

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

WILLIAM ROCHA TAVARES

**MELHORIA DO RENDIMENTO DE TRANSFORMADOR COM BASE EM
ELEMENTOS DE PROJETO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

WILLIAM ROCHA TAVARES

**MELHORIA DO RENDIMENTO DE TRANSFORMADOR COM BASE
EM ELEMENTOS DE PROJETO**

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: Prof. Me. Jonatas Policarpo Américo

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **MELHORIA DO RENDIMENTO DE TRANSFORMADOR COM BASE EM ELEMENTOS DE PROJETO**, do aluno **WILLIAM ROCHA TAVARES** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **135** de 2017.

Fizeram parte da banca os professores:

Jonatas Policarpo Américo

Jorge Luis Roel Ortiz

Géremi Gilson Dranka

Marcelo Gonçalves Trentin

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Adelia e Josenildo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por terem me ofertado a oportunidade do ensino, pela compreensão e acreditarem na minha capacidade. E aos meus irmãos e cunhados pelos mais diversos incentivos e apoio em toda a minha trajetória acadêmica.

Agradeço também aos professores Jonatas e Jorge, pela oportunidade, pelos inúmeros direcionamentos de estudo, pela confiança e apoio na orientação. E aos amigos que estiveram presentes em apoio e descontração.

EPÍGRAFE

É um erro capital teorizar antes de ter os dados. Insensivelmente, começa-se a distorcer os fatos para adaptá-los às teorias, em vez de fazer com que as teorias se adaptem aos fatos. Sherlock Holmes, em *A scandal in Bohemia*, de Conan Doyle (1891).

RESUMO

TAVARES, William Rocha. Estudo sobre a melhoria do rendimento de transformador com base em elementos de projeto. 2017. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho apresenta um algoritmo para um projeto de transformador de pequena potência (até 1,5 kVA), monofásico com um primário e um secundário, no qual permite-se analisar os resultados possíveis. Será discutida a equação do rendimento e seu estudo em função de parâmetros construtivos, como também a análise das perdas envolvidas no processo de transformação, ou seja, a partir das massas do cobre (dos enrolamentos) e do ferro (do núcleo). Serão demonstrados os passos a serem avançados para determinar os valores dos parâmetros construtivos, como por exemplo a seção geométrica e magnética do núcleo, a área da janela do núcleo e a área ocupada pelos enrolamentos. Uma abordagem de um projeto base servirá para validação do algoritmo projetado; como também, será exposto os resultados do projeto a partir do algoritmo implementado com os mesmos dados de placa (tensão de entrada, tensão de saída, frequência e potência) utilizados no projeto base. Por fim, de posse dos resultados e discussões verificou-se a validade do algoritmo e a possibilidade de utilizar este trabalho para estudos futuros.

Palavras-chave: Algoritmo. Perdas no Cobre. Perdas Magnéticas. Projeto de Transformador. Rendimento.

ABSTRACT

TAVARES, William Rocha. Estudo sobre a melhoria do rendimento de transformador com base em elementos de projeto. 2017. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This work presents an approach an algorithm for a transformer project of a small power (up to 1.5 kVA), single-phase with one primary and one secondary, in which it is possible to analyze the possible results. It will be discussed the efficiency equation and its function of constructive parameters, as well as the analysis of the losses involved in the transformation process, i.e., generated by the masse of copper (windings) and iron (from the core). The steps to determine the values of the constructional parameters will be presented such as the geometric and magnetic section of the core, the core window area and the area filled by the windings. A base-case study will be utilized to validate the algorithm developed. Furthermore, the results of the project will be presented from the implemented algorithm using the same transformer nameplate data (input voltage, output voltage, frequency and power), used in the base project. Finally, with the results and discussions, verified the validity of the algorithm and the possibility of using this work for future studies.

Keywords: Algorithm. Copper Losses. Magnetic Losses. Transformer Project. Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação de um transformador monofásico.	20
Figura 2 - Núcleo de um transformador com interação dos fluxos mútuo e concatenado.	25
Figura 3 - Núcleo magnético com formação das correntes de Foucault.	29
Figura 4 - Fenômenos de excitação. (a) Tensão, fluxo e corrente de excitação; (b) laço de histerese.	30
Figura 5 - Núcleo do tipo envolvido.	33
Figura 6 - Núcleo do tipo envolvido: (a) divisão dos enrolamentos; (b) diagrama em corte.	34
Figura 7 - Núcleo do tipo envolvente.	34
Figura 8 - Núcleo do tipo envolvente: (a) disposição dos enrolamentos; (b) diagrama em corte.	35
Figura 9 - Legenda do código de cores e formas utilizados no projeto do algoritmo.	43
Figura 10 - Visão geral do algoritmo.	44
Figura 11 - Fluxograma para obtenção dos dados provisórios.	45
Figura 12 - Lâminas do tipo EI.	45
Figura 13 - Fluxograma para obtenção dos dados da lâmina.	47
Figura 14 - Área do carretel deve ter dimensão suficiente para Seção geométrica.	47
Figura 15 - Fluxograma para obtenção das dimensões do carretel.	48
Figura 16 - Fluxograma para obtenção das dimensões finais da lâmina e do núcleo.	49
Figura 17 - Determinação do número de espiras dos enrolamentos primário e secundário.	50
Figura 18 - Metodologia para determinar a seção dos condutores.	51
Figura 19 - Metodologia para determinar as perdas no ferro.	52
Figura 20 - Metodologia para obtenção das perdas nos enrolamentos.	53
Figura 21 - Metodologia para verificar a possibilidade de execução.	54
Figura 22 - Metodologia para o cálculo final da Potência de entrada.	55
Figura 23 - Metodologia para obtenção do rendimento.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de densidade de corrente por potência.	39
Tabela 2 - Lâminas padronizadas.	40
Tabela 3 - Dimensões da geometria do núcleo.....	57
Tabela 4 - Quantidade de lâminas para o núcleo.....	58
Tabela 5 - Número de espiras – primário e secundário.	58
Tabela 6 - Dados físicos do núcleo.	59
Tabela 7 - Valores de massa do cobre.....	59
Tabela 8 - Massa do transformador.	59
Tabela 9 - Possibilidade de execução.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
FEM	Força Eletromotriz

LISTA DE SÍMBOLOS

$v_1(t)$	Tensão em corrente alternada aplicada no primário do transformador
$v_2(t)$	Tensão em corrente alternada aplicada no secundário
$i_1(t)$	Corrente alternada aplicada no primário
$i_2(t)$	Corrente alternada aplica no secundário
N_1	Número de espiras do primário
N_2	Número de espiras do secundário
$e_{ind}(t)$	Tensão induzida
$e_1(t)$	Tensão induzida no primário
$e_2(t)$	Tensão induzida no secundário
$\phi_m(t)$	Fluxo mútuo magnético variante no tempo
ω	Frequência angular
λ	Fluxo concatenado na espira
N	Espira de uma bobina
λ	Fluxo concatenado
$\overline{\varphi}$	Fluxo médio para cada espira
$\overline{\varphi}_1$	Fluxo médio no primário
$\overline{\varphi}_2$	Fluxo médio no secundário
φ_{D1}	Fluxo disperso do primário
φ_{D2}	Fluxo disperso do secundário
f	Frequência aplicada ao sistema
$P_{Condutor}$	Perdas no condutor por efeito Joule
R	Resistência do condutor
I	Corrente contínua aplicada no condutor
ρ	Resistividade do material do condutor
l	Comprimento do condutor
A	Área da seção transversal do condutor
R_{AC}	Resistência medida em corrente alternada

R_{CC}	Componente da resistência em corrente contínua
$R_{Foucault}$	Componente da resistência devido a corrente de Foucault
$R_{Pelicular}$	Componente da resistência devido ao efeito pelicular
ζ	Densidade de corrente
R_1	Resistência do enrolamento primário
R_2	Resistência do enrolamento secundário
$M_{Condutor}$	Massa do condutor
P_F	Perdas por corrente de Foucault
k_F	Constante de proporcionalidade para perdas por corrente de Foucault
M_{ferro}	Massa do ferro
γ_{ferro}	Densidade específica do ferro
B	Indução magnética em seu valor eficaz
d	Espessura das lâminas que compõem o núcleo
i_φ	Corrente necessária para produzir fluxo magnético
P_H	Perdas por histerese magnética
k_S	Coefficiente de Steinmetz
P_{Ferro}	Perdas no ferro
$P_{Dispersão}$	Perdas por fluxo de dispersão
k_{disp}	Constante relacionada ao efeito do fluxo de dispersão
Ψ_{ferro}	Coefficiente para as perdas totais no ferro
$\cos(\theta)$	Fator de potência da carga
Δ	Constante de proporcionalidade relacionada ao isolante entre as lâminas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	19
2.1	TRANSFORMADOR - DEFINIÇÃO	19
2.2	TRANSFORMADOR IDEAL	20
2.3	TRANSFORMADOR REAL	23
2.3.1	Perdas	26
2.3.1.1	Perdas no cobre	26
2.3.1.2	Correntes de Foucault	28
2.3.1.3	Perda por histerese	30
2.3.1.4	Fluxo de dispersão	31
2.3.1.5	Perda no ferro – fins industriais	31
2.4	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	32
2.4.1	Tipos de núcleo	32
2.4.1.1	Núcleo do tipo envolvido	33
2.4.1.2	Núcleo do tipo envolvente	34
2.4.2	Materiais usados no núcleo	35
2.5	RENDIMENTO	36
3	PROJETO DE TRANSFORMADORES	38
3.1	INTRODUÇÃO	38
3.2	PROJETO – CASO BASE	38
3.2.1	Cálculos para o projeto	38
4	ALGORITMO PROJETADO	43
4.1	INTRODUÇÃO	43
4.2	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO	44
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1	VALIDAÇÃO DO ALGORITMO	57
5.1.1	Comparação de valores	60
5.2	DIVERSIDADE DE APLICAÇÕES (PROJETO SECUNDÁRIO)	61
6	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO O ALGORITMO	69
	ANEXO A – DIMENSÕES DAS LÂMINAS PARA TRANSFORMADORES	70
	ANEXO B – DADOS DAS DIMENSÕES DOS CARRETÉIS	71

ANEXO C – INFORMAÇÕES DO CONDUTOR DE COBRE	72
ANEXO D – DADOS DAS LÂMINAS DE GRÃO ORIENTADO	72
ANEXO E – DADOS DAS LÂMINAS DE GRÃO NÃO-ORIENTADO	73

1 INTRODUÇÃO

O transformador é referido como um equipamento sem partes móveis, que tem como objetivo transferir energia elétrica, por meio de ação indutiva eletromagnética, de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário, terciário), pode ou não alterar o valor da tensão e corrente em um determinado circuito de corrente alternada, ou modificar os valores de impedância do circuito elétrico, de maneira a manter a mesma frequência. Os enrolamentos que determinam primário e secundário são conectados por fluxo magnético comum, sem conexão elétrica entre eles; o fluxo magnético pode circular pelo ar, quando não há um núcleo, porém, esta prática é pouco utilizada pois há grande dispersão do fluxo magnético, ou por um núcleo de material ferromagnético onde a concentração do fluxo magnético é maior, diminuindo assim a dispersão (CHAPMAN, 2013) (PAULINO, 2014).

O transformador possibilita a transmissão e distribuição de energia elétrica de forma simples e barata, pois permite elevar o nível da tensão até um valor que a corrente seja a menor possível de modo a reduzir as perdas no processo interconexão de sistemas. Em sistemas elétricos de potência o transformador, em geral, opera de duas maneiras: da geração para a transmissão opera em modo elevador de tensão, e da transmissão para distribuição opera em modo abaixador de tensão. Desta forma, é visto como necessária e indispensável a utilização de transformadores para conduzir energia elétrica até o consumidor final, de modo eficiente e econômico (MEHTA; PATEL, 2014).

É inegável a importância de transformadores quando abordado em níveis de tensão, pois este equipamento está presente desde sistemas elétricos de potência, nos quais são utilizados transformadores de grande porte (na ordem de MVA), como também, em sistemas elétricos e eletrônicos, podendo citar os transformadores para comando¹ e transformadores para fontes de alimentação de equipamentos eletrônicos, os quais possuem baixas potências (até 5 kVA) (DELGADO, 2010) (SIEMENS, 2017).

¹ Transformadores monofásicos utilizados em acionamentos elétricos (SIEMENS, 2017).

O uso generalizado do transformador é evidenciado no reflexo econômico acentuado da sociedade, desta forma, busca-se critérios cada vez mais avançados de dimensionamento e construção, de forma a conciliar a redução de custos e aumento na segurança operacional; ou ainda, verifica-se que o projeto de transformadores é considerado um problema de otimização, determinada em geral, por minimizar custos de material, produção, e perdas, de forma a maximizar rendimento, em que técnicas de otimização são usadas para determinar a configuração ótima dos parâmetros de geometria do transformador (ESEOSA, 2015) (MEHTA; PATEL, 2014) (RIES, 2007).

Neste contexto, estudos detalhados são realizados para elevar a eficiência dos transformadores, como também, analisar as propriedades físicas dos componentes, técnicas construtivas (sob a responsabilidade de atender requisitos legais de legislação e normas técnicas), e outros possíveis fatores relacionados com a execução do projeto. Verifica-se também, que realizar o projeto de transformadores envolve o processo de otimização, em que se faz necessário analisar um conjunto de informações e cálculos, tornando-se, uma fonte para uma gama de resultados, os quais, é possível obter o ótimo com base em seu propósito de utilização, pois o resultado ótimo, depende das variáveis que são consideradas importantes em uma determinada aplicação.

Para o presente trabalho será abordado o estudo para o projeto de transformadores, com único primário e único secundário, de baixa potência (até 1,5 kVA), potência elevadas abrangem mais fatores e detalhes em seus cálculos que não serão abordados.

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com Ries (2007), o projeto de transformadores é, em sua essência, um processo fortemente iterativo, pois é necessário atender as mais diversas especificações que visam obter um equipamento de menor custo total e que atenda às especificações. No presente trabalho, o projeto envolverá transformadores de baixa potência (até 1,5 kVA), monofásico, com um primário e um secundário.

Porém, pode-se considerar outros fatores que não seja o menor custo, como por exemplo a maior eficiência, as menores dimensões, a menor massa, ou ainda, uma combinação de exigências. Desta forma, a elaboração de um algoritmo para projetar transformadores que traga como resultados uma gama de possibilidades de projetos, possibilita a escolha de acordo com a determina exigência imposta.

1.2 OBJETIVOS

Elaborar um algoritmo para o projeto de um transformador em que o rendimento esteja em função de parâmetros construtivos.

Para que o objetivo principal possa ser alcançado, os objetivos específicos a seguir devem ser satisfeitos:

- Revisar o modelo matemático do transformador;
- Analisar os parâmetros de projeto e de construção de um transformador;
- Elaborar um algoritmo para o processo iterativo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 será realizado um estudo teórico sobre transformadores, incluindo a definição de transformadores ideal e real, a explanação das perdas consideradas nos enrolamentos e no núcleo, as formas de elaborar os enrolamentos, diferenciação das lâminas mais utilizadas para formar o núcleo do transformar, e por fim, a análise e determinação da equação do rendimento.

No capítulo 3 será descrito um projeto base para um transformador, o qual servirá como base para validação do algoritmo, com o objetivo de comparar os resultados no capítulo.

No capítulo 4 será desenvolvido o algoritmo, bem como a explicação das etapas de cálculo e fluxogramas para auxiliar na compreensão.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos a partir dos cálculos realizado com o algoritmo, comparação para validar o algoritmo e uma demonstração para aplicações diversas.

No capítulo 6 serão abordadas as conclusões a respeito do trabalho elaborado e indicações para futuros trabalhos.

No apêndice A será exposto os resultados totais dos cálculos realizado com o algoritmo projetado.

Nos anexos de A até E serão apresentados os dados (fornecidos pelos fabricantes) das dimensões das lâminas, dimensões dos carretéis, dados das lâminas de grão orientado e não orientado, e informações do condutor de cobre.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 TRANSFORMADOR - DEFINIÇÃO

Um transformador, em sua essência, pode ser definido como uma máquina elétrica estática, sem partes móveis, no qual sua função é transformar um nível primário de tensão em um segundo ou mais níveis de tensão, através de dois ou mais enrolamentos que são acoplados por meio de um fluxo magnético comum regido pelas fundamentações da lei de Faraday e lei de Lenz (FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006).

Por conveniência e simplicidade, considerando o transformador monofásico ilustrado pela Figura 1, no qual sua operação ocorre entre dois enrolamentos por meio de um fluxo magnético comum; ao aplicar um nível tensão $v_1(t)$ em corrente alternada, circulará uma corrente primária $i_1(t)$ pelo primeiro enrolamento com número finito de espiras N_1 , será então, produzido um fluxo magnético $\phi_m(t)$, no qual sua amplitude depende de $v_1(t)$, N_1 e da frequência de $v_1(t)$, de acordo com a lei de Faraday de Chapman (2013, p. 28-29) “se houver um fluxo passando através de uma espira de fio condutor, então uma tensão será induzida sendo diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo com relação ao tempo”, ou seja, a variação do fluxo magnético que interage com o segundo enrolamento, através de ação indutiva, induz um nível de tensão $e_2(t)$, o qual depende do número de espiras N_2 , como também $\phi_m(t)$ e da frequência de $v_1(t)$, em consequência, nos terminais do segundo enrolamento terá um nível de tensão $v_2(t)$, e na presença de carga, circulará $i_2(t)$ (DELGADO, 2010) (FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006) (RIES, 2007).

Observando ainda a Figura 1, e de acordo com a lei de Lenz de Chapman (2013, p. 29) “o sentido com que a tensão cresce na bobina é tal que, se os terminais da bobina fossem colocados em curto-circuito, então seria produzido uma corrente que causaria um fluxo oposto à variação do fluxo original”, ou seja, quando $v_1(t)$ for instantaneamente positiva, a tensão gerada $e_1(t)$ no enrolamento primário, será de

mesmo módulo, porém com polaridade negativa, devido a tendência a se opor a tensão aplicada $v_1(t)$ (KOSOW, 2005).

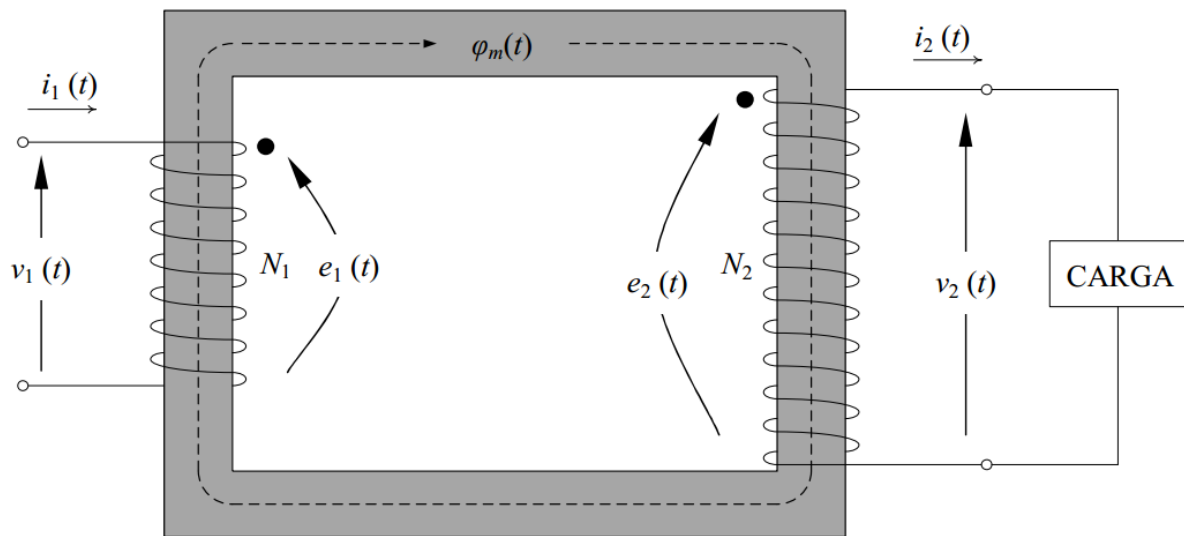


Figura 1 - Exemplificação de um transformador monofásico.
Fonte: Chapman, 2001 apud (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

2.2 TRANSFORMADOR IDEAL

Para o caso de um transformador ideal, as perdas devido a operação em regime permanente, e com frequência constante, podem ser desconsideradas, pois considera-se que: fluxo magnético esteja totalmente confinado ao núcleo e concatenado com os dois enrolamentos, de forma que não há fluxo disperso; no núcleo não há perdas por correntes parasitas provenientes da variação do fluxo magnético, e nem perdas por histerese devido a variação do campo magnetizante; para os enrolamentos primário e secundário as resistências são nulas, não havendo desta forma perdas por efeito joule (NOGUEIRA; ALVES, 2009) (MARTIGNONI, 1991).

Se for aplicada uma tensão senoidal nos terminais do lado primário, em que $v_1(t) = V_1 \text{sen}(\omega \cdot t)$ o fluxo magnético que percorre o núcleo do transformador é determinado pela Equação (1).

$$\varphi_m(t) = \frac{V_1}{\omega N_1} \cos(\omega \cdot t) \quad (1)$$

em que V_1 é a amplitude da tensão senoidal e ω é a frequência angular em radianos por segundo; quando esse fluxo concatenar com o próprio primário, faz surgir uma Força Eletromotriz (FEM) $e_1(t)$, como explícito pela lei de Lenz, esta FEM tenderá a se opor instantaneamente a $v_1(t)$; quando o fluxo concatenar o secundário, surgirá então uma FEM $e_2(t)$; de forma idêntica, e seguindo novamente a lei de Lenz, as correntes do primário e do secundário possuem direções opostas entre si, devido ao fato de que a corrente do primário produz o fluxo magnético, e este produz a corrente no secundário, portando, $i_2(t)$ tende a anular $i_1(t)$ (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

Segundo detalhado por Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006), decorre da lei de Faraday que a FEM induzida em uma espira condutora é proporcional a taxa da variação de fluxo magnético que percorre esta espira, como evidenciado pela Equação (2),

$$e_1(t) = N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (2)$$

como foi considerado um caso ideal, o valor das resistências dos condutores dos enrolamentos é nula, desta forma, tem-se que $e_1(t) = v_1(t)$; de forma análoga, com o secundário concatenado pelo fluxo magnético, a tensão $v_2(t)$ nos terminais do secundário terá o mesmo nível de tensão que a FEM induzida $e_2(t)$, a qual é denotada pela Equação (3);

$$v_2(t) = e_2(t) = N_2 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (3)$$

em decorrência, e utilizando a razão entre as equações (2) e (3), é possível obter a relação de transformação dos níveis de tensão, em função direta do número de espiras dos enrolamentos como mostrado na Equação (4).

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

Com a conexão de uma carga no secundário, uma corrente $i_2(t)$ estará presente, assim como uma FEM $N_2 \cdot i_2(t)$, como foi considerado que a permeabilidade² do núcleo é elevada, e o fluxo magnético é proveniente da tensão $v_1(t)$, logo o fluxo não irá sofrer alterações com a presença de carga no transformador, e por consequência, a FEM líquida de excitação também permanece inalterada como mostrado na Equação (5);

$$N_1 \cdot i_1(t) - N_2 \cdot i_2(t) = 0 \quad (5)$$

A forma do primário reagir à presença de carga no secundário é manter a FEM líquida sem alterações, ou seja, qualquer mudança de FEM ocorrida no secundário uma reação irá acontecer com a FEM do primário para que a FEM líquida no núcleo do transformador seja zero; utilizando da razão da equação (5), é possível obter a relação de correntes em função do número de espiras, como exposto na Equação (6) (FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006).

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} \quad (6)$$

Para o transformador ideal, a potência percebida no secundário é a mesma aplicada no primário, ou seja, não há nenhum tipo de perdas no processo de transformação dos níveis de tensão, os elementos são ideais e o rendimento é de 100 %, utilizando as Equações (4) e (6), é possível estabelecer a igualdade das potências, expressa na Equação (7).

$$v_1(t) \cdot i_1(t) = V_2(t) \cdot i_2(t) \quad (7)$$

² Representa a facilidade relativa para estabelecer um campo magnético em um material qualquer (CHAPMAN, 2013).

2.3 TRANSFORMADOR REAL

O transformador ideal serve como base para melhor compreender o funcionamento geral de um transformador, porém, mesmo admitindo os melhores processos e materiais para construção, não é possível que a máquina seja livre de perdas; desta forma, para o modelo de um transformador real deve-se considerar os efeitos dos seus elementos, como por exemplo os fluxos dispersos, a permeabilidade finita e não linear do núcleo ocasionando correntes de excitação, e as resistências dos enrolamentos (VASCONCELLOS, 2013).

Como estabelecido pela lei de Faraday, outra maneira de se obter a tensão induzida $e_{ind}(t)$ é através da Equação (8),

$$e_{ind}(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (8)$$

em que λ é o fluxo concatenado na espira em que a tensão está sendo induzida; porém o fluxo concatenado é o somatório dos fluxos que passa por cada espira, a Equação (9) exemplifica o valor de λ ,

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (9)$$

contudo, o fluxo não é o mesmo que interage com cada espira, dependendo do posicionamento da espira com relação a bobina, desta forma, o fluxo total não pode ser estabelecido apenas como $N\varphi$, mas é possível estabelecer o fluxo médio $\bar{\varphi}$ para cada espira dado pela Equação (10),

$$\bar{\varphi} = \frac{\lambda}{N} \quad (10)$$

desta forma, substituindo (10) em (8) tem-se que a tensão induzida será função do fluxo médio, como mostrado a Equação (11) (CHAPMAN, 2013).

$$e_{ind}(t) = N \frac{d\bar{\varphi}(t)}{dt} \quad (11)$$

Ainda de acordo com a lei de Faraday, quando aplicada uma tensão $v_1(t)$, o fluxo médio no primário $\overline{\varphi}_1$ é definido de acordo com a Equação (12);

$$\overline{\varphi}_1 = \frac{1}{N_1} \int v_1(t) dt \quad (12)$$

o efeito de $\overline{\varphi}_1$ com o enrolamento do secundário depende de quanto de fluxo interage com as N_2 espiras, pois nem todo fluxo proveniente de N_1 passa para o enrolamento secundário, devido a algumas linhas de fluxo que circulam pelo ar em vez de permear todas pelo núcleo ferromagnético, esse fluxo é chamado de fluxo disperso e está presente tanto no enrolamento primário como no secundário, assim, o fluxo $\overline{\varphi}_1$ pode ser dividido em dois: o fluxo disperso do primário φ_{D1} e o fluxo mútuo φ_m que de fato permanece no núcleo e concatena com o com os dois enrolamentos, como mostrado na Equação (13),

$$\overline{\varphi}_1 = \varphi_{D1} + \varphi_m \quad (13)$$

de forma análoga ocorre para o segundo enrolamento:

$$\overline{\varphi}_2 = \varphi_{D2} + \varphi_m \quad (14)$$

em que $\overline{\varphi}_2$ é o fluxo médio no secundário e φ_{D2} é o fluxo disperso do secundário, a Figura 2, exemplifica o núcleo com a interação dos fluxos (CHAPMAN, 2013).

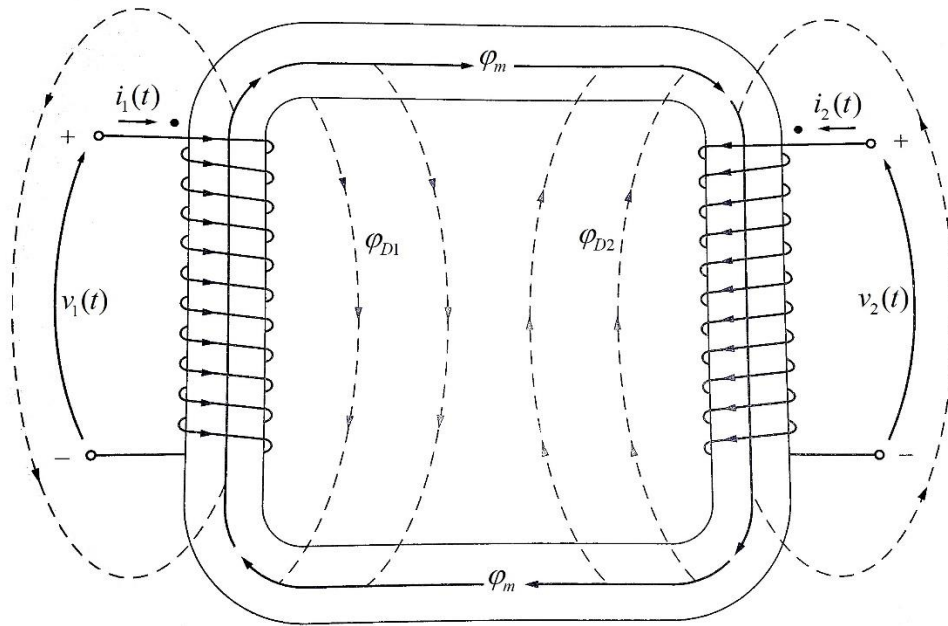


Figura 2 - Núcleo de um transformador com interação dos fluxos mútuo e concatenado.

Fonte: Extraído e adaptado de (CHAPMAN, 2013).

A tensão nos terminais do primário pode ser escrita em função dos fluxos da Equação (13), e é descrita na Equação (15),

$$v_1(t) = N_1 \left(\frac{d\varphi_{D1}(t)}{dt} + \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \right) \quad (15)$$

e a tensão induzida no enrolamento primário é dado pela Equação (16),

$$e_1(t) = N_1 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (16)$$

de forma análoga, a tensão nos terminais do secundário é dado de acordo com a Equação (17) e a tensão induzida no enrolamento secundário é dado pela Equação (18).

$$v_2(t) = N_2 \left(\frac{d\varphi_{D2}(t)}{dt} + \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \right) \quad (17)$$

$$e_2(t) = N_2 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (18)$$

Quando uma fonte em corrente alternada é conectada ao transformador, uma corrente flui no primário, sem que haja necessariamente uma carga conectada

ao secundário, esta corrente é necessária para produzir o fluxo magnético, e é composta por duas componentes: corrente de magnetização (necessária para a produção do fluxo magnético no núcleo do transformador) e corrente de perdas no núcleo (responsável por suprir as perdas por histerese e corrente de Foucault) (CHAPMAN, 2013).

Evidencia-se que para demonstrar a operação de um transformador real é necessário considerar as perdas envolvidas no processo de estabelecer o fluxo magnético. Porém, o cobre utilizado nos condutores dos enrolamentos possui resistência elétrica, ou seja, oposição a passagem da corrente elétrica, o que ocasionam dois efeitos: perdas por efeito Joule e queda de tensão (VASCONCELLOS, 2013).

As perdas e seus efeitos serão discutidos a seguir, e o rendimento para o transformador real será abordado na seção 2.5.

2.3.1 Perdas

As perdas de potência de um transformador estão concentradas basicamente no cobre (nos enrolamentos); no núcleo, as quais podem ser separadas em perdas por corrente de Foucault e perdas por histerese magnética; e também as perdas por fluxo disperso. Em ordem de relevância, as maiores perdas são por efeito Joule nos enrolamentos, seguidamente pelas perdas no núcleo, e por último, as perdas por fluxo disperso (RIES, 2007).

2.3.1.1 Perdas no cobre

Para corrente contínua considera-se que a potência dissipada sobre um condutor é dada pela Equação (19)

$$P_{Conductor} = I^2 \cdot R \quad (19)$$

em que I é a corrente contínua, e R a resistência do condutor, no qual R , pode ser calculado pela Equação (20)

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (20)$$

em que: ρ é a resistividade do material condutor, l é o comprimento do condutor, e A é área da seção transversal do condutor; contudo, para corrente alternada, tem-se que a resistência medida é uma soma de componentes, como evidenciado pela Equação (21)

$$R_{AC} = R_{CC} + R_{Foucault} + R_{Pelicular}, \quad (21)$$

em que: R_{CC} é a componente em corrente contínua, $R_{Foucault}$ componentes devido às correntes de Foucault e $R_{Pelicular}$ componente responsável pelo efeito pelicular (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

A componente $R_{Foucault}$ é ocasionada por correntes parasitas no interior dos condutores, e a componente $R_{Pelicular}$ ocorre devido a distribuição não uniforme das correntes na seção dos condutores, ou seja, as duas componentes são geradas a partir da circulação de corrente alternada, e ocorrem, em geral, quando há condutores em paralelo, e praticamente são anuladas utilizando a técnica de transposição dos condutores; os valores de $R_{Foucault}$ e $R_{Pelicular}$ são demasiadamente difíceis de serem calculados, pois, variam, principalmente de acordo com a variação do fluxo (DELGADO, 2010) (RIES, 2007). Segundo explanação de Martignoni (1991, p. 68), “...a resistência equivalente do transformador fornece por meio da prova de ensaio de curto circuito um resultado mais preciso que a medida separada das duas resistências primárias e secundárias”.

As perdas nos enrolamentos, devido a ação do efeito Joule, dependem da carga elétrica situada nos terminais do secundário, porém para efeito de simplicidade, admite-se que o transformador esteja em funcionamento nominal, desta forma, a partir do momento em que haja corrente circulando pelo primário, devido a relação de transformação, no secundário também haverá, com isso, as perdas por efeito Joule serão denominadas perdas nominais, e são proporcionais ao quadrado da corrente que passar por cada enrolamento, assim a potência dissipada sobre os condutores dos enrolamentos é dada pela Equação (22),

$$P_{Conduor} = i_1^2(t) \cdot R_1 + i_2^2(t) \cdot R_2 \quad (22)$$

em que R_1 e R_2 representam, respectivamente, a resistência do primeiro e segundo enrolamento (DELGADO, 2010) (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984).

É possível exemplificar as perdas no cobre utilizando as Equações (19) e (20), o que resulta na Equação (23).

$$P_{Conduor} = i^2 \cdot \rho \frac{l}{A} \quad (23)$$

De maneira equivalente, pode-se obter as perdas em um condutor, em função de sua massa e da densidade de corrente.

Para um condutor simbólico de seção regular A , e fixando um ponto qualquer como referência, o número de cargas que atravessa A em um segundo, definirá a intensidade da corrente elétrica (AQUINO; JUNIOR, 2016). A densidade de corrente ζ é a razão do quanto de corrente flui em uma determinada área, e é expressa de acordo com a Equação (24).

$$\zeta = \frac{i}{A} \quad (24)$$

A massa de um condutor é determinada de acordo com a Equação (25).

$$M_{Conduor} = A \cdot l \cdot \rho \quad (25)$$

Desta forma, substituindo as Equações (24) e (25) na Equação (23), e rearranjando os termos, é possível determinar as perdas nos enrolamentos de acordo com a Equação (26), que fornece a potência dissipada em função da densidade de corrente e da massa total do cobre.

$$P_{Conduor} = \zeta^2 \cdot M_{Conduor} \quad (26)$$

2.3.1.2 Correntes de Foucault

São denominadas perdas por corrente de Foucault (ou correntes parasitas) as correntes que circulam no interior do núcleo do transformador, ou como

mencionado por Oliveira, Cogo e Abreu (1984, p. 1), o surgimento de correntes parasitas “...é explicado pela lei de Faraday, a qual para este caso seria interpretada como “estando o núcleo sujeito a um fluxo alternado, nele serão induzidas forças eletromotrizes””, supondo que, no próprio núcleo seja formado um circuito elétrico, as correntes estabelecidas obedecem o sentido como de acordo com a Figura 3, no qual percorre um fluxo magnético transversal; as perdas por corrente de Foucault P_F podem ser expressas de acordo com a Equação (27),

$$P_F = k_F \cdot \frac{M_{ferro}}{\gamma_{ferro}} \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot B^2 \quad (27)$$

em que k_F é uma constante de proporcionalidade (e é determinada experimentalmente), M_{ferro} é a massa total do ferro, γ_{ferro} é a densidade específica do ferro, B é o valor eficaz da indução magnética, f a frequência da tensão aplicada e, d a espessura das lâminas do material que formam o núcleo (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984) (CALIL, 2009).

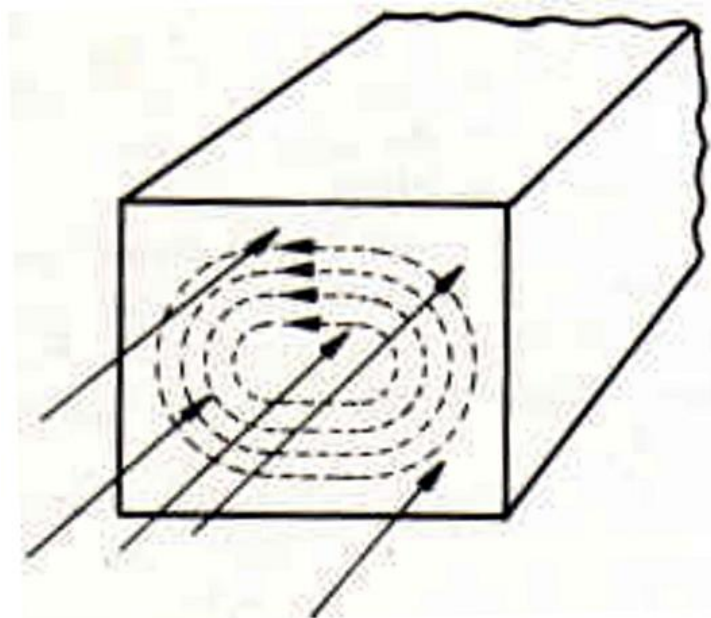


Figura 3 - Núcleo magnético com formação das correntes de Foucault.
 Fonte: Extraído de (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984).

2.3.1.3 Perda por histerese

De acordo com Nogueira e Alves (2009), este tipo de perda está relacionado com a reorganização dos momentos magnéticos atômicos do material do núcleo, no qual, uma parcela de energia é gasta para realinhar os momentos magnéticos toda vez que o ciclo de histerese for percorrido.

Devido as propriedades magnéticas não lineares do núcleo do transformador, é requerido da corrente de excitação i_φ que é a corrente necessária para produzir fluxo magnético, uma forma de onda diferente da forma de onda senoidal do fluxo; como observado na Figura 4, para um determinado instante de tempo t podem ser obtidos a partir do laço de histerese, a corrente de excitação e o fluxo φ (FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006).

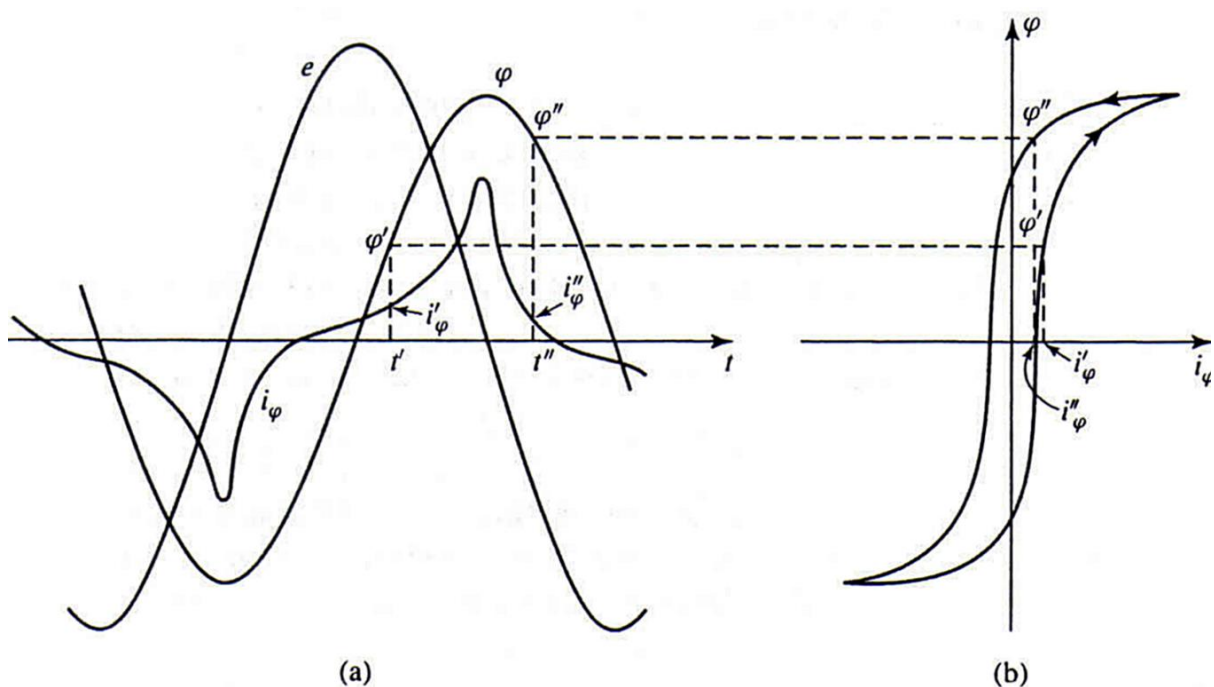


Figura 4 - Fenômenos de excitação. (a) Tensão, fluxo e corrente de excitação; (b) laço de histerese.

Fonte: Extraído de (FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006).

A potência dissipada pela perda por histerese P_H , de acordo com a fórmula de Steinmetz, pode ser obtida de acordo com a Equação (28)

$$P_H = k_S \cdot \frac{M_{ferro}}{\gamma_{ferro}} f \cdot B^{1,6} \quad (28)$$

em que k_S é o coeficiente de Steinmetz que depende do material de composição do núcleo (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984) (CALIL, 2009).

De acordo com Kulkarni e Khaparde (2004), a constante de Steinmetz é obtida empiricamente e possui valores típicos de 1,6 a 2,0 para materiais laminados a quente, e para materiais laminados a frio, a constante possui valores maiores que 2,0.

2.3.1.4 Fluxo de dispersão

O fluxo que não concatena as duas bobinas do transformador, é chamado de fluxo disperso, ou seja, supondo o fluxo produzido pelo enrolamento do primário, a parte que não enlaça o enrolamento do secundário é o fluxo disperso ϕ_{DI} ; o mesmo é válido para o fluxo produzido pelo enrolamento do secundário; esses fluxos produzem a indutância de dispersão em cada enrolamento (CHAPMAN, 2013).

Para que possua elevada permeabilidade magnética, o núcleo do transformador deve ser adequadamente projetado, de forma que a maior porção do fluxo magnético percorra o núcleo ferro magnético, resultado em uma porção mínima de fluxo disperso, o qual representa de 4 a 7% do fluxo total para operação do transformador em condições nominais (VASCONCELLOS, 2013) (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

De acordo com Walter (2007), as perdas por fluxo de dispersão são difíceis de serem calculadas, e geralmente, representam menos que 5% das perdas nos condutores.

2.3.1.5 Perda no ferro – fins industriais

A perda no ferro pode ser verificada com base em dados garantidos por fabricantes, e é composta das perdas provenientes da corrente de Foucault, perdas por histerese e por fluxo de dispersão $P_{Dispersão}$, como verificada na Equação (29).

$$P_{ferro} = P_F + P_H + P_{Dispersão} \quad (29)$$

De acordo com Calil (2009), é possível rescrever a Equação (29), considerando a massa e a densidade do ferro, e desta forma, a perda no ferro pode ser escrita como de acordo com a Equação (30), e o coeficiente que determina a perda específica para uma determinada lâmina é dada pela Equação (31).

$$P_{ferro} = k_F \cdot \frac{M_{ferro}}{\gamma_{ferro}} \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot B^2 + k_S \cdot \frac{M_{ferro}}{\gamma_{ferro}} f \cdot B^{1,6} + k_{disp} \cdot \frac{M_{ferro}}{\gamma_{ferro}} \quad (30)$$

em que k_{disp} é a constante proporcional as perdas por fluxo de dispersão.

$$\Psi_{ferro} = \frac{1}{\gamma_{ferro}} \cdot (k_F \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot B^2 + k_S \cdot f \cdot B^{1,6} + k_{disp}) \quad (31)$$

Substituindo (31) em (30), tem-se:

$$P_{ferro} = M_{ferro} \cdot \Psi_{ferro} \quad (32)$$

De acordo com a Equação (32), é possível determinar as perdas envolvidas no ferro, analisando a massa total e o coeficiente fornecido por fabricantes de lâminas.

2.4 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Nesta seção serão abordados os tipos de construção dos enrolamentos no núcleo, e os tipos de lâminas que podem ser empregadas para formar o núcleo do transformador.

2.4.1 Tipos de núcleo

Em geral, transformadores de potência, são construídos sob a forma de dois tipos de núcleo, do tipo envolvido ou do tipo envolvente. Essa denominação

refere-se a maneira como os enrolamentos estão dispostos no núcleo (CHAPMAN, 2013).

2.4.1.1 Núcleo do tipo envolvido

Neste tipo de núcleo, o fluxo magnético percorre um único caminho, como verificado na Figura 5, e a parte do núcleo que contém o enrolamento, é comumente chamada de perna ou coluna;

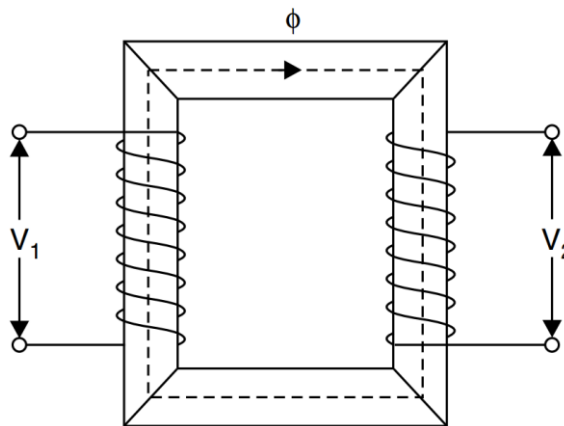


Figura 5 - Núcleo do tipo envolvido.
Fonte: Extraído de (DASGUPTA, 2009).

de acordo com a Figura 6 (a), os enrolamentos são montados ao redor das pernas de forma cilíndrica e concêntrica; na grande maioria das vezes, o enrolamento de Baixa Tensão (BT) é localizado na parte mais interna do cilindro, e o enrolamento de Alta Tensão (AT) na parte mais externa; para balancear o peso e aproveitar melhor a distribuição do fluxo magnético. Há divisão das bobinas, de modo que fique, aproximadamente, metade dos enrolamentos de BT e AT em cada uma das pernas, como verificado na Figura 6 (b); as principais vantagens para esse tipo de núcleo são fácil reparo, melhor resfriamento e construção simplificada (AGUIAR, 2007) (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

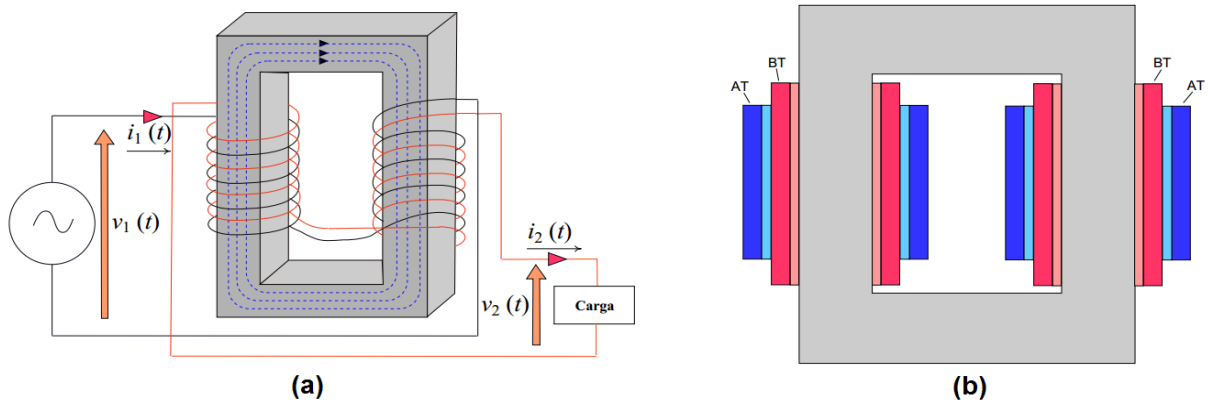


Figura 6 - Núcleo do tipo envolvido: (a) divisão dos enrolamentos; (b) diagrama em corte.
 Fonte: Adaptado de (AGUIAR, 2007).

2.4.1.2 Núcleo do tipo envolvente

Neste tipo de núcleo, o fluxo magnético percorre mais de um caminho, como pode ser verificado na Figura 7, ou seja, os enrolamentos estão sobre uma perna central, por onde passa o fluxo magnético total, e em seguida, o fluxo percorre as colunas laterais (as quais possuem a metade da seção reta da perna que contém os enrolamentos).

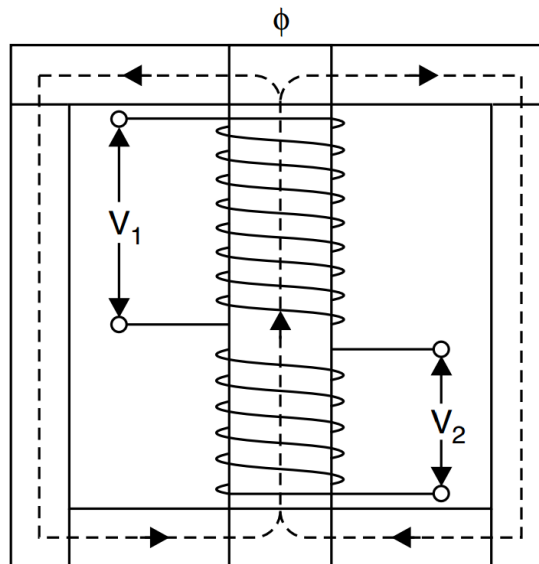


Figura 7 - Núcleo do tipo envolvente.
 Fonte: Extraído de (DASGUPTA, 2009).

Os enrolamentos são dispostos sobre a perna central e formando camadas alternadas, entre baixa e alta tensão, como verificado na Figura 8; a vantagem deste

tipo de arranjo está relacionada quando, exposto a sistemas desequilibrados e presença de harmônicos haverá caminho independente para os fluxos de sequência zero (DELGADO, 2010) (AGUIAR, 2007).

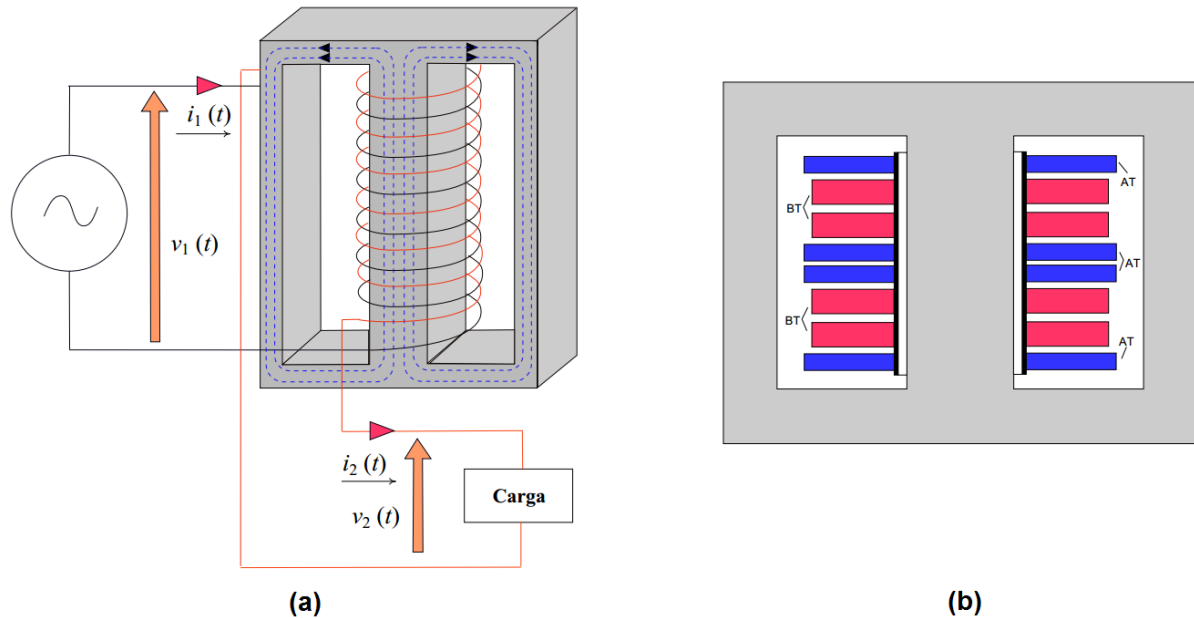


Figura 8 - Núcleo do tipo envolvente: (a) disposição dos enrolamentos; (b) diagrama em corte. Fonte: Adaptado de (AGUIAR, 2007).

2.4.2 Materiais usados no núcleo

Para melhor condução do fluxo magnético (e reduzir o fluxo disperso) o núcleo do transformador deve ser composto por material ferromagnético³. E de maneira a minimizar os efeitos causados por correntes parasitas, o núcleo deve ser laminado, ou seja, no lugar de usar material maciço utiliza-se lâminas do material ferro magnético, as quais são isoladas entre si (geralmente aplica-se verniz).

Materiais utilizados em núcleo de transformadores possuem ferro e ligas adicionais, e através de tratamentos especiais obtém-se as propriedades ideais para fabricação de lâminas para ser utilizadas em máquinas elétricas. Neste trabalho, será considerado o aço-silício como material ferromagnético para o núcleo, porém é importante frisar, que outros materiais podem ser utilizados, tais como: ferro níquel, ferro cobalto e materiais amorfos (CALIL, 2009).

³ Materiais que apresentam μ (permeabilidade magnética) $\gg \mu_0$ (permeabilidade magnética do vácuo) (CALIL, 2009).

Para que seja fabricado o aço-silício é necessário a adição de silício ao ferro, em geral, em proporção de 3%, este processo tem por objetivo fortalecer a textura cristalográfica, ou seja, dispor em direção longitudinal quase que integralmente os cristais que compõem a lâmina (este processo é conhecido como orientação de grãos do material), desta forma melhora a resistividade elétrica, aumenta a permeabilidade magnética e reduz as correntes parasitas; assim, o aço-silício de grãos orientados possui perdas reduzidas e, é amplamente utilizado para fabricação de transformadores de potência (NOGUEIRA; ALVES, 2009) (LANDGRAF, 2002).

Para fabricação o aço-silício de grão não-orientado, é necessário a adição de silício ao ferro, em geral, em proporção de 1 a 3%. Utilizado em aplicações onde não seja necessário a direção de magnetização preferencial, ou seja, as linhas de magnetização não são iguais ao longo do plano da lâmina, como por exemplo motores elétricos e pequenos transformadores utilizados em eletrônica (LANDGRAF, 2002) (AMERICANSIL, 2015).

2.5 RENDIMENTO

O rendimento de uma máquina é a razão entre a energia disponível na saída pela energia aplicada na entrada, ou seja, considerando o rendimento de um transformador, será a razão entre a potência ativa aplicada na carga e a potência ativa, proveniente da fonte, entregue ao transformador (NOGUEIRA; ALVES, 2009). O rendimento pode ser calculado como verificado na Equação (33).

$$\eta = \frac{\text{Potência}_{\text{saída}}}{\text{Potência}_{\text{entrada}}} \cdot 100\% \quad (33)$$

Para que possa ser suprida as perdas envolvidas no processo de transformação, é necessário que a potência de entrada seja igual a potência de saída incluindo a potência das perdas, como verificado na Equação (34).

$$\text{Potência}_{\text{entrada}} = \text{Potência}_{\text{saída}} + P_{\text{Condutor}} + P_{\text{Ferro}} \quad (34)$$

Desta forma, a Equação (33) pode ser reescrita de acordo com a Equação (35).

$$\eta = \frac{Potência_saída}{Potência_saída + P_{Condutor} + P_{Ferro}} \cdot 100\% \quad (35)$$

De acordo com Chapman (2013), a potência de saída de um transformador pode ser determinada de acordo com a Equação (36),

$$Potência_saída = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\theta) \quad (36)$$

em que $\cos(\theta)$ é o fator de potência da carga.

As equações de perdas no cobre e perdas no ferro foram determinadas com base na massa, ou seja, de posse da massa dos enrolamentos e do núcleo é possível determinar as perdas nestes elementos, desta maneira, o rendimento pode ser determinado de acordo com a Equação (37).

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\theta)}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\theta) + \zeta^2 \cdot M_{Condutor} + \Psi_{ferro} \cdot M_{ferro}} \cdot 100\% \quad (37)$$

É visto que as massas dos elementos que compõem o transformador influenciam em seu rendimento, pois quanto maior a massa menor será o rendimento. Desta forma, informações sobre os aspectos de construção e dos elementos construtivos são de fundamental importância para determinar quais diretrizes a serem aplicadas no projeto de um transformador.

3 PROJETO DE TRANSFORMADORES

3.1 INTRODUÇÃO

A validação do algoritmo a ser projetado é possível de ser realizada de algumas maneiras, entre elas, a utilização de um transformador o qual seja possível extrair todas informações relevantes, tais como, número de espiras dos enrolamentos, número de lâminas, características físicas e magnéticas das lâminas, perdas envolvidas e dados nominais. Com isso, o transformador a ser estudado deve passível a ser desmontado e analisado de forma minuciosa.

Na impossibilidade de utilizar um transformador, uma alternativa, é a comparação com um projeto base de mesmas características nominais, desta forma, nesta seção será abordado um projeto base como forma de demonstrar aspectos de construção de um transformador e extrair resultados para comparação futura.

3.2 PROJETO – CASO BASE

Como meio de validar o algoritmo projetado, será utilizado o algoritmo proposto no livro “Transformadores” do autor Alfonso Martignoni (1991). Será exposto o algoritmo em conjunto com os cálculos necessários para elaboração de um projeto de um transformador monofásico com as seguintes características: potência de saída 750 VA, frequência 60 Hz, tensão de entrada 127 V e tensão de saída 220 V.

3.2.1 Cálculos para o projeto

Os cálculos serão apresentados de acordo com a sequência encontrada no algoritmo:

- a) O cálculo da corrente de saída é dado pela Equação (38),

$$Corrente_saída = \frac{Potência_saída}{Tensão_saída} \quad (38)$$

a qual retorna o valor de 3,41 A;

b) O valor da potência de entrada é acrescido por 10% do valor da potência de saída, esse valor é justificado para suprir as perdas totais no processo de transformação, com isso o valor da potência de entrada será de 825 W;

c) O valor da corrente de entrada é calculado de acordo com a Equação (39),

$$Corrente_entrada = \frac{Potência_entrada}{Tensão_entrada} \quad (39)$$

a qual retorna o valor de 6,5 A;

d) De acordo com a Tabela 1, a densidade de corrente é avaliada e utilizada para determinar a seção dos condutores conforme a Equação (40).

Tabela 1 - Relação de densidade de corrente por potência.

Potência (VA)	Densidade de Corrente (A/mm ²)
500	3
500 até 1000	2,5
1000 até 3000	2

Fonte: (MARTIGNONI, 1991).

$$Seção_condutor = \frac{Corrente}{Densidade_corrente} \quad (40)$$

Desta forma, o valor para a seção do condutor de entrada é 2,6 mm², do condutor de saída 1,36 mm², e para valores comerciais têm-se AWG nº 13 e AWG nº 15 respectivamente, e a densidade média de corrente é calculada de acordo com a Equação (41),

$$Densidade_média = \frac{\frac{Corrente_1}{Seção_condutor_1} + \frac{Corrente_2}{Seção_condutor_2}}{2} \quad (41)$$

desta forma a densidade média de corrente é de 2,27 A/mm²;

e) A seção magnética de um transformador com um primário e um secundário utilizando lâminas padronizadas, é descrita de acordo com a Equação (42)

$$Seção_magnética = 7,5 \cdot \sqrt{\frac{Potência_saída}{Frequência}} \quad (42)$$

e o valor é de 26,52 cm²;

f) Para escolha das dimensões do núcleo, é necessário conhecer a seção geométrica, esta seção é a que efetivamente é constituída de ferro, e para que seja considerado o espaçamento entre uma lâmina e outra, o valor desta seção é obtido de acordo com a Equação (43)

$$Seção_geométrica = 1,1 \cdot Seção_magnética \quad (43)$$

e assim, tem-se 29 cm²;

g) De maneira a aproximar o núcleo da forma mais quadrada possível, a partir da seção geométrica, e com base na Tabela 2, escolhe-se então a lâmina padronizada, que para o seguinte projeto resulta na lâmina número 6, e desta forma as dimensões do núcleo serão 5 x 6 cm, e as novas seção geométrica e magnética serão, respectivamente de 30 cm² e 27,27 cm²;

Tabela 2 - Lâminas padronizadas.

Lâminas Padronizadas			
Nº	Perna central (cm)	Seção da janela (mm ²)	Peso do núcleo (kg/cm)
0	1,5	168	0,095
1	2	300	0,170
2	2,5	468	0,273
3	3	675	0,380
4	3,5	900	0,516
5	4	1200	0,674
6	5	1880	1,053

Fonte: (MARTIGNONI, 1991).

h) Para o cálculo do número de espiras considera-se a Equação (44)

$$Número_espira_1 = \frac{Tensão_1}{Seção_magnética} \cdot \frac{10^8}{4,44 \cdot Indução_máxima \cdot Frequência} \quad (44)$$

em que, segundo Martignoni (1991) o valor da indução máxima para lâminas de boa qualidade é de 11300 Gauss, e com isso o número de espiras do primário e do secundário serão, respectivamente, 160 e 278 espiras, a fim de superar perdas, será acrescido 10% nos valores, o que retorna, 176 para o primário e 306 para o secundário;

i) De forma a garantir que seja possível executar o projeto do transformador, primeiramente se faz necessário determinar a seção do cobre enrolado, como verificado na Equação (45).

$$Seção_{cobre_enrolado} = (N_{espira_1} \cdot Seção_{condutor_1}) + (N_{espira2} \cdot Seção_{condutor_2}) \quad (45)$$

O valor da seção do cobre enrolado é 873,76 mm². Para que a bobina dos enrolamentos possa se ajustar na janela do núcleo, a razão entre a Seção da janela e a Seção do cobre enrolado deve ser maior ou igual a 3, com verificado na Equação (46).

$$\frac{Seção_janela}{Seção_cobre_enrolado} \geq 3 \quad (46)$$

Para este projeto, o valor da razão é de 2,15; caso o projeto tivesse como intuito o de realizar a montagem do transformador, seria necessário escolher outro tipo de lâmina com janela maior;

j) Para o cálculo da massa do ferro, será utilizado os dados referentes a massa da lâmina, presente na Tabela 2, e a Equação (47),

$$Massa_ferro = Massa_núcleo \cdot Comprimento_núcleo \quad (47)$$

e assim, para o comprimento de 6 cm do núcleo, a massa do ferro do núcleo será de 6,32 kg;

k) A Equação (48) pode ser utilizada para determinar o comprimento da espira média,

$$Comprimento_médio_espira = Perna_central \cdot (2 + 0,5\pi) + 2 \cdot Comp_núcleo \quad (48)$$

e assim, o valor do comprimento da espira média será de 29,85 cm;

l) Para determinar a massa do cobre utilizado nos enrolamentos será utilizada a Equação (49),

$$Massa_cobre = \frac{Seção_{condutor_total}}{100} \cdot \rho_{cobre} \cdot Comprimento_espira_média \quad (49)$$

em que ρ_{cobre} é a densidade do cobre⁴, e considerada em 8,9 g/cm³, desta forma, a massa do cobre será 2566,9 g;

m) Para determinar as perdas no ferro, considerando lâminas normais, $\omega_{fe} = 4,22$ W/kg, e aplicando a Equação (50),

$$Perda_ferro = 1,15 \cdot \omega_{fe} \cdot Massa_ferro \quad (50)$$

em que, ω_{fe} representa a perda específica do ferro, e o valor 1,15 é utilizado para correção do valor das perdas devido ao processo de usinagem das lâminas, com isso o valor da perda no ferro é de 30,66 W;

n) É possível determinar as perdas no cobre utilizando a Equação (51),

$$Perda_cobre = Massa_cobre \cdot (Densidade_media^2) \cdot \frac{\rho_{cu}}{\zeta_{cu}} \cdot 10^3 \quad (51)$$

em que, ρ_{cu} é a resistividade do cobre⁵ e seu valor é de 0,0216 $\Omega/m/mm^2$, ζ_{cu} é a massa específica do cobre e seu valor é de 8,9 g/cm³, o fator 10^3 é para adequação do valor das grandezas, desta forma, a perda no cobre é de 32,05 W;

o) Ao final, o rendimento pode ser obtido de acordo com a Equação (52),

$$Rendimento = \frac{Potência_saída}{Potência_saída + Perda_ferro + Perda_cobre} \quad (52)$$

desta forma, o rendimento para este projeto será de 92,28%.

⁴ Densidade do cobre considerada pelo autor (MARTIGNONI, 1991, p. 68).

⁵ Resistividade para o cobre recozido a 75 °C (MARTIGNONI, 1991, p. 69).

4 ALGORITMO PROJETADO

O projeto do algoritmo será descrito em partes, de modo que a explicação não seja sobrecarregada em informações, os cálculos presentes no algoritmo projetado estão embasados na bibliografia e considerações próprias.

4.1 INTRODUÇÃO

Nesta seção será abordado o projeto do algoritmo, bem como a explicação de cada subseção. Ressalta-se que as variáveis estarão com a primeira letra em maiúscula e em itálico. A Figura 9 apresenta a legenda do código de cores e formas geométricas dos passos a serem realizados no algoritmo.

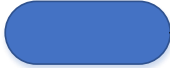


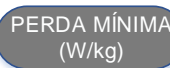







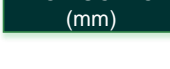
DEFINIÇÃO DE CORES E FORMAS		
COR E FORMA	APLICAÇÃO	EXEMPLO
	Dados nominais	 POTÊNCIA SAÍDA (VA)
	Dados tabelados – fornecidos por fabricantes	 PERDA MÍNIMA (W/kg)
	Variável a ser determinada - Cálculo direto	 SEÇÃO GEOMÉTRICA (cm ²)
	Cálculo intermediário	 SEÇÃO CONDUTOR (mm ²)
	Variável já determinada anteriormente	 ESPESSURA DO NÚCLEO (mm)
	Variável a ser novamente determinada	 DIMENSÕES DO NÚCLEO (parte 1)

Figura 9 - Legenda do código de cores e formas utilizados no projeto do algoritmo.
Fonte: Autoria própria.

De modo a simplificar a compreensão do algoritmo, a Figura 10 apresenta um fluxograma com a sequência de passos, bem como uma visão geral do processo. Ressaltando que o item *Possibilidade de execução* (de cor diferenciada - vermelha), pode apresentar um laço para recálculo, porém, este item será abordado com detalhes mais a frente.

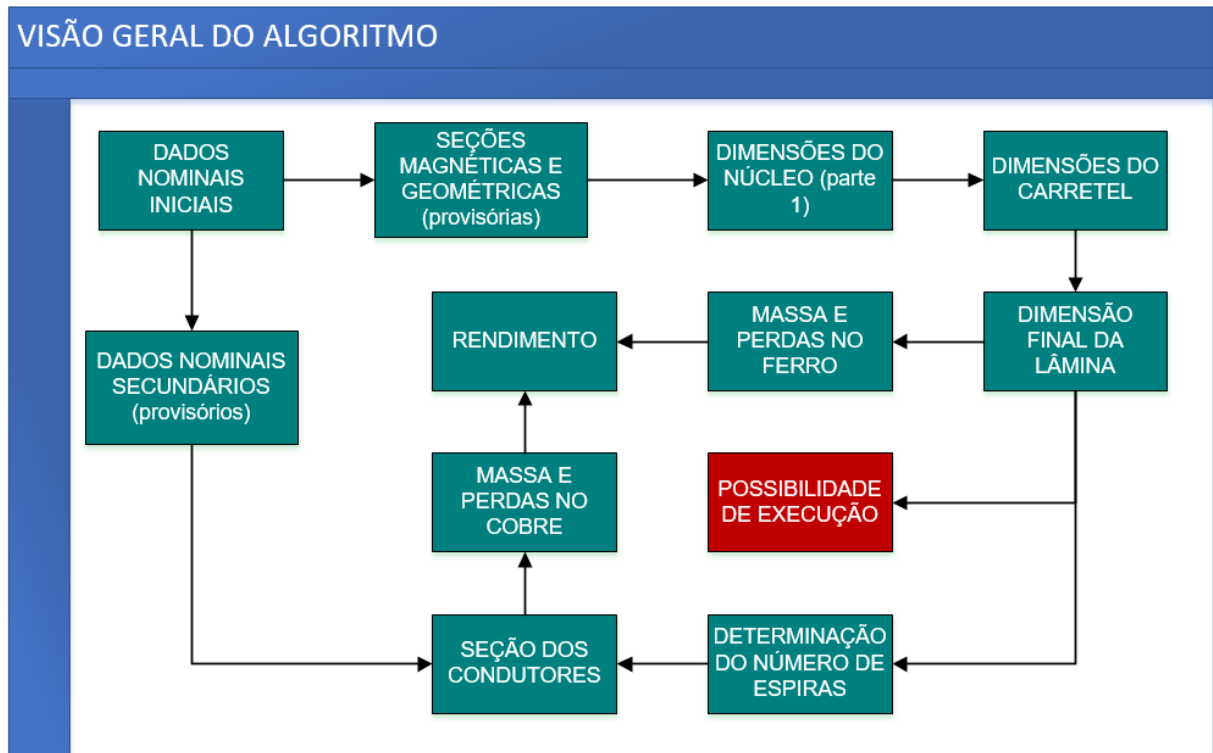


Figura 10 - Visão geral do algoritmo.
Fonte: Autoria própria.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

O ponto de partida, segue das características nominais do transformador, ou seja, *Potência de saída*, *Tensão de entrada*, *Tensão de saída* e *Frequência* de operação. A partir destes dados será possível seguir o procedimento para desenvolver o passo-a-passo do algoritmo:

a) A princípio, se faz necessário obter a *Potência de entrada* (valor provisório), para isso, utiliza-se a Equação (53),

$$Potência_entrada = 1,1 \cdot Potência_saída \quad (53)$$

Como neste ponto as perdas ainda não foram determinadas, com isso, considera-se acréscimo de 10% na *Potência de entrada* com relação a *Potência de saída*; para obter o valor da *Corrente de saída* e os valores provisórios de *Corrente de entrada*, *Seções magnéticas* e *geométricas* utiliza-se as Equações (38), (39), (42) e (43). A Figura 11 apresenta a dinâmica do enlace dos dados.

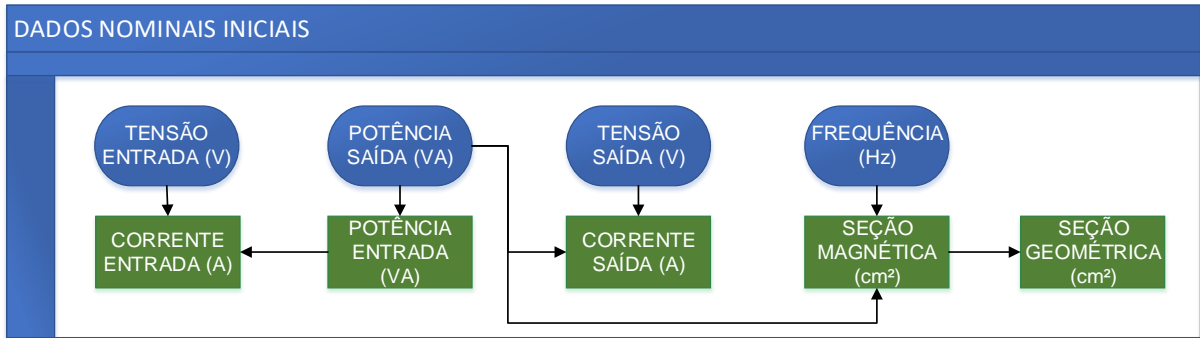


Figura 11 - Fluxograma para obtenção dos dados provisórios.
 Fonte: Autoria própria.

b) Para melhor distribuição do fluxo magnético gerado pelo primário, é necessário que a coluna central do núcleo fique o mais próximo de uma geometria quadrada, com isso a Equação (54) fornece o valor provisório para a coluna central.

$$Dimensão_coluna_central = \sqrt{Seção_geométrica} \tag{54}$$

Considerando lâminas do tipo “EI”, como de acordo com a Figura 12, em que os índices de “A” até “K”, representam as dimensões de acordo com o fabricante, a largura do núcleo corresponde à *Dimensão de “A”*.

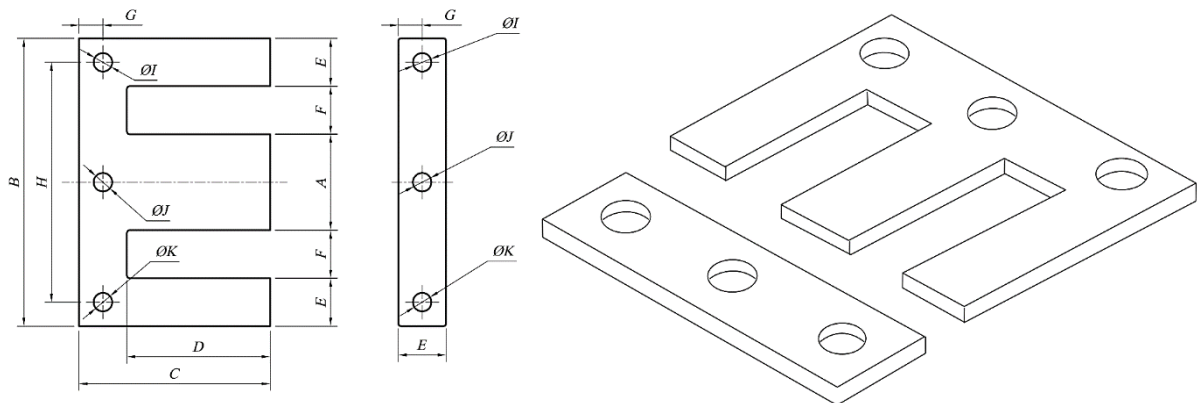


Figura 12 - Lâminas do tipo EI.
 Fonte: Extraído e adaptado de (SOMABRASIL, 2014).

De acordo com dados do fabricante, encontra-se o valor comercial mais próximo para a *Dimensão de "A"*, desta forma, a *Espessura do núcleo* é determinada de acordo com a Equação (55).

$$Espessura_núcleo = \frac{Seção_geométrica}{Dimensão_A} \quad (55)$$

A *Quantidade de lâminas* será determinada de acordo com a Equação (56),

$$Quantidade_lâminas(n) = \left(\frac{Espessura_núcleo}{Espessura_lâmina(n)} - \Delta \right) \cdot Fator_empilhamento(n) \quad (56)$$

em que, Δ é uma constante relacionada a espessura total do isolante entre as lâminas, *Espessura da lâmina* e *Fator de empilhamento* são dados padronizados pelo fabricante. O valor de *Quantidade de lâminas* irá variar de acordo com o n valor de *Espessura de lâminas*, ou seja, se o fabricante fornecer 5 espessuras diferentes então será possível obter 5 valores para a *Quantidade de lâminas*.

As novas n *Espessuras do núcleo* relacionadas com as lâminas padronizadas podem ser obtidas de acordo com a Equação (57).

$$Espessura_núcleo(n) = \left(\Delta + \frac{Quantidade_lâminas(n)}{Fator_empilhamento(n)} \right) \cdot Espessura_lâmina(n) \quad (57)$$

Da mesma maneira, as n novas *Seções geométricas e magnéticas*, podem ser obtidas pelas Equações (58) e (59) respectivamente.

$$Seção_geométrica(n) = Dimensão_A \cdot Espessura_núcleo(n) \quad (58)$$

$$Seção_magnética(n) = 0,9 \cdot (Dimensão_A \cdot Espessura_núcleo(n)) \quad (59)$$

A Figura 13 apresenta a dinâmica da escolha das lâminas a partir da *Seção geométrica provisória*.

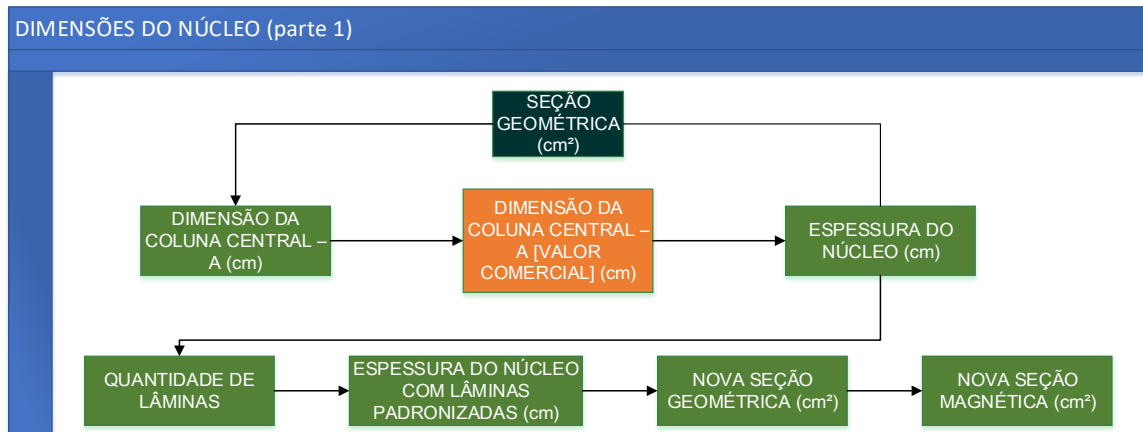


Figura 13 - Fluxograma para obtenção dos dados da lâmina.
Fonte: Autoria própria.

c) Para transformadores de pequeno porte (com potência de até 1500 VA), é possível, e também por praticidade, que os enrolamentos sejam confeccionados em carretéis. Para verificar as dimensões do carretel a ser utilizado, deseja-se que sua área interna seja igual ou o mais próximo possível da média da *Seção geométrica*. Na Figura 14 é possível observar a *Seção geométrica* e a *Área do carretel*, observando que a área do carretel é determinada de acordo com a Equação (60),

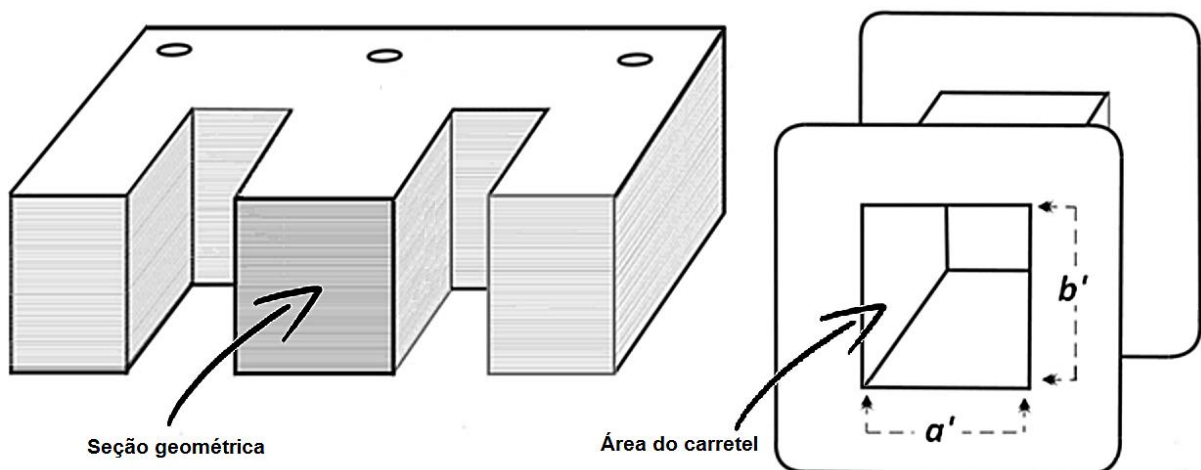


Figura 14 - Área do carretel deve ter dimensão suficiente para Seção geométrica.
Fonte: extraído e adaptado de (NOVACON, 2015).

$$\text{Área}_{\text{carretel}} = a' \cdot b' \quad (60)$$

em que, a' representa a largura da perna central que a lâmina deverá possuir, e b' a dimensão do empilhamento das lâminas. A utilização do carretel implica em um fator de restrição para o projeto, pois o núcleo deverá ter suas dimensões de tal maneira que seja possível alojá-lo no carretel.

A Figura 15 apresenta a dinâmica da escolha do carretel, considerando valores disponibilizado por fabricantes.

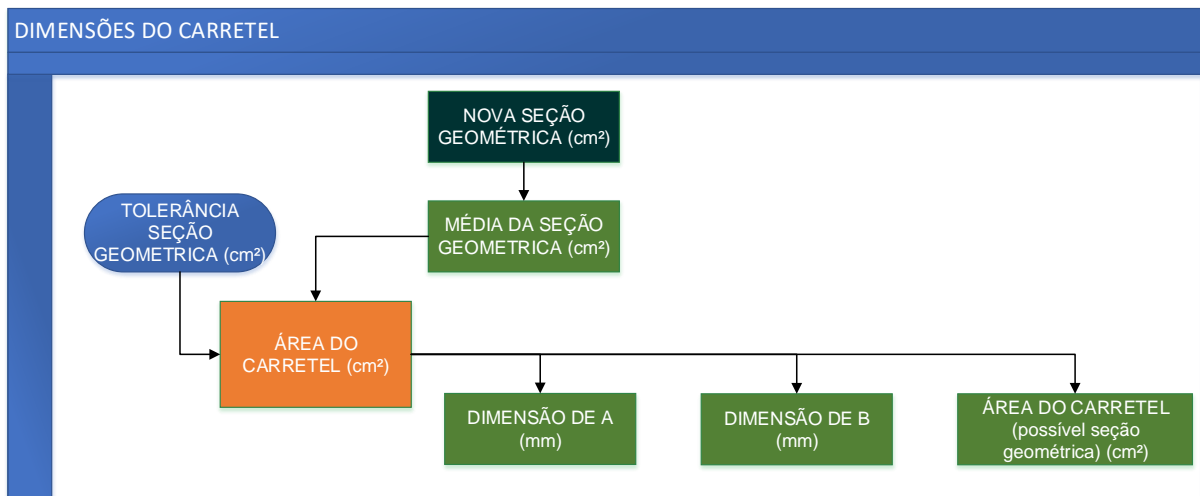


Figura 15 - Fluxograma para obtenção das dimensões do carretel.
 Fonte: Autoria própria.

d) Para o dimensionamento final das lâminas, deve ser considerado, para introduzir o carretel no núcleo, um espaçamento de até 1 mm, afim de que não ocorra esforços desnecessários para o encaixe. Desta forma, a *Dimensão de "A"* da lâmina a ser selecionada será determinada de tal maneira que ela seja até 1 mm menor que a *Dimensão de a'*.

Na ocorrência de haver mais de uma lâmina selecionada, ou seja, um novo valor "*n*" para a *Dimensão de "A"*, e com isso, será necessário avaliar qual apresentará o formato do núcleo o mais próximo de um quadrado (visto que desta maneira o fluxo percorrerá com maior fluidez um caminho em que os lados são simétricos) considerando a *Área do carretel*.

Após a seleção final da *Dimensão de "A"*, serão então definidos os valores finais da dimensão do núcleo, ou seja, as *Quantidades de lâminas*, a *Espessuras do núcleo* e a *Seções geométrica*, de acordo com as Equações (56) (57) e (58).

A Figura 16 apresenta a dinâmica da escolha final da lâmina, e a obtenção das dimensões do núcleo.

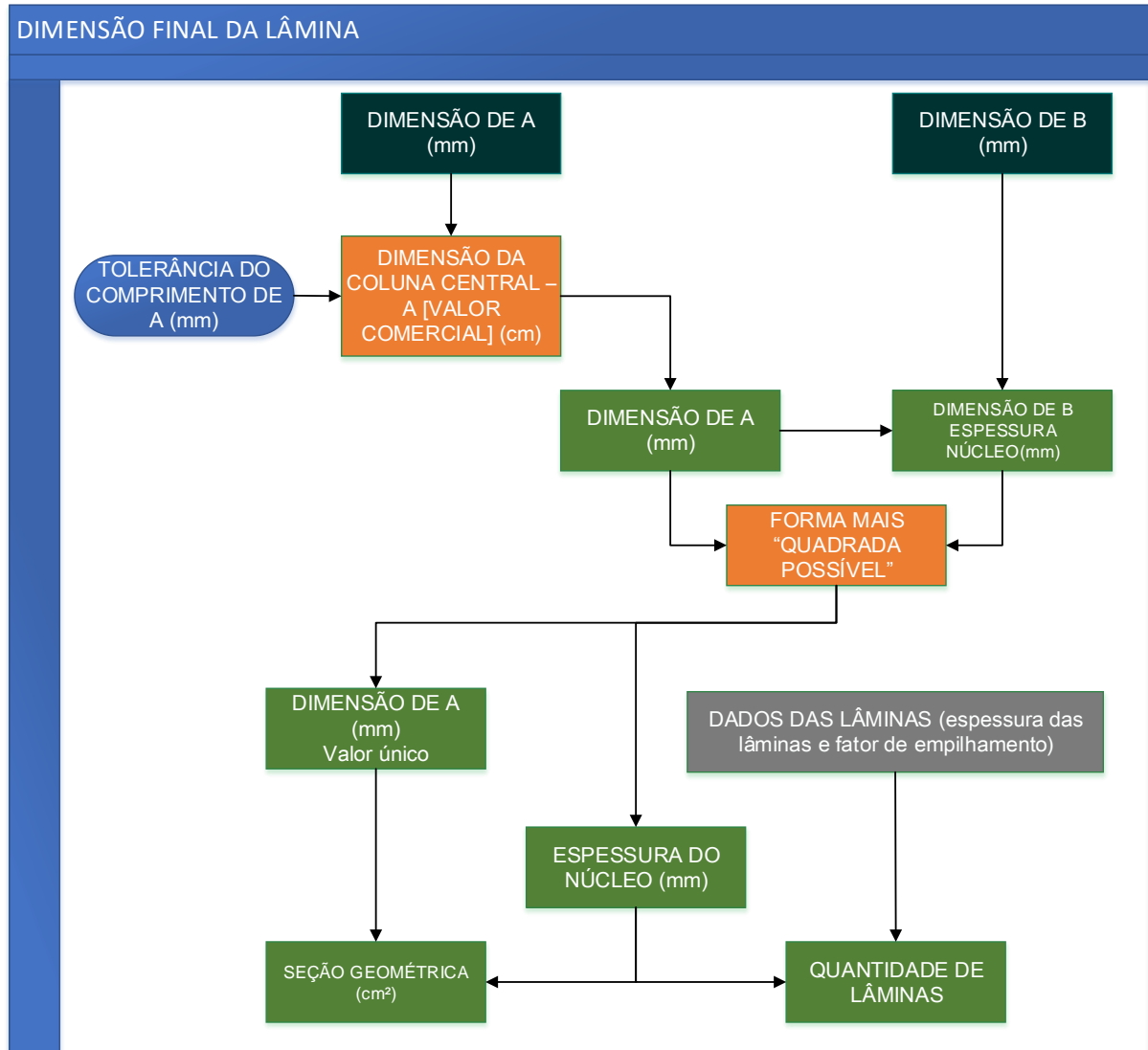


Figura 16 - Fluxograma para obtenção das dimensões finais da lâmina e do núcleo.
 Fonte: Autoria própria.

e) A partir da determinação das dimensões do núcleo, é possível determinar o *Número de espiras* das bobinas do *primário* e do *secundário*. A quantidade de espiras determina o quanto de fluxo será concatenado entre primário e secundário, e é dependente do valor da *Tensão* a que está submetido, da *Frequência* do *Fluxo magnético*, da *Seção magnética* e *Indução magnética* do núcleo, como descrito pela Equação (61).

$$Número_espira_1 = \frac{Tensão_1}{Seção_magnética} \cdot \frac{10^8}{4,44 \cdot Indução_magnética \cdot Frequência} \quad (61)$$

A *Indução magnética* é garantida pelo fabricante da lâmina, e em geral, é fornecida pelos seus valores *mínimos* e *máximos*, desta forma, é interessante que

o cálculo do *Número de espiras* seja realizado para os dois extremos, ou seja, logo no início da curva, até próximo ao ponto de saturação (joelho da curva B x H). Desta forma, tem-se: *Número_espira_1_mín*, *Número_espira_1_max*, *Número_espira_2_mín*, *Número_espira_2_max*.

Importante ressaltar que a partir deste item, as variáveis que contiverem a extensão “mínimo”, “min”, “máximo” ou “máx” referem-se à *Indução magnética mínima* ou *máxima*, ou seja, não faz referência de fato ao valor numérico mínimo ou máximo da variável.

A Figura 17 apresenta a dinâmica para determinação do número de espira dos enrolamentos.

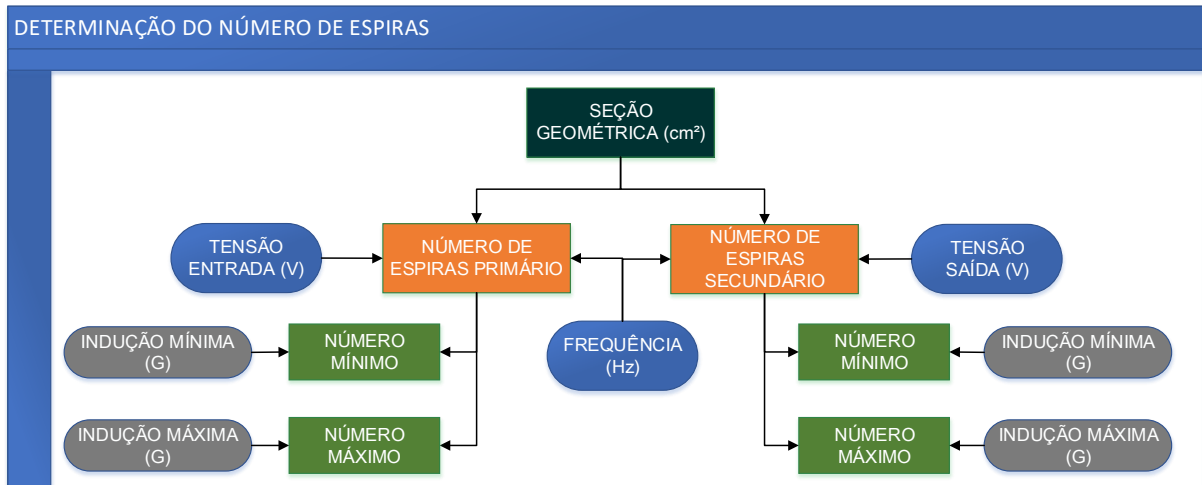


Figura 17 – Fluxograma para determinar do número de espiras dos enrolamentos.
 Fonte: Autoria própria.

f) Para determinar a *Seção dos condutores*, utiliza-se os valores das *Corrente de entrada* e *Corrente de saída* (encontradas no item (a) desta seção), e adota-se o valor de *Densidade de corrente* de acordo com a Tabela 1, e utiliza-se a Equação (40) para determinar o valor das seções dos condutores dos enrolamentos primário e secundário. Esses valores das seções serão comparados com valores comerciais dos condutores, e seleciona-se sempre, valor igual ou maior que o calculado.

Importante ressaltar, que após verificar as perdas totais, a Potência de entrada será então determinada com seu valor final, e novamente será verificado a Corrente de entrada, caso esse valor da Seção do condutor de entrada, for suficiente para a nova corrente, este permanecerá, caso contrário será então recalculado o valor da Seção do condutor de entrada.

A Figura 18 apresenta a dinâmica para determinar a seção dos condutores.

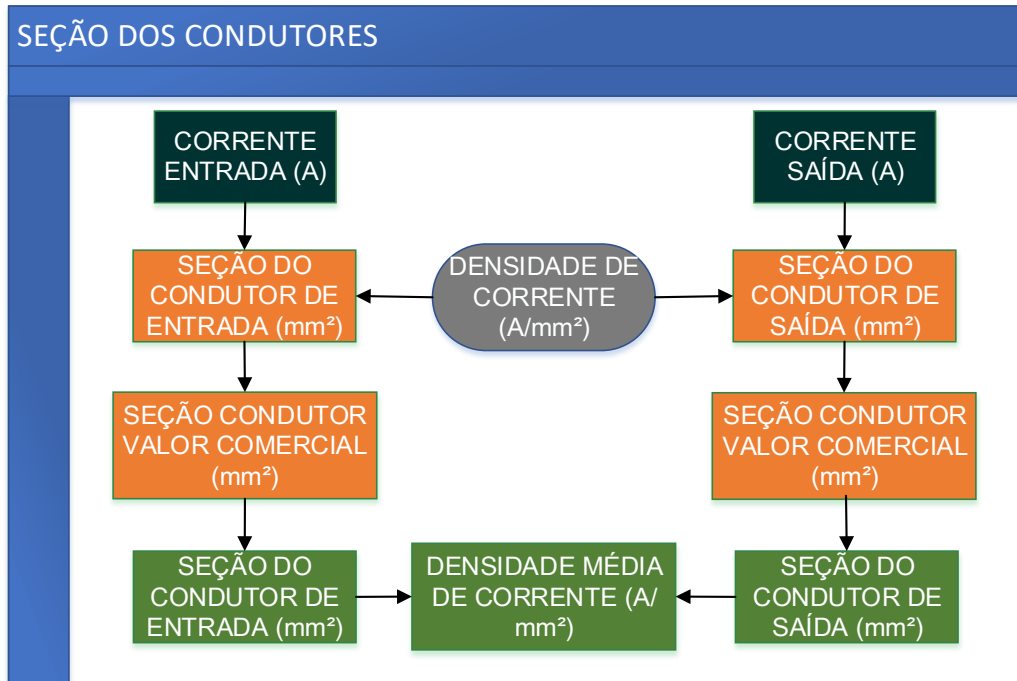


Figura 18 – Fluxograma para determinar a seção dos condutores.
 Fonte: Autoria própria.

g) Para determinar a *Massa do núcleo* é necessário encontrar o volume formado pelas lâminas. Primeiramente encontra-se a área da Figura 12, e os respectivos valores dos índices indicado pela lâmina selecionada no item (d) desta seção (valor final encontrado para *Dimensão de "A"*), e também do item (d), utiliza-se o valor encontrado para *Espessura do núcleo*. O valor do *Volume do núcleo* é determinado pela Equação (62).

$$Volume_núcleo(n) = Área_total \cdot Espessura_núcleo(n) \quad (62)$$

Após, é determinada a *Massa do núcleo*, de acordo com a Equação (63).

$$Massa_núcleo = 7,87 \cdot Volume_núcleo(n) \quad (63)$$

em que, a densidade do ferro é 7,87 g/cm³. E desta forma, as perdas serão determinadas com base nos valores especificados pelo fabricante.

A Equação (32) determina as perdas de potência relacionadas ao núcleo, sendo que Ψ_{ferro} é a perda do fabricante, e é fornecida em Energia/Massa, e pode apresentar valores para indução mínima e indução máxima.

A Figura 19 apresenta a dinâmica para determinar a *Massa no núcleo* e as *Perdas no núcleo*.

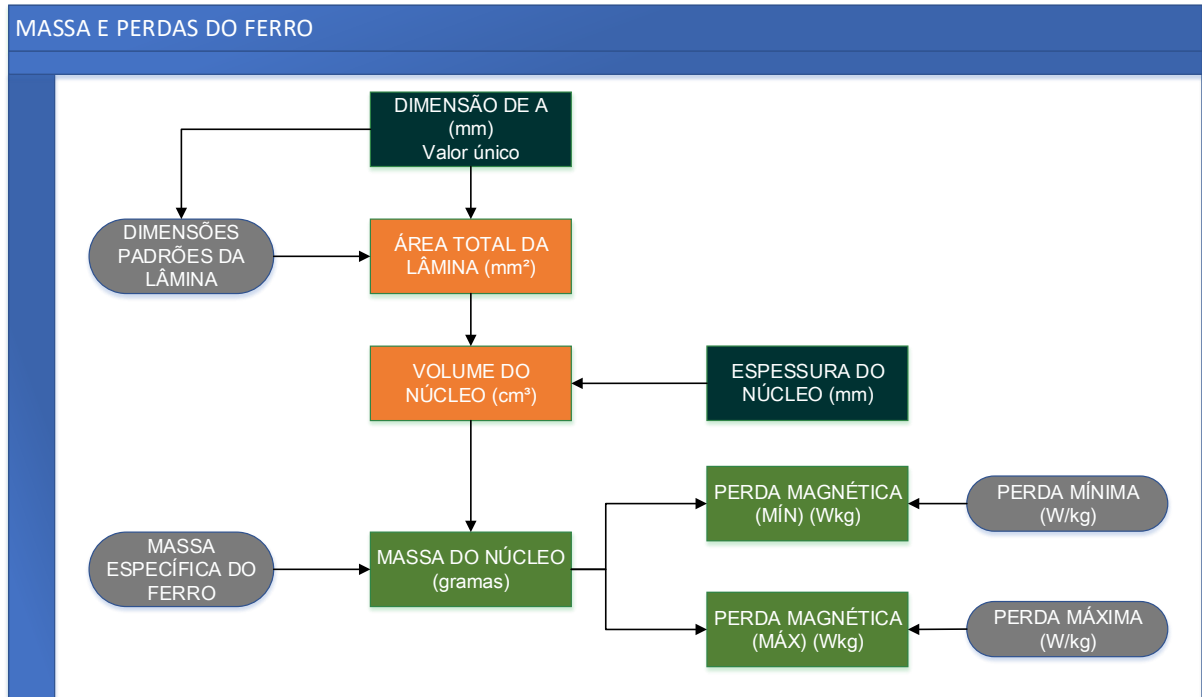


Figura 19 - Fluxograma para determinar as perdas no ferro.
Fonte: Autoria própria.

h) Para determinar a *Massa total do cobre*, é necessário identificar a *Seção do cobre enrolado* e o *Comprimento da espira média*.

A *Seção do cobre enrolado* é determinada pela soma dos produtos do *Número de espiras* com *Seção do condutor*, como verificado na Equação (45).

E o *Comprimento da espira média* com base no perímetro da coluna central do núcleo, conforme a Equação (48).

Desta forma, é possível a determinação da *Massa total do cobre* de acordo com a Equação (49), e utilizando a *Densidade de corrente* encontrada no item (f) desta seção, determina-se a perda relacionada aos enrolamentos, como de acordo com a Equação (26).

A Figura 20 apresenta a dinâmica para determinar a *Massa total do cobre* e as *Perdas nos enrolamentos*.

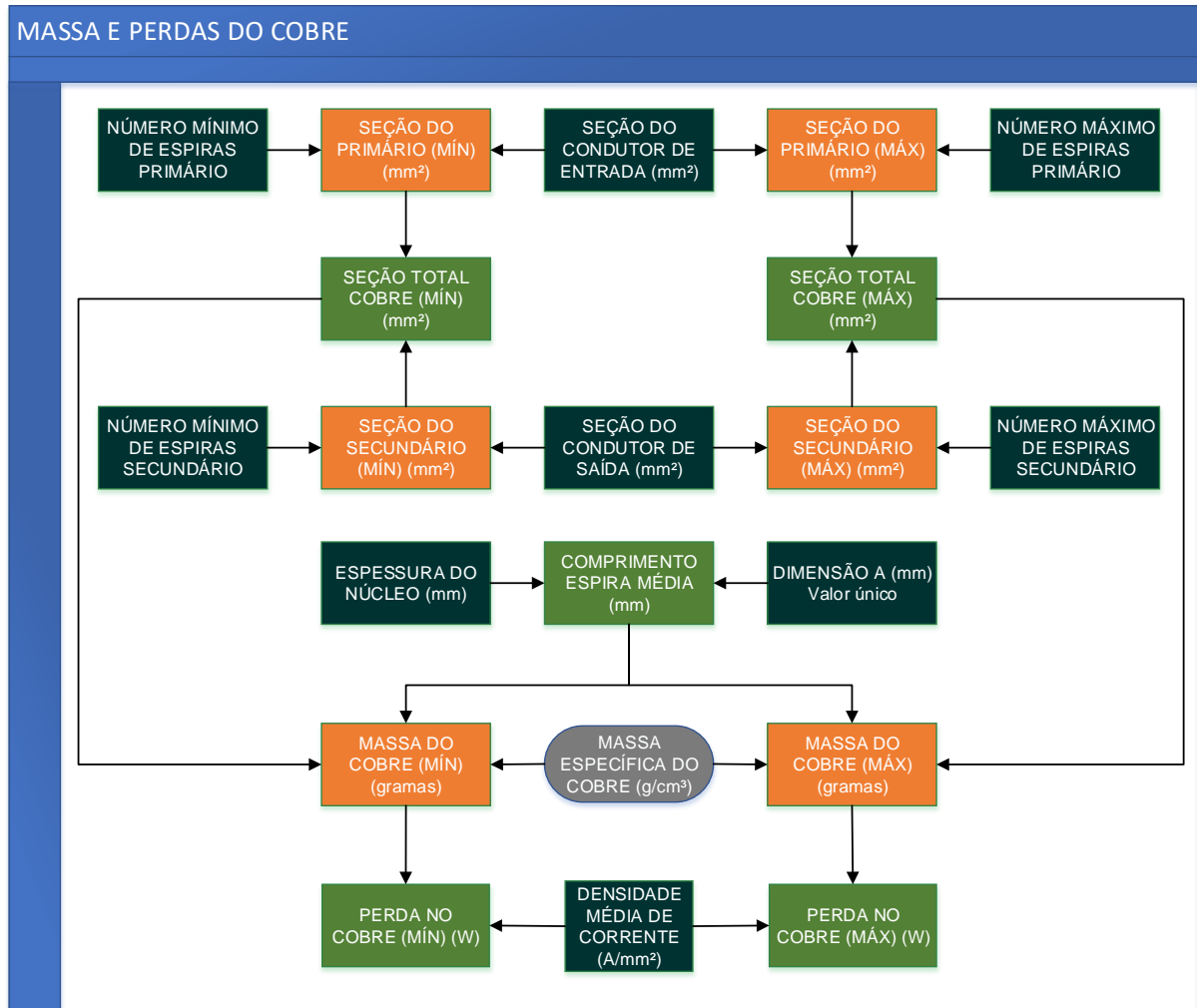


Figura 20 - Fluxograma para obter das perdas nos enrolamentos.
Fonte: Autoria própria.

i) A *Possibilidade de execução* deve ser verificada, pois é nesta etapa que há validação das características físicas, ou seja, se a possibilidade de construção do transformador será satisfeita.

Para verificação, é necessário obter a *Seção da janela*, que é determinada pelo produto das *Dimensões de "D" e "F"* como verificado na Figura 12, e determinado pelos índices indicado para a *Dimensão de "A"*. A *Seção da janela* é determinada pela Equação (64).

$$Seção_janela = Dimensão_D(n) \cdot Dimensão_F(n) \quad (64)$$

A *Possibilidade de execução* será satisfeita se a razão entre a *Seção da janela* e a *Seção do cobre* for maior ou igual a três, desta forma, o encaixe do carretel no núcleo ocorrerá sem problemas e o transformador poderá ser confeccionado.

Caso a razão apresente o valor menor que três, a determinação das dimensões núcleo deverão ser reanalisadas descartando o valor atual da *Dimensão de "A"*.

A Figura 21 apresenta a dinâmica para possibilidade de execução do projeto.

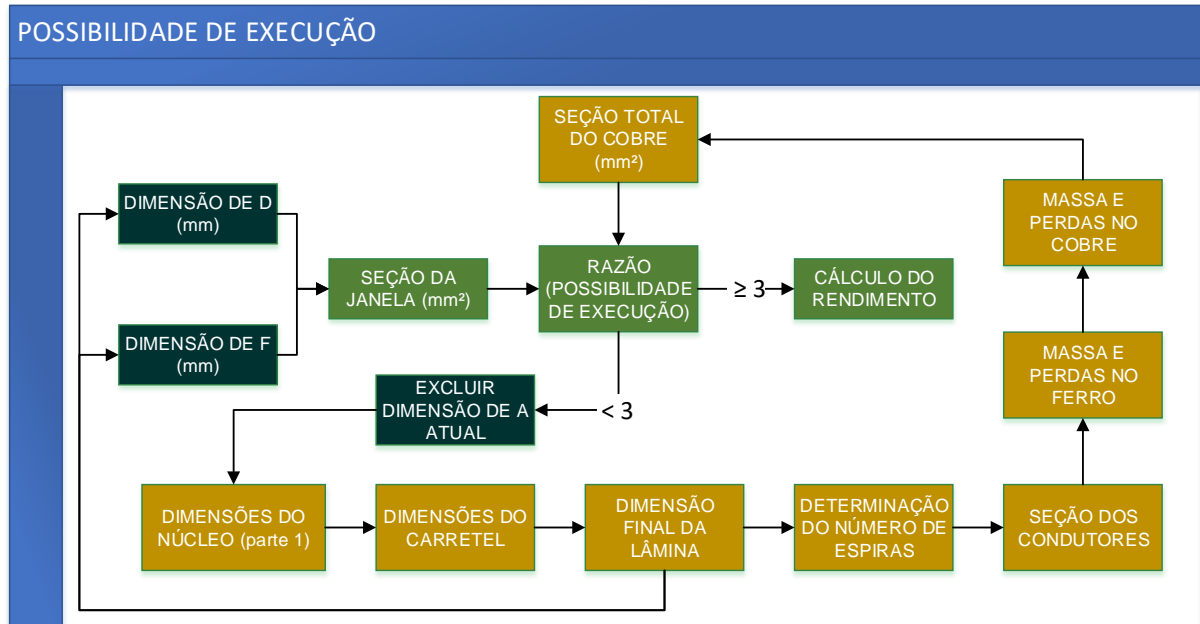


Figura 21 - Fluxograma para verificar a possibilidade de execução.
Fonte: Autoria própria.

j) Após o cálculo das perdas, é possível determinar a *Potência de entrada final*, e esta por sua vez, deverá ser menor ou igual que a *Potência de entrada inicial*, devido a *Seção do condutor* de entrada. Caso a *Potência de entrada final* seja maior que a *Potência de entrada inicial*, haveria a necessidade de recalculer a *Seção do condutor* de entrada, além disso, significaria que o transformador projetado poderia consumir uma potência de entrada 10% maior que a potência de saída, o que retornaria um rendimento abaixo de 90%, e desta forma, não se tornando atrativo em termos de eficiência energética. Assim, para o segundo caso, o projeto seria considerado inviável. A Figura 22 apresenta a dinâmica para o cálculo da *Potência de entrada*, considerando o caso para *Perda magnética mínima*.

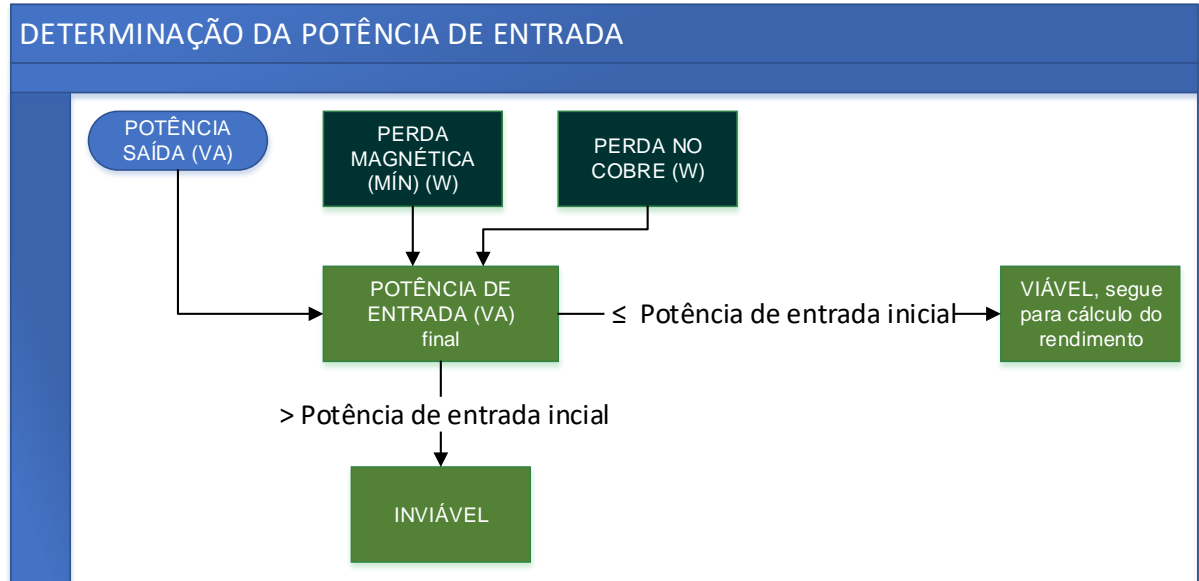


Figura 22 - Fluxograma para o cálculo final da Potência de entrada.
 Fonte: Autoria própria.

k) Após o cálculo final da *Potência de Entrada*, é possível determinar o *Rendimento* como segue na Equação (37), e é verificado na Figura 23. Para tanto, o cálculo do rendimento deve ser realizado utilizando os dados de acordo com a indução magnética especificada no item (e) desta seção.

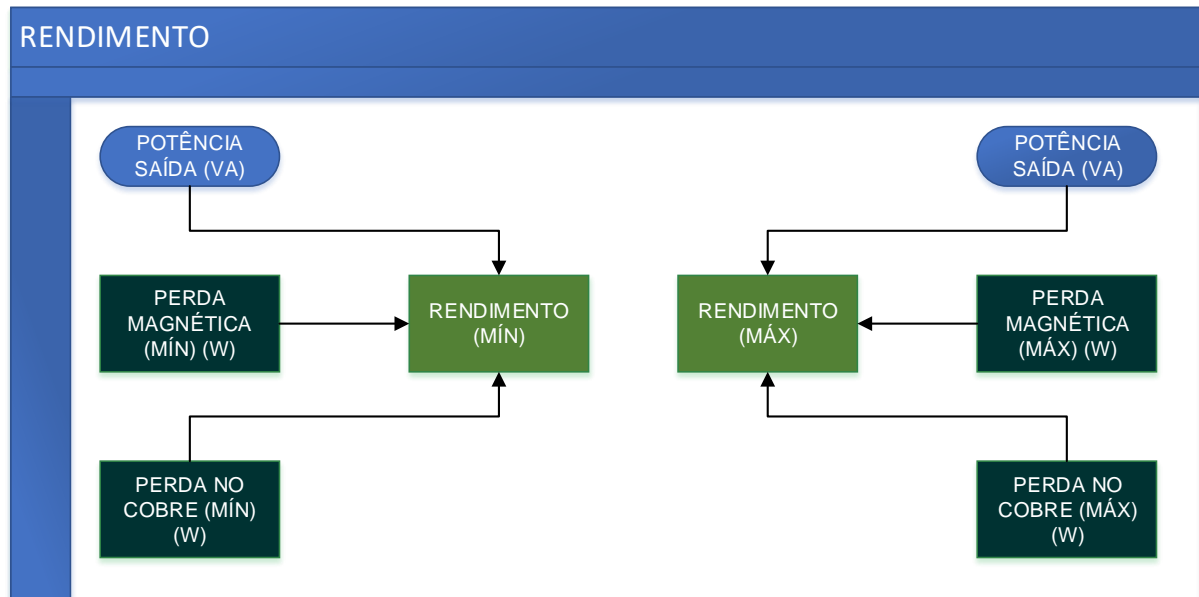


Figura 23 - Fluxograma para obter do rendimento.
 Fonte: Autoria própria.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

O algoritmo projetado pode ser implementado em várias formas (e programas para computador), como por exemplo o Mathcad[®], programas de planilhas como o Microsoft Excel[®], LibreOffice Calc[®], ou ainda em linguagens de programação. No caso do referido trabalho, o foco é a exploração de um algoritmo para o projeto, e desta forma, não será explanado sua implementação, porém o algoritmo foi implementado em linguagem de programação do *software* Matlab[®].

Para implementação houve a necessidade de utilizar um banco de dados com informações de fabricantes pertinentes aos componentes do transformador, como por exemplo as lâminas, o condutor e o carretel presentes nos anexos A, B, C, D e E.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os valores obtidos após a implementação do algoritmo; a princípio os resultados para validação do projeto, e em seguida um conjunto de resultados para explicar as possibilidades de aplicações.

Para os dois casos, os resultados a serem apresentados foram baseados com dados dos fabricantes dos materiais, e estão disponíveis nos Anexos A, B, C, D e E.

5.1 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

De modo a possibilitar comparação de valores, os valores nominais foram os mesmos utilizados no item 3.3 PROJETO – CASO BASE, Potência de saída 750 VA, Frequência de 60 Hz, Tensão de entrada 127 V e tensão de saída 220 V.

Serão apresentados dados obtidos considerando dois tipos de lâminas: a de grão orientado, com sete subtipos diferentes; e a de grão não-orientado com vinte e sete subtipos diferentes. Os subtipos estão relacionados com perdas típicas.

A Tabela 3 apresenta as dimensões físicas do núcleo, percebe-se que os valores ficaram bem próximos, devido ao fato das dimensões das lâminas serem definidas com base nos valores das dimensões do carretel. Ressalta-se que a seção geométrica, é obrigatoriamente menor ou igual a área do carretel.

Tabela 3 - Dimensões da geometria do núcleo.

	GRÃO ORIENTADO	GRÃO NÃO-ORIENTADO
Coluna Central (cm)	5	5
Espessura (cm)	6	6
Seção Geométrica (cm ²)	29,90	29,84

Fonte: Autoria própria.

Para uma mesma espessura do núcleo, a quantidade de lâminas irá variar de acordo com a espessura da própria lâmina, ou seja, quanto menor a espessura do núcleo, maior será a quantidade de lâminas, como observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de lâminas para o núcleo.

ESPESSURA DA LÂMINA	GRÃO ORIENTADO	GRÃO NÃO-ORIENTADO
0,23 mm	246	
0,27 mm	211	
0,3 mm	190	
0,35 mm	164	162
0,5 mm		116
0,54 mm		107
0,65 mm		89
1 mm		58

Fonte: Autoria própria.

A partir deste ponto, a título de comparação, serão considerados apenas os valores para as lâminas com espessura de 0,35 mm, tanto para grão orientado, como para grão não orientado.

O número de espiras, para cada tipo de lâmina, pode ser verificado na Tabela 5.

Tabela 5 - Número de espiras – primário e secundário.

	GRÃO ORIENTADO	GRÃO NÃO-ORIENTADO
N ESPIRAS PRIMÁRIO (mín)	120	178
N ESPIRAS PRIMÁRIO (máx)	106	120
N ESPIRAS SECUNDÁRIO (mín)	206	308
N ESPIRAS SECUNDÁRIO (máx)	182	206

Fonte: Autoria própria.

Os valores correspondentes ao volume e massa total do núcleo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados físicos do núcleo.

	GRÃO ORIENTADO	GRÃO NÃO-ORIENTADO
VOLUME (cm ³)	883,07	881,48
MASSA (g)	6887,9	6875,6

Fonte: Autoria própria.

A massa do cobre, considerando os dois enrolamentos, é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de massa do cobre.

	GRÃO ORIENTADO	GRÃO NÃO-ORIENTADO
Massa mín (g)	1737,3	2585,7
Massa máx (g)	1534,7	1736,0

Fonte: Autoria própria.

É possível verificar a massa do transformador referindo-se ao núcleo e aos enrolamentos, ressaltando que é desconsiderado parafusos, suportes e bornes. Desta forma, a massa do transformador pode ser verificada de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Massa do transformador.

	GRÃO ORIENTADO	GRÃO NÃO-ORIENTADO
Massa mín (kg)	8,62	9,46
Massa máx (kg)	8,42	8,61

Fonte: Autoria própria.

Neste ponto é possível verificar a possibilidade de execução. Na Tabela 9 é apresentado os valores das razões que indicam a viabilidade, ou não, da execução.

Tabela 9 - Possibilidade de execução.

	GRÃO ORIENTADO	GRÃO NÃO-ORIENTADO
Razão mín	2,86	1,92
Razão máx	3,24	2,86

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, verifica-se que apenas para o caso da indução magnética máxima e lâminas de grão orientado, o projeto é possível de ser executado, pois este

apresentou o valor da razão entre a área de janela e a área do cobre enrolado, maior ou igual que 3.

E as perdas magnéticas e perdas no cobre são: 13,57 W e 19,18 W respectivamente. E com isso, a potência de entrada para o transformador projetado é de 782,75 W.

Com o fato de que a potência de entrada efetiva (782,75 W), ficou abaixo da potência de entrada estipulada inicialmente no projeto (825 W), desta maneira, verifica-se que o condutor de entrada calculado no projeto está corretamente dimensionado, não havendo a necessidade de recalculá-lo.

O rendimento para o transformador projetado é de 95,82%.

O resultado completo do cálculo está presente no Apêndice A.

5.1.1 Comparação de valores

Nesta subseção serão comparados alguns valores obtidos do projeto caso base (item 3.2.1) com os valores obtidos do algoritmo projetado.

É possível verificar que o algoritmo projetado retorna os valores próximos ao projeto caso base, porém é verificada melhoria com relação a quantidade de materiais, menor massa total, menos perdas e melhor rendimento, como pode ser verificado no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação dos valores obtidos no projeto caso base e no algoritmo projetado.

Variável	Projeto base	Algoritmo	Variação
Potência de saída	750 VA	750 VA	-
Número de espiras primário	176	106	70
Número de espiras secundário	306	182	124
Massa do ferro	6,32 kg	6,89 kg	-0,57 kg
Massa do cobre	2,57 kg	1,53 kg	1,04 kg
Massa total	8,89 kg	8,42 kg	0,47 kg
Perdas magnéticas	30,66 W	13,57 W	17,09 W
Perdas no cobre	32,05 W	19,18 W	12,87 W
Potência de entrada (calculada)	825 VA	782,75 VA	42,25 W
Rendimento	92,28%	95,82%	3,54%

Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que no caso do número de espiras, a variação torna-se mais evidente, pois no algoritmo há opção de utilizar vários dados de diversos fabricantes, e como verificado o cálculo do número de espiras depende (também) da indução magnética, logo, com o valor da indução magnética mais elevado, o número de espiras diminui, e conseqüentemente a massa de cobre também é reduzida.

Outra verificação importante a ser realizada é que no caso do cálculo do algoritmo, a utilização do carretel, o qual é um dos fatores que determinam as dimensões do núcleo, em conjunto com variedade de espessuras das lâminas implica em maior massa de ferro.

5.2 DIVERSIDADE DE APLICAÇÕES (PROJETO SECUNDÁRIO)

De modo a explicar o algoritmo e os resultados que podem ser analisados, serão apresentados resultados de projeto secundário, considerando os seguintes dados: Tensão entrada em 127 V, Tensão de saída em 24 V, Frequência de operação de 60 Hz, e potência de 700 VA.

O Quadro 2 apresenta os resultados para o projeto citado, porém é possível fazer uma busca refinada considerando apenas parâmetros de interesse, como por exemplo o rendimento ou número de espiras.

Quadro 2 – Resultados para o projeto secundário.

Referência	Aperam	(mm)		Quantidade de lâminas	Perda magnética mín (W)	Perda magnética máx (W)	Massa mín (kg)	Massa máx (kg)	Rendimento (mín)	Rendimento (máx)	
Grão Não-Orientado											
P800-100A	E233	1		58,00	-	68,18	-	8,32	-	0,88	
P450-65A	E233	0,65		89,00	-	37,10	-	8,38	-	0,92	
M600-65A	E230			89,00	-	52,90	-	8,38	-	0,90	
M470-65A	E185			89,00	-	41,22	-	8,38	-	0,92	
M450-65A	E170			89,00	-	37,10	-	8,38	-	0,92	
M400-65A	E157			89,00	-	34,35	-	8,38	-	0,92	
M530-54A	E230	0,54		89,00	-	45,76	-	8,38	-	0,91	
P400-50A	E233	0,5		89,00	-	32,02	-	8,38	-	0,93	
M530-50A	E230			107,00	-	45,70	-	8,37	-	0,91	
M470-50A	E185			116,00	-	35,75	-	8,40	-	0,92	
M400-50A	E170			116,00	-	32,10	-	8,40	-	0,93	
M370-50A	E157			116,00	-	29,83	-	8,40	-	0,93	
M350-50A	E145			116,00	-	29,07	-	8,40	-	0,93	
M330-50A	E137			116,00	-	27,41	-	8,40	-	0,93	
M310-50A	E125			116,00	-	26,52	-	8,40	-	0,93	
M290-50A	E115			116,00	-	25,14	-	8,40	-	0,93	
M270-50A	E110			116,00	-	23,76	-	8,40	-	0,94	
M250-50A	E105			116,00	-	22,04	-	8,40	-	0,94	
M230-50A	E100			116,00	-	20,32	-	8,40	-	0,94	
M330-35A	E170		0,35		162,00	-	28,33	-	8,38	-	0,93
M300-35A	E157				162,00	-	25,71	-	8,38	-	0,93
M290-35A	E145				162,00	-	24,06	-	8,38	-	0,94
M270-35A	E137			162,00	-	23,10	-	8,38	-	0,94	
M250-35A	E125			162,00	-	21,59	-	8,38	-	0,94	
M235-35A	E115			162,00	-	19,94	-	8,38	-	0,94	
M210-35A	E110			162,00	-	18,22	-	8,38	-	0,94	
M195-35A	E100			162,00	-	17,88	-	8,38	-	0,94	
Grão Orientado											
M108-23	E003-9	0,23		246,00	6,55	9,66	8,39	8,20	0,96	0,96	
M117-23	E003-9	0,27		246,00	6,83	10,62	8,39	8,20	0,96	0,96	
M112-27	E004-7			211,00	7,25	10,09	8,40	8,19	0,96	0,96	
M125-27	E004-7	0,3		211,00	7,74	11,26	8,40	8,19	0,96	0,96	
M130-30	E005-4			190,00	7,91	11,76	8,38	8,17	0,96	0,96	
M140-30	E005-4			190,00	8,32	12,58	8,38	8,17	0,96	0,96	
M150-35	E006-2	0,35		164,00	9,51	13,57	8,40	8,19	0,95	0,95	

Fonte: Autoria própria.

De maneira a refinar a busca, serão considerados rendimentos de 94% a 95% perante ao universo de resultados apresentados no Quadro 2. Desta forma, os selecionados podem ser verificados no Quadro 3.

Quadro 3 - Primeiro refinamento do projeto secundário.

Referência	Aperam	(mm)		Quantidade de lâminas	Perda magnética mín (W)	Perda magnética máx (W)	Massa mín (kg)	Massa máx (kg)	Rendimento (mín)	Rendimento (máx)
Grão Não-Orientado										
M270-50A	E110	0,5		116,00	-	23,76	-	8,40	-	0,94
M250-50A	E105			116,00	-	22,04	-	8,40	-	0,94
M230-50A	E100			116,00	-	20,32	-	8,40	-	0,94
M290-35A	E145	0,35		162,00	-	24,06	-	8,38	-	0,94
M270-35A	E137			162,00	-	23,10	-	8,38	-	0,94
M250-35A	E125			162,00	-	21,59	-	8,38	-	0,94
M235-35A	E115			162,00	-	19,94	-	8,38	-	0,94
M210-35A	E110			162,00	-	18,22	-	8,38	-	0,94
M195-35A	E100		162,00	-	17,88	-	8,38	-	0,94	
Grão Orientado										
M150-35	E006-2	0,35		164,00	9,51	13,57	8,40	8,19	0,95	0,95

Fonte: Autoria própria.

E ainda, como forma de fazer um segundo refinamento, é possível, por exemplo, considerar apenas opções com *Perda magnética* com valores entre 9 W até 22 W. Assim, o resultado final pode ser verificado no Quadro 4.

Quadro 4 - Segundo refinamento do projeto secundário.

Referência	Aperam	(mm)		Quantidade de lâminas	Perda magnética mín (W)	Perda magnética máx (W)	Massa mín (kg)	Massa máx (kg)	Rendimento (mín)	Rendimento (máx)
Grão Não-Orientado										
M230-50A	E100	0,5		116,00	-	20,32	-	8,40	-	0,94
M250-35A	E125	0,35		162,00	-	21,59	-	8,38	-	0,94
M235-35A	E115			162,00	-	19,94	-	8,38	-	0,94
M210-35A	E110			162,00	-	18,22	-	8,38	-	0,94
M195-35A	E100			162,00	-	17,88	-	8,38	-	0,94
Grão Orientado										
M150-35	E006-2	0,35		164,00	9,51	13,57	8,40	8,19	0,95	0,95

Fonte: Autoria própria.

Por fim, é possível fazer um último refinamento, considerar a menor massa, e desta forma, a projeto escolhido pode ser observado no Quadro 5.

Quadro 5 - Última considerando do projeto secundário.

Referência	Aperam	(mm)		Quantidade de lâminas	Perda magnética mín (W)	Perda magnética máx (W)	Massa mín (kg)	Massa máx (kg)	Rendimento (mín)	Rendimento (máx)
Grão Orientado										
M150-35	E006-2	0,35		164,00	-	13,57	-	8,19	-	0,95

Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÕES

A princípio, o objetivo deste trabalho foi o de realizar um estudo acerca da teoria de transformadores, analisar os parâmetros de projeto e de construção de um transformador, buscando analisar a influência dos parâmetros construtivos no rendimento, possibilitando assim, a elaboração do algoritmo para o processo iterativo de projeto de transformadores.

Pode-se verificar que a partir de explanação da teoria do modelo matemático de um transformador, foi possível determinar a equação do rendimento em função de variáveis de parâmetros construtivos, pois esta, ficou em função da massa dos elementos (enrolamentos e núcleo), e a massa é obtida a partir do volume e densidade dos materiais. Foi verificada também a possibilidade de execução do projeto, haja vista que esta é diretamente relacionada com a razão entre a área da seção da janela do núcleo, com a área ocupada pelos enrolamentos.

Para validar o algoritmo, os resultados obtidos a partir do algoritmo projeto demonstraram-se satisfatórios e condizentes com os resultados obtidos a partir do projeto caso base (ambos com os mesmos dados, 750 VA, 127/220 V). Ressalta-se que todos os resultados obtidos são dependentes da metodologia do cálculo como também dos dados de materiais fornecido pelos fabricantes.

O algoritmo projetado realiza iterações e fornece uma gama de resultados, e estes resultados dependem diretamente de dados fornecidos pelos fabricantes dos elementos (carreteis, fios de cobre, lâminas) do transformador. A partir dos resultados fornecidos pelo algoritmo, é possível realizar uma busca de modo que, com as opções disponíveis os requisitos subsequentes possam ser atendidos.

Como exemplo de busca de resultados, o cálculo de um transformador de 700 VA 127/24 V (projeto secundário), fornece as 34 possibilidades, porém um refinamento com base no rendimento, perda magnética e massa, a possibilidade é reduzida a um único projeto; verificando-se que o refinamento (ou filtro de busca), é aplicado de maneira a suprir diversas necessidades aplicação.

Outra maneira forma de busca, é a partir do algoritmo projetado, alterar a restrição, por exemplo, fixar um número de espiras, e verificar as possibilidades de projeto, bem como realizar a busca da menor massa total possível.

O algoritmo projetado permite o projeto de transformadores com diversos tipos de materiais, por exemplo, a inclusão de lâminas de material amorfo⁶; observando que para os cálculos, são necessárias informações mínimas, fornecida por fabricantes, utilizadas no decorrer do projeto.

O presente trabalho possibilita a iniciativa para elaboração de estudos futuros, aplicando a abordagem para outros tipos de transformadores, outros parâmetros de análise e buscas em torno do universo de resultados obtidos, como por exemplo, realizar busca do resultado ótimo a partir de inteligência artificial.

⁶ Liga constituída de ferro, silício e boro que possui estrutura não-cristalina formada por resfriamento rápido do metal fundido, permitindo baixas perdas e melhoria das propriedades magnéticas (VIJAI, 2017).

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Ezequiel R. D. **Análise de Resposta em frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 114 p. Disponível em: <<http://goo.gl/Dq8zN4>>. Acesso em: Julho 2016.

AMERICANSIL. **Cortes de Chapas de Silício**. Disponível em: <<http://www.americansil.com.br>>. Acesso em: Janeiro 2017.

APERAM. **Aperam made for life**. Disponível em: <<https://goo.gl/N73rgX>>. Acesso em: Maio 2016.

AQUINO, Claudio V. D.; JUNIOR, Naasson P. D. A. **Eletromagnetismo I**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Bauru: UNESP, 2016. 152 p. Disponível em: <<https://goo.gl/E0fV4g>>. Acesso em: Março 2017.

CALIL, Wilerson V. **Determinação de Fator de Correção Para Cálculo de Perdas Magnéticas em Núcleos de Transformadores de Potência Pelo Método de Elementos Finitos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2009. 119 p. Disponível em: <<https://goo.gl/yMZ8c3>>. Acesso em: Dezembro 2016.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 65-141 p.

DASGUPTA, Indrajit. **Power Transformers Quality Assurance**. Greater Noida: New Age International, 2009. 14-29 p. ISBN ISBN 978-81-224-2889-6.

DELGADO, Rodrigo D. S. **Estudo dos requisitos essenciais a especificação de transformadores de potência em condições normais de operação**. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010. 121 p. Disponível em: <<http://migre.me/tuUfm>>. Acesso em: Março 2016.

ESEOSA, Omorogiuwa. Application of Non-Linear Programming Optimization Technique in Power Transformer Design. **Applied Research Journal**, v. I, n. 2, p. 71-79, Abril 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/JXfmzK>>. Acesso em: Maio 2017.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. 6ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

INJERTEL. **Indústria e Comércio LTDA-EPP**. Disponível em: <<http://www.injertel.com.br/produtos.php>>. Acesso em: Setembro 2016.

KOSOW, Irwing L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15ª. ed. São Paulo: Globo, 2005.

KULKARNI, S V.; KHAPARDE, S A. **Transformer Engineering Design and Practice**. Mumbai: Marcel Dekker, 2004. 36-71 p. ISBN ISBN 0-8247-5653-3.

LANDGRAF, Fernando J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. **Aços: perspectivas para os próximos 10 anos**, Rio de Janeiro, p. 109-128, 2002. Disponível em: <<https://goo.gl/PrOX5q>>. Acesso em: Janeiro 2017.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores**. 8ª. ed. São Paulo: Globo, 1991. ISBN ISBN 85-250-0223-2.

MEHTA, H. D.; PATEL, Rajesh M. A Review on Transformer Desing Optimization and Performace Analysis Using Artificial Intelligence Techniques. **International Journal of Science and Research**, v. III, n. 9, p. 726-733, Setembro 2014. Disponível em: <<https://www.ijsr.net/archive/v3i9/U0VQMTQxOTg=.pdf>>. Acesso em: Maio 2017.

NOGUEIRA, Daniel D. S.; ALVES, Diego P. **Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação Tópicos Essenciais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009. 212 p. Disponível em: <<http://migre.me/tuUgJ>>. Acesso em: Março 2016.

NOVACON. **Novacon Vertex**. Disponível em: <<http://www.novacon.com.br/audioctrasnf2.htm>>. Acesso em: Outubro 2016.

OLIVEIRA, José C. D.; COGO, João R.; ABREU, José P. G. D. **Transformadores - teoria e ensaios**. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1984. 19-27 p. ISBN ISBN 85-212-0141-9.

PAULINO, Marcelo E. D. C. Princípios básicos de transformadores de potência. **O Setor Elétrico**, Santa Cecília, n. 96, p. 52-61, Janeiro 2014.

RIES, Walter. **Transformadores, Fundamentos para o Projeto e Cálculo**. 1ª. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2007.

SIEMENS. **Controle e Distribuição em Baixa Tensão, Transformadores de Baixa Tensão, Monofásicos e Trifásicos**. Disponível em: <<https://goo.gl/5djxzB>>. Acesso em: Março 2017.

SOMABRASIL. Disponível em: <<http://www.somabrasil.com.br/transformadores>>. Acesso em: Outubro 2016.

VASCONCELLOS, Jonathan C. D. **Análise das Perdas no Transformador Monofásico Para Diferentes Condições de Operação**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013. 106 p. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006710.pdf>>. Acesso em: Junho 2016.

VIJAI. **Vijai Elétrica do Brasil Lrda**. Disponível em: <<http://www.vijai.com.br/br/amorphous.php>>. Acesso em: Abril 2017.

APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO O ALGORITMO

Quadro 6

Referência	Aperam	(mm)	Quantidade de lâminas	Número espiras pri (min)	Número espiras pri (máx)	Número espiras sec (min)	Número espiras sec (máx)	Massa cobre (min)	Massa cobre (máx)	Massa ferro	Massa total (min)	Massa total (máx)	Perda mag (min)	Perda mag (máx)	Perda cobre (min)	Perda cobre (máx)	Rendimento (min)	Rendimento (máx)
Grão Não-Orientado																		
P800-100A	E233	1	58	180	120	312	208	2,61	1,74	6,82	9,43	8,56	31,02	68,18	32,60	21,74	0,92	0,89
P450-65A	E233		89	178	120	308	206	2,58	1,74	6,87	9,46	8,61	16,13	37,40	32,31	21,69	0,94	0,93
M600-65A	E230	0,65	89	178	120	308	206	2,58	1,74	6,87	9,46	8,61	17,18	41,22	32,31	21,69	0,94	0,92
M470-65A	E185		89	178	120	308	206	2,58	1,74	6,87	9,46	8,61	16,15	37,40	32,31	21,69	0,94	0,93
M450-65A	E170		89	178	120	308	206	2,58	1,74	6,87	9,46	8,61	14,77	34,35	32,31	21,69	0,94	0,93
M400-65A	E157		89	178	120	308	206	2,58	1,74	6,87	9,46	8,61	19,99	45,76	32,31	21,69	0,93	0,92
M530-54A	E230	0,54	89	178	120	308	206	2,58	1,74	6,87	9,46	8,61	14,77	32,02	32,31	21,69	0,94	0,93
P400-50A	E233		107	178	120	310	206	2,59	1,73	6,86	9,45	8,60	19,97	45,70	32,41	21,68	0,93	0,92
M630-50A	E230		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	16,12	35,75	32,35	21,72	0,94	0,93
M470-50A	E185		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	14,81	32,10	32,35	21,72	0,94	0,93
M400-50A	E170		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	13,78	29,83	32,35	21,72	0,94	0,94
M370-50A	E157		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	12,67	29,07	32,35	21,72	0,94	0,94
M350-50A	E145	0,5	116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	11,99	27,41	32,35	21,72	0,94	0,94
M330-50A	E137		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	10,88	26,52	32,35	21,72	0,95	0,94
M310-50A	E125		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	9,99	25,14	32,35	21,72	0,95	0,94
M290-50A	E115		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	9,64	23,76	32,35	21,72	0,95	0,94
M270-50A	E110		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	9,30	22,04	32,35	21,72	0,95	0,94
M250-50A	E105		116	178	120	308	206	2,59	1,74	6,89	9,48	8,63	8,95	20,32	32,35	21,72	0,95	0,95
M230-50A	E100		162	178	120	308	206	2,59	1,74	6,88	9,46	8,61	11,69	28,33	32,32	21,70	0,94	0,94
M300-35A	E157		162	178	120	308	206	2,59	1,74	6,88	9,46	8,61	10,31	25,71	32,32	21,70	0,95	0,94
M290-35A	E145		162	178	120	308	206	2,59	1,74	6,88	9,46	8,61	9,97	24,06	32,32	21,70	0,95	0,94
M270-35A	E137	0,35	162	178	120	308	206	2,59	1,74	6,88	9,46	8,61	9,63	23,10	32,32	21,70	0,95	0,94
M250-35A	E125		162	178	120	308	206	2,59	1,74	6,88	9,46	8,61	8,59	21,59	32,32	21,70	0,95	0,95
M235-35A	E115		162	178	120	308	206	2,59	1,74	6,88	9,46	8,61	8,25	19,94	32,32	21,70	0,95	0,95
M210-35A	E110		162	178	120	308	206	2,59	1,74	6,88	9,46	8,61	7,91	18,22	32,32	21,70	0,95	0,95
M195-35A	E100		162	178	120	308	206	2,59	1,74	6,88	9,46	8,61	7,91	17,88	32,32	21,70	0,95	0,95
Grão Orientado																		
M108-23	E003-9	0,23	246	118	106	206	182	1,72	1,54	6,90	8,62	8,43	6,55	9,66	21,55	19,19	0,96	0,96
M117-23	E003-9		246	118	106	206	182	1,72	1,54	6,90	8,62	8,43	6,83	10,62	21,55	19,19	0,96	0,96
M112-27	E004-7	0,27	211	118	104	206	182	1,73	1,52	6,91	8,63	8,43	7,25	10,09	21,57	19,03	0,96	0,96
M125-27	E004-7		211	118	104	206	182	1,73	1,52	6,91	8,63	8,43	7,74	11,26	21,57	19,03	0,96	0,96
M130-30	E005-4	0,3	190	120	106	206	182	1,74	1,53	6,88	8,61	8,41	7,91	11,76	21,70	19,17	0,96	0,96
M140-30	E005-4		190	120	106	206	182	1,74	1,53	6,88	8,61	8,41	8,32	12,58	21,70	19,17	0,96	0,96
M150-35	E006-2	0,35	164	120	106	206	182	1,74	1,53	6,89	8,63	8,42	9,51	13,57	21,72	19,18	0,96	0,96

Fonte: Autoria própria.

ANEXO A – DIMENSÕES DAS LÂMINAS PARA TRANSFORMADORES.

Quadro 7 -

Características Dimensionais (mm)										
A	B	C	D	E	F	G	H	Φ dos Furos		
								I	J	K
9,53	34,93	23,81	19,05	4,76	7,94	2,38	0	0	2,38	0
9,6	35	24,5	19,05	5	7,7	0	0	0	0	0
12,7	41,28	26,99	20,64	6,35	7,94	3,18	0	0	3,18	0
12,7	41,28	26,99	20,64	6,35	7,94	0	0	0	0	0
13	41	27	21	6	8	0	0	0	0	0
15,88	47,63	31,75	23,81	7,94	7,94	3,97	0	0	3,81	0
15,88	47,63	31,75	23,81	7,94	7,94	0	0	0	0	0
15,88	47,63	31,75	23,81	7,94	7,94	3,97	0	0	4	0
16	48	32	24	8	8	0	0	0	0	0
19,05	57,15	38,1	28,58	9,53	9,53	4,76	0	0	3,18	0
19,05	57,15	38,1	28,58	9,53	9,53	4,76	0	0	4	0
19,05	57,15	38,1	28,58	9,53	9,53	0	0	0	0	0
20	60	40	30	10	10	0	0	0	0	0
20	60	40	30	10	10	5	50	4,5	0	4,5
22,23	66,68	44,45	33,34	11,11	11,11	5,56	55,56	3,97	0	3,97
22,23	66,68	44,45	33,34	11,11	11,11	0	0	0	0	0
25,4	76,2	50,8	38,1	12,7	12,7	6,35	63,5	5,56	0	5,56
28,58	85,73	57,15	42,86	14,29	14,29	7,14	71,44	5,56	0	5,56
31,75	95,25	63,5	47,63	15,88	15,88	7,94	79,38	5,56	0	5,56
34,93	104,78	69,85	52,39	17,46	17,46	8,73	87,31	5,56	0	5,56
38,1	114,3	76,2	57,15	19,05	19,05	9,53	95,25	5,56	0	5,56
40	120	80	60	20	20	10	100	7	0	7
44,45	133,35	88,9	66,68	22,23	22,23	11,11	111,13	7,14	0	7,14
50	150	100	75	25	25	12,5	125	7	0	7
53,98	161,93	107,95	80,96	26,99	26,99	13,49	134,94	8,33	0	8,33
57,15	171,45	114,3	85,73	28,58	28,58	7,94	155,58	7,94	0	7,94
60	180	120	90	30	30	15	150	9	0	9
63,5	190,5	127	95,25	31,75	31,75	9,53	171,45	9,92	9,92	9,92
70	210	140	105	35	35	17,5	175	10,5	0	10,5
80	240	160	120	40	40	20	200	10,5	0	10,5
90	270	180	135	45	45	22,5	225	10,5	0	10,5
100	300	200	150	50	50	25	250	10,5	0	10,5

Fonte: Extraído de (SOMABRASIL, 2014).

ANEXO B – DADOS DAS DIMENSÕES DOS CARRETÉIS

Quadro 8

Medida A (mm)	Medida B (mm)	Área (mm ²)	Medida A (mm)	Medida B (mm)	Área (mm ²)	Medida A (mm)	Medida B (mm)	Área (mm ²)
6	6	36	22	22	484	28,6	38	1086,8
6	9	54	22	24	528	28,6	42	1201,2
10,2	10	102	22	26	572	28,6	43	1229,8
10,2	15	153	22	30	660	28,6	50	1430
13	13	169	22	45	990	28,6	60	1716
13	20	260	25,4	19	482,6	32	22	704
16	16	256	25,4	20	508	32	28	896
16	22	352	25,4	25	635	32	32	1024
16	30	480	25,4	32	812,8	32	38	1216
16	40	640	25,4	35	889	32	40	1280
19	41	779	25,4	42	1066,8	32	42	1344
20	19	380	25,4	50	1270	32	45	1440
20	22	440	25,4	60	1524	32	52	1664
20	30	600	28,6	29	829,4	32	55	1760
20,5	30	615	28,6	33	943,8	32	60	1920
Medida A (mm)	Medida B (mm)	Área (mm ²)	Medida A (mm)	Medida B (mm)	Área (mm ²)	Medida A (mm)	Medida B (mm)	Área (mm ²)
32	66	2112	38	105	3990	50	51	2550
32	69	2208	40	40	1600	50	60	3000
35	40	1400	40	44	1760	50	70	3500
35	45	1575	40	55	2200	50	80	4000
38	40	1520	40	65	2600	50	95	4750
38	45	1710	42	44	1848	50	105	5250
38	50	1900	42	53	2226	55	65	3575
38	55	2090	42	60	2520	55	70	3850
38	60	2280	42	65	2730	55	80	4400
38	63	2394	42	70	2940	60,8	70	4256
38	66	2508	45	45	2025	60,8	75	4560
38	75	2850	45	56	2520	60,8	80	4864
38	80	3040	45	65	2925	60,8	90	5472
38	90	3420	45	70	3150	60,8	95	5776
38	94	3572	45	75	3375	60,8	105	6384

Fonte: Extraído de (INJERTEL, 2013).

ANEXO C – INFORMAÇÕES DO CONDUTOR DE COBRE

Quadro 9

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	kg por km	Resistência (ohms/km)	Capacidade de condução		Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	kg por km	Resistência (ohms/km)	Capacidade de condução
0	8,252	53,48	0	0	0,317	150		23	0,5733	0,26	16	2,29	56,4	0,73
1	7,348	42,41	0	375	1,4	120		24	0,5106	0,2	18	1,82	85	0,58
2	6,544	33,63	0	295	1,5	96		25	0,4547	0,16	20	1,44	106,2	0,46
3	5,827	26,67	0	237	1,63	78		26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
4	5,189	21,15	0	188	0,8	60		27	0,3606	0,1	25,6	0,91	170	0,29
5	4,621	16,77	0	149	1,01	48		28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23
6	4,115	13,3	0	118	1,27	38		29	0,2859	0,064	32,4	0,57	265,6	0,18
7	3,665	10,55	0	94	1,7	30		30	0,2546	0,051	35,6	0,45	333,3	0,15
8	3,264	8,36	0	74	2,03	24		31	0,2268	0,04	39,8	0,36	425	0,11
9	2,906	6,63	0	58,9	2,56	19		32	0,2019	0,032	44,5	0,28	531,2	0,09
10	2,588	5,26	0	46,8	3,23	15		33	0,1798	0,0254	56	0,23	669,3	0,072
11	2,305	4,17	0	32,1	4,07	12		34	0,1601	0,0201	56	0,18	845,8	0,057
12	2,053	3,31	0	29,4	5,13	9,5		35	0,1426	0,0159	62,3	0,14	1069	0,045
13	1,828	2,63	0	23,3	6,49	7,5		36	0,127	0,0127	69	0,1	1338	0,036
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6		37	0,1131	0,01	78	0,089	1700	0,028
15	1,45	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8		38	0,1007	0,0079	82,3	0,07	2152	0,022
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7		39	0,0897	0,0063	97,5	0,056	2696	0,017
17	1,15	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2		40	0,0799	0,005	111	0,044	3400	0,014
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5		41	0,0711	0,004	126,8	0,035	4250	0,011
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2		42	0,0633	0,0032	138,9	0,028	5312	0,009
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6		43	0,0564	0,0025	156,4	0,022	6800	0,007
21	0,723	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2		44	0,0503	0,002	169,7	0,018	8500	0,005
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92								

Fonte: Extraído de (NOVACON, 2015).

ANEXO D – DADOS DAS LÂMINAS DE GRÃO ORIENTADO

Quadro 10

Espessura (mm)	Perda Magnética Máxima a (W/kg)				Indução Magnética Mínima a (T)			Densidade Assumida (g/cm ³)	Fator de Empilhamento Mínimo (%)	Índice de Dobramento Mínimo
	1,5 T		1,7 T		800 A/m	2500 A/m	10000 A/m			
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz						
0,23	0,73	0,95	1,08	1,4	1,78	1,87	1,97	7,65	94,5	2
0,23	0,75	0,99	1,17	1,54	1,78	1,87	1,97	7,65	94,5	2
0,27	0,8	1,05	1,12	1,46	1,78	1,87	1,97	7,65	95	2
0,27	0,85	1,12	1,24	1,63	1,78	1,87	1,97	7,65	95	2
0,3	0,88	1,15	1,3	1,71	1,78	1,87	1,97	7,65	95,5	2
0,3	0,92	1,21	1,4	1,83	1,78	1,87	1,97	7,65	95,5	2
0,35	1,05	1,38	1,5	1,97	1,78	1,87	1,97	7,65	96	2

Fonte: Extraído de (APERAM, 2012).

ANEXO E – DADOS DAS LÂMINAS DE GRÃO NÃO-ORIENTADO

Quadro 11

Espessura (mm)	Perda Magnética Máxima a (W/kg)				Indução Magnética Mínima a (T)			Densidade Assumida (g/cm ³)	Fato de Empilhamento Mínimo (%)	Índice de Dobramento Mínimo
	1,0 T		1,5 T		2500 A/m	5000 A/m	10000 A/m			
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz						
1	3,6	4,55	8	10	1,64	1,73	1,84	7,75	98	5
0,65	1,95	2,35	4,25	5,4	1,64	1,73	1,84	7,75	97	10
0,65	2,6	3,25	6	7,7	1,6	1,7	1,8	7,75	97	10
0,65	2	2,5	4,7	6	1,6	1,7	1,8	7,75	97	10
0,65	1,95	2,35	4,25	5,4	1,6	1,7	1,8	7,75	97	5
0,65	1,7	2,15	3,95	5	1,6	1,7	1,8	7,75	97	10
0,65	2,3	2,91	5,3	6,66	1,59	1,69	1,79	7,75	97	10
0,65	1,7	2,15	3,68	4,66	1,64	1,73	1,83	7,75	97	10
0,54	2,3	2,91	5,3	6,66	1,59	1,69	1,79	7,75	97	10
0,5	1,85	2,34	4,1	5,19	1,59	1,69	1,79	7,75	97	5
0,5	1,7	2,15	3,68	4,66	1,59	1,69	1,79	7,75	97	5
0,5	1,57	2	3,42	4,33	1,59	1,69	1,79	7,75	97	5
0,5	1,45	1,84	3,33	4,22	1,59	1,69	1,79	7,75	97	3
0,5	1,37	1,74	3,14	3,98	1,58	1,67	1,78	7,65	97	3
0,5	1,25	1,58	3,05	3,85	1,58	1,67	1,78	7,65	97	3
0,5	1,15	1,45	2,9	3,65	1,58	1,67	1,78	7,65	97	3
0,5	1,1	1,4	2,7	3,45	1,58	1,67	1,78	7,65	97	3
0,5	1,05	1,35	2,5	3,2	1,58	1,67	1,78	7,65	97	3
0,5	1	1,3	2,3	2,95	1,58	1,67	1,78	7,65	97	3
0,35	1,3	1,7	3,3	4,12	1,56	1,66	1,76	7,75	95	3
0,35	1,2	1,5	3	3,74	1,56	1,66	1,76	7,75	95	3
0,35	1,15	1,45	2,9	3,5	1,56	1,66	1,76	7,75	95	3
0,35	1,1	1,4	2,7	3,36	1,56	1,66	1,76	7,65	95	2
0,35	1	1,25	2,5	3,14	1,56	1,66	1,76	7,65	95	2
0,35	0,95	1,2	2,35	2,9	1,56	1,66	1,76	7,65	95	2
0,35	0,9	1,15	2,1	2,65	1,56	1,66	1,76	7,65	95	2
0,35	0,9	1,15	1,95	2,6	1,56	1,66	1,76	7,65	95	2

Fonte: Extraído de (APERAM, 2012).