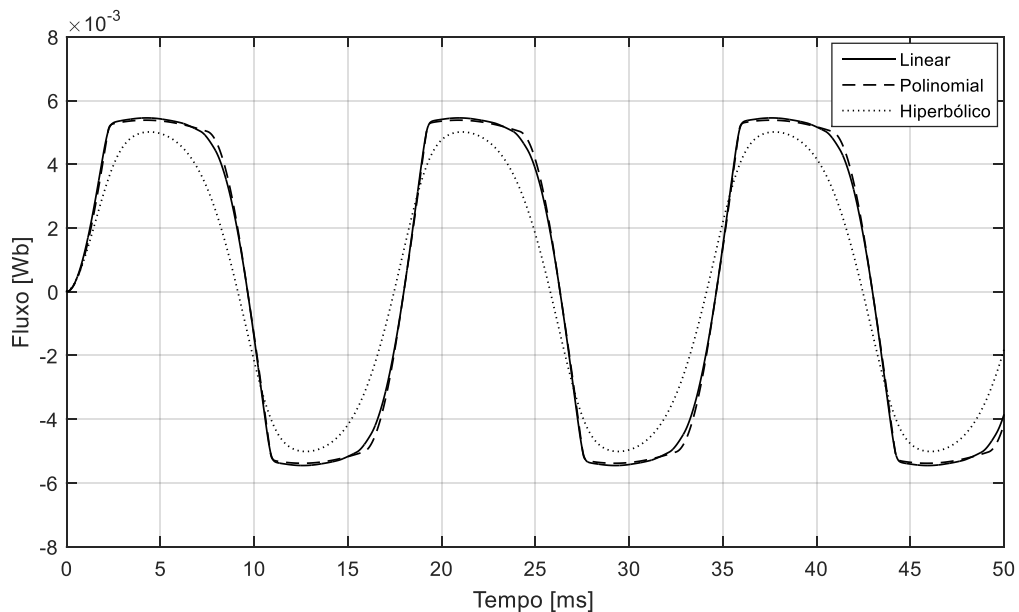


Figura 38 – Formas de onda do fluxo magnético do indutor IP12R dos modelos linear, polinomial e hiperbólico
Fonte: Autoria própria.

As formas de onda do fluxo magnético, para os modelos linearizado por segmentos e polinomial ficaram praticamente as mesmas, e para o modelo hiperbólico o erro máximo foi de 8,1% em relação ao linearizado por segmentos.

4.5.2 Formas de onda do indutor IP6

No ensaio com o indutor IP12R, aplicou-se uma tensão de alimentação de 5,65 V eficazes. Como o valor de corrente que corresponde a parte saturada da curva do material IP12R, após o joelho da curva, é de 0,19 A, pela lei de ohm resulta-se em uma resistência de 29,73 Ω . Utilizou-se também um resistor de fio enrolado com tubo cerâmico no valor de 27,3 Ω , com potência de 10 W.

A Figura 39, ilustra as formas de ondas da tensão de alimentação (V_{IN}), da tensão no resistor (V_R) e da tensão no indutor (V_L), obtidas do ensaio experimental 3.3, ensaio para obter as formas de onda de tensão e corrente dos indutores. Para este ensaio foi inserida uma tensão de alimentação de 8 V de pico.

O material IP6 apresenta saturação mais intensa a que no caso no núcleo da material IP12R, do item anterior. Isto se reflete nas formas de onda da tensão no indutor obtidas com os modelos estudados. Com maior saturação eles apresentam mais dificuldades em representar a saturação neste caso.

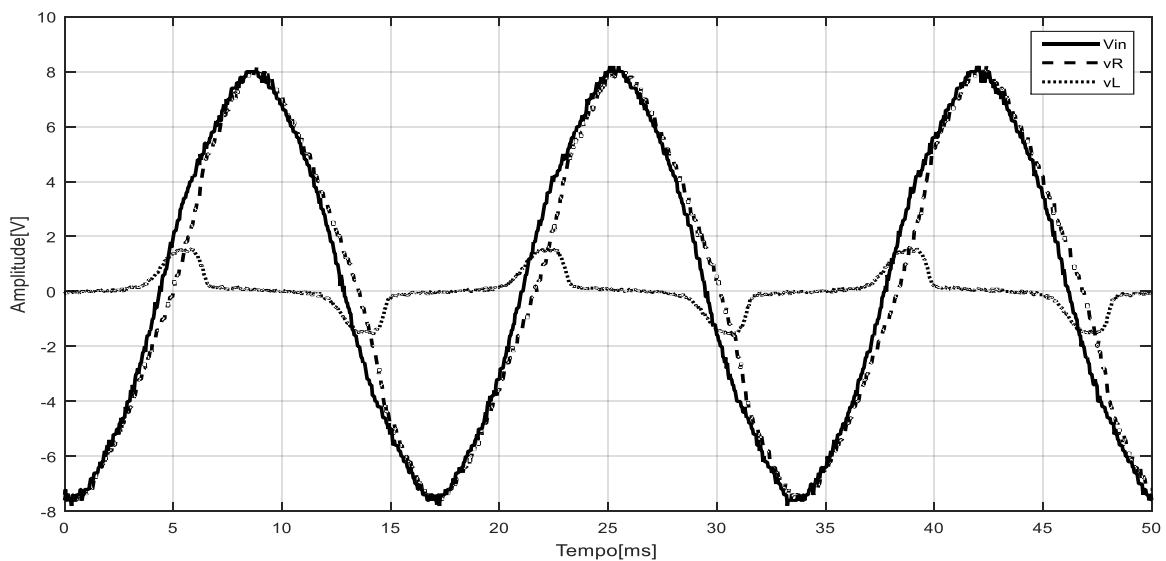


Figura 39 – Formas de onda obtidas do ensaio experimental para o indutor com núcleo IP6.

Fonte: Autoria própria.

4.5.2.1 Modelo linearizado por segmentos

A Figura 40, ilustra as formas de onda da corrente no indutor experimental e simulada. Em que a forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo linearizado por segmentos.

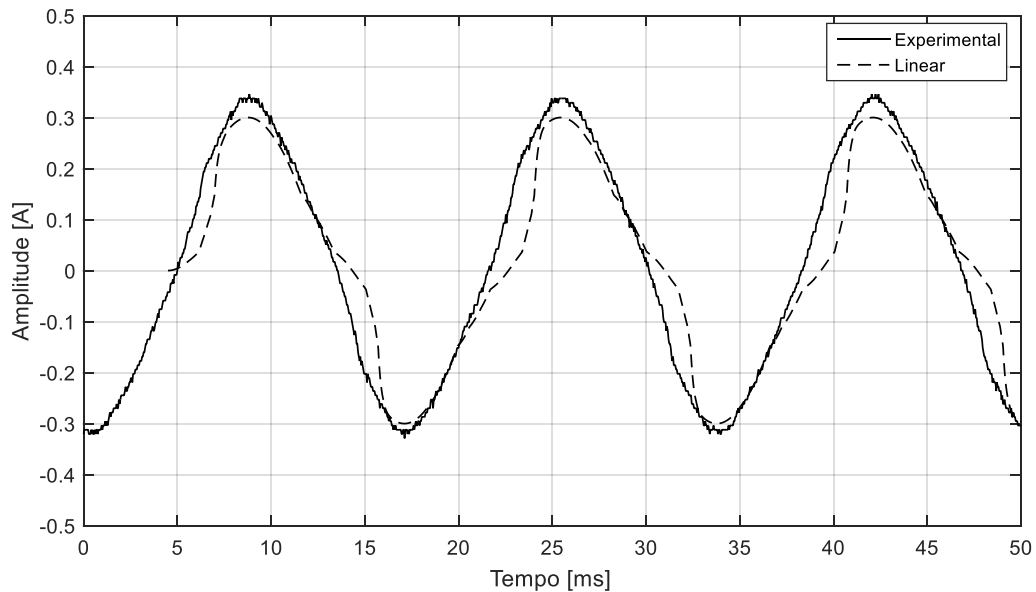


Figura 40 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo linearizado por segmentos para o núcleo IP6.
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 40, observa-se que a curva da corrente simulada segue a forma de onda da corrente obtida no ensaio experimental. As amplitudes máximas das formas de onda de corrente experimental e simulada são de 0,3376 A e 0,3001 A respectivamente.

A Figura 41, ilustra as formas de onda da tensão no indutor experimental e simulada. Em que a forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo linearizado por segmentos.

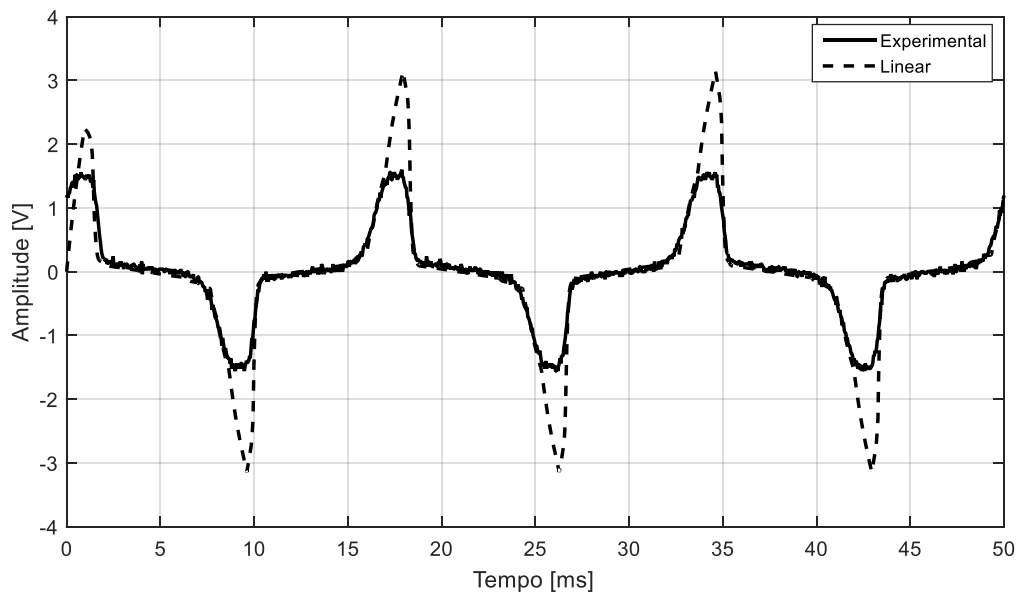


Figura 41 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo linearizado por segmentos para o núcleo IP6.
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 41, observa-se que as amplitudes máximas da forma de onda da tensão experimental e simulada são de 1,56 V e 3,14 V respectivamente.

A diferença entre os valores máximos de corrente resulta em um erro de 13,29% de amplitude e a diferença entre os valores máximos de tensão resulta em um erro de 50,32% de amplitude.

A Figura 42 relaciona a tensão de alimentação do circuito (V_{IN}) com as formas e onda da tensão no resistor (V_R) e no indutor (V_L), obtidas do modelo linearizado por segmentos para o indutor.

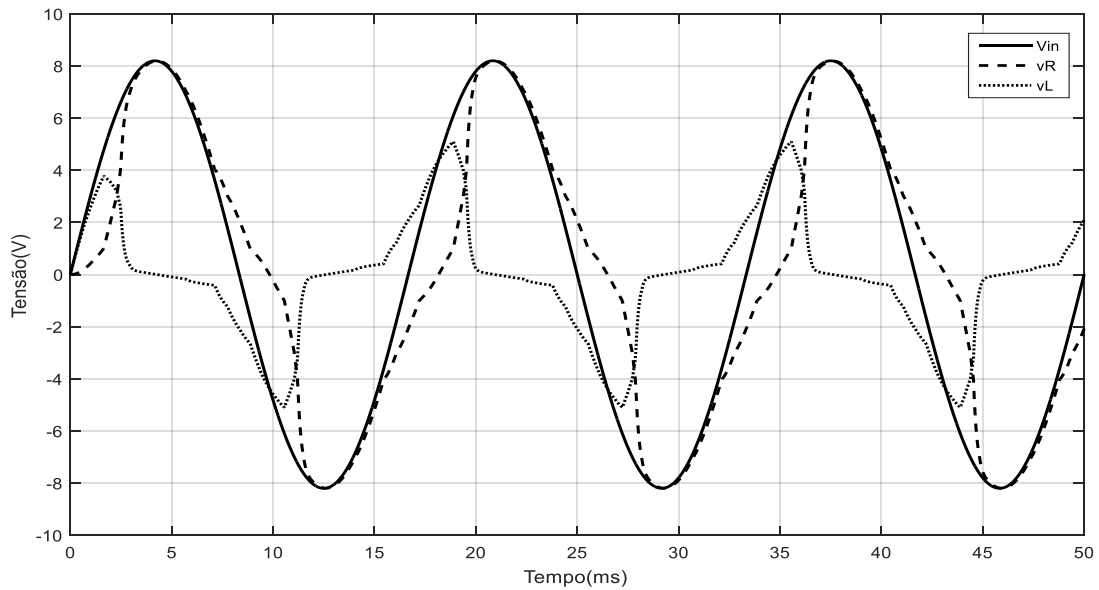


Figura 42 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo linearizado por segmentos para o indutor IP6.
Fonte: Autoria própria.

4.5.2.2 Modelo polinomial

A Figura 43, ilustra as formas de onda da corrente no indutor experimental e simulada. Em que a forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo polinomial.

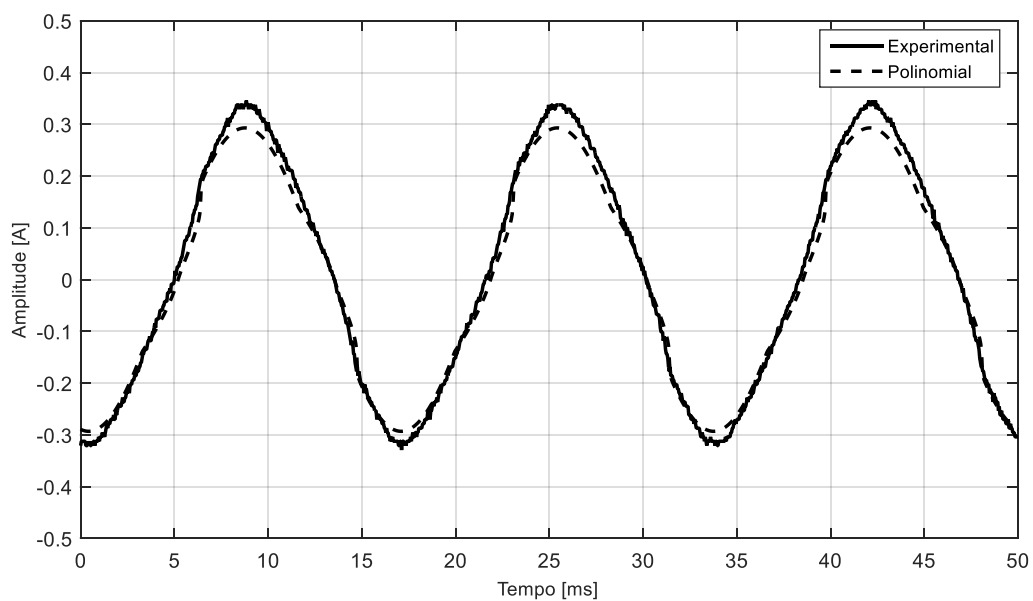


Figura 43 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo polinomial para o núcleo IP6.
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 43Figura 32Figura 29, observa-se que a curva da corrente simulada segue a forma de onda da corrente obtida no ensaio experimental. A amplitude máxima da forma de onda da corrente simulada é 0,2929 A.

A Figura 44, ilustra as formas de onda da tensão no indutor experimental e simulada. Em que a forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo polinomial.

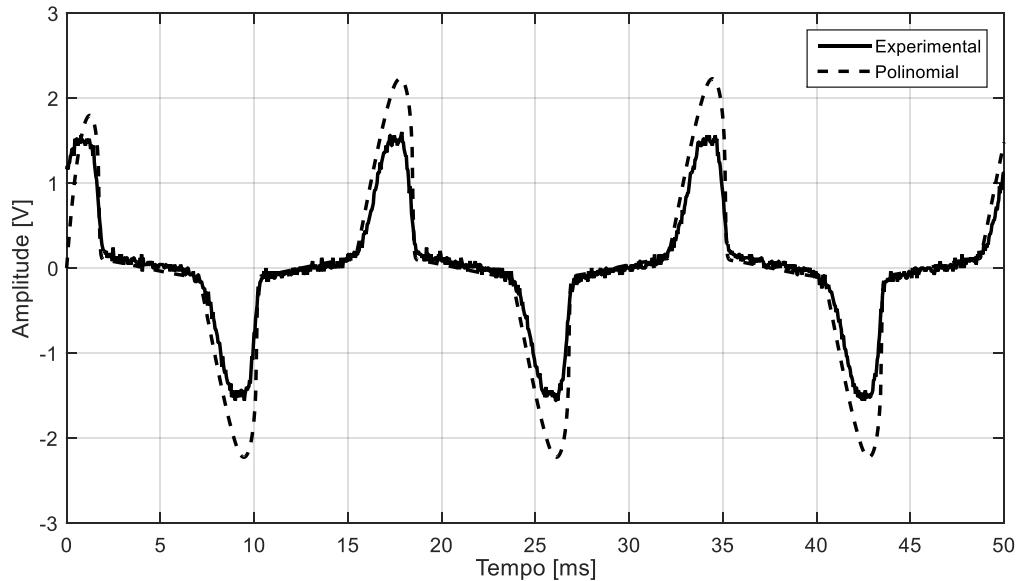


Figura 44 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo polinomial para o núcleo IP6.
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 44, observa-se que as amplitudes máxima da forma de onda da tensão simulada é de 2,22 V.

A diferença entre os valores máximos de corrente resulta em um erro de 13,21% de amplitude e a diferença entre os valores máximos de tensão resulta em um erro de 29,95% de amplitude.

A Figura 45 relaciona a tensão de alimentação do circuito (V_{IN}) com as formas e onda da tensão no resistor (V_R) e no indutor (V_L), obtidas do modelo hiperbólico.

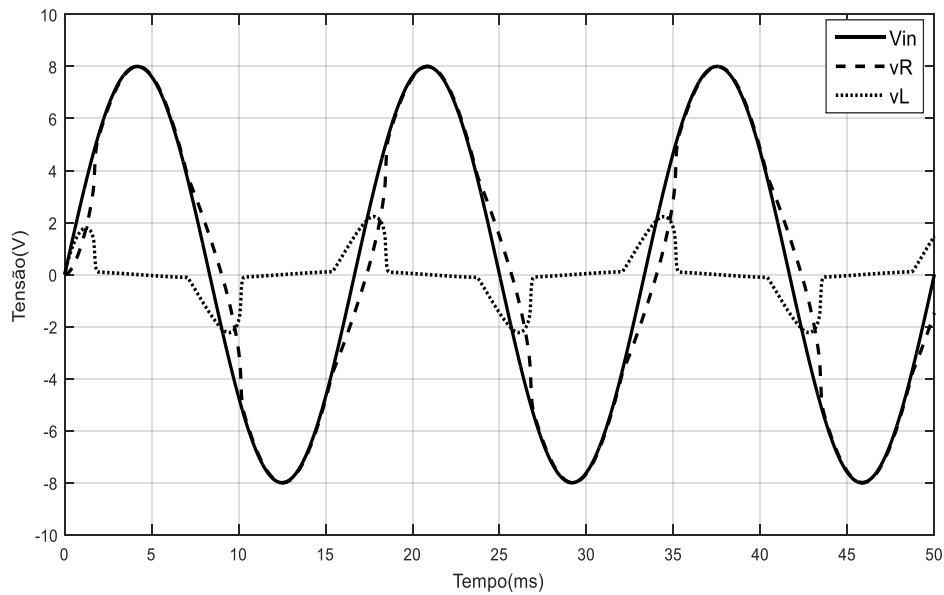


Figura 45 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo polinomial para o indutor IP6.
Fonte: Autoria própria.

4.5.2.3 Modelo hiperbólico

A Figura 46, ilustra as formas de onda da corrente no indutor experimental e simulada. Em que a forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo hiperbólico.

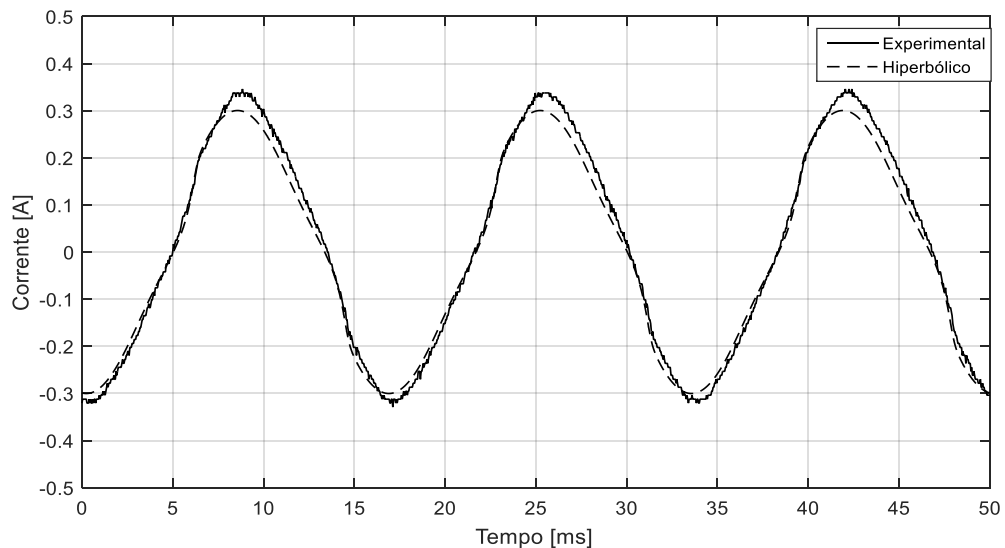


Figura 46 – Formas de onda da corrente experimental e obtida pelo modelo hiperbólico para o núcleo IP6.
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 46Figura 35, observa-se que a corrente simulada apresenta deformações em relação à experimental e o valor de amplitude máxima de corrente simulada é de 0,3003.

A Figura 47, ilustra as formas de onda da tensão no indutor experimental e simulada. Em que a forma de onda simulada resulta da aplicação do modelo hiperbólico.

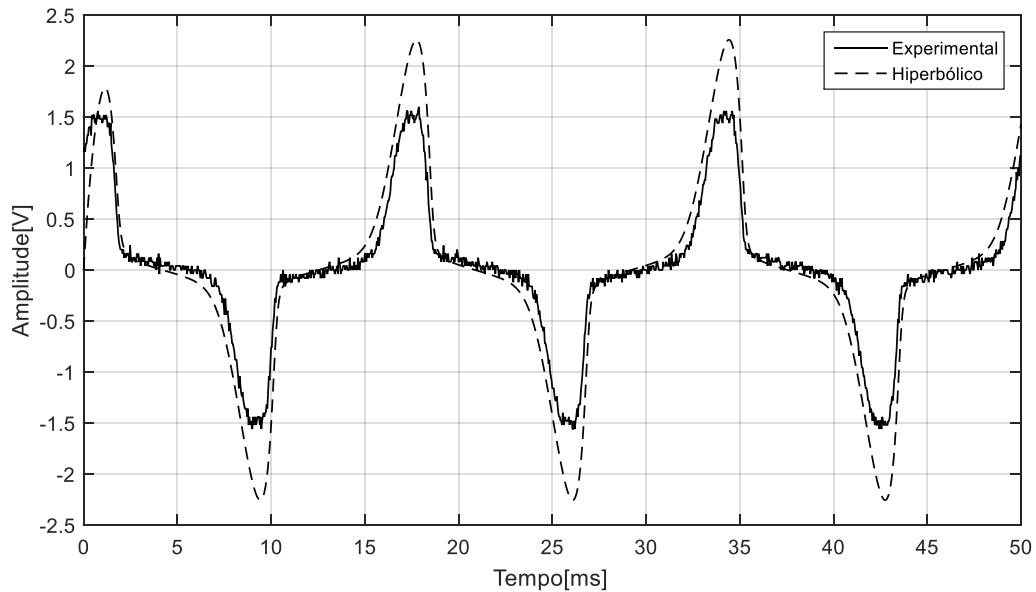


Figura 47 – Formas de onda da tensão no indutor experimental e obtida pelo modelo hiperbólico para o núcleo IP6.

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 47 observa-se que o valor máximo da amplitude de tensão para o modelo é de 2,246 V. A diferença entre os valores máximos de corrente resulta em um erro de 11,05% de amplitude e a diferença entre os valores máximos de tensão resulta em um erro de 30,63% de amplitude.

A Figura 48, relaciona a tensão de alimentação do circuito (V_{IN}) com as formas e onda da tensão no resistor (V_R) e no indutor (V_L), obtidas do modelo hiperbólico.

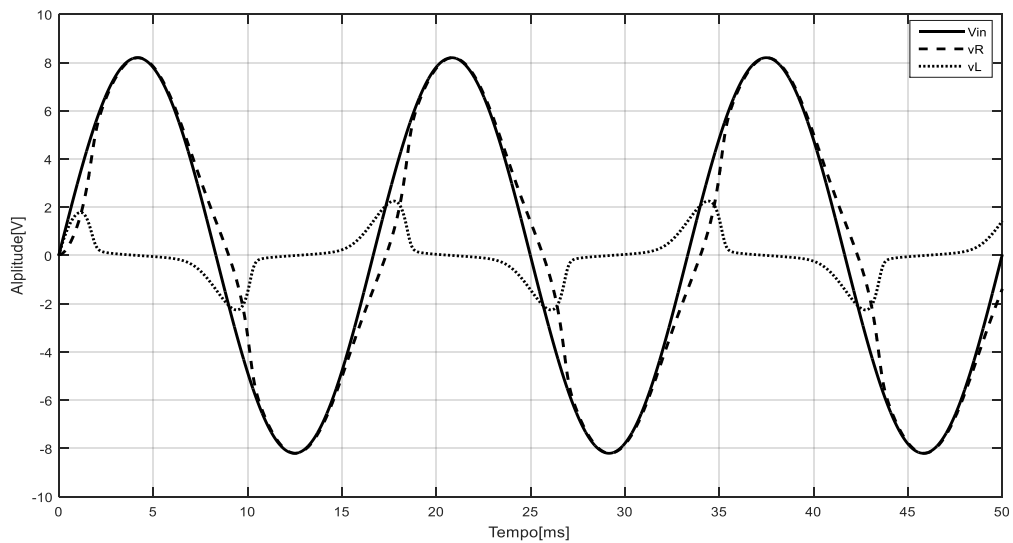


Figura 48 – Relação entre as formas de onda das tensões resultantes do modelo hiperbólico para o indutor IP6.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 49, ilustra as formas de onda do fluxo magnético, dos modelos linear, polinomial e hiperbólico, para o indutor IP6.

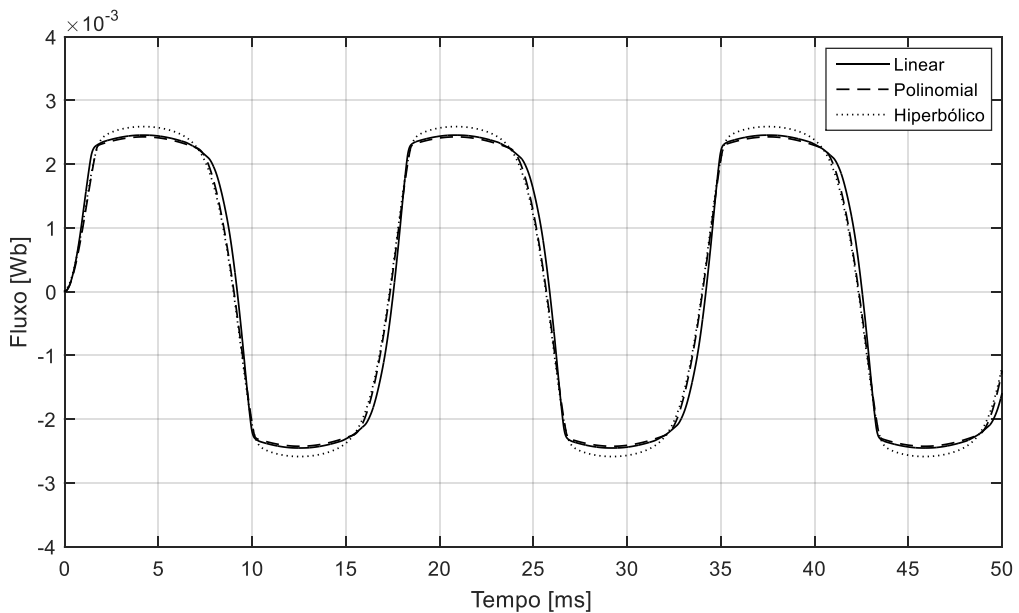


Figura 49 – Formas de onda do fluxo magnético do indutor IP6 dos modelos linear, polinomial e hiperbólico.

Fonte: Autoria própria.

Os algoritmos utilizados para obtenção dos resultados apresentados nesse trabalho encontram-se no ANEXO A.

5 CONCLUSÕES

Desenvolveram-se três algoritmos para três modelos de curvas, os modelos: linear, polinomial e hiperbólico. Com a aplicação desses três algoritmos no programa de simulação Matlab® foi possível observar o comportamento de dois dispositivos eletromagnéticos, um com núcleo de ferrite IP12R e o outro com núcleo IP6. Por meio das formas de onda obtidas pelos ensaios experimentais, com os dois indutores mencionados, observou-se que os modelos representaram os indutores próximos de seu comportamento real. No algoritmo desenvolvido utilizou-se o método numérico de Euler para a resolução das equações diferenciais.

Analisando os resultados, para o indutor com núcleo IP12R, os modelos linearizado por segmentos e o polinomial conseguiram representar o comportamento das formas de onda da corrente próximo do comportamento real. Apesar das amplitudes das correntes terem ficado praticamente as mesmas nesses dois modelos, o mesmo não ocorreu com as formas de onda da tensão no indutor, pois as formas de onda da corrente apresentaram deformações, fazendo com que as formas de onda da tensão não conseguissem alcançar a amplitude correta, esses fenômenos podem ser vistos nas: Figura 31 e Figura 34, que ilustram a relação entre as formas de onda das tensões resultantes para o modelo linearizado por segmentos e polinomial. Além disso, na simulação a saturação do núcleo da tensão do resistor diminui, conseqüentemente aumenta-se o valor da amplitude da tensão no indutor, proporcionando maior diferença entre as amplitudes do experimento e da simulação para a tensão no indutor.

A forma de onda da corrente no modelo hiperbólico não apresentou erro significativo na amplitude em relação à experimental e nem deformações, na Figura 35 as duas formas de onda ficaram sobrepostas. Mas como a curva característica do modelo é suave e neste modelo não é usado o valor de I_s , ela apresenta formas de ondas também suaves. Como já mencionado nos resultados esse modelo apresenta dificuldade na representação da tensão no indutor saturado ocasionando em uma amplitude na forma de onda da tensão do indutor menor que a forma de onda real do indutor. A origem desse fenômeno está ilustrada na Figura 37.

Para o caso da forma de onda do fluxo magnético, para os modelos linear e polinomial as amplitudes ficaram praticamente as mesmas e ambos conseguiram

representar o fluxo magnético saturado, já o modelo hiperbólico não conseguiu representar a saturação na forma de onda do fluxo. O projeto do indutor depende da corrente e do fluxo magnético, entre outras variáveis, que indicam o nível de saturação, e os modelos matemáticos apresentados conseguem acompanhar de forma parcialmente satisfatória.

Para o indutor com núcleo IP6, as formas de onda da corrente nos modelos linearizados por segmentos, polinomial e hiperbólico apresentaram deformações em relação a forma de onda da corrente experimental. Como a saturação do IP6 é mais elevada e houve dificuldade pelos modelos em representar a saturação, as formas de onda da tensão ficaram com erros maiores, não conseguiram representar de forma satisfatória o comportamento real do indutor.

Para o caso da forma de onda do fluxo magnético, para os modelos linear e polinomial as amplitudes ficaram praticamente as mesmas e conseguiram representar melhor a saturação em relação ao modelo hiperbólico.

Nota-se que o modelo hiperbólico foi o que apresentou melhores resultados para a corrente para os dois indutores, visto que, os erros na forma de onda da corrente foram menores, mas esse modelo teve desempenho inferior em relação aos demais modelos na representação da tensão no indutor, do fluxo magnético e saturação. Para a tensão do indutor o modelo polinomial foi o que teve diferenças menores entre as formas de onda experimental e simulada.

Pelos resultados obtidos, e considerando os níveis de saturação impostos, faz-se conveniente um estudo destes modelos matemáticos trabalhando no início da saturação, sem levar os núcleos a uma saturação acentuada, para observar e verificar se as respostas dos modelos melhorariam nessas condições, isto poderá ser feito num trabalho futuro.

Em trabalhos futuros pode-se utilizar os dados experimentais da curva de magnetização para obter uma função matemática aproximada que represente o comportamento do material, utilizar redes neurais artificiais para aproximar uma função para a curva de magnetização a partir dos dados experimentais e estudar os benefícios de indutores saturados em conversores.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Mathew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

BARBI, Ivo. **Projeto de Fontes Chaveadas**. 2ª. ed. Florianópolis: UFSC, 2007.

BARBOSA, Giancarlos C. **Projeto de um Transformador utilizado em uma Planta de Plasma**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: UFRN, 2012.

BARILI, Antonio et al. A Simulation Model for the Saturable Reactor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** , p. 301-304, 1988.

BASTOS, João P. A. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase estática**. 3ª. ed. Florianópolis: UFSC, 2012.

BOYLSTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 10ª. ed. São Paulo: Pearson , v. Único, 2010.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª. ed. New York: Mc Fraw Hill, v. Único, 2012.

CULLITY, B D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. ed. New Jersey: IEEE Press, v. Único, 2009.

DPI - INPE. **Processamento de Imagens**. 2011. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/sensore/sensore.htm>>. Acesso em: 1 Agosto 2016.

ELECTRÔNICA, 2016. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/leis-de-faraday>>. Acesso em: 25 Outubro 2016.

EPUSP. **Laboratório Didático de Eletricidade e Eletrônica Básicas para o Curso de Engenharia Elétrica da EPUSP**. 1996. 99 - USP. São Paulo, 1996. Disponível em: <<http://autosom.net/artigos/INDUTORES.pdf>>. Acesso em: 13 Agosto 2016.

FITZGERALD, Arthur E.; KINGSLEY, Charles J.; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas com Introdução a Eletrônica de Potência**. 6ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HAYT, Jr. W. H. H.; BUCK, John A. **Eletromagnetismo**. 8ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

LEITHOLD, Louis. **O Cálculo com Geometria Analítica**. 3ª. ed. São Paulo: HABRA, v. I, 1994.

MARTINS, Denizar ; TORTELLI, Odilon L. Model of Nonlinear Inductors Applied Numerical Simulation of Static Converters. **Brazilian Power Electronics Conference**, Florianópolis, n. SOBRAEP/UFSC, Dezembro 1991.

ORTIZ, Jorge L. R. **Projeto de Tese de Doutorado: Análise e Otimização de Indutores Não Lineares Utilizando o Método dos Elementos Finitos na Simulação de Dispositivos Eletromagnéticos Acoplados a Conversores Estáticos com Malha de Controle**. UFSC, Florianópolis, 2000.

ORTIZ, Jorge L. R. **Método de Elementos Finitos na Simulação de Dispositivos Eletromagnéticos Acoplados a Conversores Estáticos com Laço de Controle**. UFSC. Florianópolis: 2002. 133 p.

ORTIZ, Jorge L. R.; MENDES, Filomena B. R. **Apostila de Máquinas 1**. Pato Branco: UTFPR, 2011.

ORTIZ, Jorge R. et al. Acoplamento de Conversores Estáticos com Malha de Controle e Dispositivos Eletromagnéticos Não-Lineares. **Revista Controle & Automação**, v. 13, p. 79, Janeiro, Fevereiro, Março e Abril 2002.

QUADROS, Régis S. D.; BORTOLI, Álvaro L. D. **Fundamentos de Cálculo Numérico para Engenheiros**. Porto Alegre: 2009.

SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos Materiais**. 6ª. ed. São Paulo: Pearson Education Brasil, v. Único, 2008.

THORNTON, Eletrônica L. **Catálogo de Ferrite**. Disponível em: <www.thornton.com.br>.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. 13ª reimpressão. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, v. Único, 2000.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III - Eletromagnetismo**. 12ª. ed. São Paulo: Pearson, v. III, 2009.

ANEXO A – ALGORÍTMOS

```

%% MODELO LINEARIZADO POR SEGMENTOS %%

%% Declaração de Variáveis do Indutor

% Dados do circuito
L = 17e-3;           % Indutância
N = 70;             % Numero de espiras
R = 27.3;           % Resistência

% Geometria do núcleo
A = 181*1e-6;       % Área transversal do núcleo
l = 0.097;          % Comprimento médio do núcleo ferromagnético

%%
t = 0;
dt = 1e-6;
tempo = 100e-3;
n = round(tempo/dt);
i = zeros(1,n+1);
V = zeros(1,n+1);
H = zeros(1,n+1);
B = zeros(1,n+1);
f = zeros(1,n+1);
vR = zeros(1,n+1);
vL = zeros(1,n+1);
t = zeros(1,n+1);
j1 = 0;

%% Calcular equações
equations = equacao_reta();
%      1      2      3      4
% |-----|-----|-----|-----|
%      a      b      limite      limite
%                      inferior      superior

%% Calculo do Fluxo
recalc = 0;
for j=2:n+1;

    for k = 1:60
        if B(j-1)>=0
            if B(j-1)< equations(k,4) && B(j-1)>=equations(k,3)
                j1=k;
                break
            end
        elseif B(j-1)<0
            if B(j-1)>equations(k,4) && B(j-1)<equations(k,3)
                j1=k;
                break
            end
        end
    end
end

a = equations(j1,1); % a recebe a primeira coluna da matriz
equations

```

```

b = equations(j1,2);      % b recebe a segunda coluna da matriz equations

t(j) = t(j-1) + dt;

V(j) = 8.2*(sin(2*pi*60*t(j)));

i(j) = (V(j) + (i(j-1)*N^2*a*A)/(l*dt))/(R+(N^2*a*A)/(l*dt));

H(j) = (N*i(j))/l;

B(j) = a*H(j) + b;

f(j) = N*B(j)*A;

vR(j) = i(j)*R;

vL(j) = V(j) - vR(j);

if B(j)>= 0 && j1 >= 31
    if B(j) > equations(k,4) && B(j) < equations(k,3)
        dt = dt/2;
        j = j-1;
        recalc = 1;
    end
elseif B(j) < 0 && j1 < 31
    if B(j) < equations(k,4) && B(j) > equations(k,3)
        dt = dt/2;
        j = j-1;
        recalc = 1;
    end
end

if recalc == 1
    recalc = 0;
else
    dt = 1e-6;
end

end

%% RESULTADOS
t=(0:dt:tempo)*1000;

figure
plot(t,V);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
title('Tensão Aplicada (modelo linear)');
grid on;

figure
plot(t,i);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');
title('Corrente (modelo linear)');
grid on;

figure

```

```

plot(t,f)
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Fluxo');
title('Fluxo')
grid on;

figure
plot(t,vR);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
title('tensão resistor(modelo linear)');
grid on

figure
plot(t,vL);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
title('tensão no indutor(modelo linear)')
grid on

%% MODELO POLINOMIAL %%

%% Declaração de Variáveis do Indutor

% Dados do circuito
L = 17e-3;           % Indutância
N = 70;             % Numero de espiras
R = 27.3;           % Resistência

% Dados do Nucleo
uo = 2.8316e-3;     % permeabilidade da região não saturada
us = 193.23e-6;     % permeabilidade da região saturada
A = 181*1e-6;       % Área transversal do núcleo
l = 0.097;          % Comprimento médio do núcleo ferromagnético

% Dados método polinomial
Lo = 25.87e-3;
Ls = 1.76e-3;
Is = 0.1;
FIs = 5.03e-3;
a1 = Lo;
a2 = ((3*FIs)/(Is^2)) - ((2*Lo + Ls)/Is);
a3 = ((Ls + Lo)/(Is^2)) - ((2*FIs)/(Is^3));

dt = 1e-6;
tempo = 100e-3;
n = round(tempo/dt);
cont = 0;
f_offset = 0;
%% Calculo Corrente

t = zeros(1,n);
I = zeros(1,n);
V = zeros(1,n);
F = zeros(1,n);
L = zeros(1,n);
B = zeros(1,n);
H = zeros(1,n);
vR = zeros(1,n);
vL = zeros(1,n);

```

```

recalc = 0;

for i=2:n

t(i) = t(i-1) + dt;

V(i) = 8.2*sin(2*pi*60*t(i));

I(i)=(V(i)+L(i-1)*I(i-1)/dt)/(R+L(i-1)/dt);

    if I(i)>= 0
        if 0 <= I(i) && I(i) < Is
            F(i) = a1*I(i) + a2*I(i)^2 + a3*I(i)^3;
        elseif I(i) >= Is
            F(i) = FIs + Ls*(I(i)-Is);
        end

        if 0 <= I(i) && I(i) < Is
            L(i) = a1 + 2*a2*abs(I(i)) + 3*a3*I(i)^2;
        elseif I(i) >= Is
            L(i) = Ls;
        end

    elseif I(i) < 0

        if 0 <= abs(I(i)) && abs(I(i)) < Is
            F(i) = -(a1*abs(I(i)) + a2*abs(I(i))^2 + a3*abs(I(i))^3);
        elseif abs(I(i)) >= Is
            F(i) = -(FIs + Ls*(abs(I(i))-Is));
        end

        if 0 <= abs(I(i)) && abs(I(i)) < Is
            L(i) = a1 + 2*a2*abs(I(i)) + 3*a3*abs(I(i))^2;
        elseif abs(I(i)) >= abs(Is)
            L(i) = Ls;
        end

    end

    B(i) = F(i)/A;
    H(i) = N*I(i)/l;
    vR(i) = I(i)*R;
    vL(i)=L(i)*(I(i)-I(i-1))/dt;
end

%% RESULTADOS
t=(dt:0.001e-3:tempo)*1000;

figure
plot(t,V);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
title('Tensão Aplicada (modelo polinomial)');
grid on;

figure
plot(t,I);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');

```

```

title('Corrente(modelo polinomial)');
grid on;

figure
plot(t,F);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Fluxo (Wb)');
title('Fluxo');
grid on;

figure
plot(t,vR);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
title('Tensão Resistor(modelo polinomial)');
grid on

plot(t,vL);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
title('Tensao Indutor(modelo polinomial)');
grid on;

%% MODELO HIPERBÓLICO %%

%% Declaração de Variáveis do Indutor
% Dados da circuito
L = 17e-3;           % Indutância
N = 70;             % Numero de espiras
R = 27.3;           % Resistência

% Dados do Núcleo
A = 181*1e-6;       % Área transversal do núcleo
l = 0.097;          % Comprimento médio do núcleo ferromagnético

% Dados método hiperbólico
Lo = 25.87e-3;
Ls = 1.76e-3;
FIs = 5.03e-3;

%%
t = 0;               % valor inicial pra variável t
dt = 0.01e-3;       % Passo do cálculo
tempo = 100e-3;     % tempo de simulação
n = tempo/dt;        % número de pontos
I = zeros(1,n+1);
V = zeros(1,n+1);
F = zeros(1,n+1);
L = zeros(1,n+1);
vL=zeros(1,n+1);
vR=zeros(1,n+1);
Il= zeros(1,n+1);
tt(1)=0;
i=2;

for n=0.0:dt:tempo
t = dt + t;

V(i) = 8.2*sin(2*pi*60*t);

```

```

I(i)=(V(i)+L(i-1)*I(i-1)/dt)/((R+L(i-1)/dt));

F(i)=Ls*I(i)+FIs*tanh((Lo-Ls)*I(i)/FIs);
L(i)=Ls+(Lo-Ls)*(1/(cosh((Lo-Ls)*I(i)/FIs))^2);
vR(i) = I(i)*R;
vL(i)=L(i)*(I(i)-I(i-1))/dt;

tt(i)=n;
i=i+1;

end

t=(dt:0.001e-3:tempo);

figure
plot(1000*tt,I);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');
title('Corrente(modelo hiperbólico)');
grid on;

figure
plot(tt*1000,F)
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Fluxo (Wb)');
title('Fluxo (modelo hiperbólico)');
grid on;

figure
plot(tt*1000,vL);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
title('Tensão Indutor(modelo hiperbólico)');
grid on;

figure
plot(tt*1000,vR);
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
title('Tensão Resistor(modelo hiperbólico)');
grid on;

```