

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CAMPUS MACAÉ
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS MOURENTE TABOADA NETO

**ANÁLISE DE RESFRIAMENTO DOS ENROLAMENTOS DE UM
TRANSFORMADOR ELÉTRICO DE POTÊNCIA COM ÁGUA DEIONIZADA**

MACAÉ/RJ

2023

LUÍS MOURENTE TABOADA NETO

**ANÁLISE DE RESFRIAMENTO DOS ENROLAMENTOS DE UM
TRANSFORMADOR ELÉTRICO DE POTÊNCIA COM ÁGUA DEIONIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação submetido ao Corpo Docente da Engenharia Mecânica do Campus Macaé da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta

MACAÉ/RJ

2023

CIP - Catalogação na Publicação

T114

Taboada Neto, Luís Mourente

Análise de resfriamento dos enrolamentos de um transformador elétrico de potência com água deionizada / Luís Mourente Taboada neto - Macaé, 2023.
77 f.

Orientador(a): Diego Cunha Malagueta.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Mecânica, 2023.

1. Sistema de resfriamento. 2. Transformadores elétricos. 3. Trocador de calor.
I. Malagueta, Diego Cunha, orient. II. Título.

CDD 624

**ANÁLISE DE RESFRIAMENTO DOS ENROLAMENTOS DE UM
TRANSFORMADOR ELÉTRICO DE POTÊNCIA COM ÁGUA DEIONIZADA**

LUÍS MOURENTE TABOADA NETO

Orientador: Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta

Aprovada por:

Orientador: Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Banca: Prof. D.Sc. Marcelo Costa Cardoso
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Banca: Prof. M.Sc. Bernardo Pompermayer Eduardo
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

MACAÉ/RJ

2023

Dedico este trabalho ao meu avô
falecido, de quem carrego o nome.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Gilssara e Jaime, por terem me transmitido bons valores, e hoje o ser humano o qual me tornei se deve a eles. Espero um dia poder devolver todo o tempo, dedicação e amor que eles tiveram por mim e pela minha irmã, Nicole. Agradeço aos meus avós, Gilsen, Renato, Pilar e Luis pelo apoio e carinho.

Agradeço a meu orientador, Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta, pela paciência, dedicação e sabedoria nas aulas do Curso de Engenharia Mecânica de Macaé e como pessoa física. Sempre foi atencioso para corrigir meus erros e me ensinar. Comecei a gostar de me debruçar em livros de engenharia quando ele solicitava uma leitura de páginas do livro de máquinas térmicas antes das aulas virtuais, devido à pandemia de Coronavírus. Foi ele que abraçou minha ideia e implementou o ensino de exercícios resolvidos, publicados no YouTube, em seu projeto de extensão chamado “Energia para o Cidadão”. Com esses vídeos, comecei a estudar de maneiras diferentes, visando não só a aprender a disciplina, mas também como ensinar para os expectadores do canal “Monitoria de Engenharia”, no YouTube.

Agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Cardoso, pelas aulas ímpares de tensões e deformações e comportamento dos materiais, e por ter me aceitado no projeto de extensão “Engenheirando para o Futuro”, onde eram fabricados brinquedos de madeira com a participação de alunos da CAP UFRJ.

Agradeço ao Prof. MSc. Bernardo Pompermayer, que sempre foi muito solícito respondendo muitas das minhas perguntas na disciplina de seleção dos materiais, sempre com entusiasmo e dedicação.

Por fim, agradeço a todo Corpo Docente pelos anos em que fui aluno da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência”.

Henry Ford

RESUMO

Este trabalho apresenta o funcionamento e analisa o sistema de refrigeração de um transformador elétrico, abordando o problema da remoção das perdas elétricas dos enrolamentos de um transformador de potência. A conceituação básica para o entendimento do problema e seu equacionamento são apresentados inicialmente. O transformador analisado tem características peculiares, seu enrolamento é construído com tubos de cobre e resfriado internamente por água deionizada, incomum nesse tipo de aplicação, esse fluido é um líquido adequado ao circuito elétrico em questão. Esse transformador atípico é apresentado em detalhes. A abordagem do problema da refrigeração contém o cálculo das dimensões e perdas sob carga dos enrolamentos, com a utilização da elevação de temperatura para determinar as vazões volumétricas capazes de extrair calor das bobinas e a pressão necessária para o escoamento, nas condições pré-determinadas. São mostradas as premissas e hipóteses adotadas, bem como as condições de contorno utilizadas. Entre as diversas possibilidades, um diagrama hidráulico é proposto com o uso de colunas de alta e baixa pressão, e todas as bobinas, tanto do primário quanto do secundário estão em paralelo hidráulicamente. A água deionizada aquecida circula por um trocador de calor de tubo duplo de escoamento paralelo, ou seja, tubos concêntricos, permitindo que o calor removido dos enrolamentos do transformador seja transportado para fora do ambiente onde o equipamento está alocado, com clara vantagem na redução dos sistemas de ventilação e ar condicionado. O trabalho apresenta e analisa os resultados da metodologia de cálculo aplicada, como as diferentes pressões e vazões nas bobinas de diferentes comprimentos. As perdas sob carga do transformador analisado são da ordem de 284 kW, a vazão volumétrica total de água deionizada é da ordem de 8 m³/h, para uma elevação de temperatura, na condição nominal, de 30 °C, limitando a temperatura de saída do fluido em uma bobina a 80 °C. Conclui-se que o sistema de remoção de perdas sob carga apresentado foi efetivo.

Palavras-chave: Sistema de resfriamento, Transformadores elétricos, Trocador de calor.

ABSTRACT

This final project presents the operation and analyzes the cooling system of an electrical transformer, addressing the problem of removing electrical losses from the windings of a power transformer. The basic conceptualization for the understanding of the problem and its solution are presented initially. The analyzed transformer has peculiar characteristics, its winding is built with copper tubes and internally cooled by unusual in this type of application, deionized water, which is a suitable liquid for the electrical circuit in question. This atypical transformer is presented in detail. The approach to the refrigeration problem contains the calculation of the dimensions and losses under load of the windings, using the temperature rise to determine the volumetric flows capable of extracting heat from the coils and the necessary pressure for the flow, in the predetermined conditions. The assumptions and hypotheses adopted are shown, as well as the boundary conditions used. Among the various possibilities, a hydraulic diagram is proposed with the use of high and low pressure columns, and all coils, both primary and secondaries are hydraulically parallel. The heated deionized water circulates through a parallel flow double tube heat exchanger, that is, concentric tubes, allowing the heat removed from the transformer windings to be transported outside the environment where the equipments are located, with a clear advantage in reducing the ventilation and air conditioning systems. The work presents and analyzes the results of the applied calculation methodology, such as different pressures and flows in coils of different lengths. The losses under load of the analyzed transformer are of the order of 284 kW, the total volumetric flow of deionized water is of the order of 8 m³/h, for a temperature rise, in the nominal condition, of 30 °C, limiting the temperature fluid outlet in a coil at 80°C. It is concluded that the load loss removal system presented was effective.

Keywords: Cooling system, Electric transformers, Heat exchanger.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Transformador monofásico | 16 |
| Figura 2 – Transformador trifásico | 17 |
| Figura 3 - Transformador do tipo seco e do tipo imerso em líquido | 17 |
| Figura 4 - Lei de Faraday | 18 |
| Figura 5 - Conexão estrela..... | 19 |
| Figura 6 - Conexão delta-estendido..... | 19 |
| Figura 7 - Exemplo de conexão estrela e delta em um núcleo de três pernas | 20 |
| Figura 8 - Modelo de um transformador real (uma fase) | 21 |
| Figura 9 - Vida útil do material isolante elétrico em função da temperatura. | 23 |
| Figura 10 - Deionização da água | 25 |
| Figura 11 - Seção transversal da parede do tubo da bobina | 28 |
| Figura 12 – Conexão estrela do primário | 30 |
| Figura 13 - Tensão fase-fase, tensão fase-neutro e defasagem entre as tensões..... | 30 |
| Figura 14 - Curvas de magnetização de diferentes materiais | 37 |
| Figura 15 - Fase-neutro | 38 |
| Figura 16 - Conexão delta-estendido..... | 43 |
| Figura 17 - Ângulo de fase da conexão de delta-estendido..... | 43 |
| Figura 18 - Trocador de calor tubular da Tetra Pak..... | 54 |
| Figura 19 – Diagrama hidráulico do sistema de resfriamento dos enrolamentos | 70 |
| Figura 20 – Distribuição de temperaturas no trocador de calor CD129 (bobinas de cobre 12 x 1 mm) | 71 |
| Figura 21 – Distribuição de temperaturas no trocador de calor CD129 (bobinas de cobre 14 x 2 mm) | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Classes de temperatura do material isolante elétrico em função de normas técnicas IEC e certificação de produtos UL. | 22 |
| Tabela 2 - Comparação entre destilação e deionização | 25 |
| Tabela 3 - Dados de entrada do transformador | 27 |
| Tabela 4 - Dados referentes às bobinas de cobre | 27 |
| Tabela 5 -Dimensões do trocador de calor CD129 | 54 |
| Tabela 6 - Tensões dos trechos S e L para as fases das conexões dos secundários | 63 |
| Tabela 7 - Cálculo de resistência elétrica e número de espiras de bobinas dos secundários ... | 64 |
| Tabela 8 - Volumes de diferentes bobinas dos secundários | 64 |
| Tabela 9 – Resultados de perdas sob carga dos secundários | 65 |
| Tabela 10 – Vazões mássicas e vazões volumétricas dos secundários do transformador | 65 |
| Tabela 11 – Resultados de vazões e pressões para uma bobina de cada secundário | 66 |
| Tabela 12 - Principais resultados do esquema hidráulico | 67 |
| Tabela 13 – Valores de referência do coeficiente global de transferência de calor para diferentes combinações de fluidos..... | 68 |
| Tabela 14 – Comparação de desempenho para bobinas de diferentes tubos de cobre..... | 70 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO | 13 |
| 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA | 14 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 14 |
| 1.4 OBJETIVO | 15 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 CONCEITOS BÁSICOS | 16 |
| 2.1.1 Funcionamento do transformador..... | 18 |
| 2.1.1.2 Primário: conexão estrela | 19 |
| 2.1.1.3 Secundários: conexão delta-estendido..... | 19 |
| 2.1.1.4 Transformador ideal..... | 20 |
| 2.1.1.5 Perdas do transformador | 21 |
| 2.1.1.6 Vida útil do isolamento elétrico..... | 22 |
| 2.2 FLUIDO DE RESFRIAMENTO..... | 24 |
| 3 TRANSFORMADOR SOB ANÁLISE | 26 |
| 3.1 TRANSFORMADOR ESPECIAL | 26 |
| 3.2 DADOS DO TRANSFORMADOR SOB ANÁLISE | 27 |
| 4 METODOLOGIA | 29 |
| 4.1 HIPÓTESES E PREMISSAS | 29 |
| 4.2 CÁLCULO DA VAZÃO EM UMA BOBINA DO PRIMÁRIO | 29 |
| 4.3 CÁLCULO DA VAZÃO EM UMA BOBINA DO SECUNDÁRIO..... | 42 |
| 4.4 PERDA DE CARGA EM UMA BOBINA DO PRIMÁRIO | 49 |
| 4.5 PERDA DE CARGA EM UMA BOBINA DO SECUNDÁRIO | 51 |
| 4.6 TROCADOR DE CALOR DO SISTEMA | 53 |

| | |
|---|-----------|
| 4.7 PERDA DE CARGA NO TUBO INTERNO DO TROCADOR DE CALOR | 61 |
| 5 RESULTADOS | 63 |
| 5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS | 63 |
| 5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE | 70 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 72 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |

1 INTRODUÇÃO

Esta parte do trabalho introduz o problema da remoção das perdas sob carga de um transformador elétrico de potência, apresentando a contextualização do problema, problema de pesquisa, justificativa e seus objetivos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os transformadores elétricos são equipamentos necessários para adequar o nível de tensão elétrica à potência elétrica de uma determinada parte de um sistema elétrico ou de uma aplicação. Estes equipamentos, naturalmente, apresentam perdas, na forma de calor, que são transferidas para o ambiente onde são instalados (BRASFAIBER, 2023). Tais perdas devem ser removidas das salas de transformadores ou de painéis elétricos, conforme a aplicação. A remoção das perdas nestas salas é feita através de sistemas de Ventilação e Ar Condicionado, conhecido como sistema de VAC (BRASFAIBER, 2023). As perdas afetam o projeto do transformador no que diz respeito aos materiais empregados, as dimensões do equipamento, sua vida útil, e a forma como o calor é removido. Tipicamente, os transformadores de potência são do tipo imerso em líquido ou do tipo seco (HITACHI, 2023), em ambos os casos, o calor dissipado durante seu funcionamento é trocado com o ambiente ao seu redor, repercutindo diretamente no sistema de VAC para aplicações em salas fechadas. Em situações específicas em que o espaço é muito reduzido, ou seja, é muito caro, por exemplo, em instalações em unidades como plataformas marítimas de produção de petróleo, a otimização das dimensões do transformador e da retirada do calor do ambiente de instalação é economicamente vantajosa. Neste cenário, cabe destacar soluções nas quais o calor é removido do transformador e transferida para o ambiente fora da sala do equipamento, reduzindo temperaturas de operação do equipamento, com isto, maior vida útil, reduzindo ainda suas dimensões e o sistema de VAC, obtendo custo mais reduzido. Um sistema acoplado o transformador elétrico a um trocador de calor, seja do tipo ar-água ou água-água, pode reduzir as perdas na forma de calor que são despejadas na sala que contém esses equipamentos.

Normalmente, existem dois tipos de transformadores de potência elétrica: O tipo seco, que não envolve líquido ou óleo na sua refrigeração, e o tipo imerso em líquido, que é resfriado por óleo ou líquido dielétrico (HITACHI, 2023). Este trabalho aborda um transformador elétrico

resfriado a água deionizada, que trabalha em conjunto com um trocador de calor de escoamento paralelo de combinação água-água.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Projetar um transformador de potência elétrica pode ser desafiador, existem diversos aspectos que devem ser considerados e abordados, constituindo um assunto multidisciplinar de engenharia mecânica, eletromagnetismo, elétrica e eletrônica: elementos de circuitos, fenômenos de transporte, mecânica dos fluidos, ciência dos materiais e transferência de calor. Apesar de serem disciplinas diferentes, elas se conversam e convergem para o tema proposto neste trabalho, é função de um engenheiro saber unir os aspectos teóricos das diversas disciplinas para uma aplicação, que consiste em calcular perdas sob carga de um transformador de potência e aplicar trocadores de calor ao problema proposto.

1.3 JUSTIFICATIVA

A refrigeração de um transformador através de um fluido de resfriamento permite conduzir o calor proveniente de suas perdas para um ambiente externo em relação ao local de instalação, reduzindo o sistema de VAC local. Reduzindo o sistema de VAC, obtém-se vantagem econômica em projetos que usam esta alternativa.

A tecnologia de um transformador de potência elétrica mais compacto, que usa um fluido de refrigeração em bobinas tubulares para extrair o calor do enrolamento já é existente. Devido à crescente utilização em relação a aerogeradores e sistemas de painéis fotovoltaicos, cabe mostrar o funcionamento básico de um transformador, o primário e o secundário do transformador, a necessidade da vazão da bomba ao fluido de resfriamento para diminuir a temperatura das bobinas do circuito do transformador, e o uso de um trocador de calor para captar o fluido aquecido, diminuindo sua temperatura e retorná-lo para o ciclo de resfriamento.

Devido a uma maior demanda mundial por sustentabilidade, essa tecnologia de transformador elétrico pode ser cada vez mais conhecida por pessoas que trabalham na geração de energia elétrica, especificamente a usina solar, ou usina central fotovoltaica, que serve para a produção e venda de energia elétrica para centros urbanos.

1.4 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é apresentar o funcionamento e analisar o sistema de refrigeração de um transformador elétrico, abordando o problema da remoção das perdas elétricas dos enrolamentos de um transformador elétrico de potência. De forma específica, são calculadas as perdas sob carga e a sua remoção através de um fluido não condutor de eletricidade, a água deionizada. Além disso, apresenta uma revisão dos conceitos de transferência de calor por condução e convecção, necessárias para modelar as trocas térmicas nos enrolamentos do transformador. A partir do funcionamento de um transformador elétrico de potência, é feito o dimensionamento do sistema de remoção de perdas, para tal, é necessário estimar as perdas associadas à condução de corrente elétrica nos tubos de cobre utilizados no transformador, considerando o número de bobinas necessárias tanto para o primário quanto para os secundários do transformador em análise, a perda de carga e a variação de pressão com a passagem do fluido nas bobinas do primário e dos secundários, dimensionar o trocador de calor adequado ao sistema e analisar os resultados obtidos e as possíveis alternativas de dimensionamento. Não faz parte dos objetivos deste trabalho analisar a remoção das perdas do núcleo do transformador.

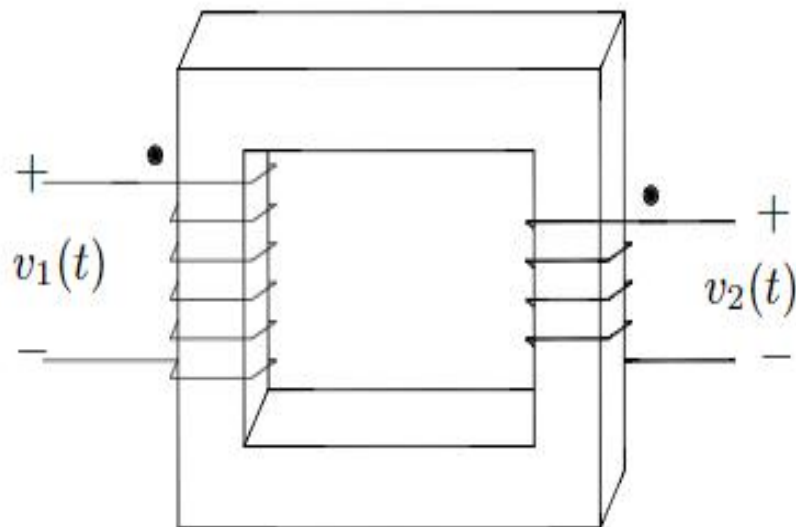
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica busca rever conceitos básicos de um transformador, seu funcionamento, a conexão estrela do primário, as conexões de delta-estendido dos secundários, o transformador ideal, e o transformador real incluindo perdas.

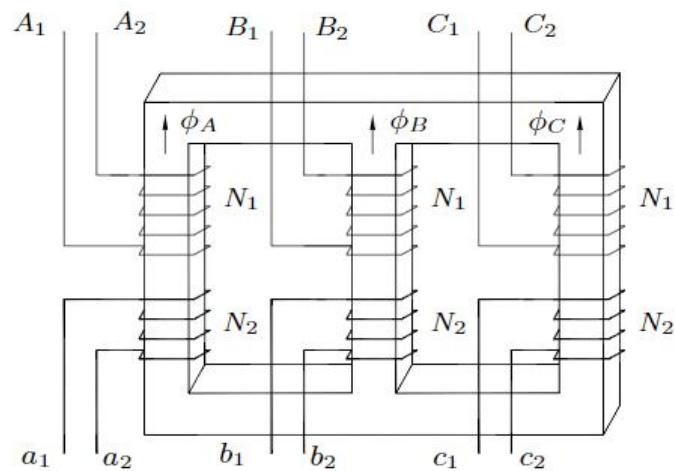
2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Segundo Bim (2014, p. 67) “O transformador monofásico é um dispositivo elétrico que converte tensão e, conseqüentemente, corrente, através de dois enrolamentos montados em um núcleo magnético fechado.”. Na Figura 1, é mostrado um transformador monofásico ideal, e a Figura 2 mostra um transformador trifásico ideal.

Figura 1 - Transformador monofásico.

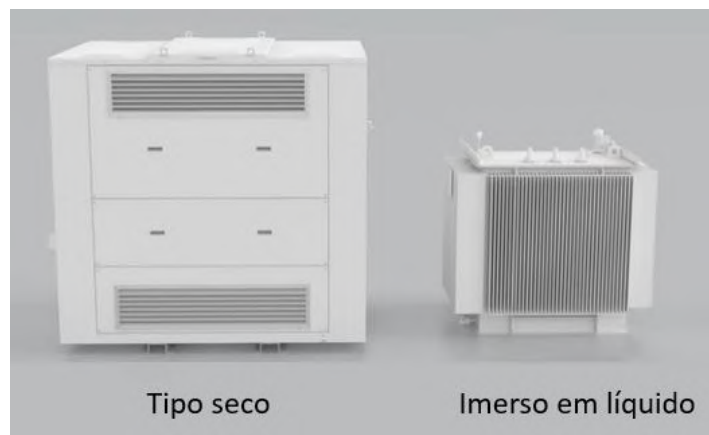


Fonte: (BIM, 2014)

Figura 2 - Transformador trifásico.

Fonte: (BIM, 2014)

A Figura 3 mostra os dois tipos de transformadores mais comuns utilizados na indústria, que são: o transformador do tipo seco e o transformador do tipo imerso em líquido.

Figura 3 - Transformador do tipo seco e do tipo imerso em líquido.

Fonte: Traduzido de (HITACHI, 2023)

O transformador do tipo seco usa dutos de ar para ajudar a extrair o calor do transformador, as perdas de potência elétrica se transformam em perdas na forma de calor. Ele é mais seguro contra incêndios, mais seguro para o meio ambiente, o custo total de instalação é menor se comparado ao transformador imerso em líquido e possui um menor custo de manutenção (HITACHI, 2023). Contudo, ele tem a desvantagem de ocupar mais espaço e ter um maior peso total, o que dificulta sua mobilidade.

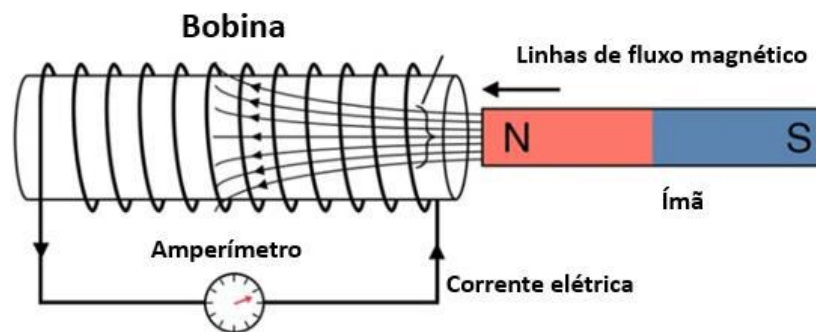
O transformador imerso em líquido ocupa menos espaço e pesa menos, se comparado com o transformador do tipo seco, seu custo inicial é menor, sua eficiência é maior e ele produz

menos ruído em operação (HITACHI, 2023). Porém, esse transformador possui mais riscos de incêndio por conta de ele poder estar imerso em óleo, que é inflamável.

2.1.1 Funcionamento do transformador

Primeiramente, tem-se a necessidade de mostrar conceitos de eletromagnetismo para ter o entendimento do funcionamento de um transformador. Utilizando a Lei de *Faraday*, que é a equação (1) (CHAPMAN, 2013), para explicar, tem-se uma bobina num circuito elétrico, e essa bobina possui espiras, que significa o número de voltas da bobina. Havendo um fluxo magnético variando com o tempo que passa no meio das espiras, tem-se uma força eletromotriz no circuito, que também é chamado de tensão induzida. A Figura 4 entrega um melhor entendimento visual do processo.

Figura 4 – Lei de Faraday.



Fonte: Adaptado e traduzido de (SCIENCE.NET, 2023)

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Em que:

ε é a força eletromotriz, a tensão induzida, em volts (V).

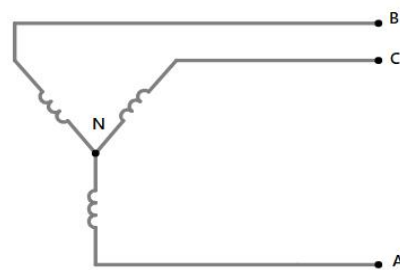
N é o número de espiras da bobina.

$\frac{d\phi}{dt}$ é a variação instantânea do fluxo magnético pelo tempo, em volts [V].

2.1.1.2 Primário: conexão estrela

O primário do transformador elétrico deste trabalho possui uma conexão estrela, mostrada na Figura 5, também pode ser chamada de conexão em Y. Essa conexão possui três terminais, em que a tensão em dois desses terminais é chamada de tensão fase-fase. Essa conexão também possui um neutro, em que a tensão de qualquer terminal até o neutro é chamada de tensão fase-neutro. Maiores detalhes serão mostrados posteriormente. As bobinas, com suas espiras, ficam alocadas no circuito, entre o neutro até os terminais. Os terminais podem ser denominados, por exemplo, A, B e C

Figura 5 - Conexão estrela

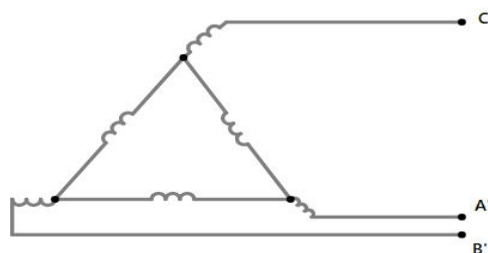


Fonte: Elaboração Própria

2.1.1.3 Secundários: conexão delta-estendido

Os secundários do transformador elétrico deste trabalho possuem conexões de delta-estendido, mostrada na Figura 6. Enquanto o primário possui uma conexão estrela em seu todo, os 18 secundários do transformador possuem conexões de delta-estendido, em diferentes fases. Assim como a conexão estrela, a conexão de delta-estendido possui três terminais, contudo não tem o neutro.

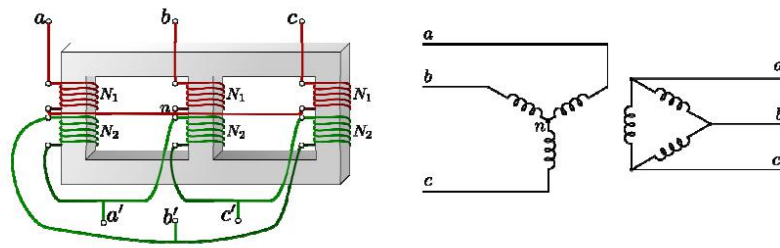
Figura 6 - Conexão delta-estendido



Fonte: Elaboração Própria

Para um melhor entendimento, a Figura 7 mostra um transformador trifásico, o enrolamento do primário possui uma conexão estrela, e uma conexão delta no secundário, salientando que o transformador deste estudo possui dezoito conexões de delta-estendido no secundário, a Figura 7 é apenas uma ilustração simplificada. O transformador elétrico trifásico possui um núcleo de três pernas.

Figura 7 - Exemplo de conexão estrela e delta em um núcleo de três pernas



Fonte: (EDISCIPLINAS.USP, 2023)

2.1.1.4 Transformador ideal

Num transformador monofásico ideal, como o da Figura 1, não haveriam perdas elétricas nos enrolamentos e no núcleo, a potência de entrada é a mesma potência de saída. Suponha que, na entrada, tenha uma tensão v_1 e que a bobina tenha N_1 espiras no lado esquerdo do transformador da Figura 1. Suponha também que, na saída, haja uma tensão v_2 e que a bobina tenha N_2 espiras no lado direito desse mesmo transformador. Seguem as equações (2-3) (BIM, 2014).

$$v_1 = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$v_2 = -N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

Pontuando que, por ser um transformador ideal, a taxa de variação de campo magnético que passa pela bobina da esquerda é a mesma que passa pela bobina da direita.

Dividindo a equação (2) pela equação (3), tem-se a equação (4) (BIM, 2014):

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

A equação (4) mostra que, se o número de espiras N_2 for maior que o número de espiras N_1 , a tensão v_2 vai aumentar. Se o número de espiras N_2 for menor que o número de espiras N_1 , a tensão v_2 vai diminuir. E se o número de espiras N_2 for igual ao número de espiras N_1 , a tensão v_2 vai se manter a mesma. O exemplo mais simples de um transformador monofásico ideal foi utilizado para mostrar como funciona a relação entre a tensão e o número de espiras da bobina de um transformador, a equação 4 é conhecida como a equação do transformador, para o caso de transformadores ideais (LIBRETEXTS, 2023).

2.1.1.5 Perdas do transformador

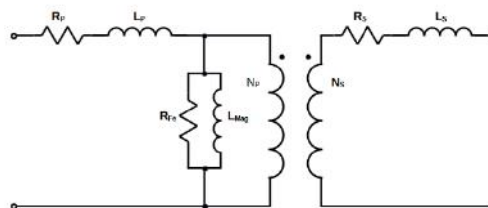
Em um circuito elétrico de um transformador de potência, existem algumas perdas, as perdas a vazio são as perdas elétricas que se transformam em calor no núcleo do transformador, elas ocorrem quando o transformador é energizado, mas não há carga no secundário. As perdas sob carga ocorrem se houver tensão e corrente nos dois lados do transformador monofásico ou nas 3 colunas do transformador trifásico. Alguns tipos de perdas elétricas são:

1. **Perdas no cobre (I^2R).** As perdas no cobre são as perdas devido ao aquecimento resistivo nos enrolamentos primário e secundário do transformador. Elas são proporcionais ao quadrado da corrente nos enrolamentos.
2. **Perdas por corrente parasita.** As perdas por corrente parasita são perdas devidas ao aquecimento resistivo no núcleo do transformador. Elas são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada ao transformador.
3. **Perdas por histerese.** As perdas por histerese estão associadas à alteração da configuração dos domínios magnéticos no núcleo durante cada semiciclo, ..., Elas são uma função não linear, complexa, da tensão aplicada ao transformador. (CHAPMAN, 2013, p.86).

Conceitos aprofundados sobre transformador e seu projeto podem ser encontrados em (MARTIGNONI, 1983).

O circuito da Figura 8 representa o modelo de um transformador real onde as perdas no primário estão associadas a R_P , no secundário a R_S e no núcleo a R_{Fe} .

Figura 8 – Modelo de um transformador real (uma fase).



Fonte: Adaptado de (CHAPMAN, 2013).

2.1.1.6 Vida útil do isolamento elétrico

Os materiais isolantes tipicamente utilizados em equipamentos elétricos possuem classes térmicas. As classes térmicas dos materiais isolantes elétricos estão associadas à vida útil que determinado material isolante possui quando submetido a uma determinada temperatura. A primeira coluna da Tabela 1 mostra a temperatura de referência, e as colunas 2 e 3 mostram as classes dos materiais isolantes elétricos. Na equação (5), adaptada de (CHAPMAN, 2013), considerando um material de classe F, por exemplo, com temperatura de referência de 155 °C, a temperatura do material de 155 °C e uma temperatura característica de 10 °C, a vida útil desse material é de 20 mil horas e para cada 10 °C de elevação, ou de redução da temperatura do material isolante, a vida útil reduz à metade ou dobra, respectivamente.

Tabela 1 - Classes de temperatura do material isolante elétrico em função de normas técnicas IEC e certificação de produtos UL.

| Classes de Temperatura do Isolante Elétrico | | |
|--|------------------|----------------|
| Temperatura (°C) | IEC 60085 | UL 1446 |
| 90 | Y | - |
| 105 | A | - |
| 120 | E | 120 (E) |
| 130 | B | 130 (B) |
| 155 | F | 155 (F) |
| 180 | H | 180 (H) |
| 200 | N | 200 (N) |
| 220 | R | 220 (R) |
| 240 | - | 240 (S) |
| Acima de 240 | - | Acima de 240 |
| 250 | 250 | - |

Fonte: (ILTEC, 2015)

Conforme a equação (5), a vida útil de isolante varia exponencialmente com a diferença de temperatura em relação à sua classe de temperatura (CHAPMAN, 2013). Por isso, é

necessário manter a temperatura em um valor que permita o material atingir uma vida útil de projeto coerente com o desejado, por exemplo, da ordem de 20 anos. A Figura 9 mostra a vida útil do material isolante elétrico em função da temperatura por classe de temperatura.

$$Vida\ Útil_{isol} = 20.000 \cdot 2^{(\theta_{ref} - \theta_{isol}) / \theta_{caract}} \quad (5)$$

Em que:

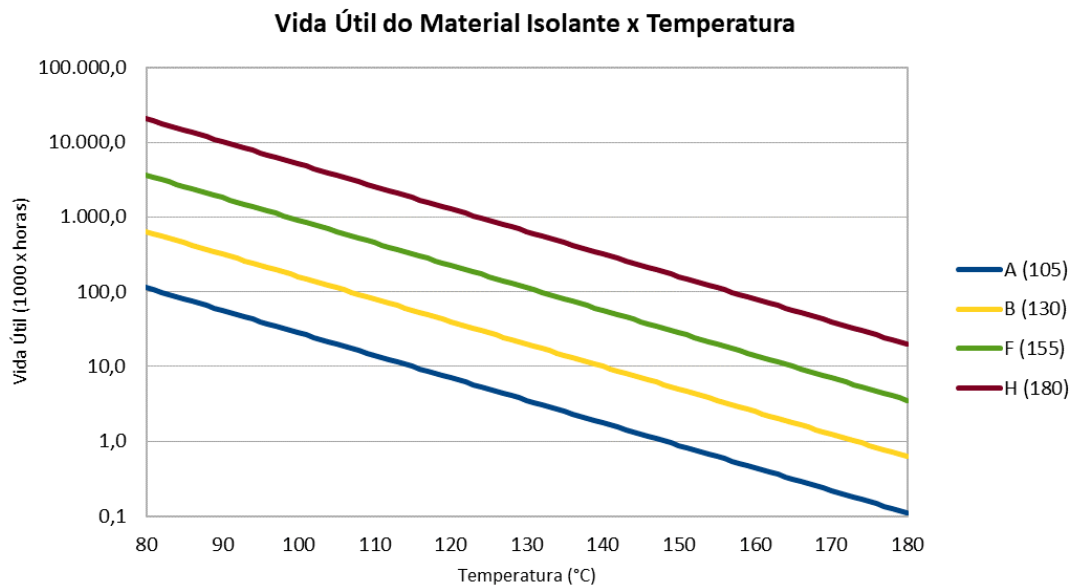
Vida Útil_{isol} é a vida útil do isolante elétrico em função da temperatura. A unidade é hora [h].

θ_{isol} é a temperatura de operação contínua do material isolante. A unidade é graus Celsius [°C].

θ_{caract} é a diferença de temperatura característica que faz a vida útil dobrar ou cair à metade. Em graus Celsius [°C]. Usado tipicamente valores da ordem de 10 °C.

θ_{ref} é a temperatura de referência de uma determinada classe de temperatura do material isolante, em graus Celsius [°C].

Figura 9 – Vida útil do material isolante elétrico em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de (CHAPMAN, 2013).

2.2 FLUIDO DE RESFRIAMENTO

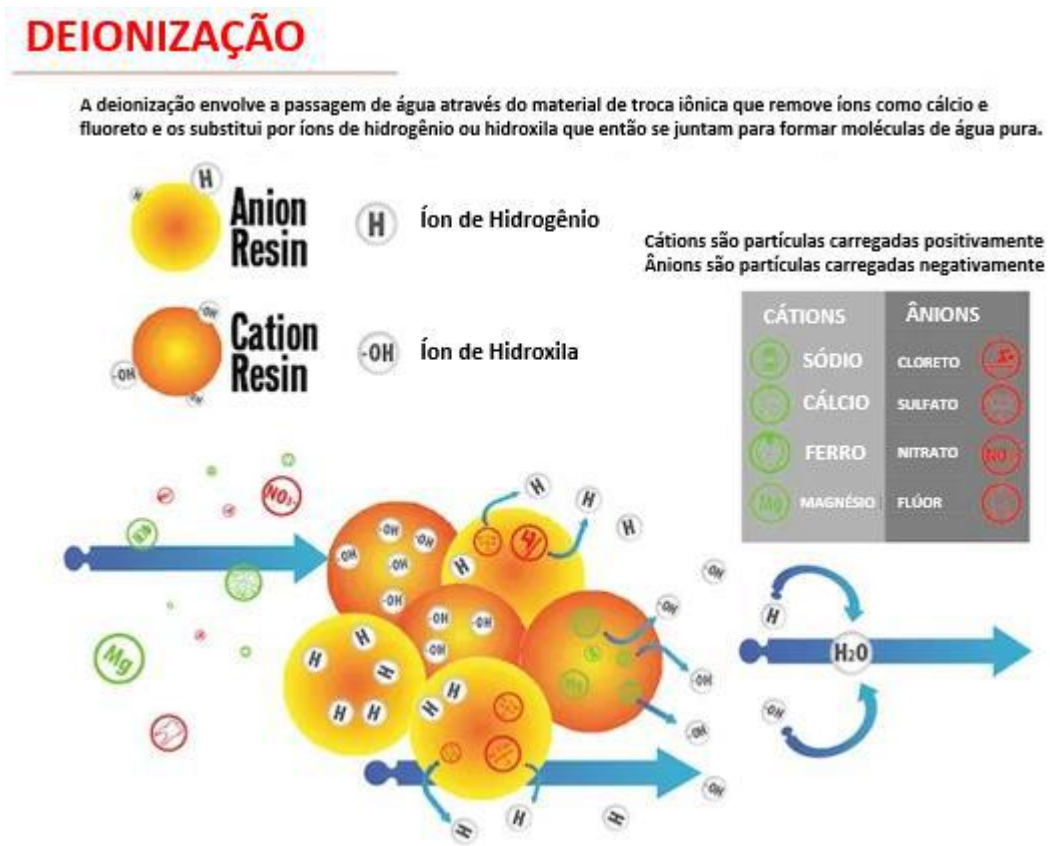
O fluido de resfriamento tem como função principal entrar num sistema para trocar calor e, ao extrair esse calor, diminuir a temperatura desse sistema. É comumente usado em casos em que uma alta temperatura danifica ou afeta o sistema. No caso do transformador, um enrolamento com uma alta temperatura diminui a vida útil de matérias que servem como isolante térmico, em alguns transformadores, as colunas do núcleo são envolvidas por material isolante que impede o contato direto entre o núcleo e o enrolamento do tubo de cobre. O fluido de resfriamento passa por dentro do tubo da bobina. A bobina é vazada para que o fluido possa extrair calor e diminuir a temperatura dessa bobina. Não é função do fluido de resfriamento extrair calor do núcleo do transformador elétrico neste trabalho.

Os fluidos de resfriamento mais comuns de serem utilizados em transformadores são a água deionizada, o glicol e, em outros tipos de transformadores, óleos, como o óleo mineral, fluido de silicone e óleo vegetal. Este trabalho está focado em analisar a água deionizada como o fluido de resfriamento

O fluido de resfriamento analisado é a água deionizada. O processo de deionização da água é diferente do processo de destilação da água. A destilação da água, basicamente, propõe aquecer a água até seu ponto de vaporização (100°C na pressão atmosférica), e condensar esse vapor num outro recipiente, separando a água de impurezas que tenham um ponto de ebulição a uma temperatura maior do que a da água (NACIENTÍFICO, 2023).

No sistema do transformador, o fluido de resfriamento precisa ser inerte ao circuito elétrico, porque ele não tem a função de participar do sistema elétrico, apenas extrair calor do tubo de cobre. A água não pode ter íons disponíveis para que não haja passagem de corrente elétrica. Por isso, é usado o método da deionização da água, que consiste na utilização de resinas de troca iônica que tem o objetivo de remover ânions e cátions presentes na água. Existem resinas de troca catiônica (H^+) e de troca aniônica (OH^-). Elas podem ser chamadas de micro esferas, quando entram em contato com a água, liberam íons H^+ e OH^- , e, com essa liberação, esses íons interagem com íons de cálcio Ca_2^+ e magnésio Mg_2^+ , removendo os cátions e ânions da água, ou seja, os íons disponíveis no meio (NACIENTÍFICO, 2023). O processo de destilação da água também consegue remover os ânions e cátions da água, porém o processo é considerado mais custoso economicamente. A Figura 10 mostra as resinas de troca catiônica e aniônica. A tabela 2 mostra uma comparação entre os processos de deionização e destilação.

Figura 10 - Deionização da água



Fonte: Traduzido de (NACIENTÍFICO, 2023)

Tabela 2 - Comparação entre destilação e deionização

| | Ca ++, Mg++ | Sulfato | NaCl | Impurezas físicas, partículas suspensas | Material orgânico | Bactérias, vírus |
|--------------------|----------------|--------------|--------------|--|----------------------|---------------------|
| Destilação | Muito eficaz | Muito eficaz | Muito eficaz | Muito eficaz | Efetivo | Muito eficaz |
| Deionização | Muito eficaz | Muito eficaz | Muito eficaz | Não eficaz | Não eficaz | Não eficaz |

Fonte: (NACIENTÍFICO, 2021)

3 TRANSFORMADOR SOB ANÁLISE

O transformador que será analisado neste projeto combina as vantagens da tecnologia de resfriamento a seco e a líquido.

O transformador possui um mecanismo de resfriamento avançado, pois possui um líquido de resfriamento que circula no interior das bobinas, que extrai suas perdas elétricas em forma de calor, e conduz esse calor até um trocador de calor externo (HITACHI, 2023).

O transformador com esse sistema é mais leve, possui uma vantagem na sua aplicação na geração de energia eólica. Geralmente, os transformadores do setor de energia eólica ficam no piso do aerogerador, ou dentro das plataformas da turbina devido ao seu maior tamanho. Tal transformador oferece uma maior facilidade na logística, na sua otimização e na redução de custos de instalação (HITACHI, 2023).

O transformador analisado neste trabalho pode ser encontrado no mercado como componente de equipamentos chamados conversores de frequência (SIEMENS, 2022), também conhecidos como *Variable Speed Drives* (VSD), tipicamente empregado para controlar a rotação de motores que acionam bombas ou compressores em plantas terrestres ou em plataformas *offshore*. Transformadores refrigerados a água deionizada podem ser encontrados em (NWL, 2023).

3.1 TRANSFORMADOR ESPECIAL

O transformador elétrico de potência sob análise é especial, se comparado a transformadores típicos de aplicação industrial no seguinte sentido:

- Possui múltiplos secundários, quando tipicamente, o comum é que transformador possua um secundário, eventualmente dois secundários.
- Os secundários são defasados do primário e entre si de ângulos diferente dos ângulos típicos de 0° e $\pm 30^\circ$.
- Os enrolamentos do transformador, primário e secundários, são construídos por tubos de cobre com exterior isolado eletricamente. No interior do tubo circula água deionizada. Tipicamente, os transformadores são secos e a região externa do enrolamento fica em contato com o ar e o calor sai do transformador através da circulação natural ou forçada do ar, ou são imersos em líquido isolante e a remoção do calor se dá por convecção natural ou forçada do líquido isolante através de radiadores em contato com o ar do ambiente externo.

3.2 DADOS DO TRANSFORMADOR SOB ANÁLISE

Na tabela 3, tem-se os dados da parte elétrica do transformador trifásico sob análise, com valores para o primário e os secundários.

Tabela 3 - Dados de entrada do transformador

| DADO | VALOR | UNIDADE |
|---|--------------|----------------|
| Potência nominal (primário) | 18.000 | kVA |
| Potência nominal (secundários) | 1.000 | kVA |
| Tensão nominal (primário – fase-fase) | 13.800 | V |
| Tensão nominal (primário – fase-neutro) | 7.967 | V |
| Tensão nominal (secundários – fase-fase) | 690 | V |

Fonte: Elaboração própria.

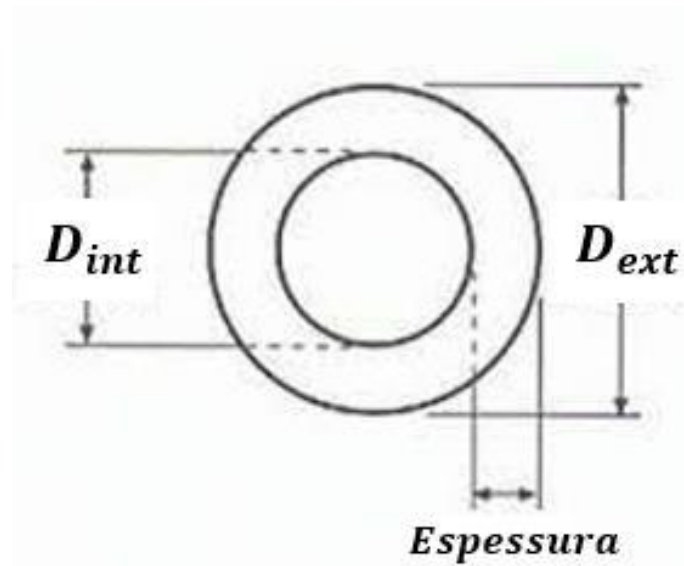
Na Tabela 4, tem-se dados referentes aos tubos e as bobinas para os cálculos da transferência de calor do transformador trifásico sob análise. O número de espiras em cada bobina significa o número de voltas em cada bobina do transformador. É importante ressaltar que o tubo da bobina tem formato cilíndrico, sendo vazado para a passagem do fluido de resfriamento, que a priori é a água deionizada. A Figura 11 mostra como é a área da seção transversal de cobre do tubo da bobina.

Tabela 4 - Dados referentes às bobinas de cobre

| DADO | VALOR | UNIDADE |
|--|---------------------|------------------|
| Diâmetro externo do tubo da bobina (Tabelado) | 12 | mm |
| Diâmetro interno do tubo da bobina (Tabelado) | 10 | mm |
| Espiras por bobina do primário | 35 | Espiras |
| Resistividade do cobre à 20°C | $1,7 \cdot 10^{-8}$ | Ωm |
| Condutividade térmica (k) do cobre à 20°C | 398 | $\frac{W}{mK}$ |

Fonte: Elaboração própria; diâmetros do tubo de cobre: (SCTUBES, 2023)

Figura 11 – Seção transversal da parede do tubo da bobina



Fonte: Traduzido de (QUORA, 2023)

Observa-se na Figura 11, o diâmetro interno do tubo, o diâmetro externo do tubo e a espessura do tubo. Para o cálculo da resistência elétrica de um tubo, a área da seção transversal é a diferença da área do círculo do diâmetro externo do tubo com a área do círculo do diâmetro interno do tubo, pois é onde ocorre a condução de corrente elétrica pelo material, no caso, o cobre, neste estudo. E o volume é calculado pelo produto da área da seção transversal do cobre pelo comprimento do tubo. Quanto maior for a resistência elétrica, maior será a dificuldade para a passagem de corrente elétrica no material, aumentando as perdas sob carga no enrolamento de cobre, sendo que a perda no cobre é o produto da corrente elétrica ao quadrado pela resistência elétrica (CHAPMAN, 2013).

4 METODOLOGIA

Nesta seção, são apresentadas: as hipóteses e premissas adotadas, o cálculo da vazão no primário e nos secundários, o cálculo da perda de carga e os cálculos referentes ao trocador de calor.

4.1 HIPÓTESES E PREMISSAS

As hipóteses e premissas que serão levadas em conta para os cálculos das perdas de potência elétrica que estão localizadas nas bobinas de cobre e que a água deionizada vai extrair para diminuir a temperatura dessas bobinas do transformador em estudo estão listadas a seguir:

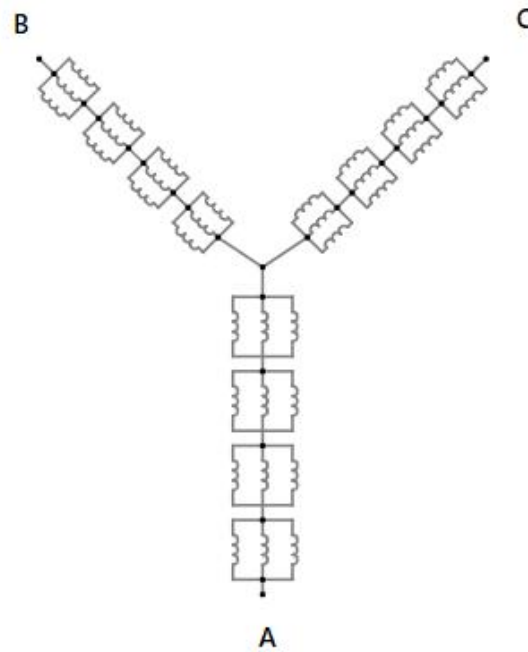
- 1°. Condições de regime estacionário:
 - a) Regime completamente estabelecido, não há variação de temperatura com o tempo.
 - b) Energia térmica gerada é constante na condição de carga nominal.
- 2°. Transferência de calor unidimensional na direção radial:
 - a) Superfícies de casca cilíndrica representam isotermas, ou seja, a temperatura não varia na direção axial, ao longo do cilindro.
- 3°. Resistência térmica na parede do tubo desprezível nas bobinas de cobre dos enrolamentos.
- 4°. A troca térmica por radiação entre a superfície externa e a vizinhança é desprezível.
- 5°. O fluxo térmico na superfície interna do tubo é constante.
- 6°. O fluxo térmico na superfície externa do tubo é adiabático, ou seja, a superfície externa não troca calor com o meio externo, pois tem um isolamento perfeito e, conseqüentemente, todo o calor gerado internamente no tubo é transferido para o fluido de resfriamento, que no caso é a água deionizada.
- 7°. O escoamento está plenamente desenvolvido.
- 8°. Existe um material isolante térmico entre o núcleo e os enrolamentos do transformador.

4.2 CÁLCULO DA VAZÃO EM UMA BOBINA DO PRIMÁRIO

No transformador, analisando a parte elétrica do primário, ela é constituída por uma conexão do tipo estrela (Figura 12). Essa conexão possui 3 terminais, chamados de A, B e C. E a tensão entre esses terminais é chamada de tensão fase-fase (Figura 13). A tensão fase-fase é

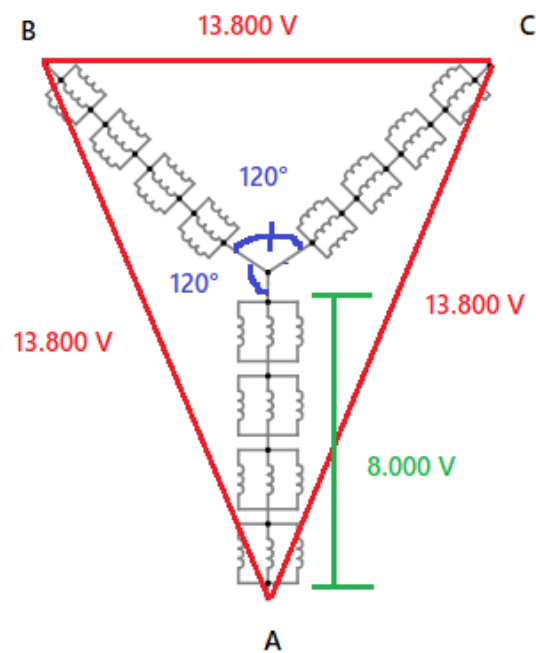
de 13.800 V, enquanto a tensão fase-neutro é cerca de 8.000 V. A defasagem entre as tensões é de 120° .

Figura 12 - Conexão estrela do primário



Fonte: Elaboração própria.

Figura 13 - Tensão fase-fase, tensão fase-neutro e defasagem entre as tensões



Fonte: Elaboração própria.

Nesta seção, será calculada a vazão volumétrica da bomba num caminho que o escoamento do fluido passa por apenas uma bobina do primário e, após o fluido extrair o calor da bobina, o fluido de resfriamento passa por um trocador de calor, e resfriado volta enfim para alimentar a bomba.

Primeiramente, será calculada a resistência da bobina do primário, utilizando a equação (6) (HALLIDAY *et al.*, 2016). Para esse cálculo, precisa-se de valores como o comprimento do tubo da bobina em que a corrente passa, a resistividade do cobre, já que a bobina é feita deste material, e da área da seção transversal do tubo, e para calcular a área, serão necessários o diâmetro interno e o diâmetro externo desse tubo (SCTUBES, 2023).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (6)$$

Em que:

R é a resistência elétrica do tubo de cobre, em ohms [Ω].

ρ é a resistividade elétrica do material, no caso o cobre, em [Ωm].

L é o comprimento do tubo, o caminho percorrido pela corrente elétrica no tubo de cobre, em metros [m].

A é a área da seção transversal da parede do tubo de cobre, em metros quadrados [m^2].

As equações (7-9) com os valores são mostradas (HALLIDAY *et al.*, 2016). A resistividade do cobre é de $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m$, o comprimento de uma espira da bobina é de 1,93 m, e, como uma bobina possui 35 espiras, então o comprimento do caminho é de 67,55 m. O diâmetro externo do tubo de cobre é meia polegada, ou seja, 12 mm, a espessura da parede do tubo de cobre é 1 mm, e, conseqüentemente, o diâmetro interno desse tubo é 10 mm. Os valores dos diâmetros da bobina são de tubos de cobre catalogados (SCTUBES, 2023). Os dados apresentados são necessários para o cálculo da área da seção transversal da parede do tubo.

$$A = \pi \frac{(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \quad (7)$$

$$A = \pi \frac{(12^2 - 10^2) mm^2}{4} = 34,56 \cdot 10^{-6} m^2 \quad (8)$$

$$R = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m \frac{67,55 m}{34,56 \cdot 10^{-6} m^2} = 33,23 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (9)$$

Devido à transferência de calor e à temperatura da bobina, a resistência elétrica da bobina precisa de uma correção, essa correção leva em conta a temperatura de entrada e de saída do fluido de resfriamento, e o coeficiente de temperatura da resistividade α do cobre a uma temperatura de 20°C (BOYLESTAD, 2012). A temperatura de entrada do fluido é de 50°C, e a temperatura de saída é de 80°C. As equações (10-14) são relacionadas à correção da resistência elétrica e a diferença entre a média de temperaturas e a temperatura de referência (BOYLESTAD, 2012).

$$R_{\text{corrigida}} = R_O \cdot (1 + \alpha_{Cu,20^\circ C} \Delta T) \quad (10)$$

$$\Delta T = \left(\frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} - 20^\circ C \right) \quad (11)$$

Em que:

$R_{\text{corrigida}}$ é a resistência elétrica corrigida, em ohms [Ω].

R_O é a resistência elétrica calculada considerando a temperatura de 20°C, em ohms [Ω].

$\alpha_{Cu,20^\circ C}$ é o coeficiente de temperatura da resistividade α do cobre a uma temperatura de 20°C, em $^\circ C^{-1}$.

$T_{\text{máx}}$ é a temperatura de saída do fluido de resfriamento na bobina de cobre, em graus Celsius [$^\circ C$].

$T_{\text{mín}}$ é a temperatura de entrada do fluido de resfriamento na bobina de cobre, em graus Celsius [$^\circ C$].

ΔT é a diferença entre a média das temperaturas de saída e de entrada do fluido refrigerante, água deionizada, e a temperatura de referência de 20°C, em graus Celsius [$^\circ C$].

$$\Delta T = \left(\frac{80^\circ C + 50^\circ C}{2} - 20^\circ C \right) = 45^\circ C \quad (12)$$

$$R_{\text{corrigida}} = 33,23 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot (1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1} 45^\circ C) \quad (13)$$

$$R_{\text{corrigida}} = 39,11 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (14)$$

Também é necessário calcular a corrente, em amperes, do primário. Seu cálculo, nas equações (15-16) (BIM, 2014), envolve dados como a tensão fase-fase e a potência aparente.

$$I_p = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{\phi\phi}} \quad (15)$$

Em que:

I_p é a corrente elétrica do primário, em amperes [A].

S é a potência aparente, em [kVA].

$V_{\phi\phi}$ é a tensão fase-fase entre os terminais da conexão estrela do primário, em [kV].

$$I_p = \frac{18.000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \text{ kV}} = 753,07 \text{ A} \quad (16)$$

Como a corrente total se divide para passar em 3 bobinas em paralelo, conforme é possível perceber nas Figuras 11 e 12, é preciso dividir a corrente por 3 para a obtenção da corrente que passa em uma das bobinas do primário. Para essa conta, segue a equação (17)

$$I'_p = \frac{I_p}{3} = 251,02 \text{ A} \quad (17)$$

Para encontrar o número de espiras de cada bobina de cobre, é preciso calcular a densidade de fluxo magnético. Esse cálculo leva em conta a permeabilidade magnética do material utilizado no núcleo magnético do transformador, a tensão elétrica, a corrente elétrica e as dimensões do núcleo do transformador.

Na equação (18) como referência, tem-se a corrente elétrica, que é a integral de linha do campo magnético ao longo de um percurso fechado. Essa equação é a Lei de Ampère (CHAPMAN, 2013).

$$I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (18)$$

Em que:

I é a corrente elétrica, em amperes [A].

H é a intensidade de campo magnético, em amperes por metros [A/m].

l é o percurso, em metros [m].

Como a corrente elétrica percorre no enrolamento do fio elétrico em volta do núcleo do transformador, o percurso se aproxima de uma volta em uma circunferência. A equação (19) (CHAPMAN, 2013) calcula o valor da intensidade de campo elétrico.

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (19)$$

Em que:

r é a distância do fio do enrolamento até o centro do transformador, em metros [m].

A densidade de fluxo magnético pode ser calculada a partir do produto da intensidade de campo magnético com a permeabilidade do material do núcleo do transformador, a equação (20) (CHAPMAN, 2013).

$$B = \mu H \quad (20)$$

Em que:

μ é a permeabilidade do material do núcleo do transformador, em [Tm/A].

B é a densidade de fluxo magnético, em tesla [T].

Contudo, existe a permeabilidade relativa, equação (21), que é a divisão entre a permeabilidade do material com a permeabilidade do vácuo (CHAPMAN, 2013).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (21)$$

Em que:

μ_r é a permeabilidade relativa, valor adimensional.

μ_0 é a permeabilidade do vácuo, em [Tm/A].

Rearranjando as equações (19-21), a equação (22) pode calcular a densidade de fluxo magnético na forma:

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi r} \quad (22)$$

Com a densidade de fluxo magnético calculada, é possível encontrar o fluxo magnético total (CHAPMAN, 2013), na equação (23).

$$\phi = \oint B \cdot dA \quad (23)$$

Em que:

ϕ é o fluxo magnético, em weber [Wb].

dA é uma área infinitesimal na superfície, em [m²].

A partir do produto da derivada do fluxo magnético no tempo pelo número de espiras do enrolamento da bobina, consegue-se encontrar a tensão induzida. A equação (24) vem da lei de *Faraday-Lenz* (CHAPMAN, 2013).

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (24)$$

Em que:

N é o número de espiras.

e é a tensão induzida, em volts [V].

Uma vez que a corrente elétrica é da forma senoidal, o campo magnético gerado é senoidal, assim como a densidade de fluxo magnético e o fluxo magnético, desta forma, tem-se as equações (25- 27) (CHAPMAN, 2013) para o fluxo magnético e frequência angular:

$$\phi = \phi_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_0) \quad (25)$$

Em que:

$$\phi_{m\acute{a}x} = B_{m\acute{a}x} \cdot A \quad (26)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (27)$$

Em que:

f é a frequência, em hertz [Hz].

ω é a frequência angular, em radianos por segundo [rad/s].

θ_0 é o ângulo de fase, em radianos.

A é a área, em metros quadrados [m²].

$B_{m\acute{a}x}$ é o valor escolhido para B abaixo do joelho da curva de saturação, em tesla [T].

$\phi_{m\acute{a}x}$ é o valor de fluxo magnético, considerando $B_{m\acute{a}x}$ e a área A , em weber [Wb].

Derivando o fluxo magnético em função do tempo, tem-se a equação (28) (CHAPMAN, 2013):

$$\frac{d\phi}{dt} = B_{m\acute{a}x} \cdot A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \theta_0) \quad (28)$$

Rearranjando a equação (24) com a equação (28), pode-se escrever a equação (29) (CHAPMAN, 2013) da seguinte forma:

$$e = -N \cdot B_{m\acute{a}x} \cdot A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \theta_0) \quad (29)$$

O valor eficaz de uma tensão alternada pode ser calculado pela equação (30) (BOYLESTAD, 2012).

$$e_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} e(t)^2 dt} \quad (30)$$

A tensão eficaz, equação (31-33) (CHAPMAN, 2013), de uma onda senoidal é igual ao valor de pico da tensão dividido por raiz quadrada de dois.

$$e_{ef} = \frac{e_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

$$e_{m\acute{a}x} = N \cdot B_{m\acute{a}x} \cdot A \cdot \omega \quad (32)$$

$$e_{ef} = \frac{N \cdot B_{m\acute{a}x} \cdot A \cdot \omega}{\sqrt{2}} \quad (33)$$

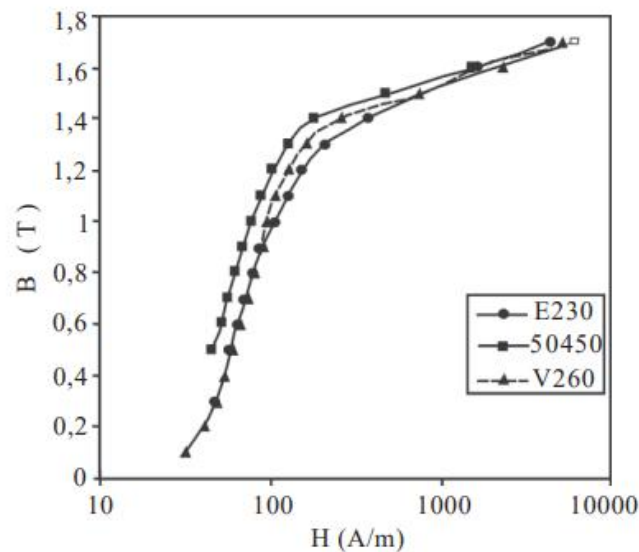
A partir da tensão fase-fase eficaz do primário do transformador, de 13.800 V, pode-se calcular a tensão fase-neutro eficaz, na equação (34) (CHAPMAN, 2013).

$$e_{\phi N-ef} = \frac{13.800}{\sqrt{3}} = 7.967,4 V \quad (34)$$

A Figura 14 mostra um gráfico que representa as curvas de magnetização, onde o eixo das ordenadas é a densidade de fluxo magnético, em tesla, e o eixo das abcissas é a intensidade

de campo magnético, em [A/m], é possível encontrar o $B_{m\acute{a}x}$, escolhendo um valor próximo da densidade de fluxo magnético na região do gráfico um pouco antes do ponto de inflexão da curva, comumente chamado de joelho. O material considerado é um aço, denominado CSN 50450. O $B_{m\acute{a}x}$ escolhido é de 1,3 tesla (LANDGRAF, 2002). Segue a curva de magnetização:

Figura 14 - Curvas de magnetização de diferentes materiais



Fonte: (LANDGRAF, 2002)

Utilizando a fórmula da tensão eficaz, equação (35), despreza-se a parte do seno, pois sabe-se que seu valor está entre -1 e 1, ou seja, considerando que o seno tenha seu valor de pico, que é 1. Com o objetivo de encontrar o número de espiras, usa-se as equações (36-37). É importante saber seu valor para a escolha do número de bobinas utilizadas no primário. A área da seção transversal da coluna do núcleo do transformador é de 0,16 m². E a frequência é 60 Hz.

$$e_{ef} = \frac{N \cdot B_{m\acute{a}x} \cdot A \cdot \omega}{\sqrt{2}} \quad (35)$$

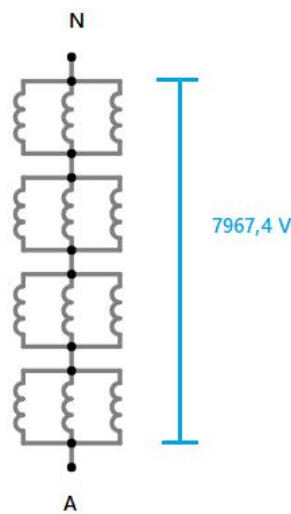
$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot e_{ef}}{B_{m\acute{a}x} \cdot A \cdot \omega} = \frac{\sqrt{2} \cdot 7.967,4 \text{ V}}{1,3 \cdot \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \cdot 0,16 \text{ m}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \frac{1}{\text{s}}} \quad (36)$$

$$N = 143,69 \text{ espiras} \quad (37)$$

Para conseguir um valor inteiro de espiras, pode-se escolher um $B_{m\acute{a}x}$ pr3ximo de 1,3 T. O novo valor escolhido da densidade de fluxo magn3tico 3 de 1,334 T para que o n3mero de espiras seja de 140.

Tendo 140 espiras, foi determinado que sejam 4 bobinas de 35 espiras, por3m cada uma dessas bobinas citadas anteriormente est3 em paralelo com mais duas bobinas, totalizando 3 bobinas em paralelo, em uma sequ3ncia de quatro “linhas”. Isso somente analisando algum terminal com o neutro. Segue a Figura 15 para uma melhor visualiza33o:

Figura 15 - Fase-neutro



Fonte: Elaboraa3o pr3pria

Agora, j3 tendo o dado calculado da resist3ncia el3trica de uma bobina, e da corrente que passa em uma bobina, 3 necess3rio encontrar o valor da taxa volum3trica da energia interna criada, que 3 o calor gerado no tubo de cobre a partir de perdas da parte el3trica do transformador, especificamente da pot3ncia que percorre a bobina, as perdas el3tricas que se transformam em calor no n3cleo do transformador ser3o desprezadas. A equaa3o (38) mostra a f3rmula da taxa volum3trica de gera33o de energia (INCROPERA *et al.*, 2017).

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{V} \quad (38)$$

Em que:

\dot{q} 3 a taxa volum3trica de gera33o de energia interna do tubo de cobre, em watts por metros c3bicos [W/m³]

R é a resistência elétrica do tubo de cobre, em ohms [Ω]

V é o volume do meio onde é gerado a energia interna, no caso o volume do tubo de cobre, em metros cúbicos [m^3]

I é a corrente elétrica que passa em uma bobina do primário, em amperes [A].

Para o cálculo do volume do tubo, nas equações (39-41) (INCROPERA et al., 2017), será feita a conta da área da seção transversal da parede do tubo, a área da base, vezes o comprimento do tubo, como se fosse a altura.

$$V = AB \cdot h = \frac{\pi(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \cdot L \quad (39)$$

$$V = \pi \frac{(12^2 - 10^2)mm^2}{4} \cdot 67,55 m \quad (40)$$

$$V = 2,33 \cdot 10^{-3} m^3 \quad (41)$$

Com o volume de uma bobina calculado e tendo a corrente elétrica $I \cong 251 A$, pode-se calcular, enfim, a taxa volumétrica \dot{q} . As equações (42-43) calculam \dot{q} .

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{V} = \frac{251,02^2 \cdot A^2 \cdot 39,11 \cdot 10^{-3} \Omega}{2,33 \cdot 10^{-3} m^3} \quad (42)$$

$$\dot{q} = 1,06 \cdot 10^6 \frac{W}{m^3} \quad (43)$$

Ter a taxa volumétrica \dot{q} é essencial para o cálculo do fluxo térmico da parede interna do tubo q''_s , que significa a potência gerada dividida pela área interna do tubo de cobre. Lembrando que o fluxo térmico da parede externa é adiabático, ou seja, nula, pois a parede externa do tubo não troca calor com o meio externo. As equações (44-46) mostram o cálculo do fluxo térmico na área superficial interna do tubo (INCROPERA et al., 2017).

$$q''_s = \frac{\dot{E}_g}{\pi D_{int} L} = \frac{\dot{q}}{4} \cdot \frac{(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{D_{int}} \quad (44)$$

$$q''_s = \frac{1,06 \cdot 10^6 \frac{W}{m^3}}{4} \cdot \frac{(12^2 - 10^2)mm^2}{10 mm} \quad (45)$$

$$q''_s = 1,16 \cdot 10^3 \frac{W}{m^2} \quad (46)$$

O fluxo térmico q''_s foi calculado para encontrar o calor q , em watts [W], que é transferido do tubo de cobre aquecido para o fluido de resfriamento. Na equação (47), tem-se a equação da taxa de calor (INCROPERA *et al.*, 2017), que basicamente é o fluxo térmico vezes a área superficial interna do tubo onde há a troca de calor entre o tubo e o fluido refrigerante.

$$q = q''_s (P \cdot L) \quad (47)$$

Em que:

P é chamado de perímetro, que é o valor da circunferência interna do tubo, em metros [m].

L é comprimento do tubo ou o caminho percorrido pela corrente elétrica no tubo, em metros [m].

q''_s é o fluxo térmico de calor, em watts por metros quadrados [W/m²].

O perímetro, nas equações (48-51) (INCROPERA *et al.*, 2017), leva em conta o diâmetro interno da bobina, que é a região de interesse da troca de calor.

$$P = \pi \cdot D_{int} \quad (48)$$

$$q = q''_s (\pi \cdot D_{int} \cdot L) \quad (49)$$

$$q = 1,16 \cdot 10^3 \frac{W}{m^2} (\pi \cdot 10 \text{ mm} \cdot 67,55 \text{ m}) \quad (50)$$

$$q = 2,46 \text{ kW} \quad (51)$$

Como foi calculado o valor da taxa de calor, que está na unidade de energia por tempo, que é de joule por segundo [J/s], ou simplesmente watts [W], agora é possível calcular a vazão mássica do fluido, em [kg/s], e posteriormente a vazão volumétrica, em [L/s], a partir da equação (52) (INCROPERA *et al.*, 2017).

$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{m,sai} - T_{m,entra}) \quad (52)$$

Em que:

q é a taxa de calor, em watts [W]

\dot{m} é a vazão mássica, em quilogramas por segundo [kg/s]

c_p é o calor específico da água, em [J/kg·°C]

$T_{m,sai}$ é a temperatura de saída do fluido de resfriamento na bobina, em graus Celsius [°C]

$T_{m,entra}$ é a temperatura de entrada do fluido de resfriamento na bobina, em graus Celsius [°C]

Como o objetivo com a equação (52) era, inicialmente, de encontrar a vazão volumétrica da bomba para que o fluido de resfriamento seja escoado no tubo da bobina, basta isolar a vazão mássica, como nas equações (53-55) (INCROPERA *et al.*, 2017). Supondo que a temperatura média de entrada do fluido seja de 50°C, e que a temperatura média de saída do fluido na bobina seja de 80°C.

$$\dot{m} = \frac{q}{c_p \cdot (T_{m,sai} - T_{m,entra})} \quad (53)$$

$$\dot{m} = \frac{2,46 \cdot 10^3 \text{ W}}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot (80 - 50)^\circ\text{C}} \quad (54)$$

$$\dot{m} = 19,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 19,6 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (55)$$

A vazão mássica é o produto da densidade do fluido de resfriamento pela vazão volumétrica, então basta dividir a vazão mássica pela densidade do fluido para encontrar a vazão volumétrica da bomba. Tem-se nas equações (56-59) (FOX *et al.*, 2014), a vazão mássica e a vazão volumétrica para uma bobina do primário.

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (56)$$

Em que:

\dot{m} é a vazão mássica do fluido em escoamento, em [kg/s]

ρ é a densidade do fluido de resfriamento, em [kg/m³]

Q é a vazão volumétrica da bomba, em [L/s]

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (57)$$

$$Q = \frac{19,6 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = \frac{19,6 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}}{1 \frac{kg}{l}} \quad (58)$$

$$Q_{1 \text{ bobina}} = 19,6 \cdot 10^{-3} \frac{l}{s} = 70,74 \frac{l}{h} \quad (59)$$

A vazão volumétrica em uma bobina foi calculada, como o primário do transformador possui 36 bobinas, a vazão volumétrica do primário está na equação (60):

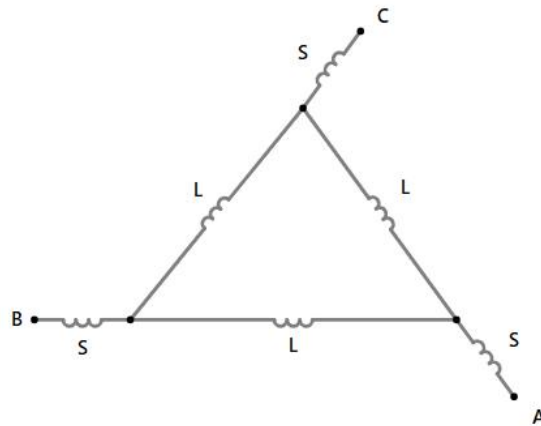
$$Q_{36 \text{ bobinas}} = 2546,73 \text{ l/h} \quad (60)$$

Antes de analisar os resultados, interpretando a vazão volumétrica obtida, serão necessários cerca de 71 litros em uma hora para resfriar uma bobina do primário do transformador. Contando que existem 36 bobinas no primário, então precisa-se de cerca de 2.500 litros em uma hora para resfriar todas as bobinas do primário. Esse dado mostra a importância de se ter um trocador de calor no sistema que serviria para resfriar o fluido que já foi aquecido por ter extraído o calor das bobinas.

4.3 CÁLCULO DA VAZÃO EM UMA BOBINA DO SECUNDÁRIO

O cálculo da vazão volumétrica que passa por uma bobina do secundário do transformador é diferente do cálculo feito no primário. Essa mudança se deve ao fato de o primário ter uma conexão estrela, enquanto o secundário possui dezoito conexões de delta estendido. Na Figura 16, tem-se a conexão delta estendido, com 3 terminais (A, B e C), de bobinas com menos espiras, chamado de S, e bobinas com mais espiras, chamado de L. Cada conexão delta-estendido deste trabalho tem 3 bobinas em paralelo para cada bobina representada na Figura 16.

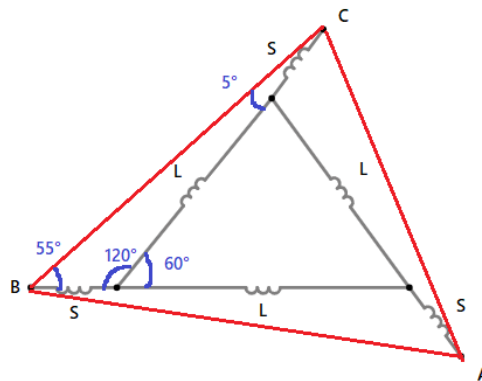
Figura 16 - Conexão delta-estendido



Fonte: Elaboração própria.

No exemplo da Figura 16, a fase da conexão de delta estendido é de 5° . Na Figura 17, é mostrado onde a fase está posicionada.

Figura 17- Ângulo de fase da conexão de delta-estendido



Fonte: Elaboração própria.

Suponha que uma bobina seja a soma, no número de espiras, de uma bobina S mais uma bobina L. Então uma bobina seria (S+L). É necessário encontrar a tensão na região S e L, a tensão fase-fase é de 690 volts. Como existem conexões de delta estendido no secundário do transformador de fases diferentes, o cálculo para a tensão na região L e S se alteram. Na fórmula (61), tem-se como calcular a tensão na região de L e a tensão na região de S. Essa fórmula foi obtida a partir da lei dos senos.

$$\frac{V_{\phi\phi}}{\text{sen}(120^\circ)} = \frac{V_S}{\text{sen}(\varphi)} = \frac{V_S+V_L}{\text{sen}(180^\circ-120^\circ-|\varphi|)} \quad (61)$$

Em que:

$V_{\phi\phi}$ é a tensão fase-fase, em volts [V].

V_S é o valor da tensão da bobina com menos espiras, em volts [V].

V_L é o valor da tensão da bobina com mais espiras, em volts [V].

φ é a fase da conexão delta estendido, em graus [°].

Usando a fase de 5° como exemplo, nas equações (62-65), busca-se o valor da tensão de S e L, os cálculos para todas as outras fases serão mostradas na seção de resultados. A tensão fase-fase entre os terminais AB, BC e CA são de mesmo valor, de 690V.

$$\frac{690 V}{\text{sen}(120^\circ)} = \frac{V_S}{\text{sen}(5^\circ)} \quad (62)$$

$$V_S = 69,44 V \quad (63)$$

$$\frac{690 V}{\text{sen}(120^\circ)} = \frac{69,44 + V_L}{\text{sen}(180^\circ - 120^\circ - 5^\circ)} \quad (64)$$

$$V_L = 583,21 V \quad (65)$$

Dividindo a tensão fase-neutro do primário, de 7.967,4 V, com o número de espiras do primário, de 140 espiras, tem-se o número de volts por espira de 56,91 V, equação (66), esse valor de volts por espira serve tanto no primário como nos secundários do transformador. Para encontrar o número de espiras de uma bobina (S + L), basta dividir a tensão, seja de S ou de L, pelo número de volts por espira, da equação (66). f_{CS} é o fator de correção do número de espiras necessário devido à queda de tensão sob carga, (MARTIGNONI, 1983), no caso, utilizado 1,05. Usando a tensão de S numa fase de 5° como exemplo, tem-se o número de espiras na equação (67):

$$\frac{V}{Esp} = 56,91 V \quad (66)$$

Em que:

V é a tensão de S ou L em uma determinada fase, em volts [V].

Esp é o número de espiras, ou o número de voltas da bobina, valor Adimensional.

$$\frac{V_{S, \varphi=5^\circ}}{V} f_{CS} = \frac{69,44 V}{56,91 V} \cdot 1,05 = 1,28 \text{ Espiras} \quad (67)$$

Para calcular as perdas, é necessário calcular, primeiramente, a resistência elétrica de L e de S, separadamente. A fórmula da resistência é a mesma utilizada da seção anterior. O comprimento de uma espira é de 2,40 metros. Nas equações (68-73), calcula-se a resistência elétrica (HALLIDAY *et al.*, 2016) na fase de 5° de L e de S.

$$R_{L, 5^\circ} = \rho_{Cu} \frac{L_L}{A} \quad (68)$$

$$R_{L, 5^\circ} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m \frac{(2,40 \frac{m}{esp} \cdot 10,76 \text{ esp})}{3,46 \cdot 10^{-5} m^2} \quad (69)$$

$$R_{L, 5^\circ} = 12,7 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (70)$$

$$R_{S, 5^\circ} = \rho_{Cu} \frac{L_S}{A} \quad (71)$$

$$R_{S, 5^\circ} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m \frac{(2,40 \frac{m}{esp} \cdot 1,28 \text{ esp})}{3,46 \cdot 10^{-5} m^2} \quad (72)$$

$$R_{S, 5^\circ} = 1,51 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (73)$$

Por conta da temperatura da bobina de cobre, é necessário usar um fator de correção na resistência elétrica (BOYLESTAD, 2012) para encontrar seu valor em função da temperatura de entrada e de saída do fluido de resfriamento na bobina. As equações (74-80) mostram o fator de correção, e o exemplo seguinte é para uma fase de 5°, primeiramente em S e depois em L.

$$R_{\text{corrigido}, S, 5^\circ} = R_{O, S, 5^\circ} \cdot (1 + \alpha_{Cu, 20^\circ C} \Delta T) \quad (74)$$

$$\Delta T = \left(\frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} - 20^\circ C \right) \quad (75)$$

$$\Delta T = \left(\frac{80^\circ C + 50^\circ C}{2} - 20^\circ C \right) = 45^\circ C \quad (76)$$

$$R_{\text{corrigido}, S, 5^\circ} = 1,51 \cdot 10^{-3} \Omega \left(1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ C} 45^\circ C \right) \quad (77)$$

$$R_{\text{corrigido}, S, 5^\circ} = 1,78 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (78)$$

$$R_{\text{corrigido}, L, 5^\circ} = 12,7 \cdot 10^{-3} \Omega \left(1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}} 45^\circ\text{C} \right) \quad (79)$$

$$R_{\text{corrigido}, L, 5^\circ} = 15 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (80)$$

Agora, será calculada a corrente que passa na porção em S e em L na conexão de delta estendido. A equação leva em conta a tensão fase-fase da conexão delta estendido, que é de 690 V, ou 0,69 kV. A corrente, em S e em L, está mostrada para uma bobina e a total, que passa pela conexão. Pontuando que, em cada fase, existem três conexões de delta estendido. A equação (81) (BIM, 2014) mostra a corrente da conexão próximo da região S.

$$I_{s,\text{total}} = \frac{1000\text{kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,69\text{kV}} = 836,74 \text{ A} \quad (81)$$

Como a corrente elétrica se divide quando encontra bobinas em paralelo, a corrente elétrica da conexão deve ser dividida por três, como na equação (82), para a obtenção da corrente elétrica que passa por uma bobina de S.

$$I_s = \frac{I_{s,\text{total}}}{3} = 278,91 \text{ A} \quad (82)$$

Pela geometria da conexão de delta estendido, para encontrar a corrente elétrica que passa pela conexão antes de chegar na bobina de L, basta dividir a corrente elétrica da conexão em S por raiz quadrada de três. Segue a equação (83) (BIM, 2014).

$$I_{L, \text{total}} = \frac{I_{s,\text{total}}}{\sqrt{3}} = 483,09 \text{ A} \quad (83)$$

Divide-se a corrente elétrica da conexão em L por três, porque ela passa por três bobinas em paralelo. A equação (84) mostra a corrente elétrica conduzida em uma bobina de L.

$$I_L = \frac{I_{L, \text{total}}}{3} = 161,03 \text{ A} \quad (84)$$

Com os valores da resistência elétrica e da corrente elétrica em mãos, tanto na região S e L da conexão de delta estendido, é possível calcular a perda de potência elétrica, em watts [W], e essa é a perda elétrica que se transforma em calor na bobina. Esse cálculo não considera as perdas no núcleo do transformador. Existem duas perdas de potência elétrica a serem considerados. Correntes parasitas, ou corrente de Foucault, que são correntes induzidas no condutor por causa da variação de campo magnético (IEEE, 2018), também afeta o núcleo, mas o foco é o enrolamento. Existe também perdas devido à presença de harmônicos na corrente, que afetam o valor eficaz desta corrente, aumentando as perdas Joule. Por conta desses dois tipos de perdas, é necessário multiplicar as perdas por fatores de correção. Esses fatores de correção são obtidos a partir de cálculos realizados pelos projetistas do transformador da área de engenharia elétrica. Neste trabalho, consideram-se valores típicos. O fator de correção associado à presença de harmônicos utilizado (IEEE, 2018) é 1,25. O fator de correção associado às correntes de Foucault (IEEE, 2018) empregado é 1,50. Nas equações (85-87) de cálculo de perdas (CHAPMAN, 2013) e (IEEE, 2018), a fase de 5° é levada em conta, em uma bobina (S + L).

$$P_{5^\circ} = f_f f_h (R_L I_L^2 + R_S I_S^2) \quad (85)$$

Em que:

f_f é o fator de correção associado às perdas elétricas por corrente de Foucault, adimensional.

f_h é o fator de correção associado às perdas elétricas por harmônicos, adimensional.

$$P_{5^\circ} = 1,5 \cdot 1,25 (15 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot 161,03^2 \cdot A^2 + 1,78 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot 278,91^2 A^2) \quad (86)$$

$$P_{5^\circ} = 986,57 \text{ W} \quad (87)$$

Com a resistência elétrica corrigida e a corrente elétrica devidamente calculadas, tanto na porção L quanto na porção S, calcula-se novamente, desta vez para uma bobina do secundário, a taxa volumétrica de geração de energia do tubo de cobre da bobina, nas equações (88-90) (INCROPERA *et al.*, 2017). Nesse caso, para uma fase de 5° na conexão de delta estendido no secundário.

$$\dot{q}_{5^\circ} = \frac{f f h I^2 R}{V} = \frac{f f h (I_L^2 R_L + I_S^2 R_S)}{V} \quad (88)$$

$$\dot{q}_{5^\circ} = \frac{1,5 \cdot 1,25 (161,03^2 \cdot A^2 \cdot 15,0 \cdot 10^{-3} \Omega + 278,91^2 \cdot A^2 \cdot 1,78 \cdot 10^{-3} \Omega)}{9,99 \cdot 10^{-4} m^2} \quad (89)$$

$$\dot{q}_{5^\circ} = 987,85 \frac{kW}{m^3} \quad (90)$$

Segue para o cálculo do fluxo térmico, nas equações (91-92), em uma bobina (L + S), na fase de 5° (INCROPERA *et al.*, 2017).

$$q''_{s\ 5^\circ} = \frac{989,92 \cdot 10^3 \frac{W}{m^3}}{4} \cdot \frac{(12^2 - 10^2) mm^2}{10 mm} \quad (91)$$

$$q''_{s\ 5^\circ} = 1.086,63 \frac{W}{m^2} \quad (92)$$

As equações (93-94) (INCROPERA *et al.*, 2017) servem para o cálculo da taxa de calor q , a partir do fluxo térmico, em uma bobina (L + S), na fase de 5°.

$$q_{5^\circ} = 1.086,63 \frac{W}{m^2} \left(\pi \cdot 10 mm \cdot 2,40 \frac{m}{esp} \cdot 12,04 esp \right) \quad (93)$$

$$q_{5^\circ} = 986,57 W \quad (94)$$

Primeiramente, obtém-se a vazão mássica, a partir das equações (95-98), em uma bobina numa conexão de fase de 5°, e, com esse valor, estima-se a vazão volumétrica necessária na mesma bobina, nas equações (112-113) (INCROPERA *et al.*, 2017).

$$\dot{m}_{5^\circ} = \frac{986,57 W}{4180 \frac{J}{kg^\circ C} \cdot (80 - 50)^\circ C} \quad (95)$$

$$\dot{m}_{5^\circ} = 7,87 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} = 7,87 \frac{g}{s} \quad (96)$$

$$Q_{5^\circ} = \frac{7,87 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = \frac{7,87 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}}{1 \frac{kg}{L}} \quad (97)$$

$$Q_{5^\circ} = 7,87 \cdot 10^{-3} \frac{L}{s} = 28,32 \frac{L}{h} \quad (98)$$

Considerando que o secundário do transformador possui 6 fases diferentes e um total de 162 bobinas, segue sua vazão volumétrica total, na equação (99):

$$Q_{s, total} \cong 5.599,13 \frac{L}{h} \quad (99)$$

4.4 PERDA DE CARGA EM UMA BOBINA DO PRIMÁRIO

Nesta seção, será calculada a perda de carga e a variação de pressão em uma bobina do primário. Esse cálculo envolve o número de Reynolds, para se ter noção se o escoamento é laminar, no regime de transição ou turbulento. Também envolve a rugosidade da parede interna do tubo, que é feito de cobre, o coeficiente de atrito de Darcy, o diâmetro interno, o comprimento do tubo e a velocidade do escoamento. Tem-se, na equação (100), a fórmula da variação de pressão (FOX et al., 2014).

$$\Delta P = f_d \frac{L\rho\bar{V}^2}{2D_i} \quad (100)$$

Em que:

f_d é o coeficiente de atrito de Darcy, que é adimensional.

L é o comprimento do tubo, em metros [m].

ρ é a densidade do fluido de resfriamento, em [kg/m³].

D_i é o diâmetro interno do tubo, em metros [m].

\bar{V} é a velocidade média do escoamento, em [m/s].

A velocidade média do escoamento (FOX et al., 2014), nas equações (101-103), são calculadas. Para encontrar esse valor, basta dividir a vazão volumétrica pela área da seção transversal do tubo na qual o fluido de resfriamento escoar, que é a área circular que leva em conta o diâmetro interno.

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} \quad (101)$$

Em que:

Q é a vazão volumétrica, em [m³/s].

A é a área da seção transversal do tubo, em metros quadrados [m²].

$$\bar{V} = \frac{1,97 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{3,46 \cdot 10^{-5} m^2} \quad (102)$$

$$\bar{V} = 0,57 \frac{m}{s} \quad (103)$$

Com o valor da velocidade média do escoamento em mãos, será feito o cálculo do número de *Reynolds*. Lembrando que, se o número de Reynolds for menor que 2300, o escoamento é laminar, se esse número for maior que 2300, o escoamento é turbulento. Segue a equação (104-106) do número de Reynolds, (FOX et al., 2014).

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D_i}{\mu} \quad (104)$$

Em que:

μ é a viscosidade cinemática da água a 60°C, em [Ns/m²].

ρ é a densidade do fluido de resfriamento, em [kg/m³].

D_i é o diâmetro interno do tubo, em metros [m].

\bar{V} é a velocidade média do escoamento, em [m/s].

$$Re = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,57 \frac{m}{s} \cdot 0,010 m}{4,67 \cdot 10^{-4} \frac{Ns}{m^2}} \quad (105)$$

$$Re = 12.181,62 \quad (106)$$

Como o número de Reynolds é maior que 2300, considera-se que o escoamento é turbulento. Para encontrar o coeficiente de atrito de Darcy, usa-se a equação de *Haaland* (107- 109), (FOX et al., 2014).

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -1,8 \log \left(\left(\frac{e}{3,7 D_i} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \quad (107)$$

Em que:

f_d é o coeficiente de atrito de Darcy, número adimensional.

e é a rugosidade do material, no caso o cobre, em metros [m].

D_i é o diâmetro interno do tubo, em metros [m].

Re é o número de *Reynolds*, número adimensional.

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -1,8 \log \left(\left(\frac{15 \cdot 10^{-6} m}{3,7 \cdot 0,01 m} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{12.181,62} \right) \quad (108)$$

$$f_d = 3,15 \cdot 10^{-2} \quad (109)$$

Com todos os parâmetros calculados, é possível encontrar a variação de pressão e a perda de carga (FOX et al., 2014) em uma bobina do primário, nas equações (110-115).

$$\Delta P = f_d \frac{L \rho \bar{V}^2}{2 D_i} \quad (110)$$

$$\Delta P = 3,15 \cdot 10^{-2} \frac{35 \cdot 1,93 m \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,57^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 \cdot 0,01 m} \quad (111)$$

$$\Delta P = 34,36 \text{ kPa} = 0,34 \text{ Bar} = 0,35 \frac{kgf}{cm^2} \quad (112)$$

$$h_l = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (113)$$

$$h_l = \frac{34,36 \text{ kPa}}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} \quad (114)$$

$$h_l = 3,50 \text{ m. c. a} \quad (115)$$

4.5 PERDA DE CARGA EM UMA BOBINA DO SECUNDÁRIO

Diferentemente de uma bobina do primário, uma bobina do secundário pode ter o número diferente de espiras se comparado à uma outra bobina do secundário. Isso ocorre devido ao secundário ter dezoito conexões de delta estendido, de seis fases diferentes, a fase acaba determinando o número de espiras em uma bobina. Todos os cálculos de perda de carga e

variação de pressão serão feitos para uma fase de 5°, contudo, no final desta seção, os resultados para cada fase serão mostrados.

A vazão volumétrica do fluido de resfriamento em uma bobina do secundário já foi calculada. Usando esse dado, e dividindo-o pela área da seção transversal do tubo, encontra-se a velocidade do escoamento, nas equações (116-118), que é importante para a determinação do número de *Reynolds*, (FOX et al., 2014).

$$v = \frac{Q}{A} \quad (116)$$

$$v = \frac{7,87 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}}{3,46 \cdot 10^{-5} m^2} \quad (117)$$

$$v = 0,228 \frac{m}{s} \quad (118)$$

O número de *Reynolds* (FOX et al., 2014), nas equações (119-121), indica se o escoamento é laminar ou turbulento. A viscosidade dinâmica da água utilizada é de 60°C.

$$Re_{5^\circ} = \frac{\rho \bar{v} D_{int}}{\mu} \quad (119)$$

$$Re_{5^\circ} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,228 \frac{m}{s} \cdot 10 mm}{4,67 \cdot 10^{-4} \frac{Ns}{m^2}} \quad (120)$$

$$Re_{5^\circ} = 4.877,05 \quad (121)$$

Na fase de 5°, como o número de Reynolds é maior que 2300, o escoamento é turbulento. Nas outras fases o escoamento também é turbulento. Para encontrar o coeficiente de atrito de Darcy para o escoamento turbulento, usa-se o método de *Haaland* (INCROPERA et al., 2017), nas equações (122-124).

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -1,8 \cdot \log \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,7 D_{int}} \right)^{1,1} + \frac{6,9}{Re} \right) \quad (122)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -1,8 \cdot \log \left(\left(\frac{1,5 \cdot 10^{-5} m}{3,7 \cdot 10 mm} \right)^{1,1} + \frac{6,9}{4.877,05} \right) \quad (123)$$

$$f_d = 4,17 \cdot 10^{-2} \quad (124)$$

Com o coeficiente de atrito de Darcy para escoamento turbulento, é possível encontrar a variação de pressão e a perda de carga em uma bobina do secundário (FOX *et al.*, 2014), nas equações (125-130).

$$\Delta P_{5^\circ} = f_d \frac{L\rho\bar{V}^2}{2D_i} \quad (125)$$

$$\Delta P_{5^\circ} = 4,17 \cdot 10^{-2} \frac{12,04 \cdot 2,40m \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,228^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 \cdot 0,01m} \quad (126)$$

$$\Delta P_{5^\circ} = 3,12 \text{ kPa} = 0,0312 \text{ Bar} = 0,0318 \frac{kgf}{cm^2} \quad (127)$$

$$h_{l5^\circ} = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (128)$$

$$h_l = \frac{3,12 \text{ kPa}}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} \quad (129)$$

$$h_l = 0,318 \text{ m. c. a} \quad (130)$$

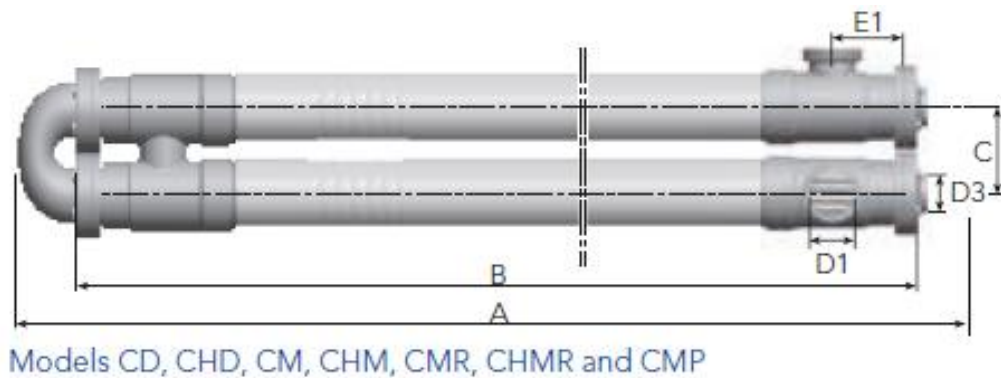
4.6 TROCADOR DE CALOR DO SISTEMA

Devido à alta vazão volumétrica necessária para usar o fluido de resfriamento para diminuir a temperatura das bobinas, tanto do primário quanto do secundário, é interessante que haja um trocador de calor no sistema, para que recolha o fluido de resfriamento que já foi aquecido por extrair calor das bobinas e resfrie esse fluido novamente, para que ele possa retornar para o reservatório de água com temperatura menor e desempenhar sua função inicial novamente. Esse trocador de calor possuiria uma bomba exclusiva só para pressurizar o fluido frio, enquanto a bomba original daria vazão para o fluido quente a ser resfriado no trocador de calor.

É importante salientar as características desse trocador de calor. Considera-se que o escoamento é plenamente desenvolvido. O trocador de calor é bi tubular, ou tubo duplo, em que são dois tubos concêntricos. O tubo interno é para o escoamento do fluido quente, ou seja, de maior temperatura, enquanto a região anular, entre o tubo externo e o interno, é para o escoamento do fluido frio, ou o fluido de menor temperatura do trocador. O escoamento é

paralelo, ou seja, o fluido de maior temperatura entra junto com o fluido de menor temperatura, os dois possuem escoamento no mesmo sentido, na mesma corrente, e o fluido frio sai do trocador de calor com sua maior temperatura, enquanto o fluido quente sai do ciclo com sua menor temperatura. Os dados do trocador de calor utilizados são de um trocador de calor da empresa Tetra Pak®. A Figura 18 mostra o modelo de trocador de calor escolhido, o CD129. Como cada módulo desse trocador possui 6 metros de comprimento, serão necessários 4 módulos, ou seja, 24 metros de comprimento do tubo para que haja uma troca térmica na ordem de 283,7 kW, que é a taxa de calor das perdas sob carga do enrolamento do transformador. A Tabela 5 mostra dados das dimensões de um módulo do trocador de calor.

Figura 18 - Trocador de calor tubular da Tetra Pak.



Fonte: (TETRPAK, 2023)

Tabela 5 - Dimensões do trocador de calor CD129

| Dimensões | Descrição | CD129 – 129 mm de diâmetro externo do casco e 6 m / 3 m |
|-----------|--|---|
| A | Comprimento máximo curva a curva | 3,394 m |
| B | Comprimento máximo contra flange a contra flange | 3,030 m |
| C | Centro a centro | 210 mm |
| D1 | União tipo SMS (Swedish Manufacturing Standard) | 104 mm |
| D3 | Flange com extremidade soldada | 76 x 1,6 mm |
| E1 | Centro SMS para o anel dividido | 118 mm |

Fonte: (TETRAPAK, 2023)

Busca-se encontrar o coeficiente convectivo de transferência de calor do tubo interno, que possui o escoamento de fluido mais quente, com o objetivo de encontrar a resistência térmica do sistema do trocador de calor, com esse valor, é possível encontrar o coeficiente global de transferência de calor. Começa-se com o cálculo do número de Prandtl (INCROPERA *et al.*, 2017), na equação (131-133).

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (131)$$

Em que:

Pr é o número de Prandtl, adimensional.

μ é a viscosidade dinâmica da água, a 60°C, em [Pa.s].

C_p é o calor específico da água a 60°C, em [J/kgK].

k é a condutividade térmica da água, a 60°C, em [W/mK].

$$Pr = \frac{0,467 \cdot 10^{-3} \cdot Pa \cdot s \cdot 4190 \frac{J}{kgK}}{0,651 \frac{W}{mK}} \quad (132)$$

$$Pr = 3 \quad (133)$$

O número de *Reynolds* (INCROPERA *et al.*, 2017), nas equações (134-136), serve para a identificação do tipo de escoamento, a densidade do fluido é levando em conta a média da temperatura de entrada e saída do fluido quente, o fluido entra a 80°C e sai a 50°C:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D_{int}}{\mu} \quad (134)$$

$$Re = \frac{980,53 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,54 \frac{m}{s} \cdot 0,0728 m}{0,467 \cdot 10^{-3} \frac{Ns}{m^2}} \quad (135)$$

$$Re = 83.127,24 \quad (136)$$

Como o escoamento é maior que 2300 Reynolds, o escoamento é turbulento. Sabendo disso, tem-se métodos e equações para encontrar o número de *Nusselt*. Como o escoamento é turbulento e plenamente desenvolvido, sendo maior de 3.000 e menor que 5.000.000 no número de Reynolds, usam-se as equações (137-140), para encontrar o valor do coeficiente *f* (INCROPERA *et al.*, 2017).

$$Turbulento, plen. de., 3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6 \quad (137)$$

$$f = (0,790 \cdot \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (138)$$

$$f = (0,790 \cdot \ln(83.127,24) - 1,64)^{-2} \quad (139)$$

$$f = 1,87 \cdot 10^{-2} \quad (140)$$

Segue a fórmula do número de *Nusselt*, nas equações (141-143), sua unidade é adimensional (INCROPERA *et al.*, 2017):

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12,7(f/8)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3}-1)} \quad (141)$$

$$Nu = \frac{(18,7 \cdot 10^{-3}/8)(83.127,24-1000) \cdot 3}{1+12,7(18,7 \cdot 10^{-3}/8)^{1/2} \cdot (3^{2/3}-1)} \quad (142)$$

$$Nu = 346,81 \quad (143)$$

Basta usar uma outra relação do número de *Nusselt*, equações (144-147), para encontrar o coeficiente convectivo de transferência de calor *h* (INCROPERA *et al.*, 2017).

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (144)$$

Em que:

Nu é o número de *Nusselt*, valor adimensional.

L_c é o comprimento característico, no caso o diâmetro interno para tubos, em metros [m].

k é a condutividade térmica da água, a 60°C, em [W/mK].

h é o coeficiente convectivo de transferência de calor, em [W/m²K].

$$h = \frac{kNu}{L_c} \quad (145)$$

$$h = \frac{0,651 \frac{W}{mK} \cdot 346,81}{0,0728 \text{ m}} \quad (146)$$

$$h_q = 3.100,87 \frac{W}{m^2K} \quad (147)$$

Analisando essa região do tubo interno, resta calcular, nas equações (148-149), a área da superfície interna do tubo interno (INCROPERA *et al.*, 2017), para encontrar o valor da resistência térmica, equação (150-151). O comprimento do tubo é de aproximadamente 24 m.

$$A_q = \pi \cdot D_{int} \cdot L_{comp.} = \pi \cdot 0,0728 \text{ m} \cdot 24 \text{ m} \quad (148)$$

$$A_q = 5,5 \text{ m}^2 \quad (149)$$

$$R_{t, quente} = \frac{1}{A_q h_q} = \frac{1}{5,5 \text{ m}^2 \cdot 3.100,87 \frac{W}{m^2K}} \quad (150)$$

$$R_{t, q} = 58,8 \cdot 10^{-6} \frac{K}{W} \quad (151)$$

O tubo interno, onde passa o fluido de maior temperatura, foi projetado. Dando prosseguimento, calcula-se a resistência térmica de condução, equações (152-154), considerando a espessura do tubo interno e, posteriormente, calcula-se a resistência térmica de convecção para a passagem do fluido com menor temperatura na região anular. O material do tubo interno é o aço AISI 316L (TETRPAK, 2023). Esse material possui uma condutividade térmica de 14 W/mK.

$$R_{cond.} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L_{comp.}} \quad (152)$$

$$R_{cond.} = \frac{\ln\left(\frac{0,076 \text{ m}}{0,0728 \text{ m}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 14 \frac{W}{mK} \cdot 24 \text{ m}} \quad (153)$$

$$R_{cond.} = 20,4 \cdot 10^{-6} \frac{K}{W} \quad (154)$$

Por fim, resta o cálculo da resistência térmica convectiva na região anular do tubo, começando com o cálculo (INCROPERA *et al.*, 2017) do número de *Prandtl*, nas equações (155-157), novamente. A temperatura do fluido frio entra a 30°C e sai a 40°C.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (155)$$

$$Pr = \frac{6,79 \cdot 10^{-4} \frac{Ns}{m^2} \cdot 4180 \frac{J}{kgK}}{0,629 \frac{W}{mK}} \quad (156)$$

$$Pr = 4,51 \quad (157)$$

O diâmetro hidráulico é a diferença entre o diâmetro interno do tubo externo e o diâmetro externo do tubo interno do trocador de calor. Com o valor do diâmetro hidráulico, encontra-se a área da seção transversal da região anular, onde passa o escoamento do fluido frio. Calcula-se o número de Reynolds, nas equações (158-160), em função do diâmetro hidráulico (INCROPERA *et al.*, 2017). Os dados da densidade e da viscosidade dinâmica da água são em função da média da temperatura de entrada e de saída do fluido frio no trocador de calor. A velocidade do escoamento na região anular é de 1,6 m/s.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi \cdot D_h \cdot \mu} \quad (158)$$

$$Re = \frac{4 \cdot 993 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,05 \cdot 10^{-2} \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot (0,119 - 0,076) m \cdot 6,79 \cdot 10^{-4} \frac{Ns}{m^2}} \quad (159)$$

$$Re = 455.559,08 \quad (160)$$

O número de *Reynolds* determina um escoamento turbulento. No caso do escoamento na região anular, a forma para o encontro do número de *Nusselt* é diferente, a equação (161- 163) de *Dittus-Boelter* é utilizada (INCROPERA *et al.*, 2017). Usa-se $n = 0,4$, pois a temperatura da área superficial externa do tubo interno é maior que a média de temperatura do fluido na região anular do escoamento.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^n \quad (161)$$

$$Nu = 0,023 \cdot 455.559,08^{4/5} \cdot 4,51^{0,4} \quad (162)$$

$$Nu = 1.413,67 \quad (163)$$

Usa-se outra equação (164-166) de *Nusselt* com o objetivo de encontrar o coeficiente convectivo de transferência de calor (INCROPERA *et al.*, 2017). O comprimento característico L_c é o diâmetro hidráulico D_h . A condutividade térmica da água está para uma temperatura de 40°C.

$$h = \frac{kNu}{D_h} \quad (164)$$

$$h = \frac{0,629 \frac{W}{mK} \cdot 1.413,67}{(0,119 - 0,076)m} \quad (165)$$

$$h_f = 20.679 \frac{W}{m^2K} \quad (166)$$

Basta apenas encontrar a área superficial externa do tubo interno para a obtenção da resistência térmica de convecção na região anular. O diâmetro usado é o diâmetro externo do tubo interno (INCROPERA *et al.*, 2017). Seguem as equações (167-170).

$$A_f = \pi \cdot D_{ext} \cdot L_{comp.} = \pi \cdot 0,076 m \cdot 24 m \quad (167)$$

$$A_f = 5,7 m^2 \quad (168)$$

$$R_{t, frio} = \frac{1}{A_f h_f} = \frac{1}{5,73 m^2 \cdot 20.679 \frac{W}{m^2K}} \quad (169)$$

$$R_{t, f} = 8,44 \cdot 10^{-6} \frac{K}{W} \quad (170)$$

A resistência térmica total (INCROPERA *et al.*, 2017), nas equações (171-173), é o somatório de todas as três resistências calculadas, a soma da resistência por convecção do escoamento interno, a resistência por condução na parede do tubo interno e a resistência por convecção no escoamento na região anular. O coeficiente global de transferência de calor U pode ser calculado a partir da resistência térmica total, na equação (174).

$$R_{total} = \frac{1}{UA} = \frac{1}{A_q h_q} + \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L_{comp.}} + \frac{1}{A_f h_f} \quad (171)$$

$$R_{total} = \frac{1}{UA} = (58,8 + 20,4 + 8,44) \cdot 10^{-6} \frac{K}{W} \quad (172)$$

$$R_{total} = \frac{1}{UA} = 87,6 \cdot 10^{-6} \frac{K}{W} \quad (173)$$

$$UA = 11.419,77 \frac{W}{K} \quad (174)$$

O produto do coeficiente global de transferência de calor com a área, na equação (175), é igual ao mesmo produto, seja na região interna, de maior temperatura, seja na região externa, de menor temperatura (INCROPERA *et al.*, 2017). Usa-se a letra q , denominando quente, e a letra f , denominando frio.

$$UA = U_q A_q = U_f A_f \quad (175)$$

É necessário o cálculo da média log das diferenças de temperaturas no trocador de calor para o escoamento paralelo (INCROPERA *et al.*, 2017) através das equações (176-182). No lado quente do trocador de calor, o fluido entra a 80°C e sai a 50°C e, no lado frio, o fluido entra a 30°C e sai a 40°C.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (176)$$

$$\Delta T_1 = T_{q,ent} - T_{f,ent} \quad (177)$$

$$\Delta T_1 = 80^\circ C - 30^\circ C = 50^\circ C \quad (178)$$

$$\Delta T_2 = T_{q,sai} - T_{f,sai} \quad (179)$$

$$\Delta T_2 = 50^\circ C - 40^\circ C = 10^\circ C \quad (180)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{10^\circ C - 50^\circ C}{\ln(10^\circ C / 50^\circ C)} \quad (181)$$

$$\Delta T_{ml} = 24,85^\circ C \quad (182)$$

Finalizando, encontra-se a taxa de calor q (INCROPERA *et al.*, 2017), a partir das equações (183-185):

$$q = UA\Delta T_{ml} \quad (183)$$

$$q = 11.419,77 \frac{W}{K} \cdot 24,85^\circ C \quad (184)$$

$$q \cong 284 kW \quad (185)$$

4.7 PERDA DE CARGA NO TUBO INTERNO DO TROCADOR DE CALOR

Com o cálculo da perda de carga em uma bobina do primário e uma bobina do secundário, resta ter a perda de carga no trocador de calor para um melhor entendimento do sistema. O trocador de calor possui um tubo interno, onde há o escoamento do fluido que extraiu calor da bobina, chama-se o escoamento interno de escoamento do fluido “quente”, enquanto o tubo externo do trocador de calor escoo o fluido de menor temperatura pela região anular. O calor é transferido a partir do fluido mais quente para o sentido do tubo mais frio. Nesta seção, calcula-se apenas a perda de carga e variação de pressão do escoamento da região interna do tubo interno, ou seja, o escoamento do fluido de maior temperatura no trocador de calor. Encontra-se a velocidade do escoamento (FOX *et al.*, 2014), nas equações (186-187). A vazão considerada é a soma da vazão do primário com a vazão do secundário.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D_{int}^2}{4}} = \frac{2,26 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi \cdot 0,0728^2 m^2}{4}} \quad (186)$$

$$v = 0,54 \frac{m}{s} \quad (187)$$

O número de *Reynolds*, na equação (188), já foi calculado na seção anterior. O escoamento interno do trocador de calor é turbulento.

$$Re = 83.127,24 \quad (188)$$

Calcula-se o coeficiente de atrito de Darcy para escoamento turbulento, nas equações (189-191) (FOX *et al.*, 2014). A rugosidade do aço AISI 304L é de 70 micrômetros

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -1,8 \cdot \log \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,7D_{int}} \right)^{1,1} + \frac{6,9}{Re} \right) \quad (189)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -1,8 \cdot \log \left(\left(\frac{70 \cdot 10^{-6} m}{3,7 \cdot 0,0728 m} \right)^{1,1} + \frac{6,9}{83.127,24} \right) \quad (190)$$

$$f_d = 2,22 \cdot 10^{-2} \quad (191)$$

A variação de pressão e a perda de carga são calculadas (FOX *et al.*, 2014), nas equações (192-197). O comprimento do caminho do escoamento do trocador de calor é de 24 m.

$$\Delta P = f_d \frac{L \rho \bar{V}^2}{2D_i} \quad (192)$$

$$\Delta P = 2,22 \cdot 10^{-2} \frac{24 m \cdot 980,53 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,54^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 \cdot 0,0728 m} \quad (193)$$

$$\Delta P = 1.061,65 Pa = 0,011 Bar = 0,011 \frac{kgf}{cm^2} \quad (194)$$

$$h_l = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (195)$$

$$h_l = \frac{1.061,65 Pa}{980,53 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} \quad (196)$$

$$h_l = 0,11 m. c. a. \quad (197)$$

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos através da metodologia aplicada, analisa os valores apresentados, avalia possíveis alternativas no dimensionamento do sistema hidráulico e propõe estudos que podem ser realizados em trabalhos futuros.

5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As Tabelas 6, 7 e 8 mostram os resultados desde a tensão na região L e S das conexões de fases diferentes de delta-estendido dos secundários, até a perda sob carga total do secundário.

Tabela 6 – Tensões dos trechos S e L para as fases das conexões dos secundários.

| Tipo de Conexão | Tensão fase-fase (V) | L (V) | S (V) | Fase | Quantidade dessa conexão no secundário |
|------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|---|
| Delta Estendido | 690 | 120,27 | 336,72 | -25° | 3 |
| Delta Estendido | 690 | 357,17 | 206,21 | -15° | 3 |
| Delta Estendido | 690 | 583,21 | 69,44 | -5° | 3 |
| Delta Estendido | 690 | 583,21 | 69,44 | 5° | 3 |
| Delta Estendido | 690 | 357,17 | 206,21 | 15° | 3 |
| Delta Estendido | 690 | 120,27 | 336,72 | 25° | 3 |

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 6 mostra que, existem 18 conexões de delta-estendido nos enrolamentos dos secundários. O enrolamento do primário do transformador possui uma conexão estrela. A Tabela 7 mostra os resultados do número de espiras e resistência elétrica numa bobina dos secundários.

Tabela 7 – Cálculo de resistência elétrica e número de espiras de bobinas dos secundários.

| Fase | Número de espiras de L | Número de espiras de S | Número de espiras (L+S) Uma bobina | Resistência em L corrigida (Ω) | Resistência em S corrigida (Ω) |
|------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|---|---|
| -25° | 2,22 | 6,21 | 8,43 | $3,08 \cdot 10^{-3}$ | $8,63 \cdot 10^{-3}$ |
| -15° | 6,59 | 3,80 | 10,39 | $7,01 \cdot 10^{-3}$ | $5,29 \cdot 10^{-3}$ |
| -5° | 10,76 | 1,28 | 12,04 | $15,0 \cdot 10^{-3}$ | $1,78 \cdot 10^{-3}$ |
| 5° | 10,76 | 1,28 | 12,04 | $15,0 \cdot 10^{-3}$ | $1,78 \cdot 10^{-3}$ |
| 15° | 6,59 | 3,80 | 10,39 | $7,01 \cdot 10^{-3}$ | $5,29 \cdot 10^{-3}$ |
| 25° | 2,22 | 6,21 | 8,03 | $3,08 \cdot 10^{-3}$ | $8,63 \cdot 10^{-3}$ |

Fonte: Elaboração própria.

Uma bobina do secundário possui, no máximo, 12 espiras, enquanto todas as bobinas do primário possuem 35 espiras cada. A maior quantidade de espiras nas bobinas do primário se deve ao fato de ter uma maior tensão na sua tensão fase-neutro do que se comparar a qualquer região das conexões de delta-estendido dos secundários, seja na região L ou S.

As Tabelas 8, 9 e 10 são referentes aos cálculos desde o volume de uma bobina de cada fase do secundário, até o resultado final, que seria a vazão volumétrica em uma bobina do secundário e a vazão total do primário e dos secundários.

Tabela 8 – Volumes de diferentes bobinas dos secundários

| Fase | Volume de L (m^3) | Volume de S (m^3) | Volume de (L + S) Uma Bobina (m^3) | Volume de uma bobina do primário |
|------|-----------------------|-----------------------|--|----------------------------------|
| -25° | $1,84 \cdot 10^{-4}$ | $5,15 \cdot 10^{-4}$ | $6,99 \cdot 10^{-4}$ | $2,33 \cdot 10^{-3}$ |
| -15° | $5,47 \cdot 10^{-4}$ | $3,16 \cdot 10^{-4}$ | $8,62 \cdot 10^{-4}$ | |
| -5° | $8,92 \cdot 10^{-4}$ | $1,06 \cdot 10^{-4}$ | $9,99 \cdot 10^{-4}$ | |
| 5° | $8,92 \cdot 10^{-4}$ | $1,06 \cdot 10^{-4}$ | $9,99 \cdot 10^{-4}$ | |
| 15° | $5,47 \cdot 10^{-4}$ | $3,16 \cdot 10^{-4}$ | $8,62 \cdot 10^{-4}$ | |
| 25° | $1,84 \cdot 10^{-4}$ | $5,15 \cdot 10^{-4}$ | $6,99 \cdot 10^{-4}$ | |

Fonte: Elaboração própria.

Uma bobina do primário possui um maior volume se comparado a qualquer bobina dos secundários, isso se deve ao fato de que, apesar de uma espira de uma bobina do secundário ser maior, uma bobina do primário possui 35 espiras, enquanto a maior bobina do secundário possui cerca de 12 espiras. O volume de uma bobina do primário ganha pelo comprimento, já que a área da seção transversal de cobre é a mesma para ambos.

Tabela 9 – Resultados de perdas sob carga dos secundários

| Fase Secundário | \dot{q} (W/m ³) Secundário | q''_s (W/m ²) Secundário | q (W) Secundário | q (kW) Total Primário | q (W) Total Secundário |
|-----------------|--|--|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| -25° | $2,01 \cdot 10^6$ | $2,22 \cdot 10^3$ | $1,41 \cdot 10^3$ | 88,7 | 195,0 |
| -15° | $1,41 \cdot 10^6$ | $1,55 \cdot 10^3$ | $1,22 \cdot 10^3$ | | |
| -5° | $9,88 \cdot 10^5$ | $1,09 \cdot 10^3$ | $9,87 \cdot 10^2$ | | |
| 5° | $9,88 \cdot 10^5$ | $1,09 \cdot 10^3$ | $9,87 \cdot 10^2$ | | |
| 15° | $1,41 \cdot 10^6$ | $1,55 \cdot 10^3$ | $1,22 \cdot 10^3$ | | |
| 25° | $2,01 \cdot 10^6$ | $2,22 \cdot 10^3$ | $1,41 \cdot 10^3$ | | |

Fonte: Elaboração própria.

A perda sob carga nos enrolamentos é maior nos secundários do que no primário pelos seguintes motivos:

1º: O comprimento total do enrolamento no secundário é maior que no primário. O primário possui 36 bobinas na conexão estrela, enquanto os secundários possuem 162 bobinas nas 18 conexões de delta-estendido.

2º: As espiras dos secundários possuem um fator de correção do número de espiras necessário devido à queda de tensão sob carga, um fator de correção associado à presença de harmônicos e um fator de correção devido às correntes de Foucault empregado.

3º: As perdas sob carga dos enrolamentos do secundário levam em conta a corrente elétrica na região S e na região L.

Tabela 10 – Vazões mássicas e vazões volumétricas dos secundários do transformador

| Fase Secundários | \dot{m} (kg/s) Secundários | Q (L/h) Uma Bobina Secundários | Q (L/h) Total Primário | Q (L/h) Total Secundário |
|------------------|------------------------------------|---|--------------------------------|-------------------------------------|
| -25° | $1,12 \cdot 10^{-2}$ | 40,45 | 2.547 | 5.559 |
| -15° | $9,70 \cdot 10^{-3}$ | 34,92 | | |
| -5° | $7,87 \cdot 10^{-3}$ | 28,32 | | |
| 5° | $7,87 \cdot 10^{-3}$ | 28,32 | | |
| 15° | $9,70 \cdot 10^{-3}$ | 34,92 | | |
| 25° | $1,12 \cdot 10^{-2}$ | 40,45 | | |

Fonte: Elaboração própria.

O motivo pelo qual a vazão volumétrica total do secundário ser maior que o do primário se deve ao fato de que as perdas elétricas sob carga são maiores nos secundários. Então precisa-se de mais água deionizada para extrair uma quantidade maior de calor nos secundários. A Tabela 11 mostra os resultados de variação de pressão e perda de carga em uma bobina de diferentes fases dos secundários.

Tabela 11 – Resultados de vazões e pressões para uma bobina de cada secundário.

| Fase | Q Uma Bobina (m ³ /s) | Velocidade (m/s) | Reynolds | f_d |
|------|--|----------------------|--------------------------------------|-------------------|
| -25° | $1,12 \cdot 10^{-5}$ | 0,325 | 6.965 | 0,0373 |
| -15° | $9,70 \cdot 10^{-6}$ | 0,281 | 6.012 | 0,0390 |
| -5° | $7,87 \cdot 10^{-6}$ | 0,228 | 4.877 | 0,0417 |
| 5° | $7,87 \cdot 10^{-6}$ | 0,228 | 4.877 | 0,0417 |
| 15° | $9,70 \cdot 10^{-6}$ | 0,281 | 6.012 | 0,0390 |
| 25° | $1,12 \cdot 10^{-5}$ | 0,325 | 6.965 | 0,0373 |
| Fase | ΔP (kPa) | ΔP (Bar) | ΔP (kgf/cm ²) | h_l (m.c.a.) |
| -25° | 3,99 | $3,99 \cdot 10^{-2}$ | $4,07 \cdot 10^{-2}$ | 0,4070 |
| -15° | 3,84 | $3,84 \cdot 10^{-2}$ | $3,91 \cdot 10^{-2}$ | 0,3910 |
| -5° | 3,12 | $3,12 \cdot 10^{-2}$ | $3,18 \cdot 10^{-2}$ | 0,3183 |
| 5° | 3,12 | $3,12 \cdot 10^{-2}$ | $3,18 \cdot 10^{-2}$ | 0,3183 |
| 15° | 3,84 | $3,84 \cdot 10^{-2}$ | $3,91 \cdot 10^{-2}$ | 0,3910 |
| 25° | 3,99 | $3,99 \cdot 10^{-2}$ | $4,07 \cdot 10^{-2}$ | 0,4070 |

Fonte: Elaboração própria.

A variação de pressão em uma bobina do primário é de 34,4 kPa. A maior variação de pressão em uma bobina do secundário é próxima de 4 kPa. Essa diferença de pressões se deve ao fato de que o comprimento de uma bobina do primário é maior que o comprimento de qualquer bobina dos secundários. A velocidade do escoamento de uma bobina do primário é de 0,57 m/s, enquanto a maior velocidade em uma bobina dos secundários é de 0,33 m/s. O fator de atrito de Darcy para escoamento turbulento é até maior nem qualquer uma das bobinas dos

secundários se comparar ao primário, mas longe de se aproximar a uma variação de pressão em uma bobina do primário.

Os valores de vazão total, variação de pressão, perda de carga do primário, dos secundários e do coeficiente global de transferência de calor do trocador de calor estão apresentados na Tabela 12. A vazão do trocador de calor na Tabela 12 considera somente o tubo interno.

Tabela 12 - Principais resultados do esquema hidráulico

| | Q Total (m ³ /s) | ΔP (kPa) | h_l (m.c.a.) | U_q (W/m ² K) | U_f (W/m ² K) |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Primário | $0,71 \cdot 10^{-3}$ | 34,4 | 3,50 | ----- | ----- |
| Secundários | $1,56 \cdot 10^{-3}$ | 3,99, em $\pm 25^\circ$ | 0,41, em $\pm 25^\circ$ | ----- | ----- |
| | | 3,84, em $\pm 15^\circ$ | 0,39, em $\pm 15^\circ$ | | |
| | | 3,12, em $\pm 5^\circ$ | 0,32, em $\pm 5^\circ$ | | |
| Trocador de Calor | $2,26 \cdot 10^{-3}$ | 1,1 | 0,11 | 2.080 | 1.993 |

Fonte: Elaboração própria

A vazão volumétrica total de água deionizada no tubo interno do trocador de calor é igual à soma das vazões do primário e dos secundários.

A perda de carga devido à circulação de água deionizada nas bobinas do primário é maior que a perda de carga associada às bobinas dos secundários. Isso ocorre porque as bobinas do primário possuem um maior número de espiras em comparação às bobinas dos secundários, ou seja, possuem um maior comprimento, ou caminho que a água deionizada tem que percorrer, e quanto maior for esse caminho, maior será a perda de carga, considerando as velocidades de escoamento e fatores de atrito de Darcy envolvidos. Esses valores de pressão e vazão encontrados se devem à decisão de projeto de conectar todas as bobinas, do primário e dos secundários, em paralelo hidráulicamente. Outras possíveis decisões de projeto, tais como, conectar as bobinas em grupos em série e em paralelo levariam a diferentes resultados de pressão e vazão, bem como a elevação de temperatura de 30°C definida no projeto. Sobre o trocador de calor, o coeficiente global de transferência de calor U está relacionado à resistência térmica total ou local. O coeficiente U_q serve para o escoamento da água deionizada quente, na região interna do tubo interno do trocador, e U_f é relacionado ao escoamento da água comum fria, na região anular do tubo bi tubular. A Tabela 13 mostra que, o valor referencial para o

coeficiente global de transferência de calor, para uma combinação água-água, tem como faixa típica valores entre 850 e 1700 W/m²K. O escoamento no tubo interno do trocador de calor e no anular possuem coeficientes globais de transferência de calor 22% e 17% maiores, respectivamente, que o limite superior da referência da Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de referência do coeficiente global de transferência de calor para diferentes combinações de fluidos

| Combinação dos fluidos | U (W/m²K) |
|---|---------------------------------|
| Água para água | 850-1700 |
| Água para óleo | 110-350 |
| Condensador de vapor de água | 1000-6000 |
| Condensador de amônia (água nos tubos) | 800-1400 |
| Condensador de álcool (água nos tubos) | 250-700 |

Fonte: (INCROPERA *et al.*, 2017)

O trocador de calor, apesar de possui uma maior vazão volumétrica se comparado ao primário e aos secundários separadamente, possui a menor perda de carga. Isso se deve ao fato de, embora o tubo interno do trocador tenha a maior velocidade média de escoamento, ele tem um menor comprimento tubular e um diâmetro interno aproximadamente 5 vezes maior se comparado a essas características de uma bobina. Isso explica o fato de o trocador de calor ter a menor perda de carga de forma comparativa.

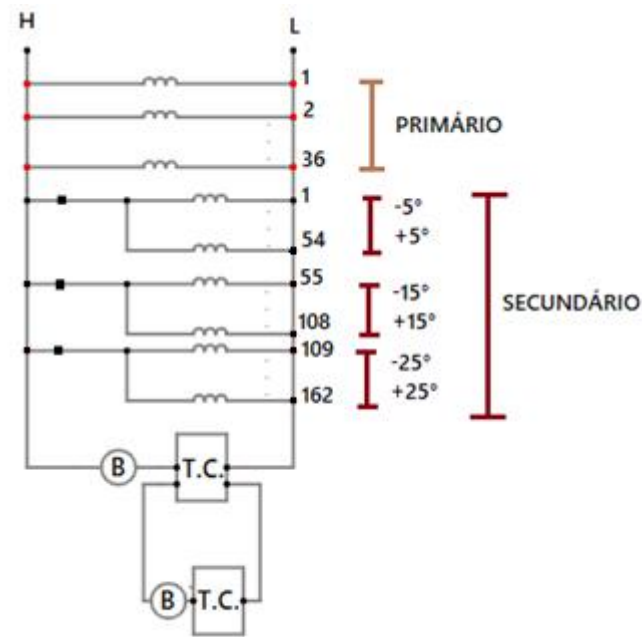
A definição de que a água deionizada saia à 80°C da bobina é devido à tentativa de se afastar dos 100°C, a temperatura de ebulição da água deionizada à 1 atm. Contudo seria completamente plausível a escolha da temperatura de saída por volta de 90°C, mais arriscado, a escolha feita foi conservadora, no entanto, poderia ser ainda mais conservadora, com a adoção de uma temperatura limite de 70 ou 75°C, por exemplo. A opção pela temperatura da saída da bobina de 80°C está atrelada à incerteza de outros fatores, por exemplo, o fluido frio sendo fornecido ao trocador a temperaturas maiores que 30 °C devido às condições ambientais, imprecisões de informações e dados de entrada necessários aos cálculos e à modelagem matemática utilizada.

A escolha da temperatura de entrada da água deionizada na bobina a 50 °C foi pensada em conjunto com o trocador de calor, como o escoamento no trocador é paralelo, de maneira alguma a temperatura do fluido frio poderia se sobrepor a temperatura do fluido quente. O fluido “quente” entra no trocador de calor à 80°C e sai à 50°C, enquanto o fluido frio entra no trocador de calor à 30 °C e sai à 40 °C. A utilização da temperatura de 30 °C como a temperatura inicial da fonte “fria” se baseia no fato de que é necessário a utilização de um outro trocador de calor,

para garantir que a fonte “fria” esteja sempre nesta temperatura para resfriar a água deionizada aquecida. Lembrando que água de processo industrial, água tratada com anti-incrustantes, agentes anticorrosivos e contra agentes biológicos danosos, para ser utilizada em circuito fechado de refrigeração em uma planta industrial, escoar na região anular do trocador de calor, enquanto água deionizada escoar no tubo interno do trocador.

Para a escolha da bomba que mais atenda ao projeto do diagrama hidráulico, a máquina de fluxo precisa ter uma vazão volumétrica de $Q = 2,26 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s}$, que é a soma da vazão do primário com o secundário, e é a vazão no trocador de calor. A maior perda de carga está no primário, então é necessário que a bomba tenha pelo menos essa perda de carga, somada à perda de carga do trocador de calor com uma folga para eventuais ajustes futuros. Como a perda de carga do primário é substancialmente maior que a perda de carga do secundário, é necessário implementar restrições de vazão, perda de carga adicional localizada, no circuito hidráulico dos secundários, para que essa restrição possa absorver o excesso de pressão antes que a água deionizada entre nas bobinas dos secundários. Se esse dispositivo não for implementado, assume-se que a vazão será maior e que o fluido de resfriamento sairá das bobinas dos secundários à uma temperatura menor que 80°C. Há desvantagens no uso desses dispositivos no que diz respeito ao projeto hidráulico, como esses dispositivos absorvem muita energia de perda de carga, a eficiência do sistema é baixa. Caso não haja a utilização de estranguladores nas mangueiras das bobinas dos secundários, ocorreria um aumento de vazão nessa região, e a água deionizada sairia a menos de 80 °C das bobinas dos secundários, o que não seria um problema, mas sim um excesso de vazão volumétrica de água deionizada. O primário precisa de 34,3 kPa de pressão, o trocador de calor, no tubo interno, requer 1,1 kPa, totalizando a pressão da bomba de circulação em no mínimo 35,4 kPa enquanto os secundários necessitam, no máximo, cerca de 4 kPa. Isso quer dizer que o estrangulador precisa absorver cerca de 30 kPa antes que a água deionizada entre no caminho para resfriar qualquer bobina de qualquer conexão do secundário. A Figura 19 mostra o desenho do diagrama hidráulico, o sistema possui uma coluna H de alta pressão, em que a bomba adiciona pressão ao escoamento, e possui uma coluna L de baixa pressão. Observe que o trocador de calor tem seu próprio sistema, com uma bomba à parte e um outro trocador de calor.

Figura 19 – Diagrama hidráulico do sistema de resfriamento dos enrolamentos.



Fonte: Elaboração Própria.

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A Tabela 14 mostra a performance do sistema hidráulico comparando diferentes dimensões de tubos de cobre, incluindo o pior caso, analisado neste estudo, que possui um diâmetro externo de 12 mm e uma espessura de 1 mm.

Tabela 14 – Comparação de desempenho para bobinas de diferentes tubos de cobre.

| Tubo $D_{ext} \times Esp$ (mm) | Q_{total} (L/h) | Perda Total q (kW) | Nº de Módulos do Trocador | U_q (W/m ² K) | U_f (W/m ² K) |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 12 x 1 | 8.146 | 284 | 4 mód / 24 m | 2.080 | 1.992 |
| 14 x 2 | 3.734 | 130 | 3 mód / 18 m | 1.247 | 1.220 |
| 12,7 x 1,27 | 6.173 | 215 | 4 mód / 24 m | 1.546 | 1.513 |
| 12,7 x 2,11 | 4.013 | 140 | 3 mód / 18 m | 1.338 | 1.310 |

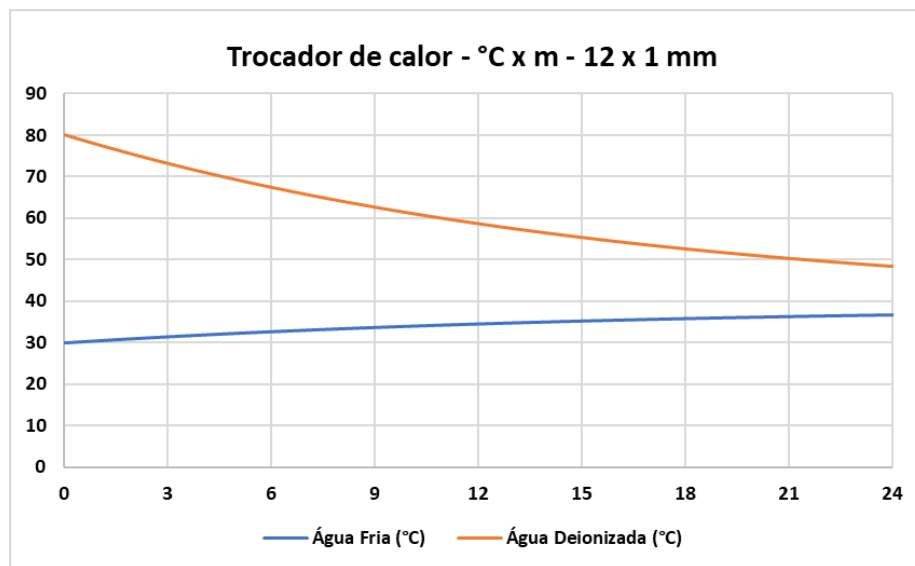
Fonte: Elaboração própria; dados dos tubos de cobre de: (SCTUBES, 2023) e (HTC, 2023)

A Tabela 14 mostra que o diâmetro externo e a espessura do tubo de cobre impactam significativamente nas perdas que devem ser removidas dos enrolamentos, na vazão

volumétrica total da bomba que escoar água deionizada e nas dimensões do trocador de calor. O tubo de cobre de 14 x 2 mm é a melhor opção pois é o enrolamento que gera menos perdas, menor vazão volumétrica e o menor número de módulos de 6 m do trocador de calor.

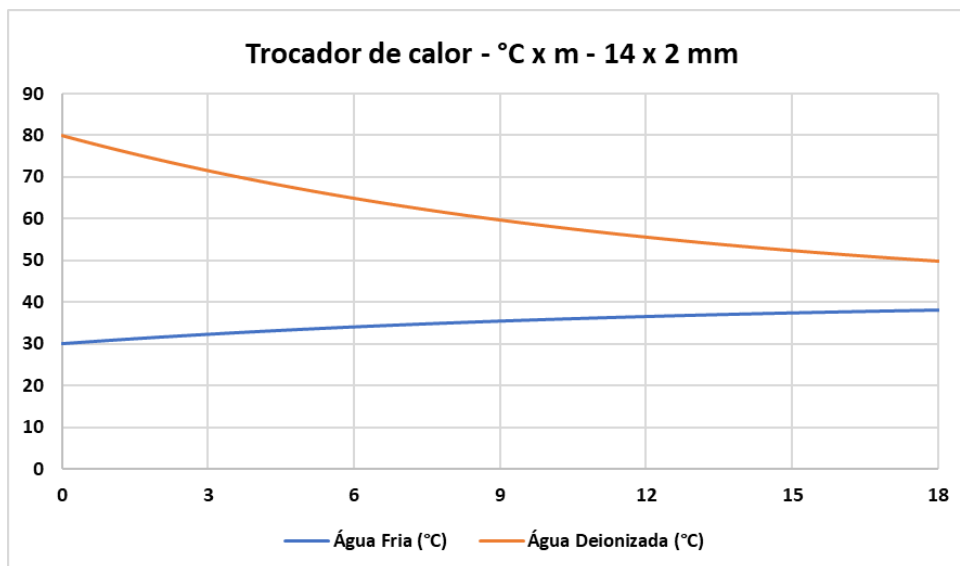
As Figuras 20 e 21 mostram as curvas de temperatura da água deionizada e a água industrial ao longo do trocador de calor de tubo duplo CD129 com escoamento paralelo, com as dimensões do tubo de cobre a 12 x 1 mm e 14 x 2 mm, respectivamente.

Figura 20 – Distribuição de temperaturas no trocador de calor CD129 (bobinas de cobre 12 x 1 mm).



Fonte: Elaboração Própria

Figura 21 – Distribuição de temperaturas no trocador de calor CD129 (bobinas de cobre 14 x 2 mm).



Fonte: Elaboração Própria

6 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o sistema de remoção de perdas sob carga do transformador elétrico de potência apresentado, através da circulação de água deionizada em contato com os condutores, foi efetivo. Tal sistema se mostrou capaz de limitar a elevação de temperatura dos enrolamentos primário e secundários e, conseqüentemente, garantir uma maior vida útil aos materiais isolantes elétricos dos enrolamentos, no que diz respeito à degradação por temperatura.

Adicionalmente, é possível constatar a importância dos parâmetros envolvidos no sistema de remoção de perdas. Tais parâmetros são: corrente elétrica, dimensões das bobinas, número de bobinas eletricamente em paralelo e em série, arranjo hidráulico das bobinas em paralelo e em série, resistência elétrica das bobinas tubulares em cobre, vazão volumétrica do fluido de resfriamento, características do trocador de calor, temperatura da fonte “fria” disponível, perdas sob carga, notadamente, perdas Joule e as perdas por correntes parasitas, incluído efeitos dos harmônicos, as temperaturas de entrada e saída da água deionizada nas bobinas (elevação de temperatura aceitável).

É importante salientar o impacto das premissas e das decisões de projeto referentes ao delta de temperatura entre a temperatura de entrada e de saída do fluido de resfriamento na bobina. Como o fluido entra a 50°C e sai a 80°C, o delta de temperatura é de 30°C, é importante ressaltar que, se o delta de temperatura fosse maior, o fluido precisaria de mais tempo trocando calor dentro da bobina, o que diminuiria a velocidade do escoamento e, como a área da seção transversal interna do tubo interno se mantém constante, a vazão volumétrica requerida seria menor.

Cabe destacar os seguintes ganhos associados a utilização deste tipo de sistema de remoção de perdas sob carga, se a refrigeração fosse feita somente com ar, por convecção natural ou ventilação forçada, seria necessário um volume muito grande de ar para remover todo o calor das perdas, um ganho é a diminuição do sistema de VAC (Ventilação e Ar Condicionado) em salas de equipamentos elétricos e transformadores em instalações industriais. No caso deste trabalho, as perdas sob carga, da ordem de 284 kW são removidas da sala de equipamentos através do fluido de resfriamento. Esse calor deixa de ser removido pelo sistema de VAC, isto para somente um transformador, caso fossem, por exemplo, quatro transformadores, a remoção pelo VAC evitada seria de quase 1,14 MW. Tal desempenho está

relacionado ao fato de, em termos de um mesmo volume e mesma elevação de temperatura, a água ter maior capacidade de remover calor que o ar.

É importante mencionar, a partir da análise de sensibilidade, a importância das dimensões como o diâmetro externo, a espessura e o comprimento do tubo de cobre do enrolamento em relação aos resultados da vazão volumétrica, das perdas sob carga e das dimensões do trocador de calor.

O diagrama hidráulico proposto neste trabalho usou, como uma escolha, que todas as bobinas, do primário e dos secundários, estejam em paralelo hidráulicamente. Essa solução tem uma desvantagem no sentido da eficiência de energia empregada pela bomba. O uso de estranguladores implica em perdas significativas de pressão, pelo fato de uma bobina do primário necessitar relativamente de valores significativamente maiores de pressão se comparada às bobinas dos secundários. Um trabalho futuro poderia propor uma solução alternativa: o arranjo em série de um certo número de bobinas dos secundários, a definir, por exemplo, algumas bobinas dos secundários podem estar organizadas em série, e essa série estar em paralelo com algumas outras bobinas do secundário, e assim em diante, no projeto hidráulico. Mesmo que seja requisitado o uso de estranguladores, sua absorção de pressão seria menor se comparado à solução proposta neste trabalho.

O trocador de calor principal no diagrama hidráulico pode ser otimizado, apesar de atender ao projeto hidráulico. Cabe avaliar outros modelos disponíveis no mercado ou na indústria com relação ao desempenho e para que seja mais compacto.

Um assunto interessante, que pode ser tema para um futuro Trabalho de Conclusão de Curso, seria o dimensionamento de um trocador de calor específico para retirar o calor proveniente das perdas do núcleo de um transformador elétrico de potência. O trocador de calor seria alocado acima da face superior do núcleo, por exemplo, sendo de tubo duplo. Sugere-se a utilização da combinação de fluidos água deionizada e ar ou água industrial e ar. A água deionizada teria seu escoamento através do tubo interno, enquanto o ar, impulsionado por um sistema de ventilação no trocador, escoaria pela região externa do tubo externo dos tubos concêntricos. O mais seguro seria o escoamento da água deionizada no interior do tubo interno porque, caso haja uma fratura ou furo no tubo interno, esse líquido seja recolhido dentro do tubo externo, evitando o contato do líquido com o núcleo do transformador, o tubo externo tendo o papel de conduzir o fluido vazado para um detector de vazamento. Tal solução reduz a probabilidade da ocorrência de curto-circuito caso o líquido vaze, “pingando” no núcleo ou nas bobinas do transformador elétrico.

Outro tema interessante seria o dimensionamento do isolamento térmico entre o núcleo e os enrolamentos. Caberia escolher um material isolante térmico e determinar a temperatura real, ou aproximada, do núcleo de forma a prover o isolamento térmico necessário entre o enrolamento e o núcleo, sempre buscando obter uma vida útil mais prolongada do transformador.

A análise de possíveis fluidos alternativos à água deionizada, bem como, a avaliação de eventual corrosão associada à presença de água deionizada em tubos de cobre são outros temas que podem ser considerados para futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIM, Edson. **Máquinas elétricas e acionamento**. 3. ed. São Paulo: LTC, 2014.
- BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012.
- BRASFAIBER (São Paulo). Ventilação em salas com Painéis Elétricos e Transformadores: o que é e como funciona. Disponível em: <https://www.brasfaiber.com.br/ventilacao-em-salas-com-paineis-eletricos-e-transformadores-o-que-e-e-como-funciona/>. Acesso em: 10 jul. 2023.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2013.
- EDISCIPLINAS.USP, **Exemplo de conexão Y- Δ em um único núcleo com três pernas**, 2023. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4115303/mod_resource/content/4/7_Considerações_Finais_Transformadores_v3%20%5BModo%20de%20Compatibilidade%5D.pdf. Acesso em: 23 maio. 2023.
- FOX, Robert W. *et al.* **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014.
- HALLIDAY et al. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016.
- HITACHI ENERGY HInk Big install small: CompactCool™ Technology for dry-type transformers., 2023, Disponível em: <https://www.hitachienergy.com/it/it/products-and-solutions/transformers/distribution-transformers/dry-type-transformers/compactcool-technology>. Acesso em: 26 abr. 2023.
- HTC (Estados Unidos). Round Tube: dead soft temper. Dead Soft Temper. Dimensões de tubos de cobre. Disponível em: <http://www.hunterdontransformer.com/copper-tubing.html>. Acesso em: 10 jul. 2023.
- IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents, In IEEE Std C57.110™-. IEEE Std C57.110-2008), vol., no., pp.1-68, 31 Oct. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8511103.
- ILTEC (Brasil) (comp.). Sistema de Isolação do Motor Elétrico WEG. 2015. Disponível em: <https://www.iltec.com.br/noticias/sistema-de-isolacao-motor-eletrico-weg-2/>. Acesso em: 07 jul. 2023.
- INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017.
- LANDGRAF, Fernando José Gomes *et al.* Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos. **Aços: perspectivas para os próximos**, v. 10, p. 109-128, 2002.

LIBRETEXTS (comp.). COLLEGE PHYSICS: openstax. Califórnia: Libretexts, 2023.

LIBRETEXTS (comp.). 23.10: Transformers. 2023. Disponível em: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/Book%3A_College_Physics_1e_\(OpenStax\)/23%3A_Electromagnetic_Induction_AC_Circuits_and_Electrical_Technologies/23.10%3A_Transformers#:~:text=VsVp%3DN,of%20loops%20in%20their%20coils](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/Book%3A_College_Physics_1e_(OpenStax)/23%3A_Electromagnetic_Induction_AC_Circuits_and_Electrical_Technologies/23.10%3A_Transformers#:~:text=VsVp%3DN,of%20loops%20in%20their%20coils). Acesso em: 10 jul. 2023.

MARTIGNONI, Alfonso. Transformadores. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1983.

NACIENTIFICO, **Comparação entre Destilação e Deionização**, 2023, Figura. Disponível em: <https://www.nacientifico.com.br/voce-sabe-a-diferenca-entre-agua-destilada-da-agua-deionizada/>. Acesso em: 25 abr. 2023.

NACIENTIFICO, **DEIONIZATION**, 2023, Disponível em: <https://www.nacientifico.com.br/voce-sabe-a-diferenca-entre-agua-destilada-da-agua-deionizada/>. Acesso em: 25 abr. 2023.

NACIENTÍFICO (comp.). Você sabe a diferença entre Água Destilada e Água Deionizada? 2021. Disponível em: <https://www.nacientifico.com.br/voce-sabe-a-diferenca-entre-agua-destilada-da-agua-deionizada/>. Acesso em: 08 jul. 2023.

NWL (Estados Unidos). **Industrial Transformers & Inductors**: industrial transformers & inductors specifications. Industrial Transformers & Inductors Specifications. 2023. NWL. Disponível em: <https://www.nwl.com/products/transformers-inductors/industrial-transformers-inductors/>. Acesso em: 06 jul. 2023.

QUORA (Estados Unidos) (comp.). Why is the outer diameter measured in the case of tubes? 2018. Rede Social. Disponível em: <https://www.quora.com/Why-is-the-outer-diameter-measured-in-the-case-of-tubes>. Acesso em: 07 jul. 2023.

SCIENCEFACTS (org.). Faraday's Law: faraday's law equation. Faraday's Law Equation. 2023. Disponível em: <https://www.sciencefacts.net/faradays-law.html>. Acesso em: 07 jul. 2023.

SCTUBES (Itália). **General catalogue**: copper tubes for air conditioning and plumbing sector. Disponível em: <https://sctubes.com/pdf/en.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2023.

SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA. Universidade de São Paulo (org.). Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4115303/mod_resource/content/4/7_Considera%C3%A7%C3%B5es_Finais_Transformadores_v3%20%5BModo%20de%20Compatibilidade%5D.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023.

SIEMENS. **SINAMICS PERFECT HARMONY Uptime. All the time.**: the sinamics perfect harmony gh180 water-cooled drive usa.siemens.com/perfectharmony. The SINAMICS Perfect Harmony GH180 water-cooled drive usa.siemens.com/perfectharmony. 2022. Disponível em: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:4b644e4734afdccce245c1b59214c8990ff08de61/watercooled-perfectharmony-brochure-june-2018.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

TETRAPAK. TETRA PAK® **tubular heat exchanger** c. 2022. disponível em: <https://www.tetrapak.com/content/dam/tetrapak/media-box/global/en/processing/technology-area-general/heat-treatment/documents/tetra-pak-tubular-heat-exchanger-pd-leaflet.pdf>. acesso em: 08 jul. 2023.