

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Beatriz Kretzer

Reprojeto de transformadores de distribuição: estudo de caso

Florianópolis

2021

Beatriz Kretzer

Reprojeto de transformadores de distribuição: estudo de caso

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Coorientador: Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.

Florianópolis

2021

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

Kretzer, Beatriz

Reprojeto de transformadores de distribuição : estudo de caso / Beatriz Kretzer ; orientador, Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Patrick Kuo Peng, 2021.
95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Transformador. 3. Reprojeto.
4. Conserto. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Peng, Patrick Kuo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Beatriz Kretzer

Reprojeto de transformadores de distribuição: estudo de caso

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 19 de maio de 2021.

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Eletric. Ricardo de Araujo Elias, M.Sc.
Avaliador
Celesc Distribuição S.A.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Bernadete e Ilberto.

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque é a partir dele que tudo é possível. Porque Ele me guia e ajuda a fazer com que as coisas se encaminhem do jeito certo, ainda que nem sempre seja do jeito que eu havia imaginado que seriam.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram, cada um do seu jeito, em casa e na nossa empresa, a Belman. Ilberto, meu pai, muito me ajudou no desenvolvimento deste trabalho, principalmente por ser também a minha maior inspiração e aquele com quem eu compartilho muito do que aprendo. Bernadete, minha mãe, ajudou muito também, sempre estando disposta a conversar e a escutar, além de ajudar a melhorar o dia com comidas deliciosas sempre que possível. Muito obrigada! Vocês sabem que cheguei até aqui porque tive vocês do meu lado, me apoiando e ajudando sempre.

Aos meus irmãos, André e Marlon, que me acompanham desde que nasceram. Eles me ensinam a ter paciência e também me fazem rir, mesmo quando eu não acho que será possível. Vocês têm um dom para isso. Obrigada pelo companheirismo e pela nossa convivência, que enchem a minha vida de momentos alegres.

Ao meu noivo Artur, que me apoia e me incentiva sempre. Agradeço por escutar pacientemente sobre as minhas descobertas animadas durante o desenvolvimento deste trabalho e por todas as suas preciosas sugestões durante a revisão dele. Muito obrigada também por me fazer transbordar e deixar os meus dias tão mais felizes, mesmo quando são corridos por causa do TCC e do final do curso.

A todos os meus professores, de todos os níveis escolares. Todos, sem exceção, ajudaram a moldar a pessoa que sou hoje. Muito eu aprendi com cada um, desde a época do pré-escolar. Mas quero agradecer aqui, especialmente, ao meu orientador e professor Jhoe e ao meu coorientador e professor Patrick, que me guiaram no desenvolvimento deste trabalho, sanando dúvidas e trazendo questionamentos e sugestões importantes. Quero agradecer também ao professor Nelson, que sanou algumas dúvidas e ajudou a encontrar referências bibliográficas quando eu estava só começando. Professores, muito obrigada mesmo.

A todos os meus amigos, que me ajudaram no decorrer da vida e que acreditaram em mim, me dando forças quando me faltava, muitas vezes no decorrer do curso de Engenharia Elétrica. Aqui incluo aqueles que são da família, os que já estudaram comigo e também os que trabalham ou trabalharam comigo. Sou muito feliz por poder contar com pessoas tão incríveis. Muito obrigada! A vida fica mais colorida com vocês por perto, mesmo que isso seja mais virtual do que presencial hoje em dia.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo de caso em que é feito o reprojeto de um transformador trifásico de distribuição de 112,5 kVA, com isolamento a óleo, que tem como objetivo consertar o equipamento após ele ter sido avariado. Para isto, apresentou-se no trabalho os conceitos básicos relacionados aos transformadores, desde o seu princípio de funcionamento até a sua construção. Descreveu-se a metodologia e os cálculos utilizados no reprojeto, que tem como base um programa numérico desenvolvido por Ilberto José Kretzer e usado hoje na empresa Belman Transformadores e Equipamentos Elétricos, localizada em Biguaçu (SC). Foi feita também uma comparação entre o resultado dos cálculos do reprojeto com os resultados dos ensaios elétricos, após o transformador ser consertado e ensaiado pela empresa. Desta forma, mostrou-se a validade da metodologia e dos cálculos realizados para este estudo de caso.

Palavras-chave: Transformador. Reprojeto. Conserto.

ABSTRACT

In this work it is presented a case study in which a distribution transformer of 112,5 kVA with oil insulation was reprojected. Its objective was repairing the equipment after it had been damaged. Therefore, it was presented in this work the basic concepts related with transformers, since its operation principle until its construction. Then the methodology and the calculations were described, being based in the program that have been developed by Ilberto José Kretzer and is used today in the company Belman Transformadores e Equipamentos Elétricos, situated in Biguaçu (SC). A comparison was also done between the calculations results from the reproject and the results from the electrical tests, after the transformer was repaired and tested in Belman's laboratory, showing the validity of the methodology and the calculations from this study case.

Keywords: Transformer. Reproject. Repair.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gerador secundário de Gaulard e Gibbs.....	30
Figura 2 - Transformador de Bláthy.....	30
Figura 3 - Transformador com núcleo de ferro.....	32
Figura 4 - Circuito equivalente de um transformador com núcleo de ferro.....	34
Figura 5 - Diagrama fasorial ou vetorial do transformador para $a < 1$	35
Figura 6 - Circuito equivalente simplificado do transformador.....	36
Figura 7 - Diagrama fasorial em vazio.....	36
Figura 8 - Diagrama fasorial sob carga para $a > 1$	37
Figura 9 - Circuito equivalente transferindo os parâmetros do secundário para o primário.	37
Figura 10 - Circuito equivalente simplificado refletido ao primário do transformador.....	38
Figura 11 - Diagrama fasorial simplificado do transformador sob carga.	39
Figura 12 - Transformador monofásico tipo “núcleo envolvente” com bobinas concêntricas.	40
Figura 13 - Transformador monofásico tipo "núcleo envolvente" com bobinas intercaladas.	40
Figura 14 - Transformador monofásico tipo "núcleo envolvido" com bobinas concêntricas.	41
Figura 15 - Transformador trifásico tipo "núcleo envolvido" com bobinas concêntricas.	41
Figura 16 - Transformador trifásico tipo "núcleo envolvente" de 5 colunas e com bobinas concêntricas.....	42
Figura 17 - Pasta de trabalho 1 (IJK1.1).	44
Figura 18 - Pasta de trabalho 2 (IJK1.2).	45
Figura 19 - Pasta de trabalho 3 (IJK1.3).	46
Figura 20 - Fluxograma do processo seguido para o projeto de transformadores.	47
Figura 21 - Parte ativa de um transformador de 75 kVA, com detalhe no núcleo.....	50
Figura 22 - Parte ativa de um transformador desmontada parcialmente, com detalhe no núcleo.	50
Figura 23 – Painel de comutação de um transformador.....	54
Figura 24 – Chave rotativa de comutação de um transformador (avariado).....	54
Figura 25 – Placa de identificação de um transformador.....	63
Figura 26 – Cabeceira na bobina de alta tensão.	69
Figura 27 - Transformador do estudo de caso.....	71
Figura 28 – Parte ativa do transformador do estudo de caso (lado das conexões de BT).....	72
Figura 29 – Parte ativa do transformador do estudo de caso (lado das conexões de AT).....	72
Figura 30 – Modelo 3D do núcleo.	74

Figura 31 – Dimensões dos pacotes de chapas dos núcleos.....	74
Figura 32 – Dimensões das janelas do núcleo.....	75
Figura 33 – Alocação das bobinas no núcleo.....	77
Figura 34 – Dimensões das bobinas junto ao núcleo.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de placa a serem coletados, usados diretamente nos cálculos.	49
Tabela 2 - Dados de placa a serem coletados, usados indiretamente nos cálculos.	49
Tabela 3 - Informações do núcleo a serem coletadas e usadas diretamente nos cálculos.	51
Tabela 4 - Informações do núcleo a serem coletadas, usadas indiretamente nos cálculos.	51
Tabela 5 - Informações das bobinas de BT a serem coletadas usadas diretamente nos cálculos.	52
Tabela 6 - Informações das bobinas de BT a serem coletados, usadas indiretamente nos cálculos.	53
Tabela 7 - Informações das bobinas de AT a serem coletadas e usados diretamente nos cálculos.	55
Tabela 8 - Informações das bobinas de AT a serem coletadas, usadas indiretamente nos cálculos.	55
Tabela 9 – Valores do fator de empilhamento de chapas para núcleo.	56
Tabela 10 – Raio de curvatura dos cantos e a redução da seção do condutor.	59
Tabela 11 – Densidade de corrente nos enrolamentos de um transformador.	59
Tabela 12 – Dimensões da espessura do isolamento de baixa tensão.	60
Tabela 13 – Dimensões do isolamento de alta tensão.	64
Tabela 14 - Dados de placa coletados, a serem usados diretamente nos cálculos.	73
Tabela 15 - Dados de placa coletados, a serem usados indiretamente nos cálculos.	73
Tabela 16 - Dados do núcleo coletados, a serem usados diretamente nos cálculos.	73
Tabela 17 - Dados do núcleo coletados, a serem usados indiretamente nos cálculos.	74
Tabela 18 - Dados das bobinas de baixa tensão coletados, a serem usados diretamente nos cálculos.	75
Tabela 19 - Dados das bobinas de baixa tensão núcleo coletados, a serem usados indiretamente nos cálculos.	76
Tabela 20 - Dados das bobinas de alta tensão coletados, a serem usados diretamente nos cálculos.	76
Tabela 21 - Dados das bobinas de alta tensão núcleo coletados, a serem usados indiretamente nos cálculos.	76
Tabela 22 - Resultados do ensaio realizado em vazio.	78
Tabela 23 - Resultados do ensaio realizado em carga.	78
Tabela 24 - Valores normatizados e medidos para as perdas.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- α – Bitola axial do fio utilizado na BT (considerando-se fio retangular)
- β – Bitola radial do fio utilizado na BT (considerando-se fio retangular)
- Δ – Delta (tipo de ligação entre as bobinas do transformador)
- ΔP_A – Diferença percentual entre as perdas adicionais medidas e ΔP_T
- ΔP_T – Diferença entre as perdas totais medidas e calculadas
- φ – Fluxo magnético mútuo que atravessa N espiras
- φ_1 – Fluxo de dispersão da bobina primária
- φ_2 – Fluxo de dispersão da bobina secundária
- φ_M – Fluxo magnético mútuo máximo
- ρ – Condutividade do material
- $\rho_{aluminio}$ – Condutividade do alumínio a 20°C
- ρ_{cobre} – Condutividade do cobre a 20°C
- $\gamma_{aluminio}$ – Peso específico do alumínio
- γ_{cobre} – Peso específico do cobre
- $\gamma_{condutor}$ – Peso específico do condutor
- γ_{ferro} – Peso específico do ferro
- θ – Ângulo da impedância da carga
- θ_1 – Defasagem entre tensão e corrente nos terminais da bobina primária
- ω – Frequência angular do fluxo
- a – Relação de transformação
- a_1 – Espessura da bobina de AT
- a_2 – Espessura da bobina de BT
- b – Altura da bobina de BT
- A_{fe} – Área da seção do núcleo
- AT – Alta tensão
- AWG – American Wire Gauge
- B_M – Indução magnética máxima
- b_n – Média da largura das colunas do núcleo
- BT – Baixa tensão
- CA – Corrente alternada
- CC – Corrente contínua

d – Espessura do isolante entre as bobinas de AT e BT
 d_{AT} – Densidade de corrente da AT
 D_{AT} – Diâmetro do fio utilizado na AT (considerando-se fio circular)
 D_{ATi} – Diâmetro interno da bobina de AT
 D_{ATe} – Diâmetro externo da bobina de AT (coletado)
 D_{ATe2} – Diâmetro externo da bobina de AT (calculado)
 $D_{isolcam}$ – Espessura da isolação entre as camadas da AT
 $D_{ATisolfinal}$ – Espessura da isolação final da AT
 d_{BT} – Densidade de corrente da BT
 D_{BTi} – Diâmetro interno da bobina de BT
 D_{BTe} – Diâmetro externo da bobina de BT (coletado)
 D_{BTe2} – Diâmetro externo da bobina de BT (calculado)
 $D_{isolcam}$ – Espessura do isolamento das camadas da BT
 $D_{BTisolfinal}$ – Espessura do isolamento final da BT
 $D_{BTisolfio}$ – Espessura do isolamento do fio da BT
 $e(t)$ – Tensão induzida instantânea
 E_1 – Força contra-eletromotriz eficaz na bobina primária
 E_2 – Tensão induzida/força eletromotriz eficaz na bobina secundária
 $E_{ATcanal}$ – Espessura de cada canal da AT
 $E_{BTcanal}$ – Espessura de cada canal da BT
 E_C – Espessura da chapa utilizada no núcleo
 E_M – Tensão induzida máxima
 $E_{N1} \dots E_{Ni}$ – Espessura dos pacotes de chapa (i sendo o número de pacotes)
 f – Frequência do fluxo magnético mútuo ou frequência nominal do transformador
 $F_{BTaxial}$ – Bitola axial do fio utilizado na BT (considerando-se fio retangular)
 $F_{BTradial}$ – Bitola radial do fio utilizado na BT (considerando-se fio retangular)
 F_{cm1} – Força magnetomotriz nas colunas
 F_{cm2} – Força magnetomotriz nas travessas
 F_{mm} – Força magnetomotriz máxima do circuito magnético
 H_{AT} – Altura da bobina de AT
 H_{ATcab} – Altura da cabeceira de AT
 H_{BT} – Altura da bobina de BT
 H_{BTcab} – Altura da cabeceira da bobina de BT

H_J – Altura da janela do núcleo
 H_n – Valor do campo magnético
 I_0 – Corrente de excitação do núcleo
 $I_{0\%}$ – Corrente de excitação percentual do núcleo
 I_1 – Corrente que circula na bobina primária
 I_2 – Corrente que circula na bobina secundária
 I_{ATfase} – Corrente de fase da AT
 $I_{ATlinha}$ – Corrente de linha da AT
 I_{BTfase} – Corrente de fase da BT
 $I_{BTlinha}$ – Corrente de linha da BT
 I_{c1} – Corrente de carga na bobina primária
 I_m – Corrente que circula por X_m / Componente reativa de I_0
 I_p – Corrente que circula por R_p / Componente ativa de I_0
 K_e – Fator de empilhamento
 K_f – Fator de correção da seção do fio retangular de baixa tensão
 K_r – Fator de correção da reatância de dispersão
 l_{AT} – Comprimento médio das espiras de AT
 l_{BT} – Comprimento médio das espiras da BT
 l_e – Espessura do entreferro do núcleo
 L_J – Largura da janela do núcleo
 l_{medio} – Comprimento médio das espiras
 l_n – Comprimento da seção magnética
 $L_{N1} \dots L_{Ni}$ – Largura dos pacotes de chapa (i sendo o número de pacotes)
 n – Posição do ajuste do *tap* da AT diminuído de 1
 N – Número de espiras da bobina em que é induzida a tensão
 N_1 – Número de espiras na bobina primária
 N_2 – Número de espiras na bobina secundária
 N_{AT} – Número total de espiras na AT
 $N_{ATbobina}$ – Número de espiras por bobina
 $N_{ATcamada}$ – Número de espiras por camada
 $N_{ATfases}$ – Quantidade de fases da AT que serão refeitas
 $N_{ATfolga}$ – Folga de espiras considerada no projeto da AT

N_{ATtap} – Número de espiras por degrau de tap
 N_{ATtapn} – Número de espiras a serem excluídas da AT para ajuste do tap na posição “n”
 N_{BT} – Número total de espiras na BT
 $N_{BTcamada}$ – Número de espiras por camada da BT
 $N_{BTfases}$ – Quantidade de fases da BT que serão refeitas
 P – Potência nominal do transformador
 P_{AT} – Peso das bobinas de AT a serem refeitas
 P_{BT} – Peso das bobinas de BT a serem refeitas
 P_{Tc} – Perdas totais calculadas
 P_{Tm} – Perdas totais medidas
 $Q_{ATbobinas}$ – Quantidade total de bobinas por fase da AT
 $Q_{ATcamadas}$ – Quantidade total de camadas de cada bobina na AT
 $Q_{ATcanais}$ – Quantidade de canais nas bobinas de AT
 $Q_{ATderivacao}$ – Quantidade de bobinas com derivação de AT
 $Q_{ATradial}$ – Quantidade de fios radiais da AT (considerando-se fio circular)
 $Q_{ATsimples}$ – Quantidade de bobinas simples de AT
 Q_{ATtap} – Quantidade de tap’s da AT
 $Q_{BTaxial}$ – Quantidade de fios axiais na BT (considerando-se fio retangular)
 $Q_{BTcamadas}$ – Quantidade de camadas na bobina de BT
 $Q_{BTcanais}$ – Quantidade de canais na bobina de BT
 $Q_{BTradial}$ – Quantidade de fios radiais da BT (considerando-se fio retangular)
 R_1 – Resistência da bobina primária
 R_2 – Resistência da bobina secundária
 R_{21} – Resistência da bobina secundária referida ao lado primário
 R_{AT} – Resistência da bobina de AT
 R_{BT}' – Resistência da bobina de BT referida à bobina de AT
 R_{ATEq20} – Resistência equivalente referida aos enrolamentos da AT a 20 °C
 R_{ATEq75} – Resistência equivalente referida aos enrolamentos da AT a 75 °C
 R_p – Resistência do núcleo
 S – Tensão aparente no primário e no secundário do transformador
 S_{ATfio} – Seção do fio utilizado na AT (considerando-se fio circular)
 S_{BTfio} – Seção geométrica do fio utilizado na BT

S_{BTfio2} – Seção corrigida do fio utilizado na BT

$S_{BTtotal}$ – Seção total dos fios da BT

S_G – Seção geométrica do núcleo

S_M – Seção magnética do núcleo

t - Tempo

V_1 – Tensão aplicada na bobina primária

V_2 – Tensão induzida nos terminais da bobina secundária

V_{21} – Tensão induzida nos terminais da bobina secundária referida ao lado primário

$V_{ATajuste}$ – Tensão da AT com o *tap* ajustado em “n”

V_{ATfase} – Tensão de fase da AT

$V_{ATlinha}$ – Tensão nominal de linha de AT

V_{ATtap} – Tensão do *tap* da AT

$V_{BTlinha}$ – Tensão nominal de linha de BT

V_{BTfase} – Tensão de linha de BT

V_{cc} – Tensão de curto-circuito

W_0 – Perdas no núcleo

w_{fe} – Perda específica do núcleo

W_R – Perdas totais nos enrolamentos

X_1 – Reatância da bobina primária

X_2 – Reatância da bobina secundária

X_{21} – Reatância da bobina secundária referida ao lado primário

X_{ATEq} – Reatância equivalente referida à bobina de AT

X_m – Reatância do núcleo

Y – Estrela (tipo de ligação entre as bobinas do transformador)

Z – Zig-zag (tipo de ligação entre as bobinas do transformador)

$Z_{\%}$ - Impedância percentual / Queda de tensão percentual

Z_{ATEq} – Impedância equivalente referida à bobina de AT

Z_C – Impedância da carga

Z_{C1} – Impedância da carga referida ao lado primário

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS	28
1.1.1 Objetivo geral	28
1.1.2 Objetivos específicos	28
2 TRANSFORMADOR	29
2.1 HISTÓRIA	29
2.2 FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR	31
2.3 CONSTRUÇÃO	39
2.4 AVARIAS	42
3 REPROJETO DE TRANSFORMADORES	43
3.1 PROGRAMA EXISTENTE	43
3.1.1 Pasta de trabalho 1: impressão	43
3.1.2 Pasta de trabalho 2: dados	44
3.1.3 Pasta de trabalho 3: cálculos	45
3.1.4 Fluxograma simplificado	46
3.2 METODOLOGIA E CÁLCULOS	48
3.2.1 Coleta de dados	48
3.2.1.1 Placa	48
3.2.1.2 Núcleo	49
3.2.1.3 Bobinas de baixa tensão.....	51
3.2.1.4 Bobinas de alta tensão	53
3.2.2 Cálculos	55
3.2.2.1 Núcleo	56
3.2.2.2 Bobinas de baixa tensão.....	58
3.2.2.3 Bobinas de alta tensão	61
3.2.2.4 Perdas no núcleo.....	65
3.2.2.5 Perdas nos enrolamentos	67
4 ESTUDO DE CASO	71
4.1 DADOS DO TRANSFORMADOR	71
4.1.1 Dados nominais.....	72
4.1.2 Dados do núcleo.....	73
4.1.3 Dados das bobinas de baixa tensão.....	75

4.1.4 Dados das bobinas de alta tensão.....	76
4.2 CÁLCULOS.....	76
4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS E COMPARAÇÃO	78
4.3.1 Ensaios.....	78
4.3.2 Comparação.....	79
<i>4.3.2.1 Análise da diferença entre os resultados dos ensaios e dos cálculos</i>	<i>79</i>
<i>4.3.2.2 Comparação com os valores normalizados</i>	<i>81</i>
5 CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A – CÁLCULOS NO MATHCAD.....	87
ANEXO A – REPROJETO FEITO PELA BELMAN	93

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do transformador como o conhecemos hoje foi um processo demorado, descrito em [1], tendo seu início quando Michael Faraday descobriu o princípio da indução em 1831. Um transformador com um circuito magnético fechado, semelhante ao que é utilizado hoje, foi construído apenas em 1885. O transformador evoluiu significativamente em muitos aspectos desde então.

Atualmente o transformador é um equipamento amplamente utilizado e de muita importância ao sistema elétrico mundial, pois foi o principal fator que tornou possível a transmissão da energia elétrica por longas distâncias [2]. No entanto, é importante levar em conta que, mesmo tendo um custo menor com manutenção corretiva por ser uma máquina estática [2], ainda está sujeito a avarias pelas mais variadas razões.

Para que o transformador danificado possa voltar a entrar em operação, a sua reforma se faz necessária, o que pode envolver a bobinagem dos seus enrolamentos de alta ou baixa tensão, pois na maioria dos casos um ou mais deles ficam avariados. Isto, no entanto, deve ser feito de acordo com a estrutura já existente do transformador para que a reforma não tenha um custo maior que a compra de um novo equipamento, tornando o processo mais complexo. Uma das razões é o fato de uma empresa de manutenção responsável pelo serviço ter que lidar com diferentes formas construtivas de transformadores, pois são de diferentes fabricantes e modelos, sem ter o projeto original para usar como base. Sendo assim, é preciso projetar novamente os enrolamentos dos transformadores que precisam ser consertados, processo que costuma ser chamado de “reprojeto”.

A Belman Transformadores e Equipamentos Elétricos é uma destas empresas de manutenção. Para simplificar o reprojeto dos enrolamentos dos transformadores avariados, a empresa utiliza um programa baseado em um conjunto de planilhas, desenvolvidas no software Excel por seu sócio fundador, Ilberto José Kretzer, há cerca de vinte anos atrás. No entanto, esse desenvolvimento não foi documentado, tornando difícil o aprimoramento das planilhas de acordo com a evolução dos estudos sobre o projeto de transformadores.

Neste trabalho, são apresentados os conceitos básicos do transformador no capítulo 2, para então apresentar o programa existente e documentá-lo parcialmente no capítulo 3, em que são sugeridas algumas mudanças para algumas de suas fórmulas. Um dos objetivos foi utilizar as fórmulas no estudo de caso apresentado no capítulo 4, em que é feito o reprojeto de um transformador de 112,5 kVA. As conclusões e as ideias para desenvolvimentos futuros são expostas no capítulo 5.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi iniciar o desenvolvimento um novo programa de reprojeto de transformadores, que faz uso das características construtivas do transformador danificado, podendo ser adaptado com base nas necessidades do cliente. O ponto de partida foi um programa já existente, utilizado na empresa Belman Transformadores e Equipamentos Elétricos, de Biguaçu, Santa Catarina.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, teve-se como objetivos metodológicos: (a) entender o programa existente e fazer um fluxograma do seu funcionamento; (b) revisar as equações e fórmulas empregadas, documentando-as e, se for o caso, atualizando-as; (c) estruturar um novo programa, enumerando e documentando as fórmulas; e (d) comparar os resultados dos cálculos obtidos com os resultados de ensaios elétricos realizados em um transformador consertado pela Belman.

2 TRANSFORMADOR

2.1 HISTÓRIA

Como já mencionado, o desenvolvimento do transformador como o conhecemos hoje foi um processo demorado, descrito em [1]. Ele teve início quando Michael Faraday descobriu o princípio da indução em agosto de 1831, ao notar que uma corrente transitória era induzida em uma bobina quando a circulação de corrente na segunda bobina iniciava ou era interrompida, estando as duas bobinas no mesmo núcleo toroidal de ferro. Alguns meses depois, em outubro, ele observou também que uma corrente era induzida na bobina de um núcleo toroidal quando um ímã era movimentado em seu meio, algo que também havia sido observado por Francesco Zantedeschi em 1830 e por Joseph Henry em 1831. Tais observações levaram a uma conclusão importante: a partir de um campo magnético variável, é possível ter consequências elétricas, como a indução de corrente e de tensão [1].

A partir disso, foram desenvolvidos muitos equipamentos, mas voltados para a corrente contínua (CC), que era muito mais difundida na época do que a corrente alternada (CA). Em 1836, Nicholas Joseph Callan construiu o primeiro dispositivo que explorava o acoplamento mútuo para utilizar em seus experimentos que necessitavam de alta tensão. O dispositivo que ele desenvolveu era usado em CC e a indução se dava na interrupção abrupta do fluxo de corrente. Heinrich Daniel Ruhmkorff, em 1851, melhorou a ideia de Callan e a patenteou, levando o dispositivo a ser utilizado em maior escala, tornando-o conhecido como “bobina de Ruhmkorff”. Esta bobina foi utilizada em telégrafos e teve um papel fundamental em pesquisas como fonte de alta tensão [1].

Em 1876, começou a ser utilizada a CA, que era originada de alternadores alimentados por dínamos. Ela era utilizada em lâmpadas a arco, que eram mais simples e baratas, mas que precisavam de uma corrente que tinha seu sentido revertido continuamente. Jablochkov, o inventor desta lâmpada, sugeriu o uso da corrente alternada em bobinas acopladas por um núcleo magnético. A ideia só foi posta em prática em 1881 por Lucien Gaulard e John Dixon Gibbs, que criaram o “gerador secundário”, composto por um núcleo de ferro aberto e bobinas que tinham a mesma quantidade de espiras (vide Figura 1) [1].

Figura 1 - Gerador secundário de Gaulard e Gibbs.



Fonte: [1].

Foi apenas em 1885 que um transformador com um circuito magnético fechado e adaptado para a CA, semelhante ao que é utilizado hoje em transformadores, foi construído (vide Figura 2). O primeiro a fazê-lo foi o engenheiro húngaro Ottó Titusz Bláthy, que atribuiu ao equipamento o nome pelo qual o conhecemos hoje. Ainda em 1885, Bláthy e dois colegas de trabalho da Ganz & Co., Károly Zipernowsky e Miska Déri, desenvolveram o sistema ZBD, que fazia uso de transformadores abaixadores para distribuir energia elétrica. Aplicar esta tecnologia fez da Ganz uma das principais companhias elétricas europeias [1].

Figura 2 - Transformador de Bláthy.



Fonte: [1].

William Stanley Jr. melhorou o dispositivo de Bláthy, em 1886, com o uso de um núcleo laminado, e colocou um sistema de CA em funcionamento nos EUA, com a diferença de usar também transformadores elevadores. Em 1890 ele abriu sua própria fábrica de transformadores e, em 1893, forneceu os primeiros transformadores trifásicos à primeira

unidade de geração de energia elétrica polifásica americana. Muitos melhoramentos surgiram com o decorrer dos anos, como o isolamento a óleo (por Elihu Thomson, em 1887), e muitos outros ainda deverão ocorrer [1].

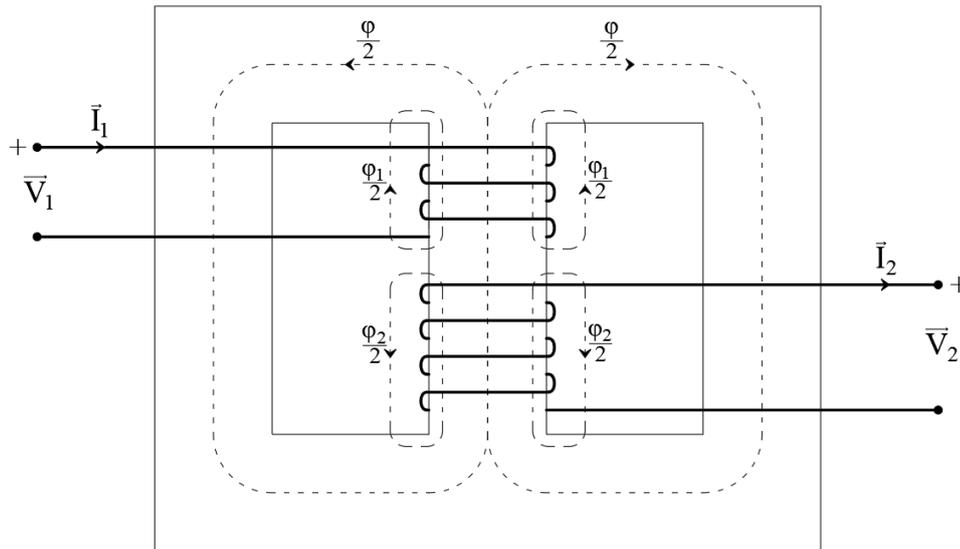
Atualmente, o transformador é um equipamento amplamente utilizado, de bastante importância ao sistema elétrico mundial, pois foi o principal fator que tornou possível a transmissão econômica da energia elétrica cobrindo longas distâncias, com tensões elevadas [3]. Para entender o seu funcionamento, partir-se-á do transformador ideal até chegar em seu circuito elétrico equivalente completo em regime (adequado para frequências industriais), em que se tem os seus parâmetros concentrados em um modelo formado por resistências e reatâncias.

2.2 FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR

Como explicado anteriormente, um transformador é constituído basicamente por duas bobinas elétricas e um núcleo ferromagnético. As bobinas são conhecidas, cada uma, como “primário” e “secundário” do transformador, sendo que no primário é onde circula a corrente responsável pela indução de tensão no secundário. O núcleo magnético é o elemento responsável por concentrar o fluxo magnético, permitindo que haja uma indução também no interior do enrolamento secundário. Transformadores podem ter mais de duas bobinas, como é o caso dos transformadores trifásicos, que serão vistos mais adiante [4].

O esquema de um transformador da Figura 3 tem a composição básica mencionada anteriormente, onde as grandezas com índice “1” estão relacionadas ao primário e as grandezas com índice igual a “2” ao secundário. Nesta figura, tem-se uma tensão alternada V_1 aplicada na bobina primária, com a circulação de uma corrente alternada I_1 em suas espiras, fazendo surgir um fluxo magnético mútuo também alternado φ . Este fluxo faz com que seja induzida uma tensão alternada V_2 nos terminais da bobina secundária, o que tem como consequência a circulação de uma corrente alternada I_2 caso o circuito esteja fechado. Os fluxos φ_1 e φ_2 que também podem ser observados na Figura 3 são os fluxos de dispersão de cada enrolamento e serão tratados mais adiante.

Figura 3 - Transformador com núcleo de ferro.



Fonte: Adaptado de [3].

A tensão induzida na bobina secundária resultante do fluxo que circula no núcleo é explicada pela lei de Faraday. A equação (1) é uma das formas de escrever a lei de Faraday, aplicando certas condições, onde $e(t)$ é a tensão induzida instantânea, N é o número de espiras da bobina em que é induzida a tensão, φ é o fluxo magnético que atravessa as N espiras e t é o tempo. A magnitude de tensão é proporcional ao número de espiras e à variação do fluxo no tempo.

O sinal negativo da equação (1) tem origem da lei de Lenz, que afirma que a polaridade de $e(t)$ é tal que o fluxo gerado pela corrente induzida se opõe ao fluxo mútuo φ [5]. Nesta seção, no entanto, considera-se apenas o módulo de $e(t)$.

$$e(t) = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (1)$$

Considerando-se o funcionamento de um transformador e um fluxo na forma de onda senoidal, conforme equação (2), chega-se na equação (3), que representa o valor instantâneo da tensão, onde tem-se φ_M como o fluxo magnético mútuo máximo, ω como a frequência angular do fluxo, f como a frequência do fluxo (equivalente à frequência da corrente que o originou) e E_M como a tensão induzida máxima. O valor eficaz da tensão (E), ao se considerar que ela também é senoidal, é então dada pela equação (4), onde também se considera a relação entre φ_M , a indução magnética máxima (B_M) e a área da seção do núcleo (A_{fe}).

$$\varphi(t) = \varphi_M \cdot \sin(\omega t) = \varphi_M \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (2)$$

$$e(t) = N \cdot \varphi_M \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(\omega t) = E_M \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$E = \frac{E_M}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot f \cdot \varphi_M = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot B_M \cdot A_{fe} \quad (4)$$

Outro fator importante em transformadores é a relação de transformação a , que é calculada através da equação (5). Ela é a relação entre as tensões das bobinas do primário e do secundário e também a relação entre as espiras das bobinas. No caso do transformador ideal, também é a relação entre as correntes que circulam pelas bobinas e entre as tensões de entrada e saída do transformador, conforme é dado pela equação (6). A partir dessa relação, podemos obter a equação da conversão de potência do transformador, dada pela expressão (7), em que se tem o mesmo valor de potência aparente no primário e no secundário. Isto é válido apenas para o transformador ideal.

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (5)$$

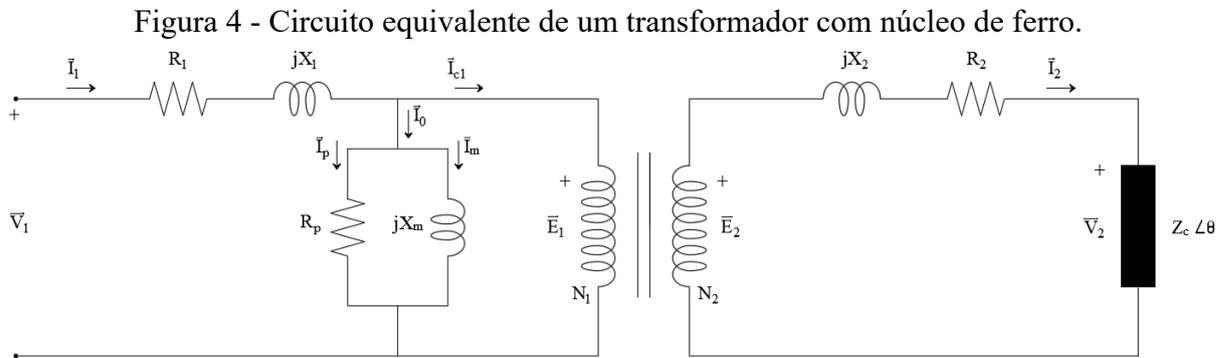
$$a = \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} \quad (6)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \rightarrow V_1 I_1 = V_2 I_2 = S \quad (7)$$

O transformador real, no entanto, não é ideal, pois ele tem perdas e fluxos de dispersão e de magnetização. As perdas elétricas estão relacionadas com as perdas por efeito Joule que ocorrem nos condutores das bobinas, enquanto as perdas magnéticas do núcleo têm origem no fenômeno da histerese magnética e nas correntes induzidas nas lâminas (um fenômeno também decorrente do efeito Joule). As perdas adicionais são uma espécie de perdas de origem magnética e ainda são assunto de pesquisa, sem haver ainda uma explicação “universalmente aceita”, conforme [6], estando relacionadas com a diferença entre as perdas medidas no ensaio

de perdas em carga e as perdas resistivas calculadas com base na medição da resistência ôhmica dos enrolamentos.

O circuito equivalente que representa o transformador real é mostrado na Figura 4, onde tem-se representado o transformador ideal e os parâmetros do transformador. As perdas por efeito Joule nas bobinas primária e secundária são representadas pelos resistores R_1 e R_2 e os fluxos de dispersão de cada bobina estão relacionados às reatâncias X_1 e X_2 . O núcleo é representado pelo ramo em paralelo, onde tem-se as perdas por correntes parasitas e as perdas por histerese relacionadas à representação pelo resistor R_p , e o fluxo de magnetização (ou fluxo mútuo) está representado pela reatância X_m .



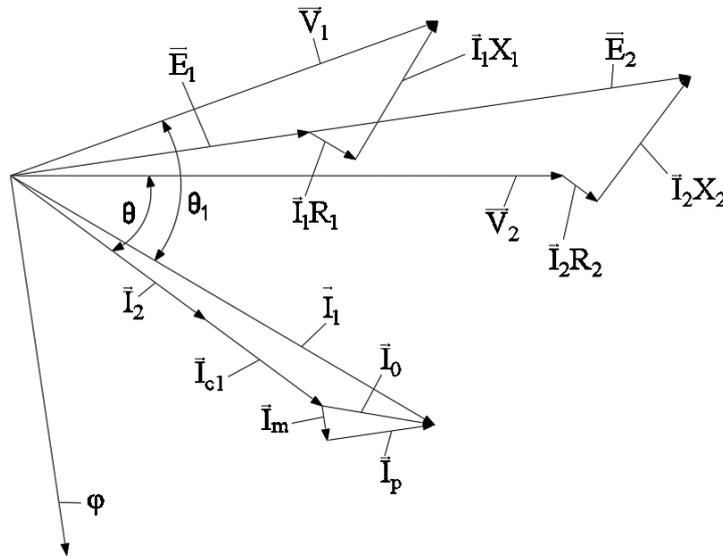
Fonte: Adaptado de [3].

Na Figura 4, tem-se também a carga $Z_C \angle \theta$ alimentada pelo secundário do transformador, que faz com que circule uma corrente I_2 na bobina, cujo valor também varia com os valores dos parâmetros R_2 e X_2 . A tensão nos terminais da carga é representada por V_2 . Entre o primário e o secundário, tem-se a representação de um transformador ideal com núcleo de ferro, onde tem-se a força eletromotriz na bobina secundária E_2 e a força contra-eletromotriz na bobina primária E_1 , além dos números de espiras em cada bobina N_1 e N_2 .

A corrente que entra no transformador e a tensão nos terminais da bobina primária são representados por I_1 e V_1 , respectivamente. No entanto, como o núcleo está representado no lado primário e está em paralelo com a bobina primária, a corrente que contribui de forma efetiva para a indução da tensão na bobina secundária não é a que entra no enrolamento primário. Assim, tem-se a corrente de carga do primário I_{c1} , a corrente I_p que circula pelo resistor R_p e a corrente I_m que circula pela reatância X_m . A corrente I_0 é conhecida como a corrente de excitação do núcleo e equivale à soma das correntes I_p e I_m . A corrente I_1 equivale à soma das correntes I_{c1} e I_0 .

Na Figura 5, apresenta-se o diagrama fasorial com as grandezas e os parâmetros do circuito elétrico equivalente da Figura 4, considerando-se um transformador elevador de tensão, em que a tensão secundária é maior que a tensão primária. O ângulo θ_1 é referente à defasagem entre tensão e corrente nos terminais da bobina primária. O fluxo mútuo φ está atrasado de noventa graus em relação às tensões E_1 e E_2 . Há também as quedas de tensão representadas por I_1R_1 , I_1X_1 , I_2R_2 e I_2X_2 .

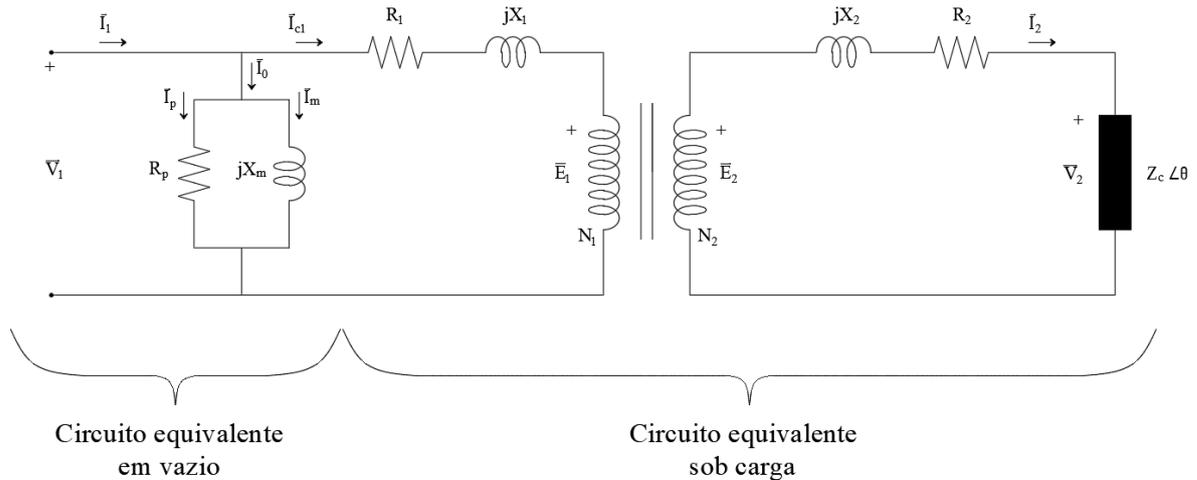
Figura 5 - Diagrama fasorial ou vetorial do transformador para $a < 1$.



Fonte: Adaptado de [3].

De acordo com [3], pode-se simplificar o circuito equivalente e o diagrama fasorial apresentados na Figura 4 e na Figura 5, respectivamente, ao se levar em conta o rendimento do transformador, que normalmente é alto. Em transformadores de elevada potência de conversão, por exemplo, é comum encontrar rendimentos na ordem de 99,5%. Sendo assim, obtém-se o circuito equivalente simplificado apresentado na Figura 6, onde observa-se a separação entre circuito equivalente a vazio e sob carga.

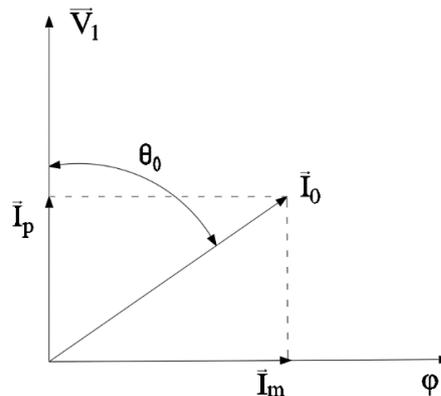
Figura 6 - Circuito equivalente simplificado do transformador.



Fonte: Adaptado de [3].

Quando o transformador está em vazio, não há carga conectada na sua bobina secundária e, conseqüentemente, não circula corrente por ela. Assim, a corrente de carga do primário I_{c1} é nula, o que torna o circuito equivalente em vazio apresentado na Figura 6 uma aproximação aceitável. O diagrama fasorial em vazio do transformador é dado pela representação na Figura 7.

Figura 7 - Diagrama fasorial em vazio.

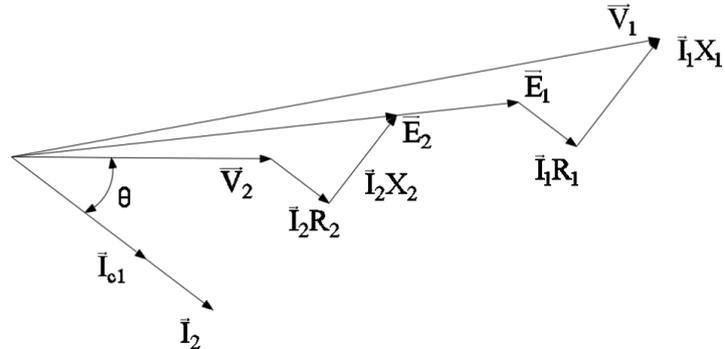


Fonte: Adaptado de [3].

Quando o transformador está sob carga a situação muda, pois a corrente que circula nas bobinas primária e secundária é maior do que I_0 . Como a corrente de excitação se altera relativamente pouco (e também é relativamente baixa quando comparada com a corrente de carga nominal do transformador), o crescimento da corrente secundária faz com que o circuito equivalente sob carga apresentado na Figura 6 seja uma aproximação aceitável também. O

diagrama fasorial sob carga do transformador está representado na Figura 8, em que se tem a tensão primária maior que a secundária (transformador abaixador de tensão).

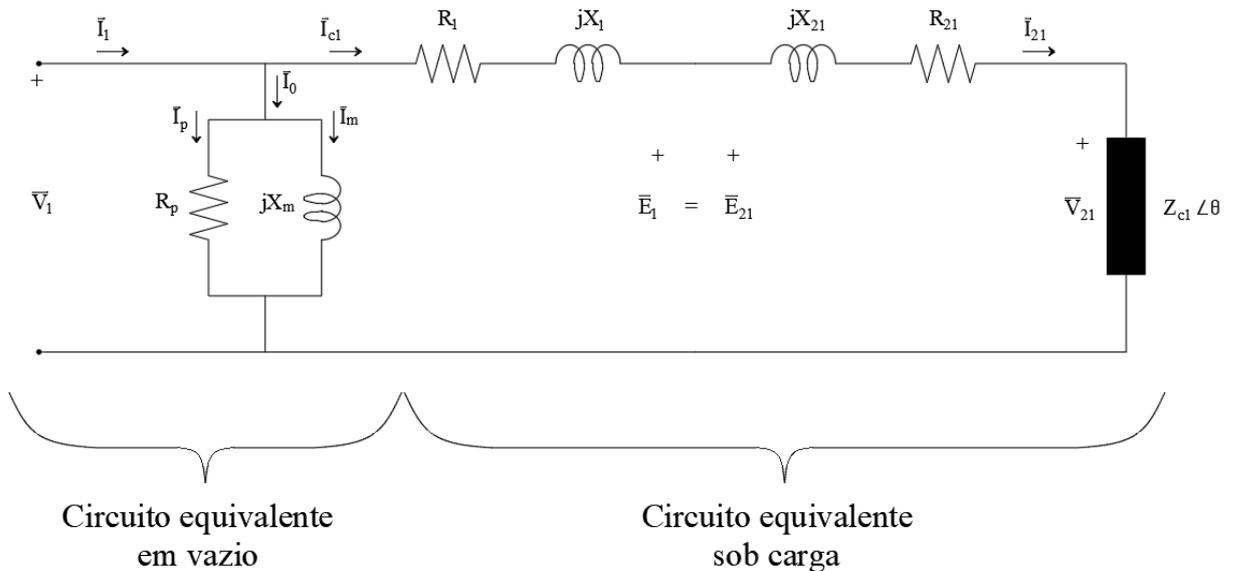
Figura 8 - Diagrama fasorial sob carga para $a > 1$.



Fonte: Adaptado de [3].

Para simplificar mais o circuito equivalente, pode-se retirar o transformador ideal e referir os parâmetros a um dos lados do transformador. Ao se referir-se os parâmetros da bobina secundária ao lado primário do transformador, por exemplo, chega-se ao circuito equivalente da Figura 9. Para calcular os valores dos parâmetros referidos ao primário, utiliza-se a relação de transformação apresentada na equação (5), que é aplicada nas relações apresentadas em (8), (9), (10) e (11) [3].

Figura 9 - Circuito equivalente transferindo os parâmetros do secundário para o primário.



Fonte: Adaptado de [3].

$$R_{21} = R_2 \cdot a^2 \quad (8)$$

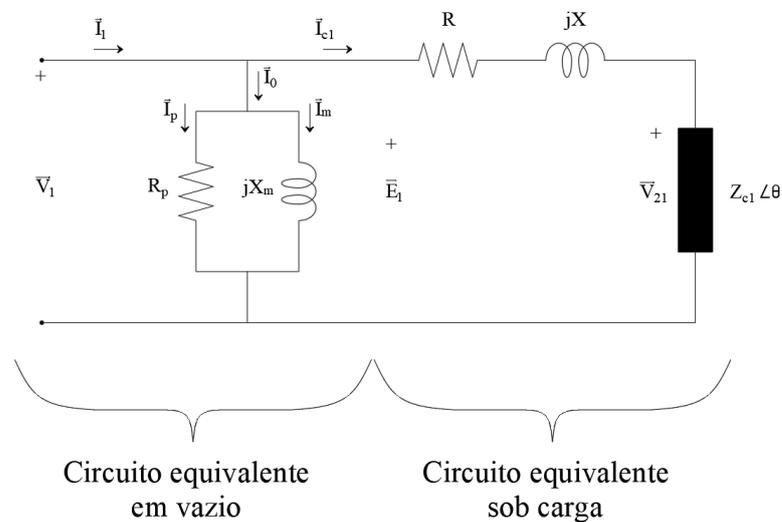
$$X_{21} = X_2 \cdot a^2 \quad (9)$$

$$Z_{C1} = Z_C \cdot a^2 \quad (10)$$

$$V_{21} = V_1 \cdot a \quad (11)$$

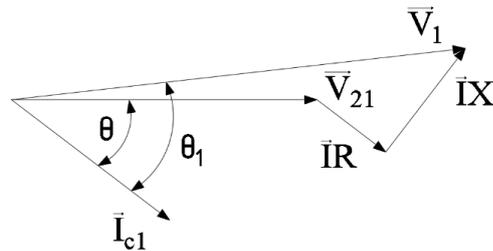
Somando as resistências e reatâncias das bobinas primária e secundária, obtém-se o circuito equivalente da Figura 10 e o diagrama fasorial da Figura 11. Desta maneira, representa-se o transformador sob carga por uma única impedância interna, composta pela resistência equivalente das bobinas (que representa as perdas por efeito joule nas bobinas) e pela reatância equivalente (que representa os efeitos dos fluxos de dispersão).

Figura 10 - Circuito equivalente simplificado refletido ao primário do transformador.



Fonte: Adaptado de [3].

Figura 11 - Diagrama fasorial simplificado do transformador sob carga.



Fonte: Adaptado de [3].

2.3 CONSTRUÇÃO

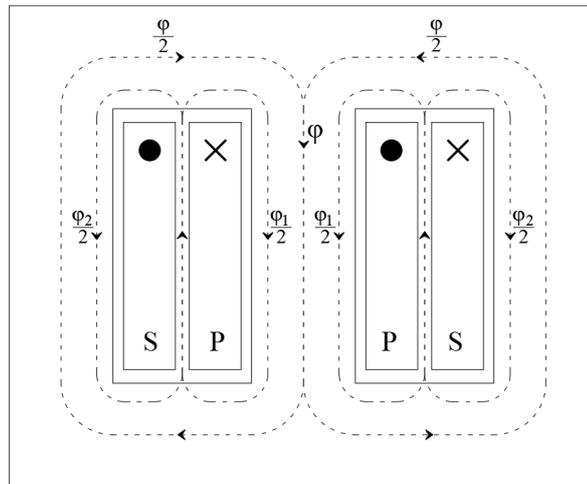
Os transformadores podem ser construídos de diversas formas, de acordo com a sua aplicação. Em redes de distribuição, por exemplo, encontram-se muitos transformadores trifásicos, pois a rede elétrica utilizada também é trifásica. Existem outros transformadores mais específicos, como transformadores de corrente constante, que são utilizados em aeroportos para manter a pista com iluminação uniforme, ou reguladores de tensão, que são autotransformadores utilizados em redes de distribuição para manter a tensão da rede elétrica em nível adequado para o consumo.

O foco deste trabalho são os transformadores de potência utilizados em redes de distribuição. Assim, não serão abordadas as formas de construção dos demais tipos de transformadores.

As principais diferenças de construção estão relacionadas aos núcleos e ao posicionamento das bobinas. As formas de isolamento nos transformadores também podem diferir, assim como os materiais utilizados na construção das bobinas, que normalmente são feitas de cobre ou de alumínio.

É importante ressaltar que a disposição das bobinas na Figura 3 é didática, sendo pouco aplicável em transformadores reais. Conforme [3], isso acontece porque esta disposição faria com que as bobinas se repelissem violentamente devido à oposição dos fluxos de dispersão. O mais comum é encontrar bobinas concêntricas, conforme pode ser observado na Figura 12, na Figura 14, na Figura 15 e na Figura 16, onde o fluxo de dispersão circula entre as bobinas. Normalmente a bobina interna, que está mais próxima do núcleo, é aquela com tensão menor para facilitar o isolamento e tornar o projeto mais econômico [3].

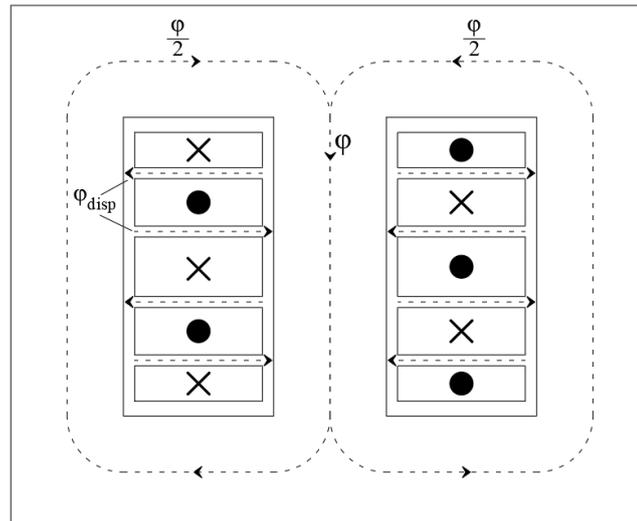
Figura 12 - Transformador monofásico tipo “núcleo envolvente” com bobinas concêntricas.



Fonte: Adaptado de [3].

As bobinas podem ser dispostas também de forma intercalada, conforme mostra a Figura 13, onde as bobinas primárias e secundárias são dispostas de forma alternada. Quanto maior a quantidade de bobinas, maior o acoplamento entre elas e, conseqüentemente, menores são os fluxos de dispersão [3].

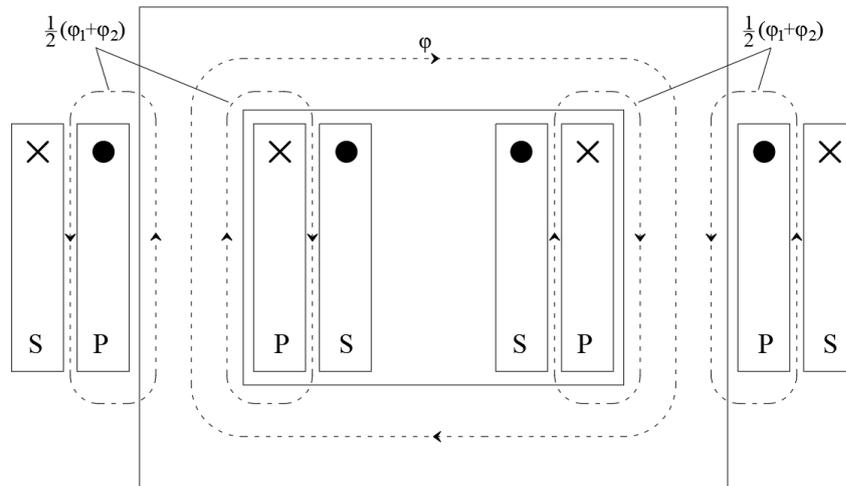
Figura 13 - Transformador monofásico tipo "núcleo envolvente" com bobinas intercaladas.



Fonte: Adaptado de [3].

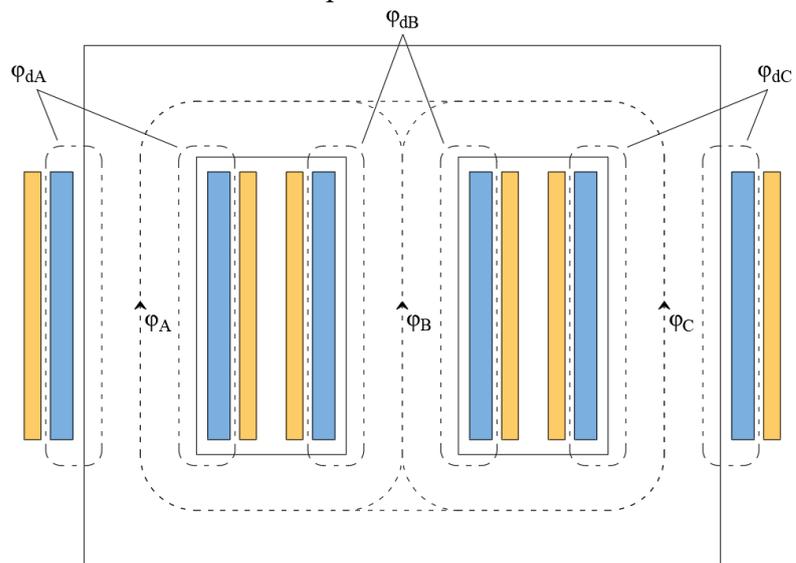
Quanto aos núcleos, tem-se dois tipos principais. Nos transformadores com núcleo de tipo envolvente, as bobinas são envolvidas pelo núcleo, como são os casos mostrados na Figura 12, na Figura 13 e na Figura 16. Nos transformadores com núcleo envolvido, são as bobinas que envolvem o núcleo, conforme mostram a Figura 14 e a Figura 15.

Figura 14 - Transformador monofásico tipo "núcleo envolvido" com bobinas concêntricas.



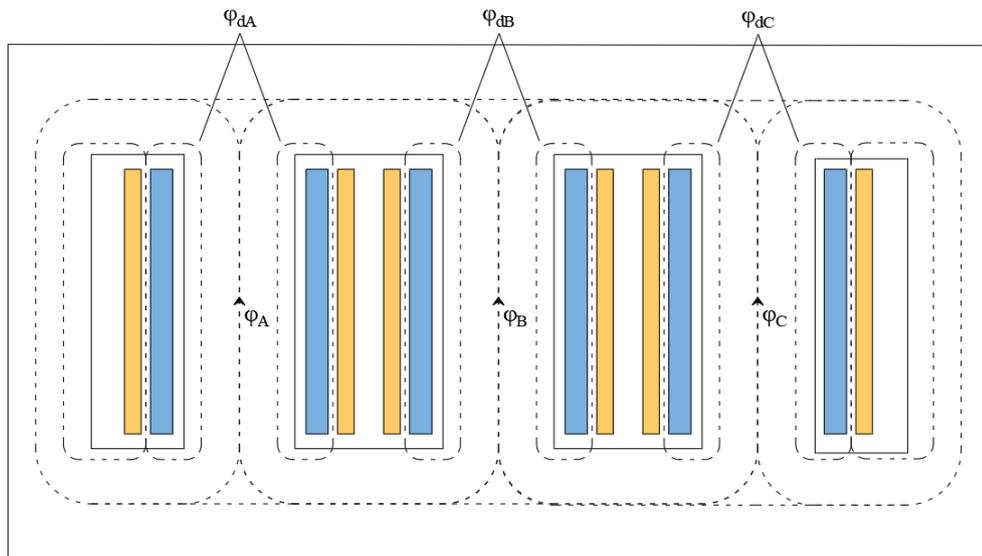
Fonte: Adaptado de [3].

Figura 15 - Transformador trifásico tipo "núcleo envolvido" com bobinas concêntricas.



Fonte: Adaptado de [3].

Figura 16 - Transformador trifásico tipo "núcleo envolvente" de 5 colunas e com bobinas concêntricas.



Fonte: Adaptado de [3].

2.4 AVARIAS

Sabe-se que o custo com manutenção corretiva em transformadores é menor do que em máquinas elétricas girantes, por eles serem máquinas estáticas [2]. Porém, esta classe de equipamento ainda assim está sujeita a avarias pelas mais variadas razões. Algumas que podem ser citadas são infiltração de água, baixo isolamento, curto-circuito interno ou externo, descarga atmosférica, interrupção no painel de comutação, desequilíbrio de fases e sobrecarga [7].

Para que o transformador avariado possa voltar a entrar em operação, a sua reforma se faz necessária, algo que envolve a rebobinagem dos seus enrolamentos de alta ou de baixa tensão, pois na maioria dos casos um ou mais deles estão avariados. No entanto, a rebobinagem deve ser feita de acordo com a estrutura já existente do transformador, o que torna o processo um tanto complexo. Isso acontece porque uma empresa de manutenção de equipamentos elétricos lida com transformadores que possuem projetos diferentes, mesmo que tenham características nominais semelhantes, pois os fabricantes também são diferentes. Assim, como os fabricantes não deixam os seus projetos em domínio público, é preciso projetar novamente os enrolamentos de todos os transformadores que precisam ser refeitos.

3 REPROJETO DE TRANSFORMADORES

3.1 PROGRAMA EXISTENTE

A Belman Transformadores e Equipamentos Elétricos, localizada em Biguaçu, no estado de Santa Catarina, é uma empresa fundada em 2007 por Ilberto José Kretzer, após trabalhar durante cerca de quinze anos na área de manutenção corretiva de transformadores em duas outras empresas, que realizavam a manutenção corretiva de transformadores para diversas concessionárias e cooperativas de energia elétrica do país. Durante o período anterior à Belman, I. Kretzer desenvolveu um programa para realizar o reprojeto de transformadores, que tem como base três pastas de trabalho implementadas no software Excel. Ele relatou que a principal referência utilizada foi [8], livro que também é utilizado como referência neste trabalho.

O programa desenvolvido foi comparado com outros utilizados nas duas empresas em que I. Kretzer trabalhou. No início da utilização do programa, este também era atualizado de acordo com os resultados obtidos dos ensaios realizados nos transformadores após serem reformados. Isto possibilitou a adequação de alguns parâmetros de acordo com a realidade das empresas. Este programa desenvolvido por I. Kretzer é utilizado na Belman desde a sua fundação, além de ter sido utilizado também nas duas empresas em que I. Kretzer trabalhou. Até o presente momento, tem mostrado bons resultados ao longo de sua utilização em todos estes anos. No entanto, o programa numérico em forma de planilhas no software Excel ainda tem algumas limitações, tal como o cálculo da reatância de dispersão, e também não existe uma documentação formal explicando o seu funcionamento.

Das três pastas de trabalho existentes, a primeira é onde são exibidas as instruções para a construção dos enrolamentos necessários, a segunda é onde são inseridos os dados e a terceira é onde a maior parte das fórmulas estão localizadas. As três pastas de trabalho serão brevemente apresentadas nesta seção, assim como um fluxograma simplificado do processo seguido pela Belman para o reprojeto de transformadores.

3.1.1 Pasta de trabalho 1: impressão

Na pasta de trabalho 1, cujo nome é IJK1.1 e está mostrada na Figura 17, tem-se um resumo das informações das pastas de trabalho 2 e 3, com as instruções necessárias para a construção dos enrolamentos. Ela é composta por diversas planilhas, feitas para os tipos de

enrolamentos diferentes. O tipo necessário é escolhido pelo usuário manualmente, que irá exibir e imprimir as informações da planilha.

Figura 17 - Pasta de trabalho 1 (IJK1.1).

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

ENROLAMENTO DE AT

CLIENTE: SULCATARINENSE MARCA: ITEL POT: 45,0 KVA
MOLDE: 139 X 120 SÉRIE: 18720 N° PROJ.:
PAPEL: 0,20 BT: 320 AT: 3250
FIO: 23 LIGAÇÃO: D/Y PESO: 5,11 KG

2 BOBINA SIMPLES 30,25 CAMADAS 22,9
TOTAL DE ESPIRAS 692
0 BOBINA DE DERIVAÇÃO 0 0 692

DIÂMETRO EXTERNO: 162 COMEÇO: DIR
PERDAS RESISTIVAS DE AT: 57,9 DERIVAÇÃO: DIR
OBS.: CANAL DE ÓLEO NÃO

ENROLAMENTO DE BT

MOLDE: 66 X 150 CABRETEIRA: 20
FIO: 6 X 5 CILINDRO: 398
AXIAIS: 1 RADIAIS: 1 PESO: 6,15 KG
PAPEL: 0,2 5 CAMADAS 10,00
2 BOBINA DE BT TOTAL DE ESPIRAS 50

DIÂMETRO EXTERNO: 134 COMEÇO: ESQ
PERDAS RESISTIVAS DE BT: 0,0528
OBS.: CANAL DE ÓLEO NÃO

VALORES DE CÁLCULO VAL. DA BMR(440)

VALORES DE CÁLCULO	VAL. DA BMR(440)	TOL.
$I_1 = 0,00$	20 = 4	4,8
$W_1 = 0,00$	50 = 53	
$PF = 2429,07$	PF = 1000	1080
$V_1 = 2,32$	VE = 3,5	3,76

VAL. DE ENSAIO

VAL. DE ENSAIO		
$S_{\text{CALC}} = 0,259$	$S_{\text{ENSAO}} = 4,17$	
$S_{\text{ENSAO}} = 4,17$	$V. / \text{ENSAO} = 4,39$	
$V_{\text{ENSAO}} = 0$	20 =	8
$V_{\text{ENSAO}} = 0$	50 =	W
$V_{\text{ENSAO}} = 0$	PF =	W
$V_{\text{ENSAO}} = 0$	VE =	W
$V_{\text{ENSAO}} = 0$	VE =	8

VALORES DE ENSAIO

VALORES DE ENSAIO		
10 =	0	%
50 =	0	W
PF =	0	W
VE =	0	W
VE =	0	%

Fonte: Material fornecido pela Belman.

Esta pasta de trabalho, no entanto, não foi finalizada quando o programa estava sendo desenvolvido, pois muitas das planilhas estão incompletas. Ainda assim, com as planilhas não finalizadas, é possível construir as bobinas necessárias para os reparos. As informações que faltam estão mais relacionadas com imagens explicativas, que facilitariam o trabalho da pessoa responsável por bobinar os enrolamentos.

As informações que são obtidas nesta planilha podem ser encontradas no Anexo A, onde tem-se o reprojeto do transformador que é o objeto do estudo de caso apresentado no capítulo 5.

3.1.2 Pasta de trabalho 2: dados

Na pasta de trabalho 2, cujo nome é IJK1.2 e está mostrada na Figura 18, tem-se apenas uma planilha, onde são inseridos os dados construtivos do transformador que está sendo projetado, relacionados ao núcleo e às bobinas de alta e baixa tensão. Nesta planilha também

se tem o resultado de alguns cálculos realizados na pasta de trabalho 3, que são utilizados como base na inserção de dados de escolha do usuário. Com base no gradiente de temperatura previsto para o enrolamento, por exemplo, o projetista pode escolher uma bitola maior ou menor para os fios utilizados. A metodologia utilizada será apresentada de forma básica na seção 3.1.4 e de maneira mais detalhada no capítulo 4.

Assim como a primeira pasta de trabalho, esta também não está finalizada, pois falta a inserção de fórmulas para o reprojeto de bobinas de reguladores de tensão. Pode-se observar na Figura 18 que a fonte da parte da planilha em que seriam inseridos os “dados de alta tensão”, para o reprojeto de reguladores, está com cor branca.

Figura 18 - Pasta de trabalho 2 (IJK1.2).

REPROJETO DE TRANSFORMADORES												
ENVTE=1 ; ENVDO=2	0			B _m =	1,70	NBR	W ₀ =	251,93	220,0			
Data de Fabricação	-			V ₂ =	4,39		I ₀ =	3,74	3,7		I ₀ =	#DIV/0!
Cliente	SULCATARINENSE			D. FAS =	-14		GRAD. (AT) =	8,70			GRAD. (BT) =	0,00
Fabricante	ITEL			P _{nat} =	309,3		GRAD. (BT) =	16,05				
N Série	18720			P _{nat} =	370,6		D _{at} =	2,09				
N° de Reforma	-			P _{nat-10} =	829,4	780,0	D _{bc} =	3,38			D _{bc} =	#DIV/0!
Potência	45			D _{est} =	226		S ₀ =	73,39				
Número de Fases	3			D _{est} =	134		Kg->AT/BT	12,32	0,00		Kg->AT/BT	0,00
DADOS DO NUCLEO			DADOS DE BAIXA TENSÃO				DADOS DE MÉDIA TENSÃO				DADOS DE ALTA TENSÃO	
LARG.	ESP.	V2 (Linha)	380			VI (Fase)	13800	13800			VI (Fase)	13800
1	104	20	Circ.=1 ; Ret.=2	2	3	N Bob (p/ Fase)	6				N Bob (p/ Fase)	
2	94	15	Fio (axial)	6		Bob. Simp.	4	?			Bob. Simp.	?
3	74	12,3	Fio (radial)	3,5		Bob. Der.	2	?			Bob. Der.	?
4	54	7,8	Axial	1		Início da Bob.	ESQ	ESQ			Início da Bob.	0
5	34	3,6	Radial	1		Início da Der.	DIR	?			Início da Der.	?
6			Início BT	ESQ		Der. Int.=1;Ext.=2	2	2			Der. Int.=1;Ext.=2	2
7			Diâm. Int.	114	54	110,1	Diâm. Int.	101	87	150	Diâm. Int.	180
8			Altura	275		283	Altura	25	31		Altura	-40
9			N2	66		77,4	Circ.=1 ; Ret.=2	1			Circ.=1 ; Ret.=2	-77
10			Esp. Papel	0,5		0,5	Fio AT (AXIAL)	20	N1		Fio AT (AXIAL)	N1
11			FIO EM AWG	-		2,00	Fio AT (RADIAL)	0	4151		Fio AT (RADIAL)	692
12	HJ	290	Cabeceira	27			Axial	1	N Camadas		Axial	N Camadas
13	LJ	108	S (mm2)	20,2		20,14	Radial	1	30,3		Radial	30,3
14	ESP. DA CHAPA	0,27	Canal;S=0;P=1;T=2	0			Esp. Papel	0,1	Cabeceira		Esp. Papel	Cabeceira
15	CORTE		Esp. Canal	0	3	<-CAN.	Canal-S=0-P=1-T=2	0	35,71428571		Canal-S=0-P=1-T=2	-77,5
16	45=1,90=2	1	N columnas	0			Esp. Canal	0	S (mm2)		Esp. Canal	S (mm2)
17	D/Y=1-D/D=2-D/ZZ=3-Y/Y=4-Y/D=5-Y/ZZ=6			1			N Tap's	1	0,5191		N Tap's	0,5191
18							Volt's p/ Degrau	600	600,0		Volt's p/ Degrau	600,0

Fonte: Material fornecido pela Belman.

3.1.3 Pasta de trabalho 3: cálculos

Na pasta de trabalho 3, cujo nome é IJK1.3 e está mostrada na Figura 19, também se tem apenas uma planilha, onde são realizados os cálculos com base nos dados inseridos na pasta de trabalho 2. Nela também são encontradas tabelas utilizadas como referência, tanto para as perdas estipuladas em normas técnicas quanto para diâmetros de fios. Esta planilha pode ser

consultada em caso de dúvida sobre algum resultado, de maneira a se entender melhor o projeto que está sendo feito e quais os parâmetros que precisam ser modificados.

Assim como a primeira e a segunda pasta de trabalho, esta também não está finalizada, pois falta a inserção de algumas fórmulas relacionadas às reatâncias de dispersão de alguns tipos de núcleo. Na Figura 19 pode ser observado que a fonte da parte da planilha em que apareceriam os resultados para alguns parâmetros do núcleo envolvente, por exemplo, estão com cor cinza.

Figura 19 - Pasta de trabalho 3 (IJK1.3).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	NÚCLEO ENVOLVENTE (ESPIRAL)													DIÂMETRO		BITOLA	SEÇÃO				
2	FÓRMULAS													mm	AWG	mm ²					
3	L _{FE} = 85,88 M													4,790	5	16,7639					
4	P _{FE} = 49,16 KG													4,270	6	13,2993					
5	L _{CU1} = 59,90 M													3,810	7	10,5496					
6	P _{CU1} = 11,49 KG													3,409	8	8,3674					
7	L _{CU2} = #VALOR!													3,043	9	6,6326					
8	P _{CU2} = #VALOR!													2,720	10	5,2604					
9	L _{CU2} = #VALOR!													2,431	11	4,1692					
10	P _{CU2} = #VALOR!													2,172	12	3,3071					
11	P _{CU2} = #VALOR!													1,943	13	2,6273					
12	P _{CU2} = #VALOR!													1,737	14	2,0816					
13	P _{CU2} = #VALOR!													1,557	15	1,6513					
14	P _{CU2} = #VALOR!													1,392	16	1,307					
15	P _{CU2} = #VALOR!													1,250	17	1,0405					
16	P _{CU2} = #VALOR!													1,118	18	0,8235					
17	P _{CU2} = #VALOR!													1,003	19	0,6533					
18	P _{CU2} = #VALOR!													0,897	20	0,5191					
19	P _{CU2} = #VALOR!													0,805	21	0,4117					
20	P _{CU2} = #VALOR!													0,721	22	0,3247					
21	P _{CU2} = #VALOR!													0,648	23	0,2588					
22	P _{CU2} = #VALOR!													0,582	24	0,2051					
23	P _{CU2} = #VALOR!													0,523	25	0,1626					
24	P _{CU2} = #VALOR!													0,470	26	0,1282					
25	P _{CU2} = #VALOR!													0,419	27	0,1024					
26	P _{CU2} = #VALOR!													0,376	28	0,0804					
27	P _{CU2} = #VALOR!													0,340	29	0,0647					
28	P _{CU2} = #VALOR!													0,305	30	0,0507					
29	P _{CU2} = #VALOR!													0,274	31	0,0405					
30	P _{CU2} = #VALOR!													0,249	32	0,032					
31	P _{CU2} = #VALOR!													0,224	33	0,0254					
32	P _{CU2} = #VALOR!													0,198	34	0,0201					
33	P _{CU2} = #VALOR!													0,178	35	0,0161					
34	P _{CU2} = #VALOR!													0,160	36	0,0127					
35	P _{CU2} = #VALOR!													DIÂMETRO		BITOLA	SEÇÃO				
36	P _{CU2} = #VALOR!													DIÂMETRO		BITOLA	DIÂMETRO		BITOLA		
37	P _{CU2} = #VALOR!													6		3,5					
38	P _{CU2} = #VALOR!																				

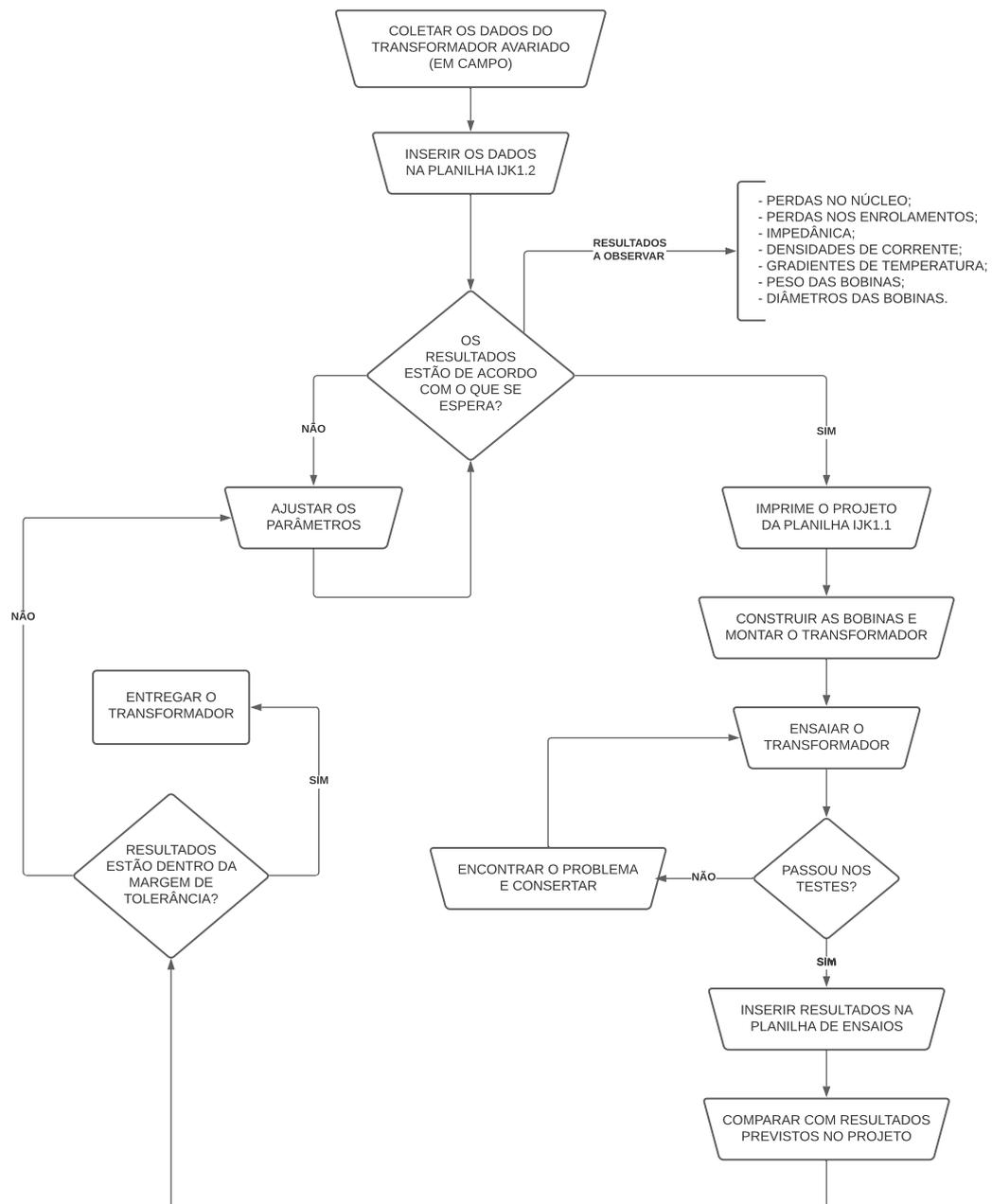
Fonte: Material fornecido pela Belman.

3.1.4 Fluxograma simplificado

Com base no processo de projeto seguido pela Belman, foi montado um fluxograma simplificado, mostrado na Figura 20. Observa-se que o primeiro passo é a coleta dos dados do transformador avariado em campo, pois é a partir dos dados do transformador existente que o reprojeto será feito. Os tipos de dados serão tratados mais adiante neste trabalho. Os dados coletados são inseridos em IJK1.2 e são observados os resultados calculados para os valores das perdas no núcleo e nos enrolamentos, da impedância, das densidades de corrente, dos gradientes de temperatura, do peso das bobinas e do diâmetro delas. Caso eles não estejam

dentro dos limites esperados, que serão especificados adiante, os valores dos parâmetros devem ser ajustados. Esse ajuste também é feito caso haja uma limitação no material disponível para a construção das bobinas, por exemplo, quando é necessário utilizar um material de especificação diferente das bobinas já existentes no transformador. São os cálculos que vão indicar que o uso do material diferente não vai prejudicar o funcionamento do equipamento que está passando pela manutenção corretiva.

Figura 20 - Fluxograma do processo seguido para o projeto de transformadores.



Fonte: Autora.

Após os parâmetros serem ajustados e os resultados observados estarem dentro do limite desejado, o projeto das bobinas é impresso. Alguns ajustes ainda podem ser feitos no projeto impresso por conta das limitações existentes na planilha, para posteriormente serem construídas as bobinas e feita a montagem do transformador. Após a montagem, ele é ensaiado em laboratório e são comparados os resultados obtidos com os que haviam sido calculados.

Caso o transformador não passe nos testes, no entanto, será necessário investigar a origem do problema e corrigi-lo. O problema pode estar relacionado, por exemplo, com a montagem do transformador ou com a própria construção das bobinas. Na Belman, há uma minoria de casos em que é necessário desmontar a bobina que havia sido construída, implementando uma nova. Existe também a possibilidade de os resultados dos ensaios estarem fora dos limites especificados, caso em que também pode chegar a ser necessário a reconstrução da bobina.

Na Belman, o transformador é devolvido para o cliente somente após a realização dos ensaios e a comprovação do seu bom funcionamento. Os ensaios realizados serão descritos no capítulo 4.

3.2 METODOLOGIA E CÁLCULOS

3.2.1 Coleta de dados

Como mencionado na seção 3.1.4, a primeira etapa do reprojeto de transformadores é a coleta de dados. São coletados dados de placa, do núcleo e das bobinas de baixa e alta tensão, conforme será apresentado nesta seção.

3.2.1.1 Placa

Os dados de placa necessários são a potência nominal, as tensões nominais, a frequência nominal e a ligação entre os enrolamentos. No caso do transformador trifásico, que é o foco deste trabalho, as ligações mais encontradas são: delta (Δ), estrela (Y) e zig-zag (Z).

Os dados a serem coletados estão nomeados na Tabela 1 e na Tabela 2. A primeira apresenta os dados que serão utilizados nos cálculos da seção 3.2.2, juntamente com as abreviações utilizadas. A segunda apresenta outras características construtivas que devem ser observadas e que também podem influenciar nos cálculos.

Tabela 1 - Dados de placa a serem coletados, usados diretamente nos cálculos.

Dado coletado	Abreviação	Unidade
Potência nominal	P	kVA
Tensão nominal de linha de alta tensão	$V_{ATlinha}$	kV
Tensão nominal de linha de baixa tensão	$V_{BTlinha}$	V
Frequência nominal	f	Hz
Tensão do <i>tap</i>	V_{ATtap}	V
Quantidade de <i>tap</i> 's	Q_{ATtap}	-

Fonte: Autora.

Tabela 2 - Dados de placa a serem coletados, usados indiretamente nos cálculos.

Dado coletado	Dados possíveis
Ligação entre as bobinas de alta tensão	Delta (Δ), estrela (Y) ou zig-zag (Z)
Ligação entre as bobinas de baixa tensão	Delta (Δ), estrela (Y) ou zig-zag (Z)

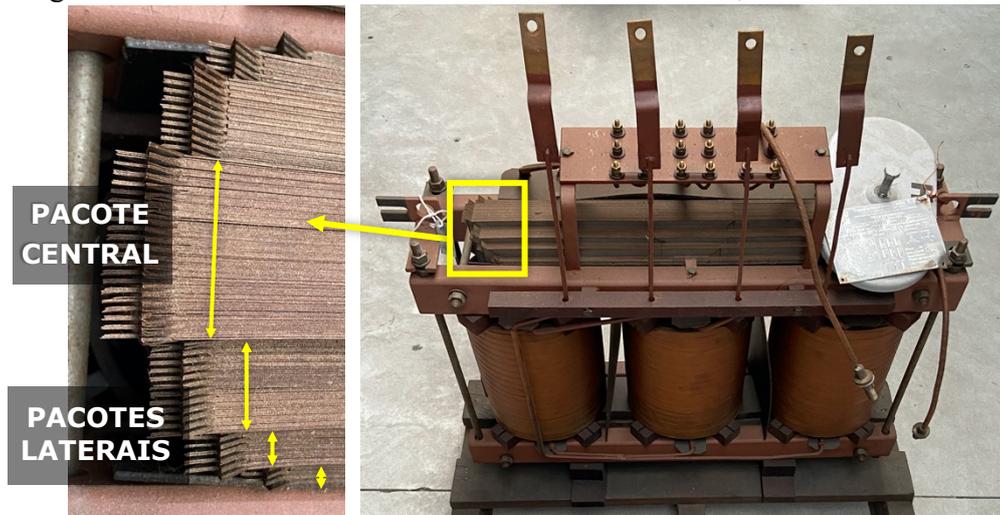
Fonte: Autora.

3.2.1.2 Núcleo

Os dados do núcleo necessários são a largura e a espessura dos pacotes de chapas, a espessura de cada chapa e a altura e largura da janela entre as colunas do núcleo.

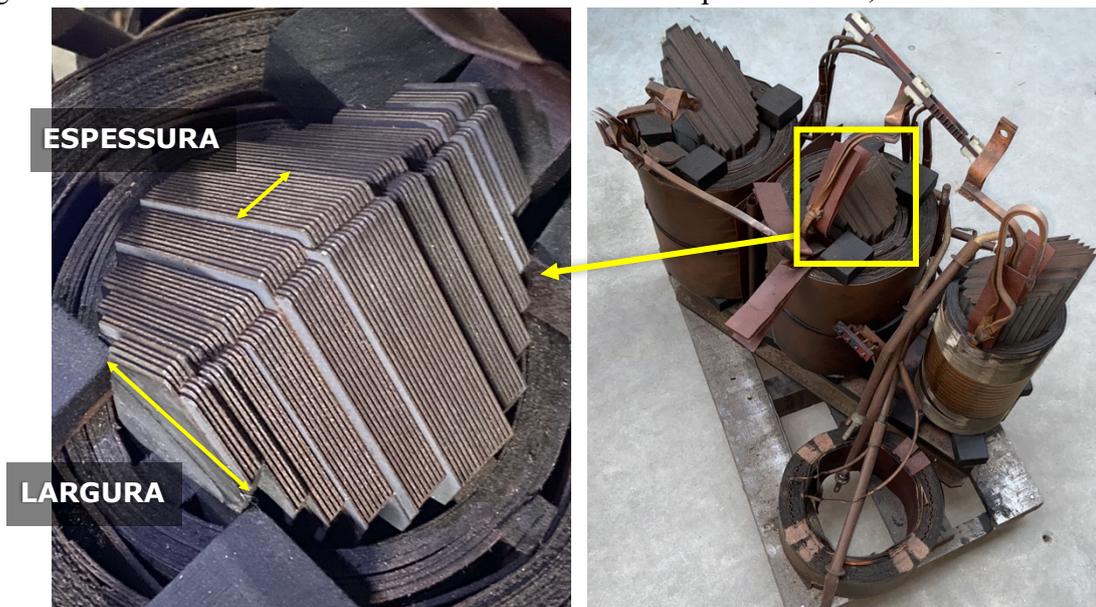
No detalhe da Figura 21, observa-se a montagem do núcleo de um transformador de 75 kVA. O núcleo tem 4 pacotes de chapas: um central e três em cada lateral. Quando as medições são feitas, no entanto, o núcleo do transformador não está totalmente montado, pois nem todos os parâmetros poderiam ser obtidos dessa maneira. Conforme mostra a Figura 21, pode-se ter apenas a medida da espessura dos pacotes de chapas (que é a medida vertical), enquanto no detalhe da Figura 22, pode-se obter também a dimensão horizontal (que é a medida das larguras). Neste outro transformador, o núcleo tem seis pacotes a serem medidos: o pacote central e os cinco pacotes em cada lateral. A espessura de cada chapa do núcleo também deve ser medida. Como já mencionado, além dos dados já mencionados, a altura e a largura das janelas do núcleo também devem ser medidas, pois essa medida vai limitar o tamanho das bobinas de baixa e de alta tensão.

Figura 21 - Parte ativa de um transformador de 75 kVA, com detalhe no núcleo.



Fonte: Autora.

Figura 22 - Parte ativa de um transformador desmontada parcialmente, com detalhe no núcleo.



Fonte: Autora.

Os núcleos que aparecem na Figura 21 e na Figura 22 são núcleos do tipo empilhado, em que as chapas são encaixadas uma dentro da outra. Outro tipo de núcleo que poderia ser encontrado é do tipo enrolado, em que as chapas são enroladas e passam pelo interior das bobinas, “abraçando” duas de cada vez. Quando o núcleo é do tipo enrolado, os dados a serem coletados diferem um pouco daqueles do tipo empilhado, mas este assunto não será tratado neste trabalho.

Os dados a serem coletados estão listados na Tabela 3 e na Tabela 4. A primeira apresenta os dados que serão utilizados nos cálculos da seção 3.2.2, juntamente com as

abreviações utilizadas. A segunda apresenta outras características construtivas que devem ser observadas e que também podem influenciar nos cálculos.

Tabela 3 - Informações do núcleo a serem coletadas e usadas diretamente nos cálculos.

Dado coletado	Abreviação	Unidade
Largura dos pacotes de chapa (<i>i</i> sendo o número de pacotes)	$L_{N1} \dots L_{Ni}$	mm
Espessura dos pacotes de chapa (<i>i</i> sendo o número de pacotes)	$E_{N1} \dots E_{Ni}$	mm
Altura da janela	H_J	mm
Largura da janela	L_J	mm
Espessura da chapa	E_C	mm

Fonte: Autora.

Tabela 4 - Informações do núcleo a serem coletadas, usadas indiretamente nos cálculos.

Dado coletado	Situações possíveis de ocorrerem
Tipo de núcleo	Envolvente ou envolvido
Tipo de montagem do núcleo	Empilhado ou enrolado
Qualidade do núcleo	Bom, regular ou ruim

Fonte: Autora.

3.2.1.3 Bobinas de baixa tensão

Das bobinas de baixa tensão, é necessário verificar qual o fio utilizado, o sentido de enrolamento das bobinas, as suas dimensões, os canais de passagem do óleo isolante e também a quantidade de espiras. Para tal, normalmente será necessário desmontar parte do núcleo, retirando a bobina de alta tensão que fica sobre a bobina de baixa tensão.

A verificação do fio utilizado está relacionada não só com a bitola do fio, mas também com o tipo e com a quantidade. O fio pode ser, por exemplo, retangular ou circular, o que muda a forma como será identificada a sua bitola. Pode-se ter também vários fios em paralelo, para possibilitar a utilização de fios com bitolas menores, facilitando a montagem das bobinas. É necessário verificar, neste caso, a quantidade de fios posicionados radialmente (no sentido do raio da bobina) e axialmente (no sentido paralelo à coluna do núcleo). No caso das bobinas de baixa tensão, é comum o uso de fios retangulares em paralelo, uma vez que a corrente pode ser relativamente alta, dependendo da potência do transformador.

O sentido de enrolamento dos fios vai determinar o sentido do fluxo magnético. Portanto, deve-se prestar atenção a essa informação para o sentido do fluxo, pois não pode ser alterado quando a reforma do transformador é parcial.

As dimensões da bobina que devem ser verificadas são a sua altura, os seus diâmetros internos e externos e também a cabeceira, que equivale à distância entre a bobina e a culatra do núcleo. A culatra é a parte horizontal que interliga as colunas do núcleo, tanto na parte inferior quanto na parte superior.

Os canais de passagem de óleo isolante podem ser parciais ou totais, ou mesmo não existirem, dependendo do projeto do transformador. São responsáveis pelo resfriamento e isolamento da bobina. Eles têm dimensões radiais que devem ser medidas, para que possam ser replicados.

A quantidade de espiras também deve ser verificada, sendo uma atividade fácil de ser executada uma vez que é relativamente pequena por ser no lado de baixa tensão. É a partir dessa quantidade de espiras que será possível calcular, posteriormente, a indução no núcleo e a quantidade de espiras na bobina de alta tensão. A partir do estudo de caso que será apresentado no capítulo 4, pode-se entender melhor a situação.

Os dados a serem coletados estão listados na Tabela 5 e na Tabela 6. A primeira apresenta as informações que serão utilizados nos cálculos da seção 3.2.2, juntamente com as abreviações utilizadas. A segunda apresenta outras características construtivas que devem ser observadas e que também podem influenciar nos cálculos. No caso das bobinas de baixa tensão, considerou-se que o fio utilizado é retangular.

Tabela 5 - Informações das bobinas de BT a serem coletadas usadas diretamente nos cálculos.

Dado coletado	Abreviação	Unidade
Bitola axial do fio utilizado (considerando-se fio retangular)	$F_{BTaxial}$	mm
Bitola radial do fio utilizado (considerando-se fio retangular)	$F_{BTradial}$	mm
Quantidade de fios axiais (considerando-se fio retangular)	$Q_{BTaxial}$	-
Quantidade de fios radiais (considerando-se fio retangular)	$Q_{BTradial}$	-
Número de espiras por camada	$N_{BTcamada}$	-
Quantidade de camadas	$Q_{BTcamadas}$	-
Quantidade de canais	$Q_{BTcanais}$	-
Espessura de cada canal	$E_{BTcanal}$	mm
Altura da bobina	H_{BT}	mm
Altura da cabeceira	H_{BTcab}	mm
Diâmetro interno da bobina	D_{BTi}	mm
Diâmetro externo da bobina	D_{BTe}	mm

Fonte: Autora.

Tabela 6 - Informações das bobinas de BT a serem coletados, usadas indiretamente nos cálculos.

Dado coletado	Dados possíveis
Início da bobina	Horário ou anti-horário
Tipo de canal	Sem canal, canal parcial ou canal total

Fonte: Autora.

3.2.1.4 Bobinas de alta tensão

Assim como no caso das bobinas de baixa tensão, é necessário verificar qual o fio utilizado, o sentido de enrolamento das bobinas, as suas dimensões e a quantidade de canais. Mas, ao contrário do lado de baixa tensão, não é verificada a quantidade de espiras. No entanto, a quantidade de bobinas deve ser verificada, pois normalmente os enrolamentos de alta tensão de uma fase se dividem em duas ou mais bobinas, assim como os *tap*'s (também chamado de "tapes") do transformador. Os *tap*'s são as posições de ajuste disponíveis em um transformador, que variam a sua relação de transformação.

Como mencionado em 3.2.1.3, a verificação do fio utilizado está relacionada não só com a bitola do fio, mas também com o tipo e com a quantidade, informações que devem ser coletadas. No caso da bobina de alta tensão de transformadores com potências menores, normalmente se tem apenas um fio circular. Nesse caso, é medido o seu diâmetro e verificado o seu equivalente em *American Wire Gauge* (AWG). Particularmente aos procedimentos na empresa, para medir o diâmetro do fio do enrolamento de alta tensão não é necessário retirar parte do seu esmalte que isola o fio entre as espiras, pois a tabela utilizada como referência pela Belman já fornece o valor do diâmetro do fio com a inclusão do esmalte. Esta mesma tabela fornece também a seção do fio, já desconsiderando o esmalte, dado que também será utilizado nos cálculos.

O sentido de enrolamento dos fios, como no caso das bobinas de baixa tensão, também vai determinar o sentido do fluxo magnético. Da mesma forma, se o fio é enrolado no sentido horário ou anti-horário.

Assim como em 3.2.1.3, as dimensões da bobina que devem ser verificadas são a sua altura, os seus diâmetros internos e externos e a cabeceira. Quando há mais de uma bobina, as dimensões são referentes a apenas uma bobina, sendo necessário verificar também a quantidade de bobinas "simples" e "com derivação".

As bobinas com derivação estão relacionadas com os *tap*'s dos transformadores, que permitem o ajuste a tensão de saída. Esse ajuste, no caso dos transformadores de distribuição,

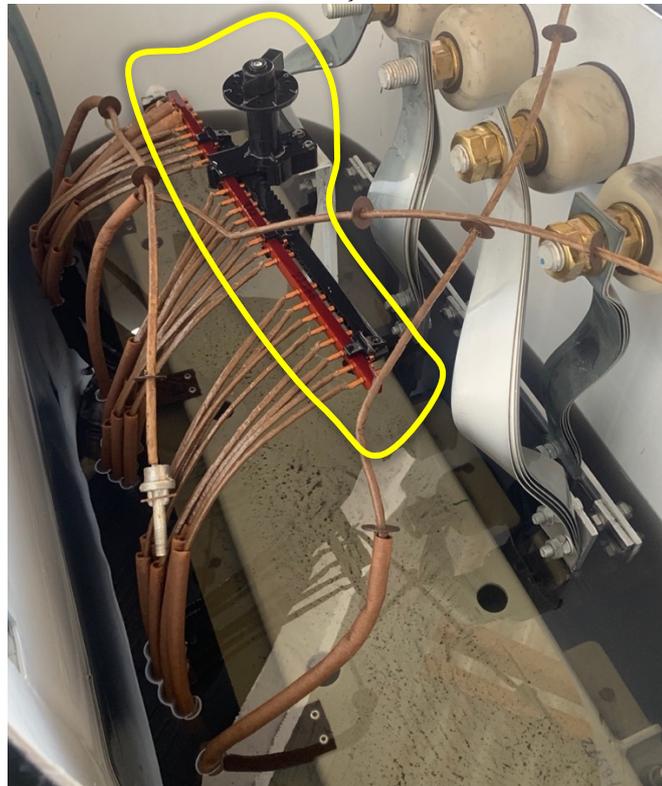
geralmente é feito através de painéis de comutação ou de chaves rotativas (vide Figura 23 e Figura 24, respectivamente). As saídas das derivações são conectadas nestes dispositivos e as diferentes conexões resultantes do ajuste alteram a quantidade de espiras utilizadas nas bobinas de alta tensão, conseqüentemente alterando a relação de transformação e a tensão de saída. No entanto, estas derivações podem influenciar também no fluxo de dispersão, dependendo do posicionamento das espiras que serão retiradas do circuito [3].

Figura 23 – Painel de comutação de um transformador.



Fonte: Autora.

Figura 24 – Chave rotativa de comutação de um transformador (avariado).



Fonte: Autora.

Os canais de passagem de óleo isolante a serem verificados são análogos aos canais descritos na seção 3.2.1.3, e também podem ser parciais, totais ou mesmo não existirem.

As informações a serem coletadas estão listadas na Tabela 7 e na Tabela 8. A primeira apresenta as informações que serão utilizados nos cálculos da seção 3.2.2, juntamente com as abreviações utilizadas. A segunda apresenta outras características construtivas que devem ser observadas e que também podem influenciar nos cálculos. Na metodologia utilizada, no caso das bobinas de alta tensão, considera-se que o fio utilizado é circular.

Tabela 7 - Informações das bobinas de AT a serem coletadas e usados diretamente nos cálculos.

Dado coletado	Abreviação	Unidade
Diâmetro do fio utilizado (considerando-se fio circular)	D_{AT}	mm
Seção do fio utilizado (considerando-se fio circular)	S_{ATfio}	mm ²
Quantidade de bobinas simples	$Q_{ATsimples}$	
Quantidade de bobinas com derivação	$Q_{ATderivacao}$	-
Quantidade de canais	$Q_{ATcanais}$	-
Espessura de cada canal	$E_{ATcanal}$	mm
Altura da bobina	H_{AT}	mm
Altura da cabeceira	H_{ATcab}	mm
Diâmetro interno da bobina	D_{ATi}	mm
Diâmetro externo da bobina	D_{ATe}	mm

Fonte: Autora.

Tabela 8 - Informações das bobinas de AT a serem coletadas, usadas indiretamente nos cálculos.

Dado coletado	Dados possíveis
Início da bobina	Horário ou anti-horário
Bitola AWG do fio (considerando-se fio circular)	(comparar D_{AT} com tabela do fornecedor)
Tipo de canal	Sem canal, canal parcial ou canal total

Fonte: Autora.

3.2.2 Cálculos

Após a coleta dos dados, eles são inseridos na pasta de trabalho IJK1.2, conforme mencionado na seção 3.1.4, onde se observam alguns dos resultados calculados. Nesta seção são apresentados os cálculos realizados pelo programa para o estudo de caso do capítulo 4, em que se tem um transformador com núcleo empilhado, fio retangular utilizado na baixa tensão,

fio circular na alta tensão, ligação das bobinas de baixa tensão em Y e ligação das bobinas de alta tensão em Δ . Serão sugeridas também mudanças em algumas fórmulas, de maneira que aumente a precisão dos resultados dos cálculos. Os cálculos estão separados em cinco partes, iniciando com os cálculos que se referem apenas ao núcleo e às bobinas de baixa e alta tensão, seguido pelo cálculo das perdas no núcleo e nos enrolamentos, que irá considerar os resultados dos primeiros cálculos.

3.2.2.1 Núcleo

Primeiramente é calculada a seção geométrica do núcleo (S_G) conforme a equação (12) com base nos dados dos pacotes de chapas, onde $L_{N1}, L_{N2}, \dots, L_{Ni}$ são as larguras dos pacotes de chapa do núcleo e $E_{N1}, E_{N2}, \dots, E_{Ni}$ são as espessuras dos pacotes de chapa, sendo i o número de pacotes contados do centro a um dos lados do núcleo. O cálculo consiste na soma da área do pacote central e dos pacotes laterais de chapa, este último multiplicado por dois.

$$S_G = L_{N1} \cdot E_{N1} + 2 \cdot (L_{N2} \cdot E_{N2} + L_{N3} \cdot E_{N3} + L_{N4} \cdot E_{N4}) \quad (12)$$

A seção geométrica, no entanto, não corresponde à seção magnética (S_M), dada pela equação (13), que seria a seção do núcleo pela qual o fluxo magnético é efetivamente conduzido. Isso acontece principalmente por causa do isolamento entre as chapas [3], definindo-se o fator de empilhamento (K_e) como a relação entre S_M e S_G . A Belman utiliza $K_e = 0,94$, mas é sugerido por [3] o uso da Tabela 9, que fornece o valor de K_e com base no isolamento da chapa e na sua espessura E_C .

$$S_M = K_e \cdot S_G \quad (13)$$

Tabela 9 – Valores do fator de empilhamento de chapas para núcleo.

	Isolamento								
	Papel			Verniz			Silicônico		
E_C (mm)	0,50	0,40	0,35	0,50	0,40	0,35	0,35	0,30	0,28
K_e	0,88 a 0,91	0,86 a 0,89	0,85 a 0,88	0,90 a 0,93	0,89 a 0,92	0,88 a 0,90	0,97	0,96	0,95

Fonte: [3].

O fator de empilhamento também é fornecido pelo fabricante das chapas. No entanto, para diminuir os custos com materiais e tornar a reforma viável, as chapas do núcleo já existente são reaproveitadas quando é feito o reprojeto de um transformador. Além disso, a Tabela 9 não fornece o valor de K_e para chapas com $E_C = 0,27 \text{ mm}$ (caso do transformador estudado no capítulo 4). Propõe-se, portanto, manter o K_e utilizado pela Belman, que é próximo do menor valor para K_e encontrado na Tabela 9, em que $E_C = 0,28 \text{ mm}$.

Além das seções do núcleo, se faz necessário calcular também a indução magnética máxima no núcleo com base no número de espiras da bobina de baixa tensão (N_{BT}), na seção magnética do núcleo (S_M) calculada em (13), a frequência nominal (f) e a tensão de fase da baixa tensão (V_{BTfase}). Utiliza-se a equação (4), que ao ser adaptada resulta em (14).

$$B_M = \frac{V_{BTfase}}{4,44 \cdot N_{BT} \cdot f \cdot S_M} \quad (14)$$

Para utilizar a equação (14) ainda é necessário calcular V_{BTfase} e N_{BT} , que não foram coletados na seção 3.2.1. Para isso, utilizam-se as equações (15) e (16). Em (15), considera-se a tensão de linha ($V_{BTlinha}$) na forma de onda senoidal, que é um dado de placa do transformador, e que as bobinas de baixa tensão estão conectadas em estrela (Y). Em (16), utiliza-se a quantidade de camadas ($Q_{BTcamadas}$) e o número de espiras por camada ($N_{BTcamada}$) coletados na seção 3.2.1.

$$V_{BTfase} = \frac{V_{BTlinha}}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

$$N_{BT} = N_{BTcamada} \cdot Q_{BTcamadas} \quad (16)$$

A massa do núcleo (P_{nucleo}) também é calculada pela equação (17), onde γ_{ferro} e b_n correspondem à massa específica do núcleo e à média da largura das colunas, respectivamente. Para o cálculo da massa, multiplica-se a massa específica do material do núcleo pelo seu volume. Para este cálculo, considera-se o valor da massa específica do ferro, cujo valor equivale a $\gamma_{ferro} = 7800 \text{ kg/m}^3$ [8], para fins de simplificação. Este valor poderia mudar também de acordo com a quantidade de silício presente no ferro utilizado no núcleo, mas isto não está sendo considerado.

$$P_{nucleo} = \gamma_{ferro} \cdot S_G \cdot (3 \cdot H_J + 4 \cdot L_J + 6 \cdot b_n) \quad (17)$$

A média da largura das colunas pode ser calculada conforme (18). Foi considerado que se tem quatro pacotes de chapas, como é o caso do transformador que será reprojetoado no capítulo 4.

$$b_n = \frac{L_{N1} + L_{N2} + L_{N3} + L_{N4}}{4} \quad (18)$$

3.2.2.2 Bobinas de baixa tensão

Inicia-se calculando a corrente nominal de linha das bobinas de baixa tensão ($I_{BTlinha}$), dada pela equação (19), em que se utiliza a potência nominal do transformador (P) e a sua tensão nominal de linha de baixa tensão ($V_{BTlinha}$). A corrente nominal de fase (I_{BTfase}) pode ser encontrada de acordo com a ligação entre as bobinas. Logo, ao se considerar que as bobinas estão conectadas em Y, a corrente de linha será igual à corrente de fase.

$$I_{BTlinha} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{BTlinha}} \quad (19)$$

Calcula-se então a seção geométrica do fio utilizado (S_{BTfio}), conforme equação (20), onde $F_{BTaxial}$ é a bitola axial do fio e $F_{BTradial}$ é a bitola radial, sendo ambos dados coletados inicialmente. Considerou-se o caso em que o fio é retangular para as bobinas de baixa tensão.

$$S_{BTfio} = F_{BTaxial} \cdot F_{BTradial} \quad (20)$$

O condutor, no entanto, tem seus cantos arredondados para diminuir os gradientes de potencial e evitar o corte do material isolante que o envolve [3]. A seção final do condutor deve, portanto, ser corrigida através de um fator K_f , conforme equação (21). A Belman usa um valor fixo $K_f = 0,86 \text{ mm}^2$ para reduzir a área. No entanto, é sugerido por [3] o uso dos valores da Tabela 10 para a correção, em que α e β são equivalentes a $F_{BTaxial}$ e $F_{BTradial}$, respectivamente. Na tabela, tem-se “r” como o valor do raio do arredondamento dos cantos do fio e “red (mm²)” como o valor de redução de área, equivalente ao valor de K_f a ser utilizado

na equação (21). Como melhoria, sugere-se o uso dessa tabela no novo programa. Dessa forma, para o caso do transformador estudado neste trabalho, obtém-se $K_f = 55 \text{ mm}^2$.

$$S_{BTfio2} = S_{BTfio} - K_f \quad (21)$$

Tabela 10 – Raio de curvatura dos cantos e a redução da seção do condutor.

α (mm)	β (mm)	0,7 a 1,0	1,1 a 1,5	1,6 a 1,8	1,9 a 3,1	3,3 a 4,2	4,3 a 5,7	5,8 a 6,4
2,6 a 4,8	r		0,3	0,4	0,4	0,8	1,2	-
	red. (mm ²)	0,15*	0,08	0,14	0,14	0,55	1,24	-
4,8 a 19,0	r				0,8	0,8	1,2	1,6
	red. (mm ²)	0,15*	0,35*	0,65*	0,55	0,55	1,24	2,2

* para condutores com formato semelhante ao da Fig. 10 [3, pg. 135]

Fonte: [3].

Após se obter o valor da seção corrigida do fio (S_{BTfio2}), é necessário ainda se obter a seção total, uma vez que os fios das bobinas de baixa tensão normalmente são utilizados em paralelo. O cálculo é feito conforme a equação (22), onde $Q_{BTaxial}$ e $Q_{BTradial}$ são as quantidades de fios axiais e radiais, respectivamente.

$$S_{BTtotal} = S_{BTfio2} \cdot (Q_{BTaxial} + Q_{BTradial}) \quad (22)$$

Calcula-se então o valor da densidade de corrente, conforme a equação (23). Para transformadores a óleo com refrigeração natural, a referência [8] sugere que o valor fique próximo dos indicados na Tabela 11.

$$d_{BT} = \frac{I_{BTfase}}{S_{BTtotal}} \quad (23)$$

Tabela 11 – Densidade de corrente nos enrolamentos de um transformador.

P (kVA)	5	10	25	50	100	500	1000	5000
d (A/mm ²)	1,8	2,0	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8

Fonte: [8].

Ainda é calculado o diâmetro externo da bobina (D_{BTe2}), conforme a equação (24), onde D_{BTi} é o diâmetro interno da bobina de baixa tensão, $F_{BTradial}$ é a bitola axial do fio utilizado, $D_{BTisolfio}$ é a espessura da isolação do fio, $Q_{BTradial}$ é a quantidade de fios radiais, $D_{isolcam}$ é a espessura do isolamento entre camadas, $E_{BTcanal}$ é a espessura do canal de óleo (quando é do tipo total), $Q_{BTcanais}$ é a quantidade de canais de óleo e $D_{BTisolfinal}$ é a espessura do isolamento final da bobina. Para isso, a Belman considera as dimensões radiais dos fios e também dos isolamentos conforme a Tabela 12.

$$D_{BTe2} = D_{BTi} + \{[(F_{BTradial} + D_{BTisolfio}) \cdot Q_{BTradial} + D_{isolcam}] \cdot Q_{BTcamadas} + E_{BTcanal} \cdot Q_{BTcanais} + D_{BTisolfinal}\} \cdot 2 \quad (24)$$

Tabela 12 – Dimensões da espessura do isolamento de baixa tensão.

Isolamento	Abreviatura	Valor (mm)
Fio	$D_{BTisolfio}$	0,5
Entre camadas	$D_{BTisolcamada}$	0,5
Final da bobina	$D_{BTisolfinal}$	0,5

Fonte: Belman.

Finalmente, de maneira semelhante à equação (17) referente à massa do núcleo, calcula-se a massa de cada bobina de baixa tensão conforme equação (25). Nesta equação, tem-se que $\gamma_{condutor}$ equivale à massa específica do condutor utilizado (para o cobre tem-se $\gamma_{cobre} = 8.900 \text{ kg/m}^3$ e para o alumínio tem-se $\gamma_{alumínio} = 2.703 \text{ kg/m}^3$ [9]) e l_{BT} equivale ao comprimento médio das espiras das bobinas de baixa tensão, dada pela equação (26), onde D_{BTe2} é o diâmetro externo da bobina calculado em (24) e D_{BTi} é o diâmetro interno da bobina medido. Este cálculo é importante para mensurar o valor do material a ser utilizado na reforma, uma vez que os condutores normalmente são vendidos por peso. Considera-se também a quantidade de fases que serão refeitas ($N_{BTfases}$).

$$P_{BT} = N_{BTfases} \cdot \gamma_{condutor} \cdot S_{BTtotal} \cdot l_{BT} \cdot N_{BT} \quad (25)$$

$$l_{BT} = 2\pi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{D_{BTe2} + D_{BTi}}{2} \quad (26)$$

3.2.2.3 Bobinas de alta tensão

Inicia-se calculando a corrente nominal de linha das bobinas de alta tensão ($I_{ATlinha}$), dada pela equação (27), em que utiliza-se a potência nominal do transformador (P) e a sua tensão nominal de linha de alta tensão ($V_{ATlinha}$). A corrente nominal de fase (I_{ATfase}) pode ser encontrada de acordo com a ligação entre as bobinas. Logo, se for considerado que as bobinas estão conectadas em Δ , a corrente de linha será dada pela equação (28).

$$I_{ATlinha} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{ATlinha}} \quad (27)$$

$$I_{ATfase} = \frac{I_{ATlinha}}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

Calcula-se então o valor da densidade de corrente, conforme equação (29), em que I_{ATfase} é calculada através de (28) e S_{ATfio} é a seção do fio utilizado, encontrada através da tabela do fabricante. Os valores sugeridos são semelhantes ao caso das bobinas de baixa tensão, conforme Tabela 11.

$$d_{AT} = \frac{I_{ATfase}}{S_{ATfio}} \quad (29)$$

É necessário calcular também a quantidade de espiras das bobinas de alta tensão (N_{AT}). Utiliza-se a equação (4), que ao ser adaptada resulta em (30), em que V_{ATfase} é a tensão nominal de fase de alta tensão, B_M é a indução magnética máxima calculada por (14), f é a frequência nominal do transformador e S_M é a seção magnética do núcleo calculada por (13).

$$N_{AT} = \frac{V_{ATfase}}{4,44 \cdot B_M \cdot f \cdot S_M} \quad (30)$$

O valor calculado em (30) corresponde ao número total de espiras. Mas muitas vezes as bobinas de alta tensão são divididas em duas ou mais bobinas, algumas delas com derivação para o ajuste dos *tap*'s, conforme mencionado na seção 3.2.1.4. Calcula-se então a quantidade de espiras por bobina e as espiras em que serão feitas as derivações.

A partir das equações (31) e (32) encontra-se a quantidade total de bobinas ($Q_{ATbobinas}$) e o número de espiras em cada uma delas ($N_{ATbobina}$), enquanto o número de espiras por camada ($N_{ATcamada}$) é calculado pela equação (33). Nestas equações tem-se $Q_{ATsimples}$ como a quantidade de bobinas simples, $Q_{ATderivacao}$ como a quantidade de bobinas com derivação, N_{AT} como o número total de espiras nas bobinas de alta tensão calculado em (30), H_{AT} como a altura de cada bobina de alta tensão, D_{ATcab} como a altura das cabeceiras das bobinas de alta tensão, D_{AT} como o diâmetro do fio utilizado nas bobinas de alta tensão e $N_{ATfolga}$ refere-se à redução da quantidade de espiras consequente do espaço entre os fios de uma camada, que não é igual a zero. Esse espaçamento pode variar de acordo com a pessoa que for construir a bobina e com a sua habilidade, sendo $N_{ATfolga} = 5$ o valor utilizado pela Belman. A quantidade de camadas ($Q_{ATcamadas}$), por sua vez, é calculada pela equação (34).

$$Q_{ATbobinas} = Q_{ATsimples} + Q_{ATderivacao} \quad (31)$$

$$N_{ATbobina} = \frac{N_{AT}}{Q_{ATbobinas}} \quad (32)$$

$$N_{ATcamada} = \frac{H_{AT} - 2 \cdot D_{ATcab}}{D_{AT}} - N_{ATfolga} \quad (33)$$

$$Q_{ATcamadas} = \frac{N_{ATbobina}}{N_{ATcamada}} \quad (34)$$

Para definir em quais espiras serão feitas as derivações, é necessário utilizar a tensão do degrau do *tap* (V_{ATtap}), a tensão nominal de fase de alta tensão (V_{ATfase}) e o número total de espiras da alta tensão (N_{AT}) para definir a quantidade de espiras necessárias para acumular o potencial do degrau do *tap* (N_{ATtap}), conforme equação (35). Esta tensão corresponde à diferença entre os ajustes de tensão possíveis para as bobinas de alta tensão, conforme exemplo da Figura 25, em que se tem a foto da placa de identificação de um transformador de 300 kVA.

$$N_{ATtap} = \frac{V_{ATtap}}{V_{ATfase}} \cdot N_{AT} \quad (35)$$

Figura 25 – Placa de identificação de um transformador.

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

N.º DATA FABRICAÇÃO

POT. kVA NORMA

IMPEDÂNCIA % TIPO DO ÓLEO ISOLANTE

ALTA TENSÃO					TERMINAIS H1 - H2 - H3		
VOLTS	POS	COMUT.	LIGA	LIG.			
13800	1	13 - 16	14 - 17	15 - 18	25	26	27
13200	2	16 - 10	17 - 11	18 - 12	22	23	24
12600	3	10 - 19	11 - 20	12 - 21	19	20	21
12000	4	19 - 7	20 - 8	21 - 9	16	17	18
11400	5	7 - 22	8 - 23	9 - 24	13	14	15
10800	6	22 - 4	23 - 5	24 - 6	10	11	12
10200	7	4 - 25	5 - 26	6 - 27	7	8	9
					4	5	6

BAIXA TENSÃO

TERMINAIS X0 - X1 - X2 - X3

VOLTS	LIGAÇÃO
330 / 220	X0

VOLUME L. P.I. N.º DIAGRAMA FASORIAL Dyn1

ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ÓLEO/ENROLAMENTO °C

MATERIAL DOS ENROLAMENTOS AT/BT

NBI kV ISENTO DE PCB MASSA TOTAL kg

INDÚSTRIA BRASILEIRA

Fonte: Autora.

Ao ser feito o ajuste do *tap*, N_{ATtapn} espiras são excluídas das bobinas de alta tensão, o que tem como consequência a alteração da relação de transformação. A quantidade total de espiras que serão excluídas é dada pela equação (36), em que $V_{ATajuste}$ é o valor da tensão na posição do *tap* e n é a posição do ajuste. Para o caso do transformador da placa da Figura 25, por exemplo, para a posição de ajuste do *tap* em que $n = 2$, tem-se $V_{ATajuste} = 13.200 V$.

$$N_{ATtapn} = \frac{V_{ATfase} - V_{ATajuste}}{V_{ATtap}} \cdot N_{ATtap} \quad (36)$$

Outra forma de fazer esse cálculo é definir o valor de n e multiplicá-la por N_{ATtap} , conforme (37). Este procedimento foi utilizado no estudo de caso neste trabalho.

$$N_{ATtapn} = (n - 1) \cdot N_{ATtap} \quad (37)$$

O diâmetro externo da bobina (D_{ATe2}) é calculado conforme a equação (38), em que D_{ATi} é o diâmetro interno da bobina, D_{AT} é o diâmetro do fio (em que já se considera o seu isolamento), $Q_{ATradial}$ é a quantidade de fios radiais, $D_{isolcamada}$ é a espessura do isolamento entre as camadas, $Q_{ATcamadas}$ é a quantidade de camadas de cada bobina, $E_{ATcanal}$ é a espessura do canal de óleo da bobina de alta tensão, $Q_{ATcanais}$ é a quantidade de canais na bobina de alta tensão e $D_{ATisolfinal}$ é a espessura do isolamento final da bobina de alta tensão. Para isso, a Belman considera as dimensões radiais dos fios e também os valores dos isolamentos da Tabela 13, que podem variar de acordo com o projeto. O valor de $D_{ATisolcamada}$, por exemplo, foi modificado. No caso das bobinas de alta tensão com fio de diâmetro circular, não é considerado o diâmetro do isolamento do fio porque ele já está incluído no diâmetro do próprio fio.

$$D_{ATe2} = D_{ATi} + \{ [D_{AT} \cdot Q_{ATradial} + D_{isolcamada}] \cdot Q_{ATcamadas} + E_{ATcanal} \cdot Q_{ATcanais} \} \cdot 2 + D_{ATisolfinal} \quad (38)$$

Tabela 13 – Dimensões do isolamento de alta tensão.

Isolamento	Abreviatura	Valor (mm)
Entre camadas	$D_{ATisolcamada}$	0,386
Final da bobina	$D_{ATisolfinal}$	4

Fonte: Belman.

Por fim, calcula-se a massa de cada bobina de alta tensão conforme equação (39), de maneira semelhante à massa do núcleo pela equação (17). Como no caso das bobinas de baixa tensão, tem-se que $\gamma_{condutor}$ equivale à massa específica do condutor utilizado, em geral cobre ($\gamma_{cobre} = 8.900 \text{ kg/m}^3$) ou alumínio ($\gamma_{alumínio} = 2.703 \text{ kg/m}^3$) [9], e l_{AT} equivale ao comprimento médio das espiras das bobinas de alta tensão, dada pela equação (40). $N_{ATfases}$ equivale à quantidade de fases da alta tensão que serão refeitas, D_{ATe2} equivale ao diâmetro das bobinas de alta tensão calculado em (38) e D_{ATi} equivale ao diâmetro interno das bobinas de alta tensão.

$$P_{AT} = N_{ATfases} \cdot \gamma_{condutor} \cdot S_{ATfio} \cdot l_{AT} \cdot N_{AT} \quad (39)$$

$$l_{AT} = 2\pi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{D_{ATe2} + D_{ATi}}{2} \quad (40)$$

3.2.2.4 Perdas no núcleo

Conforme já mencionado na seção 2.2, as perdas no núcleo, chamadas de perdas magnéticas, têm origem no fenômeno da histerese magnética e nas correntes induzidas nas lâminas, chamadas de correntes de Foucault. Existem também as perdas anômalas, que ainda são assunto de pesquisa [6], e não serão tratadas aqui por motivos de simplificação.

Segundo [5], a corrente de excitação é calculada através da equação (41), em que o circuito magnético é dividido em várias seções, nas quais o fluxo magnético pode ser considerado constante. Nesta equação, tem-se N como o número de espiras do enrolamento excitado, l_n como o comprimento médio correspondente à seção magnética, I_0 como a corrente de excitação e H_n como o valor do campo magnético. Os valores do campo devem ser obtidos tanto para o material laminado quanto para os entreferros entre as lâminas. Porém, enquanto o primeiro pode ser obtido da curva de magnetização do material, o segundo depende de um processo complexo para ser obtido, que não é abordado neste trabalho.

$$I_0 = \frac{\sum H_n l_n}{N} \quad (41)$$

Sendo assim, calcula-se as perdas do núcleo e a corrente de excitação levando-se em conta a perda específica do material w_{fe} , que é um valor obtido através de testes ou de catálogos, dadas em W/kg. Simplificando (a parcela da corrente relativa à magnetização ou à reatância de magnetização é desprezada), a corrente de excitação poderia ser obtida pela equação (42), conforme [5], e as perdas totais no núcleo (W_0), em watt (W), são dadas pela equação (43). A equação (42) pode ainda ser simplificada conforme (44). Nestas equações considera-se que P_{nucleo} é a massa do núcleo calculada através da equação (17) e que $V_{BTlinha}$ é a tensão nominal de linha.

$$I_0 = \frac{w_{fe} \cdot P_{nucleo}}{\sqrt{3} \cdot V_{BTlinha}} \quad (42)$$

$$W_0 = w_{fe} \cdot P_{nucleo} \quad (43)$$

$$I_0 = \frac{W_0}{\sqrt{3} \cdot V_{BTlinha}} \quad (44)$$

A Belman utiliza uma tabela de referência própria para a obtenção de w_{fe} , que tem como base inclusive o estado do núcleo, que normalmente não está em condições ideais por ser reutilizado. O valor de w_{fe} poderia ser obtido também de catálogos dos fabricantes de chapas. No entanto, como as chapas são reaproveitadas, geralmente não se sabe a sua origem. Para o novo programa será utilizada a tabela da Belman, uma vez que, conforme [5], estes valores são obtidos através de testes. Para o caso de um núcleo que não se encontra em condições muito boas, como é o caso do transformador estudado neste trabalho, utiliza-se $w_{fe} = 2,35 \text{ W/kg}$.

Para o cálculo da corrente de excitação (I_0), a Belman utiliza equações que diferem da (44), pois calcula as duas componentes que são observadas no circuito equivalente da Figura 4. Para isto, utiliza as equações (45), (46) e (47), indicadas por [8], onde I_p e I_m são, respectivamente, as componentes ativa e reativa de I_0 . F_{mm} é a força magnetomotriz máxima do circuito magnético, F_{cm1} é a força magnetomotriz nas colunas, F_{cm2} é a força magnetomotriz nas travessas, l_e é a espessura do entreferro correspondente à cada junta, H_J é a altura da janela do núcleo, L_J é a largura da janela do núcleo e B_M é a indução magnética máxima calculada por (14). A Belman considera que $l_e = 0,005 \text{ mm}$ e que $F_{cm1} = F_{cm2}$. O valor de F_{cm1} e F_{cm2} é obtido de uma tabela de referência própria da Belman, assim como w_{fe} , o qual tem seu valor definido de acordo com a indução calculada em (14). Para o caso da indução do transformador estudado, o valor tabelado é $F_{cm1} = F_{cm2} = 31,5 \text{ A/m}$.

$$I_p = \frac{W_0}{V_{BTlinha}} \quad (45)$$

$$I_m = \frac{F_{mm}}{N_{BT}} \quad (46)$$

$$F_{mm} = F_{cm1} \cdot H_J + 2 \cdot F_{cm2} \cdot L_J + 2 \cdot 0,8 \cdot B_M \cdot l_e \quad (47)$$

$$I_0 = \sqrt{I_p^2 + I_m^2} \quad (48)$$

O último passo é o cálculo da corrente de excitação percentual ($I_{0\%}$) pela equação (49), em que se tem como base a corrente nominal de baixa tensão, uma vez que os cálculos e o ensaio de perdas a vazio são feitos pelo lado da baixa tensão.

$$I_{0\%} = \frac{I_0 \cdot 3}{I_{BTlinha}} \cdot 100 \quad (49)$$

Para o cálculo de I_0 , sugere-se manter a metodologia utilizada pela Belman.

3.2.2.5 Perdas nos enrolamentos

Os cálculos das perdas nos enrolamentos e da impedância percentual estão relacionados com o valor das resistências e das reatâncias no circuito equivalente da Figura 4, que devem ser calculadas.

Para o cálculo das resistências leva-se em conta o comprimento do fio, a sua seção e a resistividade do material (ρ). Logo, conforme [9], tem-se $\rho_{cobre20} = 17,241 \Omega mm^2/km$ para o cobre e $\rho_{aluminio20} = 28,264 \Omega mm^2/km$ para o alumínio, em uma temperatura de $20^\circ C$. A equação utilizada é a (50) para a baixa tensão e (51) para a alta tensão. Como a medição das perdas nos enrolamentos (de curto-circuito) é feita pelo lado da alta tensão, as perdas da baixa tensão estão referidas à alta tensão, conforme equação (8), em que a é dado pela equação (53). A resistência equivalente referida aos enrolamentos da alta tensão (R_{ATeq20}) é dada pela soma das resistências dos enrolamentos de alta e baixa tensão, conforme equação (52). Para os cálculos, utilizam-se também o comprimento médio das espiras de alta e baixa tensão (l_{AT} e l_{BT}) e as seções dos fios utilizados (S_{ATfio} e $S_{BTtotal}$).

$$R_{BT}' = \frac{\rho \cdot l_{BT}}{S_{BTtotal}} \cdot a^2 \quad (50)$$

$$R_{AT} = \frac{\rho \cdot l_{AT}}{S_{ATfio}} \quad (51)$$

$$R_{ATeq20} = R_{AT} + R_{BT}' \quad (52)$$

$$a = \frac{V_{ATfase}}{V_{BTfase}} \quad (53)$$

A correção do valor da resistência para uma temperatura de referência (no caso de transformadores a óleo é 75 °C) é feito com base no anexo D [10], conforme (54), em que se considera a temperatura de 20 °C como a temperatura de origem.

$$R_{ATeq75} = R_{ATeq20} \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20} \quad (54)$$

O cálculo das reatâncias de dispersão X_{ATeq} (vide circuito equivalente da Figura 4), no entanto, não é tão direto. Conforme [8], pode-se calcular o valor da reatância de dispersão equivalente referida ao primário através da equação (55), onde l_{medio} é o comprimento médio das espiras dado por (56) e K_r é o fator de correção dado pela equação (57), tendo origem no fator de Rogowski [3]. Os valores de a_1 , a_2 , b e d equivalem, respectivamente, à espessura da bobina de alta tensão, à espessura da bobina de baixa tensão, à altura da bobina e à espessura do isolante entre as bobinas de alta tensão, podendo ser calculados através das expressões (58), (59), (60) e (61). Utilizam-se também o comprimento médio das espiras de alta e baixa tensão (l_{AT} e l_{BT}), a frequência nominal do transformador (f), o número total de espiras na alta tensão (N_{AT}), os diâmetros internos medidos das bobinas de alta e baixa tensão (D_{ATi} e D_{BTi}), os diâmetros externos calculados das bobinas de alta e baixa tensão (D_{ATe2} e D_{BTe2}) em (38) e (24), a altura da bobina de baixa tensão (H_{BT}) e a altura da cabeceira da bobina de baixa tensão (H_{BTcab}).

$$X_{ATeq} = 7,9 \cdot \frac{f \cdot l_{medio} \cdot N_{AT}^2}{b} \cdot K_r \cdot \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-6} \quad (55)$$

$$l_{medio} = \frac{l_{AT} + l_{BT}}{2} \quad (56)$$

$$K_r = 1 - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2d + a_1 + a_2}{b} \quad (57)$$

$$a_1 = \frac{D_{ATe2} - D_{ATi}}{2} \quad (58)$$

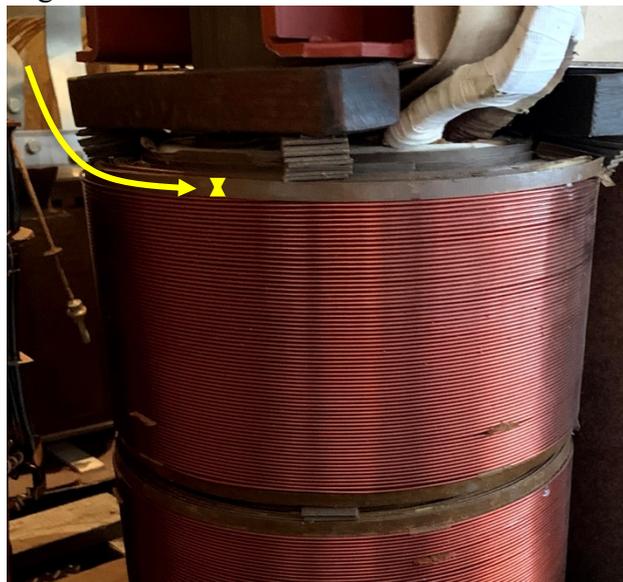
$$\alpha_2 = \frac{D_{BTe2} - D_{BTi}}{2} \quad (59)$$

$$b = H_{BT} - 2 \cdot H_{BTcab} \quad (60)$$

$$d = \frac{D_{ATi} - D_{BTe2}}{2} \quad (61)$$

É através da equação (55) que a Belman calcula a reatância de dispersão. Observa-se, no entanto, que é considerado que as alturas das bobinas de alta e baixa tensão são as mesmas, o que não é real na maioria dos casos, pois existe a altura da cabeceira a ser considerada ou mesmo a distância entre as bobinas de alta tensão. Nesses casos, o formato do fluxo não é apenas paralelo ao eixo da coluna, porque conta com componentes significativas que são perpendiculares [11]. Assim, a equação (55) usada atualmente não é muito precisa, o que já foi observado na prática na empresa, constatando que o valor da impedância percentual e das perdas divergem quando as cabeceiras têm tamanhos consideráveis. A cabeceira é o espaço da bobina em que não há espiras (que pode ser observado na Figura 26). Ela é necessária muitas vezes por questões de isolamento, para manter uma distância segura do núcleo, por exemplo.

Figura 26 – Cabeceira na bobina de alta tensão.



Fonte: Autora.

O cálculo da reatância de forma mais precisa será feito em trabalhos futuros. Neste trabalho, para calcular o módulo da impedância equivalente referida ao primário, utiliza-se a equação (62).

$$Z_{ATEq} = \sqrt{R_{ATEq75}^2 + X_{ATEq}^2} \quad (62)$$

Pode-se calcular também a impedância percentual, que é obtida através do cálculo da tensão de curto-circuito, conforme equações (63) e (64). A tensão de curto-circuito também será medida durante o ensaio de curto-circuito, que servirá de comparação para o valor calculado. A impedância percentual, por sua vez, pode ser comparada com a impedância nominal do transformador, presente na sua placa. É importante notar que a comparação tem maior validade se o transformador estiver no mesmo *tap* indicado na placa para a impedância, já que a exclusão de espiras influencia na reatância dos enrolamentos.

$$V_{cc} = Z_{ATEq} \cdot I_{ATfase} \quad (63)$$

$$Z_{\%} = \frac{V_{cc}}{V_{ATlinha}} \cdot 100 \quad (64)$$

A perda joule total nos enrolamentos é calculada por (65), em que se considera um transformador trifásico.

$$W_R = 3 \cdot R_{ATEq75} \cdot I_{ATfase}^2 \quad (65)$$

4 ESTUDO DE CASO

O transformador deste estudo de caso teve suas três fases de alta e baixa tensão refeitas, tendo-se reaproveitado apenas o núcleo e a carcaça. Nas próximas seções serão apresentados os dados do transformador, os resultados dos ensaios realizados após ter sido reformado, os cálculos relativos ao reprojeto e uma comparação entre os resultados dos cálculos com os dos ensaios.

4.1 DADOS DO TRANSFORMADOR

Os dados do transformador deste estudo de caso serão dispostos em tabelas, baseados nas tabelas da seção 3.2.1, e foram coletados em campo. Uma foto do transformador em questão está mostrada na Figura 27, obtida quando foi aberto para ser inspecionado internamente. A sua parte ativa está mostrada em detalhe na Figura 28 e na Figura 29, onde se verifica também a existência de avaria na parte central, apresentando deslocamento mecânico.

Figura 27 - Transformador do estudo de caso.



Fonte: Autora.

Figura 28 – Parte ativa do transformador do estudo de caso (lado das conexões de BT).



Fonte: Autora.

Figura 29 – Parte ativa do transformador do estudo de caso (lado das conexões de AT).



Fonte: Autora.

4.1.1 Dados nominais

Os dados nominais do transformador estão colocados na Tabela 14 e na Tabela 15.

Tabela 14 - Dados de placa coletados, a serem usados diretamente nos cálculos.

Dado coletado	Resultado
Potência nominal	$P = 112,5 \text{ kVA}$
Tensão nominal de linha de alta tensão	$V_{ATlinha} = 23,1 \text{ kV}$
Tensão nominal de linha de baixa tensão	$V_{BTlinha} = 380 \text{ V}$
Frequência nominal	$f = 60 \text{ Hz}$
Tensão do degrau <i>tap</i>	$V_{ATtap} = 1.100 \text{ V}$
Quantidade de <i>tap</i> 's	$Q_{ATtap} = 5$

Fonte: Autora.

Tabela 15 - Dados de placa coletados, a serem usados indiretamente nos cálculos.

Dado coletado	Resultado
Ligação entre as bobinas de alta tensão	Delta (Δ)
Ligação entre as bobinas de alta tensão	Estrela (Y)

Fonte: Autora.

4.1.2 Dados do núcleo

Os dados coletados relacionados ao núcleo do transformador estão listados na Tabela 16 e na Tabela 17. Também foi modelado geometricamente em 3D para um melhor entendimento da sua construção, conforme a Figura 30. As dimensões do núcleo estão dispostas também na Figura 31 e na Figura 32.

Tabela 16 - Dados do núcleo coletados, a serem usados diretamente nos cálculos.

Dado coletado	Resultado
Largura dos pacotes de chapa ($n = 1$)	$L_{N1} = 130 \text{ mm}$
Largura dos pacotes de chapa ($n = 2$)	$L_{N2} = 110 \text{ mm}$
Largura dos pacotes de chapa ($n = 3$)	$L_{N3} = 90 \text{ mm}$
Largura dos pacotes de chapa ($n = 4$)	$L_{N4} = 50 \text{ mm}$
Espessura dos pacotes de chapa ($n = 1$)	$E_{N1} = 57,3 \text{ mm}$
Espessura dos pacotes de chapa ($n = 2$)	$E_{N2} = 16,6 \text{ mm}$
Espessura dos pacotes de chapa ($n = 3$)	$E_{N3} = 10,0 \text{ mm}$
Espessura dos pacotes de chapa ($n = 4$)	$E_{N4} = 11,8 \text{ mm}$
Altura da janela	$H_J = 355 \text{ mm}$
Largura da janela	$L_J = 110 \text{ mm}$
Espessura da chapa	$E_C = 0,27 \text{ mm}$

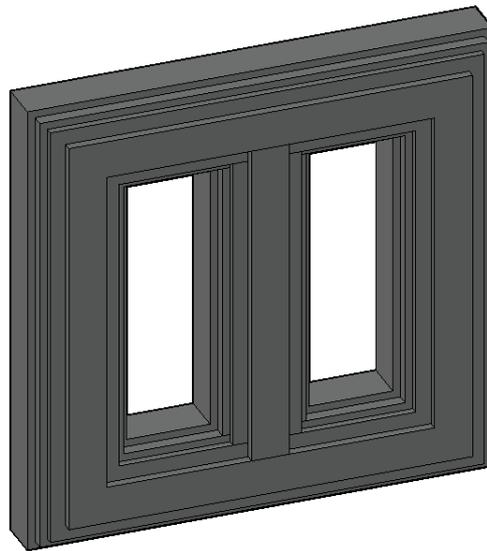
Fonte: Autora.

Tabela 17 - Dados do núcleo coletados, a serem usados indiretamente nos cálculos.

Dado coletado	Resultado
Tipo de núcleo	Envolvido
Tipo de montagem do núcleo	Empilhado
Qualidade do núcleo	Ruim

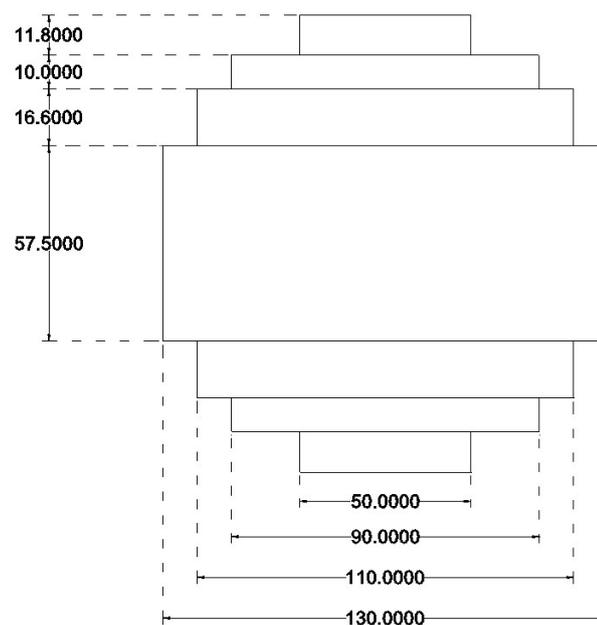
Fonte: Autora.

Figura 30 – Modelo 3D do núcleo.



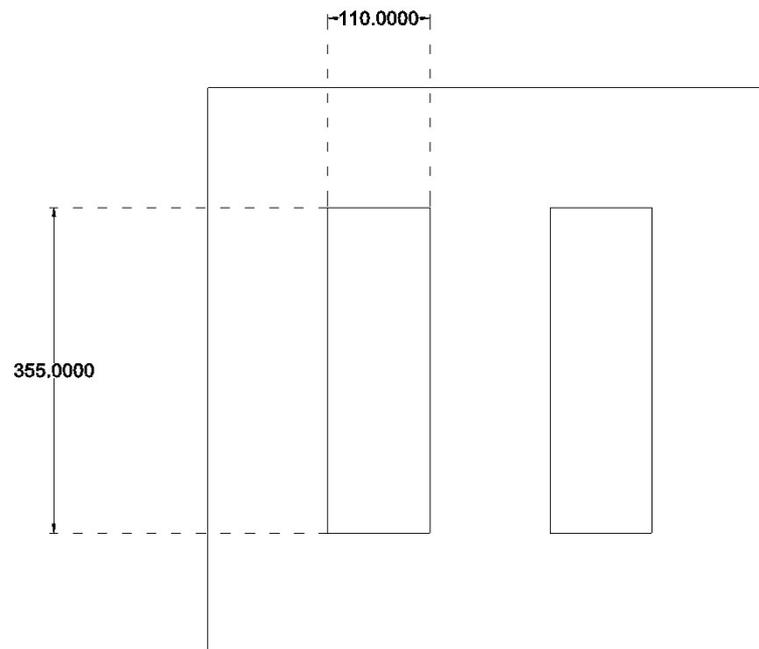
Fonte: Autora.

Figura 31 – Dimensões dos pacotes de chapas dos núcleos.



Fonte: Autora.

Figura 32 – Dimensões das janelas do núcleo.



Fonte: Autora.

4.1.3 Dados das bobinas de baixa tensão

Os dados coletados relacionados às bobinas de baixa tensão do transformador são listados na Tabela 18 e na Tabela 19.

Tabela 18 - Dados das bobinas de baixa tensão coletados, a serem usados diretamente nos cálculos.

Dado coletado	Resultado
Bitola axial do fio utilizado	$F_{BTaxial} = 7 \text{ mm}$
Bitola radial do fio utilizado	$F_{BTradial} = 3,5 \text{ mm}$
Quantidade de fios axiais	$Q_{BTaxial} = 2$
Quantidade de fios radiais	$Q_{BTradial} = 1$
Número de espiras por camada	$N_{BTcamada} = 21$
Quantidade de camadas	$Q_{BTcamadas} = 2$
Quantidade de canais	$Q_{BTcanais} = 0$
Espessura de cada canal	$E_{BTcanal} = 0$
Altura da bobina	$H_{BT} = 331 \text{ mm}$
Altura da cabeceira	$H_{BTcab} = 7 \text{ mm}$
Diâmetro interno da bobina	$D_{BTi} = 149 \text{ mm}$
Diâmetro externo da bobina	$D_{BTe} = 169 \text{ mm}$

Fonte: Autora.

Tabela 19 - Dados das bobinas de baixa tensão núcleo coletados, a serem usados indiretamente nos cálculos.

Dado coletado	Resultado
Sentido do enrolamento da bobina	Horário
Tipo de canal	Sem canal

Fonte: Autora.

4.1.4 Dados das bobinas de alta tensão

Os dados coletados relacionados às bobinas de alta tensão do transformador são mostrados na Tabela 20 e na Tabela 21.

Tabela 20 - Dados das bobinas de alta tensão coletados, a serem usados diretamente nos cálculos.

Dado coletado	Resultado
Diâmetro do fio utilizado	$D_{AT} = 0,805 \text{ mm}$
Seção do fio utilizado	$S_{AT} = 0,4117 \text{ mm}^2$
Quantidade de bobinas simples	$Q_{ATsimples} = 0$
Quantidade de bobinas com derivação	$Q_{ATderivacao} = 2$
Quantidade de canais	$Q_{ATcanais} = 1$
Espessura de cada canal	$E_{ATcanal} = 4 \text{ mm}$
Altura da bobina	$H_{AT} = 140 \text{ mm}$
Altura da cabeceira	$H_{ATcab} = 0 \text{ mm}$
Diâmetro interno da bobina	$D_{ATi} = 190 \text{ mm}$
Diâmetro externo da bobina	$D_{ATe} = 231 \text{ mm}$

Fonte: Autora.

Tabela 21 - Dados das bobinas de alta tensão núcleo coletados, a serem usados indiretamente nos cálculos.

Dado coletado	Resultado
Início da bobina	Esquerda
Bitola AWG do fio	21 AWG
Tipo de canal	Total

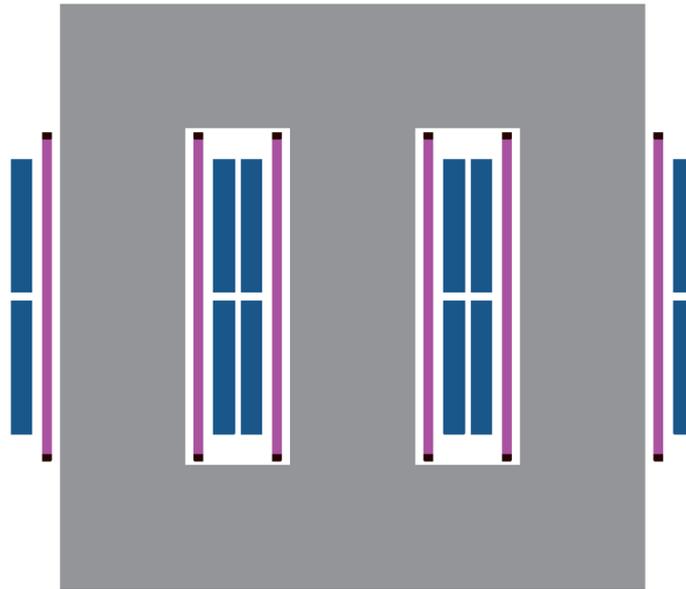
Fonte: Autora.

4.2 CÁLCULOS

Os cálculos foram feitos através do software Mathcad, utilizando as equações apresentadas na seção 3.2.2, e podem ser vistos em detalhes no Apêndice A. A previsão de

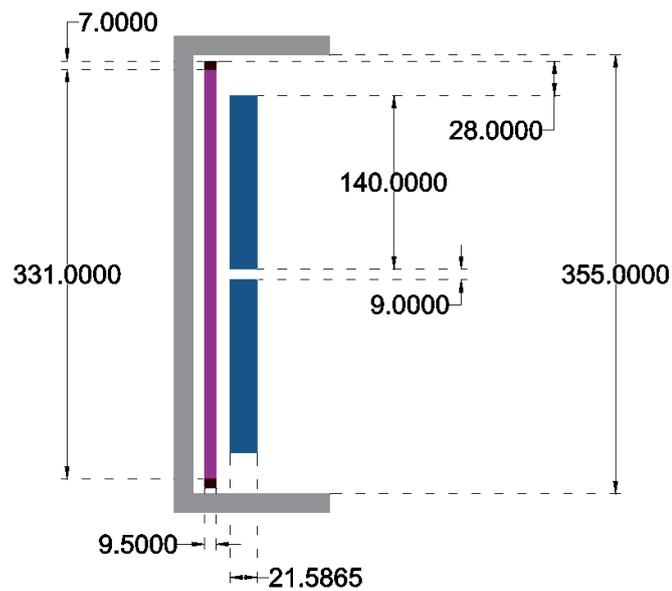
alocação das bobinas no núcleo ficou conforme a Figura 33 e a Figura 34, onde tem-se o núcleo com cor cinza, as bobinas de alta tensão com cor azul e as bobinas de baixa tensão com cor rosa. No caso das bobinas de baixa tensão, tem-se ainda as cabeceiras, com cor preta. Os espaços que “sobram” são onde o óleo circula, tanto para fins de resfriamento quanto de isolamento.

Figura 33 – Alocação das bobinas no núcleo.



Fonte: Autora.

Figura 34 – Dimensões das bobinas junto ao núcleo.



Fonte: Autora.

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS E COMPARAÇÃO

Os ensaios foram realizados no laboratório da Belman e os resultados foram obtidos e organizados através de um programa utilizado pela empresa. Os valores obtidos via ensaio e cálculo, bem como a diferença percentual entre eles, estão dispostos na Tabela 22 (para os resultados do ensaio em vazio) e na Tabela 23 (para os resultados do ensaio em carga). Os ensaios serão explicados de forma breve na seção 4.3.1 e uma comparação mais detalhada entre os resultados de ensaio e dos cálculos será feita na seção 4.3.2, assim como também uma comparação com os valores normatizados em [12].

Tabela 22 - Resultados do ensaio realizado em vazio.

Parâmetro	Resultado	Valor calculado	Diferença %
Corrente de excitação percentual	1,812 %	$I_{0\%} = 2,587 \%$	-42,788 %
Perdas em vazio	572,244 W	$W_0 = 535,567 W$	6,409 %

Fonte: Belman.

Tabela 23 - Resultados do ensaio realizado em carga.

Parâmetro	Resultado	Valor calculado	Diferença %
Tensão de curto-circuito	640,936 V	$V_{cc} = 684,716 V$	-6,831 %
Impedância percentual (75 °C)	2,994 %	$Z_{\%} = 2,964 \%$	1,001 %
Perdas em carga (75 °C)	2.159 W	$W_R = 1.985 W$	8,046 %
Perdas adicionais (75 °C)	255 W	-	-
Perdas resistivas (75 °C)	1.904 W	$W_R = 1.985 W$	-4,285 %

Fonte: Belman.

4.3.1 Ensaio

Para a realização dos ensaios, utiliza-se como base os anexos D e E de [10], que tratam da influência da temperatura nas perdas em carga e dos métodos de ensaio, respectivamente. Existem algumas diferenças entre os métodos utilizados pela Belman e os métodos normatizados, que serão citadas de forma breve.

Para a realização dos ensaios em vazio, são medidas as correntes eficazes de linha, as tensões eficazes de fase e as potências ativas de cada fase, aplicando-se a tensão nominal no lado de baixa tensão. Para este ensaio, o lado de alta tensão estava aberto, de forma a simular o funcionamento do transformador em vazio (sem carga). A referência [10] recomenda ainda a correção da forma de onda da tensão devido à presença significativa de harmônicas na operação

em vazio do transformador [5]. Essa correção, no entanto, ainda não é realizada na empresa Belman.

Para a realização dos ensaios em carga, primeiramente são medidas as resistências dos enrolamentos de alta e de baixa tensão com equipamento específico e posteriormente é realizado o ensaio de curto-circuito, conforme [10]. Para a realização do ensaio, os terminais dos enrolamentos de baixa tensão são curtos-circuitados e faz-se circular a corrente nominal nos enrolamentos de alta tensão, medindo-se as correntes eficazes de linha, as tensões eficazes de fase e as potências ativas de cada fase. É possível ainda fazer circular uma corrente menor que a nominal e posteriormente corrigir os valores medidos, contanto que a corrente aplicada seja no mínimo equivalente à 50% do valor nominal, conforme [10]. As perdas adicionais são a diferença entre o valor total das perdas em curto-circuito e as perdas resistivas calculadas através nas resistências ôhmicas. Os valores são também corrigidos para a temperatura de referência, de 75 °C para transformadores a óleo [10].

4.3.2 Comparação

Nesta seção se analisa os dados apresentados na Tabela 22 e na Tabela 23 sob duas perspectivas. A primeira apresenta uma análise da diferença entre os resultados obtidos através dos ensaios e dos cálculos e a segunda a comparação com os valores normalizados em [12].

4.3.2.1 Análise da diferença entre os resultados dos ensaios e dos cálculos

Através dos dados apresentados na Tabela 22 e na Tabela 23, pode-se observar que o valor total das perdas calculado inicialmente (P_{Tc}) resultou próximo do valor total medido nos ensaios (P_{Tm}). As somas das perdas totais obtidas nos resultados dos cálculos e dos ensaios são mostradas em (66) e (67), respectivamente, e a diferença entre as duas é calculada em (68) e (69). A diferença percentual será analisada melhor na seção 4.3.2.2, ao comparar os valores obtidos com os valores normalizados.

$$P_{Tc} = 535,567 + 1.985 = 2.520,567 \text{ W} \quad (66)$$

$$P_{Tm} = 572,244 + 2.159 = 2.731,244 \text{ W} \quad (67)$$

$$\Delta P_T = P_{Tm} - P_{Tc} = 2.731,244 - 2.520,567 = 210,677 \text{ W} \quad (68)$$

$$\Delta P_{T\%} = \frac{P_{Tm} - P_{Tc}}{P_{Tm}} = \frac{2.731,244 - 2.520,567}{2.731,244} \cdot 100 = 7,71 \% \quad (69)$$

Destaca-se também o valor das perdas adicionais presente na Tabela 23, que está relacionado com perdas nas ferragens e na cabeça das bobinas, conforme [13]. Este valor não é calculado pela Belman durante o reprojeto. Segundo [13], o seu cálculo é bastante difícil de ser realizado e recomenda-se que se utilize a relação de 15% a 20% das perdas em vazio para calculá-las.

Sendo assim, espera-se que as perdas adicionais resultem entre 80,335 W e 107,113 W, se calculadas em cima do valor das perdas em vazio do reprojeto. Por sua vez, se as perdas adicionais são calculadas em cima do valor das perdas em vazio medidas através dos ensaios. Espera-se que as perdas adicionais resultem entre 85,836 W e 114,449 W. No entanto, ambas as faixas divergem do valor obtido com os ensaios, de 255 W.

Com base nos resultados dos ensaios realizados em transformadores reformados pela Belman, observou-se que o valor das perdas adicionais aumenta quando a qualidade do núcleo é ruim, como é o caso do transformador estudado, o que justificaria a divergência entre os valores. Com estudos adicionais, pode-se estimar uma relação percentual que possibilite o cálculo das perdas adicionais ainda na etapa de reprojeto, de forma a ter uma precisão maior nos cálculos, levando-se em conta as características do núcleo.

De modo geral, observou-se que a diferença percentual entre os valores calculados durante o reprojeto e os valores medidos durante os ensaios não passa de 10%, com exceção da corrente de excitação, cuja diferença chegou em 42%. Esta diferença pode ter relação, por exemplo, com a metodologia de cálculo de reprojeto e com a falta de correção da forma de onda durante o ensaio de perdas em vazio.

Estes resultados indicam que a metodologia utilizada pela Belman tem precisão satisfatória na previsão dos valores das perdas, ainda que alguns cálculos (em especial da corrente de excitação) possam ser aprimorados.

4.3.2.2 Comparação com os valores normalizados

Os resultados obtidos através dos ensaios podem ser comparados com os valores normalizados em [12] para perda em vazio, perda total, corrente de excitação e tensão de curto-circuito (análoga à impedância percentual) em um transformador de 112,5 kVA e classe de tensão de 24,2 kV, semelhante ao deste estudo de caso. Os valores normalizados estão listados na Tabela 24, juntamente com os valores medidos e a diferença percentual entre eles.

Tabela 24 - Valores normalizados e medidos para as perdas.

Parâmetro	Valor normalizado	Valor medido	Diferença %
Perda em vazio	425 W	572,244 W	+34,65%
Perda total	2.085 W	2.731,244 W	+30,99%
Corrente de excitação	2,80 %	1,812 %	-35,29%
Tensão de curto-circuito	4,00 %	2,994 %	-25,15%

Fonte: [12]/Autora.

Observa-se que os valores das perdas medidas são maiores que os valores normalizados, enquanto os valores das correntes de excitação e da tensão de curto-circuito são menores. Esta diferença percentual pode estar relacionada, no caso das perdas e da corrente de excitação, com a qualidade do núcleo em seu estado atual.

A tensão de curto-circuito, por sua vez, se manteve próximo do valor da placa de identificação do transformador, conforme previsto no reprojeto. Originalmente este valor era de 2,95 % e o valor obtido é de 2,99%. Pode-se levar em conta ainda que o valor da tensão de curto-circuito de placa foi medido com o *tap* na posição 1, cuja tensão é de 13.800 V, enquanto os ensaios na Belman foram realizados na posição 2, cuja tensão é de 13.200 V, o que pode incorrer em uma diferença entre os dois valores. As medições em diferentes posições de *tap* não foram realizadas, mas seriam um resultado interessante para análise, através do qual poderia ser observada a variação da tensão de curto-circuito.

A diferença percentual entre os valores medidos e calculados pode ser analisada com base na tolerância especificada em [10], entre o valor obtido através dos ensaios e os dados de placa do equipamento. Serão considerados nesta análise os valores resultantes do reprojeto como os dados de placa, pois na placa de identificação do equipamento não constam as informações relacionadas às perdas em vazio e total e à corrente de excitação.

A referência [10] estabelece uma tolerância de +6 % para as perdas totais, de $\pm 7,5$ % para a impedância percentual, de +10 % para as perdas em vazio e de +20 % para a corrente de

excitação. Observa-se, assim, que apenas os valores das perdas totais, cuja diferença foi calculada em (69), e da corrente de excitação, cuja diferença está disposta na Tabela 22, estariam acima da tolerância estabelecida pela norma. A diferença é bastante expressiva no caso da corrente de excitação, que chega a ser o dobro da tolerância estabelecida em [10]. Porém, como observado na seção 4.3.2.1, esta diferença pode estar relacionada com as metodologias de cálculo e de ensaios.

Caso calculada de acordo com a equação (44), o valor da corrente de excitação seria diferente, conforme (70) e (71), e ter-se-ia uma diferença percentual ($\Delta I_{0\%}$) menor, de acordo com a equação (72). No entanto, a equação utilizada atualmente tem uma validade prática para a Belman que a equação (44) não tem ainda. Além disso, a equação (44) desconsidera a componente reativa da corrente de magnetização, conforme mencionado anteriormente, diferente das equações utilizadas pela Belman, o que pode torná-la menos precisa. Um estudo com mais transformadores poderia mostrar se esta nova equação apresenta bons resultados práticos em outros casos além do apresentado neste trabalho.

$$I_0 = \frac{535,567}{\sqrt{3} \cdot 380} = 0,8137 \text{ A} \quad (70)$$

$$I_{0\%} = \frac{0,8137 \cdot 3}{170,926} = 1,428 \% \quad (71)$$

$$\Delta I_{0\%} = \frac{0,01812 - 0,01428}{0,01812} \cdot 100 = 21,19 \% \quad (72)$$

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado durante o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi importante para se ter condições de iniciar o desenvolvimento de um novo programa para o reprojeto de transformadores. Este presente estudo apresentou e organizou uma base de equações e procedimentos de cálculos. Durante o desenvolvimento do TCC, contatou-se que o programa existente na empresa Belman tem suficiente precisão ao prever os valores das perdas do transformador a ser reformado. Porém, sua eficácia ainda pode ser melhorada. Para isto, estudos adicionais devem ser realizados e são sugeridos a seguir.

Para uma melhor comparação entre os resultados dos cálculos e dos ensaios, pode ser feita uma revisão dos ensaios e, possivelmente, uma melhoria no laboratório da Belman para que seja possível realizar a correção da forma de onda do ensaio em vazio, visualizando também as formas de onda através de um osciloscópio, por exemplo.

Para a obtenção de um valor mais preciso para a perda específica do núcleo (w_{fe}), pode-se verificar a viabilidade do desenvolvimento um método para a sua medição em um núcleo já existente e utilizado.

Para possibilitar o reprojeto de transformadores diferentes do objeto deste estudo de caso, não só com ligações diferentes entre os enrolamentos de alta e baixa tensão, mas também com tipos de núcleo diferentes (como o núcleo enrolado e/ou o núcleo envolvente) e com disposições diferentes das bobinas (com bobinas intercaladas), pode ser desenvolvido um programa mais completo. Novos casos devem, portanto, ser levados em conta. O banco de dados que a Belman possui pode ser utilizado para tal estudo, assim como os novos transformadores reformados, que poderiam ser ensaiados já com as melhorias no laboratório implementadas. O desenvolvimento deste programa mais completo pode ser realizado através do software Labview, por exemplo.

Ainda com base no banco de dados que a Belman possui, pode ser realizado um estudo da variação da impedância percentual com base nas alturas das bobinas e das cabeceiras, pois sabe-se que esta disposição construtiva pode causar desvios significativos entre os valores de cálculo de projeto e os valores medidos em ensaios. Assim, pode-se desenvolver uma maneira mais precisa de calcular o valor da impedância percentual.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Guarnieri, "Who Invented the Transformer? [Historical]," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, pp. 56-59, dezembro 2013.
- [2] R. M. d. Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah and R. Ajuha, *Transformer Design Principles*, Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018.
- [3] W. Ries, *Transformadores: fundamentos para o projeto e cálculo*, Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- [4] M. J. Heathcote, *J&P Transformer Book: a practical technology of the power transformer*, Burlington: Elsevier, 2007.
- [5] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: design, technology and diagnostics*, Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2013.
- [6] J. P. A. Bastos, *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase estática*, Florianópolis: Ed. da UFSC, 2012.
- [7] C. F. Ribeiro, M. V. A. Alvares, B. G. P. Ortega e C. A. Costa, "Contribuição ao Estudo e Aplicação de Transformadores de Distribuição no Sistema Elétrico da COELBA.," em *ANAIS DO II CITENEL*, Brasília, 2003.
- [8] A. Martignoni, *Transformadores*, São Paulo: Globo, 2003.
- [9] ALLCAB Fios e Cabos Elétricos, "Cobre ou alumínio?," [Online]. Available: <https://www.allcab.com.br/condutor-de-aluminio-ou-de-cobre/>. [Acesso em 30 03 2021].
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5356-1: Transformadores de potência - Parte 1: Generalidades, Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [11] H. O. Stephens, "Transformer Reactance and Losses With Nonuniform Windings," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 53, pp. 343-349, fevereiro 1934.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5440: Transformadores para redes aéreas de distribuição - requisitos, Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- [13] J. C. d. Oliveira, J. R. Cogo e J. P. G. d. Abreu, *Transformadores: teoria e ensaios*, São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

APÊNDICE A – CÁLCULOS NO MATHCAD

Parte 1: Inserção de dados

Dados de placa

Potencia nominal:

$$P := 112.5\text{kVA}$$

Tensão nominal da AT:

$$V_{AT\text{linha}} := 23.1\text{kV} \quad \text{ligação em delta}$$

$$V_{AT\text{fase}} := V_{AT\text{linha}} = 23.1\text{kV}$$

Tensão nominal da BT:

$$V_{BT\text{linha}} := 380\text{V} \quad \text{ligação em estrela}$$

$$V_{BT\text{fase}} := \frac{V_{BT\text{linha}}}{\sqrt{3}} = 219.393\text{V}$$

Frequencia nominal:

$$f := 60\text{Hz}$$

Dados do núcleo

Nível	Largura	Espessura
1	$L_{N1} := 130\text{mm}$	$E_{N1} := 57.3\text{mm}$
2	$L_{N2} := 110\text{mm}$	$E_{N2} := 16.6\text{mm}$
3	$L_{N3} := 90\text{mm}$	$E_{N3} := 10.0\text{mm}$
4	$L_{N4} := 50\text{mm}$	$E_{N4} := 11.8\text{mm}$

Altura da janela: $H_J := 355\text{mm}$

Largura da janela: $L_J := 110\text{mm}$

Espessura da chapa: $E_C := 0.27\text{mm}$

Dados da baixa tensão

Fio utilizado:

$F_{BTaxial} := 7\text{mm}$ $Q_{BTaxial} := 2$

$F_{BTradial} := 3.5\text{mm}$ $Q_{BTradial} := 1$

Número de espiras e camadas:

$N_{BTcamada} := 21$ $Q_{BTcamadas} := 2$

$N_{BT} := N_{BTcamada} \cdot Q_{BTcamadas} = 42$

Altura da bobina: Altura da cabeceira:

$H_{BT} := 345\text{mm}$ $H_{BTcab} := 7\text{mm}$

Diâmetro interno: Diâmetros das isolações:

$$D_{BTi} := 149\text{mm}$$

$$D_{BTisol\text{fio}} := 0.5\text{mm}$$

$$D_{BTisol\text{cam}} := 0.5\text{mm}$$

$$D_{BTisol\text{final}} := 0.5\text{mm}$$

Dados da alta tensão

Fio utilizado:

Seção do fio:

$$D_{AT} := 0.805\text{mm} \quad \Rightarrow 21 \text{ AWG}$$

$$S_{AT\text{fio}} := 0.4117\text{mm}^2$$

Altura da bobina:

Quantidade de canais:

$$H_{AT} := 140\text{mm}$$

$$E_{AT\text{canal}} := 4\text{mm} \quad \Rightarrow \text{canal total}$$

Quantidade de bobinas:

$$Q_{AT\text{simples}} := 0 \quad Q_{AT\text{derivacao}} := 2$$

$$Q_{AT\text{bobinas}} := Q_{AT\text{simples}} + Q_{AT\text{derivacao}} = 2$$

Degrau de tensão da derivação:

Quantidade de tap's:

$$V_{AT\text{tap}} := 1100\text{V}$$

$$Q_{AT\text{tap}} := 5$$

Diâmetro interno:

Diâmetros das isolações:

$$D_{ATi} := 190\text{mm}$$

$$D_{ATisol\text{cam}} := \frac{0.3\text{mm} \cdot 10 + 0.6\text{mm} \cdot 4}{14} = 0.386\text{mm}$$

$$D_{ATisol\text{final}} := 4\text{mm}$$

Parte 2: Cálculos

Núcleo

Seção geométrica:

$$S_G := L_{N1} \cdot E_{N1} + 2 \cdot (L_{N2} \cdot E_{N2} + L_{N3} \cdot E_{N3} + L_{N4} \cdot E_{N4}) = 140.81 \cdot \text{cm}^2$$

Coefficiente de enchimento:

Seção magnética:

$$K_e := 0.94$$

$$S_M := K_e \cdot S_G = 132.361 \cdot \text{cm}^2$$

Indução máxima:

$$B_M := \frac{V_{BT\text{fase}}}{S_M \cdot 4.44 \cdot f \cdot N_{BT}} = 1.481 \text{ T}$$

Média das larguras das colunas:

$$b_n := \frac{L_{N1} + L_{N2} + L_{N3} + L_{N4}}{4} = 95 \cdot \text{mm}$$

Peso:

$$P_{\text{nucleo}} := 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot S_G \cdot (3 \cdot H_J + 4 \cdot L_J + 6 \cdot b_n) = 227.901 \text{ kg}$$

Bobinas de baixa tensão

Corrente nominal:

$$I_{BTlinha} := \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{BTlinha}} = 170.926 \text{ A}$$

$$I_{BTfase} := I_{BTlinha} = 170.926 \text{ A}$$

Seção geométrica do fio:

$$S_{BTfio} := F_{BTaxial} \cdot F_{BTradial} = 24.5 \cdot \text{mm}^2$$

Seção corrigida do fio:

$$S_{BTfio2} := S_{BTfio} - 0.55 \text{mm}^2 = 23.95 \cdot \text{mm}^2$$

Seção total dos fios:

$$S_{BTtotal} := S_{BTfio2} \cdot (Q_{BTaxial} \cdot Q_{BTradial}) = 47.9 \cdot \text{mm}^2$$

Densidade de corrente:

$$d_{BT} := \frac{I_{BTfase}}{S_{BTtotal}} = 3.568 \cdot \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Diametro externo calculado:

$$D_{BTe2} := D_{BTi} + \left[\left(F_{BTradial} + D_{BTisol fio} \right) \cdot Q_{BTradial} + D_{BTisol cam} \right] \cdot Q_{BTcamadas} + D_{BTisol final} \cdot 2 = 168 \cdot \text{mm}$$

Comprimento médio da espira:

$$l_{BT} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{D_{BTe2} + D_{BTi}}{2} = 49.794 \cdot \text{cm}$$

Número de fases:

$$N_{BTfases} := 3$$

Peso da bobina:

$$P_{BT} := N_{BTfases} \cdot 8900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot S_{BTtotal} \cdot l_{BT} \cdot N_{BT} = 26.747 \cdot \text{kg}$$

Bobinas de alta tensão

Corrente nominal:

$$I_{ATlinha} := \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{ATlinha}} = 2.812 \text{ A}$$

$$I_{ATfase} := \frac{I_{ATlinha}}{\sqrt{3}} = 1.623 \text{ A}$$

Densidade de corrente:

$$d_{AT} := \frac{I_{ATfase}}{S_{ATfio}} = 3.943 \cdot \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Número de espiras total:

$$N_{AT} := \frac{V_{ATfase}}{S_M \cdot 4.44 \cdot f \cdot B_M} = 4.422 \times 10^3$$

Número de espiras por bobina:

$$N_{ATbobina} := \frac{N_{AT}}{Q_{ATbobinas}} = 2.211 \times 10^3$$

Número de espiras por camada:

$$N_{ATcamada} := \frac{H_{AT}}{D_{AT}} = 173.913 \quad N_{ATfolga} := 5$$

Número de camadas:

$$N_{ATcamada2} := N_{ATcamada} - N_{ATfolga} = 168.913$$

$$Q_{ATcamadas} := \frac{N_{ATbobina}}{N_{ATcamada2}} = 13.09$$

Número de espiras da derivação:

$$N_{ATtap} := \frac{V_{ATtap} \cdot N_{AT}}{V_{ATfase}} = 210.581$$

$$N_{ATtap1} := 1 \cdot N_{ATtap} = 210.581$$

$$N_{ATtap3} := 3 \cdot N_{ATtap} = 631.743$$

$$N_{ATtap2} := 2 \cdot N_{ATtap} = 421.162$$

$$N_{ATtap4} := 4 \cdot N_{ATtap} = 842.324$$

Diametro externo calculado:

$$D_{ATe2} := D_{ATi} + [(D_{AT} + D_{ATisolcam}) \cdot Q_{ATcamadas} + E_{ATcanal}] \cdot 2 + D_{ATisolfinal} = 233.173 \cdot \text{mm}$$

Comprimento médio da espira:

$$l_{AT} := 2\pi \cdot \frac{D_{ATe2} + D_{ATi}}{2 \cdot 2} = 66.472 \cdot \text{cm}$$

Número de fases:

$$N_{ATfases} := 3$$

Peso da bobina:

$$P_{AT} := N_{ATfases} \cdot 8900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot S_{ATfio} \cdot l_{AT} \cdot N_{AT} = 32.312 \text{ kg}$$

Perdas no núcleo

Perda específica do ferro:

$$w_{fe} := 2.35 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

Perdas totais no núcleo:

$$W_0 := w_{fe} \cdot P_{nucleo} = 535.567 \cdot \text{W}$$

Corrente ativa:

$$I_p := \frac{W_0}{V_{BTlinha}} = 1.409 \text{ A}$$

Espessura do entreferro:

$$l_e := 0.005 \text{ mm}$$

Fmm por cm (tabela):

$$F_{mm_{cm}} := 31.5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Força magnetomotriz máxima:

$$F_{mm_{max}} := F_{mm_{cm}} \cdot H_J + 2 \cdot F_{mm_{cm}} \cdot L_J + 2 \cdot 0.8 \frac{\text{m} \cdot \text{C}^2}{\text{J} \cdot \text{s}^2} \cdot B_M \cdot l_e = 18.113 \text{ A}$$

Corrente de magnetização:

$$I_m := \frac{F_{mm_{max}}}{N_{BT}} = 0.431 \text{ A}$$

Corrente de excitação:

$$I_0 := \sqrt{I_p^2 + I_m^2} = 1.474 \text{ A}$$

$$I_{0\%} := \frac{3I_0}{I_{BTfase}} = 2.587\%$$

Perdas nos enrolamentos

Resistividade do cobre:

$$\rho_{cobre20} := 17.241 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$$

Relação de transformação:

$$a := \frac{V_{ATfase}}{V_{BTfase}} = 105.29$$

Resistência da baixa tensão:

$$R_{BT} := \frac{\rho_{cobre20} \cdot l_{BT} \cdot N_{BT}}{S_{BTtotal}} = 7.528 \cdot \text{m}\Omega$$

Resistência da alta tensão:

$$R_{AT} := \frac{\rho_{cobre20} \cdot l_{AT} \cdot N_{AT}}{S_{ATfio}} = 123.1 \Omega$$

Resistência equivalente:

$$R_{ATeq20} := (R_{AT} + R_{BT} \cdot a^2) = 206.551 \Omega$$

Correção da resistência:

$$R_{ATeq75} := R_{ATeq20} \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20} = 251.102 \Omega$$

Comprimento médio das espiras:

$$l_{medio} := \frac{l_{AT} + l_{BT}}{2} = 0.581 \text{ m}$$

Espessura da AT:

$$a_1 := \frac{(D_{ATe2} - D_{ATi})}{2} = 2.159 \cdot \text{cm}$$

Espessura da BT:

$$a_2 := \frac{(D_{BTe2} - D_{BTi})}{2} = 0.95 \cdot \text{cm}$$

Altura da bobina:

$$b := H_{BT} - 2 \cdot H_{BTcab} = 33.1 \cdot \text{cm}$$

Espessura do isolante:

$$d := \frac{(D_{ATi} - D_{BTe2})}{2} = 1.1 \cdot \text{cm}$$

Fator de Rogowski:

$$K_T := 1 - \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2d + a_1 + a_2}{b} = 0.974$$

Reatância equivalente:

$$X_{ATeq} := 7.9 \frac{\text{J} \cdot \text{s}^2}{\text{m} \cdot \text{C}^2} \cdot \frac{f \cdot l_{\text{medio}} \cdot N_{AT}^2}{b} \cdot K_T \cdot \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-6} = 338.896 \Omega$$

Impedância equivalente:

$$Z_{ATeq} := \sqrt{R_{ATeq75}^2 + X_{ATeq}^2} = 421.785 \Omega$$

Tensão de curto circuito:

$$V_{cc} := Z_{ATeq} \cdot I_{ATfase} = 684.716 \text{ V}$$

Impedância percentual:

$$Z_{\%} := \frac{V_{cc}}{V_{ATlinha}} = 2.964 \%$$

Perdas nos enrolamentos:

$$W_R := 3R_{ATeq75} \cdot I_{ATfase}^2 = 1.985 \cdot \text{kW}$$

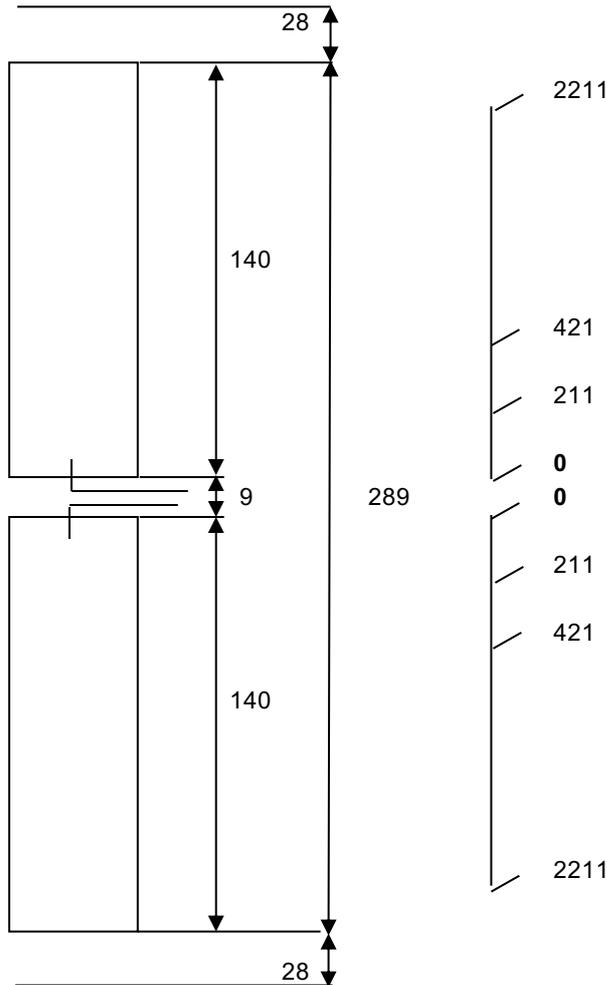
Perdas totais:

$$W_T := W_0 + W_R = 2.521 \cdot \text{kW}$$

ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO POT.: 112,5 kVA
 TENSÃO PRIMÁRIA : 23100 / 22000 / 20900 / 19800 / 18700
 TENSÃO SECUNDÁRIA : 380 / 220

Nº DO PROJ. -



CAM	ESP	ISOL
1	168,9	0,60
2	337,8	0,60
3	506,7	0,30
4	675,7	0,30
5	844,6	0,30
6	1013,5	0,30
7	1182,4	0,30
8	1351,3	0,30
9	1520,2	0,30
10	1689,1	0,30
11	1858,0	0,30
12	2027,0	0,30
13	2195,9	0,60
14	2211,0	0,60

Canal total de óleo de 4mm
entre camadas 6 e 7

DIÂMETRO INTERNO **190** DIÂMETRO EXTERNO **231**

ISOLAÇÃO DE CAMADAS **L C**
 140 X 725

PESO DO CONDUTOR : **33,84** KG

* CONDUTOR Nº 21 AWG

* INICIAR ENRL. **ESQ**

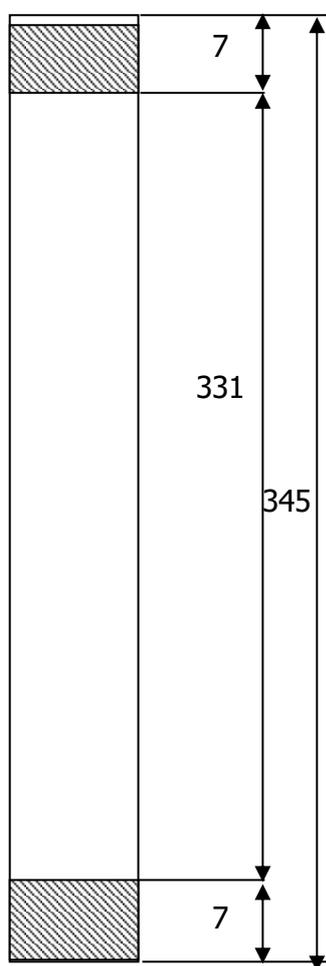
CONFECCIONAR **3** FASE(S)

ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO

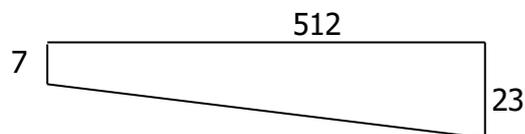
TRANSFORMADOR TRIFÁSICO
 TENSÃO PRIMÁRIA 23100
 TENSÃO SECUNDÁRIA : 380
 Nº DE SÉRIE : 213064

POTÊNCIA 112,5 KVA

Nº DO PROJ. -



1-CONDUTOR NÚ	7	X	3,5
1-CONDUTOR ISOLADO	7,5	X	4
2-CONDUTOR PARALELO AXIAL	2		
CONDUTOR PARALELO RADIAL	1		
3-QUANTIDADE DE CAMADAS	2		
4-ESPIRAS / CAMADAS	21,00		
5-ESPIRAS TOTAIS	42		
6-INICIO DO ENROLAMENTO	ESQ		
7-ISOL. ENTRE CAMADAS	0,5		
8-CABECEIRA	7	X	23



DIÂMETRO INTERNO 149 DIÂMETRO EXTERNO 169

MOLDE ISOLANTE 345 X 493

PESO DO CONDUTOR : 28,46 KG

CONFECCIONAR 3 FASE(S)