

Luís Fernando Etges Gomes

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE INDUTORES DE
NÚCLEO EI**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
submetido ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica
Orientador: Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Gomes, Luís Fernando Etges

Projeto e desenvolvimento de indutores de núcleo
EI / Luís Fernando Etges Gomes ; orientador, Jean
Vianeí Leite, 2019.

73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Engenharia Elétrica.
3. Indutores. 4. Núcleo EI. 5. Capacidade de
potência. I. Leite, Jean Vianeí. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Luís Fernando Etges Gomes

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE INDUTORES DE
NÚCLEO EI**

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 11 de julho de 2019.

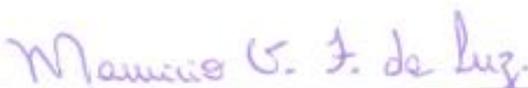


Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em
exercício

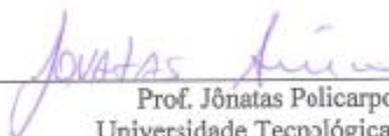
Banca Examinadora:



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Maurício Valência Ferreira da Luz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Jônatas Policarpo Américo, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Para meus pais, que dedicam suas vidas
a realizar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por batalharem diariamente para me proporcionar a melhor educação possível.

À minha irmã, por ser um exemplo para mim, apesar de ser mais nova.

À minha namorada, Mariana Demarco, pela grande ajuda na finalização deste trabalho, e também, por iluminar meus dias.

Aos meus amigos, em especial José Eduardo, Matheus Martins, Rafael Osmari e Vinícius Petri, que tornaram toda essa trajetória uma experiência única. Espero que permaneçam sempre ao meu lado.

Ao técnico do LABMAQ, Cristian Franzoi Mazzola, em especial, por toda a ajuda prestada durante a execução deste TCC, desde a concepção, pesquisa e execução até a revisão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve o estudo realizado para a fabricação de indutores monofásicos utilizando lâminas do tipo EI como núcleo ferromagnético. O objetivo é que esses indutores constituam um banco indutivo trifásico a ser implantado no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Santa Catarina. Alguns conceitos básicos da teoria de eletromagnetismo são discutidos para que se possa compreender a construção de dispositivos eletromagnéticos e, também, os principais tipos de perdas a eles relacionados. Expõe-se a metodologia utilizada para o dimensionamento dos indutores, com a qual foram definidos os parâmetros de projeto a partir dos materiais disponíveis para a fabricação. É descrito o processo de confecção e calibração de 9 indutores de potência de 330 VA e, por fim, são apresentados os resultados a partir de experimentos que determinam as indutâncias e perdas de cada indutor. Os cálculos indicados no dimensionamento se mostraram eficazes na estimativa das perdas que produziram um fator de potência médio de 0,06 entre os indutores.

Palavras-chave: Indutor; Núcleo EI; Dispositivos magnéticos; Capacidade de potência.

ABSTRACT

This work describes the study made for the manufacture of single-phase inductors using EI lamination as magnetic core. The objective is that these inductors constitute a three-phase inductive bank to be implanted in the Laboratory of Electric Machines and Drives of the Federal University of Santa Catarina. Some basic concepts of the theory of electromagnetism are discussed to be able to understand the construction of magnetic devices and also the main types of losses related to them. The methodology used for inductors design is presented, thereby the parameters were selected from the materials available for manufacturing. The process of confection and calibration of 9 inductors with 330 VA is described and, finally, the results are presented from experiments that determine the inductances and losses of each inductor. The calculations indicated in the design were effective in estimating the losses that produced an average power factor of 0.06 among the inductors.

Keywords: Inductor; EI core; Magnetic devices; Power handle capability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustra a forma como o campo magnético muda a polaridade da bússola.....	24
Figura 2: Configuração das linhas de campo formadas por um solenoide.	25
Figura 3: Representação de um indutor simples com núcleo ferromagnético.	26
Figura 4: (a) Enrolamento em uma das pernas de um núcleo formando um indutor. (b) Circuito magnético equivalente.	29
Figura 5: Núcleo ferromagnético com entreferro.	30
Figura 6: Efeito de espraiamento.....	31
Figura 7: Curva de magnetização.....	32
Figura 8: Orientação dos domínios magnéticos antes (a) e depois (b) de excitação externa.	33
Figura 9: Laço de histerese.....	34
Figura 10: Perda de potência por histerese. (a) Energia armazenada durante a magnetização do núcleo. (b) Energia liberada durante a desmagnetização do núcleo.	34
Figura 11: Correntes parasitas em núcleo de material ferromagnético maciço (a) e laminado (b).....	35
Figura 12: Definição da área de janela (W_a) e da seção transversal (A_c) para um núcleo EI.	38
Figura 13: Disposição do entreferro no núcleo magnético.	43
Figura 14: Localização do fluxo de espraiamento em núcleo E-I.	44
Figura 15: Lâminas fornecidas pelo INEP.	50
Figura 16: Aglomeração de fluxo em laminação intercalada.	53
Figura 17: Caminho do fluxo magnético.	54
Figura 18: (a) Máquina de enrolamento linear. (b) Carretel bobinado. .	55
Figura 19: Cantoneira.....	55
Figura 20: Os nove indutores fabricados.	56
Figura 21: Forma de ondas de um dos indutores.....	57
Figura 22: Variação das perdas nos indutores.	57
Figura 23: Variação das indutâncias dos indutores.	58
Figura 24: Comportamento dos indutores sob excitação.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Seção de área
A_c	Seção transversal do núcleo
A_{fio}	Seção de área do condutor
A_p	Produto de área
A_t	Área de superfície radiante de calor
B	Densidade de fluxo magnético
B_r	Densidade de fluxo residual
E	Largura do tronco central da lâmina
e	Tensão induzida
F	Fator de espraçamento
f	Frequência de operação
\mathcal{F}	Força magnetomotriz
G	Comprimento da janela do núcleo
H	Intensidade de campo magnético
H_c	Campo coercitivo
I	Corrente
J	Densidade de corrente
K_f	Coefficiente da forma da onda
K_u	Fator de utilização da janela
L	Indutância
l_c	Comprimento do caminho médio do núcleo
l_g	Espessura do entreferro
MLT	Comprimento médio da volta
MPL	Comprimento do caminho magnético
N	Número de espiras
P_c	Perdas do cobre
P_e	Perdas do entreferro
P_n	Perdas do núcleo
P_Σ	Perdas totais
R	Resistência
\mathcal{R}	Relutância
\mathcal{R}_g	Relutância do entreferro
\mathcal{R}_c	Relutância do núcleo
S	Potência aparente
T	Temperatura
V	Tensão
W_a	Área da janela do núcleo

W_{tfe}	Massa efetiva do núcleo
ΔT	Varição de temperatura
λ	Enlace de fluxo
μ	Permeabilidade magnética
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_m	Permeabilidade magnética do material
Φ	Fluxo magnético
Ψ	Densidade de perda de potência por superfície

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	EXPOSIÇÃO DO PROBLEMA E DO TEMA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral.....	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
1.3	JUSTIFICATIVA	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	FUNDAMENTOS DE ELETROMAGNETISMO	23
2.1.1	Lei de Ampère.....	24
2.1.2	Fluxo Magnético e Densidade de Fluxo Magnético.....	26
2.1.3	Circuito Magnético	28
2.1.4	Materiais Magnéticos	31
2.1.5	Lei de Faraday	35
2.2	INDUTORES.....	36
3	MÉTODO DE PROJETO DE INDUTORES.....	37
3.1	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO	38
3.2	MATERIAL MAGNÉTICO.....	39
3.3	CAPACIDADE DE MANIPULAÇÃO DE POTÊNCIA	39
3.3.1	Coefficiente de forma de onda	40
3.3.2	Fator de utilização da janela.....	40
3.4	SELEÇÃO DE MATERIAIS	41
3.4.1	Condutor.....	41
3.4.2	Núcleo	41
3.4.3	Isolante.....	42
3.5	CÁLCULO DO ENTREFERRO	42
3.6	EFEITO DO FLUXO DE ESPRAIAMENTO	43

3.6.1	Correção de parâmetros	45
3.7	ESTIMATIVA DE PERDAS	45
3.7.1	Elevação da Temperatura.....	46
4	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	49
4.1	LIMITAÇÕES DE PROJETO.....	49
4.2	EXECUÇÃO DO PROJETO.....	51
4.2.1	Construção dos indutores	54
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
6	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Um condutor elétrico, conduzindo corrente, produz um campo magnético, que por sua vez dá origem a um fluxo magnético. Define-se indutância como sendo a razão entre o fluxo magnético e a corrente que o produziu. Um circuito ou parte de um circuito que possui indutância é chamado de indutor. Então, pode-se pensar a indutância como a medida da energia magnética que pode ser armazenada em um indutor. Essa energia armazenada é uma função da corrente que passa através do indutor e, por isso, ele resiste às variações de corrente do circuito no qual está inserido. Essa característica faz com que os indutores sejam extensamente utilizados em várias áreas da engenharia com diferentes modos de operação. Por isso, há uma imensa variedade de indutores disponíveis no mercado, os quais diferem em tamanho, formato, material, indutância e capacidade de potência.

O uso de núcleo magnético em indutores se torna necessário à medida que se aumenta a potência de operação. Mesmo que sejam mais caros, os núcleos magnéticos permitem que indutores similares tenham tamanho menor e apresentem menos perdas nos enrolamentos, pois, ao elevar a densidade de fluxo magnético, eles possibilitam o uso de menos espiras para se alcançar uma certa indutância. Nesses casos, o uso de núcleos laminados tem sido largamente utilizado pela Eletrônica de Potência, isso porque, dispositivos magnéticos estão presentes na maioria de seus circuitos, como os conversores (GRANDI et al., 2004). É comum que os indutores, bem como os transformadores, sejam os elementos mais volumosos e os que acarretam mais perdas nos conversores. Isso faz com que, no projeto e construção desses dispositivos, se busque sempre alcançar maiores níveis de eficiência (JANGHORBAN, 2016).

No projeto de indutores, a escolha e o arranjo dos componentes são feitos de forma a se encontrar um equilíbrio nas variáveis de tamanho, peso, custo e eficiência. Um bom exemplo é a relação entre seção de área do núcleo e número de espiras do enrolamento, pois sabe-se que, ao aumentar um, é possível diminuir o outro. O problema é que, ao aumentar o número de espiras, é provável que haja um aquecimento em demasia do enrolamento, além de uma maior dificuldade na acomodação das espiras na janela do núcleo. E se, ao contrário, a seção do núcleo for elevada, isso acarreta em um indutor de maior massa e com preço mais elevado (MARTIGNONI, 1991). Assim, é possível perceber que é preciso observar as capacidades e limitações dos componentes dos indutores para que a elaboração do projeto seja bem-sucedida.

O presente trabalho se propõe a fazer o estudo de um método adequado para o dimensionamento de indutores que irão compor um banco de carga indutiva de testes para o Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos – LABMAQ. Além disso, serão apresentados os procedimentos utilizados na confecção e posteriores testes experimentais.

1.1 EXPOSIÇÃO DO PROBLEMA E DO TEMA

No estudo das máquinas elétricas, é possível conceber circuitos elétricos equivalentes, que levam em consideração as principais características desses equipamentos e, dessa forma, se possa analisar melhor o comportamento deles em relação ao sistema no qual estão inseridos (CHAPMAN, 2013).

Esses circuitos podem ser modelados a partir da determinação de alguns parâmetros das máquinas e sua obtenção pode ser feita através da realização de ensaios em laboratório, como ensaio de circuito aberto, de curto-circuito e em carga.

O LABMAQ possui transformadores, motores de indução e geradores síncronos que são utilizados pelos discentes da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC para a realização de ensaios acadêmicos durante os estudos na área de conversão de energia e fundamentos de máquinas. Por isso, é comum a utilização de cargas no laboratório, como as cargas resistivas, que são usadas na determinação da regulação dos transformadores e do gerador síncrono.

Além das cargas resistivas, cargas indutivas são usadas para suprir o gerador síncrono em ensaios para a determinação da reatância de Potier. Através desse experimento, é possível conhecer a característica de fator de potência zero da máquina e, assim, traçar o triângulo de Potier, do qual é possível fazer uma aproximação para a reatância de dispersão do gerador e para a constante de reação de armadura.

Idealmente, os indutores não dissipam potência, possuem somente potência reativa e fator de potência nulo. A carga indutiva utilizada atualmente no LABMAQ possui um fator de potência maior do que zero, fazendo com que os resultados dos ensaios sejam afetados. Além disso, há uma falta de cargas indutivas que permitam mais associações e que poderiam ser usadas para outros ensaios, como nos transformadores.

Neste trabalho, foi então proposta a confecção de novos indutores com fator de potência próximo a zero para compor um banco de cargas, juntamente com resistores e capacitores que o laboratório já possui. Esses indutores devem ser suficientes para suportar a potência da máquina síncrona didática, que é de 5 kVA.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Projetar e fabricar indutores monofásicos para constituir um banco indutivo trifásico a ser implantado no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Santa Catarina.

1.2.2 Objetivos Específicos

–Estudar as características construtivas de dispositivos magnéticos, bem como a influência de diferentes tipos de componentes em seu funcionamento;

–Apresentar e analisar uma metodologia adequada para o desenvolvimento de indutores monofásicos com núcleo ferromagnético;

–Fazer dimensionamento de indutores conforme metodologia proposta e viabilidade econômica;

–Confeccionar os indutores;

–Apresentar resultados e confrontá-los com os resultados estimados, principalmente no que se refere ao fator de potência e indutância das cargas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Apesar de a viabilidade econômica ser um dos motivos da necessidade de confecção de novas cargas para o LABMAQ, há ainda um outro fator importante que explica o porquê desta escolha. O indutor é um componente magnético quase único para cada aplicação, o que torna difícil a tarefa de se encontrar um indutor adequado nos catálogos de fabricantes.

Para que se possa entender o motivo desse argumento, é conveniente que se faça uma analogia entre indutores e capacitores. Estes são encontrados com maior facilidade no mercado e mesmo que a classificação do dielétrico constituinte do capacitor exceda as especificações de projeto, o custo não será de grande diferença. Além disso, os materiais dielétricos apresentam características lineares em uma grande faixa de tensão e frequência. Por outro lado, a mesma corrente que cria o campo magnético e caracteriza o indutor dá origem a perdas resistivas nos enrolamentos, que podem levar a aumentos excessivos de temperatura. Já os materiais ferromagnéticos podem saturar com

facilidade e, também, contribuem para aumento temperatura dos dispositivos magnéticos. Isso faz com que pequenas alterações na especificação do projeto do indutor tenha um grande efeito sobre o volume e o custo final do mesmo (HURLEY; WÖLFLE, 2013).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

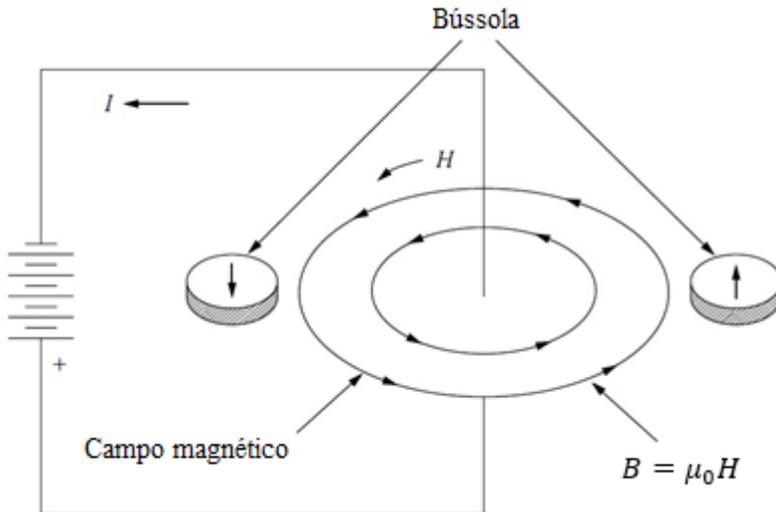
2.1 FUNDAMENTOS DE ELETROMAGNETISMO

Apesar de já haver indícios de que fenômenos elétricos e magnéticos estavam relacionados de alguma forma, foi só em 1820 que o físico dinamarquês Hans Christian Oersted descobriu a relação entre magnetismo e o movimento de cargas, ao verificar que a agulha de uma bússola era desviada por um fio conduzindo corrente elétrica. A partir dessa descoberta, eletricidade e magnetismo passaram a ser uma só ciência – o eletromagnetismo. Contudo, ainda há uma característica que distingue esses dois fenômenos: a carga elétrica. Não existe um conceito equivalente no magnetismo - embora existam os polos magnéticos. Enquanto na eletricidade existem partículas elementares portadoras de cargas (positivas e negativas), no magnetismo não há evidências da existência de polos magnéticos isolados. Eles sempre existem formando pares (YOUNG; FREEDMAN, 2015; GASPAS, 2013). Assim sendo, se o campo elétrico é produzido por cargas elétricas, como podem ser produzidos os campos magnéticos? De duas formas: por um ímã permanente (materiais em que os campos magnéticos dos elétrons se combinam e produzem um campo na vizinhança do material) ou por uma corrente elétrica em um eletroímã (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Eletroímãs são, geralmente, solenoides com núcleo ferromagnético que atuam como ímãs. Desse modo, podem ser construídos ímãs temporários, pois, ao ser interrompida a corrente, o magnetismo induzido no eletroímã desaparece. O cientista americano Joseph Henry destacou-se na pesquisa de eletroímãs, fazendo importantes melhorias no modelo. Isto foi possível porque, anos antes, Oersted havia demonstrado que uma corrente percorrendo um condutor gera um campo magnético ao seu redor. A direção e o sentido das linhas de campo podem ser determinados pela regra da “mão direita”, como mostra a Figura 1 (GASPAS, 2013).

Dois vetores podem descrever o campo magnético que circula pelo condutor mostrado na Figura 1. O primeiro é a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} e o segundo, a intensidade de campo magnético \mathbf{H} . Este último é explicado pela Lei de Ampère (HURLEY; WÖLFLE, 2013).

Figura 1: Ilustra a forma como o campo magnético muda a polaridade da bússola.



Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

2.1.1 Lei de Ampère

Esta lei afirma que a integral de linha da intensidade do campo magnético \mathbf{H} , ao longo de um contorno fechado L qualquer, é igual à corrente total, I , que atravessa a superfície envolvida pelo contorno L , como mostrado em [1], em que $d\mathbf{l}$ representa o vetor de deslocamento infinitesimal (SADIKU, 2015).

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad [1]$$

A lei de Ampère é derivada da lei de Biot-Savart e é um caso especial para o cálculo de campos magnéticos em que a distribuição da corrente é simétrica. Além disso, sabendo que a corrente total que flui através de uma superfície S é dada por [2], pode ser demonstrado, através do teorema de Stokes [3], que a lei de Ampère também é derivada de uma das equações de Maxwell, conforme [4] (SADIKU, 2015).

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad [2]$$

$$I = \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S} \quad [3]$$

$$(\nabla \times \mathbf{H}) = \mathbf{J} \quad [4]$$

Em que:

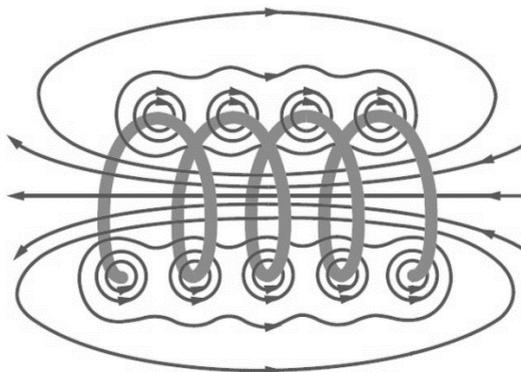
\mathbf{J} = Densidade de corrente

$d\mathbf{S}$ = Elemento de área infinitesimal

∇ = Operador diferencial

O solenoide é um exemplo simples no qual a Lei de Ampère é muito útil. Esse dispositivo magnético, mostrado na Figura 2, é construído com um condutor enrolado em forma de hélice. Uma vez que um campo magnético é estabelecido ao redor de um condutor no momento em que esse condutor passa a transportar uma corrente elétrica, pode-se afirmar que, ao aproximar dois condutores que transportam uma corrente, seus campos magnéticos se somam e, conseqüentemente, a intensidade de campo magnético é duplicada. Portanto, se o solenoide é um enrolamento helicoidal, cada uma das voltas pode ser considerada uma espira circular e a soma vetorial dos campos que circundam as espiras é igual ao campo magnético resultante do solenoide (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009; MCLYMAN, 2011; SERWAY; JEWETT, 2014).

Figura 2: Configuração das linhas de campo formadas por um solenoide.



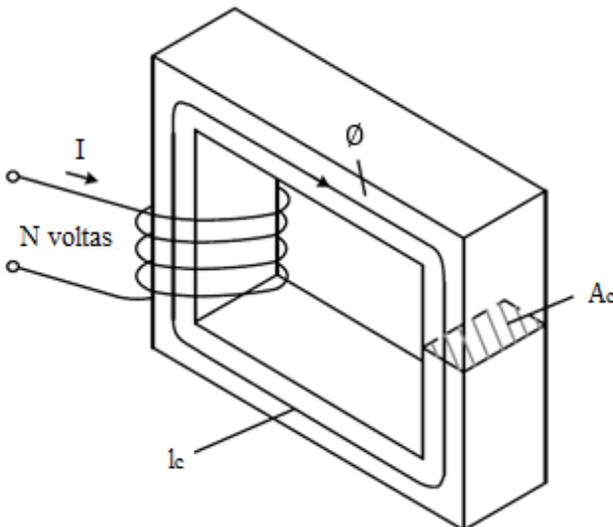
Fonte: Adaptado de Gaspar (2013).

Ao fazer uma avaliação da Figura 2, pode-se notar uma semelhança entre as linhas de campo de um ímã permanente e a distribuição do campo externo do solenoide. Então, é possível concluir que o solenoide age como um ímã, criando dois polos em suas extremidades, um polo sul e um polo norte e, ao se inverter o sentido da corrente, é possível inverter a polaridade do solenoide (SERWAY; JEWETT, 2014).

2.1.2 Fluxo Magnético e Densidade de Fluxo Magnético

A Figura 3 mostra um núcleo retangular feito de material ferromagnético, que tem como característica a boa condução de fluxo magnético. Ao enrolar, nesse núcleo, N vezes um condutor conduzindo corrente elétrica, o campo magnético gerado pela bobina irá permanecer dentro do núcleo, onde se pode considerar um caminho fechado l_c . Assim, é possível integrar [1] pelo caminho de l_c , que representa o comprimento do caminho médio do núcleo, também conhecido como MPL. A força magnetomotriz que dá origem ao campo magnético que circula pelo caminho de integração l_c é igual a NI . Portanto, a magnitude da intensidade do campo magnético, H , que passa pelo circuito apresentado na Figura 3 pode ser dada por [5] (CHAPMAN, 2013).

Figura 3: Representação de um indutor simples com núcleo ferromagnético.



Fonte: Adaptado de Hurley & Wölfle (2013).

Como a unidade do comprimento do caminho médio do núcleo é o metro (m) e a unidade da corrente que passa por N espiras é o Ampère-espira (A.e), a intensidade de campo magnético é dada pelo ampère-espira por metro (A.e/m), também conhecido como Oersted (Oe).

$$H = \frac{NI}{l_c} \quad [5]$$

É possível ver, por [5], que a intensidade do campo magnético, H , está diretamente ligada à corrente I que flui pela bobina. Desse modo, se a corrente tem a função de produzir o campo magnético, o núcleo ferromagnético tem como finalidade concentrar esse campo e formar um caminho fechado para o fluxo magnético, evitando a dispersão do mesmo.

A “quantidade” de fluxo magnético, Φ , que passa através de uma determinada área A é dada por [6], onde a grandeza escalar Φ é dada em Weber (Wb), o vetor B , que representa a densidade de fluxo magnético, é dado em Tesla (T), e o vetor A , que é a seção de área pela qual atravessa o fluxo magnético, é dado em m^2 (SADIKU, 2015).

$$\Phi = \int_A B \cdot dA \quad [6]$$

A relação entre os vetores de densidade de fluxo magnético, B , e de intensidade do campo magnético, H , é mostrada em [7], em que μ representa a permeabilidade magnética do material imerso no campo magnético (SADIKU, 2015). A permeabilidade magnética μ , dada em Henry/m, é uma propriedade do material e indica a facilidade com que o material conduz o fluxo magnético.

$$B = \mu H \quad [7]$$

A permeabilidade relativa relaciona a permeabilidade de qualquer material com a permeabilidade do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m). Materiais ferromagnéticos como ferro, cobalto, níquel e suas ligas têm seus valores de permeabilidade magnética muito superiores a de materiais como o cobre, o papel e o ar (KAZIMIERCZUK, 2014). Assim, a maior parte do fluxo magnético que percorre um material ferromagnético permanece nele, sem se dispersar para o ar que circunda o material. Esse é o motivo de pelo qual os materiais ferromagnéticos são importantes para

a construção de dispositivos magnéticos, como transformadores, indutores e máquinas elétricas.

Finalmente, um último ponto que se pode concluir com [7] é que o vetor \mathbf{B} depende não só da atuação da corrente na bobina para o estabelecimento da corrente, mas também do tipo de material que compõe o núcleo.

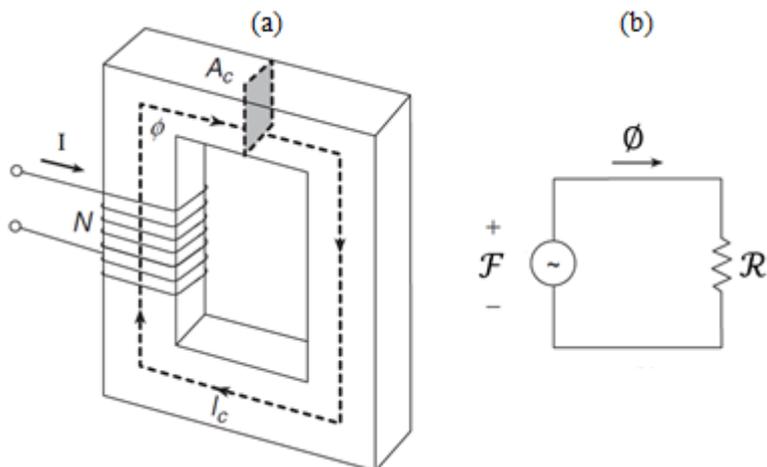
2.1.3 Circuito Magnético

O uso de circuitos elétricos tem por finalidade a realização de diferentes tarefas, entre elas, o design e construção de dispositivos elétricos. O conceito de modelagem de circuitos também é muito útil para que se possa entender o comportamento dos efeitos magnéticos em diversos equipamentos, como máquinas elétricas, transformadores e, também, o indutor.

O circuito magnético da Figura 4 pode ser analisado através de uma analogia com um circuito elétrico, em que uma fonte de tensão V alimenta um resistor R com uma corrente I (pela Lei de Ohm: $V=RI$). Conforme [1] e [6], é possível perceber que uma corrente fluindo por uma bobina pode estabelecer um campo magnético e, conseqüentemente, um fluxo magnético, como pode ser visto na Figura 4(a). O trabalho realizado por NI no circuito magnético é muito semelhante ao realizado pela força eletromotriz (ou tensão) no circuito elétrico e, por isso, NI é chamada de força magnetomotriz, representada por \mathcal{F} . Essa força produz um fluxo magnético \mathcal{O} , que é similar ao fluxo de cargas (ou corrente) produzida pela diferença de potencial entre os terminais de um circuito elétrico. Na Figura 4(b), é apresentado o circuito magnético equivalente para o indutor retratado na Figura 4(a). A equação [8] demonstra a Lei de Ohm aplicada a esse circuito (CHAPMAN, 2013; ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$\mathcal{F} = \mathcal{O}\mathcal{R} \quad [8]$$

Figura 4: (a) Enrolamento em uma das pernas de um núcleo formando um indutor. (b) Circuito magnético equivalente.



Fonte: Adaptado de Kazimierczuk (2014).

A relutância, dada por \mathcal{R} , medida em Ampere-espira por Weber ($A.e/Wba$), é o equivalente da resistência R nos circuitos elétricos e pode ser entendida como a dificuldade oferecida pelo material à passagem de fluxo magnético. Portanto, a magnitude da força magnetomotriz para estabelecer um fluxo magnético em algum material irá depender da relutância desse material. E a relutância varia de núcleo para núcleo, pois ela depende não só do material, mas também das dimensões físicas do núcleo, como é possível observar em [9]. Vale lembrar que, apesar de serem equivalentes, a relutância não está relacionada às perdas de potência ativa, como é o caso da resistência elétrica (HURLEY; WÖLFLE, 2013).

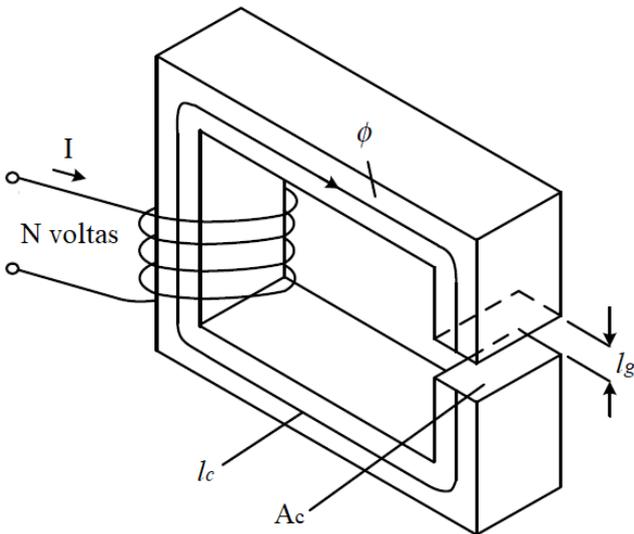
$$\mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad [9]$$

Ao analisar circuitos magnéticos como o da Figura 3, é possível perceber que, se o material ferromagnético possuir uma permeabilidade magnética elevada, a aplicação de uma pequena corrente na bobina pode levar o núcleo à saturação. Em analogia a um circuito elétrico, seria como possuir uma resistência muito baixa, praticamente um curto-circuito. Uma estratégia usada pelos projetistas é fazer a introdução de um entreferro no núcleo para que se possa aumentar a relutância do caminho

magnético. Assim, uma corrente elevada seria necessária para levar o núcleo à saturação.

A Figura 5 mostra um núcleo que possui um entreferro delgado de ar no caminho magnético, o qual tem espessura l_g . Como as relutâncias obedecem às mesmas regras das resistências, é possível somar a relutância do entreferro, \mathcal{R}_g , e do núcleo, \mathcal{R}_c , para que se possa obter a relutância equivalente do circuito. Porém, a permeabilidade magnética do núcleo ferromagnético é muito elevada em comparação à do entreferro e, como consequência, a relutância equivalente do circuito será aproximadamente igual a relutância do entreferro (MCLYMAN, 2011).

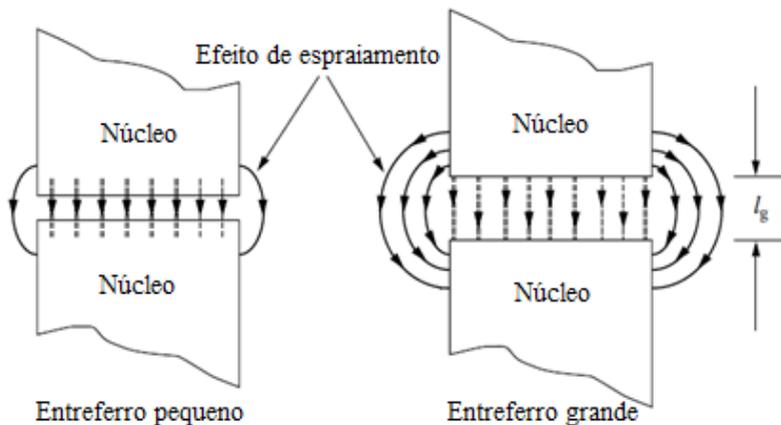
Figura 5: Núcleo ferromagnético com entreferro.



Fonte: Adaptado de Hurley & Wölfle (2013).

Segundo o que foi exposto, pode ser feita uma regulação da relutância de um circuito ao variar a espessura do entreferro. Mas, um grande problema circunda o cálculo do entreferro, o efeito de espraiamento, como pode ser observado na Figura 6. Essa projeção das linhas de campo é chamada de espraiamento. A Figura 6 mostra como o aumento da espessura do entreferro aumenta a seção transversal pela qual o fluxo deve atravessar, o que leva a uma diminuição da densidade de fluxo magnético (KAZIMIERCZUK, 2014).

Figura 6: Efeito de espraioamento.

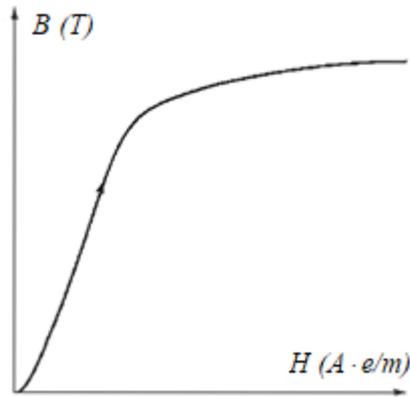


Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

2.1.4 Materiais Magnéticos

A equação [7] mostra a relação entre a intensidade de campo magnético e a densidade de fluxo magnético e como essa relação depende da permeabilidade magnética do material. Em primeiro momento, é natural supor que ao selecionar algum material para compor um núcleo qualquer, a permeabilidade desse material seja constante, mas isso não se observa na prática, como pode ser visto pela curva de magnetização apresentada na Figura 7. Essa curva mostra que, ao se excitar um material ferromagnético com uma intensidade de campo H , a densidade de fluxo magnético B cresce, inicialmente, de maneira muito rápida, até o ponto em que qualquer incremento de H gere o mesmo aumento de B , que ocorre em um material não ferromagnético. A partir do ponto de saturação do núcleo (joelho da curva da Figura 7), a relação entre H e B não é mais linear, de onde se conclui que a permeabilidade magnética dos materiais ferromagnéticos não é constante (MCLYMAN, 2011).

Figura 7: Curva de magnetização.

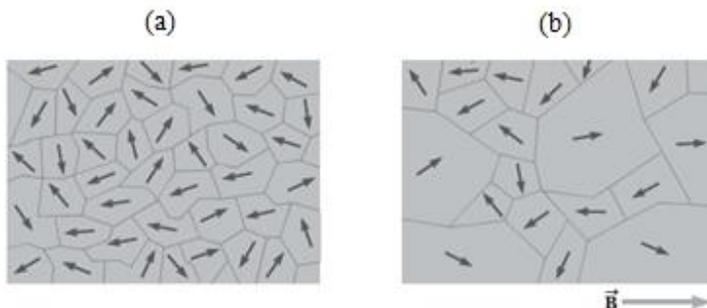


Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

Algumas características dos materiais ferromagnéticos precisam ser analisadas para que se possa compreender o comportamento da permeabilidade magnética. Observando os materiais ferromagnéticos em escala microscópica, é possível notar que todos eles possuem regiões nas quais os momentos magnéticos dos átomos estão alinhados. Essas regiões são denominadas de domínios magnéticos.

Quando o campo externo ao material é nulo, verifica-se que os momentos magnéticos dos domínios estão orientados de forma totalmente aleatória, como mostra a Figura 8(a). Então, o fluxo B medido externamente também é nulo, pois o material como um todo não possui momento resultante. Quando o material é submetido a um campo magnético externo, os domínios irão interagir com esse campo na tentativa de um alinhamento e, à medida que isso acontece, os domínios que possuem a mesma orientação do campo externo crescem, conforme mostra a Figura 8(b). Então, o fluxo B medido externamente tem um valor não nulo. A facilidade que os átomos têm para que aconteça esse realinhamento dos momentos magnéticos dá ao material sua permeabilidade magnética característica. Assim, dependendo da intensidade do campo externo aplicado no material, chegará o momento em que praticamente todos os domínios do material estarão alinhados e, nesse momento, B atinge seu nível de saturação (SERWAY; JEWETT, 2014; KAZIMIERCZUK, 2014).

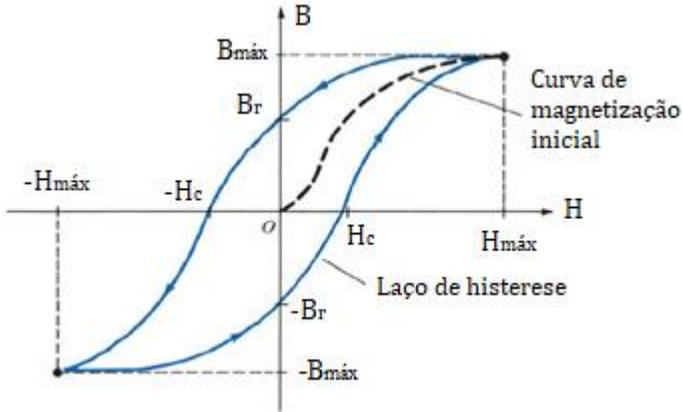
Figura 8: Orientação dos domínios magnéticos antes (a) e depois (b) de excitação externa.



Fonte: Adaptado de Serway & Jewett (2014).

Ao remover o campo magnético externo aplicado ao material ferromagnético, ele pode reter uma parte de seu magnetismo. Para entender por que isso ocorre, pode ser feita uma avaliação da curva de magnetização de um circuito magnético que é alimentado por uma corrente alternada. Nesse caso, a cada ciclo da corrente o material é levado à magnetização e à desmagnetização e, como resultado, tem-se a curva mostrada na Figura 9, chamada de histerese. Conforme a figura, ao aplicar um campo magnético inicial no material, a densidade de fluxo magnético irá aumentar até sua saturação em B_{max} . Nesse ponto, o alinhamento dos momentos magnéticos dos domínios é quase total. Quando a intensidade de campo magnético H é reduzida pela inversão da corrente, os domínios tendem a permanecer alinhados. Isso ocorre porque não há energia que os force a retornar às posições iniciais. Portanto, quando H é reduzido a zero, o material retém uma densidade de fluxo residual B_r . Para que o material volte ao estado inicial, é necessária a aplicação de um campo com orientação contrária ao alinhamento retido. A indução será nula quando o campo chegar à força coercitiva $-H_c$. Assim, é fácil deduzir que o laço de histerese do núcleo de indutores e transformadores deve ser estreito e alto pois, desse modo, ele poderá alcançar altos valores de B sem que haja saturação do núcleo e haverá uma perda reduzida de energia para o realinhamento dos domínios (KAZIMIERCZUK, 2014).

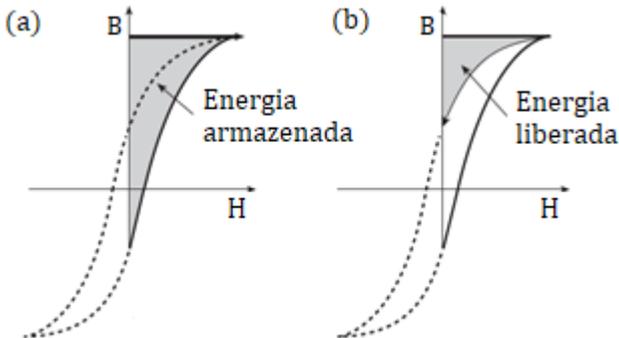
Figura 9: Laço de histerese.



Fonte: Adaptado de Sadiku (2015).

No primeiro trecho da corrente alternada aplicada no circuito magnético, a energia é transferida da fonte para o enrolamento, conforme Figura 10(a). Já no segundo ciclo, a energia é liberada do circuito e devolvida à fonte, conforme Figura 10(b). Fica claro, pela Figura 10, que há uma diferença entre as energias absorvida e liberada e essa diferença, proporcional à área do laço, é chamada de perda por histerese, comum em transformadores e indutores, e ocasionada pelo realinhamento dos domínios magnéticos (KAZIMIERCZUK, 2014).

Figura 10: Perda de potência por histerese. (a) Energia armazenada durante a magnetização do núcleo. (b) Energia liberada durante a desmagnetização do núcleo.



Fonte: Adaptado de Kazimierczuk (2014).

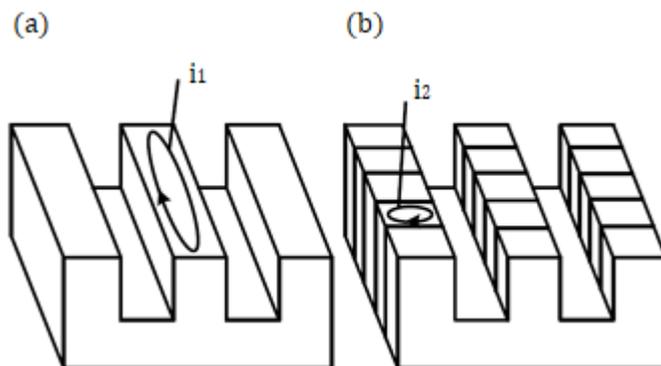
2.1.5 Lei de Faraday

Onze anos depois de Oersted ter demonstrado como uma corrente pode criar um campo magnético, Michael Faraday demonstrou como esse campo pode afetar sua vizinhança. E isso acabaria se tornando a base da teoria de funcionamento dos transformadores. Segundo a Lei de Faraday [10], um fluxo magnético fluindo através de uma bobina pode induzir uma força eletromotriz nos terminais desta e a magnitude da tensão é diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo em relação ao tempo (HAYT; BUCK, 2012).

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad [10]$$

O fato de um fluxo magnético variável no tempo poder induzir uma tensão em materiais condutores faz com que o projetista de dispositivos magnéticos, como indutores, tenha que se atentar a mais um tipo de perda. Isso porque o fluxo magnético que flui pelo núcleo desses dispositivos induz tensões nele mesmo, gerando correntes que fluem por caminhos circulares dentro do núcleo (Figura 11(a)). Sendo o núcleo formado por material resistivo, a circulação das chamadas correntes parasitas (ou correntes de *Foucault*) provocam uma perda por aquecimento do núcleo. A laminação do núcleo pode reduzir essas perdas, pois limita o caminho das correntes a pequenas áreas (Figura 11(b)) (CHAPMAN, 2013).

Figura 11: Correntes parasitas em núcleo de material ferromagnético maciço (a) e laminado (b).



Fonte: Adaptado de Hurley & Wölfle (2013).

2.2 INDUTORES

Ao percorrer os enrolamentos de uma bobina, uma corrente produzirá um campo magnético e esse campo induzirá a formação de um fluxo no núcleo dessa bobina. Se os enrolamentos dessa bobina estiverem fortemente acoplados, pode-se considerar que o fluxo que passa por uma determinada espira é praticamente o mesmo que atravessará as outras N espiras. Portanto, o enlace de fluxo λ é dado por [11] (HAYT; BUCK, 2012; SADIKU, 2015).

$$\lambda = N\phi \quad [11]$$

A razão entre o enlace total de fluxo e a corrente que produz esse fluxo é chamada de indutância e é representada por L , conforme [12]. Essa medida de “enlaçamentos de fluxo por unidade de corrente” é representada pela unidade de medida Henry (H) e apresenta a habilidade de um dispositivo de armazenar energia. Qualquer material condutor de corrente elétrica apresenta uma indutância, mas é possível fazer um arranjo físico no condutor para que esse efeito indutivo se eleve. A forma mais simples de se fazer isso é enrolá-lo na forma de um solenoide (como mostrado na Figura 2) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009; SADIKU, 2015).

$$L = \frac{N\phi}{I} \quad [12]$$

Esses dispositivos projetados para armazenar energia em seu campo magnético são chamados de indutores. Eles têm uma vasta gama de aplicações, principalmente nos campos de eletrônica e eletrônica de potência, e variam muito, não só quanto ao valor da indutância, mas também no tamanho e na forma de construção.

Pode-se encontrar outra definição de indutância, dada por [13], na qual a indutância depende das dimensões físicas e da construção do indutor. Com essa equação, é possível regular a indutância, alterando o número de espiras N , a permeabilidade magnética μ do material, a seção transversal do núcleo A_c ou o comprimento do caminho magnético l_c (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$L = \frac{N^2 \mu A_c}{l_c} \quad [13]$$

3 MÉTODO DE PROJETO DE INDUTORES

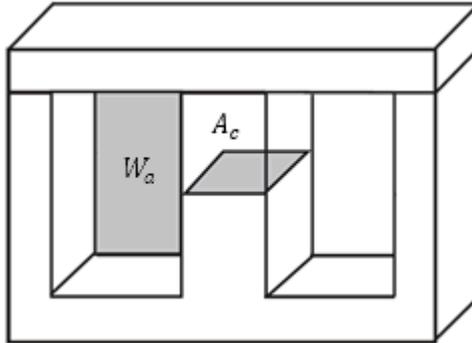
Há muitos anos, engenheiros eletricitistas se dedicam ao projeto de componentes magnéticos. Entre outras aplicações, tais dispositivos formam partes fundamentais dos conversores eletrônicos de potência, na forma de transformadores e indutores (HURLEY; WÖLFLE, 2013). Geralmente, esses itens são os mais pesados e volumosos no circuito de conversão, além de ter um efeito significativo no desempenho do sistema. Por esses motivos, o *design* de transformadores e indutores tem grande influência no aprimoramento do peso, tamanho, eficiência e também no custo do projeto (MCLYMAN, 2011).

Projetistas usam diversas abordagens. Muitas vezes, o processo é feito de forma empírica, baseado no método de tentativa e erro. Porém, tamanho e custo dos componentes magnéticos são fatores extremamente importantes para qualquer projeto. Portanto, o *design* deve levar em consideração o núcleo ferromagnético, as perdas por correntes parasitas e histerese, o aquecimento dos enrolamentos e a isolamento. A literatura existente para esses e outros pontos cresceu, mas está dispersa em inúmeros artigos e são vários os métodos utilizados para o projeto de transformadores e indutores (BOSSCHE; VALCHEV, 2005; MCLYMAN, 2011; HURLEY; WÖLFLE, 2013).

O presente trabalho utiliza o método de projeto de indutores de corrente alternada apresentado por McLyman (2011), que atribui a cada tamanho de lâmina (núcleo magnético) um valor chamado de *produto de área*, A_p . Esse valor é usado pelos principais fabricantes de lâminas para indicar sua capacidade de manipulação de potência. O *produto de área* é assim chamado porque é definido pelo produto entre a área da janela do núcleo, W_a (cm²), e a seção transversal do núcleo, A_c (cm²), como mostra [14]. Na Figura 12, é possível ver essas medidas indicadas em um núcleo magnético formado por lâminas EI (MCLYMAN, 2011).

$$A_p = W_a \cdot A_c \text{ [cm}^4\text{]} \quad [14]$$

Figura 12: Definição da área de janela (W_a) e da seção transversal (A_c) para um núcleo EI.



Fonte: Kazimierczuk (2014).

3.1 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

O primeiro passo para que se possa projetar um indutor é a determinação de alguns parâmetros como:

- Tensão aplicada;
- Frequência de operação;
- Indutância desejada;
- Material do núcleo;
- Densidade de fluxo máxima.

Tais parâmetros determinam fatores como custo, tamanho, eficiência, aumento de temperatura e fator de potência do indutor. Portanto, para alcançar o *design* desejado, é necessário que se façam *trade-offs* entre as especificações do projeto, sendo muito difícil otimizar todas elas simultaneamente (MCLYMAN, 2011).

Por exemplo, caso fosse necessário construir um indutor com o menor peso e volume para uma dada indutância, uma primeira opção seria fazer uma compensação selecionando um material de núcleo mais eficiente, que possibilitasse uma maior densidade de fluxo sem a saturação do mesmo. Mas a escolha resultaria em um custo maior. Uma alternativa poderia ser encontrada com a elevação da frequência de operação, mas com a penalidade de um aumento nas perdas e, conseqüentemente, o aumento da temperatura (MCLYMAN, 2011; HURLEY; WÖLFLE, 2013).

Assim, fica claro que o projetista se depara frequentemente com algumas restrições de projeto que devem ser observadas e contornadas,

quando possível. E esse caminho alternativo pode ser encontrado simplesmente fazendo um ajuste nos parâmetros iniciais.

3.2 MATERIAL MAGNÉTICO

Uma etapa básica do projeto de indutores, além da determinação dos parâmetros iniciais, é a seleção de um material adequado para o núcleo. A principal finalidade de se utilizar um núcleo é conter o fluxo magnético em um caminho definido. A capacidade de controlar esse fluxo magnético é essencial para que se possa regular a operação do indutor. Cada material tem características que podem beneficiar de alguma forma o projetista no espectro de frequência de operação, tamanho, eficiência e custo, como pode ser notado pelo Apêndice A (MCLYMAN, 2011).

Indutores e transformadores que operam em baixa frequência, geralmente tem seu núcleo magnético formado por lâminas de liga de ferro. Essas lâminas são fabricadas em diversos tamanhos e formas e a liga é comumente o *magnesil*, formado por silício (3%) e ferro (97%). A adição de silício ao ferro tem dois motivos principais: a estabilidade das perdas do material à medida que o tempo passa e o aumento da resistividade do núcleo, o que leva, portanto, à redução de perdas por correntes parasitas (MCLYMAN, 2011; HURLEY; WÖLFLE, 2013).

Como vantagens da laminação, quando se considera a aplicação na construção de indutores, podem-se destacar a disponibilidade de lâminas em vários tamanhos, o baixo custo, a alta indução magnética de saturação, que geralmente está na faixa de 1,5 T, e uma permeabilidade magnética relativamente alta (BOSSCHE; VALCHEV, 2005).

3.3 CAPACIDADE DE MANIPULAÇÃO DE POTÊNCIA

A capacidade de manipulação de potência pode ser interpretada como a habilidade de um indutor em dissipar calor, ou seja, se o calor puder ser removido com segurança, a potência do indutor pode ser aumentada. Essa capacidade de potência pode ser relacionada com o produto de área, A_p , conforme mostra [15] (MEADE, 2002; MCLYMAN, 2011).

$$A_p = \frac{S \cdot (10^4)}{K_f \cdot K_u \cdot B_i \cdot f \cdot J} \text{ [cm}^4\text{]} \quad [15]$$

Em que:

S = Potência aparente, VA

K_f = Coeficiente da forma da onda

K_u = Fator de utilização da janela

B = Densidade de fluxo de operação, T

f = frequência de operação, Hz

J = Densidade de corrente, A/cm²

Assim, pode ser observado que, selecionados os parâmetros iniciais de projeto, quase todos os valores são conhecidos para que se possa encontrar o produto de área, A_p . Em algumas ocasiões, a indutância desejada é informada e, em outras, a corrente, mas, independente disso, uma pode ser encontrada a partir da outra, tendo-se conhecimento da tensão e frequência da fonte.

3.3.1 Coeficiente de forma de onda

A Lei de Faraday afirma que, se houver uma variação de fluxo magnético através de uma espira condutora, uma tensão será induzida nela. Então, desconsiderando as perdas, o valor da tensão eficaz induzida seria $E_{ind} = 1/\sqrt{2} \cdot 2NA_c B\pi f = 4,44 \cdot NA_c Bf$, sendo N o número de voltas do enrolamento e A_c a seção transversal do núcleo. Assim, o coeficiente de forma de onda senoidal é definido como $K_f = \sqrt{2}\pi = 4,44$ (SHA et al., 2015).

3.3.2 Fator de utilização da janela

O fator de utilização da janela pode ser definido como a razão entre a área de condução de corrente e a área da janela do núcleo (HURLEY; WÖLFLE, 2013). Isto é, se esse fator for multiplicado pela área da janela, pode-se obter o espaço da janela do núcleo que será ocupado pelo cobre. Segundo McLyman (2011), uma boa aproximação para o fator de utilização é $K_u = 0,4$. Esse valor foi obtido levando em consideração alguns pontos como: 1) o desconto da área ocupada pela isolamento do fio de cobre; 2) o fator de preenchimento, que avalia a forma como foi feito o assentamento do fio de cobre; 3) a habilidade do operador.

3.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS

3.4.1 Condutor

Em geral, o condutor empregado nos indutores é o fio de cobre esmaltado, que possui um revestimento fino de polímero de alto desempenho. Esse revestimento garante a isolamento entre as futuras espiras e tem uma espessura muito pequena para possibilitar que o maior número de voltas seja possível dentro da janela do núcleo. Além disso, o processo de esmaltação pode dar outras características ao fio, como resistência a altas temperaturas e efeito abrasivo e baixo coeficiente de atrito (MURRAY, 2008).

A densidade de corrente precisa ser fixada para que se possa selecionar a seção do condutor a ser usado. É preciso ter em mente que a escolha de um valor para a densidade de corrente está diretamente ligada ao aquecimento do enrolamento do indutor e as dificuldades de irradiação do calor se elevam, conforme se aumenta o tamanho do indutor. Assim, é indicado que se diminua o valor de J à medida que se aumenta a potência (MARTIGNONI, 1991).

O Anexo A apresenta a escala de bitolas de fios de cobre. A partir do valor da seção de fio, A_{fio} , encontrado com [16], em que I é a corrente no fio (A) e J a densidade de corrente (A/cm²), é possível fazer a escolha de um tamanho de seção adequado para o uso no indutor. Através da tabela, também é possível encontrar valores de resistências dos fios, dadas em micro-ohms por centímetros, que serão necessários em cálculos futuros.

$$A_{fio} = I/J \quad [cm^2] \quad [16]$$

3.4.2 Núcleo

Considerando o emprego de núcleo laminado, a determinação do tamanho das lâminas pode ser feita através do valor do *produto de área*, A_p , já definido no início do projeto, pois ele fornece uma estimativa inicial aproximada do tamanho do núcleo (KAZIMIERCZUK, 2014). Como exemplo, o Apêndice B contém dados sobre as características de algumas lâminas do tipo EI. Essas informações podem ser encontradas nos catálogos fornecidos pelos fabricantes. Analisando essa tabela, é possível encontrar, a partir de A_p , o tamanho de lâmina mais adequado para a capacidade de potência do indutor.

3.4.3 Isolante

É necessário que não haja contato entre a bobina e o núcleo do indutor e, para isso, é indispensável o uso de um material isolante entre as duas partes. A utilização de carretéis para esse fim é comum, tanto em transformadores de pequeno porte quanto em indutores, pois, além de fazer a isolação do núcleo, eles realizam o acomodamento das bobinas (MARTIGNONI, 1991).

O número de vezes que o fio deve ser enrolado sobre o carretel pode ser calculado a partir de [17], derivada de [10], em que N depende da tensão aplicada V (V), do coeficiente de forma de onda K_f , da densidade de fluxo B (T), da frequência f (Hz) e da seção transversal do núcleo A_c (cm²) (MCLYMAN, 2011).

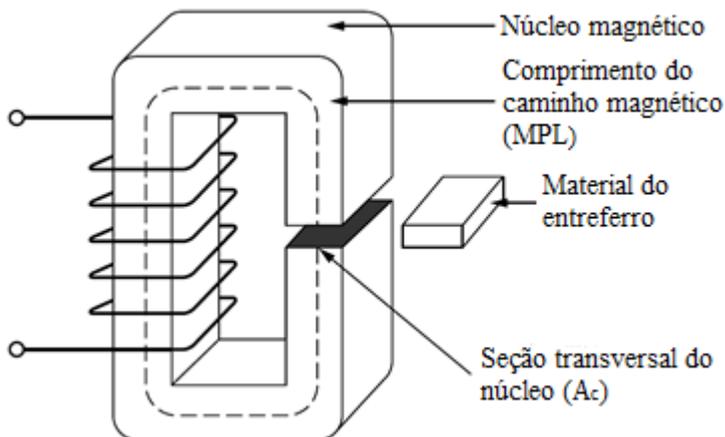
$$N = \frac{V \cdot (10^4)}{K_f \cdot B \cdot f \cdot A_c} \text{ [voltas]} \quad [17]$$

3.5 CÁLCULO DO ENTREFERRO

As lâminas que formam o núcleo do indutor são, normalmente, fornecidas em dois componentes, como é o caso das lâminas EI. Ao montar o núcleo, um pequeno espaço, chamado de entreferro, surge inevitavelmente entre as duas partes (HURLEY; WÖLFLE, 2013). Esse espaço pode ser preenchido por algum material, ou não, mas, em geral, algum tipo de papel é usado para que se evite trepidações do núcleo quando em operação. Comumente esse papel é o *presspan*.

O uso de entreferro é de grande utilidade para projetistas na *design* de indutores. Ele é utilizado para aumentar a relutância do caminho magnético (MPL), representado pelo tracejado da Figura 13. A vantagem é que se pode ter um controle mais rigoroso sobre a permeabilidade magnética, que sofre variações com o aumento de temperatura e tensão de excitação (MCLYMAN, 2011).

Figura 13: Disposição do entreferro no núcleo magnético.



Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

Ao analisar a relutância do caminho magnético quando um material isolante for inserido no entreferro (mostrado na Figura 13), é possível perceber que o controle sobre a relutância dá ao projetista o controle sobre o fluxo magnético e também sobre a indutância L (KAZIMIERCZUK, 2014). Isso pode ser visto em [18], em que μ_0 (H/m) representa a permeabilidade magnética no vácuo, μ_m (H/m) a permeabilidade magnética do núcleo, MPL o comprimento do caminho magnético (cm) e, finalmente, l_g a espessura do entreferro (cm).

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A_c}{l_g + (MPL/\mu_m)} \text{ [Henry]} \quad [18]$$

Isolando-se l_g , é possível calcular a espessura do entreferro:

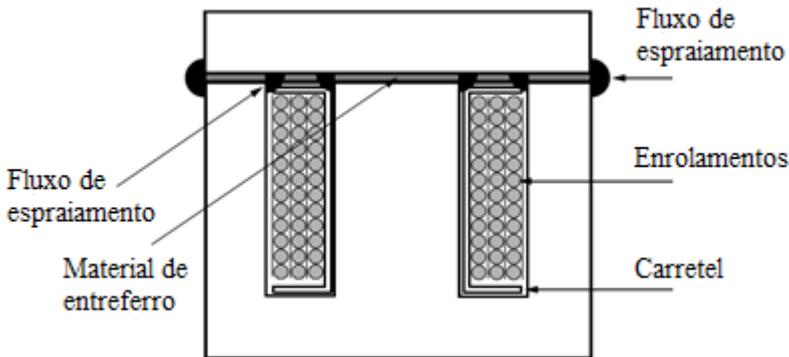
$$l_g = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A_c}{L} - \frac{MPL}{\mu_m} \text{ [cm]} \quad [19]$$

3.6 EFEITO DO FLUXO DE ESPRAIAMENTO

A Figura 14 mostra um indutor com núcleo magnético, formado por chapas EI, que está sendo excitado por uma corrente que flui pelos enrolamentos. Também é possível ver pela imagem que um fluxo de

espraiamento é formado nas proximidades no entreferro. Ao projetar um indutor, o efeito causado pela formação do fluxo de espraiamento deve ser levado em consideração, pois ele pode trazer uma série de problemas ao projeto.

Figura 14: Localização do fluxo de espraiamento em núcleo E-I.



Fonte: Adaptado de McLyman (2014).

O fluxo de espraiamento é maior em indutores construídos com núcleo de baixa permeabilidade e ele se eleva à medida que se aumenta a espessura do entreferro. A presença desse fluxo pode reduzir a eficiência do indutor ao induzir correntes nos enrolamentos, causando um superaquecimento nas vizinhanças do entreferro. Para evitar que isso aconteça, é indicado que o entreferro esteja espaçado dos enrolamentos por pelo menos dois comprimentos de l_g (KAZIMIERCZUK, 2014).

Segundo Kazimierczuk (2014), uma boa aproximação para que se possa calcular o fator de espraiamento é dada por [20], em que G (cm) é definido como o comprimento da janela do núcleo.

$$F = \left(1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln \left(\frac{2G}{l_g} \right) \right) \quad [20]$$

A redução da relutância equivalente do entreferro é um outro efeito do espraiamento de fluxo. Isso faz com que a indutância aumente (por um fator F) e, possivelmente, ocorra a saturação do núcleo. O valor de L' , em [21], leva em consideração a correção pelo fator de espraiamento e

desconsidera a baixa relutância do núcleo magnético comparada com a relutância do entreferro (MCLYMAN, 2011).

$$L' = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A_c \cdot F}{l_g} \text{ [Henry]} \quad [21]$$

3.6.1 Correção de parâmetros

Como há uma alteração considerável no valor da indutância ocasionada pelo fluxo de espreamento, se fazem necessárias algumas correções. Conforme [21], pode-se observar que duas alterações podem ser feitas para que se preserve a indutância desejada no início do projeto. Uma delas é diminuir o número de voltas do enrolamento. A segunda é aumentar a espessura do entreferro (KAZIMIERCZUK, 2014).

Como o número de voltas reduzido pode levar a uma redução tanto no peso, quanto no custo do indutor, opta-se pelo recálculo de N . A Equação 17 não pode ser utilizada para esse fim, pois não se conhece o novo valor da densidade de fluxo B . Assim, deve ser usada uma variação da equação [21], como mostrado em [22] (MCLYMAN, 2011).

$$N_{Novo} = \sqrt{\frac{L \cdot l_g}{\mu_0 \cdot A_c \cdot F}} \text{ [Voltas]} \quad [22]$$

Portanto, é possível encontrar o novo valor da densidade de fluxo B , usando [23], derivada de [17].

$$B_{Novo} = \frac{V \cdot (10^4)}{K_f \cdot N_{Novo} \cdot f \cdot A_c} \text{ [T]} \quad [23]$$

3.7 ESTIMATIVA DE PERDAS

O último passo para que se possa concluir o projeto do indutor é a realização de cálculos para se estimar as perdas com potência ativa e o consequente aumento na temperatura. Assim, é possível avaliar se os resultados estão dentro dos limites aceitáveis. Caso contrário, é necessário que seja feita uma reavaliação dos parâmetros.

Segundo McLyman (2011), as perdas totais do indutor podem ser calculadas pela soma das perdas individuais do enrolamento de cobre, P_c , do núcleo, P_n , e do entreferro, P_e .

$$P_{\Sigma} = P_c + P_n + P_e \quad [W] \quad [24]$$

As perdas no enrolamento do indutor são calculadas a partir da corrente I (A) definida no projeto, do comprimento médio da volta MLT (cm), encontrado para dado núcleo no Apêndice B, do número de voltas do enrolamento N_{Novo} (voltas) já calculado e da resistência do fio de cobre $\mu\Omega/cm$, como pode ser visto em [25] (MCLYMAN, 2011).

$$P_c = I^2 \cdot \left(MLT \cdot N_{Novo} \cdot \frac{\mu\Omega}{cm} \cdot 10^{-6} \right) \quad [W] \quad [25]$$

As perdas no núcleo podem ser calculadas a partir de informações fornecidas pelos fabricantes. A equação [26], de perdas no núcleo, leva em consideração a frequência de operação f (Hz), a densidade de fluxo B (T), o massa efetiva do núcleo W_{tfe} (Kg), fornecido pelos fabricantes e encontrado no Apêndice B, e os coeficientes “k”, “m” e “n”, que são fornecidos pelos fabricantes para determinados materiais de núcleo e podem ser encontrados no Anexo B (MCLYMAN, 2011).

$$P_n = k \cdot f^m \cdot B_{Novo}^n \cdot W_{tfe} \quad [W] \quad [26]$$

Diferentemente das perdas no núcleo e no enrolamento do indutor, as perdas do entreferro não ocorrem exatamente no material de entreferro. Isso acontece porque, ao aumentar a espessura l_g do material, o fluxo de espraiamento se eleva, atingindo o núcleo. Assim, correntes parasitas são induzidas nas lâminas, elevando a temperatura e causando as perdas P_e . A equação [27] é uma boa aproximação para as perdas ocasionadas pelo fluxo de espraiamento. É possível ver que P_e depende da espessura do entreferro l_g (cm), da frequência de operação f (Hz), da densidade de fluxo B_{Novo} (T) e da largura do tronco central da lâmina E (cm) (MCLYMAN, 2011 apud. RUBEN; STEPHENS, 1973).

$$P_e = 0,155 \cdot l_g \cdot f \cdot B_{Novo}^2 \cdot E \quad [W] \quad [27]$$

3.7.1 Elevação da Temperatura

A densidade de perda de potência por superfície é dada por [28], em que P_{Σ} (W) é a soma da perda de potência ativa do indutor e A_t (cm²) é a área de superfície radiante de calor. O valor de A_t é fornecido pelas

fabricantes e pode ser encontrado no Apêndice B (KAZIMIERCZUK, 2014).

$$\Psi = \frac{P_{\Sigma}}{A_t} \quad [W/cm^2] \quad [28]$$

Conhecendo o valor de Ψ , pode-se utilizar [29] para se encontrar a elevação de temperatura no indutor (KAZIMIERCZUK, 2014).

$$\Delta T = 450 \cdot (\Psi)^{0,826} \quad [^{\circ}C] \quad [29]$$

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A metodologia deste trabalho, apresentada no capítulo anterior, tem uma estrutura de projeto bem definida e pode ser vista no fluxograma encontrado no Apêndice C. Nele é possível ver que os valores de tolerância da densidade de fluxo magnético B e temperatura T são verificados para que o projeto respeite os limites de operação. Caso algum desses critérios não seja admitido, é preciso retornar ao início do projeto, onde alguns *trade-offs* talvez sejam necessários.

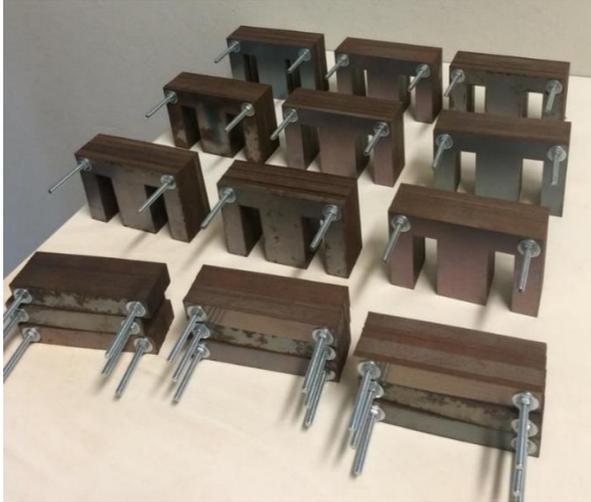
A primeira etapa apresentada pelo fluxograma do Apêndice C é a escolha de parâmetros. Por isso, o primeiro passo para o projeto é definir em que condições os indutores devem operar, para que sua aplicação no laboratório seja bem-sucedida.

4.1 LIMITAÇÕES DE PROJETO

Os indutores serão utilizados como carga trifásica para ensaios em uma máquina síncrona que possui potência de 5 kVA. Assim, a condição inicial para o projeto é que as cargas indutivas atendam a potência da máquina. Esse seria o ponto de partida para que os parâmetros pudessem ser selecionados. Porém, esse trabalho não seguiu a sequência natural apresentada pelo fluxograma do Apêndice C, isso porque não havia viabilidade econômica para a aquisição de materiais usados na confecção dos indutores.

O projeto da fabricação de indutores para o laboratório de máquinas só foi possível, em parte, pela ajuda de outros laboratórios, que forneceram alguns materiais. O primeiro exemplo é o Instituto de Eletrônica de Potência - INEP, do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica - EEL, da UFSC que, além de confeccionar os carretéis utilizados para a acomodação dos enrolamentos, forneceu grande quantidade de lâminas de ferro silício do tipo EI, conforme mostrado na Figura 15. A quantidade de lâminas era suficiente para a confecção de 10 indutores, mas, considerando que eles serão utilizados em um circuito trifásico, foi decidida a fabricação de apenas 9 indutores. Esta foi a primeira decisão de projeto.

Figura 15: Lâminas fornecidas pelo INEP.



Fonte: Autor (2019).

Verificando as dimensões das lâminas fornecidas, foi constatado, a partir do Apêndice B, que se trata da lâmina EI-138 e seus parâmetros estão reunidos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da lâmina EI-138.

Parâmetros	Valores
Largura do tronco central - E	3,493 cm
Comprimento da janela do núcleo - G	5,239 cm
Massa efetiva do núcleo - W_{tfe}	1786,0 g
Comprimento médio da volta - MLT	20,1 cm
Comprimento do caminho magnético - MPL	21,0 cm
Seção transversal do núcleo - A_c	12,201 cm ²
Área da janela do núcleo - W_a	9,148 cm ²
Produto de área - A_p	111,615 cm ⁴
Área de superfície radiante de calor - A_t	403 cm ²

Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

O fio de cobre esmaltado, usado nos enrolamentos dos indutores foi fornecido pelo laboratório LAESP, também do EEL. Havia alguns tamanhos de bitola para a escolha. Como o objetivo era produzir uma carga indutiva com a maior potência possível, foi escolhido o fio de maior seção nominal. Esse fio é o 21 AWG, que possui diâmetro de 0,72 mm. A tabela com as bitolas de fios de cobre disponíveis no mercado é mostrada no Anexo A.

A inviabilidade de aquisição de materiais fez com que a escolha dos mesmos fosse restrita aos disponíveis no momento. Isso se tornou uma limitação do projeto, pois os parâmetros de operação tiveram que ser escolhidos conforme o material, e não o contrário, como seria natural.

4.2 EXECUÇÃO DO PROJETO

Para que seja dado início ao projeto, é necessário que se definam os parâmetros do indutor a partir dos materiais selecionados. Então, um limite para a densidade de corrente J usada no projeto deve ser fixada para que se possa determinar a magnitude da corrente I com a qual o indutor irá operar. Segundo Martignoni (1991), quanto maior o volume do dispositivo, maiores são suas dificuldades de dissipação de calor. Então, ele sugere um valor de 3 A/mm² para a densidade de corrente. Já Kazimierczuk (2014) fornece o valor de 5 A/mm² como a máxima densidade de corrente para ser utilizada em condições naturais de ventilação. Portanto, foi escolhido o valor de 4 A/mm² para utilização neste projeto. Este é um valor intermediário aos os dois outros apresentados. Assim, ele oferece uma maior potência ao indutor e, ao mesmo tempo, não aquece os enrolamentos de forma excessiva.

Martignoni (1991) aponta que dispositivos magnéticos, como os indutores em questão, irão operar com os parâmetros nominais caso suas temperaturas não ultrapassem o valor de 40 °C. Dessa forma, esse mesmo valor foi escolhido como um dos limites de operação para a fabricação dos indutores.

Considerando lâminas de ferro silício de boa qualidade, é indicado para a densidade de fluxo magnético, $B_{máx}$, um valor máximo de 1,13 T (MARTIGNONI, 1991). Mas, devido às condições das lâminas usadas, foi indicado, pelo próprio INEP, que não se ultrapassasse o valor de 1 T.

Assim, considerando que os indutores serão excitados por uma tensão senoidal de 60 Hz, os valores dos parâmetros iniciais para a confecção dos indutores são mostrados na Tabela 2. O valor da permeabilidade magnética foi retirado do Apêndice A.

Tabela 2: Parâmetros e limites operacionais iniciais.

Parâmetros e limites	Valores
Tensão nominal, V	220 V
Corrente nominal, I	1,5 A
Frequência de operação, f	60 Hz
Permeabilidade magnética (Fe-Si), μ_m	1500
Fator de utilização da janela, K_u	0,4
Coefficiente da forma da onda, K_f	4,44
Densidade de corrente máxima, $J_{m\acute{a}x}$	4 A/mm ²
Densidade de fluxo magnético máxima, $B_{m\acute{a}x}$	1,0 T
Aumento de temperatura máximo, $T_{m\acute{a}x}$	40 °C

Fonte: O autor (2019).

Utilizando os dados de tensão e corrente apresentados, é possível calcular, através de [30] e [31], uma estimativa para a potência aparente e a indutância que podem ser obtidas por cada um dos indutores. A potência aparente, S, e a indutância, L, terão os valores de 330 VA e 389,24 mH, respectivamente.

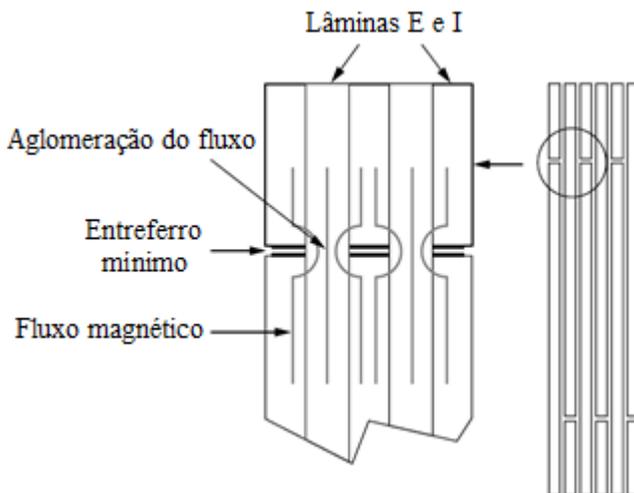
$$S = VI \quad [30]$$

$$L = \frac{V}{I(2\pi f)} \quad [31]$$

Com todos os parâmetros definidos e materiais escolhidos, é possível calcular o número de voltas do enrolamento usando [17], que fornece o valor de 677 voltas. Esse valor é apenas uma aproximação inicial, que deve ser recalculado posteriormente devido ao cálculo da espessura do entreferro. Mas, mesmo assim, foi feito um primeiro indutor de teste com 677 voltas e, ao acomodar o núcleo no carretel, foi usada a técnica da laminação intercalada, em que há uma alternância entre as posições dos Es e Is das lâminas, como pode ser visto na Figura 16. Nesse caso, não há nenhum material no entreferro, pois ele tem apenas um valor mínimo de contato entre as lâminas. O fluxo, que procura um caminho de

maior permeabilidade, irá saltar para a lâmina vizinha e isso acarretará em uma aglomeração de fluxo na região do entreferro (MCLYMAN, 2011).

Figura 16: Aglomeração de fluxo em laminação intercalada.

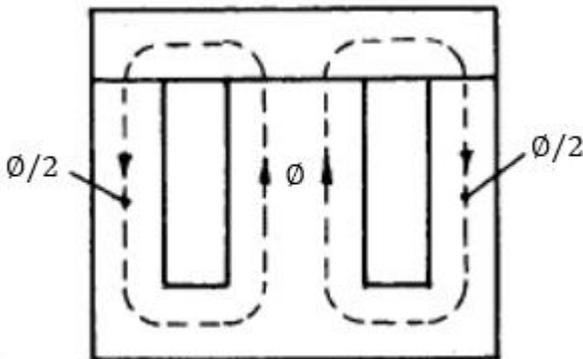


Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

Esse arranjo foi feito na tentativa de desconsiderar o uso de qualquer material no entreferro para que se evitassem maiores perdas por espraçamento. Infelizmente, sem esse material, a relutância do núcleo é muito baixa e o indutor teve seu núcleo saturado com uma corrente de excitação muito baixa. Além disso, outro problema foi detectado nos testes que se sucederam: a densidade de fluxo magnético efetiva do núcleo era sempre ligeiramente maior que aquela usada para o cálculo inicial de N . Isso acontece devido às perdas por espraçamento e o conseqüente recálculo de N . Por isso, foi usado um valor menor de B para que os cálculos fossem realizados e o valor escolhido foi de 0,85 T (o número de voltas inicial também foi recalculado, com valor de 796 voltas).

A equação [19] é usada para o cálculo da espessura do entreferro que deve ser utilizado. O valor encontrado foi de 2,35 mm, mas o material usado nesse projeto deve ter a metade desse valor, isso porque os núcleos EI tem duas pernas e o fluxo total que é produzido no tronco central se divide em duas componentes, como visto na Figura 17.

Figura 17: Caminho do fluxo magnético.



Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

A partir da espessura do entreferro, é possível calcular o fator de espraioamento F , conforme [20]. O resultado encontrado para o valor adimensional foi de 1,256. Após a verificação do efeito do espraioamento no indutor, é necessário que se refaça o cálculo do número de voltas do enrolamento através de [22]. Assim, o valor definitivo para o número de voltas que devem ser aplicadas para a formação do enrolamento é de 691. Conseqüentemente, o valor de densidade de fluxo magnético se torna 0,98 T [23], valor aceitável sabendo que o $B_{\text{máx}}$ foi definido como 1 T.

Conforme pode ser visto no Apêndice C, a primeira verificação de limite foi aceita e o próximo passo é fazer a estimativa de perdas no enrolamento, no núcleo e no entreferro, usando [25], [26] e [27], respectivamente. Assim, consultando os Anexos A e B, encontram-se as estimativas de 13,09 W de perdas no enrolamento, 0,93 W de perdas no núcleo e 7,36 W de perdas no entreferro. A soma desses valores dá 21,38 W de perdas totais em cada indutor.

O aumento de temperatura decorrente dessas perdas foi calculado em 39,8 °C com o uso de [28] e [29]. Isso mostra que o limite estabelecido no início do projeto foi respeitado.

4.2.1 Construção dos indutores

Após confecção dos carretéis pelo INEP, pôde ser feito o enrolamento do fio esmaltado de cobre com o uso da máquina de enrolamento linear (LW 16, RUFF, Alemanha), disponível no LAESP (Figura 18). A escolha da utilização da máquina teve como objetivo obter

uma melhor acomodação dos enrolamentos nos carretéis, que resulta em um valor adequado para o fator de utilização.

Figura 18: (a) Máquina de enrolamento linear. (b) Carretel bobinado.



Fonte: Autor (2019).

Para preenchimento do entreferro, foi utilizado um tipo de papel mais espesso, conhecido como “papel paraná”. E a fixação das chapas EI foi feita com a utilização de cantoneiras de alumínio, nas quais foram feitos dois furos com uma furadeira de bancada (Figura 19). O primeiro furo foi feito com o diâmetro exato para passagem dos parafusos, já o segundo foi feito com o diâmetro ligeiramente maior para que pudesse ser feito um ajuste final.

Figura 19: Cantoneira.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 20 mostra os indutores prontos após realizadas todas as etapas de confecção descritas anteriormente.

Figura 20: Os nove indutores fabricados.



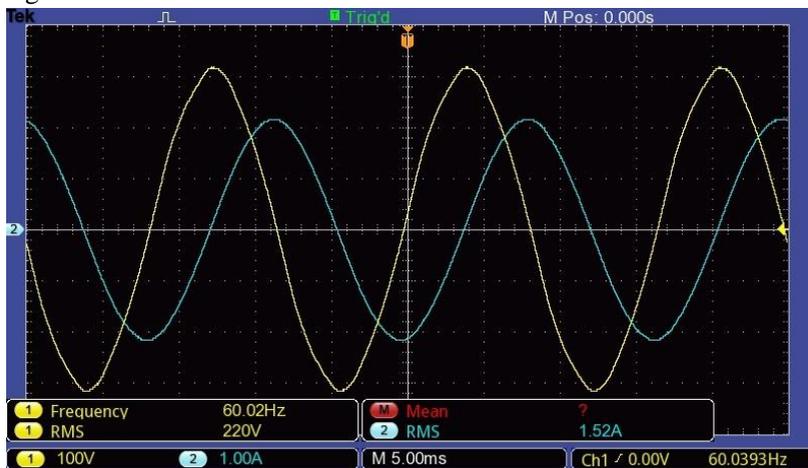
Fonte: Autor (2019).

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A calibração final dos indutores foi feita com o uso de um amperímetro, um voltímetro e um wattímetro. Foi aplicada a tensão nominal nos terminais dos indutores e, ao mesmo tempo em que eram feitas as medições da corrente e da potência, a espessura do entreferro era ajustada, para que as indutâncias dos nove indutores ficassem com valores o mais próximos possíveis uns dos outros. Esse ajuste fino é possível porque, ao regular a espessura do entreferro, pode ser feito um controle sobre a relutância do circuito magnético do indutor, alterando sua indutância.

Em seguida, os indutores foram ligados à um osciloscópio para que as formas de onda pudessem ser observadas e as medições fossem refeitas. A Figura 21 mostra as formas de ondas de um dos indutores analisados. Nela é possível perceber a defasagem de aproximadamente 90° entre a tensão e a corrente.

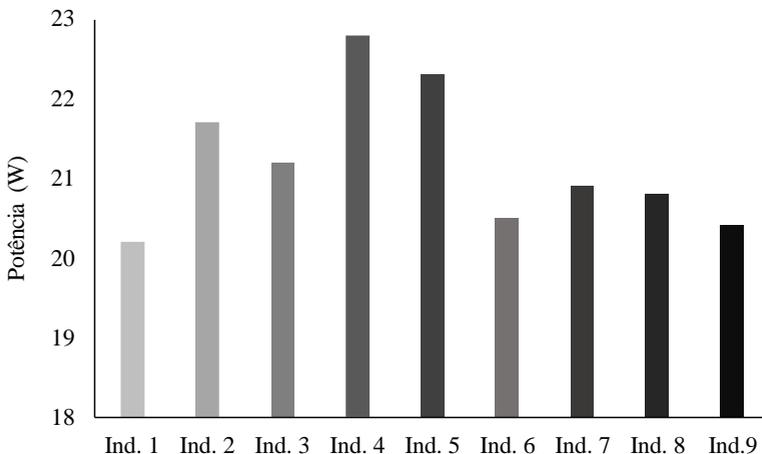
Figura 21: Forma de ondas de um dos indutores.



Fonte: Autor (2019).

Ao estimar as perdas dos indutores, na fase de dimensionamento, foi obtido o valor de 21,38 W. A Figura 22 mostra, na prática, a diferença da dissipação de potência ativa entre os indutores. O valor médio de perdas em cada um é $21,20 \pm 0,89$ W. Assim, pode-se calcular o valor médio do fator de potência entre os indutores como sendo 0,06 (indutivo).

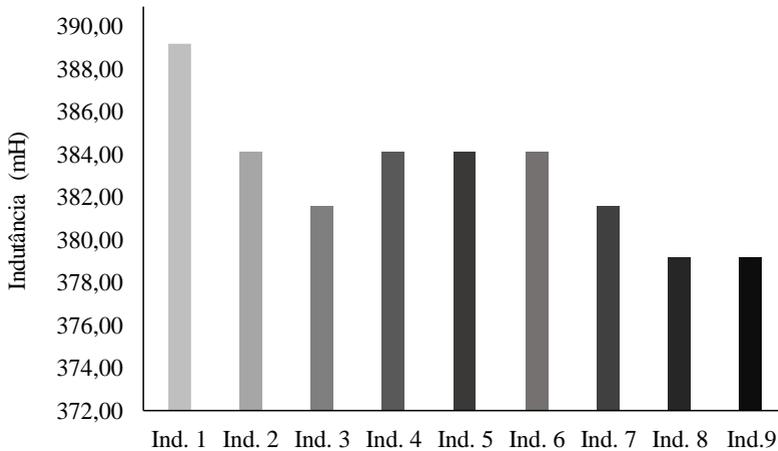
Figura 22: Variação das perdas nos indutores.



Fonte: Autor (2019).

A indutância desejada para os indutores era de 389 mH e, como pode ser visto pela Figura 23, houve uma grande variação entre as indutâncias efetivas dos indutores confeccionados. O valor médio entre eles é igual a $383,02 \pm 3,12$ mH.

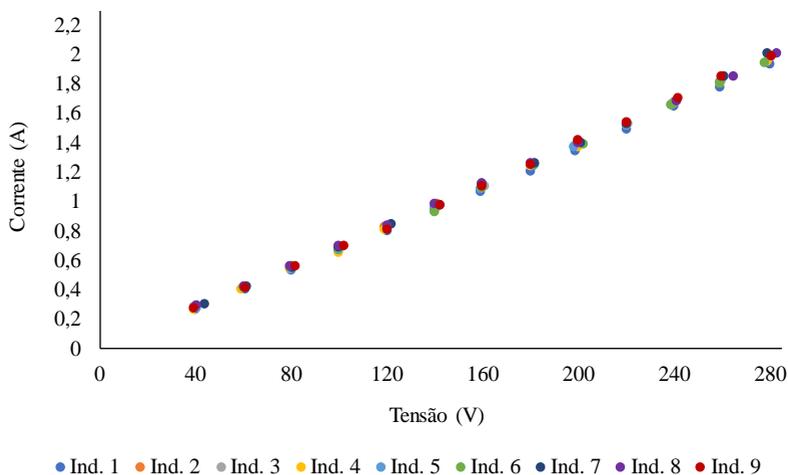
Figura 23: Variação das indutâncias dos indutores.



Fonte: Autor (2019).

Através de um transformador de tensão variável, um Varivolt, foi possível fazer um incremento gradual de tensão nos indutores para se avaliar o comportamento da corrente. O resultado é mostrado na Figura 24.

Figura 24: Comportamento dos indutores sob excitação.



Fonte: Autor (2019).

Pode-se observar que a resposta da corrente sob a aplicação de uma tensão tem um efeito quase linear para todos os indutores, mesmo com a magnitude da corrente um terço acima da corrente nominal. Consequentemente, não foi possível a observação da ocorrência de saturação no núcleo. Isso se deve ao fato da escolha de projeto em diminuir a densidade de fluxo magnético de operação devido à qualidade das lâminas.

Por fim, a resistência de isolamento entre o enrolamento e a carcaça dos indutores foi medida através de um megômetro e todos eles apresentaram resistências superiores a 2.000 M Ω . Isso mostra que há isolamento entre os enrolamentos e os núcleos de cada indutor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do estudo dos materiais que compõe o indutor e de suas características quando em operação, foi possível verificar que existem vários meios de se controlar não só a indutância final, mas também minimizar as perdas resultantes. Com a realização de ajustes na fase de projeto, é possível, a partir de um equilíbrio na escolha de material e montagem, alcançar grandes ganhos quanto ao volume, custo e eficiência final dos indutores.

Apesar de o método do produto de área se apresentar como uma estratégia adequada para a escolha das lâminas, neste trabalho elas já haviam sido pré-determinadas pela dependência da utilização das lâminas disponíveis no momento. Essas lâminas não eram novas e se revelaram como uma dificuldade no projeto, pois a saturação do núcleo ocorria com muita facilidade, não sendo possível a exploração da densidade de fluxo para a redução das espiras, acarretando em um aumento de temperatura no enrolamento e conseqüente elevação do fator de potência. Além disso, a diferença entre as condições das lâminas levou a uma assimetria entre as indutâncias dos nove indutores fabricados.

O ajuste na espessura de entreferro foi de grande utilidade na calibração dos indutores, mas essa variável também traz grandes problemas ao projeto devido ao fluxo de espraiamento e se torna um desafio de projeto manter o entreferro com espessura mínima.

Mesmo com as dificuldades identificadas, a confecção dos indutores se mostrou bem-sucedida ao apresentar valores de indutância e perdas muito próximos dos esperados. Evitar a variação de valores entre os diferentes indutores foi uma tarefa difícil, devido às diferentes condições das lâminas. Pôde-se perceber também que o método escolhido para o dimensionamento dos dispositivos magnéticos apresentou resultados satisfatórios e suas estimativas foram muito eficazes.

A complicação no projeto, pela inviabilidade de aquisição de materiais, fez com que a potência esperada não fosse atingida, porém o baixo fator de potência apresentado pelos indutores, somado ao fato de que o laboratório dispõe de três outros indutores para uso, torna possível a aplicação desse material no laboratório. Até a conclusão deste trabalho, o banco de cargas não havia sido concluído e, por isso, não foi possível fazer ensaios com o gerador síncrono.

Portanto, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação do comportamento dos indutores quanto aos fatores térmicos quando em operação e o projeto de um sistema capaz de fazer o

chaveamento de cargas indutivas, capacitivas e resistivas para ser implementado no banco de cargas e trazer maior praticidade aos ensaios.

6 REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5ª ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013.

BOSSCHE, Alex Van den; VALCHEV, Vencislav Cekov. **Inductors and Transformers for Power Electronics**. 1ª ed. Flórida – EUA: CRC Press, 2005.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5ª ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013.

GASPAR, Alberto. **Compreendendo a Física: Eletromagnetismo e física moderna**. 2ª ed. São Paulo: Editora Ática, 2013.

GRANDI, Gabriele; KAZIMIERCZUK, Marian K.; MASSARINI, Antonio; REGGIANI, Ugo; SANCINETO, Giuseppe. Model of Laminated Iron-Core Inductors for High Frequencies. **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 40, nº 4., 2004.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da Física: Eletromagnetismo**. Vol. 3. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HAYT, William Hart; BUCK, John A. **Engineering Electromagnetics**. 8ª ed. Nova Iorque - EUA: Mc Graw Hill, 2012.

HURLEY, William G.; Wölfle, W. H. **Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, design and applications**. 1ªed. Reino Unido: Wiley, 2013.

JANGHORBAN, Samira. **Desing of inductors for power converters operating at intermediate switching frequencies**. Tese de doutorado. 2016. School of Engineering. RMIT University Australia, 2016.

KAZIMIERCZUK, Marian K. **High-Frequency Magnetic Components**. 2ª ed. Reino Unido: Wiley, 2014.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores**. 8ª ed. São Paulo: Globo, 1991.

MCLYMAN, Colonel Wm. T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 4ª ed. Flórida - EUA: CRC Press, 2011.

MEADE, Russel L. **Foundations of Electronics**. 4ª ed. Nova Iorque – EUA: Delmar Learning, 2002.

MURRAY, Thomas J. Poly(amide-imides): Wire enamels with excellent thermal and chemical properties. **Macromolecular Materials and Engineering**, 293, 350-360, 2008.

SADIKU, Matthew N. O. **Elements of Electromagnetics**. 6ª ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 2015.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. Jr. **Eletromagnetismo**. Vol. 3. 5ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

SHA, Zhanyou; WANG, Xiaojun; WANG, Yanpeng; MA, Hongtao. **Optimal design of switching power supply**. 1ª ed. Reino Unido: Wiley, 2015.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III: Eletromagnetismo**. 14ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

APÊNDICE A

Características dos materiais do núcleo magnético.

Nome do material	Permeabilidade μ	Densidade de Fluxo - B	Frequência Operacional - f
Ligas de Ferro			
Magnésil	1.500	1,5 – 1,8 T	< 2 kHz
Supermendur	800	1,9 – 2,2 T	<1 kHz
Orthonol	2.000	1,42 – 1,58 T	< 2 kHz
Sq. permalloy	12.000 – 100.000	0,66 – 0,82 T	< 25 kHz
Supermalloy	10.000 – 50.000	0,65 – 0,82 T	< 25 kHz
Amorfo			
2605-SC	3.000	1,5 – 1,6 T	< 250 kHz
2714A	20.000	0,5 – 0,58 T	< 250 kHz
Vitro perm 500	30.000	1,0 – 1,2 T	< 250 kHz
Ferrite			
MnZn	750 – 15.000	0,3 – 0,5 T	< 2 MHz
NiZn	15 – 1.500	0,3 – 0,5 T	< 100 MHz

Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

APÊNDICE B

Tabela 1: Dados de projeto para lâminas “EI”.

Placas N°	W_{tf} g	MLT cm	MPL cm	A_c cm²	W_a cm²	A_p cm⁴	A_t cm²
EI-100	676,0	14,8	15,2	6,452	4,839	31,219	212,9
EI-112	976,0	16,5	17,2	8,162	6,124	49,987	269,4
EI-125	1343,0	18,3	19,1	10,081	7,560	76,210	333,0
EI-138	1786,0	20,1	21,0	12,201	9,148	111,615	403,0
EI-150	2334,0	22,0	22,9	14,516	10,887	158,037	479,0
EI-175	3711,0	25,6	26,7	19,758	14,818	292,774	652,0
EI-225	7976,0	32,7	34,3	32,661	24,496	800,069	1078,0

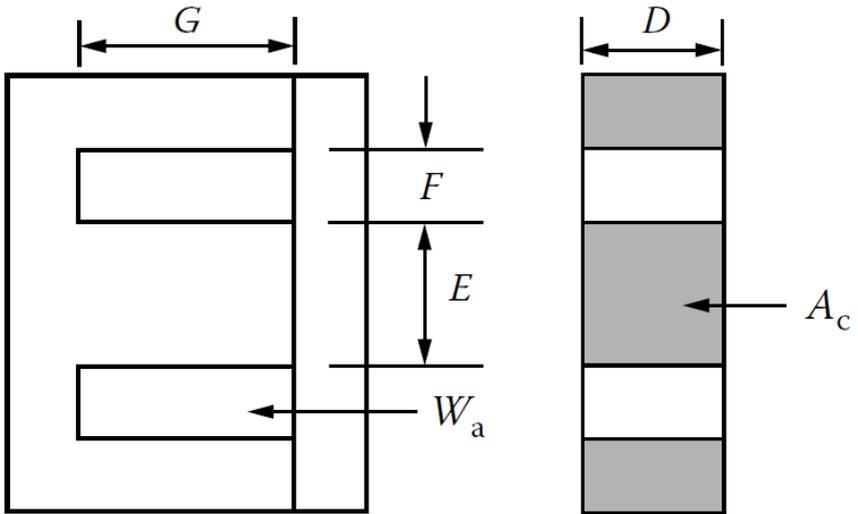
Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

Tabela 2: Dados dimensionais para lâminas “EI”.

Placas N°	D cm	E cm	F cm	G cm
EI-100	2,540	2,540	1,270	3,810
EI-112	2,857	2,857	1,429	4,286
EI-125	3,175	3,175	1,588	4,763
EI-138	3,493	3,493	1,746	5,239
EI-150	3,810	3,810	1,905	5,715
EI-175	4,445	4,445	2,223	6,668
EI-225	5,715	5,715	2,858	8,573

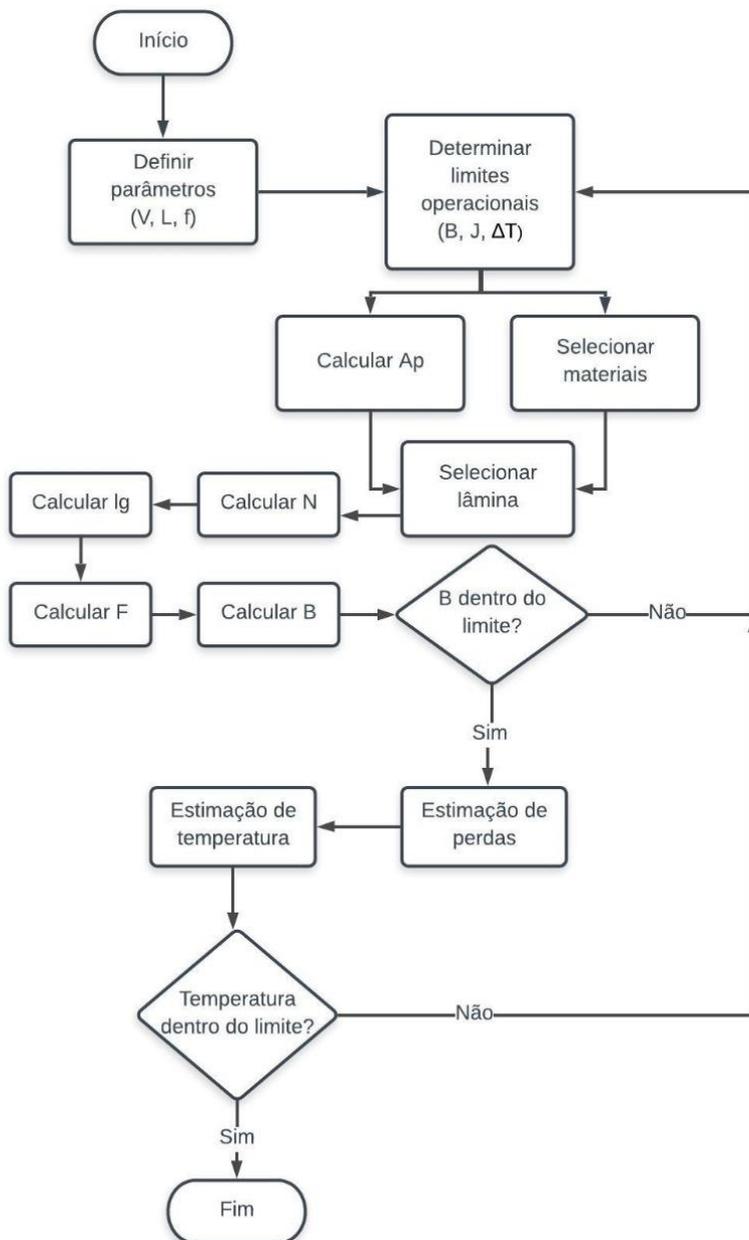
Fonte: Adaptado de McLyman (2011).

Figura 1: Formato das lâminas “EP”.



Fonte: McLyman (2011).

APÊNDICE C



ANEXO A

Tabela AWG com bitola equivalente no padrão métrico.

Bitola	Diâmetro	Seção	Resistência	Corrente
	aproximado [mm]	aproximada [mm ²]	aproximada ¹ [ohm/m]	máxima ² [A]
40 AWG	0,08	0,005	3,4	-
39 AWG	0,09	0,006	2,7	-
38 AWG	0,1	0,008	2,2	-
37 AWG	0,11	0,01	1,7	-
36 AWG	0,13	0,013	1,4	-
35 AWG	0,14	0,016	1,1	1
34 AWG	0,16	0,02	0,86	-
33 AWG	0,18	0,025	0,68	-
32 AWG	0,2	0,032	0,54	-
31 AWG	0,23	0,04	0,43	-
30 AWG	0,26	0,051	0,34	2
29 AWG	0,29	0,064	0,27	-
28 AWG	0,32	0,081	0,21	-
27 AWG	0,36	0,1	0,17	-
26 AWG	0,41	0,13	0,13	-
25 AWG	0,46	0,16	0,11	-
24 AWG	0,51	0,21	0,084	4
23 AWG	0,57	0,26	0,067	-
22 AWG	0,64	0,33	0,053	6
21 AWG	0,72	0,41	0,042	-
20 AWG	0,81	0,52	0,033	9
19 AWG	0,91	0,65	0,026	-
18 AWG	1	0,82	0,021	11
17 AWG	1,2	1	0,017	-
16 AWG	1,3	1,3	0,013	13
15 AWG	1,5	1,7	0,01	-
14 AWG	1,6	2,1	0,0083	16
13 AWG	1,8	2,6	0,0066	-
12 AWG	2	3,3	0,0052	22
11 AWG	2,3	4,2	0,0041	-
10 AWG	2,6	5,3	0,0033	35

Fonte: Eletric Vale.

ANEXO B

Coeficiente de perda no núcleo para núcleos de liga de ferro

Core Loss Equation Factors					
Iron Alloy					
Material	Thickness mil's	Frequency Range	Coefficient k	Coefficient (m)	Coefficient (n)
50/50 Ni-Fe	1.00		0.0028100	1.210	1.380
	2.00		0.0005590	1.410	1.270
	4.00		0.0006180	1.480	1.440
Supermendur	2.00		0.0236000	1.050	1.300
	4.00	400 Hz	0.0056400	1.270	1.360
Permalloy 80	1.00		0.0000774	1.500	1.800
	2.00		0.0001650	1.410	1.770
	4.00		0.0002410	1.540	1.990
Supermalloy	1.00		0.0002460	1.350	1.910
	2.00		0.0001790	1.480	2.150
	4.00		0.0000936	1.660	2.060
Silicon	1.00		0.0593000	0.993	1.740
	2.00		0.0059700	1.260	1.730
	4.00		0.0035700	1.320	1.710
	12.00		0.0014900	1.550	1.870
	14.00		0.0005570	1.680	1.860
	24 M27 non-or	50-60 Hz	0.0386000	1.000	2.092

Fonte: Adaptado de McLyman (2011).