

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ENERGIA**

MARCELO DOS SANTOS

**ANÁLISE FINANCEIRA REFERENTE ÀS PERDAS
FERROMAGNÉTICAS EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO
CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE AÇOS PARA FINS
ELÉTRICOS**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ENERGIA**

MARCELO DOS SANTOS

**ANÁLISE FINANCEIRA REFERENTE AS PERDAS
FERROMAGNÉTICAS EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO
CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE AÇO PARA FINS
ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Sistemas de Energia.

Orientador:
Prof. Juliano Bitencourt Padilha, Dr. Eng.

Coorientadora:
Profa. Lisandra Kittel Ries, Dra. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Santos, Marcelo dos
Análise Financeira Referente As Perdas Ferromagnéticas Em Um Transformador Trifásico Considerando Diferentes Tipos De Aço Para Fins Elétricos / Marcelo dos Santos; orientação de Juliano Bitencourt Padilha; coorientação de Lisandra Kittel Ries. - Florianópolis, SC, 2023.
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. CST em Sistemas de Energia. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. Perdas Técnicas. 2. Análise . 3. Financeira.
4. Transformadores . I. Padilha, Juliano Bitencourt. II. Ries, Lisandra Kittel. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. Análise Financeira Referente As Perdas Ferromagnéticas Em Um Transformador Trifásico Considerando Diferentes Tipos De Aço Para Fins Elétricos.

ANÁLISE FINANCEIRA REFERENTE AS PERDAS FERROMAGNÉTICAS EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE AÇO PARA FINS ELÉTRICOS

MARCELO DOS SANTOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Sistemas de Energia, e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Energia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Juliano Bitencourt Padilha, Dr. Eng.

Prof. Lisandra Kittel Ries, Dra. Eng.

Prof. Ricardo Luiz Alves, Dr. Eng.

Prof. Adilson Pacheco Bortoluzzi, Me. Eng.

Resumo

Este trabalho inicialmente aborda aspectos teóricos sobre transformadores trifásicos, com destaque para as perdas presentes na máquina. Após o dimensionamento do núcleo ferromagnético de um transformador trifásico de 75 kVA (13800/380 V) é realizado seguindo as etapas presentes em determinada referência bibliográfica. Com o núcleo dimensionado, avaliou-se a utilização de três diferentes tipos de chapas ferromagnéticas em termos de viabilidade econômica. Resultados indicam que a utilização de chapas de melhor qualidade, embora mais caras, se justificam ao longo do tempo devido a mitigação das perdas ferromagnéticas.

Palavras-chave: Transformadores trifásicos. Perdas ferromagnéticas. Análise financeira.

ABSTRACT

This work initially addresses theoretical aspects of three-phase transformers, with emphasis on the losses present in the machine. Subsequently, the sizing of the ferromagnetic core of a 75 kVA three-phase transformer (13800/380 V) is carried out following the steps outlined in a specific bibliographic reference. With the core sized, the use of three different types of ferromagnetic sheets is evaluated in terms of economic feasibility. Results indicate that the use of higher-quality sheets, although more expensive, is justified over time due to the mitigation of ferromagnetic losses.

Keywords: Three-phase transformers. Ferromagnetic losses. Financial analysis.

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 6 |
| 1.1 | Justificativa | 7 |
| 1.2 | Definição do Problema | 9 |
| 1.3 | Objetivo Geral | 9 |
| 1.4 | Objetivos Específicos..... | 9 |
| 1.5 | Estrutura do Trabalho..... | 10 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 11 |
| 2.1 | Transformadores..... | 11 |
| 2.1.1 | Teoria sobre transformadores trifásicos | 12 |
| 2.1.2 | Elementos construtivos de um transformador | 13 |
| 2.1.2.1 | <i>Elementos construtivos de um transformador trifásico</i> | <i>13</i> |
| 2.1.2.2 | <i>Transformadores tipo núcleo envolvente e tipo envolvido</i> | <i>14</i> |
| 2.1.3 | Princípio de funcionamento de um transformador | 16 |
| 2.1.3.1 | <i>Transformador ideal.....</i> | <i>17</i> |
| 2.1.3.2 | <i>Transformador real.....</i> | <i>18</i> |
| 2.2 | Perdas em transformadores..... | 19 |
| 2.2.1 | Perdas nos condutores | 20 |
| 2.2.2 | Perdas no ferro | 21 |
| 2.2.2.1 | <i>Cálculo das perdas totais no núcleo.....</i> | <i>24</i> |
| 3 | AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO ORIENTADO (GO) E GRÃO NÃO-ORIENTADO (GNO)..... | 25 |
| 4 | CÁLCULO ANALÍTICO DAS DIMENSÕES DO NÚCLEO FERROMAGNÉTICO DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO | 28 |
| 4.1 | Dados técnicos do transformador para dimensionamento do núcleo 28 | |
| 4.1.1 | Cálculo das dimensões e peso do Transformador | 29 |
| 5 | ANÁLISE FINANCEIRA CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE CHAPAS FERROMAGNÉTICAS..... | 35 |
| 5.1 | Comparativo entre as chapas 1 e 2 | 36 |
| 5.2 | Comparativo entre as chapas 1 e 3 | 38 |
| 5.3 | Comparativo entre as chapas 2 e 3 | 40 |
| 5.4 | Resumo dos resultados..... | 43 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 44 |
| | REFERÊNCIAS | 46 |
| | ANEXO A1 | 48 |

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são máquinas amplamente utilizadas ao longo de todo o sistema elétrico e apresentam a função de alterar os níveis de tensão ao longo do sistema. Assim, “transformadores são dispositivos elétricos ... usados para transferir energia elétrica por meio de um campo magnético variável” (PINTO, 2021, p.14). Os principais elementos construtivos dessas máquinas são as bobinas (alumínio ou cobre) e o núcleo ferromagnético (chapas de Fe-Si).

Segundo Umans (2014), um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum e seu funcionamento requer apenas a existência de um fluxo alternado, que é variável no tempo, que envolve os enrolamentos.

O acoplamento entre enrolamentos pode ser muito mais eficiente com o uso de um núcleo de ferro ou de algum outro material ferromagnético. Nesse caso, a maior parte do fluxo fica confinada a um caminho delimitado, de alta permeabilidade, enlaçando os enrolamentos. Tal transformador é normalmente denominado transformador de núcleo de ferro. A maioria dos transformadores é desse tipo. (UMANS, 2014, p. 64)

Chapman (2013) coloca que um transformador ideal é capaz de converter um nível de tensão CA (corrente alternada) em outro, sem influenciar a potência elétrica real fornecida. Ele afirma que a energia elétrica CA pode ser gerada, em seguida sua tensão é elevada para ser transmitida a longa distância, com perdas muito baixas.

Porém, como toda máquina elétrica real, os transformadores não apresentam 100% de rendimento, logo, possuem perdas. “Perda é a potência absorvida pelo transformador e dissipada, em forma de calor, pelos enrolamentos primários e secundários e pelo núcleo de ferro” (MAMEDE FILHO, 2019, p. 387). Assim, as mesmas são basicamente de duas naturezas: nos condutores (devido à passagem de corrente elétrica pelos enrolamentos) e ferromagnéticas (histerese e correntes de Foucault). A primeira depende do nível de carregamento da máquina, enquanto a segunda é considerada praticamente constante independentemente do nível de carregamento (PINTO, 2021).

Segundo Silva (2011), existe um atraso em magnetizar e desmagnetizar o núcleo, este atraso é a histerese que resulta em perdas. O autor afirma que esse

fenômeno ocorre porque os materiais ferromagnéticos se magnetizam rapidamente quando sofrem a influência do campo magnético, porém, não desmagnetizam tão rapidamente quando o campo é retirado, já as perdas por correntes de Foucault são resultado das correntes induzidas que circulam no material do núcleo. As chapas ou lâminas de ferro isoladas entre si, são capazes de promover redução das perdas no núcleo.

Uma vez que transformadores trifásicos costumam operar 24 horas por dia, as perdas ferromagnéticas, embora na maioria das vezes menores que as dos condutores a plena carga, influenciam muito na eficiência da máquina. Assim, acredita-se que o uso de chapas ferromagnéticas de melhor qualidade para a confecção dos núcleos pode ser uma opção economicamente viável.

1.1 Justificativa

Visto que os transformadores são máquinas amplamente utilizadas ao longo de todo o sistema elétrico, é importante que sejam desenvolvidos estudos que visam o melhor desempenho dessas, para que possam operar de forma mais eficiente e econômica ao longo do tempo.

Segundo Viana *et al.* (2012) os transformadores são essenciais em todas as etapas da produção e distribuição de energia elétrica, incluindo transmissão e distribuição. Mesmo com alto rendimento, o processo repetido de ajuste de tensões usando transformadores resulta em perdas significativas de energia. Os autores ainda afirmam que no Brasil, estima-se que cerca de 14% de toda a energia elétrica gerada são perdidos durante a transmissão e distribuição, com aproximadamente 30% dessas perdas técnicas ocorrendo nos transformadores de distribuição. Assim, reduzir essas perdas é fundamental para melhorar a eficiência do sistema elétrico.

Nesse contexto, por exemplo, a CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.), que é uma sociedade de economia mista que atua desde 1955 nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia, atuando principalmente no estado de Santa Catarina, define os critérios de funcionamento de transformadores com potência até 300 kVA, onde é possível verificar na Tabela 1 abaixo as perdas

máximas no núcleo e também as perdas máximas admitidas de um transformador de distribuição adquirido pela empresa.

Tabela 1 – Características elétricas

| Item | Tensão Nominal da Rede | Tensão Máxima de Operação | Nº Fases | Potência | Corrente Excitação Máxima | Perdas Vazio Máximas | Perdas Totais Máximas | Tensão Curto Circuito | Tensão Primária Derivações | Tensão Secundária |
|------|------------------------|---------------------------|------------|----------|---------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|
| (N) | (kV) | (kV) | (N) | (kVA) | (%) | (W) | (W) | (%) | (V) | (V) |
| 1 | 13,8 | 15/V3 | MONOFÁSICO | 10 | 2,7 | 40 | 200 | 2,5 | 7967 7621 7275 | 440/220 |
| 2 | | | | 15 | 2,4 | 50 | 270 | | | |
| 3 | | | | 25 | 2,2 | 70 | 395 | | | |
| 4 | | | | 37,5 | 2,1 | 110 | 550 | | | |
| 5 | | | | 50 | 2,0 | 130 | 640 | | | |
| 6 | | 15 | TRIFÁSICO | 30 | 3,6 | 110 | 560 | 3,5 | 13800 13200 12600 | 380/220 |
| 7 | | | | 45 | 3,2 | 140 | 760 | | | |
| 8 | | | | 75 | 2,7 | 215 | 1 125 | | | |
| 9 | | | | 112,5 | 2,5 | 285 | 1 525 | 4,5 | | |
| 10 | | | | 150 | 2,3 | 350 | 1 880 | | | |
| 11 | | | | 225 | 2,1 | 470 | 2 630 | | | |
| 12 | | | | 300 | 1,9 | 585 | 3 275 | | | |
| 13 | 23,1 | 24,2/V3 | MONOFÁSICO | 10 | 3,3 | 45 | 220 | 2,5 | 13337 12702 12067 | 440/220 |
| 14 | | | | 15 | 3,0 | 60 | 300 | | | |
| 15 | | | | 25 | 2,8 | 80 | 430 | | | |
| 16 | | | | 37,5 | 2,7 | 115 | 595 | | | |
| 17 | | | | 50 | 2,6 | 150 | 760 | | | |
| 18 | | 24,2 | TRIFÁSICO | 30 | 4,2 | 115 | 590 | 4,0 | 23100 22000 20900 | 380/220 |
| 19 | | | | 45 | 3,6 | 155 | 815 | | | |
| 20 | | | | 75 | 3,2 | 230 | 1 200 | | | |
| 21 | | | | 112,5 | 2,8 | 310 | 1 595 | 5,0 | | |
| 22 | | | | 150 | 2,6 | 380 | 2 010 | | | |
| 23 | | | | 225 | 2,4 | 530 | 2 770 | | | |
| 24 | 300 | | | 2,1 | 620 | 3 440 | | | | |

Fonte: CELESC (2023).

Quando se têm várias propostas para aquisição de um ou mais transformadores, devem-se analisar, além dos aspectos técnicos dos equipamentos, os custos envolvidos na sua operação, notadamente os das perdas. Dessa forma, não se deve adquirir o transformador apenas considerando o preço da proposta; outros fatores são importantes para a decisão de compra, ... utilizada por muitas concessionárias do setor elétrico (MAMEDE FILHO, 2019, p.395)

Assim, este trabalho se faz relevante ao realizar uma análise de viabilidade econômica para o uso de diferentes tipos de chapas ferromagnéticas para a composição do núcleo de um transformador trifásico dimensionado.

Ainda, aspectos teóricos referentes ao tema também serão abordados, visando tornar esse trabalho uma boa fonte de pesquisa sobre o assunto.

1.2 Definição do Problema

Segundo Pinto (2021), em transformadores não há perdas por atrito ou ventilação associadas a outras máquinas elétricas. No entanto os transformadores sofrem outros tipos de perdas chamadas perdas nos condutores e perdas no ferro.

Um transformador ideal seria 100% eficiente, passando toda a energia que recebe do lado primário para o lado secundário. Mas os transformadores não são 100% eficientes. Quando estão operando em plena capacidade de carga, sua eficiência máxima fica em torno de 94% a 96%. E operando com tensão e frequência CA constante, sua eficiência máxima pode chegar a 98% (PINTO, 2021).

Este estudo se faz voltado a redução das perdas no ferro. Acredita-se que o uso de chapas ferromagnéticas de melhor qualidade para a confecção dos núcleos pode ser uma opção para a redução das perdas e também economicamente viável.

Com as abordagens acima, a delimitação deste estudo fica estabelecida com a seguinte questão: a utilização de chapas de melhor qualidade em transformadores trifásicos é economicamente viável?

1.3 Objetivo Geral

Avaliar a utilização de chapas ferromagnéticas de melhor qualidade em um transformador trifásico em termos de viabilidade econômica.

1.4 Objetivos Específicos

Em atendimento ao objetivo geral proposto, este estudo apresenta os seguintes objetivos específicos:

- a) descrever conceitos teóricos referentes aos diferentes tipos de perdas em transformadores;

- b) apresentar características magnéticas de chapas ferromagnéticas comerciais;
- c) apresentar uma metodologia de projeto para a determinação das dimensões do núcleo do transformador;
- d) analisar a viabilidade econômica do uso de diferentes chapas ferromagnéticas para composição do núcleo.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em seis capítulos. Iniciando com o presente Capítulo 1, denominado Introdução, onde são apresentadas a justificativa, definição do problema e objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 é resultado de revisões bibliográficas, onde é estabelecida a fundamentação teórica sobre transformadores trifásicos, seus elementos construtivos e princípio de funcionamento. Também são abordadas as perdas ferromagnéticas e perdas nos condutores nesse capítulo.

O Capítulo 3 destaca as diferenças entre aços para fins elétricos de grão não-orientado (GNO) e de grão orientado (GO) e também apresenta características das chapas de um determinado fabricante.

O Capítulo 4 apresenta uma metodologia para dimensionamento do núcleo de transformadores trifásicos com base em uma determinada referência bibliográfica.

O Capítulo 5, foco do trabalho, apresenta resultados referentes à análise financeira realizadas.

E, por fim, o Capítulo 6 é destinado às considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, a partir da revisão bibliográfica realizada, são apresentados aspectos teóricos referentes a transformadores.

2.1 Transformadores

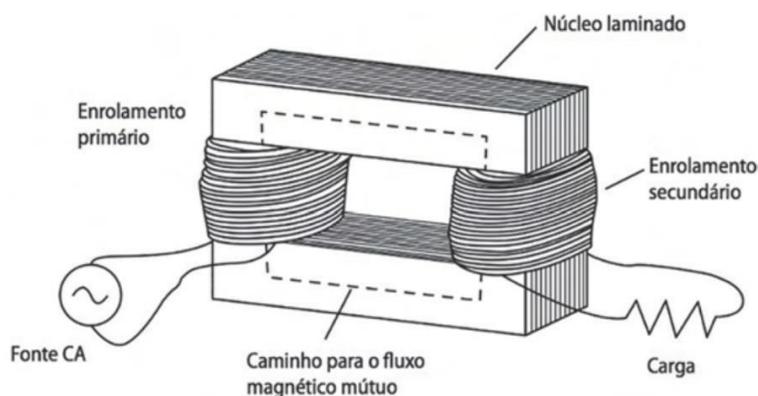
O transformador é um equipamento utilizado para redução ou aumento de tensão. Este termo também pode ser definido como transformador abaixador ou elevador de tensão (NASCIMENTO JUNIOR, 2020).

Com o uso dos transformadores, é possível transmitir energia em um nível de tensão conveniente, e em seguida elevar essa tensão para níveis adequados à transmissão a longas distâncias. Em seguida, é possível abaixar novamente essa tensão para realizar a sua distribuição de forma prática e segura (SOUZA, RODRIGUES, 2017 p. 283).

Um transformador é uma máquina estática que, por meio de indução magnética, transfere energia elétrica em CA (Corrente Alternada) de um circuito primário para outros circuitos mantendo a mesma frequência, mas geralmente com valores diferentes de tensão e corrente (BARROS; BORELLI, GEDRA, 2014).

A Figura 1 demonstra um transformador monofásico.

Figura 1 – Transformador monofásico



Fonte: Petruzella (2014).

Em geral os transformadores são máquinas muito eficientes, pois a não existência de partes móveis ou rotativas como um motor de indução lhe permite que

sejam alcançados rendimentos na ordem de 96% a 99%. Porém observando somente a questão do rendimento pode ocorrer uma visão distorcida do que realmente acontece em relação as perdas, visto que possam ser pequenas em termos relativos, elas podem ser muito relevantes em termos absolutos (VIANA *et al.*, 2012, p. 259).

2.1.1 Teoria sobre transformadores trifásicos

Segundo Chapman (2013), na atualidade quase todos os principais sistemas de geração e distribuição de potência no mundo são sistemas CA trifásicos, o que justifica o estudo abordado. O autor coloca que os transformadores são circuitos que podem ser construídos de duas formas: a primeira consiste em conectar três transformadores monofásicos formando um banco trifásico e a segunda forma é construir um transformador trifásico.

ELPROCUS (2013) coloca que um transformador monofásico é um dispositivo que transfere energia elétrica de um circuito a outros, baseado no conceito de indução mútua e composto por duas bobinas. Segundo o autor, do mesmo modo, um transformador trifásico consiste em três bobinas primárias e três bobinas secundárias e é representado como trifásico ou 3ϕ .

Em concordância com Chapman (2013), ELPROCUS (2013) afirma que um transformador trifásico pode ser construído usando três transformadores monofásicos idênticos individuais, ele acrescenta que esse transformador trifásico é conhecido como banco de três transformadores. Por outro lado, o transformador trifásico pode ser construído em um único núcleo.

Chapman (2013) afirma que esses dois tipos possíveis de construção de transformadores trifásicos (três transformadores separados ou de um único transformador trifásico) são muito utilizados na atualidade. Mas afirma que um transformador trifásico é mais leve, menor, tem custo mais baixo e ligeiramente mais eficiente.

Coloca por outro lado o ponto positivo do uso dos três transformadores monofásicos separados, o fato de que cada unidade pode ser substituída em um possível problema.

Em vez de três transformadores monofásicos, um banco trifásico pode consistir em um transformador trifásico tendo os seis enrolamentos em um núcleo comum de pernas múltiplas contidas em um único tanque. Os transformadores trifásicos são mais vantajosos que as conexões com três transformadores monofásicos, pois eles custam menos, requerem menos espaço e tem um rendimento um pouco maior. (UMANS, 2014, p. 92).

2.1.2 Elementos construtivos de um transformador

Umans (2014) coloca que um transformador consiste basicamente em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum.

Para Viana *et al.* (2012 p. 261) o transformador pode ser dividido nos seguintes componentes: enrolamentos, núcleo, tanque e meio refrigerante e acessórios. Sendo os enrolamentos constituídos de fios de cobre ou alumínio isolados com esmalte com seção retangular ou circular.

Já o núcleo é feito com material ferromagnético em chapas finas isoladas entre si com sua composição em silício proporcionando características de magnetização e perdas reduzidas. Sendo esses, o núcleo e enrolamentos a parte ativa do transformador (VIANA *et al.*, 2012, p. 261).

O tanque serve como invólucro da parte ativa e de recipiente para o óleo isolante, esse que tem função de dissipar pra o exterior o calor gerado nos enrolamentos e no núcleo. Por fim, os acessórios são formados por buchas, parafusos, tampas, sensores, relés, reguladores, ventiladores, etc, destinados a auxiliar o funcionamento do transformador (VIANA *et al.*, 2012, p. 261).

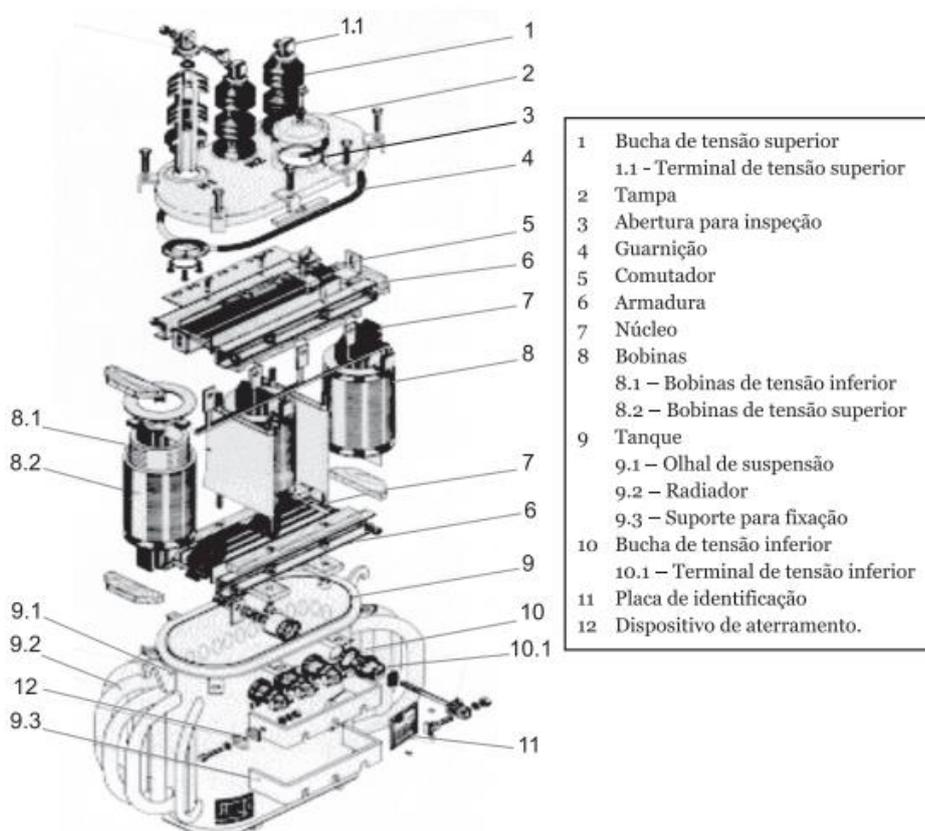
2.1.2.1 Elementos construtivos de um transformador trifásico

Segundo Gedra, Barros e Borelli, (2014 p. 46), um transformador trifásico é constituído por seis bobinas, sendo duas para cada fase, e quando conectada no lado da alimentação elétrica a bobina é denominada de primária. A bobina conectada no lado de saída do transformador é chamada de secundária. Entre as bobinas citadas existe um núcleo constituído com liga de ferro e silício, formado por chapas empilhadas e isoladas entre si. Os autores colocam que a relação de transformação

entre as tensões de fase de entrada e de saída é obtida pela relação entre o número de espiras na bobina primária e secundária.

A Figura 2 mostra um transformador trifásico em corte e seus elementos construtivos enumerados e identificados.

Figura 2 – Transformador trifásico em corte



Fonte: VIANA *et al.* (2012)

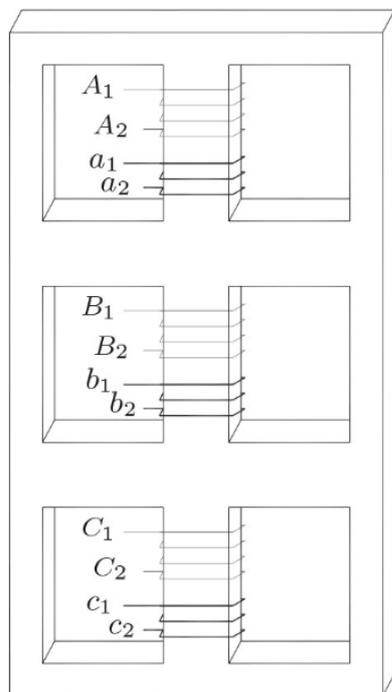
2.1.2.2 Transformadores tipo núcleo envolvente e tipo envolvido

Segundo Bim (2018), de acordo com o arranjo das bobinas dos enrolamentos e o núcleo existem dois tipos de transformadores, a) tipo núcleo envolvente e b) tipo núcleo envolvido.

a) tipo núcleo envolvente: no qual as bobinas dos enrolamentos do primário e secundário são envolvidas pelo núcleo, com as bobinas do primário e do secundário enroladas em torno da mesma coluna. Conforme Petruzella (2013), o tipo núcleo

envolvente é usado em transformadores de menor potência. A Figura 3 mostra um transformador trifásico do tipo núcleo envolvente.

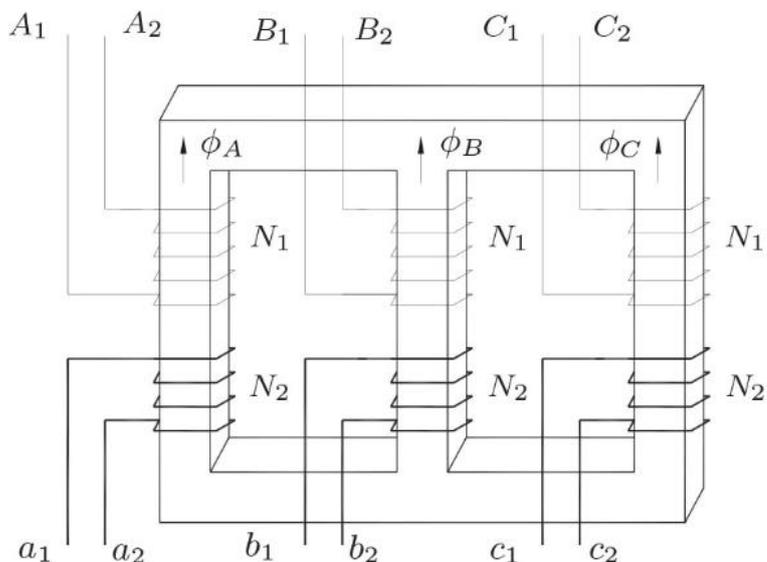
Figura 3 – Transformador trifásico com núcleo envolvente



Fonte: Bim (2018).

b) tipo núcleo envolvido: no qual as colunas do núcleo são envolvidas pelas bobinas dos enrolamentos. Essa configuração é recomendada para transformadores de alta tensão (DEL TORO, 1994). Além disso, são mais fáceis de isolar e refrigerar. A Figura 4 ilustra um transformador trifásico do tipo núcleo envolvido.

Figura 4 – Transformador trifásico com núcleo envolvido



Fonte: Bim (2018).

2.1.3 Princípio de funcionamento de um transformador

Chapman (2013) coloca que a finalidade principal de um transformador é a alteração da tensão elétrica CA para outro nível de tensão. Ele acrescenta funções aos transformadores, que perpassam por amostragens de tensão, amostragens de corrente e também transformação de impedância.

Umans (2014) diz que a essência do funcionamento de um transformador se faz pautada na existência de um fluxo mútuo, variável no tempo e com enlace de dois enrolamentos. Ele afirma que essa ação pode acontecer entre enrolamentos acoplados pelo ar, mas que, a melhor das possibilidades, está no acoplamento com uso de um núcleo de ferro ou de algum material ferromagnético, obtendo, assim, a maior parte do fluxo confinada a um caminho delimitado, e de alta permeabilidade, enlaçando os enrolamentos.

Em concordância Petruzella (2013) afirma que o princípio de operação de um transformador é baseado na indução mútua. Quando uma tensão alternada é aplicada ao enrolamento primário de um transformador, surge uma corrente elétrica nesse enrolamento, conhecida como corrente de excitação, essa mesma corrente estabelece um fluxo magnético alternado que enlaça as espiras e induz tensão em ambos os enrolamentos.

2.1.3.1 Transformador ideal

Para Gussow (2009), se considerarmos que um transformador funciona sob condições ideais, a transferência de energia de uma tensão para outra se faz sem perdas.

Dadas essas suposições o transformador em questão é idealizado com as seguintes características:

- a) Não há resistência nos enrolamentos (condutor elétrico perfeito).
- b) Todo o fluxo magnético está confinado ao núcleo (condutor magnético perfeito).
- c) O núcleo é ideal, não havendo perdas no mesmo devido à ausência de histerese magnética e correntes de Foucault.
- d) A permeabilidade magnética do núcleo é infinita, o que implica que a corrente de magnetização é nula.

Segundo Chapman (2014) as relações entre a tensão de entrada e a tensão de saída e entre a corrente de entrada e a corrente de saída do transformador monofásico ideal podem ser dadas pelas seguintes equações:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (1)$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a} \quad (2)$$

Onde:

a = é a relação de transformação do transformador;

V_p = tensão no primário;

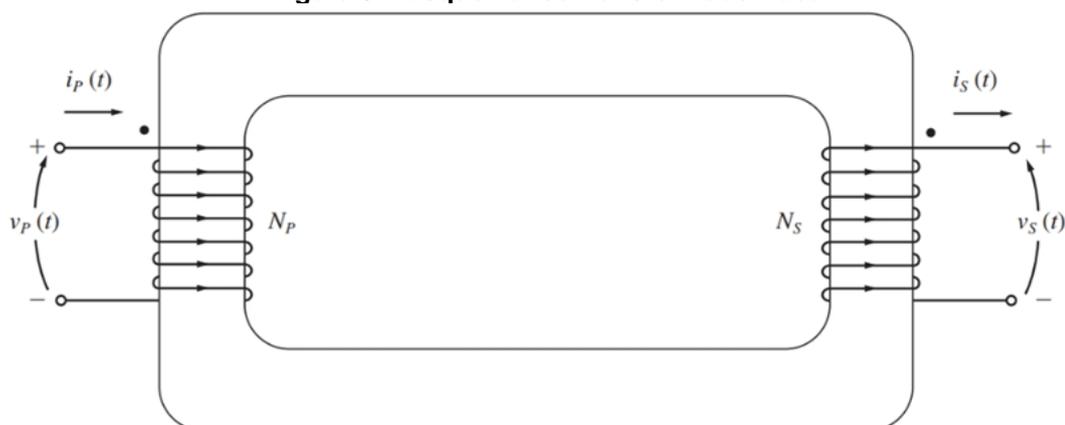
V_s = tensão no secundário;

N_p = corrente no primário;

I_s = corrente no secundário;

A Figura 5 representa um esquemático de um transformador ideal.

Figura 5 – Esquemático transformador ideal



Fonte: Chapman (2013).

2.1.3.2 Transformador real

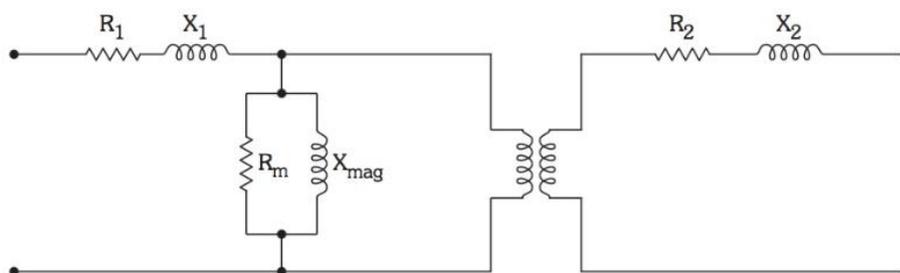
Os transformadores ideais abordados na seção anterior não podem ser construídos na prática, apesar de serem muito úteis para estudos e análises diversas. Os que são construídos são transformadores reais, onde suas características se aproximam muito das características de um transformador ideal, mas somente até um certo grau (CHAPMAN, 2013).

No desenvolvimento ou análise de um transformador real deve ser considerado a dissipação da potência ativa e reativa para criar os campos magnéticos, pois existe resistência elétrica nas bobinas e também as perdas ferromagnéticas.

Um transformador, visto pelos profissionais da área de máquinas, não se resume a apenas duas bobinas e um núcleo de ferro. Existem parâmetros “escondidos”, que muitas vezes necessitam ser mapeados, e o controle desses parâmetros determina o funcionamento adequado de uma máquina. O transformador real está longe do modelo ideal...(NASCIMENTO JUNIOR, 2020, p. 21)

Na Figura 6, é apresentado um esquema de circuito equivalente de um transformador real, onde agora, diferente da Figura 5 da seção anterior, são adicionadas resistências e reatâncias para caracterização das não-idealidades.

Figura 6 – Circuito equivalente de um transformador real



Fonte: Nascimento Júnior (2020).

Onde:

R_1 = resistência do enrolamento primário;

X_1 = reatância de dispersão do enrolamento primário;

R_m = resistência de magnetização que retrata as perdas no ferro;

X_{mag} = reatância de magnetização;

R_2 = resistência do enrolamento secundário;

X_2 = reatância de dispersão do enrolamento secundário.

2.2 Perdas em transformadores

Segundo Viana *et al.* (2012, p. 266), em cada transformador existem três circuitos que devem ser considerados: o elétrico, o magnético e o dielétrico. E em cada desses ocorrem perdas, que são subdivididas em: a) perdas no circuito elétrico; b) perdas no circuito magnético e c) perdas no circuito dielétrico, sendo essas normalmente incluídas nas perdas no ferro.

O autor classifica em:

a) perdas no circuito elétrico:

perdas devido à corrente de carga;

perdas devido à corrente de excitação;

perdas por correntes parasitas nos condutores devido ao fluxo de dispersão.

b) perdas no circuito magnético:

perdas por histerese no núcleo;

perdas por correntes parasitas, ou de Foucault, no núcleo;

perdas por dispersão das correntes parasitas no núcleo através dos grampos, parafusos, etc.

Viana *et al.* (2012, p. 265) coloca que as diferentes perdas de um transformador podem ser agrupadas em duas: a) em perdas sem carga (conhecidas como perdas no circuito magnético) e b) perdas com carga (englobam as perdas nos condutores) sendo essas duas abordadas a seguir.

2.2.1 Perdas nos condutores

Para Pinto (2021) as perdas nos enrolamentos representam a maior perda na operação de um transformador, em que a energia elétrica perdida no calor acaba sendo o resultado da circulação das correntes nos enrolamentos dos transformadores. Ele acrescenta a potência perdida pode ser medido em cada enrolamento por meio da multiplicação da corrente elétrica eficaz ao quadrado pela resistência em ohms do enrolamento (I^2R).

Viana *et al.* (2012, p. 266) denomina as perdas nos condutores como sendo as perdas com carga. E aponta dois itens constantes nessa denominação. O primeiro vem a ser perdas $R \cdot I^2$, devido a corrente de carga. E o segundo seriam as perdas por correntes parasitas nos condutores devido ao fluxo de dispersão.

Gussow (2009) afirma que a perda nos condutores pode ser medida com a utilização de um wattímetro, sendo esse inserido no circuito primário do transformador enquanto o circuito secundário é curto-circuitado. Aplica-se então uma tensão no primário até que a corrente especificada para carga máxima flua através do secundário em curto circuito. Nesse estágio, o wattímetro mostrará as perdas totais nos enrolamentos.

Segundo Gussow (2009) a perda nos enrolamentos é dada em watts e pode ser calculada através da equação que segue.

$$P_c = I_p^2 \cdot R_p + I_s^2 \cdot R_s \quad (3)$$

Onde:

I_p = corrente do primário (A);

I_s = corrente do secundário (A);

R_p = resistência do enrolamento do primário (Ω);

R_s = resistência do enrolamento do secundário (Ω).

2.2.2 Perdas no ferro

A perda a vazio refere-se à energia absorvida pelo transformador quando ele é alimentado com sua tensão e frequência nominais, enquanto os enrolamentos secundários ou terciários estão desconectados. As perdas no núcleo são constantes e estão presentes em todo momento de operação do transformador, seja com carga ou sem. Basicamente, as perdas no núcleo são causadas por a) histerese magnética, e b) correntes parasitas, também conhecidas como correntes de Foucault.

a) Perdas por histerese

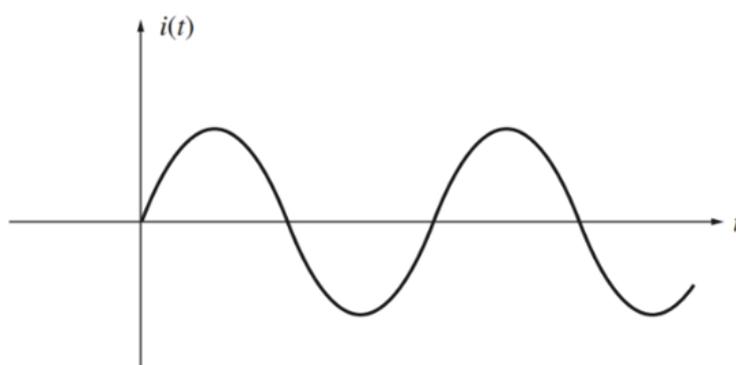
Pinto (2021) afirma que a perda por histerese, que é o atraso das moléculas magnéticas dentro do núcleo que servem de resposta ao fluxo magnético alternado. A condição de atraso é entendida como estar fora de fase, e está relacionada à necessidade de energia para reverter as moléculas magnéticas.

A reversão só acontece quando o fluxo magnético tem força suficiente. Ela resulta em atrito, que produz calor no núcleo e configura uma forma de perda de energia. Essa perda (histerese) pode ser reduzida confeccionando o núcleo com ligas de aço especiais (PINTO, 2021).

Chapman (2014) afirma que quando aplicado uma corrente alternada (ver Figura 7) no enrolamento primário e assumindo que o fluxo de corrente é inicialmente zero, ao ser aumentada gradualmente a corrente, o fluxo do núcleo percorre o caminho *ab* da Figura 8, porém quando a corrente volta a diminuir o fluxo percorrido segue um caminho diferente daquele que foi percorrido quando a corrente foi incrementada. À medida que a corrente diminui, o fluxo do núcleo segue o caminho *bcd* e depois, quando a corrente cresce novamente, o fluxo segue o caminho *deb*. É possível observar que a quantidade de fluxo presente no núcleo depende não só do valor da corrente aplicada ao enrolamento do núcleo, mas também da história prévia

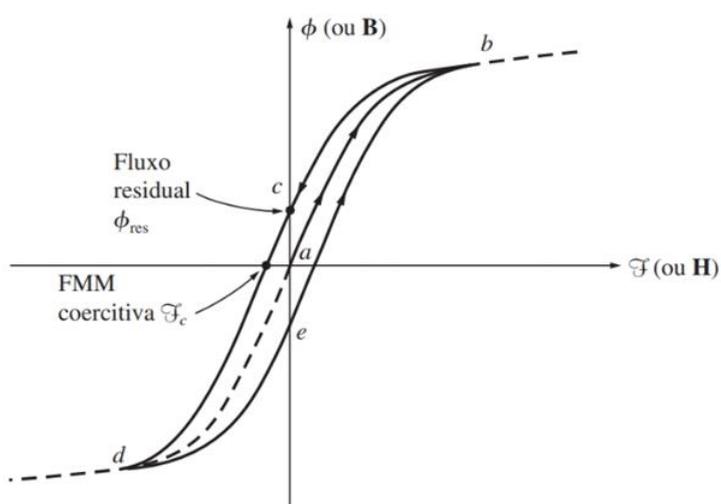
do fluxo no núcleo. Essa dependência da história anterior do fluxo e a impossibilidade resultante de se repetir os mesmos caminhos de fluxo é denominada histerese. O caminho *bcdeb* na Figura 8, que é percorrido quando há mudança na intensidade da corrente aplicada, é denominado laço de histerese.

Figura 7 – Corrente aplicada



Fonte: Chapman (2013).

Figura 8 – Laço de histerese



Fonte: Chapman (2013).

Para Viana *et al.* (2012, p. 266) as perdas por histerese no núcleo fazem parte das perdas do circuito magnético de um transformador e dependem da qualidade do núcleo usado. Podem ser avaliadas a partir das curvas fornecidas pelos fabricantes de núcleo magnético. São proporcionais ao peso do material usado, e apresentam variação de acordo com a densidade do material.

A redução dessas perdas está relacionada com redução máxima do peso do material e na determinação de um valor apropriado para densidade de fluxo (ou que não seja muito elevado). Fica a observação de que a redução na densidade de fluxo, que objetiva a diminuição da perda por histerese, tem como consequência o aumento da massa de material ferromagnético, e o conseqüente aumento no comprimento dos fios condutores nos enrolamentos que repercute no aumento das perdas por $R.I^2$ (VIANA *et al.*, 2012, p. 267).

As perdas por histerese no núcleo de um transformador podem ser calculadas com a equação que segue.

$$P_h = K_h \cdot v \cdot f \cdot (B_{\max})^n \quad (4)$$

Onde:

P_h = perda por histerese [W];

K_h = coeficiente amplamente variável;

n = expoente variando entre 1,5 e 2,5;

v = volume do núcleo magnético;

f = frequência da fonte [Hz];

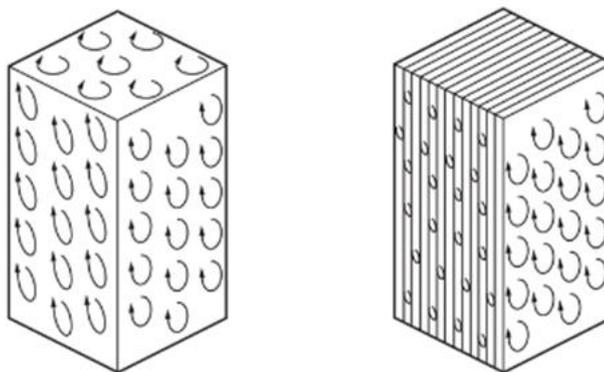
B_{\max} = densidade máxima de fluxo magnético [Wb/m²];

Os valores de K_h dependem do tipo de material considerado.

b) Perdas por corrente parasitas (correntes de Foucault)

Segundo Filho (2019) quando um objeto metálico é exposto a mudanças no campo magnético é criado então uma força elétrica chamada eletromotriz (E), que gera correntes elétricas significativas dentro do objeto. Essas correntes elétricas resultam em perdas de energia, que por sua vez são transformadas em calor no núcleo de ferro do transformador. Para minimizar essas perdas são utilizadas lâminas finas de ferro-silício separadas por uma camada isolante a fim de reduzir as correntes de Foucault ao mínimo possível. A Figura 9 demonstra esse fenômeno, onde tem-se um núcleo sólido à esquerda com correntes parasitas e à direita um núcleo laminado (que reduz a circulação de correntes parasitas).

Figura 9 – Correntes parasitas



Fonte: Chapman (2013).

Com a equação que segue pode ser calculada as perdas por corrente parasitas:

$$P_f = K_f \cdot v \cdot \tau^2 \cdot f^2 \cdot (B_{\max})^2 \quad (5)$$

Onde:

P_f = perdas por correntes de Foucault (W);

K_f = coeficiente amplamente variável e dependente do tipo de material;

v = volume do núcleo magnético;

τ = espessura das chapas;

f = frequência da fonte (Hz);

B_{\max} = densidade máxima de fluxo magnético (Wb/m²).

2.2.2.1 Cálculo das perdas totais no núcleo

As perdas totais no núcleo, por efeito Joule, correspondem às perdas por histerese mais por correntes de Foucault, conforme a Equação 6.

$$P_{fe} = P_h + P_f \quad (6)$$

Onde:

P_{fe} = perdas totais no núcleo [W].

Por meio das expressões empíricas de cálculo das perdas por histerese e por correntes de Foucault é obtido a seguinte equação para a perda total no ferro:

$$P_{fe} = K_h \cdot v \cdot f \cdot (B_{\max})^n + K_f \cdot v \cdot \tau^2 \cdot f^2 \cdot (B_{\max})^2 \quad (7)$$

3 AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO ORIENTADO (GO) E GRÃO NÃO-ORIENTADO (GNO)

Segundo Umans (2014) praticamente todos os transformadores e certas partes de máquinas elétricas são feitos com um tipo de material feito a partir de chapas de aço. Estas chapas têm direções muito específicas que favorecem a magnetização. Ao longo dessas direções, as perdas de energia no núcleo são mínimas e a capacidade de conduzir o magnetismo é alta. Esse tipo específico de aço é chamado de aço de grão orientado.

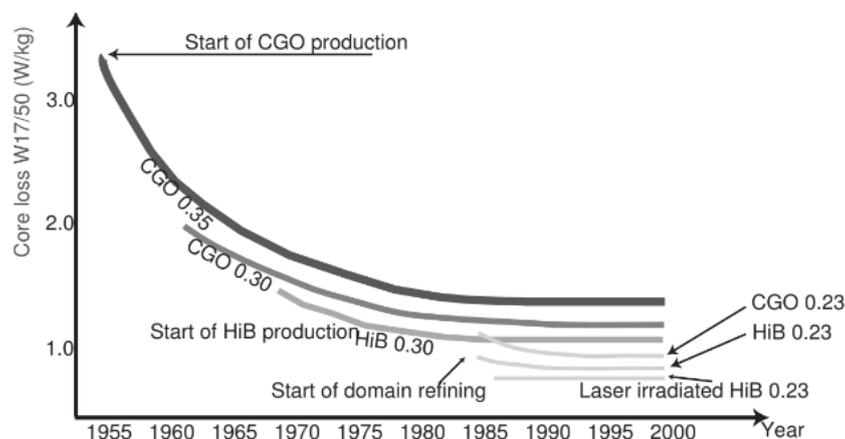
Essa característica especial está relacionada à estrutura atômica dos cristais na liga de silício e ferro. Cada cubo da estrutura tem um átomo em cada canto e um no centro. Em termos de magnetização, o eixo ao longo da aresta do cubo é o mais propício, enquanto o eixo através da diagonal da face é mais difícil de magnetizar, e a diagonal do próprio cubo é a mais difícil de todas.

A fabricação dessas chapas é feita de maneira a alinhar a maioria das arestas dos cubos dos cristais na direção do processo de laminação. Dessa forma, essa direção torna-se a mais favorável para a magnetização. Comparado aos aços não-orientados, nos quais os cristais estão dispostos aleatoriamente, os aços orientados apresentam um desempenho superior em termos de menores perdas no núcleo e capacidade de conduzir magnetismo. A estrutura orientada permite que esses aços operem com densidades de fluxo mais altas do que os aços não-orientados.

Os aços elétricos não-orientados são usados em situações em que o fluxo magnético não segue um padrão que pode ser orientado durante o processo de fabricação, ou quando o custo mais baixo é uma prioridade. Nesses aços, as perdas de energia são maiores e a capacidade de conduzir magnetismo é significativamente menor em comparação com os aços de grão orientado.

A Figura 10 mostra a evolução ao longo dos anos dos aços elétricos para melhor eficiência e rendimento do núcleo dos transformadores.

Figura 10 – Eficiência dos aços ferromagnéticos ao longo dos anos



Fonte: Procobre Instituto Brasileiro do Cobre (2009).

Por volta de 1900, o aço laminado quente tornou-se o material básico do núcleo, composto de chapas individuais separadas por camadas isolantes para reduzir perdas sem carga. Os aços laminados a frio e técnicas de isolamento mais sofisticadas foram progressivamente desenvolvidos para melhorar o desempenho.

Os aços de silício de grão orientado tornaram-se disponíveis na década de 1950 e foi um salto na redução das perdas elétricas sem carga. Várias técnicas de processamento e revestimento e um teor reduzido de silício levaram à criação de aços de grãos orientados de alta permeabilidade (*high permeability grain oriented steels*).

Além da escolha do aço, a forma como os núcleos dos transformadores de distribuição é projetada, cortada, fabricada e montados desempenha um papel importante na eficiência energética. Aumentar a seção magnética do núcleo reduz a densidade do campo magnético e, dessa forma, melhora a eficiência energética.

A Aperam, fabricante de aços elétricos de grão orientado e de grão não-orientado fornece informações sobre as características dos aços para fins elétricos, conforme ilustra Tabela 2. É possível verificar a perda por W/kg de acordo com a chapa a ser utilizada baseando-se na indução máxima e frequência.

Tabela 2 – Características de diferentes aços ferromagnéticos

| Produto | | Espessura (mm) | Perda Magnética a (W/kg) | | | | Indução Magnética a (T) | | |
|------------|--------|----------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|----------|-----------|
| Referência | Aperam | | 1,5 T | | 1,7 T | | 800 A/m | 2500 A/m | 10000 A/m |
| | | | 50 Hz | 60 Hz | 50 Hz | 60 Hz | | | |
| M108-23 | E003-9 | 0,224 | 0,70 | 0,91 | 1,01 | 1,31 | 1,87 | 1,93 | 1,98 |
| M117-23 | E003-9 | 0,224 | 0,72 | 0,94 | 1,07 | 1,38 | 1,85 | 1,93 | 1,97 |
| M112-27 | E004-7 | 0,263 | 0,77 | 1,01 | 1,09 | 1,42 | 1,86 | 1,93 | 1,97 |
| M125-27 | E004-7 | 0,263 | 0,79 | 1,04 | 1,14 | 1,47 | 1,85 | 1,93 | 1,97 |
| M130-30 | E005-4 | 0,293 | 0,83 | 1,10 | 1,17 | 1,54 | 1,86 | 1,93 | 1,97 |
| M140-30 | E005-4 | 0,293 | 0,86 | 1,14 | 1,23 | 1,61 | 1,84 | 1,93 | 1,97 |
| M150-35 | E006-2 | 0,342 | 0,94 | 1,25 | 1,30 | 1,73 | 1,85 | 1,93 | 1,97 |

Fonte: Aperam (2012).

Observa-se pela tabela os seguintes fatos:

- a) Há diferentes tipos de chapas (diferentes tipos de composição), que apresentam diferentes valores de perdas.
- b) Chapas feitas com o mesmo material podem se diferenciar devido sua espessura (chapas de menor espessura apresentam menores perdas).
- c) A frequência e a indução magnética a serem utilizadas, influenciam consideravelmente nas perdas elétricas das chapas (quanto maiores, maiores as perdas).

4 CÁLCULO ANALÍTICO DAS DIMENSÕES DO NÚCLEO FERROMAGNÉTICO DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Este capítulo apresenta de forma analítica as etapas para o dimensionamento do núcleo de um transformador trifásico de distribuição. A metodologia a ser seguida é referenciada pelo livro “*Transformadores 8ªed*” do autor Alfonso Martignoni, onde é abordado a estruturação dos cálculos de construção e perdas do núcleo do transformador.

Baseando-se em um estudo da CEPEL N° 9402/07 intitulado “*Análise das informações fornecidas pelas concessionárias de energia elétrica – ano 2007*”, relativo à quantidade de transformadores trifásicos instalados por potência e por região do Brasil, optou-se por dimensionar o núcleo de um transformador trifásico de 75 kVA, visto tal potência ser uma das mais utilizadas no sistema de distribuição, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Transformadores trifásicos instalados no Brasil no ano de 2007

| Região | 10 kVA | 15 kVA | 30 kVA | 45 kVA | 75 kVA | 112,5 kVA | 150 kVA | 225 kVA | 300 kVA | 500 kVA | Total kVA |
|--------------|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|------------------|
| NE | 0 | 55.241 | 48227 | 29.156 | 24.870 | 15.999 | 4.516 | 2.269 | 0 | 321 | 180.598 |
| N | 0 | 35 | 4.077 | 18.069 | 23.078 | 12.196 | 6.910 | 1.036 | 345 | 0 | 65.746 |
| S | 0 | 1.780 | 40.752 | 96.389 | 81.775 | 40.381 | 3.042 | 495 | 0 | 0 | 264.613 |
| SE | 343 | 111.881 | 133.345 | 93.259 | 91.200 | 39.156 | 38.862 | 11.320 | 18.573 | 4.362 | 542.301 |
| CO | 0 | 6.942 | 5.214 | 19.252 | 12.680 | 5.276 | 1.388 | 185 | 0 | 0 | 50.937 |
| TOTAL | 343 | 175.878 | 231.614 | 256.125 | 233.604 | 113.007 | 54.717 | 15.306 | 18.919 | 4.682 | 1.104.195 |
| % | 0,03 | 15,93 | 20,98 | 23,20 | 21,16 | 10,23 | 4,96 | 1,39 | 1,71 | 0,42 | 100 |

Fonte: Procobre Instituto Brasileiro do Cobre (2009).

4.1 Dados técnicos do transformador para dimensionamento do núcleo

A Tabela 4 apresenta os dados técnicos do transformador para o início do desenvolvimento dos cálculos analíticos e da metodologia de projeto do dimensionamento do núcleo do transformador.

Tabela 4 – Dados do transformador

| Dados do Transformador | | | |
|------------------------|------------------|-------------------|---------|
| | Alta Tensão (AT) | Baixa Tensão (BT) | Unidade |
| Potência | 75 | | kVA |
| Ligação | Delta | Estrela | - |
| Tensão | 13800 | 380/220 | V |
| Frequência | 60 | | Hz |
| Núcleo | Envolvido | | - |
| Condutor | Cobre | | - |

Fonte: Elaboração Própria (2023).

4.1.1 Cálculo das dimensões e peso do Transformador

Da Tabela 1, obtém-se os limites de perdas no ferro $W_{fe} = 215 \text{ W}$ e perdas no cobre $W_{Cu} = 1125 \text{ W}$.

A densidade média de corrente para os dois enrolamentos, conforme Tabela 5, pode ser considerada $d_m = 2,5 \text{ A/mm}^2$, portanto, a perda específica do cobre $w_{cu} = 2,43 \cdot d_m^2 = w_{cu} = 2,43 \cdot 2,5^2 = 15,185 \text{ W/kg}$.

Tabela 5 – Densidade média de corrente

| kVA | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 500 | 1000 | 5000 |
|-------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| A/mm ² | 1,8 | 2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 |

Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

Para o núcleo empregam-se chapas Armco com 0,356 mm (ver Tabela 6), tipo M14 que para $B_{max} = 10000 \text{ G}$ ($1,0 \text{ Wb/m}^2$) tem uma perda específica de $W_{Fe-10} = 1,14 \text{ W/kg}$.

Tabela 6 – Características das chapas

| PERDAS ESPECÍFICAS DAS LÂMINAS ARMCO (f = 60 Hz) | | | | | | |
|--|----------------------------|------|----------------------------|------|----------------------------|------|
| B _{max} = 10000 G | | | | | | |
| Tipo | Bitola 29 Esp = 0,356mm | | Bitola 25 Esp = 0,470mm | | Bitola 24 Esp = 0,635mm | |
| | W/p | W/kg | W/p | W/kg | W/p | W/kg |
| M 14 | 0,52 | 1,14 | - | - | - | - |
| M 15 | 0,58 | 1,17 | 0,68 | 1,5 | - | - |
| M19 | 0,67 | 1,47 | 0,76 | 1,67 | 0,91 | 2,00 |

Fonte: Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

A indução máxima no núcleo de transformadores resfriados a óleo varia entre 11000 e 15000 G, sendo escolhida para este estudo o valor de 11000 G. Portanto, a perda específica no ferro é conforme a Equação 8:

$$W_{Fe} = W_{Fe-10} \left(\frac{B_{max}}{10000} \right)^2 = 1,14 \left(\frac{11000}{10000} \right)^2 = 1,38 \text{ W/kg} \quad (8)$$

Pode-se então calcular a seção do núcleo com a Equação 9:

$$S_{Fe} = C \sqrt{\frac{W_2 \frac{W_{Cu}}{W_{Fe}}}{f \frac{W_{Cu}}{W_{Fe}} d \cdot B_{max}}} \quad \therefore \quad 38 \cdot \sqrt{\frac{75 \cdot \frac{15,18}{1,38}}{60 \cdot \frac{1125}{215} \cdot 2,43 \cdot 11000}} \cong 119,2 \text{ cm}^2 \quad (9)$$

Onde:

S_{Fe} = seção do núcleo (cm²);

f = frequência (Hz);

W_2 = potência do transformador (kVA);

W_{Cu} = perdas no cobre (W);

W_{Fe} = perdas no ferro (W);

d = densidade de corrente (A/mm²);

B_{max} = indução magnética máxima (G);

w_{Cu} = perda específica no cobre (W/kg);

w_{Fe} = perda específica no ferro (W/kg).

A constante C é retirada da Tabela 7.

Tabela 7 – Valores da constante “C”

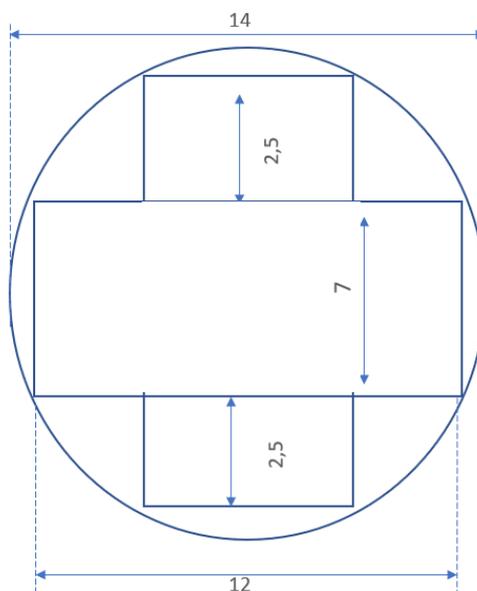
| Valores da Constante C | | |
|--|-------------|------------|
| Tipos de Núcleos | Monofásicos | Trifásicos |
| Transformadores de núcleo envolvido com bobinas redondas | 45 | 38 |
| Transformadores de núcleo envolvido com bobinas retangulares | 55 | 45 |
| Transformadores de núcleo envolvente | 65 | 55 |

Fonte: Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

De forma simplificada, o núcleo é feito em forma de cruz conforme ilustra a Figura 11, com a seção geométrica dada pela Equação 10. Na prática, a construção do núcleo pode apresentar uma maior quantidade de degraus, fazendo com que o mesmo tenha uma seção em formato mais próximo de uma circunferência.

$$S_{g_{Fe}} = 2 \cdot 2,5 \cdot 7 + 7 \cdot 12 = 119 \text{ cm}^2 \quad (10)$$

Figura 11 – Núcleo em forma de cruz



Fonte: Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

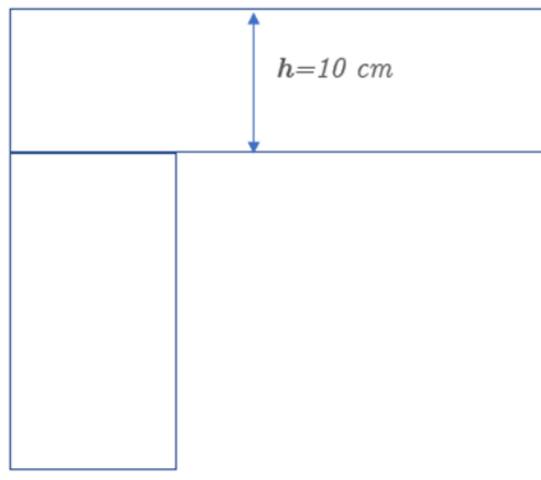
Considerando o fator de enchimento de 0,87 a seção magnética do núcleo é dada pela Equação 11:

$$S_M = 119 \cdot 0,87 = 103 \text{ cm}^2 \quad (11)$$

A seção das travessas é retangular, conforme ilustra a Figura 12, sendo assim a altura das travessas é indicada na Equação 12:

$$h = \frac{119}{12} \cong 10 \text{ cm} \quad (12)$$

Figura 12 – Altura das travessas



Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

Sendo a seção magnética do núcleo igual a 103 cm^2 e $B_{\max} = 11000 \text{ G}$, o fluxo máximo no núcleo é dado pela Equação 13:

$$\phi_{\max} = S_{Fe} \cdot B_{\max} \quad \therefore \quad \phi_{\max} = 103 \cdot 11000 = 1133 \cdot 10^3 \quad (13)$$

O número de espiras do enrolamento AT é dado pela Equação 14:

$$N_1 = \frac{V_{f1} \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \phi_M} = \frac{13800 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 60 \cdot 1133 \cdot 10^3} \approx 4572 \text{ espiras} \quad (14)$$

Onde:

N_1 = Número de espiras;

V_{f1} = tensão de fase no primário (V);

ϕ_{\max} = fluxo de indução máximo (T).

Em correspondência da potência nominal, a corrente fornecida para o enrolamento AT é calculada pela Equação 15:

$$I_1 = \frac{W_2 \cdot 10^3}{3 \cdot V_{f1}} = \frac{75 \cdot 10^3}{3 \cdot 13800} = 1,81 \text{ A} \quad (15)$$

A seção do condutor no circuito de AT, S_1 , é indicada na Equação 16:

$$S_1 = \frac{I_1}{d_1} = \frac{1,81}{2,38} = 0,76 \text{ mm}^2 \quad \left(\text{aqui } d_1 = \frac{d_m}{1,05} \right) \quad (16)$$

E o número total de Ampère espira de cada coluna é expresso pela Equação 17:

$$2N_1 \cdot I_1 = 2 \cdot 4572 \cdot 1,81 = 16550 \text{ A/espira} \quad (17)$$

Sendo assim, com o número total de A/espira, calcula-se a altura da janela pela Equação 18:

$$H = \frac{2 \cdot N_1 \cdot I_1}{A} = \frac{2 \cdot 4572 \cdot 1,81}{380} \approx 43 \text{ cm} \quad (18)$$

Onde A é fornecido de acordo com a potência do transformador, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Valores da constante “A”.

| Valores de "A" para transformadores resfriados em óleo | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| kVA | 10 | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 | 250 | 500 | 750 | 1000 | 2500 | 5000 |
| 15 kV | 150 | 220 | 260 | 330 | 380 | 440 | 570 | 690 | 730 | 790 | 900 | 1000 |
| 30kV | - | - | 180 | 250 | 300 | 370 | 530 | 660 | 720 | 780 | 890 | 995 |

Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

Uma vez que o transformador é de núcleo envolvido, a seção aproximada do cobre na janela é expressa na Equação 19:

$$S_{CU} = 2(2 \cdot N_1 \cdot S_1) = 2(2 \cdot 4572 \cdot 0,76) = 13898 \text{ mm}^2 \quad (19)$$

E a largura da janela é dada pela Equação 20:

$$L = \frac{S_{CU}}{100 \cdot f_{CU} \cdot H} = \frac{13898}{100 \cdot 0,22 \cdot 43} \approx 15 \text{ cm} \quad (20)$$

Executa-se L (largura da janela) com 15,5 cm.

Onde:

L = Largura da janela (cm);

H = Altura da janela (cm).

Para transformadores de núcleo envolvido, resfriados com óleo, os valores dos fatores de enchimento (f_{CU}) em função da potência estão indicados na Tabela 9.

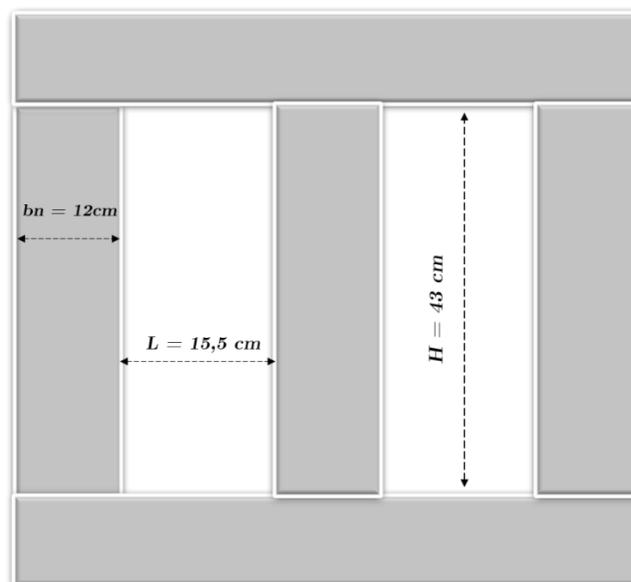
Tabela 9 – Fatores de enchimento

| Fatores de enchimento para transformadores de núcleo envolvido, resfriados com óleo | | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| F _{cu} | kVA | 50 | 75 | 100 | 250 | 500 | 750 | 1000 | 2500 | 5000 |
| | 5000 kV | 0,25 | 0,28 | 0,3 | 0,35 | 0,39 | 0,4 | 0,41 | 0,42 | 0,43 |
| | 15000 kV | 0,2 | 0,22 | 0,24 | 0,28 | 0,32 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,36 |
| | 30000 kV | 0,125 | 0,15 | 0,16 | 0,18 | 0,2 | 0,21 | 0,22 | 0,23 | 0,24 |

Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

Com todas as medidas calculadas, o núcleo dimensionado possui a forma e dimensões indicadas na Figura 13.

Figura 13 – Dimensões do núcleo



Fonte: Adaptado de Martignoni (1991).

Finalmente a massa do núcleo pode ser calculada pela Equação 21:

$$m_{Fe} = d_{Fe} \cdot S_{Fe} (3 \cdot H + 4 \cdot L + 6 \cdot b_n) \cdot 10^{-3} \quad (21)$$

$$m_{Fe} = 7,8 \cdot 103 (3 \cdot 43 + 4 \cdot 15,5 + 6 \cdot 12) \cdot 10^{-3} = 211,29 \text{ kg}$$

Onde:

d_{Fe} = densidade da chapa ferromagnética (g/cm^3).

5 ANÁLISE FINANCEIRA CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE CHAPAS FERROMAGNÉTICAS

As análises financeiras a serem abordadas irão considerar três diferentes tipos de chapas (ver anexo A1). Em resumo, tais chapas apresentam as seguintes características (fornecidas por um fabricante de transformadores em 27 de novembro de 2023):

CHAPA 1: **GNO/0,50 mm/90°**

Preço: R\$12,96 por kg

Para indução máxima de 1,10 T, perda de 3,16 W/kg

CHAPA 2: **GO/0,35 mm/90°**

Preço: R\$18,60 por kg

Para indução máxima de 1,10 T, perda de 1,89 W/kg

CHAPA 3: **GO/0,27 mm/45°**

Preço: R\$27,36 por kg

Para indução máxima de 1,10 T, perda de 0,72 W/kg

A análise financeira também considera uma taxa de juros anual, transformada em mensal, para a correção da diferença entre os custos dos núcleos, ou seja, emprega-se uma correção do valor economizado inicialmente quando opta-se pelo núcleo mais barato. Já o montante economizado com energia, ao utilizar a chapa de melhor qualidade, também será corrigido pela mesma taxa. Ainda, o custo da energia permanece constante durante o ano, sendo corrigido pela taxa anual após cada ciclo de 12 meses.

Utilizando as medidas do transformador estudado no capítulo anterior, obtém-se o peso do núcleo de aproximadamente 211 quilos, o qual foi considerado para essa análise financeira. Também foi estabelecido um valor de 0,54 kWh para o custo inicial de energia consumida.

5.1 Comparativo entre as chapas 1 e 2

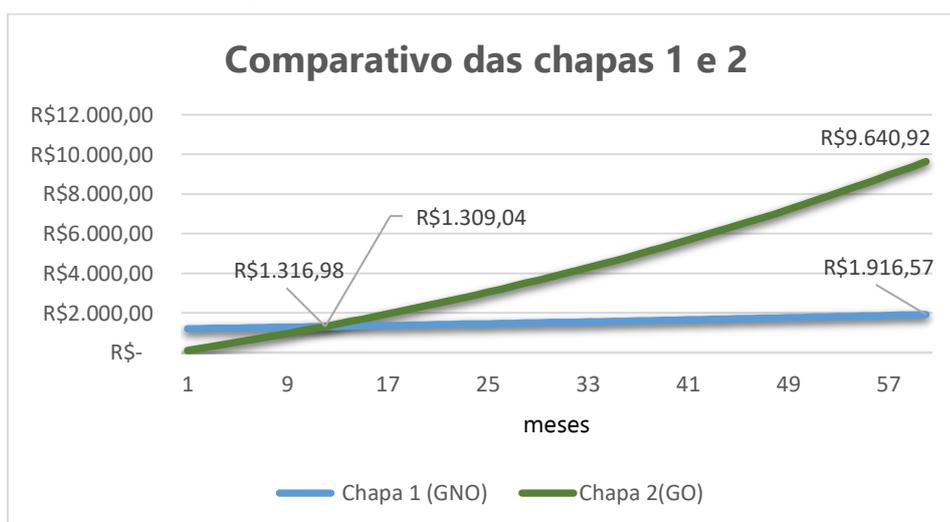
A diferença de custo final para aquisição de cada uma das chapas para a composição do núcleo está indicada na Tabela 10. Para uma taxa de juros de 10 % a.a, o comparativo entre o emprego da chapa 1 (GNO 0,5 mm) e da chapa 2 (GO 0,35 mm) é apresentado na Figura 14. Já as análises individuais para cada uma das chapas são apresentadas nas Figuras 15 e 16.

Tabela 10 – Custo das chapas 1 e 2

| Tipo | Preço/ kg | Custo Total | Diferença Custo Final |
|---------|-----------|--------------|-----------------------|
| Chapa 1 | R\$ 12,96 | R\$ 2.734,56 | R\$ 1.190,04 |
| Chapa 2 | R\$ 18,60 | R\$ 3.924,60 | |

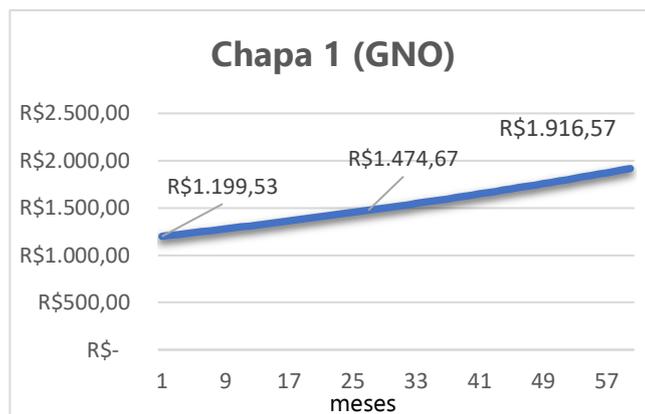
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 14 – Comparativo das chapas 1 e 2



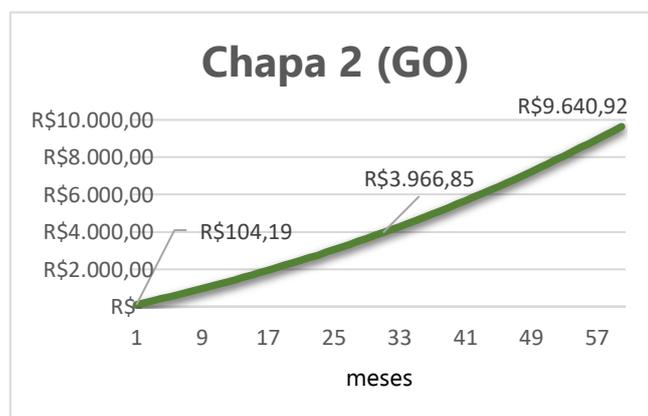
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 15 – Análise da chapa 1



Fonte: Elaboração própria (2023).

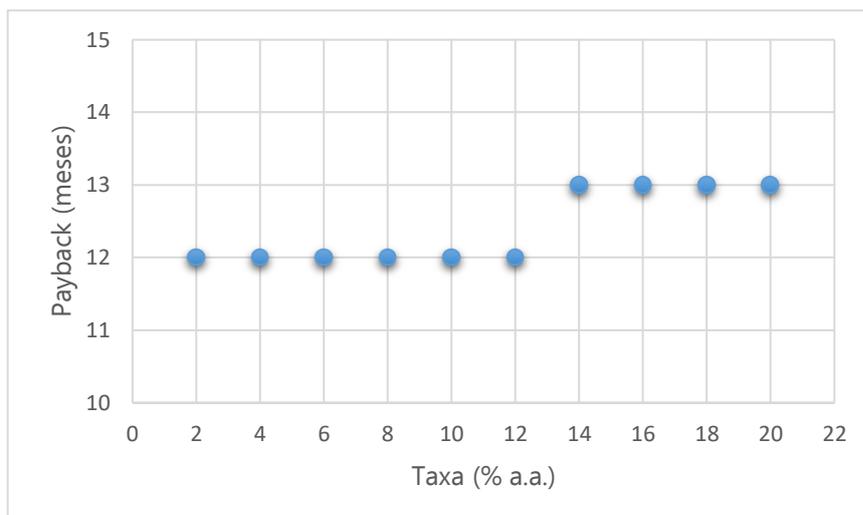
Figura 16 – Análise da chapa 2



Fonte: Elaboração própria (2023).

Nesse cenário, ao optar pela chapa 2 (GO) (melhor qualidade e maior custo), observa-se, conforme Figura 14, um *payback* descontado de 12 meses. Já o *payback* considerando outras taxas de juros é ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Payback considerando outras taxas



Fonte: Elaboração própria (2023).

5.2 Comparativo entre as chapas 1 e 3

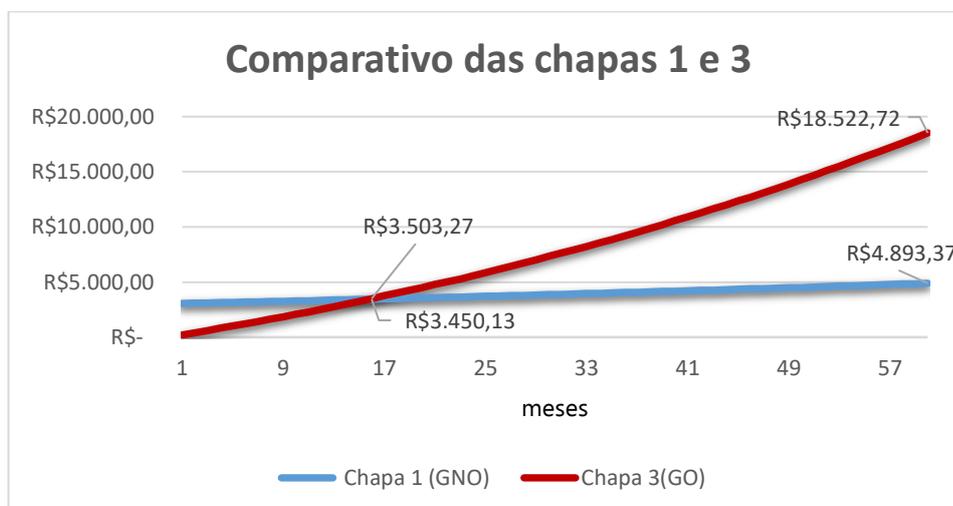
A diferença de custo final para aquisição de cada uma das chapas para a composição do núcleo está indicada na Tabela 11. Para uma taxa de juros de 10 % a.a, o comparativo entre o emprego da chapa 1 (GNO 0,5 mm) e da chapa 3 (GO 0,27 mm) é apresentado na Figura 18. Já as análises individuais para cada uma das chapas são apresentadas nas Figuras 19 e 20.

Tabela 11 – Custo das chapas 1 e 3

| Tipo | Preço/ kg | Custo Total | Diferença Custo Final |
|---------|-----------|--------------|-----------------------|
| Chapa 1 | R\$ 12,96 | R\$ 2.734,56 | R\$ 3038,40 |
| Chapa 3 | R\$ 27,36 | R\$ 5.772,96 | |

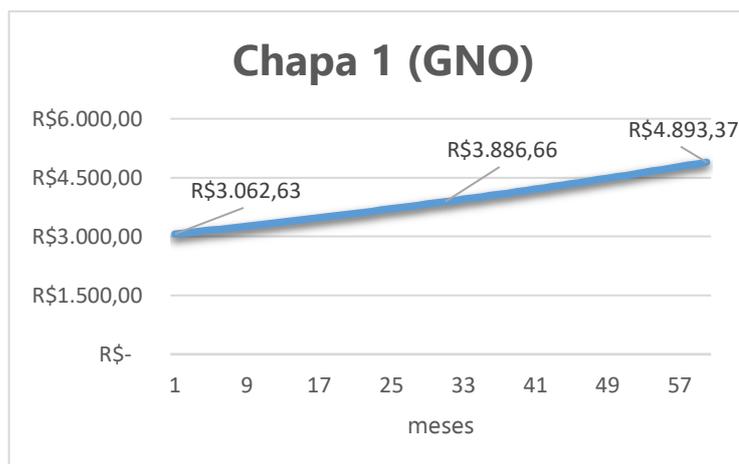
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 18 – Comparativo das chapas 1 e 3



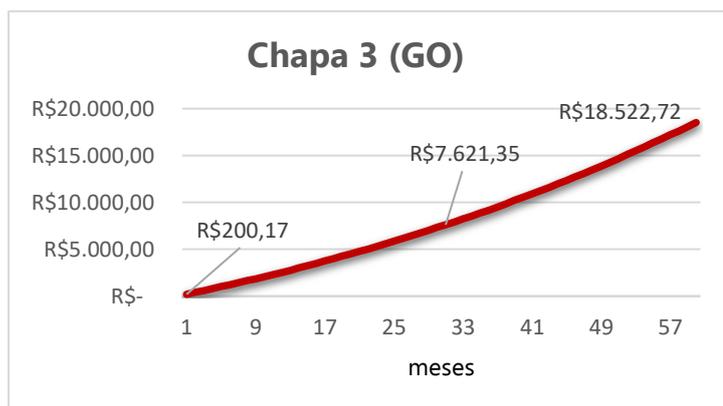
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 19 – Análise da chapa 1



Fonte: Elaboração própria (2023).

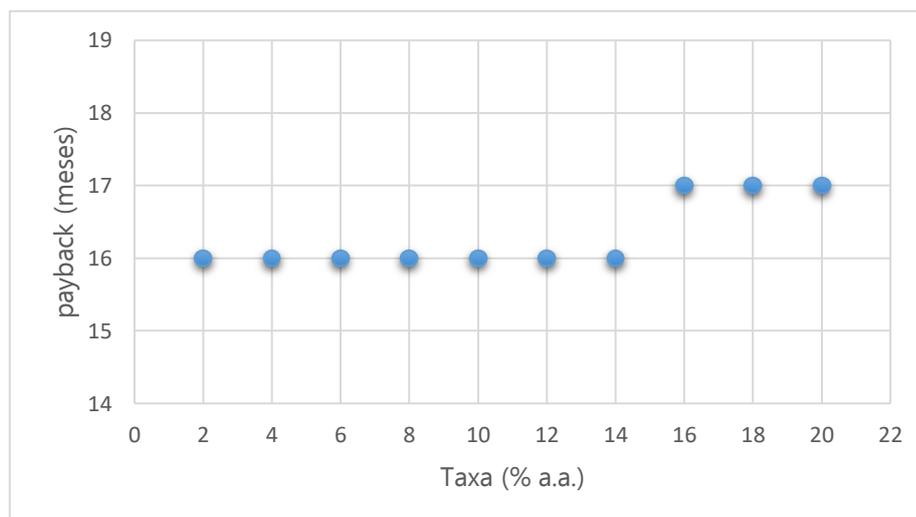
Figura 20 – Análise da chapa 3



Fonte: Elaboração própria (2023).

Nesse cenário, ao optar pela chapa 3 (maior custo e maior qualidade) em vez da chapa 1 (menor custo e menos eficiente), tem-se um *payback* descontado de 16 meses. Já o *payback* considerando outras taxas de juros é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Payback considerando outras taxas



Fonte: Elaboração própria (2023).

5.3 Comparativo entre as chapas 2 e 3

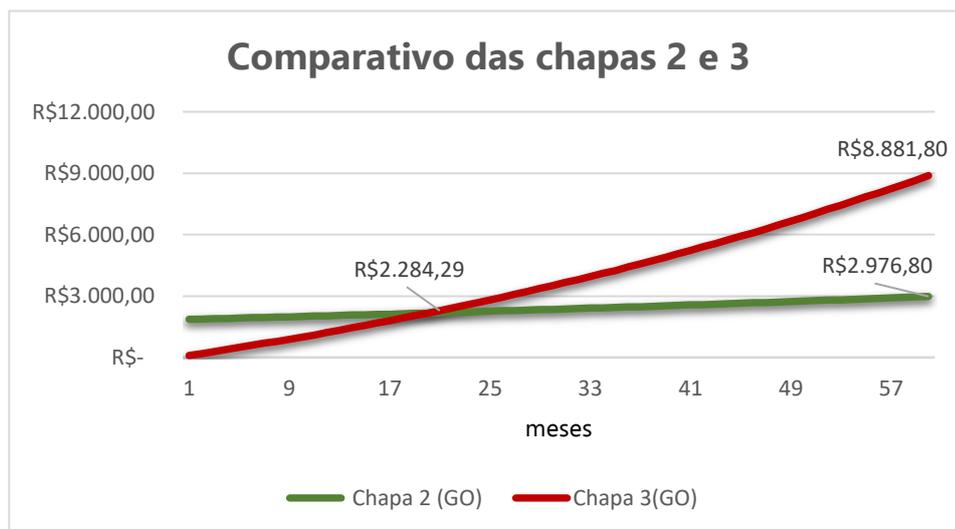
A diferença de custo final para aquisição de cada uma das chapas para a composição do núcleo está indicada na Tabela 11. Para uma taxa de juros de 10 % a.a, o comparativo entre o emprego da chapa 2 (GO 0,35 mm) e da chapa 3 (GO 0,27 mm) é apresentado na Figura 22. Já as análises individuais para cada uma das chapas são apresentadas nas Figuras 23 e 24.

Tabela 12 – Custo das chapas 2 e 3

| Tipo | Preço/ kg | Custo Total | Diferença Custo Final |
|---------|-----------|--------------|-----------------------|
| Chapa 2 | R\$ 18,60 | R\$ 3.924,60 | R\$ 1.848,36 |
| Chapa 3 | R\$ 27,36 | R\$ 5.772,96 | |

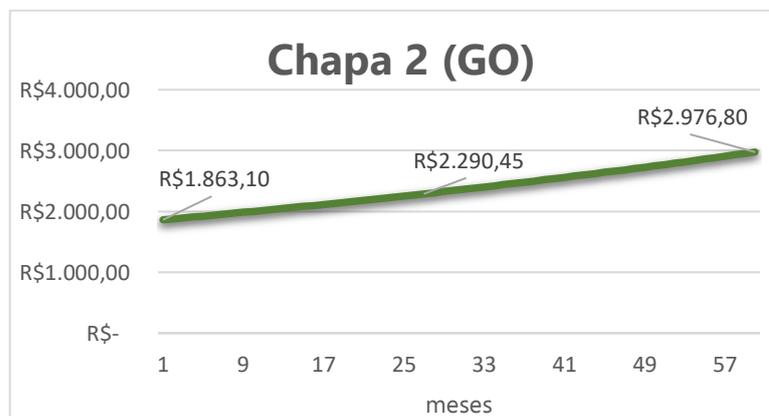
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 22 – Comparativo das chapas 2 e 3



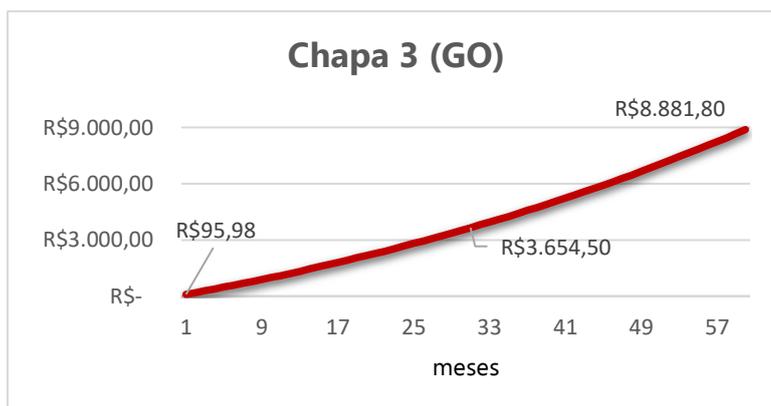
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 23 – Análise da chapa 2



Fonte: Elaboração própria (2023).

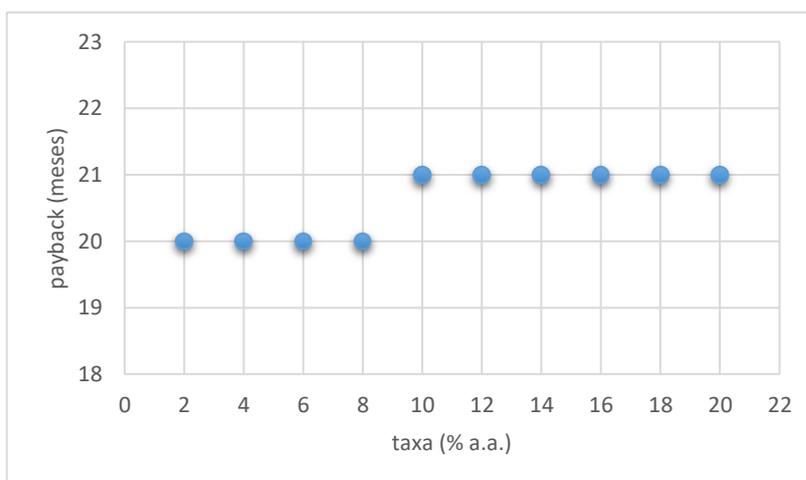
Figura 24 – Análise da chapa 3



Fonte: Elaboração própria (2023).

Nessa última análise, ao optar-se pela chapa 3 em vez da chapa 2, é obtido um *payback* descontado de 21 meses. O *payback* para outras taxas de juros é ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Payback considerando outras taxas



Fonte: Elaboração própria (2023).

5.4 Resumo dos resultados

Em suma, considerando os cenários financeiros estabelecidos na seção anterior, foi demonstrado que o uso de chapas ferromagnéticas de melhor qualidade para a composição do núcleo do transformador trifásico tem como resultado uma perspectiva positiva.

No primeiro comparativo entre as chapas 1 (GNO) e a chapa 2 (GO), optando-se pela chapa 1, a diferença final ficou em R\$ 1.190,04 sendo esse aplicado em um investimento com uma taxa anual de 10%, no final de 12 meses, se o adquirente do transformador tivesse escolhido a chapa 2, o mesmo já estaria com um *payback* positivo, pois a chapa 2 mesmo sendo mais cara, possui uma perda menor de energia.

O mesmo acontece no comparativo das chapas 1 e 3, sendo que nessa circunstância o *payback* seria de 16 meses, pois a diferença de custo inicial entre as duas chapas é maior e conseqüentemente é maior o capital investido.

Por fim, o comparativo entre as chapas 2 e 3 indica que o retorno financeiro pela diferença de aquisição das chapas, que é de R\$ 1.848,36, apresenta um *payback* mais longínquo (aproximadamente de 21 meses). Nesse comparativo as duas chapas são de grão-orientado, porém a chapa 3 apresenta menores perdas do que a chapa 2.

Analisando de forma individual as chapas, é possível verificar que a única chapa que atendeu os critérios estabelecidos na Tabela 1 (Características elétricas máximas para o funcionamento dos transformadores adquiridos pela CELESC), para transformadores trifásicos com potência de 75 kVA e tensão nominal de 13,8 kV, é a chapa número 3, onde suas perdas totais à vazio (perdas no ferro) é de aproximadamente 151 W. As chapas 1 e 2 extrapolaram o limite máximo de perdas totais, ou seja, perdas no ferro (perdas a vazio) maiores que 215 W.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada uma análise financeira referente à utilização de diferentes chapas ferromagnéticas para a confecção do núcleo de um transformador trifásico. Inicialmente foi apresentada uma revisão bibliográfica, onde é estabelecido a fundamentação teórica sobre transformadores monofásicos e trifásicos, seus elementos construtivos e princípio de funcionamento. Por ser tratar de um dos dispositivos mais importantes para o sistema elétrico, a maioria dos estudos já estão consolidados na literatura. O trabalho também abordou as perdas ferromagnéticas e perdas nos condutores.

Adicionalmente foram realizados estudos sobre as características e os tipos de materiais que compõe o núcleo dos transformadores, sendo esses os aços de grão orientado (GO) e os aços de grão não-orientados (GNO).

Para a análise financeira, foi necessária uma metodologia de projeto de um núcleo de um transformador trifásico por meio de cálculos analíticos retirados de determinada bibliografia. Nessa etapa foi estabelecido um tamanho fixo do núcleo, o que limitou a análise realizada especificamente nas perdas ferromagnéticas de acordo com as características dimensionadas.

Cabe destacar que para uma abordagem mais completa é necessário considerar mais variáveis, além do dimensionamento do núcleo. Uma possível alteração no tamanho do núcleo, por exemplo, afetaria na disposição e características dos condutores e no tamanho das bobinas, aumentando ou diminuindo o custo de aquisição do transformador, conseqüentemente iria influenciar no que se diz respeito a viabilidade econômica do transformador a ser adquirido.

Porém, com a análise realizada de um núcleo com dimensões fixas, é possível verificar uma ótima previsão das possíveis perdas ferromagnéticas e uma boa aproximação de valores monetários que poderiam vir a surgir, de acordo com o tipo da chapa a ser empregada na composição do núcleo do transformador.

Ao final da análise ficou constatado que a utilização de chapas ferromagnéticas de melhor qualidade tem grande impacto financeiro positivo ao longo do tempo. Apesar das perdas no ferro (sem carga) serem menores do que as perdas nos condutores (com carga), é válida a análise, pois como visto na Tabela 3, há um

grande número de transformadores trifásicos instalados no Brasil, e como as perdas no ferro são constantes (independentes da carga), podem representar um grande percentual de perdas no sistema elétrico.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se:

- a) Avaliar a viabilidade econômica referente à troca de transformadores antigos por novos de melhor rendimento.
- b) Realizar análises de transformadores de diferentes potências.
- c) Buscar uma análise mais completa considerado o projeto dos enrolamentos e consequentemente as perdas no cobre.
- d) Utilizar de ferramentas computacionais para análise do projeto de transformadores, como por exemplo, *softwares* que fazem uso do método de elementos finitos.

REFERÊNCIAS

- BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 4.ed. Rio de Janeiro: 2018.
- CELESC. Centrais Elétricas de Santa Catarina. **Especificação de materiais e equipamentos elétricos**. Disponível em <https://www.celesc.com.br/especificacao-de-equipamentos-e-materiais>. Acesso em 20 nov. 2023.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. rev. Porto Alegre: 2013.
- DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: 1994.
- GEDRA, Ricardo L.; BARROS, Benjamim Ferreira D.; BORELLI, Reinaldo. **Geração Transmissão distribuição**. São Paulo: Editora Saraiva: 2014.
- GUSSOW, Milton **Eletricidade Básica** 2ed.Porto Alegre: 2009
- MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 5. ed. [S. I.]: LTC: 2019.
- MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8º edição. ed. São Paulo: Globo:1991.
- NASCIMENTO JUNIOR, Geraldo Carvalho. **Máquinas Elétricas**. São Paulo : 2020.
- O que é um transformador trifásico: construção e funcionamento. **Elprocus**. 2013. Disponível em: <https://www.elprocus.com/what-is-three-phase-transformer-construction-and-its-working/>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- PETRUZELLA, Frank D. **Eletrotécnica II**. Porto Alegre: 2014.
- PINTO, Carlos Alberto. **Guia do Transformador**: Os tipos de transformadores e como usar. [S. I.]: CapSistema, 2021. 86 p. v. 1. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Guia_do_Transformador/1PYyEAAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1. Acesso em: 21 out. 2022.
- PROCOBRE. **Eficiência energética em transformadores de distribuição**. [S. I.]:2009.
- SILVA, Clodoaldo. **Perdas no Cobre e no Ferro dos Transformadores**. [S. I.]: Clube da eletrônica, 2011. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/18E_bsAdPyRc8aOIEia0qRdTXPNxogxHu/view. Acesso em: 21 out. 2022.
- SOUZA, Diogo B C.; RODRIGUES, Rodrigo. **Eletrotécnica**. Porto Alegre Editora: 2017
- UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**: de Fitzgerald e kingsley. 7. Ed. Porto Alegre: Bookman, Mc Graw Hill Education:2014.

VIANA, Augusto N. C. *et al.* **Eficiência energética**: ed. Campinas - SP Serviços S.A., 2012. 315 p. Disponível em:
https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/pdflibrary/01_livro_eficiencia_energetica.pdf. Acesso em: 18 nov. 2022.

ANEXO A1

| GNO 0,50 mm 90° | | GO 0,35 mm 90° | | GO 0,27 mm 45° | |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| Preço (R\$/kg): | 12,96 | Preço (R\$/kg): | 18,60 | Preço (R\$/kg): | 27,36 |
| Indução (G) | Perdas (W/kg) | Indução (G) | Perdas (W/kg) | Indução (G) | Perdas (W/kg) |
| 9000 | 2,07 | 7089 | 0,86 | 8483 | 0,42 |
| 9500 | 2,30 | 7798 | 1,02 | 10070 | 0,62 |
| 10000 | 2,60 | 8507 | 1,20 | 11658 | 0,80 |
| 10500 | 2,85 | 9216 | 1,36 | 13246 | 1,06 |
| 11000 | 3,16 | 9925 | 1,55 | 14790 | 1,37 |
| 11500 | 3,39 | 10634 | 1,78 | 14870 | 1,38 |
| 12171 | 3,85 | 11343 | 2,00 | 14940 | 1,40 |
| 12500 | 4,11 | 12052 | 2,24 | 15020 | 1,42 |
| 13000 | 4,52 | 12761 | 2,47 | 15090 | 1,43 |
| 13500 | 4,99 | 13470 | 2,83 | 15170 | 1,45 |
| 14000 | 5,45 | 14179 | 3,24 | 15240 | 1,47 |
| 14500 | 5,95 | 14888 | 3,70 | 15320 | 1,49 |