

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

ANDRÉ FELIPE MATZENBACHER BALLAN

**TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS: COMPARATIVO
DE MATERIAIS PARA OS ENROLAMENTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2019

ANDRÉ FELIPE MATZENBACHER BALLAN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS: COMPARATIVO DE MATERIAIS PARA OS ENROLAMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - CO-ELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Dr. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

PATO BRANCO

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **TRANSFORMADORES TRI-FÁSICOS: COMPARATIVO DE MATERIAIS PARA OS ENROLAMENTOS** do acadêmico **André Felipe Matzenbacher Ballan** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata examinadora **Nº 226** de **2019**

Fizeram parte dessa banca examinadora os professores:

Dr. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

Dr. Marcelo Gonçalves Trentin

MSc. Santo Tiverolli Filho

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

Dedico este trabalho principalmente à minha mãe, Andréa Matzenbacher e aos meus avós, José Reinando Matzenbacher e Helena Raspini Matzenbacher que com muito amor e carinho me criaram sem medir esforços para que eu chegasse nesta etapa da minha vida.

A humildade é a única base sólida de todas as
virtudes. - Confúcio

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, pelo excelente ambiente oferecido aos seus alunos e os profissionais qualificados que disponibiliza para nos ensinar.

À professor Filomena Barbosa Rodrigues Mendes, pela orientação, apoio e confiança.

Aos professores, Dr. Marcelo Gonçalves Trentin e MSc. Santo Tiverolli Filho, por aceitarem participar da banca e por todas as suas contribuições.

À minha mãe, Andréa Matzenbacher e aos meus avós, José Reinando Matzenbacher e Helena Raspini Matzenbacher por tudo que fizeram por mim ao longo desses anos de formação.

Aos amigos, que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

E à todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

BALLAN, André Felipe Matzenbacher. **Transformadores Trifásicos: Comparativo de materiais para os enrolamentos**. 2019. Monografia. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

Nos últimos anos o cobre vem apresentando um encarecimento em relação ao alumínio, com isso torna-se importante avaliar e comparar os custos da fabricação de equipamentos que utilizam cobre e alumínio. Um dos equipamentos que apresenta a possibilidade de substituição de suas partes de cobre por alumínio é o transformador. Este presente em aplicações de eletrônica de baixa potência até em sistemas de transmissão de energia. Comparado com o cobre, o alumínio possui mais resistência, portanto, menor condutividade. Assim, faz-se necessário um estudo para a utilização do alumínio na manufatura dos enrolamentos de transformadores trifásicos de baixa potência. Este deve avaliar se o alumínio é capaz de atender as mesmas condições de trabalho que o cobre. O presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo desses materiais no emprego de enrolamentos de transformadores trifásicos. Desta forma desenvolveu-se o projeto de um transformador com enrolamentos de cobre e outro com enrolamentos de alumínio, sendo os cálculos realizados em um **software** de cálculo matemático, notou-se que o projeto com bobinas de alumínio teve desempenho equivalente ao projeto com bobinas de cobre, além disso o alumínio apresenta vantagens econômicas em relação ao cobre. Para um próximo trabalho é visado a construção dos devidos transformadores.

Palavras-chave: Transformador trifásico, Enrolamentos, Alumínio, Cobre.

ABSTRACT

BALLAN, André Felipe Matzenbacher. **Three-Phase Transformers: Comparative Materials for Windings**. 2019. monography. (Completion of course work) - Course of Electrical Engineering, Federal Technological University of Paraná, 2019.

In recent years copper prices has been increasing in relation to aluminum, so it is important to evaluate and compare the costs of manufacturing copper and aluminum equipment. One of the equipment that has the possibility of replacing its copper parts with aluminum is the transformer. This present in applications of low power electronics up to power transmission systems. Compared to copper, aluminum has more resistance, therefore, lower conductivity. Thus, a study is required for the use of aluminum in the manufacture of windings of three-phase low-power transformers. It must assess whether aluminum is capable of meeting the same working conditions as copper. The present work has the objective of carrying out a comparative study of these materials in the use of windings of three - phase transformers. In this way the design of a transformer with copper windings and another one with aluminum windings was developed, being the calculations realized in a software of mathematical calculation, it was noticed that the design with aluminum coils had performance equivalent to design with copper coils, in addition aluminum has economic advantages over copper. For a future work is aimed at the construction of the appropriate transformers.

Keywords: Three-Phase Transformer, Winding, Aluminum, Copper .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Histórico de cotação do cobre e alumínio no período de 1998 a 2011.	14
Figura 2 –	Núcleo envolvente	17
Figura 3 –	Núcleo envolvido.	18
Figura 4 –	(a) Enrolamento helicoidal (b) Enrolamento em camadas. . . .	19
Figura 5 –	(a) Enrolamento concêntrico (b) Enrolamento alternado	19
Figura 6 –	(a) bobinas recém fabricadas (b) transformador inutilizado devido a falha no papel isolante.	20
Figura 7 –	Circulação do fluxo magnético em núcleo de transformador . .	21
Figura 8 –	Circuito equivalente de um transformador.	22
Figura 9 –	Transformador trifásico composto por três transformadores monofásicos.	23
Figura 10 –	Transformador trifásico enrolado em um único núcleo.	23
Figura 11 –	Histórico de cotação do cobre e alumínio no período de 03/2018 a 03/2019	25
Figura 12 –	Topologia do Núcleo dos transformadores	28
Figura 13 –	(a) Circuito Magnético (b) Circuito Magnético Simplificado. . .	28
Figura 14 –	Projeto e Dados Dimensionais para Lâminas Trifásicas	31
Figura 15 –	Diagrama de Ligações das Bobinas dos Transformadores . . .	42
Figura 16 –	Dimensões do Transformador	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas do cobre e alumínio	24
Tabela 2 – Parâmetros do projeto	43
Tabela 3 – Dimensões das lâminas comerciais escolhidas	44
Tabela 4 – Área do Fio Primário e Secundário Calculada	44
Tabela 5 – Dimensões dos Enrolamentos	45
Tabela 6 – Comparativo de Parâmetros	45
Tabela 7 – Quantidade de Materiais	46
Tabela 8 – Dimensões Estimadas dos Transformadores	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 METODOLOGIA DO TRABALHO	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2 TRANSFORMADORES	17
2.1 CONSTRUÇÃO	17
2.1.1 Núcleo	17
2.1.2 Enrolamentos	18
2.1.3 Papel Isolante	19
2.2 FUNCIONAMENTO	20
2.3 PERDAS E CIRCUITO EQUIVALENTE	21
2.4 RENDIMENTO	22
2.5 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	22
3 COMPARATIVO DOS MATERIAS COBRE E ALUMÍNIO	24
3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	24
3.2 CUSTO DA MATÉRIA PRIMA	25
3.3 RESISTIVIDADE DOS MATERIAS	26
3.4 DESEMPENHO DURANTE CURTO CIRCUITO	27
3.5 COMPARATIVO DOS CIRCUITOS MAGNÉTICOS	27
4 PROJETO DOS TRANSFORMADORES	30
4.1 NÚCLEO	30
4.2 CONDUTORES	32
4.2.1 Enrolamento Primário	32

4.2.2	Enrolamento Secundário	32
4.3	PERDAS	33
4.3.1	Perdas nos enrolamentos	33
4.3.2	Perdas no Ferro	34
4.3.3	Perdas totais	35
4.3.4	Perdas por unidade de área	35
4.4	RENDIMENTO CALCULADO DO TRANSFORMADOR	35
4.5	REGULAÇÃO DE TENSÃO CALCULADA	35
4.6	CÁLCULO DO AUMENTO DE TEMPERATURA	36
4.7	UTILIZAÇÃO DA JANELA DO TRANSFORMADOR	36
4.8	QUANTIDADE DE MATERIAIS	38
4.8.1	Quantidade de Lâminas	38
4.8.2	Quantidade de fio condutor	38
4.8.3	Quantidade total de Materiais	39
4.9	ALGORITMO DE CÁLCULO PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS ..	39
4.10	DIAGRAMA DE LIGAÇÕES DAS BONINAS DOS TRANSFORMADORES ..	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1	PARÂMETROS	43
5.2	NÚCLEO	43
5.3	ENROLAMENTOS	44
5.4	COMPARATIVO DOS PARÂMETROS	45
5.4.1	Regulação de Tensão	46
5.4.2	Fator de Utilização da Janela	46
5.4.3	Rendimento	46
5.4.4	Aumento de Temperatura	46
5.4.5	Quantidade de Materiais	46
5.4.6	Dimensões dos Transformadores	47
6	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49
	ANEXO A - TABELA DE FIOS DE COBRE	50

1 INTRODUÇÃO

Desde a Pré História o homem vem procurando meios de reduzir seus esforços. Observando a natureza percebeu que poderia usar algumas formas de energia a seu favor. Buscou compreendê-las e dominá-las, primeiramente com o fogo, o qual garantiu uma melhora significativa em sua vida e milhares de anos depois possibilitou a revolução industrial, quando foi transformado em movimento, permitindo a construção da máquina a vapor.

Posteriormente outra forma de energia começa a ser compreendida pelo homem, a energia elétrica, relatada pela primeira vez no século XI, porém, foi só com Alexandre Volta quando inventou a bateria em 1800, que a energia elétrica começava de fato a ser compreendida.

Os estudos sobre ela seguem até André Marie Ampère descobrir a relação entre corrente e campo magnético. Em 1831 o inglês Michael Faraday descobre a indução eletromagnética e estabelece o princípio do gerador elétrico.

Finalmente em 1879 o americano Thomas Alva Edison inventa a lâmpada elétrica e em 1882 instala a primeira usina de geração de energia elétrica do mundo em corrente contínua (CC), com fins comerciais, porém, seu sistema por utilizar uma baixa tensão de geração e transmissão, necessitava de uma elevada corrente para gerar quantidades significativas de energia. Segundo [1] “o fato de que, usando sistemas de energia CC de baixa tensão, a energia não podia ser transmitida para longe significava que as usinas geradoras deveriam ser pequenas e localizadas pontualmente sendo, portanto, relativamente ineficientes.”

Então em 1885 Willian Sntaley desenvolve comercialmente o transformador e logo depois em 1888, Nikola Tesla inventa os motores de indução e síncrono com o princípio da corrente alternada (CA), o mesmo usado nos transformadores.

A invenção do transformador juntamente com o desenvolvimento das estações de geração CA eliminam o problema de alcance e de capacidade da geração CC, pois, o transformador converte um nível de tensão CA em outro nível de tensão, sem alterar a potência elétrica fornecida. Como a potência elétrica (P) é representada

pela equação.

$$P = V.I, \quad (1)$$

onde: V é tensão elétrica (V); I corrente elétrica (A).

Desta maneira a energia elétrica pode ser gerada em grandes usinas centralizadas e depois transmitida para os centros de consumo, com perdas muito baixas. Em um sistema de transmissão as perdas são proporcionais ao quadrado da corrente como mostra a equação [1].

$$P = R.I^2, \quad (2)$$

sendo R é a resistência elétrica do material (Ohms).

Desta forma, se usado um transformador que eleve a tensão de transmissão as perdas serão reduzidas significativamente.

Embora os transformadores sejam fundamentais nos sistemas de potência CA, essa não é sua única aplicação. O transformador também é usado em larga escala em sistemas eletrônicos de baixa potência, com o intuito de casar impedâncias entre uma fonte e sua carga, obter a máxima transferência de potência e promover isolamento galvânica entre partes de um mesmo circuito elétrico [2].

Os transformadores são constituídos basicamente pelo seu núcleo ferromagnético por onde flui o fluxo magnético, enrolamentos condutores por onde flui a corrente elétrica e materiais isolantes para isolar o núcleo dos enrolamentos e para isolar os enrolamentos entre si.

O objetivo de confeccionar os núcleos com material ferromagnético é obter um caminho preferencial para o fluxo magnético gerado pelos enrolamentos e permitir o maior acoplamento possível entre os enrolamentos primário e secundário com baixo fluxo de dispersão [3].

Os enrolamentos são considerados a parte mais importante do projeto de um transformador pois sua vida útil está diretamente relacionada com suas bobinas, as quais são fabricadas em cobre ou alumínio. Devido ao conhecimento técnico insuficiente sobre as ligas de alumínio, inicialmente determinou-se somente o uso de cobre nas bobinas. No entanto durante a Primeira e Segunda Guerra Mundial o uso de alumínio para fabricação das bobinas tornou-se comum, porém, devido a algumas situações de guerra e política o cobre se firmou como o principal material para confecção dos enrolamentos dos transformadores.

O cobre e o alumínio são os dois materiais mais utilizados no setor elétrico, afinal ambos têm boa capacidade de condução de corrente elétrica. Nesse quesito o

cobre é o segundo colocado e o alumínio o terceiro, o melhor condutor de corrente elétrica é a prata, porém, seu custo de aquisição torna inviável sua utilização como matéria prima das bobinas dos transformadores.

Atualmente o critério para escolha do material das bobinas é seu custo de aquisição, geralmente feitos de cobre. O alumínio vem se tornando uma opção atraente para a substituição do cobre no projeto dos enrolamentos, vê-se no gráfico da figura 1, que até 2003 o preço dos dois se assemelhava, a partir daí ocorre uma severa divergência de preços ficando o cobre muito mais caro que o alumínio.



Figura 1 – Histórico de cotação do cobre e alumínio no período de 1998 a 2011.
Fonte:[4].

A escolha do material a ser utilizado nos enrolamentos deve ser feita levando em consideração diversos fatores e não apenas o custo de manufatura do transformador. Devem ser analisados o comportamento desses materiais em ensaios para a aprovação e liberação do transformador, além disso deve-se verificar como este material se comportará durante a vida útil do equipamento. Sendo assim a escolha do material não visa somente a economia financeira com redução de custo na fabricação, mas também a economia com a redução de falhas dos transformadores em campo [4].

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo comparativo de materias para os enrolamentos de transformadores trifásicos.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudar as diferenças entre os materiais cobre e alumínio na manufatura de enrolamentos de transformadores;
2. Escrever um algoritmo para projetar um transformador trifásico, com bobinas de cobre e outro com bobinas de alumínio com as especificações: 220/380V; delta-delta; corrente secundária de 1 A; 60 Hz; 1.18 T. Tais especificações foram escolhidas visando a facilitação da execução dos projetos.
3. Analisar, discutir e comparar os resultados obtidos nos projetos dos transformadores.

1.2 METODOLOGIA DO TRABALHO

Com base na pesquisa bibliográfica é possível projetar um transformador trifásico com as seguintes especificações: 220/380v; delta-delta; corrente secundaria de 1 A; 60 Hz; 1,18 T, com enrolamentos de cobre. Com as mesmas especificações será desenvolvido um transformador com os enrolamentos de alumínio, para possibilitar uma análise comparativa adequada.

Inicialmente será elaborada uma fundamentação teórica sobre os transformadores em seguida será desenvolvida uma pesquisa sobre o cobre e o alumínio, buscando um comparativo de suas propriedades físicas e financeiras, em seguida sucedera o desenvolvimento do projeto de um transformador com enrolamentos de cobre e outro com enrolamentos de alumínio ambos tendo as mesmas especificações citadas a cima, por fim, será feito o comparativo dos dois projetos, para que em um trabalho futuro seja desenvolvida a montagem de ambos os transformadores.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho será organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 - Introdução: Inserção do tema, a fim de situar o trabalho;

Capítulo 2 - Transformadores: Explicação acerca de transformadores de uma forma genérica, sua construção, funcionamento, circuito equivalente, cálculo das perdas;

Capítulo 3 - Comparativo entre cobre e alumínio: Comparação das propriedades físicas, custo de aquisição e desempenho dos materiais na aplicação de enrolamentos de transformadores;

Capítulo 4 - Projeto: Apresentação do método de projeto dos transformadores com enrolamentos de cobre e alumínio;

Capítulo 5 - Resultados apresentados: Neste serão apresentados e discutidos os resultados obtidos;

Capítulo 6 - Conclusão: Avaliação do trabalho se atingiu ou não seus objetivos e as dificuldades encontradas.

2 TRANSFORMADORES

2.1 CONSTRUÇÃO

2.1.1 NÚCLEO

O núcleo de um transformador não é maciço e sim constituído por chapas de material ferromagnético isoladas entre si. Isso se deve ao fato de que quando um material ferromagnético é excitado por uma corrente CA induz-se nele um fluxo magnético e pela lei de Faraday vê-se que campos magnéticos que variam no tempo, dão origem a campos elétricos.

Nos materiais ferromagnéticos esses campos elétricos dão origem a correntes induzidas, usualmente chamadas de correntes parasitas, as quais por se oporem ao fluxo magnético representam perdas. Assim dividindo o núcleo em chapas e isolando-as entre si aumenta-se a resistência elétrica do núcleo e por consequência as correntes parasitas diminuem [2].

Existem dois tipos de circuitos magnéticos para a construção de núcleo de transformadores, quais sejam, núcleo envolvido e núcleo envolvente. No primeiro os enrolamentos estão situados na coluna central do núcleo, conforme mostra a Figura 2. No segundo os enrolamentos são posicionados nas colunas periféricas do núcleo mostrado na Figura 3 [5].

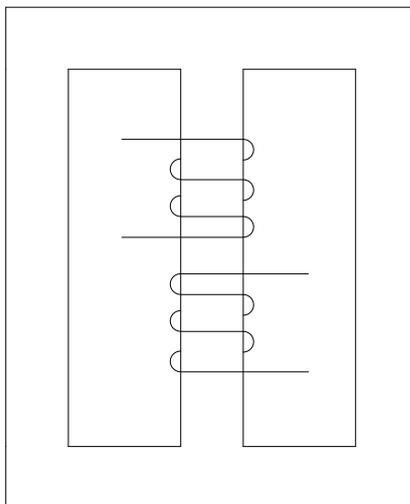


Figura 2 – Núcleo envolvente
Fonte: Adaptado de [5].

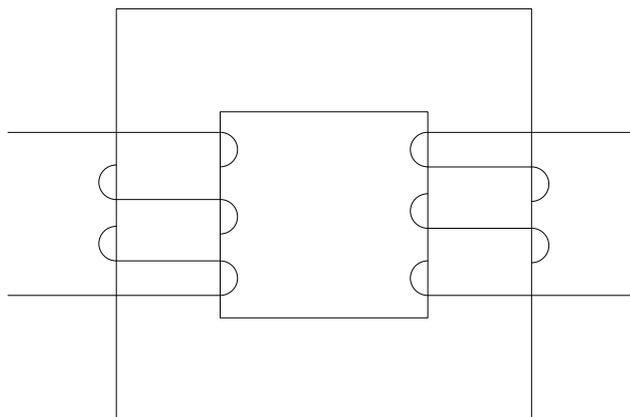


Figura 3 – Núcleo envolvido.

Fonte: Adaptado de [5].

Sendo assim, o circuito magnético é composto pelas colunas onde são montados os enrolamentos e as vigas que unem as colunas. O espaço vazio em que os enrolamentos passam é denominado de janela no núcleo [6].

2.1.2 ENROLAMENTOS

Os enrolamentos constituem o circuito elétrico dos transformadores e devem ser projetados para possuir temperatura de operação compatível com a classe de transformador desejada, resistir a curto-circuito e dispor de isolamento adequada para a classe de tensão pretendida.

Comumente os enrolamentos são confeccionados em formato helicoidal ou em camadas. No enrolamento helicoidal o condutor é enrolado de forma espiral de modo a haver apenas uma camada no enrolamento, logo, não há superposição dos condutores no sentido radial. O enrolamento em camada é confeccionado da mesma maneira que o helicoidal, porém, os condutores são enrolados em camadas, sendo necessário uma camada de isolamento entre cada camada de condutor [3].

As figuras 4a e 4b ilustram os tipos de enrolamentos citados no parágrafo anterior.

Além do tipo de confecção do enrolamento, outro fator que os diferencia é sua disposição na coluna do núcleo, podendo ser classificados como concêntricos ou alternados conforme mostra a figura 5.

Os enrolamentos (a) concêntricos formam um tubo coaxial apresentando uma única camada de enrolamento, enquanto que os (b) alternados são formados por mais de uma camada [6].

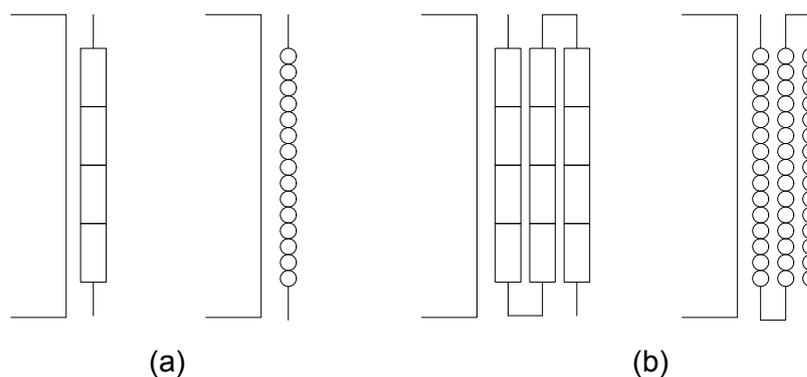


Figura 4 – (a) Enrolamento helicoidal (b) Enrolamento em camadas.
Fonte: Adaptado de [4].

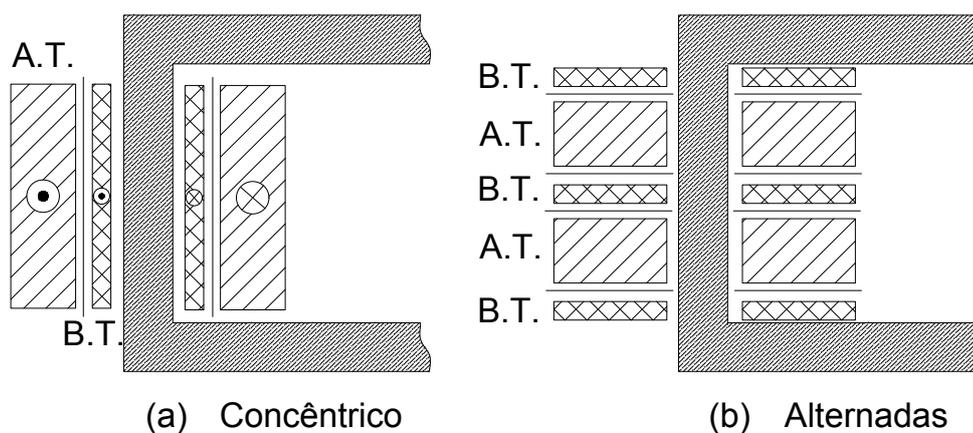


Figura 5 – (a) Enrolamento concêntrico (b) Enrolamento alternado
Fonte: Adaptado de [6].

2.1.3 PAPEL ISOLANTE

A celulose é o principal componente dos papéis isolantes, responsável pelas propriedades mecânicas e dielétricas presentes no papel. A degradação da celulose resulta na alteração dessas propriedades, ocasionando defeitos e até mesmo a inutilização do transformador. Essa degradação se dá principalmente por três fatores, hidrólise relacionada a água na fabricação do papel, oxidação referente ao oxigênio e pirólise devido a temperatura [3].

Assim sendo o papel isolante é parte essencial para a longevidade do transformador e os fenômenos de degradação da celulose devem ser controlados, consequentemente a umidade e temperatura a qual o equipamento é submetido devem estar dentro dos padrões aceitáveis de operação da máquina. As imagens a seguir mostram (a) bobinas recém fabricadas e um (b) transformador inutilizado devido a falha no papel isolante.



Figura 6 – (a) bobinas recém fabricadas (b) transformador inutilizado devido a falha no papel isolante.

Fonte: Adaptado de [3].

2.2 FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento de um transformador é simples, apenas há a necessidade de um fluxo comum que varie no tempo e enlace dois enrolamentos [2].

Sendo assim, segundo Nasar (1932) “a ação de um transformador é baseada na lei de indução eletromagnética de Faraday, de acordo com a qual, um fluxo variável com o tempo, enlaçando uma bobina, induz nesta uma fem (tensão).”

Desta forma se o fluxo (Φ), enlaça um enrolamento de (N_1) espiras, sua tensão induzida (e_1), será representada pela equação.

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

A Figura 7 mostra o diagrama esquemático da circulação do fluxo no núcleo de um transformador, onde o enrolamento com (N_1) espiras, é chamado de primário e o de (N_2) espiras, de secundário, (V_1) é a tensão aplicada ao primário e (V_2) a tensão gerada no secundário devido a indução magnética.

Percebe-se que o fluxo que enlaça (N_1) é o mesmo que enlaça (N_2), e analogamente a (e_1), a tensão induzida na bobina do secundário é dada por.

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

Sendo o fluxo Φ comum aos dois enrolamentos então a razão entre e_1 e e_2 é

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5)$$

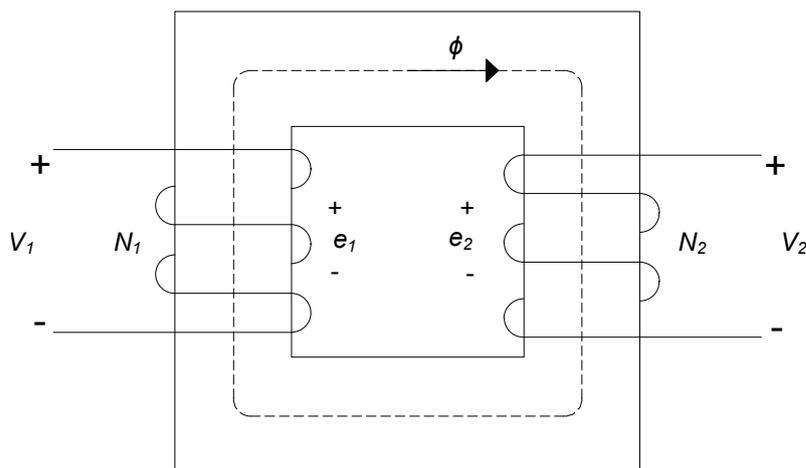


Figura 7 – Circulação do fluxo magnético em núcleo de transformador
Fonte: Adaptado de [7].

Isto significa que a razão da tensão induzida no primário e secundário, pelo fluxo comum, é igual a relação de espiras do transformador [1].

2.3 PERDAS E CIRCUITO EQUIVALENTE

Um transformador ideal seria um transformador sem perdas de energia e, portanto, 100% eficiente. Todavia na prática, parte da energia transformada é dissipada nos enrolamentos, núcleo e outras estruturas adjacentes [4].

Nos enrolamentos estas perdas são representadas pelas resistências (R_1) e (R_2) e, suas reatâncias de dispersão (X_1) e (X_2), no núcleo simbolizadas pela resistência de magnetização (R_C) e reatância de magnetização (X_m) [2].

Em que (R_1) e (R_2) são resistências elétricas que quando multiplicadas pela corrente representam as perdas joule, devido ao aquecimento dos enrolamentos. Sabe-se também que uma parcela do fluxo que passa pelos enrolamentos do primário e secundário escapa do núcleo, chamado de fluxo de dispersão relacionado com (X_1) e (X_2). Já (R_C) é a resistência elétrica que equivale as perdas por correntes parasitas e histerese do núcleo, além disso, a histerese é responsável por outra perda, (X_m) a qual está relacionada a corrente de magnetização, responsável por alinhar os domínios magnéticos do núcleo [6].

O circuito equivalente com os elementos que geram as perdas de um transformador é mostrado na Figura 8.

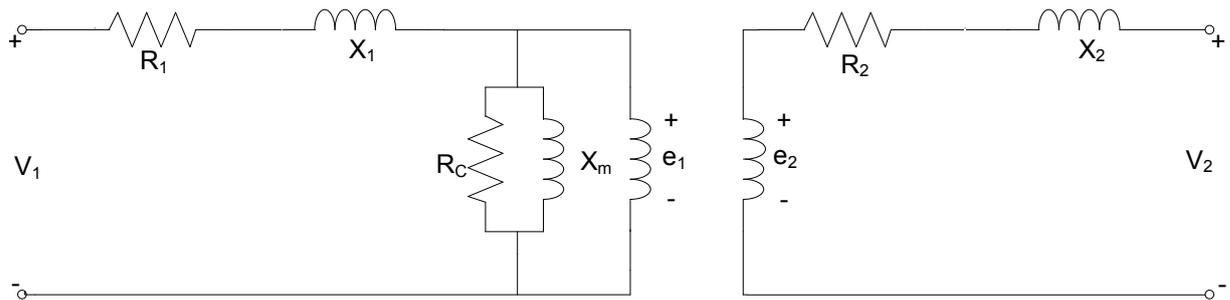


Figura 8 – Circuito equivalente de um transformador.

Fonte: Adaptado de [7].

2.4 RENDIMENTO

O rendimento (eficiência) é a relação direta entre potência de entrada e potência de saída do transformador em um dado instante, como mostra a equação 6. Logo o rendimento não é uma grandeza constante, é variável com a potência exigida pela carga em seu secundário.

$$n = \frac{P_{Saída}}{P_{Entrada}} = \frac{P_{Saída}}{P_{Saída} + Perdas} \quad (6)$$

Sendo n é o rendimento, ($P_{Saída}$) a potência de saída do transformador, ($P_{Entrada}$) a potência de entrada do transformador.

Portanto seu rendimento para uma determinada potência depende de suas perdas. Sendo elas divididas em dois grupos.

O primeiro relaciona-se com suas perdas a vazio (perda no ferro), devido ao circuito magnético, ou seja, o núcleo do transformador e são constantes, consequentemente independem da potência a qual o transformador está submetido existindo até mesmo quando o transformador não alimenta carga alguma e ocorrem ao longo de toda vida do equipamento. O segundo refere-se as perdas em carga (perdas no cobre), totalmente dependente da potência exigida pela carga acionada, tendo comportamento quadrático [4].

2.5 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Todas as análises feitas até aqui se aplicam à transformadores monofásicos, porém, para a construção de um transformador trifásico basta-se reunir três transformadores monofásicos e ligá-los em um banco trifásico. Ou ainda envolver três conjuntos de enrolamentos em um único núcleo de três pernas. Os dois tipos de construção estão mostrados nas Figuras 9 e 10 [1].

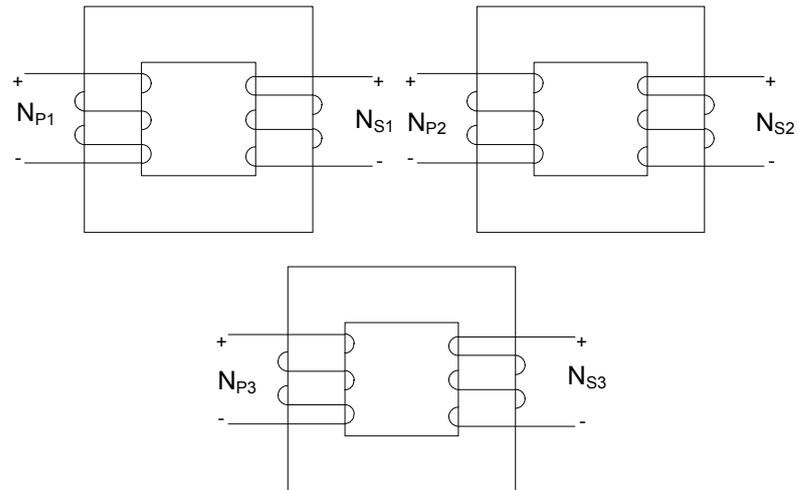


Figura 9 – Transformador trifásico composto por três transformadores monofásicos.
Fonte: Adaptado de [1].

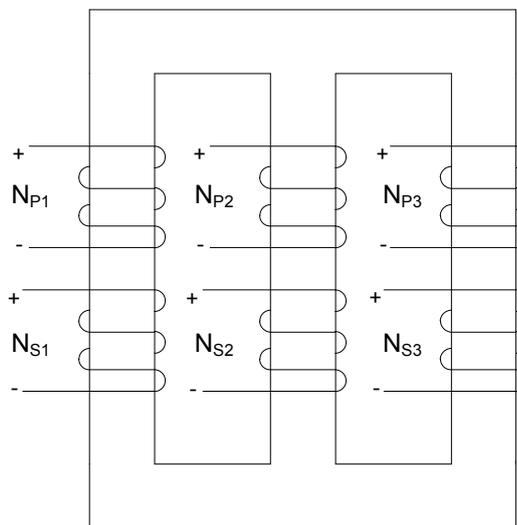


Figura 10 – Transformador trifásico enrolado em um único núcleo.
Fonte: Adaptado de [1].

3 COMPARATIVO DOS MATERIAS COBRE E ALUMÍNIO

Este capítulo apresenta um comparativo entre o cobre e o alumínio como materiais condutores a serem utilizados nos enrolamentos dos transformadores. A utilização do alumínio em substituição do cobre em transformadores vem se tornando cada vez mais frequente devido a diferença de preço dos materias.

3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

A comparação entre os materias é feita, embasando-se nas suas características físicas e tem como objetivo definir o limite de custo na manufatura do transformador quando usado um ou outro material, buscando a maior economia.

Tabela 1 – Características físicas do cobre e alumínio

Propriedades	Unidade	Cobre	Alumínio
Resistividade 20°C	Ωm	$1,72 * 10^{-8}$	$2,83 * 10^{-8}$
Coefficiente de Temperatura a 20°C	$^{\circ}C^{-1}$	0,00393	0.00403
Temperatura ponto T	$^{\circ}C$	234,5	228,1
Tensão de Ruptura a 20°C	kgf/mm^2	23	4,9
Densidade de massa	kg/dm^3	8,89	2,7
Coefficiente de expansão	$^{\circ}C^{-1}$	$16,7 * 10^{-6}$	$23,86 * 10^{-6}$
Condutividade térmica	$W/^{\circ}C$	398	210
Calor específico	$J/kg^{\circ}C$	384,6	904
Ponto de fusão	$^{\circ}C$	1085	660

Fonte: adaptado de [4].

Como mostra a tabela acima, a resistividade do cobre é cerca de 40% menor que o alumínio, além disso o cobre é 4,7 vezes mais resistente a ruptura que o alumínio e apresenta uma condutividade de calor 90% maior, por outro lado o cobre é 3,3 vezes mais pesado que o alumínio.

O condutor de cobre usado em transformadores comumente tem um grau de pureza superior a 99,9%. Pequenas quantidades de impurezas podem degradar a resistividade do condutor. O alumínio é mais sensível as impurezas que o cobre, uma quantidade de 0,5% de impurezas pode reduzir em 10% a capacidade do alumínio em conduzir corrente elétrica [4].

3.2 CUSTO DA MATÉRIA PRIMA

O cobre e o alumínio são considerados commodities. Commodities são mercadorias que em geral são homogêneas, cuja oferta e demanda são praticamente inelásticas no curto prazo e suas transações são efetuadas nas principais bolsas de mercadorias internacionais [9].

Entende-se por demanda inelástica, quando a variação percentual na quantidade demandada é menor que a variação percentual do preço, ou seja, uma elevação do preço provoca redução na quantidade demandada relativamente menos que a elevação do preço [10].

Até o ano de 2003 o preço das duas commodities se assemelhavam, a partir de 2003 o preço do cobre começou a disparar em relação ao alumínio, como vistona Figura 1. A diferença de preço no último ano é apresentada na Figura 11.

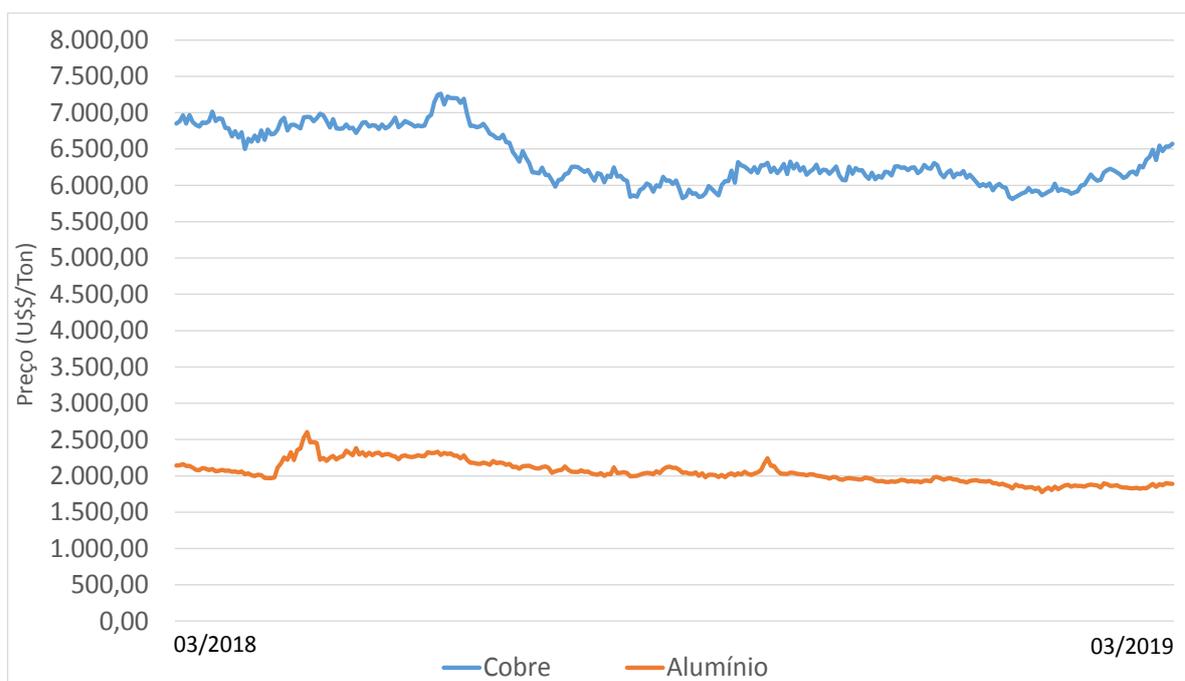


Figura 11 – Histórico de cotação do cobre e alumínio no período de 03/2018 a 03/2019
Fonte: Adaptado de [11].

Percebe-se que o cobre é mais caro que o alumínio e devido a isso o uso do alumínio em substituição ao cobre no setor elétrico vem crescendo, porém, outros fatores vêm dando força para essa substituição, como o fato de que as reservas mundiais de alumínio são muito maiores que as de cobre e com o uso excessivo do cobre a tendência do seu preço é crescer ainda mais.

3.3 RESISTIVIDADE DOS MATERIAS

Na tabela 01 os valores de resistividade dos materiais são apresentados para uma temperatura de 20 °C, porém, a temperatura de operação do transformador é estimada em 75°C, sendo a resistividade variante com a temperatura, deve-se corrigir estes valores.

Para a compatibilização da resistência com a temperatura de operação usa-se a equação 14, para tal é necessária uma temperatura T fictícia para o cobre de 234,5°C e para o alumínio de 228,1°C [4].

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T + \theta_2}{T + \theta_1} \quad (7)$$

Sendo, (ρ_1) a resistividade em (Ωm) à temperatura (θ_1) em (°C), (ρ_2) a resistividade em (Ωm) à temperatura (θ_2) em (°C), e (T) a temperatura fictícia do material em (°C). Isolando (ρ_2) tem-se a resistividade corrigida para temperatura de operação respectivamente para o cobre (ρ_{Cu}) e para o alumínio (ρ_{Al}) :

$$\rho_{Cu} = 1,72 * 10^{-8} * \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} = 2,09 * 10^{-8} \Omega m \quad (8)$$

$$\rho_{Al} = 2,83 * 10^{-8} * \frac{228,1 + 75}{228,1 + 20} = 3,46 * 10^{-8} \Omega m \quad (9)$$

A resistência elétrica (R) de um condutor cilíndrico em (Ω) é representada pela equação:

$$R = \rho * \frac{L}{S} \quad (10)$$

Sendo (ρ) a resistividade em (Ωm), (L) o comprimento e (S) a seção do condutor em (m^2).

De (10):

$$R_{Cu} = \rho_{Cu} * \frac{L_{Cu}}{S_{Cu}} \quad (11)$$

$$R_{Al} = \rho_{Al} * \frac{L_{Al}}{S_{Al}} \quad (12)$$

Como ambos os enrolamentos devem ter a mesma resistência, chega-se a equação abaixo:

$$\rho_{Cu} * \frac{L_{Cu}}{S_{Cu}} = \rho_{Al} * \frac{L_{Al}}{S_{Al}} \quad (13)$$

Para $(L_{Cu}) = (L_{Al})$ tem-se:

$$\frac{\rho_{Al} * L_{Al}}{S_{Al} * L_{Cu}} = \frac{\rho_{Cu}}{S_{Cu}} \quad (14)$$

Logo:

$$\frac{\rho_{Al}}{S_{Al}} = \frac{\rho_{Cu}}{S_{Cu}} \quad (15)$$

Assim:

$$S_{Al} = \frac{3,46 * 10^{-8}}{2,09 * 10^{-8}} * S_{Cu} = 1,66 * S_{Cu} \quad (16)$$

Portanto para o alumínio ser usado na manufatura de enrolamentos de transformadores tendo a mesma resistência que um enrolamento de cobre, a seção transversal do condutor deve ser 1,66 vezes maior que a seção do condutor de cobre.

3.4 DESEMPENHO DURANTE CURTO CIRCUITO

O curto circuito impõe ao transformador um grande valor de corrente instantânea, que por sua vez proporciona um aumento brusco de sua temperatura, afetando assim a resistência dos enrolamentos.

Estudos apontam que para desempenhos equivalentes frente a curto circuito a seção transversal do condutor de alumínio deve ser cerca de 80% maior que a seção do condutor de cobre, além disso transformadores com enrolamentos de cobre são capazes de resistir por mais tempo a curtos circuitos. Por estes motivos o cobre tende a ser o material mais adequado para aplicações de potência mais elevada [4].

3.5 COMPARATIVO DOS CIRCUITOS MAGNÉTICOS

O comportamento de um circuito magnético pode ser definido com equações análogas as de um circuito elétrico. Para um circuito elétrico tensão (V) é igual a multiplicação da corrente (I) pela resistência (R). Em circuitos magnéticos a força magnetomotriz (FMM) em (A.e) é igual a multiplicação do fluxo (Φ) em (Wb) pela relutância (R) em (A.e/Wb), além disso as relutâncias em um circuito magnético obedecem as mesmas premissas de resistência equivalente de um circuito elétrico [1].

$$FMM = N * i = \Phi * R \quad (17)$$

$$\Phi = B * A \quad (18)$$

$$R = \frac{L}{\mu * A} \quad (19)$$

No qual (N) é o número de espiras, (i) é a corrente elétrica em (A), B é a densidade de fluxo magnético em (T), (A) é a área se seção reta do núcleo em (m^2), (L) o comprimento do caminho médio do núcleo em (m) e (μ) a permeabilidade magnética do material em (H/m).

Como a topologia do núcleo dos transformadores com enrolamentos de alumínio e com enrolamentos de cobre é igual, representada na figura 12, ambos apresentam o mesmo circuito magnético, mostrado na figura 13a e simplificado em 13b.

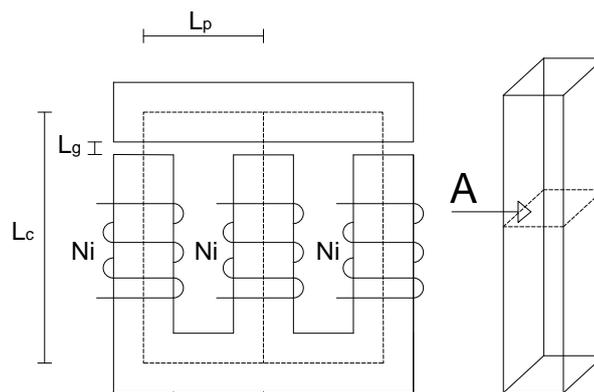


Figura 12 – Topologia do Núcleo dos transformadores
Fonte: Autoria Própria.

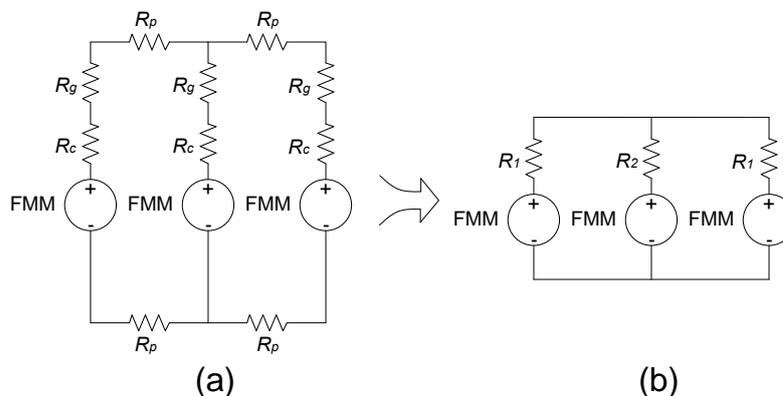


Figura 13 – (a) Circuito Magnético (b) Circuito Magnético Simplificado.
Fonte: Autoria Própria.

E respectivamente as relutâncias em (A.e/Wb) são:

$$R_c = \frac{L_c - L_g}{\mu * A} \quad (20)$$

$$R_g = \frac{L_g}{\mu_0 * A} \quad (21)$$

$$R_p = \frac{L_p}{\mu * A} \quad (22)$$

$$R_1 = R_c + R_g + 2 * R_p \quad (23)$$

$$R_2 = R_c + R_g \quad (24)$$

4 PROJETO DOS TRANSFORMADORES

Nesta seção será descrito as principais etapas do método utilizado para projetar os transformadores propostos seguindo a sistemática de cálculo de [12] e [13]. O método consiste em calcular: o tamanho e a quantidade das chapas que formam o núcleo, o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, a bitola do fio primário e secundário, o peso de fio para os enrolamentos primário e secundário, além do diagrama de ligações das bobinas dos transformadores.

4.1 NÚCLEO

Supondo um transformador trifásico, com valores pré-definidos de rendimento ($rend$), tensão de linha no secundário (V_{ol}) e corrente de linha no secundário (I_o) a potência total (P_t) em (w) que as laminas do núcleo estão submetidas é:

$$P_t = [V_{ol} * I_o] * \left[\frac{1}{rend} + 1 \right] \quad (25)$$

Esta potência é utilizada para calcular a constante da geometria do núcleo (K_g) em (cm^5) para um dado valor de regulação de tensão (α).

$$K_g = \frac{P_t}{2 * k_e * \alpha * 100} \quad (26)$$

Em que K_e é a constante de condições elétricas da máquina dada por:

$$K_e = 0,145 * k_f^2 * f^2 * Bm^2 * 10^{-4} \quad (27)$$

K_f é a constante da forma de onda, para ondas senoidais seu valor é de 4,44, f é a frequência da rede que excita o transformador em Hertz, e (Bm) é a indução magnética máxima do transformador em Tesla.

Com o valor calculado de K_g é definido o tamanho da chapa do núcleo. Escolhe-se chapas comerciais que apresentam K_g maior ou igual a K_g calculado. Assim ficam conhecidas as dimensões E, F, G, D, A_c e W_a mostradas na figura 14.

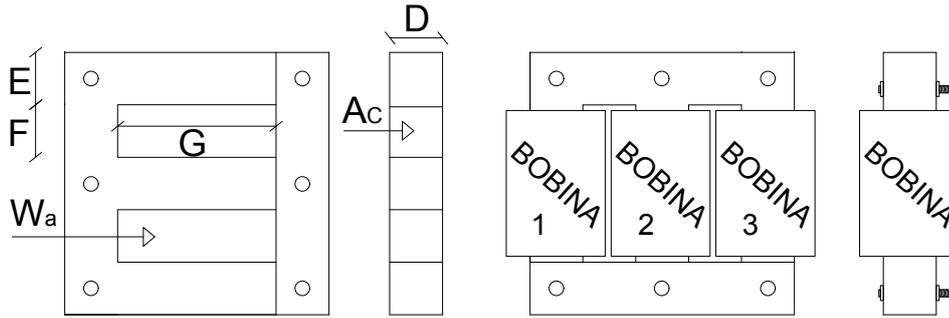


Figura 14 – Projeto e Dados Dimensionais para Lâminas Trifásicas
Fonte: Adaptado de [14].

A unidade de (K_g) é (cm^5) , na matemática (R^5) é o conjunto de vetores com 5 componentes. Na engenharia elétrica para calcular a temperatura em um ponto da chapa de um transformador podemos considerar a temperatura inicial, as três coordenadas espaciais do ponto na chapa e a fonte de calor. Estas informações podem ser representadas utilizando um vetor com 5 componentes.

Além do (K_g) as lâminas tem as seguintes dimensões: (W_{tfe}) peso do núcleo em gramas, (MLT) comprimento médio das espiras em (cm), (W_a) é a área da janela do núcleo em (cm^2) , entende-se por janela a área disponível para o bobinamento das fases do transformador, (A_c) é a área de material ferromagnético do núcleo em (cm^2) , (A_p) é a multiplicação das áreas (A_c) e (W_a) em (cm^4) e (A_t) é a área total da superfície requerida para dissipação de calor.

Além disso a figura 16 representa o designe do núcleo do transformador, onde (G) é a altura da janela em (cm), (F) a largura da janela do núcleo em (cm), (E) é a largura da perna do núcleo em (cm), (D) é a profundidade do núcleo, isto é a altura das laminas empilhadas em (cm).

$$W_a = F * G \quad (28)$$

$$A_c = D * E \quad (29)$$

$$A_p = A_c * W_a \quad (30)$$

$$A_t = 41,3 * A_p^{0,5} \quad (31)$$

$$W_{tfe} = 68,2 * A_p^{0,75} \quad (32)$$

4.2 CONDUTORES

Para os condutores é estimada inicialmente a bitola do fio do enrolamento primário e seguindo a mesma metodologia é estimada a bitola do fio do secundário.

4.2.1 ENROLAMENTO PRIMÁRIO

A determinação do número de espiras do primário (N_p) é feita através da equação:

$$N_p = \frac{V_{pl}}{K_f * Bm * f * A_c} * 10^4 \quad (33)$$

Na qual V_{pl} é a tensão de linha do primário em volts.

Além do número de espiras é preciso definir a área do condutor levando em consideração o fator de utilização da janela (K_u), este é uma constante empírica que indica a porcentagem da área da janela a ser utilizada para melhorar a eficiência do bobinamento dos enrolamentos. Considerando a área de ocupação do primário mais secundário, como neste primeiro momento é de interesse apenas a área ocupada pelo primário (K_u) deve ser dividido por dois, sendo assim a área do condutor do enrolamento primário (A_{wpb}) é determinada por:

$$K_{uP} = \frac{K_u}{2} \quad (34)$$

$$A_{wpb} = \frac{K_{uP} * W_a}{4 * N_p} \quad (35)$$

Com o valor calculado de (A_{wpb}) escolher em uma tabela de fios esmaltados comerciais, um fio com área maior e mais próxima a calculada.

4.2.2 ENROLAMENTO SECUNDÁRIO

O número de espiras do secundário (N_s) é determinado levando em consideração uma regulação de tensão ($alpha$) pré-definida, sendo assim o número de espiras do secundário é equacionado conforme abaixo:

$$N_s = \left[\frac{N_p * V_{ol}}{V_{pl}} \right] * (1 * alpha) \quad (36)$$

Da mesma maneira que no primário, necessita-se definir a área do condutor do enrolamento secundário (A_{wpb}). Seguindo as mesmas considerações feitas para

o enrolamento primário, tem-se as equações do secundário:

$$K_{uS} = \frac{K_u}{2} \quad (37)$$

$$A_{wsb} = \frac{K_{uS} * W_a}{4 * N_s} \quad (38)$$

Sendo (K_{uS}) o fator de utilização da janela apenas para o secundário.

Igualmente feito para o primário com a área do condutor calculada, escolhe-se em uma tabela de fios esmaltados comerciais, um com área maior e mais próxima a calculada.

4.3 PERDAS

Este tópico expõe o equacionamento das perdas totais do transformador. A perda total do transformador é dada pela soma das perdas no cobre (ou alumínio) e perdas no ferro.

4.3.1 PERDAS NOS ENROLAMENTOS

A resistência de um fio condutor cilíndrico é representada pela equação 10 descrita no item 3.3. A potência ativa que representa as perdas ôhmicas no transformador é definida pela equação 2 explanada no item 1.

Desta maneira para o cálculo das perdas nos enrolamentos faz-se necessário o conhecimento de sua resistência e corrente. A partir de sua resistência por centímetro (Ω/cm) é possível calcular a resistência total do enrolamento, tanto para o primário quanto para o secundário:

Na qual R_p é a resistência do primário em Ω :

$$R_p = MLT * N_p * (\Omega/cm) \quad (39)$$

E R_s é a resistência do secundário:

$$R_s = MLT * N_s * (\Omega/cm) \quad (40)$$

A corrente de linha do primário (I_{plinha}) em A é calculada levando em conside-

razão (V_{ol} , I_o , V_{pl}) e rendimento, sendo:

$$P_o = V_{ol} * I_o \quad (41)$$

$$I_{plinha} = \frac{P_o}{3 * V_{pl} * \text{rend}} \quad (42)$$

E a corrente de fase do primário ($I_{p\text{fase}}$) é:

$$I_{p\text{fase}} = \frac{I_{plinha}}{\sqrt{3}} \quad (43)$$

Já a corrente de linha do secundário é a própria (I_o) previamente definida, sendo assim a corrente de fase do secundário ($I_{s\text{fase}}$) é:

$$I_{s\text{fase}} = \frac{I_{slinha}}{\sqrt{3}} \quad (44)$$

Finalmente, as perdas no fio de primário (P_p) e secundário (P_s) em (w) são mostradas nas equações a seguir:

$$P_p = 3 * I_{p\text{fase}}^2 * R_p \quad (45)$$

$$P_s = 3 * I_{s\text{fase}}^2 * R_s \quad (46)$$

A multiplicação por três se deve ao fato de que o transformador é trifásico como mostra a figura 10. Assim as perdas totais nos enrolamentos (P_{cu}) em (w) são:

$$P_{cu} = P_p + P_s \quad (47)$$

4.3.2 PERDAS NO FERRO

As perdas no ferro estão relacionadas com a indução eletromagnética que o núcleo é submetido (B_m) e a frequência da onda que o excita (f). Seu modelo matemático é descrito a seguir:

$$Watt\text{por}\text{kg} = k * f^m * B_m^n \quad (48)$$

A equação resulta em um valor de perdas por quilograma, sendo as constantes (k , m e n) obtidas através de ensaios de lâminas, os quais levam em consideração a geometria e material da lâmina. Os valores numéricos das constantes são encon-

trados em tabelas de fabricantes.

Para o cálculo das perdas no ferro (P_{fe}) em (w), basta multiplicar os ($Wattsporkg$) pelo peso do núcleo em quilogramas (W_{tfe}):

$$P_{fe} = Wattporkg * W_{tfe} \quad (49)$$

4.3.3 PERDAS TOTAIS

As perdas totais do transformador (P_{soma}) são obtidas através da soma das perdas nos enrolamentos (P_{cu}) e as perdas no núcleo (P_{fe}) em (w):

$$P_{soma} = P_{cu} + P_{fe} \quad (50)$$

4.3.4 PERDAS POR UNIDADE DE ÁREA

Esta perda é definida pela divisão das perdas totais (P_{soma}) pela área total da lâmina requerida para dissipação de calor (A_t), dada em (w/cm²):

$$P_{area} = \frac{P_{soma}}{A_t} \quad (51)$$

É importante o conhecimento do valor dessa perda, para a estimativa de aumento de temperatura que será calculado no item 4.6.

4.4 RENDIMENTO CACULADO DO TRANSFORMADOR

O rendimento calculado ($Rend_{calc}$) do transformador é obtido pela divisão de sua potência (P_o) pela soma de (P_o) com as perdas totais (P_{soma}). O valor do rendimento calculado deve ser confrontado com a meta de rendimento definida inicialmente para o transformador. Em caso de discrepância é necessário repetir os cálculos utilizando outras bitolas de fio e tamanho de chapas.

$$Rend_{calc} = \frac{P_o}{P_o + P_{soma}} \quad (52)$$

4.5 REGULAÇÃO DE TENSÃO CALCULADA

Para calcular a regulação de tensão é necessário avaliar quais perdas do transformador são variáveis com a carga, visto que as perdas do transformador estão presentes no núcleo e nos enrolamentos. Pode-se afirmar que como a corrente de

magnetização é constante, as únicas perdas variáveis com a carga são as perdas nos enrolamentos (P_{cu}), dessa forma a regulação de tensão calculada é:

$$\alpha_{calc} = \frac{P_{cu}}{P_o} \quad (53)$$

O valor de alfa calculado deve ser confrontado com a meta de regulação de tensão definida inicialmente para o transformador. Em caso de discrepância é necessário repetir os cálculos utilizando outras bitolas de fio e tamanho de chapas.

4.6 CÁLCULO DO AUMENTO DE TEMPERATURA

Sabendo que o aumento de temperatura em graus Celsius é dado pela equação:

$$Tr_{calc} = 450 * P_{area}^{0.836} \quad (54)$$

Vê-se pela variável (P_{area}) que o aumento de temperatura do transformador está relacionado com suas perdas totais e sua área requerida para dissipação de calor.

O valor de (Tr_{calc}) deve ser confrontado com a meta de elevação de temperatura definida inicialmente para o transformador. Em caso de discrepância é necessário repetir os cálculos utilizando outras bitolas de fio e tamanho de chapas.

4.7 UTILIZAÇÃO DA JANELA DO TRANSFORMADOR

No item 4.2, para o cálculo dos condutores foi usado um (K_u) pré-definido, porém, a área dos condutores comerciais é apenas aproximada a área dos condutores calculados, isso significa que a constante de ocupação da janela se altera, como essa constante é um parâmetro de projeto deve-se recalcula-la tendo mínima divergência, respectivamente para o primário (K_{uPnovo}) e secundário (K_{uSnovo}):

$$K_{uPnovo} = \frac{4 * N_p * Awpb_{novo}}{W_a} \quad (55)$$

$$K_{uSnovo} = \frac{4 * N_s * Awsb_{novo}}{W_a} \quad (56)$$

Em que ($Awpb_{novo}$) e ($Awsb_{novo}$) são as bitolas comerciais dos condutores do primário e secundário, selecionados no item 4.2 em (cm²)

Logo a constante de utilização total da janela (K_{unovo}) é:

$$K_{unovo} = K_{uPnovo} + K_{uSnovo} \quad (57)$$

O valor de (K_{unovo}) calculado deve ser confrontado com a meta de utilização da janela definida inicialmente para o transformador. Em caso de discrepância é necessário repetir os cálculos utilizando outras bitolas de fio e tamanho de chapas. O próximo passo é encontrar a ocupação total dos enrolamentos na janela, para isso inicialmente calcula-se o número de linhas do fio do primário (lfc_P) que cabem na altura (G) tomando como referência a figura 14.

$$lfc_P = \frac{G}{diamP} \quad (58)$$

Sendo ($diamP$) o diâmetro do condutor do enrolamento primário (cm).

A seguir calcula-se o número de colunas do fio do primário (cfc_P):

$$cfc_P = \frac{N_p}{lfc_P} \quad (59)$$

A ocupação total do fio do primário ($Ocup_P$) em (cm) na janela é dada por:

$$Ocup_P = cfc_P * diamP \quad (60)$$

Repete-se o procedimento para o cálculo da ocupação do fio do secundário:

$$lfc_S = \frac{G}{diamS} \quad (61)$$

Sendo ($diamS$) o diâmetro do condutor do enrolamento secundário (cm).

$$cfc_S = \frac{N_s}{lfc_S} \quad (62)$$

$$Ocup_S = cfc_S * diamS \quad (63)$$

A ocupação total dos enrolamentos por fase ($Ocup_{TE}$) em (cm) é:

$$Ocup_{TE} = Ocup_P + Ocup_S \quad (64)$$

Contudo para estimar-se a ocupação total da janela deve-se levar em consideração além dos enrolamentos o papel isolante. São necessárias três camadas de papel isolante, uma para isolar a coluna do núcleo, outra para cobrir o enrolamento

primário e a última para cobrir o enrolamento secundário, assim a ocupação do papel ($Ocup_{PI}$) em (cm) é:

$$Ocup_{PI} = 3 * Esp_{PI} \quad (65)$$

Sendo (Esp_{PI}) é a espessura do papel isolante em (cm).

Logo a ocupação total da janela ($Ocup_{TJ}$) em (cm) é dada por:

$$Ocup_{TJ} = Ocup_{TE} + Ocup_{PI} \quad (66)$$

Além disso o espaço do comprimento (F) que sobra após o bobinamento é denominado de folga, como este é ocupado por duas fases do transformador é escrito como:

$$folga = \frac{F - 2 * Ocup_{TJ}}{2} \quad (67)$$

4.8 QUANTIDADE DE MATERIAIS

Nesta seção será calculada a quantidade de materias necessárias para construção dos transformadores propostos.

4.8.1 QUANTIDADE DE LÂMINAS

Sempre tomando como referência a figura 16, para o cálculo da quantidade de laminas é necessário o conhecimento da “profundidade” do núcleo, calculada dividindo a área (A_c) pelo comprimento (E).

$$Profund = \frac{A_c}{E} \quad (68)$$

Assim dividindo a profundidade do núcleo ($Profund$) pela espessura de uma lâmina, tem-se a quantidade de lâminas necessárias para o projeto ($Quant_{Lam}$):

$$Quant_{Lam} = \frac{Profund}{Esplam} \quad (69)$$

Na qual ($Esplam$) é a espessura de uma lâmina em (cm).

4.8.2 QUANTIDADE DE FIO CONDUTOR

Os materiais condutores, tanto o cobre quanto o alumínio são vendidos por peso, então para estimar a quantidade de condutores é necessário conhecer quanto cada fase vai pesar.

O peso total dos três primários (P_{Pt}) e três secundários (P_{St}) em (kg) para um transformador trifásico respectivamente é aqui:

$$P_{Pt} = 3 * N_p * MLT * Awpb_{novo} * P_e * 10^{-3} \quad (70)$$

$$P_{St} = 3 * N_s * MLT * Awsb_{novo} * P_e * 10^{-3} \quad (71)$$

Em que (P_e) é o peso específico do material condutor em (g/cm^3).

Somando o peso do primário e secundário tem-se o peso total do condutor (P_{TC}) em (kg) a ser usado na confecção do transformador:

$$P_{TC} = P_{Pt} + P_{St} \quad (72)$$

4.8.3 QUANTIDADE TOTAL DE MATERIAIS

Para garantir uma segurança de projeto no momento da aquisição dos materiais para confecção do transformador, aplica-se um fator de 25% na quantidade dos materiais, assim:

$$QuantSegLam = 1,25 * QuantLam \quad (73)$$

$$P_{SegP} = 1,25 * P_{Pt} \quad (74)$$

$$P_{SegS} = 1,25 * P_{St} \quad (75)$$

Sendo ($QuantSegLam$) a quantidade segura de laminas e (P_{SegP}) e (P_{SegS}) o peso total dos condutores para o primário e secundário a se adquirir no momento da confecção do projeto.

4.9 ALGORITMO DE CÁLCULO PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Nesta seção é apresentado o algoritmo utilizado para projetar os transformadores, implementado em um *software* de cálculo matemático.

PARÂMETROS

Vpl = 220;
Vol = 380;
Io = 1;
Po = Vol*Io;

```
f = 60;
rend = 0.95;
alfa = 0.05;
Bm = 1.18;
Ku = 0.4;
Tr = 30;
Kf = 4.44;
```

```
Pt = Po*((1/rend)+1);
Ke = 0.145*Kf^2*f^2*Bm^2*10^-4;
```

```
Kg = Pt/(2*Ke*alfa*100);
```

Seleção da lâmina

```
F =
E =
G =
Wtfe =
MLT =
Ac =
Wa =
Ap =
Kgnovo =
At =
```

```
Np = (Vpl*10^4)/(Kf*Bm*f*Ac);
Iplinha = Po/(3*Vpl*rend);
Ipfase = Iplinha/(3^(1/2));
Kup = 0.2;
AWPb = (Kup*Wa)/(4*Np);
```

Seleção do fio do primário

```
AWGP =
diamP =
AWPbnovo =
AWP =
microohnsorcmp =
```

```
Rp = MLT*Np*microohnsorcmp*10^-6;
Pp = 3*Ipfase^2*Rp;
Vs = Vol;
Ns = ((Np*Vol)/(Vpl))*(1+alfa);
Kus = 0.2;
Awsb = (Kus*Wa)/(4*Ns);
```

Seleção do fio do secundário

```
Awgs =
diamS =
Awsbnovo =
Aws =
```

```

microonsporcms =

Isfase = Islinha/(3^(1/2));
Ps = 3*Isfase^2*Rs;
Pcu = Pp+Ps;
alfacalculado = Pcu/Po;

K =
m =
n =
WattsporKg = K*f^m*Bm^n;
Pfe = WattsporKg*Wtfe;
Psoma = Pcu + Pfe;
rendcalc = Po/(Po+Psoma);
Pporarea = Psoma/At;
Trcalculado = 450*(Pporarea)^0.826;
KuSnovo = (4*Ns*Awsbnovo)/Wa;
KuPnovo = (4*Np*AWPbnovo)/Wa;
Kunovo = KuPnovo + KuSnovo;
Ifcp = G/diamP;
cfcp = Np/Ifcp;
Ocupp = cfcp*diamP;
Ifcs = G/diamS;
cfcs = Ns/Ifcs;
OcupS = cfcs*diamS;
OcupTE = Ocupp + OcupS;
espPI = 0.02;
OcupPI = espPI*3;
OcupTj = OcupTE + OcupPI;
folga = (F - 2*OcupTj)/2;
Esplam = 0.095;
Profund = Ac/E;
quantLam = Profund/Esplam;
quantLamSeg = quantLam + (quantLam*25)/100;
Pe = 8.93;
Ppt = 3*Np*MLT*AWPbnovo*Pe*10^(-3);
Pst = 3*Ns*MLT*Awsbnovo*Pe*10^(-3);
Ptc = Ppt + Pst;
PsegP = 1.25*Ppt;
PsegS = 1.25*Pst;

```

4.10 DIAGRAMA DE LIGAÇÕES DAS BONINAS DOS TRANSFORMADORES

As bobinas dos primários e secundários ligadas em delta são mostradas na figura 15. Em que os índices 1,2 e 3 indicam começo de bobina e os índices 4,5 e 6 indicam final de bobina.

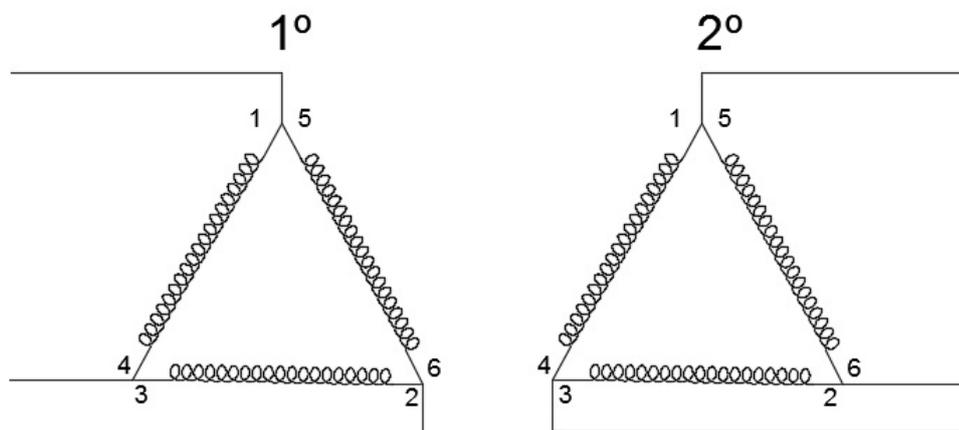


Figura 15 – Diagrama de Ligações das Bobinas dos Transformadores
Fonte: Autoria Própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram realizados dois projetos distintos de transformadores, um com enrolamentos de cobre que atingiu as metas (PCU2) e um segundo com enrolamentos de alumínio que também atingiu as metas (PAL1), inicialmente foi elaborado um projeto de transformador com enrolamentos de cobre que não atingiu as metas (PCU1).

Neste capítulo serão explanados e discutidos os resultados obtidos para os dois projetos.

5.1 PARÂMETROS

Os parâmetros utilizados para os projetos dos transformadores foram:

Tabela 2 – Parâmetros do projeto

Variável	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão no Primário	V_{pl}	220	V
Tensão no secundário	V_{ol}	380	V
Corrente de linha no secundário	I_o	1	A
Potência	P_o	380	W
Frequência	f	60	Hz
Rendimento	$Rend$	95	%
Regulação de tensão	α	5	%
Indução magnética	Bm	1,18	T
Fator de utilização da janela	K_u	40	%
Aumento de temperatura	Tr	30	°C

Os valores de indução magnética e fator de utilização da janela são dados empíricos.

Em 1,18 [T] é onde o núcleo trabalha próximo de sua saturação e sem saturar os 40% de utilização da janela é o ideal para uma boa eficiência de bobinamento.

5.2 NÚCLEO

Com o valor de Kg calculado no item 4.1, obteve-se lâminas com as seguintes dimensões:

Tabela 3 – Dimensões das lâminas comerciais escolhidas

Variável	Símbolo	PCU1	PCU2	PAL1	Unidade
$K_{gcalculado}$	–	54, 4370	54, 4370	54, 4370	Constante
K_{gnovo}	–	61, 727	187, 898	470, 453	Constante
-	F	3,048	3, 81	4, 572	cm
-	E	3,048	3, 81	4, 572	cm
-	G	7, 620	9, 525	11, 430	cm
Peso do núcleo	W_{tfe}	3, 546	6, 957	12, 017	kg
Comprimento Médio da Espira	MLT	17, 6	22	26, 3	cm
Área do Núcleo	A_c	8, 826	13, 790	19, 858	cm ²
Área da Janela	W_a	23, 23	36, 29	52, 26	cm ²
Produto das áreas A_c e W_a	A_p	307, 48	750, 68	1556, 61	cm ⁴
Área para Dissipação de Calor	A_t	725	1132	1630	cm ²

Na primeira simulação (PCU1), o valor calculado e comercial de (Kg) é praticamente igual, porém esta não apresentou resultados satisfatórios. Notou-se a necessidade de um núcleo com dimensões maiores, dessa forma, para a segunda simulação (PCU2) foi escolhido o núcleo com o próximo valor de (Kg).

Partindo da premissa que os enrolamentos de alumínio terão uma sessão maior que os de cobre, o núcleo escolhido para a terceira simulação (PCU3) deve ser maior que o da segunda.

5.3 ENROLAMENTOS

No item 3.3 determinou-se que a seção do fio de alumínio deve ser 1,66 vezes maior que a do fio de cobre.

Sendo assim o enrolamento de alumínio é determinado multiplicando a área calculada para o fio de cobre por 1,66.

Tabela 4 – Área do Fio Primário e Secundário Calculada

Enrolamento	PCU2 (cobre)	PAL1 (alumínio)	Unidade
Área calculada do Fio Primário Nú	0, 0036	0, 0059	cm ²
Área calculada do Fio Secundário Nú	0, 0020	0.0033	cm ²

O número de espiras e as dimensões dos condutores comerciais escolhidos para os enrolamentos estão apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 5 – Dimensões dos Enrolamentos

Enrolamento	PCU2 (cobre)	PAL1 (alumínio)	Unidade
Número de Espiras Primário	507,5072	352,4284	<i>Adimensional</i>
Fio Primário	21	19	<i>Adimensional</i>
Área do Fio Primário Nú	0,004116	0,006531	cm^2
Resistência do Fio Primário	418,9	1,7 * 263,9	$\frac{\mu * \Omega}{cm}$
Número de Espiras Secundário	920,4335	639,1770	<i>Adimensional</i>
Fio Secundário	24	22	<i>Adimensional</i>
Área do Fio Secundário Nú	0,002047	0,003243	cm^2
Resistência do Fio Secundário	842,1	1,7 * 531,4	$\frac{\mu * \Omega}{cm}$

A tabela completa de condutores está presente no anexo A, percebe-se que esta apresenta valores apenas para fios de cobre, porém, sabe-se que a resistência do alumínio é aproximadamente 1,7 vezes maior que a do cobre, assim, tomando o cuidado de multiplicar por 1,7 a resistência encontrada na tabela, pode-se usa-la também para o projeto com alumínio.

Devido ao número de espiras ser inversamente proporcional a área do núcleo (A_c), tendo um núcleo maior, o projeto com alumínio obteve um número menor de espiras comparado com o projeto com cobre.

5.4 COMPARATIVO DOS PARÂMETROS

Na tabela a seguir encontra-se os valores dos parâmetros usados para elaboração dos projetos e os valores obtidos após o dimensionamento do núcleo e enrolamentos:

Tabela 6 – Comparativo de Parâmetros

Parâmetros de projeto	PCU1	PCU2	PAL1
Regulação de Tensão (%)	5	5	5
Regulação de tensão calculada (%)	12,67	4,94	4,40
Fator de utilização da janela (%)	40	40	40
Fator de utilização da janela calculado (%)	47,44	43,79	33,48
Rendimento (%)	95	95	95
Rendimento Calculado (%)	88,22	94,09	93,70
Aumento de Temperatura ($^{\circ}C$)	30	30	30
Aumento de Temperatura Calculado ($^{\circ}C$)	50,0361	18,5842	14,5397

5.4.1 REGULAÇÃO DE TENSÃO

O valor de regulação de tensão esperado era de no máximo 5%. Por tanto PCU1 não atende a meta, por outro lado PCU2 e PAL1 ficaram dentro da meta com um valor de regulação de tensão um pouco inferior ao limite máximo.

5.4.2 FATOR DE UTILIZAÇÃO DA JANELA

Objetivado em 40%, tanto PCU1 quanto PCU2 extrapolaram o limite, por outro lado PAL1 se sobressai quanto a esse parâmetro.

O desvio em PCU2 é de aproximadamente 10%, porem, como este parâmetro é apenas para garantir um bom bobinamento no momento da confecção do transformador, este desvio é tolerado.

5.4.3 RENDIMENTO

Os três projetos apresentam um rendimento inferior ao desejado, no entanto, pode-se considerar que pelo rendimento de PCU2 e PAL1 serem próximos aos 95% e tratar-se de um trabalho acadêmico ambos cumprem a meta.

5.4.4 AUMENTO DE TEMPERATURA

O aumento de temperatura calculado para PCU2 e PAL1 é muito inferior ao limite máximo estabelecido, sendo assim apenas PCU1 é considerado fora de meta.

5.4.5 QUANTIDADE DE MATERIAIS

A quantidade de materiais foi calculada no item 4.8.3, apresenta os seguintes resultados:

Tabela 7 – Quantidade de Materiais

Enrolamentos	Cobre	Alumínio
Quantidade de Lâmina E	47,624	57,1499
Quantidade de Lâmina I	47,624	57,1499
Fio Primário AWG	21	19
Quantidade de fio primário (kg)	1,5389	0,6129
Fio Secundário AWG	24	22
Quantidade de fio secundário (kg)	1,3881	0,5520
Quantidade total de fio (Kg)	2,927	1,165

Uma cotação feita no Mercado livre no dia 29/03/2019, apontava que o menor preço encontrado para os fios AWG de bitola entre 1 e 30 era de 38 (R\$/kg) para alumínio e 66 (R\$/kg) para o cobre.

Assim estima-se que os gastos para confecção dos protótipos serão de R\$ 193,18 com cobre e R\$ 44,27 com alumínio.

5.4.6 DIMENSÕES DOS TRANSFORMADORES

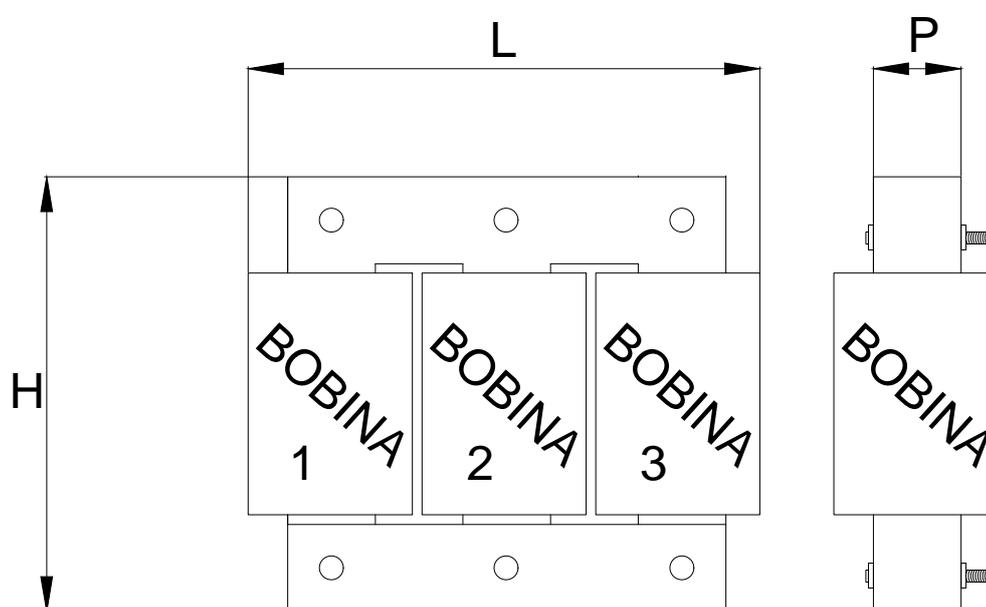


Figura 16 – Dimensões do Transformador
Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Dimensões Estimadas dos Transformadores

Dimensões	Enrolamentos de Cobre	Enrolamentos de Alumínio
H (cm)	17,14	20,57
L (cm)	20,16	23,87
P (cm)	3,81	4,72
Peso (kg)	9,88	13,18

6 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou transformadores trifásicos: Comparativo de materiais para os enrolamentos. Para esta comparação foram projetados com as mesmas especificações um transformador com enrolamentos de cobre e outro com enrolamentos de alumínio.

A primeira tentativa de projetar um transformador com enrolamentos de cobre não foi bem sucedida, pois, os parâmetros de projeto não foram atendidos. Verificou-se a necessidade de um núcleo maior e assim ajustado, o projeto seguinte atendeu as especificações requisitadas. Feita as adaptações necessárias o projeto com enrolamentos de alumínio também atingiu as metas.

Em linhas gerais o trabalho atendeu os objetivos propostos, uma vez que foi possível a comparação entre os dois materiais usados na elaboração dos projetos.

Apurados os parâmetros notou-se a equivalência de desempenho entre o cobre e o alumínio. Sendo o cobre mais caro e com quantidade prevista maior que o alumínio, do ponto de vista dos enrolamentos, para os projetos avaliados neste trabalho o alumínio é mais vantajoso para confecção de transformadores.

Para este trabalho ser realizado foi necessário conhecimento de diversas disciplinas do curso superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, principalmente as disciplinas cursadas nas ramificações das áreas de eletromagnetismo e circuitos elétricos.

Sugere-se para trabalhos futuros a confecção dos protótipos projetados neste estudo, analisando não somente o ponto de vista dos enrolamentos, mas o transformador como um todo, visto que o número de laminas necessárias para a manufatura do protótipo de alumínio é superior ao número de lâminas do protótipo de cobre.

REFERÊNCIAS

- [1] CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.
- [2] FITZGERALD, Arthur Eugene; KINGSLEY, Charles; KUSKO, Alexander. Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas. McGraw-Hill, 1975.
- [3] SANTOS, Adriano Machado dos et al. Estimação relativa de tempo de vida de transformadores de distribuição, considerando cargas não lineares. Goiás: UFG, 2014.
- [4] SALUSTIANO, Rogério. Análise técnica de transformadores para redes de média tensão. Itajuba: UNIFEI, 2012.
- [5] MARTIGNONI, Alfonso. Máquinas de corrente alternada. Editôra Globo, 1970.
- [6] MORA, Jesús Fraile. Máquinas eléctricas. McGraw-Hill, 2008.
- [7] NASAR, Syed A.; NASAR, Syed A. Máquinas Eléctricas. Schaum McGraw-Hill, CEP, v. 4533, 1932.
- [8] KOSOW, Irving L. Máquinas elétricas e transformadores. Globo, 1985.
- [9] WILLIAMSON, John. A Economia aberta ea economia mundial um texto de economia internacional. Rio de Janeiro: Campus, 1989.
- [10] MANKIW, N. Gregory. Introdução à economia. Cengage Learning, 2009.
- [11] London Metal Exchange, 2018. [Online].Avaiable: <https://www.lme.com/>. [Acessado em 15 março 2019].
- [12] MARCHESE, R. Abramo. Transformador Monofásico: Comparativo de Materiais para os Enrolamentos. Pato Branco: UTFPR, 2018.
- [13] L. BLUME. *Transformer Engineering*. Nova York: John Wileu & Sons Inc, 1938.
- [14] MCLYMAN, Colonel Wm T. Transformer and inductor design handbook. CRC press, 2016.

ANEXO A - TABELA DE FIOS DE COBRE

Esta tabela informa as características das diversas bitolas A.W.G.

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	g/ cm	Kg por Km	Resistência (ohms/Km)
0	11,86	107,2				0,158
0	10,4	85,3				0,197
0	9,226	67,43				0,252
0	8,252	53,48				0,317
1	7,348	42,41		3,75	375	1,4
2	6,544	33,63		2,95	295	1,5
3	5,827	26,67		2,37	237	1,63
4	5,189	21,15		1,88	188	0,8
5	4,621	16,77		1,49	149	1,01
6	4,115	13,3		1,18	118	1,27
7	3,665	10,55		0,94	94	1,7
8	3,264	8,36		0,74	74	2,03
9	2,906	6,63		0,589	58,9	2,56
10	2,588	5,26		0,468	46,8	3,23
11	2,305	4,17		0,321	32,1	4,07
12	2,053	3,31		0,294	29,4	5,13
13	1,828	2,63		0,233	23,3	6,49
14	1,628	2,08	5,6	0,185	18,5	8,17
15	1,45	1,65	6,4	0,147	14,7	10,3
16	1,291	1,31	7,2	0,116	11,6	12,9
17	1,15	1,04	8,4	0,0926	9,26	16,34
18	1,024	0,82	9,2	0,073	7,3	20,73
19	0,9116	0,65	10,2	0,0579	5,79	26,15
20	0,8118	0,52	11,6	0,0461	4,61	32,69
21	0,723	0,41	12,8	0,0364	3,64	41,46
22	0,6438	0,33	14,4	0,0289	2,89	51,5
23	0,5733	0,26	16	0,0229	2,29	56,4
24	0,5106	0,2	18	0,0182	1,82	85
25	0,4547	0,16	20	0,0144	1,44	106,2
26	0,4049	0,13	22,8	0,0114	1,14	130,7
27	0,3606	0,1	25,6	0,0091	0,91	170
28	0,3211	0,08	28,4	0,0072	0,72	212,5
29	0,2859	0,064	32,4	0,0057	0,57	265,6
30	0,2546	0,051	35,6	0,0045	0,45	333,3
31	0,2268	0,04	39,8	0,0036	0,36	425
32	0,2019	0,032	44,5	0,0028	0,28	531,2
33	0,1798	0,0254	56	0,0023	0,23	669,3
34	0,1601	0,0201	56	0,0018	0,18	845,8
35	0,1426	0,0159	62,3	0,0014	0,14	1069
36	0,127	0,0127	69	0,001	0,1	1338
37	0,1131	100	78	0,00089	0,089	1700
38	0,1007	0,0079	82,3	0,0007	0,07	2152
39	0,0897	0,0063	97,5	0,00056	0,056	2696
40	0,0799	0,005	111	0,00044	0,044	3400
41	711	0,004	126,8	0,00035	0,035	4250
42	0,0633	0,0032	138,9	0,00028	0,028	5312
43	0,0564	0,0025	156,4	0,00022	0,022	6800
44	0,0503	0,002	169,7	0,00018	0,018	8500