

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MATHEUS BALDINE DIAS

**ANÁLISE DE FALHA POR DESBALANÇO DE CARGA EM TRANSFORMADOR
DE DISTRIBUIÇÃO A SECO E SUA RESOLUÇÃO**

Ilha Solteira
2024

Matheus Baldine Dias

**Análise de falha por desbalanço de carga em transformador de distribuição
a seco e sua resolução**

Trabalho de graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Jonatas Boas Leite
Orientador

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Dias, Matheus Baldine.

D541a Análise de falha por desbalanço de carga em transformador de distribuição a seco e sua resolução / Matheus Baldine Dias. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
44 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2024

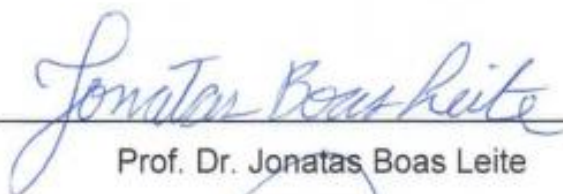
Orientador: Jonatas Boas Leite

Inclui bibliografia

1. Distribuição. 2. Elementos finitos. 3. Transformadores a seco. 4. Simulação eletromagnética.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e nove dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente **Matheus Baldine Dias**, matriculado sob o nº 172054478, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Jonatas Boas Leite*, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro* e o *Doutorando Vagner Antonio de Moraes da Cruz*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Análise de Falha por Desbalanço de Carga em Transformador de Distribuição a Seco e sua Resolução**", obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -



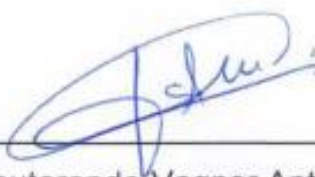
Matheus Baldine Dias

- Discente -



Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro

- Membro da Banca -

Doutorando Vagner Antonio de Moraes da
Cruz

- Membro da Banca -

Dedico este trabalho aos meus avós Maria Aparecida e Olavo, e ao meu pai Jorge.

AGRADECIMENTOS

Gratidão à minha família, que foi meu alicerce durante toda esta jornada. Agradeço pelo apoio incondicional, pelas palavras de encorajamento e pelo amor inabalável.

Aos meus colegas de trabalho, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, meu sincero agradecimento. Fernando Zillo, Alexandre Milagre, Andre Moreno e Robson Alves, sua paciência e proatividade em me auxiliar nas dúvidas foram inestimáveis.

A meus amigos que encontrei na minha passagem pela universidade e de meu projeto de extensão TEC Ilha Baja, aos ótimos momentos e conquistas que tivemos juntos, em especial a Thalles e André, sua amizade foi um grande apoio durante essa fase

A meu orientador, Jonatas Boas Leite, pela paciência em me auxiliar no decorrer deste trabalho.

E por fim, à minha companheira Julia, por todo suporte nos momentos de anseio durante minha graduação. Seu apoio foi fundamental para que eu pudesse seguir em frente.

A todos vocês, minha sincera gratidão.

“O sucesso não acontece por acaso. É trabalho duro, perseverança, aprendizado, estudo, sacrifício e, acima de tudo, amor pelo que você está fazendo ou aprendendo a fazer”. Pelé.

Resumo

Neste trabalho, tem-se o objetivo de diagnosticar uma falha causada devido a cargas desbalanceadas em um transformador de distribuição de tipo seco e propor a solução para que não seja possível a recorrência deste tipo de falha. Deve-se utilizar o método dos elementos finitos para simulação eletromagnética a partir das equações derivadas da lei de Ampère. Com o estudo do campo magnético pode-se analisar a distorção do campo causada pelo desbalanço em uma bobina de baixa tensão com 2 enrolamentos ligados em série dispostos axialmente, gerando um franjamento do campo potencializando as perdas parasitas. Com os dados de perdas obtidos executou-se simulações de transferência térmica obtendo variações de até 10°C em regime estático. Ao observar a foto do transformador recortado a região onde apresenta a queima foi a mesma que visto no franjamento do campo, portanto pode se concluir que bobinas de baixa tensão com enrolamentos dispostos axialmente apresentam uma fragilidade ao serem expostos ao tipo de situação analisado e a resolução mais simples é a utilização de enrolamentos dispostos radialmente.

Palavras-chave: Distribuição, Elementos finitos, Transformadores a seco, Simulação eletromagnética.

ABSTRACT

This work aims to diagnose a fault caused by unbalanced loads in a dry-type distribution transformer and propose a solution to prevent the recurrence of such faults. The finite element method should be used for electromagnetic simulation based on Ampère's law. By studying the magnetic field, the field distortion caused by the imbalance in a low-voltage coil with two axially arranged windings connected in series was analyzed, that distortion generated field fringing that enhanced the parasitic losses. With the obtained loss data, thermal transfer simulations were conducted, revealing variations of up to 10°C in a static regime. Observing the photograph of the cut transformer, the region showing burn marks corresponded to the area where field fringing was observed. Therefore, it can be concluded that low-voltage coils with axially arranged windings exhibit vulnerability when exposed to the analyzed situation, and the simplest resolution is to use radially arranged windings.

Keywords: Dry transformers, Distribution, Electromagnetic simulation, Finite elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Transformador a óleo <i>padmount</i>	18
Figura 2	- Transformador a óleo de poste.....	19
Figura 3	- Bobina de alta dividida em panquecas com fios circulares.....	22
Figura 4	- Bobina dividida em panquecas de folhas.....	22
Figura 5	- Discretização da região. a) Região da solução. b) Discretização em elementos finitos.....	23
Figura 6	- Elemento triangular e seus nós.....	32
Figura 7	- a) Elementos 1D. b) Elementos triangulares em 2D. c) Elementos quadriláteros em 2D. d) Elementos tetraédricos em 3D. e) Elementos hexaédricos em 3D.....	35
Figura 8	- Diagrama axissimétrico das distâncias alta, baixa e cabeceira.....	35
Figura 9	- Gráfico de potência sobre um transformador na mesma rede.....	36
Figura 10	- Circuito elétrico de ligação da baixa tensão.....	37
Figura 11	- Simulação de campo magnético balanceado, perdas: LV1 = 61,4 W; LV2 = 61,4 W.....	37
Figura 12	- Simulação de campo magnético balanceado, perdas: LV1 = 61,4 W; LV2 = 33,2 W.....	38
Figura 13	- Simulação de campo magnético em desbalanço, perdas: LV1 = 99,5 W; LV2 = 27,6 W.....	39
Figura 14	- Franjamento do fluxo nas cabeceiras com bobinas de mesma altura e com alturas diferentes.....	39
Figura 15	- Simulação térmica cargas equivalentes 7,5 kVA.....	40
Figura 16	- Simulação térmica cargas desbalanceadas LV1 = 7,5 kVA e LV2 = 0 kVA.....	18
Figura 17	- Visualização da falha.....	18
Figura 18	- Circuito elétrico de ligação de baixa tensão dispostos radialmente.....	18
Figura 19	- Bobina de alta dividida em panquecas com fios circulares.....	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Parâmetros e unidades elétricas.....	24
Tabela 2	- Parâmetros e unidades do molde e material de encapsulamento utilizado.....	24
Tabela 3	- Parâmetros e unidades do núcleo.....	25
Tabela 4	- Parâmetros e unidades dos condutores.....	25
Tabela 5	- Parâmetros geométricos das bobinas de alta e baixa tensão.....	26
Tabela 6	- Especificações elétricas.....	29
Tabela 7	- Especificações do molde e material de encapsulamento utilizado.....	29
Tabela 8	- Especificações do núcleo.....	30
Tabela 9	- Material condutores.....	30
Tabela 10	- Dimensões bobinas de alta e baixa tensão.....	33

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Indução magnética (T)
C	Comprimento (mm)
d	Densidade de corrente condutor A/mm ²
E	Intensidade do campo elétrico (V/m)
f	Frequência (Hz)
H	Força do campo magnético (A/m)
H_{coil}	Altura da bobina (m)
H_{eq}	Altura elétrica (mm)
I	Corrente (A)
K_R	Fator de Rogowski
L	Largura (mm)
L_{1LV}	Distância entre raios interno maior da BT (m)
L_{2LV}	Distância entre raios interno menor da BT (m)
L_{1IS}	Distância entre raios interno maior do isolante (m)
L_{2IS}	Distância entre raios interno menor da isolante (m)
N	Número de espiras
p	Perímetro (mm)
p_{Δ}	Perímetro médio da bobina (mm)
P	Potência (VA)
r	Raio (mm)
R_{en}	Resistencia do enrolamento (Ohm)
r_{1LV}	Raio interno BT (m ²)
r_{1IS}	Raio interno isolante (m ²)
R	Resistência (Ohm)
S_c	Seção condutor (mm ²)
S_m	Seção núcleo magnético (mm ²)
S_1	Seção bobina de baixa tensão (m ²)
S_2	Seção do isolante entre bobinas (m ²)
S_3	Seção bobina de alta tensão (m ²)
T_g	Radial isolamento entre bobinas (m)
T_1	Radial baixa tensão (m)

T_2	Radial alta tensão (m)
V	Tensão no circuito (V)
W_{en}	Perda no enrolamento (W)
W_{fe}	Perdas no núcleo (W)
W_T	Perdas totais (W)
$X(\%)$	Componente reativa da impedância em percentual (%)
μ_0	Permeabilidade magnética do ar ($4\pi \cdot 10^{-7}$) H/m)
σ	Perímetro médio da bobina (mm)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo.....	17
2. METODOLOGIA	18
2.1. Perdas em transformadores	18
2.2. Métodos construtivos de bobinas	19
2.3. Impactos da carga trifásica desequilibrada.....	20
2.4. Análise da falha utilizando simulação de elementos finitos.....	22
3. RESULTADOS	30
3.1. Especificação e cálculo do transformador.....	35
3.2. Análise da falha e resolução tomada	35
4. CONCLUSÃO	43
5. Referências Bibliográficas	44

1. INTRODUÇÃO

Transformadores de distribuição são dispositivos essenciais para a vida moderna, pois são eles que completam o ciclo de fornecimento de energia para as residências, comércios e indústrias. Sua função é a de reduzir a média tensão, 1,0 a 69 kV, da rede de distribuição (Aneel, 2022) para níveis padrões de baixa tensão, 110 e/ou 220 V, que grande parte dos aparelhos eletrônicos operam, por meio do processo de indução eletromagnética, onde ocorre a transferência de energia por meio de um campo magnético isolando fisicamente ambos os circuitos conectados no lado de alta e baixa tensão.

Esses dispositivos podem ser de três, duas ou uma fase, comumente transformadores de fase única são utilizados somente para fornecimento de residências podendo ter um banco de até 3 transformadores com o mesmo nível de tensão, mas de potências diferentes. Geralmente no Brasil, e em muitos países, é feito o uso de transformadores trifásicos dado o tipo de rede e o custo menos elevado por eliminar a necessidade de se ter um banco de 3 monofásicos, diferentemente dos Estados Unidos da América onde monofásicos predominam (Harlow., 2001). A forma de instalação pode variar sendo feita em postes ou de forma subterrânea por exemplo o *padmount*.

Figura 1 – Transformador a óleo *padmount*.



Fonte: (Harlow., 2001).

Figura 2 – Transformador a óleo de poste.



Fonte: (Harlow., 2001).

Há dois tipos comuns de transformadores de distribuição, os banhados a óleo e a seco. Os transformadores a óleo têm seu conjunto submerso no mesmo para isolamento e refrigeração, por outro lado, os transformadores a seco têm sua parte ativa encapsulada ou impregnada em resina frequentemente epóxi, trazendo diversos benefícios em comparação ao a óleo, como a não inflamabilidade, diminuição da manutenção, por não precisar trocar o fluido, e redução do tamanho, dado que não há necessidade de tanques para submersão, mas, em contrapartida, são mais complexos de se fabricar e apresentam em muitos casos a impossibilidade de repará-los.

Dentre as causas de falhas que ocorrem em transformadores a seco, pode-se destacar: sobrecarga do equipamento, instalação incorreta, erros na fabricação, ambiente com ventilação inadequada, dentre outros (Foster, 2013). Em um plano de manutenção para transformadores, deve ser previsto o ensaio de resistência de isolamento elétrica pelos materiais isolantes (Junior & Pacheco, 2017). Para a sua realização, faz-se necessária a desenergização do transformador. Contudo, as paradas para manutenção têm alto custo para as empresas de energia elétrica, tornando-se necessária a busca por técnicas não-invasivas para serem aplicadas com o equipamento em operação (Velo, et al., 2008).

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a análise de falha decorrente de um desbalanço de carga na rede de distribuição de energia em um transformador de distribuição de tipo seco, com uma bobina de baixa tensão, com enrolamentos dispostos radialmente.

No procedimento de resolução, deve-se dimensionar os enrolamentos tanto de baixa como de alta tensão do transformador como, também, o cálculo de suas perdas. Utilizar o método dos elementos finitos para a observação do modo que o fluxo magnético se comporta, tanto para o caso usual, sem um desbalanço como para um caso em que ocorreria carga em somente um dos enrolamentos.

Para a simulação térmica, deve montar um modelo em 3 dimensões contemplando todos seus componentes e suas características térmicas e o uso dos valores do fluxo magnético, para obter as perdas de cada região das bobinas. Com os resultados obtidos, pode-se encontrar um novo arranjo para a bobina a fim de mitigar, ou eliminar totalmente esse tipo falha.

2. METODOLOGIA

Neste capítulo, tem-se o estudo das perdas que podem ocorrer em um transformador. Os principais métodos construtivos para as bobinas tanto de alta como de baixa tensão são apresentados, assim como uma breve passagem pelo método dos elementos finitos. Em seguida, apresenta-se o dimensionamento de um transformador de distribuição monofásico do tipo seco.

2.1. Perdas em transformadores

As perdas em transformadores ocorrem em duas regiões: no núcleo e nas bobinas (Fitzgerald, et al., 2014).

As perdas no núcleo são decorrentes de:

- Corrente parasita “Eddy losses”: é uma das principais perdas em transformadores ocasionadas pelas excitações do campo magnético sobre efeito da corrente alternada, que produz um campo magnético inverso, induzindo correntes circulares no núcleo em sentido perpendicular ao campo. Na oposição do fluxo magnético ocorre a resistência a mudança de sentido, assim gerando calor nas chapas do núcleo;
- Histerese: ocorre devido o ciclo de magnetização do núcleo quando há a passagem de corrente alternada, esse varia de acordo com a frequência e as propriedades do ferro magnético utilizado.

As perdas na bobina são decorrentes de:

- Perda por resistência ôhmica: está relacionada com a resistividade apresentada nos enrolamentos que produz calor quando há passagem de corrente por eles, está diretamente relacionado com a secção do condutor e seu material;
- Perdas parasitas nos condutores: são ocasionados por fluxos dispersos gerados pela própria corrente de carga, na maioria dos casos são pequenas e desprezíveis, mas em outros casos em que bobinas apresentam tamanhos diferentes pode ocorrer um “françamento” do fluxo gerando aquecimento na cabeceira da bobina;
- Perdas por circulação de corrente em condutores em paralelo: surgem quando utiliza-se de condutores em paralelo na tentativa de manter a densidade de corrente equivalentes para

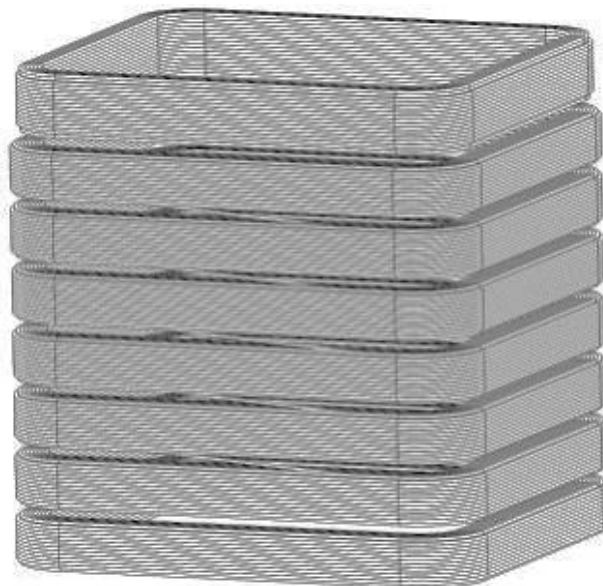
limitar perdas por efeito Joule ou parasitas, mas caso os condutores apresentem tamanho diferentes surge o efeito contrário causando mais perdas;

Perdas adicionais podem ocorrer ocasionados também pelo fluxo de dispersão, gerando perdas parasitas também em outras partes do transformador feitas com materiais metálicos.

2.2. Métodos construtivos de bobinas

Existem diversos modos de se produzir uma bobina, não necessariamente como o imaginário comum com um rolo de fios circulares, mas podendo ter diversos formatos dependendo do espaço que se deve ocupar ou o tipo de arranjo de núcleo usado. Deve-se atentar aos raios, que podem afetar o campo, como também a quantidade de espiras que cada enrolamento possui que irá definir o nível de tensão que a bobina apresenta, visto que é necessário ter isolamento da parte ativa e cada material dielétrico possui um nível de tensão por distância, para rompê-lo; caso ocorra uma tensão alta suficiente em uma bobina ocasionada por curto-circuito entre ela e outro material interno. Para que uma bobina não tenha um nível de tensão alto, a bobina é comumente dividida em pequenas seções, chamadas de “panquecas” de enrolamentos para que mantenha níveis seguros de tensão em relação ao material dielétrico utilizado, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 3 - Bobina de alta tensão dividida em panquecas com fios circulares



Fonte: Elaborado pelo autor.

Podem ser utilizados formatos diferentes de condutores não devendo ser somente fios circulares, por exemplo:

- Bobinas de chapas ou folha: neste tipo de bobina, uma chapa ou folha de cobre ou alumínio é enrolada em torno do núcleo, encontrado principalmente em transformadores de tipo seco de média potência ou maior, pela facilidade e rapidez em bobinar, mas requer mais material isolante, tendo que ter pelo menos uma volta a cada camada de condutor, como apresentado na figura 2.

- Bobinas de discos: neste tipo de bobina, os fios são enrolados em uma série de discos empilhados, é comumente utilizado papel *kraft* banhado no óleo para fazer o isolamento entre camadas. Este tipo de bobina é usado em transformadores que precisam lidar com altas tensões, por exemplos transformadores de potencial.

Figura 4 - Bobina dividida em panquecas de folhas



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3. Impactos da carga trifásica desequilibrada

Dentre as principais consequências da carga trifásica desequilibrada na operação do transformador, têm-se:

- Aumento da perda de energia elétrica dos transformadores: a perda de potência do transformador de distribuição varia com o desequilíbrio da carga;

- Redução da capacidade do transformador: a estrutura de enrolamento é projetada de acordo com as condições de operação com carga balanceada, e capacidade nominal igual de cada fase. A saída máxima permitida do transformador de distribuição é limitada pela capacidade nominal de cada fase. Quando a carga elétrica nas três fases não é igual, a fase com menos carga fica com capacidade sobrando, o que faz o transformador funcionar de forma menos eficiente. O grau de redução da produção está relacionado ao desequilíbrio da carga trifásica. Quanto maior o desequilíbrio da carga trifásica, mais diminui a saída do transformador de distribuição. Portanto, sua capacidade de saída não pode atingir o valor nominal e sua capacidade de *backup* é correspondentemente reduzida, resultando em uma diminuição na capacidade de sobrecarga. Se o transformador de distribuição operar sob condições de sobrecarga, é altamente provável que cause aquecimento do transformador de distribuição e, em casos graves, pode até causar queima do transformador de distribuição.

- Aparecimento da corrente de sequência zero: sob condições de carga trifásica desequilibrada, o transformador de distribuição gera corrente de sequência zero, que varia com o grau de desequilíbrio da carga trifásica. Quanto maior o desequilíbrio, maior é a corrente de sequência zero. Quando a corrente de sequência zero passa pelos componentes de aço, ocorrem perdas por histerese e por correntes parasitas, causando aumento de temperatura local e aquecimento dos componentes de aço do transformador de distribuição. O isolamento do enrolamento tem o envelhecimento acelerado devido ao superaquecimento, diminuindo a vida útil do equipamento.

- Diminuição da operação segura de equipamentos elétricos: com base na condição de operação de carga trifásica balanceada, a resistência, a reatância de fuga e a impedância de excitação de cada enrolamento de fase são basicamente as mesmas. Sob equilíbrio de carga trifásico, sua corrente trifásica é basicamente igual, e a queda de tensão de cada fase dentro do transformador de distribuição também é basicamente a mesma, então a saída de tensão trifásica pelo transformador de distribuição é também equilibrado. Se a carga trifásica estiver desequilibrada, a corrente de saída de cada fase não é igual e a queda de tensão trifásica interna do transformador não é igual, o que inevitavelmente leva ao desequilíbrio trifásico da tensão de saída do transformador de distribuição. Ao mesmo tempo, a corrente de saída trifásica é diferente, e há corrente passando pelo neutro. Como resultado, é gerada uma queda de tensão de impedância na linha neutra, levando ao desvio do ponto neutro e causando alterações na

tensão de cada fase, colocando seriamente em risco a operação segura dos equipamentos elétricos.

2.4. Análise da falha utilizando simulação de elementos finitos

Um desbalanço de cargas entre ambos os enrolamentos de baixa tensão pode fazer com que as perdas sejam diferentes entre os enrolamentos. Dessa forma, é possível utilizar um modelo em elementos finitos para observar a reação do campo magnético e fornecer um diagnóstico para evitar falhas futuras. O método dos elementos finitos (MEF) foi desenvolvido para suprir a necessidade de resolução dos problemas que os métodos analíticos e métodos numéricos não contemplavam. Inicialmente, foi desenvolvido apenas para solução de problemas mecânicos e posteriormente, com a evolução dos computadores e a velocidade de processamento, foi expandido para aplicações em eletromagnetismo, aeronáutica e áreas nucleares. A aplicação do MEF se dá pela aproximação de uma quantidade contínua através de um modelo discreto, que por sua vez é composto por um conjunto de funções contínuas definidas em um número finito (Bastos; Sadowski, 2003).

O procedimento para a resolução de problemas utilizando o método dos elementos finitos pode ser feito utilizando o método variacional, onde deve-se definir uma função que deve ser minimizada. Em casos simples a função é conhecida, mas em casos mais complexos se torna um trabalho árduo sua definição, portanto, muitas vezes recorre-se ao método residual onde se usa equações comuns da física. Uma das derivações deste método que é comumente utilizado para simulações eletromagnéticas, é o de Galerkin (Bastos; Sadowski, 2003).

O método de Galerkin é dividido nas seguintes etapas: definição das equações, discretização da solução, aproximação da solução e a montagem do sistema global.

Definição da equação física: na simulação realizada neste trabalho, foram utilizadas as equações (1) à (4), derivadas da lei de Ampere.

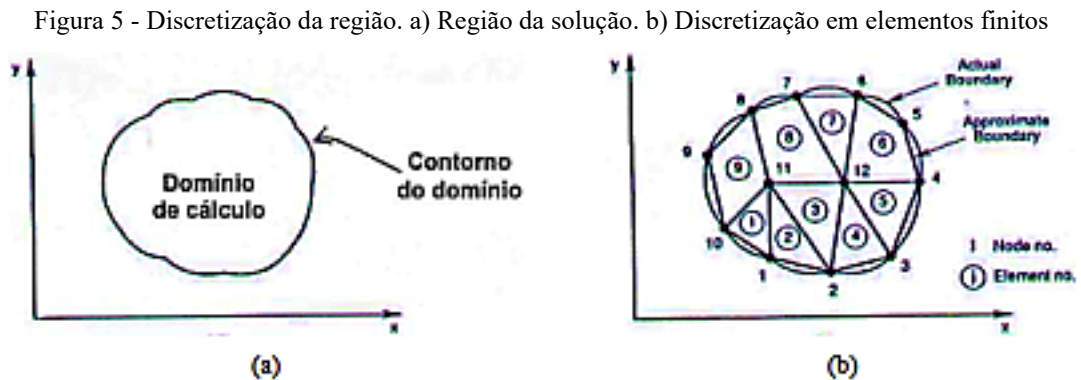
$$E = -j\omega A \quad (1)$$

$$\nabla * H = J \quad (2)$$

$$B = \nabla * A \quad (3)$$

$$J = \sigma E + j\omega D \quad (4)$$

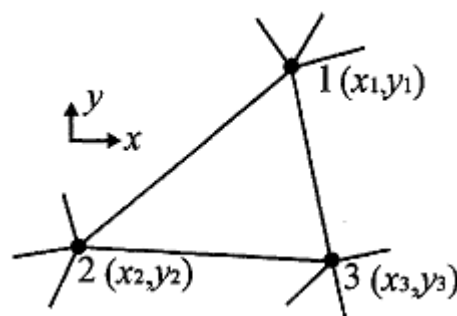
Discretização da Região: a discretização da região, tipicamente, é o que delimita as fronteiras, ou contornos do problema a ser resolvido. Divide-se estas em regiões menores, chamadas de “elementos finitos”, conforme é apresentado na Figura 3. Em a) é apresentado a região da solução, e em b) a região parametrizada com os seus devidos elementos numerados de 1 até 9.



Fonte: (Bastos; Sadowski, 2003).

Os elementos são compostos de nós, cada um deles possui suas componentes variando a quantidade de dimensões. O tipo mais comum de elemento usado é o triangular como visto na Figura 4.

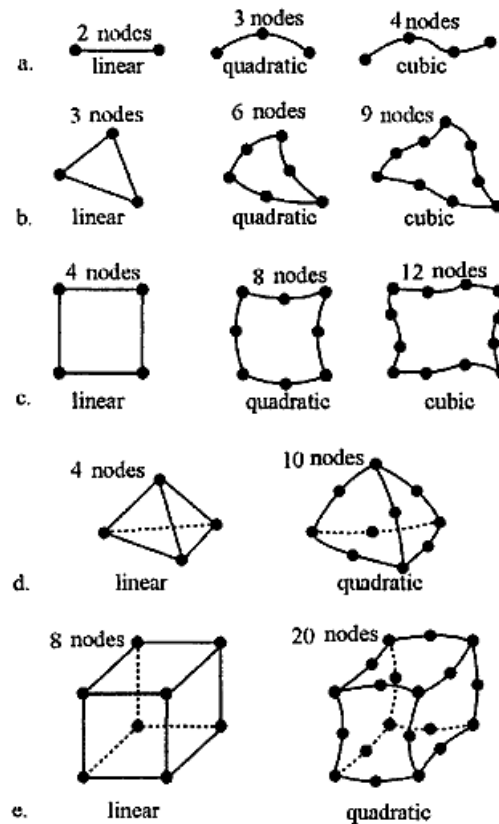
Figura 6 – Elemento triangular e seus nós



Fonte: (Bastos; Sadowski, 2003).

Há diversos tipos de elementos podendo conter mais nós que necessariamente vértices da figura geométrica que se baseiam.

Figura 7 – a) Elementos 1D. b) Elementos triangulares em 2D. c) Elementos quadriláteros em 2D. d) Elementos tetraédricos em 3D. e) Elementos hexaédricos em 3D.



Fonte: Bastos; Sadowski, 2003.

Definido um número de nós região do domínio, os conjuntos de elementos organizados por esses nós formam a malha de elementos finitos. Cada nó possui um valor de grandeza contínua e, em MEF, é basicamente a incógnita do problema proposto.

Uma grande vantagem desse método é a possibilidade de resolução de problemas com materiais não homogêneos, onde cada região do domínio assume características físicas diferentes (Carpes, 2021). Isso é verificado na simulação do campo elétrico de transformadores onde, por exemplo, a rigidez dielétrica do isolante da bobina (a resina epoxy, nos casos de transformadores a seco) possui um valor diferente da rigidez dielétrica do ar.

Montagem de um sistema global: Com a definição dos nós e das malhas, o próximo passo para obter a solução em MEF é a montagem do sistema global. Para isso, todos os elementos da malha devem ser considerados, isto é, um elemento triangular, composto por três nós podendo ser representado por uma matriz 3×3 , que por sua vez é inserido em uma matriz genérica $M \times M$ que leva em conta todos os elementos. Com a montagem da matriz global, é possível relacionar um determinado nó de um elemento pelo acoplamento com outro nó.

Portanto, a montagem do sistema global é correspondente a descrição da matriz relacionando todos os elementos através dos pontos. Com a matriz global mapeada é possível utilizar o espaço de nós já conhecidos para descobrir os valores dos nós livres, esse procedimento é conhecido como imposição das condições de contorno (Carpes, 2021).

2.5. Dimensionamento do Transformador

Cálculo transformador monofásico com núcleo envolvente de distribuição tipo seco, tem os seguintes parâmetros elétricos e de molde, dispostas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Parâmetros e unidades elétricas

Parâmetro	Unidade Típica
Potência	kVA
Alta Tensão	V
Baixa Tensão	V
Frequência	Hz
NBI Alta	kV
NBI Baixa	kV
Tensão aplicada alta	kV
Tensão aplicada baixa	kV

Fonte: Autoria própria

Tabela 2 – Parâmetros e unidades do molde e material de encapsulamento utilizado

Parâmetro	Unidade Típica
Comprimento janela núcleo	mm
Largura janela núcleo	mm
Comprimento janela mínimo enrolamento	mm
Largura interna mínimo enrolamento	mm
Altura máxima enrolamento	mm
Altura máxima núcleo	mm
Empilhamento máximo núcleo	mm
Material	-
Rigidez dielétrica	kV/mm

Fonte: Autoria própria

Como se trata de um transformador a seco, suas medidas são limitadas pelo molde utilizado, logo, o núcleo não tem muita flexibilidade em seu tamanho, por isso é adotado um com os parâmetros limites para se ter um melhor desempenho nas perdas como também menores valores de indução. A Tabela 3 tem os parâmetros do núcleo.

Tabela 3 – Parâmetros e unidades do núcleo

Parâmetro	Unidade Típica
Comprimento janela núcleo	mm
Largura janela núcleo	mm
Comprimento externo núcleo	mm
Largura externo núcleo	mm
Altura núcleo	mm
Empilhamento núcleo	mm
Seção	mm ²
Material	-
Indução máxima	T
Perdas	W/kg
Massa	kg
Perda no ferro	62,1 W

Fonte: Autoria própria

O material para os condutores de alta e baixa tensão é o descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Material condutores

Parâmetro	Unidade típica
Material	-
Condutividade 20°C	S/mm
Condutividade 120°C	S/mm
Peso específico	kg/dm ³

Fonte: Autoria própria

Sabendo das distâncias do molde, tendo o somatório das espessuras das blindagens e suas folgas, deve-se atentar na decisão do número de espiras e a espessura do condutor.

Para um transformador com função de redução de tensão, é mais intuitivo e indicado o cálculo partindo das espiras de baixa tensão, visando uma baixa perda no núcleo para uma indução magnética específica. Assim, utilizando a equação (5) define-se a quantidade de espiras.

$$N = \frac{V}{4.44 * f * (B * 10^{-4}) * (Sm * 10^{-2})} \quad (5)$$

Como se trata de um transformador a seco, a densidade de corrente dos condutores não pode ser igual ao utilizado em um submerso no óleo. Utilizando da equação (6) e (7) calcula-se a seção do condutor.

$$I = \frac{P}{V} \quad (6)$$

$$S_c = \frac{I}{d} \quad (7)$$

Usando a especificação da folha, obtém-se a densidade; utilizando um isolante DMD obtém-se um radial para a bobina de baixa tensão e usando a relação descrita na equação (8) encontra-se o número de espiras de alta.

$$\frac{volt}{esp} = \frac{V}{N} \quad (8)$$

Utilizando a especificação do fio, obtém-se uma densidade de corrente. Dividindo pelo número de seções, determina-se a especificação da bobina. Sabendo a rigidez dielétrica, altura máxima do enrolamento e os valores de tensão para impulso e aplicada, pode-se definir as distâncias entre seção e cabeceira. Para uma distância ideal para cabeceira, tem-se uma resistência maior. Com os valores obtidos, é possível dimensionar as bobinas de alta e baixa, conforme as dimensões apresentas na Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensão das bobinas de alta e baixa tensão

Bobina	Parâmetro em mm
Baixa tensão	Largura janela
	Comprimento janela
	Raio janela
	Largura externa
	Comprimento externo
	Raio externo
	Altura
Alta tensão	Largura janela
	Comprimento janela
	Raio janela
	Largura externa
	Comprimento externo
	Raio externo
	Altura

Fonte: Autoria própria

Utilizando as dimensões descritas na Tabela 5 e a equação (9) encontra-se os perímetros das bobinas e o valor médio entre externo e interno.

$$P = 2\pi * r + 2 * (L + C - 4 * r) \quad (9)$$

Com os valores de perímetro médio utiliza-se a equação (10) para obter a resistividade e com isso calcular as perdas nos enrolamentos com a equação (11). A condutividade a ser utilizada é para 120 °C, como definida na norma NBR 5356-11.

$$R = \frac{1}{\sigma} * P_{\Delta} * \frac{N}{S_c} \quad (10)$$

$$W_{en} = R_{en} * I^2 \quad (11)$$

$$W_T = W_{en} + W_{fe} \quad (12)$$

Com as equações (13) a (18), calcula-se a reatância percentual do circuito e a seções das bobinas e distância entre elas.

$$X(\%) = \frac{400\mu_0\pi^2 f(I * N)}{(V * N) * H_{eq}} [S_1 + S_2 + S_3] \quad (13)$$

$$H_{eq} = \frac{H_{coil}}{K_R} \quad (14)$$

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{\frac{-\pi H_{coil}}{T_1 + T_g + T_2}}}{\frac{\pi H_{coil}}{T_1 + T_g + T_2}} \quad (15)$$

$$S_1 = \int_{x=0}^{T_1} \left(\frac{x}{T_1}\right)^2 \left[(x + r_{1LV}) + \left(\frac{1}{\pi}\right) (L_{1LV} + L_{2LV}) \right] dx = \frac{T_1}{3} \left[r_{1LV} + \left(\frac{1}{\pi}\right) (L_{1LV} + L_{2LV}) \right] + \frac{T_1^2}{4} \quad (16)$$

$$S_2 = \int_{x=0}^{T_g} \left[(x + r_{1IS} + T_1) + \left(\frac{1}{\pi}\right) (L_{1IS} + L_{2IS}) \right] dx = T_g \left[r_{1IS} + T_1 + \left(\frac{1}{\pi}\right) (L_{1IS} + L_{2IS}) \right] + \frac{T_g^2}{2} \quad (17)$$

$$S_3 = \int_{x=0}^{T_2} \left(1 - \frac{x}{T_2}\right)^2 \left[x + r_{1HV} + \left(\frac{1}{\pi}\right) (L_{1HV} + L_{2HV}) \right] dx = \frac{T_2}{3} \left[r_{1HV} + \left(\frac{1}{\pi}\right) (L_{1HV} + L_{2HV}) \right] + \frac{T_2^2}{12} \quad (18)$$

A partir das equações (19) e (20) chega-se à impedância percentual do sistema a 120 °C.

$$R(\%) = \frac{W_{\text{en}}}{P} * 100 \quad (19)$$

$$Z(\%) = \sqrt{R(\%)^2 + X(\%)^2} \quad (20)$$

Seguindo esses passos pode se descrever os valores elétricos de um transformador monofásico a seco

3. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados. Primeiramente, determina-se o dimensionamento do transformador de distribuição e em seguida, com esses dados, são apresentados os resultados obtidos com as simulações geradas pelo MEF bem como suas análises, e comparação com o ocorrido e a possível solução da falha para novos transformadores

3.1. Especificação e Cálculo do transformador

Cálculo de um transformador monofásico com núcleo envolvente de distribuição tipo seco, com as seguintes especificações da rede e especificações do molde dispostas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Especificações elétricas

Parâmetro	Valores
Potência	15 kVA
Alta Tensão	7967 V
Baixa Tensão	440 V
Frequência	60 Hz
NBI Alta	95 kV
NBI Baixa	10 kV
Tensão aplicada alta	35 kV
Tensão aplicada baixa	4 kV

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Especificações do molde e material de encapsulamento utilizado

Parâmetro	Valores
Comprimento janela núcleo	253 mm
Largura janela núcleo	67 mm
Comprimento janela mínimo enrolamento	180 mm
Largura interna mínimo enrolamento	84 mm
Altura máxima enrolamento	245 mm
Altura máxima núcleo	170 mm
Empilhamento máximo núcleo	41.5 mm
Material	Epóxi
Rigidez dielétrica	9 kV/mm

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 8 apresenta suas especificações do núcleo utilizado.

Tabela 8 – Especificações do núcleo

Parâmetro	Valores
Comprimento janela núcleo	253 mm
Largura janela núcleo	68 mm
Comprimento externo núcleo	335 mm
Largura externo núcleo	150 mm
Altura núcleo	170 mm
Empilhamento núcleo	41 mm
Seção	13522 mm ²
Material	Silício
Indução máxima	1,75 T
Perdas	0,780 W/kg
Massa	79,70 kg
Perda no ferro	62,17 W

Fonte: Próprio autor.

O material escolhido para os condutores de alta e baixa tensão é o descrito na Tabela 9.

Tabela 9 – Material condutores

Parâmetro	Valor
Material	Alumínio
Condutividade 20°C	35700,00 S/mm
Condutividade 120°C	25352,17 S/mm
Peso específico	2,70 kg/dm ³

Fonte: Próprio autor.

Sabendo das distâncias do molde, tem-se uma espessura radial de 67 mm para os enrolamentos, isolantes e blindagem. Sabendo que o somatório das espessuras das blindagens e suas folgas são 9,35 mm, portanto, restam 57,65 mm devendo-se atentar na decisão do número de espiras e a espessura do condutor.

Para um transformador com a função de redução de tensão, é mais intuitivo e indicado o cálculo partindo das espiras de baixa tensão, e visando uma baixa perda no núcleo definiu-se uma indução magnética de 1,25 T. Utilizando da equação (5) define-se a quantidade de espiras.

$$N_1 = \frac{440}{4,44 * f * (1,25 * 10^{-4}) * (13522 * 10^{-2})} = 97,72 \cong 98 \text{ espiras}$$

Utilizando um enrolamento de baixa tensão com duas bobinas ligados em série resultam 49 espiras por enrolamento. Como se trata de um transformador a seco a densidade de corrente

dos condutores não pode ser igual ao utilizado em um submerso no óleo, portanto, definiu-se uma densidade de 1.5 a/mm², e utilizando da equação (6) e (7), calcula-se a seção do condutor.

$$I_b = \frac{15000}{440} = 34.09 \text{ A}$$

$$S_x = \frac{34.09}{1.5} = 22.73 \text{ mm}^2$$

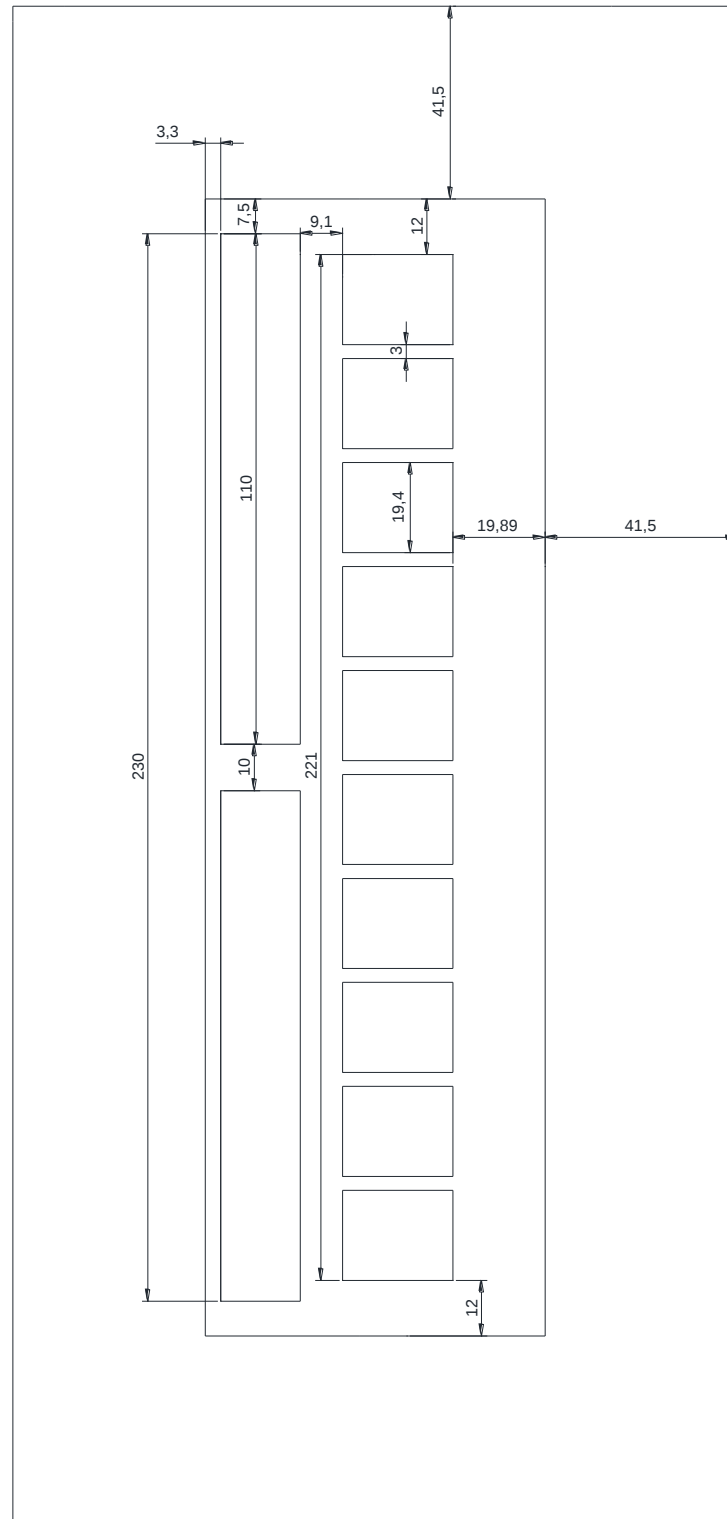
Usando uma folha de 110 mm de comprimento, 0,20 de espessura e seção igual a 22 mm² a densidade sobe para 1.55 A/mm², utilizando um isolante DMD por volta de 0,15 mm de espessura obtém-se um radial de 17,15 mm para a bobina de baixa tensão, e usando a relação descrita na equação (8), encontra-se o número de espiras de alta.

$$\frac{\text{volt}}{\text{esp}} = \frac{440}{98} = 4,49 \text{ V/N}$$

$$\text{esp} = \frac{7967}{4,49} = 1774,39 \text{ N}$$

Utilizando um fio 15 AWG esmaltado com espessura de 1,588 mm, 1,450 mm nu e seção 1,65 mm², obteve-se uma densidade de corrente equivalente a 1,14 A/mm². Dividindo por 10 seções, cada uma tem 178 voltas, radial de 23,82 mm, axial de 19,4 mm e tensão de 799.22V. Sabendo a rigidez dielétrica, altura máxima do enrolamento e os valores de tensão para impulso e aplicada pode se definir as distâncias entre seção e de cabeceira. Sabe-se que a distância ideal para cabeceira é 10,56 mm. A fim de se ter uma resistência maior a tensão, elevou-se a distância para 12 mm e com a distância restante distribuiu entre seções como disposta na Figura 6.

Figura 8 – Diagrama axissimétrico das distâncias alta, baixa e cabeceira.



Fonte: Próprio autor.

Com os valores obtidos, montou-se a Tabela 5, descrevendo as dimensões das bobinas.

Tabela 5 – Dimensões bobinas de alta e baixa tensão

Bobina	Parâmetro	Valor (mm)
Baixa tensão	Largura janela	90,6
	Comprimento janela	186,6
	Raio janela	6,3
	Largura externa	126,7
	Comprimento externo	228,0
	Raio externo	24,4
	Altura	230,0
Alta tensão	Largura janela	144,8
	Comprimento janela	246,1
	Raio janela	25,0
	Largura externa	192,4
	Comprimento externo	293,7
	Raio externo	48,8
	Altura	221,0

Fonte: Próprio autor.

Utilizando da Tabela 5 e da equação (9) encontram-se os perímetros das bobinas e o valor médio entre externo e interno.

$$P_{btin} = 2\pi * 6,3 + 2 * (90,6 + 186,6 - 4 * 6,3) = 544 \text{ mm}$$

$$P_{btex} = 2\pi * 24,4 + 2 * (126,7 + 228,0 - 4 * 24,4) = 668 \text{ mm}$$

$$P_{atin} = 2\pi * 25 + 2 * (144,8 + 246,1 - 4 * 25) = 739 \text{ mm}$$

$$P_{atex} = 2\pi * 48,8 + 2 * (192,4 + 293,7 - 4 * 48,8) = 889 \text{ mm}$$

$$P_{bt\Delta} = \frac{544 + 668}{2} = 606 \text{ mm}$$

$$P_{at\Delta} = \frac{739 + 889}{2} = 814 \text{ mm}$$

Com os valores de perímetro médio, utiliza-se da equação (10) para obter a resistividade e com isso calcular as perdas nos enrolamentos com a equação (11). A condutividade a ser utilizada será para 120 °C, como definida na norma NBR 5356-11.

$$R_{bt} = \frac{1}{25352,17} * 606 * \frac{49}{22} = 0,05324 \text{ Ohm}$$

$$R_{at} = \frac{1}{25352,17} * 1774 * \frac{814}{1,65} = 34,52 \text{ Ohm}$$

$$W_{enbt} = 2 * (0,05324 * 34,09^2) = 123,67 \text{ W}$$

$$W_{enat} = 34,52 * 1,88^2 = 122,00 \text{ W}$$

$$W_{to} = 123,67 + 122,00 + 62,17 = 307,84 \text{ W}$$

Com as equações (13) a (18), calcula-se a reatância percentual do circuito.

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{\frac{-\pi 0,230}{0,022+0,0091+0,02382}}}{\frac{\pi 0,230}{0,022 + 0,0091 + 0,02382}} = 0,9240$$

$$H_{eq} = \frac{0,230}{0,9145} = 0,2515$$

$$S_1 = \frac{0,022}{3} \left[0,0063 + \left(\frac{1}{\pi} \right) (0,174 + 0,078) \right] + \frac{0,022^2}{4} = 0,000602 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 0,0091 \left[0,0063 + 0,0181 + \left(\frac{1}{\pi} \right) (0,174 + 0,078) \right] + \frac{0,0091^2}{2} = 0,000988 \text{ m}^2$$

$$S_3 = \frac{0,0238}{3} \left[0,025 + \left(\frac{1}{\pi} \right) (0,1961 + 0,0948) \right] + \frac{0,0238^2}{12} = 0,000981 \text{ m}^2$$

$$X(\%) = \frac{400 * (4\pi * 10^{-7}) \pi^2 * 60(34,09 * 98)}{(4,49) * 0,2515} [0,000602 + 0,000988 + 0,000981] = 2,26\%$$

A partir das equações (19) e (20) chega-se à impedância percentual do sistema a 120 °C.

$$R(\%) = \frac{(123,67 + 122,00)}{15000} * 100 = 1,64\%$$

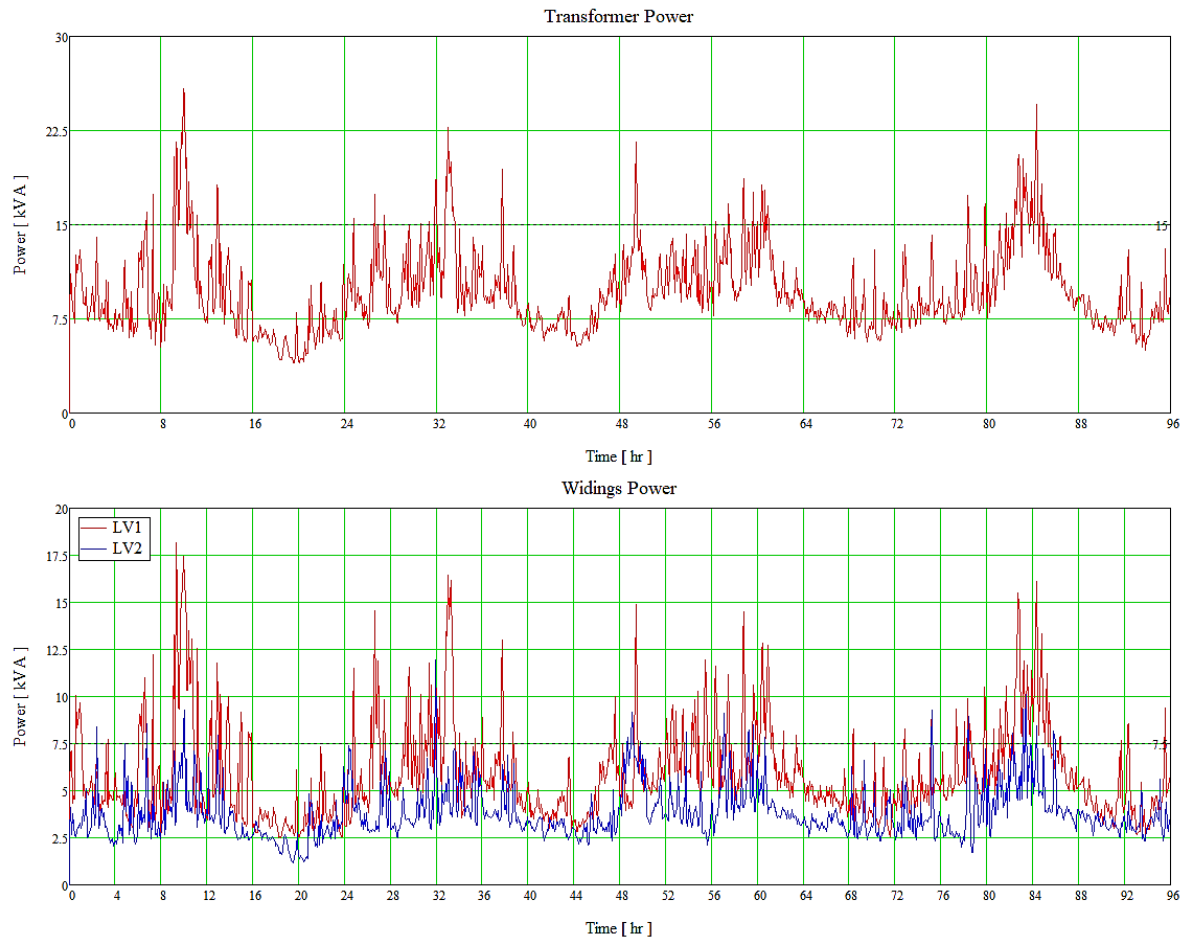
$$Z(\%) = \sqrt{1,64^2 + 2,26^2} = 2,79\%$$

3.2. Análise da falha e resolução tomada

Uma das unidades de transformador que operava em campo foi reportado a um dano precoce, com isso retornou-se o mesmo para a fábrica onde foi analisado e observado que

ocorreu um sobreaquecimento no enrolamento de baixa tensão como visto na Figura 14. Ao analisar os dados da rede, onde estava instalado, foi aferido que ela possui um desbalanço de cargas entre as bobinas de baixa, como visto na Figura 7.

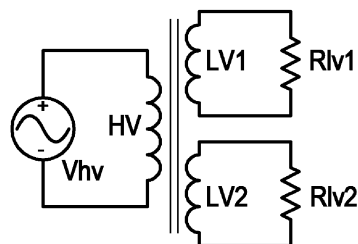
Figura 9: gráfico de potência sobre um transformador na mesma rede.



Fonte: Próprio autor.

Pressupondo-se que pelo método construtivo ser de dois enrolamentos de baixa tensão axialmente disposta e ligadas em série, como o esquema da Figura 8.

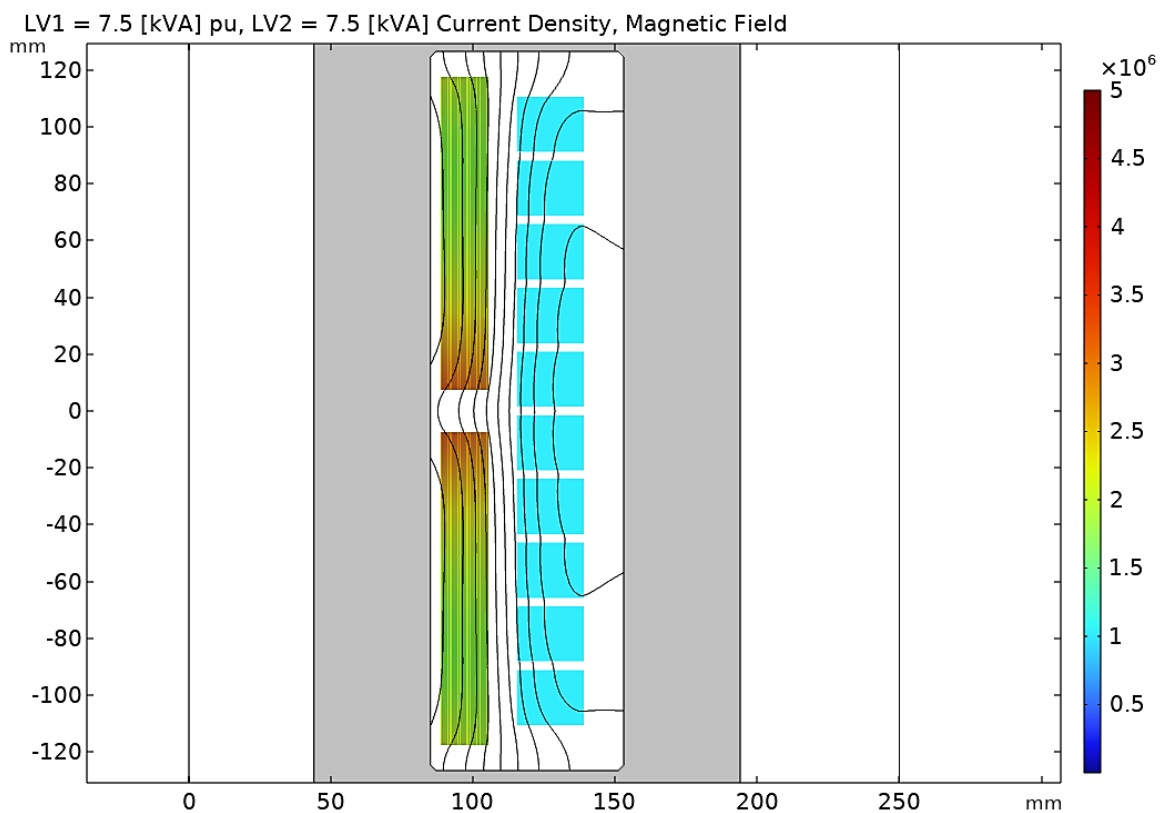
Figura 10: Circuito elétrico de ligação da baixa tensão.



Fonte: Próprio autor.

Quando ocorre um desbalanço em um sistema onde cada bobina está conectada a uma carga, duas saídas de 120V são geradas. Se essas saídas fossem ligadas em série, elas operariam com uma carga de 220V. No entanto, se as cargas conectadas às bobinas forem diferentes, cada uma delas terá uma corrente maior, o que causa uma distorção no campo magnético. Esse fenômeno é semelhante ao franjamento, mas ocorre mais abaixo da parte superior da bobina do que o esperado. Sabendo disso, fez-se um modelo em elementos finitos axissimétrico 2D para observação a reação do campo magnético nesta situação.

Figura 11 - Simulação de campo magnético balanceado, perdas: LV1 = 61,4 W; LV2 = 61,4 W.

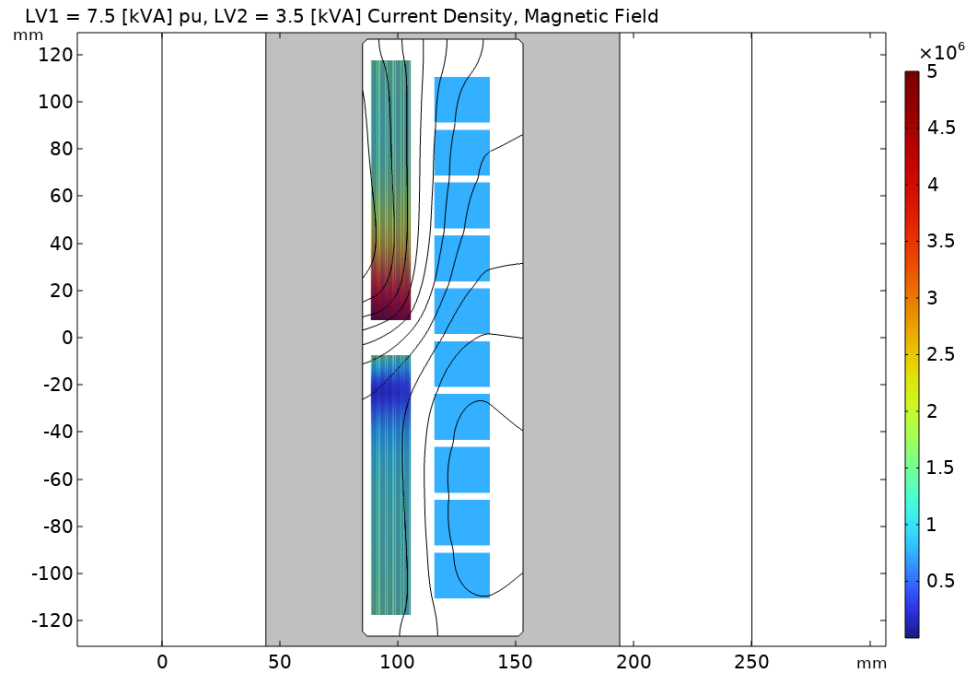


Fonte: Próprio autor.

Pelas simulações vistas nas figuras 9 e 10, é possível perceber que o desbalanço ocorreu uma dispersão do fluxo magnético (franjamento), dado o maior fluxo em sentido radial perpendicularmente ao enrolamento LV1. A diferença de carga entre enrolamentos nesta situação pode ocasionar um fenômeno similar ao caso de bobinas de alta e baixa tensão de alturas diferentes, além do fato que as perdas parasita agrava em casos onde o comprimento do condutor é muito maior que a largura, como é no caso analisado onde é utilizado chapas de alumínio no enrolamento, pois o fluxo de dispersão tem duas componentes como visto na Figura 11. Dado que o diâmetro do fio de alta tensão é muito menor que o comprimento da chapa o

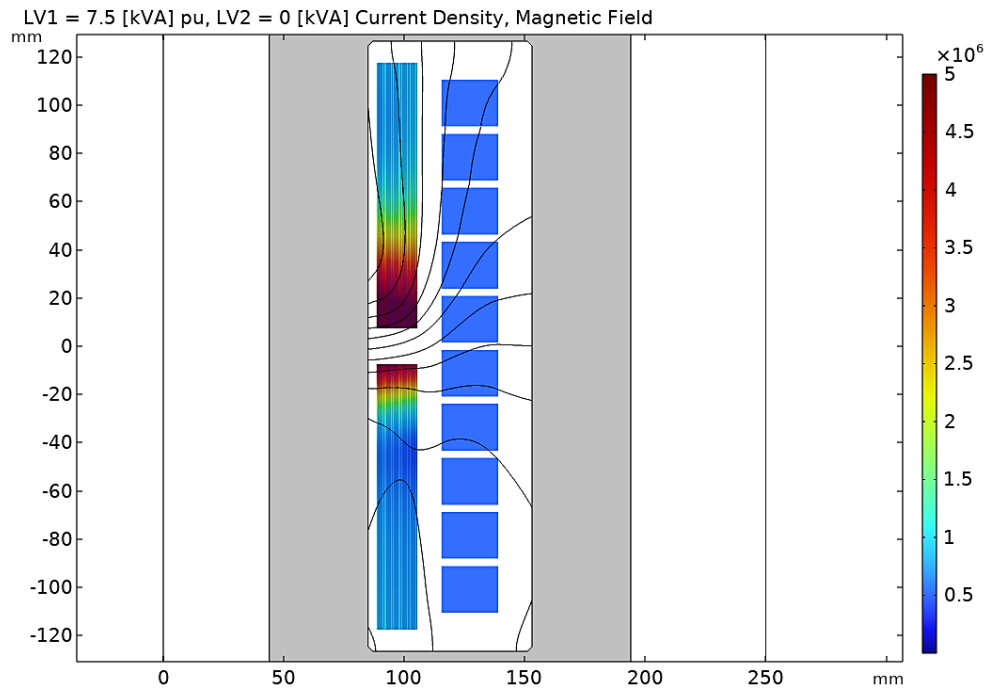
mesmo fenômeno não irá ocorrer no primário pois é utilizado um fio circular, logo, não há variação entre altura e largura do contutor. (Ries, 2006).

Figura 12 - Simulação de campo magnético em desbalanço, perdas: LV1 = 74,6 W; LV2 = 33,2W.



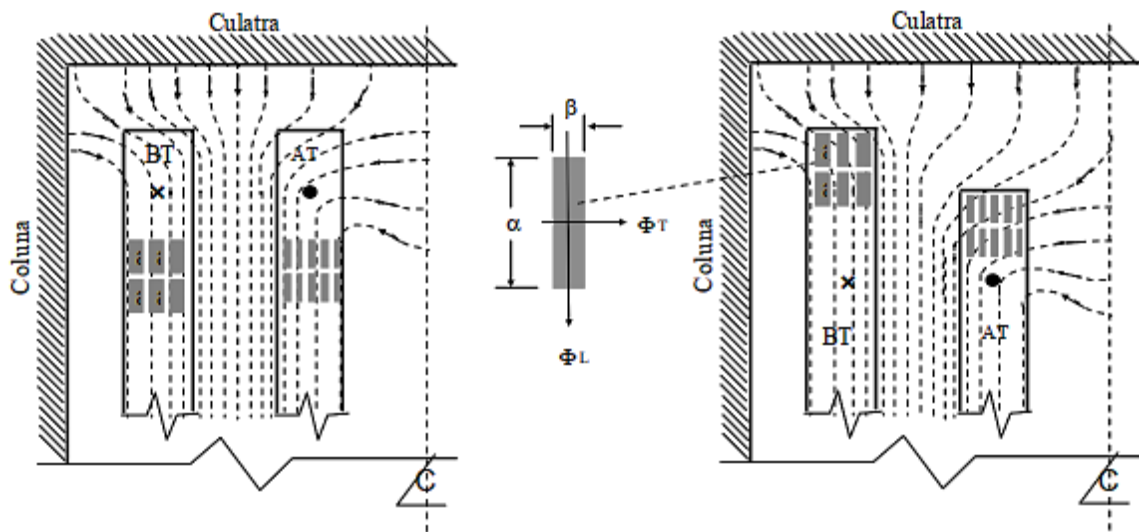
Fonte: Próprio autor

Figura 13 - Simulação de campo magnético em desbalanço, perdas: LV1 = 99,5 W; LV2 = 27,6 W.



Fonte: Próprio autor

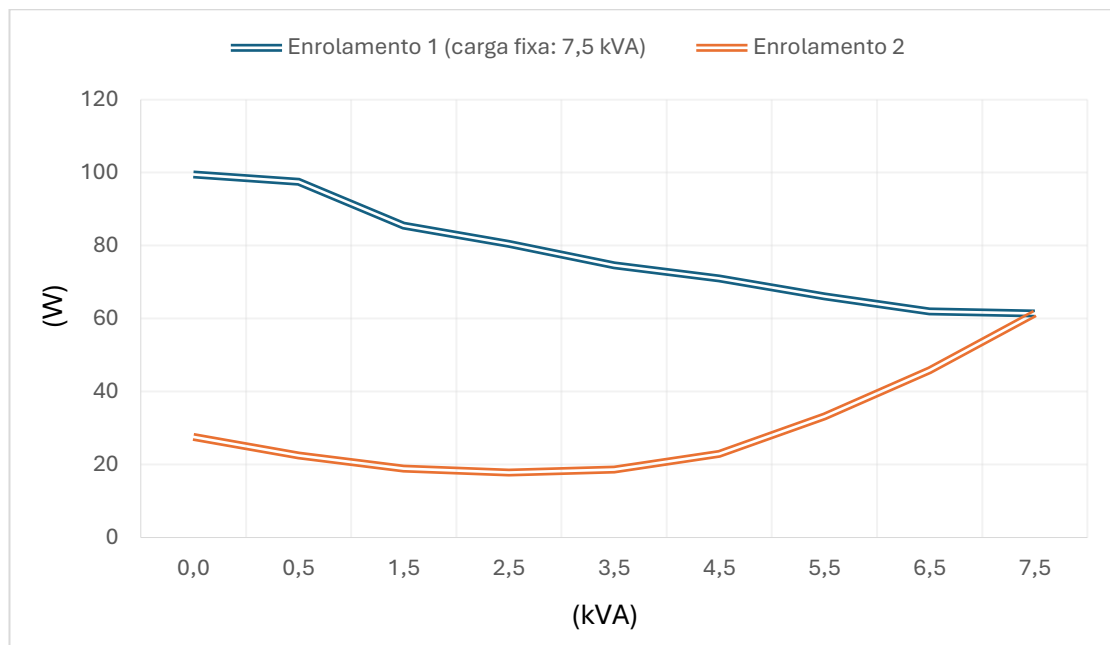
Figura 14 – Franjamento do fluxo nas cabeceiras com bobinas de mesma altura e com alturas diferentes



Fonte: (Rise, 2006).

Com os valores obtidos na simulação definindo a carga do primeiro enrolamento (LV1) fixa em 7,5 kVA e o segundo (LV2) variando de 0 kVA até 7,5 kVA, foi gerado o gráfico X da perda nessas situações.

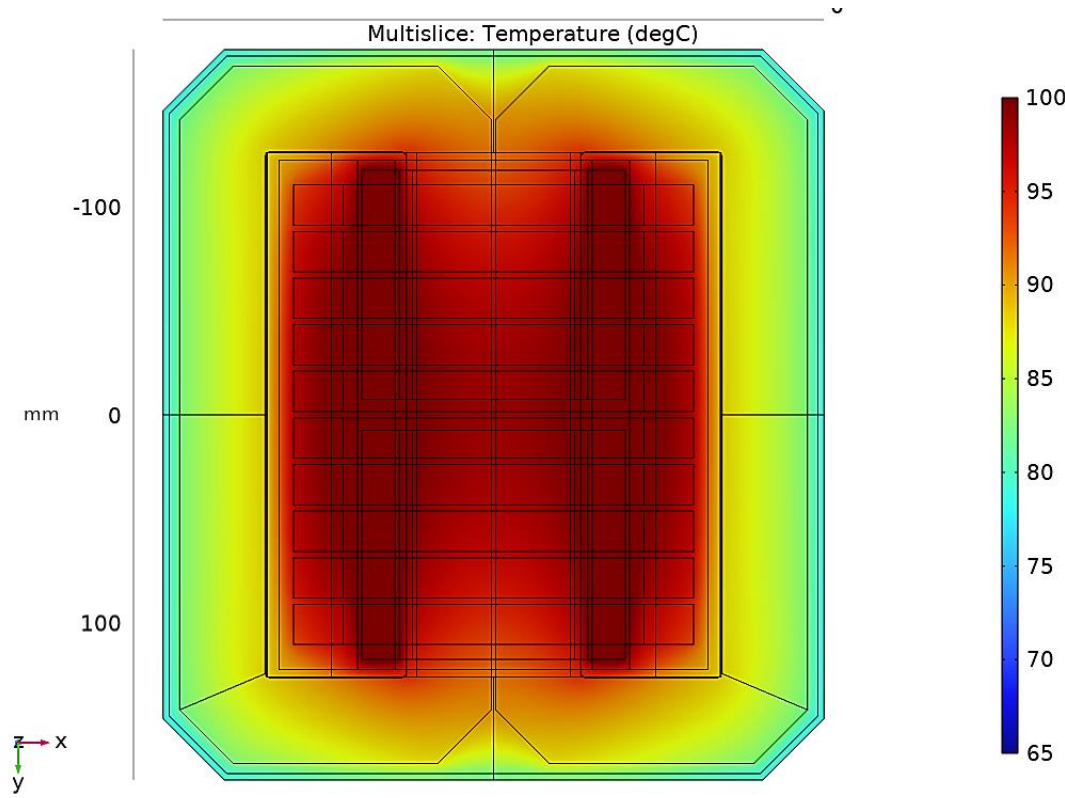
Gráfico 1 – Perdas nos enrolamentos pela variação de carga no 2º enrolamento (LV1)



Fonte: Próprio autor.

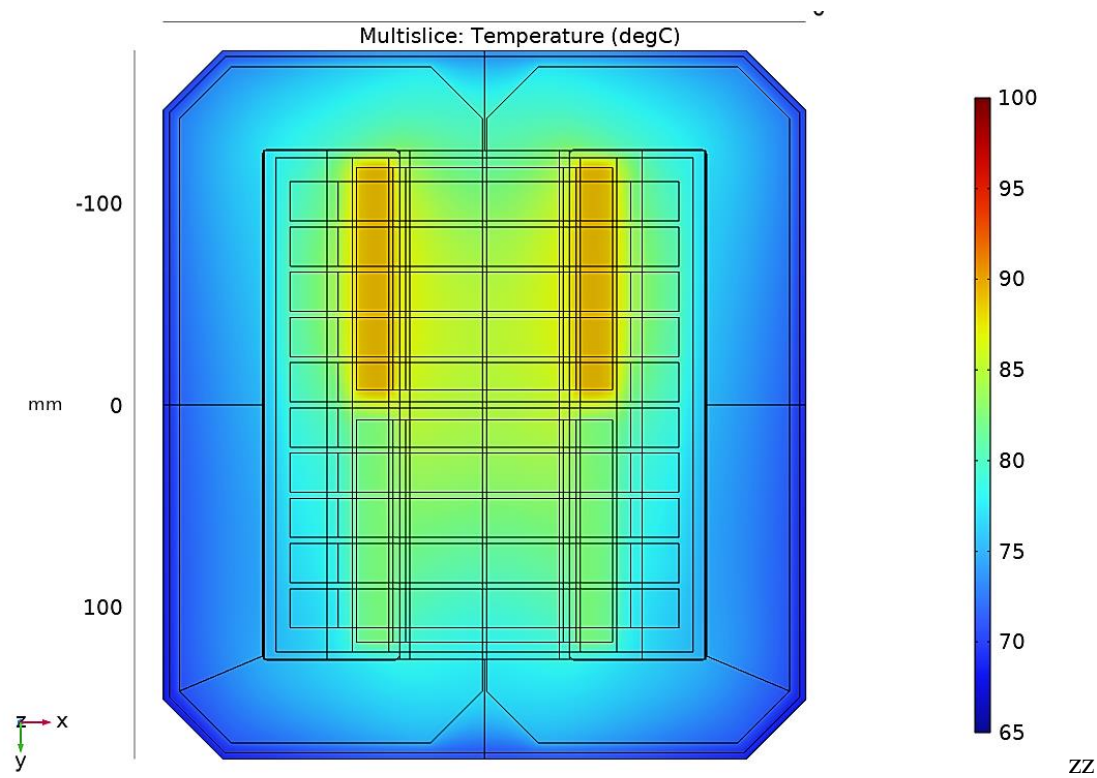
Pelo gráfico observa-se que as perdas nos enrolamentos aumentam com a diferença da carga. Com esses valores foi feita a simulação térmica estática utilizando um modelo 3D.

Figura 15 – Simulação térmica cargas equivalentes 7,5 kVA



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Simulação térmica cargas desbalanceadas LV1 = 7,5 kVA e LV2 = 0 kVA



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que há uma diferença de temperatura de aproximadamente 10 °C entre as bobinas num período estático, a longo prazo empiricamente essa elevação de uma das bobinas causou o aquecimento até uma falha catastrófica como visto na figura 14.

Figura 17 – Visualização da falha

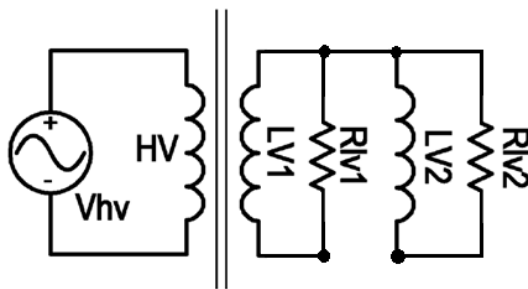


Fonte: Próprio autor.

Vê-se pela Figura 14 que a região onde ocorreu o aquecimento é similar à região em que dispersão do fluxo passa perpendicularmente ao condutor, portanto entende-se que existe uma fragilidade na disposição da bobina de baixa tensão em situações similares.

Para solucionar e evitar futuras falhas, propõe-se o uso de dois enrolamentos em série dispostos radialmente, bobinados um sobre o outro, com seu circuito como no esquema da **Figura 15**.

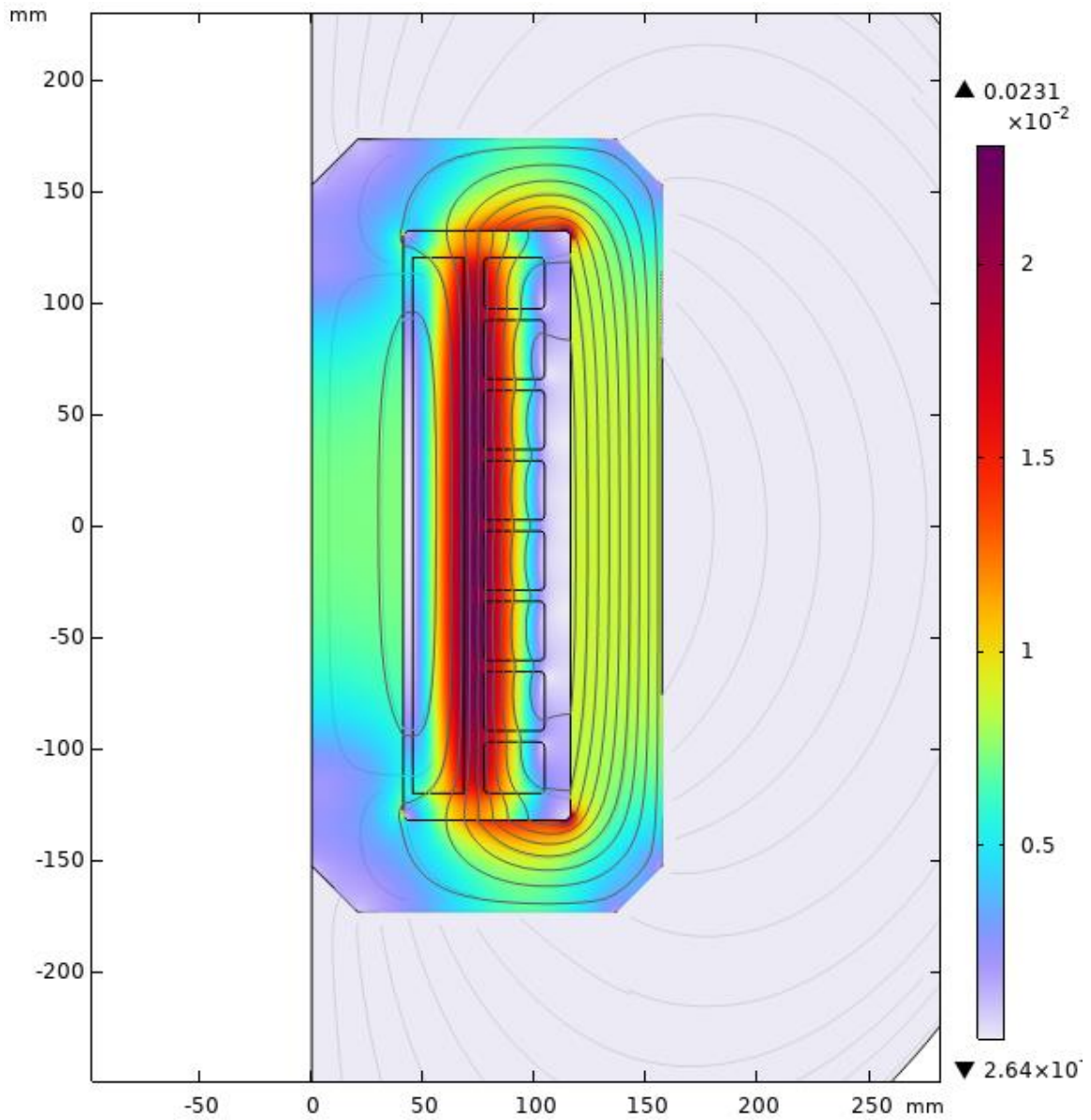
Figura 18: Circuito elétrico de ligação de baixa tensão dispostos radialmente.



Fonte: Próprio autor.

Com os enrolamentos ligados dessa forma, ambos têm a mesma altura que a bobina de alta tensão e em casos de desbalanço não ocorre aumento de perdas parasitas por dispersão de fluxo, mesmo que opere uma bobina sobre carga com somente 120V na saída.

Figura 19 – Simulação de campo magnético em balanço



Fonte: Próprio autor.

4. CONCLUSÃO

A partir do estudo das perdas e pela simulação do campo magnético, percebeu-se como a distorção do campo magnético pode influenciar as perdas parasitas, estas podendo ser ampliadas tanto pelo formato como pelo tamanho do condutor. Visto que o franjamento do campo pode ser, em certos casos, críticos à operação de um transformador, dependendo do quão elevado a corrente nominal no enrolamento for. Para a finalidade de distribuição há grande margem para erro, mesmo assim ainda pode proporcionar falhas nos que se destinam a geração de energia elétrica onde os níveis de potência podem passar de 1 MVA. Qualquer distorção no campo pode causar elevadas perdas parasitas, aumentando a temperatura nos condutores até uma falha catastrófica.

A simulação eletromagnética e térmica confirmou que a diferença de carga entre enrolamentos resultou no aumento das perdas em aproximadamente 40%, elevando a temperatura a níveis críticos a longo prazo e assim diminuindo a vida útil do material a ponto de ocasionar a falha.

A fim de mitigar essa falha e evitar com que ocorra novamente no futuro, propôs-se uma nova disposição dos enrolamentos da bobina de baixa tensão agora dispostas radialmente, uniformizando as alturas e minimizando as perdas. Assim, melhorando a eficiência e elevando a vida útil do transformador

5. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 13, vigente a partir de 01/01/2022

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. Florianópolis, Brasil: Marcel Dekker, 2003.

CARPES, W. P. Introdução ao Método de Elementos Finitos. 2021.

FITZGERALD, A.E., KINGSLEY JR.; UMANS, S. D., “Máquinas Elétricas”, Editora Bookman, 7ª Ed., Brasil, 2014.

FOSTER, D. R. Failures in Dry - Type Transformers for Offshore Applications. 2013.

HARLOW, J. H. “Transformes” vol. 3, 2001, p. 295.

JUNIOR, J. N. P.; PACHECO, L. G. Ensaios para diagnóstico das falhas em transformadores de potência. Tese (Doutorado) — Universidade do Sul de Santa Catarina, 2017.

VELOSO, G. F. C. et al. Detecção de descargas parciais em transformadores de potência utilizando transformada de Wavelet. n. November 2014, 2008.

RIES, Walter W. Transformadores. 2. ed. São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-11: Transformadores de potência - Parte 11: Transformadores do tipo seco - Especificação. Rio de Janeiro, 2016.