



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIZ FERNANDO SOARES DE SOUZA

**MODELAGEM E ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA E TÉRMICA DE UM
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO A SECO UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Uberlândia

2021

LUIZ FERNANDO SOARES DE SOUZA

**MODELAGEM E ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA E TÉRMICA DE UM
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO A SECO UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes Santos

Uberlândia, 10, junho de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arnaldo José Pereira Rosentino Junior

Prof^a. Dra. Elise Saraiva

Uberlândia

2021

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais
pelo apoio, companheirismo e conselhos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela dádiva da vida, pela força e pela conquista de chegar até este presente momento.

À minha família: Minha mãe Ângela Soares, ao meu pai Alex Neri e ao meu irmão Luiz Fellipe apoio incondicional em minhas escolhas, motivação, paciência e carinho.

Agradeço à companheira de vida, Isabella Dias, pelo seu amor, serenidade e amizade.

A todos meus amigos e companheiros que, direta ou indiretamente contribuíram para minha formação, em especial, ao meu amigo de graduação e vida Guilherme Campos, pela amizade e companheirismo ao longo desses anos.

Meus agradecimentos ao Prof.º Dr. Ivan Nunes Santos por todos seus ensinamentos, por sua presença, dedicação, disposição e pelas oportunidades ao longo de minha graduação.

Ao Prof.º Dr. Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior por seu esforço, interesse e amparo nesta pesquisa.

Aos membros da pós graduação do Núcleo da Qualidade da Energia Elétrica (NQEE).

À Instituição Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte físico, material e humano.

Ao Projeto de P&D UFU/TCE-CEB (PD-05160-1803/2018) pelo suporte financeiro concedido à pesquisa em questão, bem como o suporte fornecido pela ANSYS, Inc e ESSS.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro do Programa de Bolsas de Iniciação Científica PIBIC/CNPq/UFU.

*“A Matemática é o alfabeto com o qual Deus
escreveu o Universo.”
Galileu Galilei*

RESUMO

Este trabalho tem como propósito fornecer uma contribuição para estudos em elementos finitos para transformadores trifásicos. Os estudos foram feitos utilizando *software* ANSYS Maxwell® 3D, visando a simulação de um transformador trifásico a seco de 1,5 MVA. O transformador em questão foi analisado em condições nominais, distorção harmônica e em desequilíbrio, visando calcular parâmetros essenciais como densidade de fluxo magnético, perdas no núcleo, temperatura e densidade de perdas no núcleo e realizar um comparativo com os dados de fabricante. Tais dados mostram que o método de elementos finitos (MEF) é uma ferramenta altamente eficiente para estudos de geometrias complexas onde a solução analítica não é fácil de se obter.

Palavras-chave: Elementos Finitos, ANSYS, Transformador trifásico, perdas no núcleo, densidade de fluxo magnético, análise térmica.

ABSTRACT

This paper provides a contribution to finite element studies for three phase transformers. The studies were performed using ANSYS Maxwell® 3D *software*, describing the simulation of a 1,5 MVA three-phase dry transformer. The transformer in question was analyzed under nominal, harmonic and unbalance conditions, in order to calculate essential parameters such as magnetic flux density, core loss, temperature and core loss density of a 1,5 MVA three phases dry-type transformer and making a comparison with manufacturer data. These data show that the finite element method (FEM) is a highly efficient tool for studies of complex geometries where the analytical solution is not easy to obtain.

Keywords: Finite elements, ANSYS, Three phase transformer, Core loss, Magnetic flux density.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Detalhes e peças constituintes de um transformador a seco da GEAFOL.	15
Figura 2 – Tipos de simulação para o ANSYS Electronics.....	20
Figura 3 – Desenho orientativo do transformador a seco.....	23
Figura 4 – Vista da geometria implementada no ANSYS destacando o enrolamento AT, o enrolamento BT com suas camadas, e os respectivos canais de ar.	23
Figura 5 – Vista da geometria implementada no ANSYS destacando o conjunto de panquecas/discos do enrolamento AT.	24
Figura 6 – Resultado obtido da geometria do problema.....	24
Figura 7 – Curva B versus H aproximada.	26
Figura 8 – Curva B versus P aproximada.....	26
Figura 9 – Circuito externo de excitação para o lado de baixa tensão do transformador a seco.....	28
Figura 10 – Forma de onda das tensões no lado de alta tensão.....	29
Figura 11 – Distribuição das malhas no núcleo.....	29
Figura 12 – Distribuição da densidade de fluxo magnético B (em Teslas), em condições nominais. (a) Análise da magnitude. (b) Análise vetorial.	30
Figura 13 - Distribuição da densidade de perdas totais no núcleo (em W/kg), em condições nominais.	31
Figura 14 – Distribuição de perdas nos enrolamentos, em condições nominais. (a) nos enrolamentos de AT. (b) nos enrolamentos de BT.....	31
Figura 15 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 1. Em azul, encontra-se as perdas por correntes parasitas, em laranja as perdas por histerese magnética e, em vermelho, as perdas totais no núcleo.	31
Figura 16 – Forma de onda das perdas totais nos enrolamentos do transformador, para o caso 1.	32
Figura 17 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m ² , no invólucro da subestação.....	33
Figura 18 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m ² , nas armaduras do transformador.....	33

Figura 19 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 2.	35
Figura 20 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 2.	35
Figura 21 – Forma de onda das perdas totais nos enrolamentos do transformador, para o caso 2.	36
Figura 22 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , no invólucro da subestação, para o caso 2.	36
Figura 23 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , na armadura do transformador, para o caso 2.	37
Figura 24 – Circuito externo implementado com fontes de correntes harmônicas de 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a ordem.	38
Figura 25 – Forma de onda das nas tensões no secundário do transformador, para o caso 3.	38
Figura 26 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 3.	39
Figura 27 – Forma de onda das perdas totais nos enrolamentos do transformador, para o caso 3.	39
Figura 28 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , no invólucro da subestação, para o caso 3.	39
Figura 29 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , nas armaduras do transformador, para o caso 3.	40
Figura 30 – Forma de onda das nas tensões no secundário do transformador, para o caso 4.	41
Figura 31 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 4.	42
Figura 32 – Forma de onda das perdas totais nos enrolamentos do transformador, para o caso 4.	42
Figura 33 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , no invólucro da subestação, para o caso 4.	42
Figura 34 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , nas armaduras do transformador, para o caso 4.	43
Figura 35 – Tensões na carga obtidas na simulação para o caso 5.	44
Figura 36 – Perdas no núcleo obtidas na simulação para o caso 5.	45

Figura 37 – Perdas nos enrolamentos obtida na simulação para o caso 5.....	45
Figura 38 – Distribuição da densidade de campo magnético, em Teslas. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4. (e) Caso 5.	47
Figura 39 – Distribuição de perdas no enrolamento AT, em W/m ³ . (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4. (e) Caso 5.....	48
Figura 40 – Distribuição de perdas no enrolamento BT, em W/m ³ . (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4. (e) Caso 5.....	49
Figura 41 – Distribuição de perdas no núcleo, em W/m ³ . (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4. (e) Caso 5.	50
Figura 42 – Perdas em superfície, em W/m ² , nas armaduras do transformador. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.....	51
Figura 43 – Perdas em superfície, em W/m ² , do invólucro da subestação. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.	52
Figura 44 – Demonstração de intercomunicação entre as plataformas do ANSYS. .	54
Figura 45 – Distribuição de temperatura no núcleo do transformador em condições nominais (Caso 1).....	55
Figura 46 – Distribuição de temperatura nos enrolamentos de alta tensão do transformador em condições nominais (Caso 1).....	56
Figura 47 – Distribuição de temperatura nos enrolamentos de baixa tensão do transformador em condições nominais (Caso 1).....	56
Figura 48 – Perfil de temperatura enrolamento AT, em °C. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.....	57
Figura 49 – Perfil de temperatura enrolamento BT, em °C. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.....	57
Figura 50 – Perfil de temperatura no núcleo, em °C. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de desequilíbrio de tensão pelo PRODIST Módulo 8.....	18
Tabela 2 – Valores e parâmetros estimados para o transformador a seco de 1,5 MVA.....	22
Tabela 3 – Propriedades físicas do enrolamento.....	25
Tabela 4 – Propriedades físicas do núcleo.....	25
Tabela 5 – Valores reais e simulados dos principais parâmetros eletromagnéticos do transformador a seco, em condição nominal.....	34
Tabela 6 – Pré-distorção imposta no enrolamento AT.....	34
Tabela 7 – Valores de resistências desequilibradas para o circuito externo (Caso 5).	44
Tabela 8 – Resultados eletromagnéticos gerais obtidos nas simulações em transient e eddy current.....	52
Tabela 9 – Variações dos resultados dos Casos 2 a 5 com referência aos nominais (Caso 1).....	53
Tabela 10 – Parâmetros térmicos utilizados para as simulações térmicas.....	55
Tabela 11 – Resultados térmicos obtidos no núcleo do transformador.....	59
Tabela 12 – Resultados térmicos obtidos nos enrolamentos de alta tensão do transformador.....	60
Tabela 13 – Resultados térmicos obtidos nos enrolamentos de baixa tensão do transformador.....	60
Tabela 14 – Comparativo com as temperaturas máximas obtidas no núcleo e nos enrolamentos do transformador.....	60
Tabela 15 – Comparativo de resultados com os dados de fabricantes.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampères
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CEB	Companhia Elétrica de Brasília
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Hz	Hertz
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PLC	<i>Power Line Communication</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Brasileiro
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
TRAEL	Transformadores Elétricos LTDA
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
V	Volts
W	Watts
RMS	<i>Root Mean Square</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
W	Watts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DEFINIÇÕES E CONCEITOS	15
2.1 Transformadores a seco	15
2.2 Distorções harmônicas e seus efeitos.....	16
2.3 Desequilíbrio de tensão e seus efeitos em transformadores	17
3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) E O SOFTWARE ANSYS	19
4 DEFINIÇÕES E MODELAGEM DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	22
5 RESULTADOS ELETROMAGNÉTICOS	27
5.1 Procedimentos gerais	27
5.2 Estudo de caso 1: Condição nominal.....	28
5.2.1 <i>Solver Transient</i>	28
5.2.2 <i>Solver Eddy Current</i>	32
5.3 Estudo de caso 2: Barramento distorcido	34
5.3.1 <i>Solver Transient</i>	34
5.3.2 <i>Solver Eddy Current</i>	36
5.4 Estudo de caso 3: Rede nominal e carga não-linear.....	37
5.4.1 <i>Solver Transient</i>	37
5.4.2 <i>Solver Eddy Current</i>	39
5.5 Estudo de caso 4: Barramento distorcido e carga não-linear.....	41
5.5.1 <i>Solver Transient</i>	41
5.5.2 <i>Solver Eddy Current</i>	42
5.6 Estudo de caso 5: Rede Nominal e Carga Desequilibrada	44
5.7 Resultados Eletromagnéticos Finais e Discussões.....	45
6 RESULTADOS TÉRMICOS E DISCUSSÕES	54
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tornou-se fundamental para a vida humana devido ao crescimento tecnológico tanto em grandes indústrias quanto em aglomerados comerciais. Para que seja possível suprir cada vez mais as demandas de energia elétrica no país, é necessário atender as normas técnicas estipuladas por cada concessionária de energia e, dentro dessas normas, é necessário a construção de uma Subestação de Energia Elétrica [1]. Dito isso, esse aumento crescente no consumo traz cada vez mais sistemas com mais cargas não-lineares, ocasionando em problemas como aumento na potência reativa, desequilíbrios de tensão e corrente e ressonâncias [2] e [3].

As subestações desempenham um papel muito importante no cenário da transmissão e distribuição de energia elétrica. De acordo com a norma ABNT NBR 5460 /1992, as subestações são definidas como sendo parte de um sistema de potência em um determinado local, entre as extremidades de linhas de transmissão e/ou distribuição, com os respectivos dispositivos de manobra, controle e proteção, incluindo também os transformadores.

Dentro dessa linha de raciocínio, os transformadores exercem a principal funcionalidade de uma subestação, que é reduzir ou aumentar os níveis de tensão, a depender de sua aplicação. Este equipamento é de grande importância e custo, uma vez que, recentemente, vivenciamos e vimos o grande apagão no Amapá. Este apagão ocorreu devido a uma falha de dois transformadores em uma subestação [4]. Segundo a ONS, a falha nos transformadores ocasionou uma interrupção de 242 MW, correspondente a, aproximadamente, 95% do total das cargas do Amapá. Logo, percebe-se a importância de ter uma grande confiança neste equipamento.

Ainda nesta linha de raciocínio, os fabricantes de transformadores se empenham em aperfeiçoar seus equipamentos a fim de reduzir suas perdas, uma vez que o cenário elétrico está cada vez mais preocupado com a eficiência energética de seus equipamentos. Para isso, existem várias modificações em parâmetros de projeto, como novos materiais para o núcleo ferromagnético, mudanças na forma de enrolar as bobinas, diferentes tipos de isolamento etc. Então, é essencial conhecer todos esses parâmetros e realizar análises computacionais acerca destas mudanças para uma melhor otimização destes [5].

O transformador trifásico estudado é um transformador a seco de 1,5 MVA, 13,8

kV/380 V que faz parte de um estudo de caso do projeto P&D UFU/CEB de uma subestação subterrânea, hermética, pressurizada, automatizada e isolada. Tal escolha foi definida uma vez que fica mais fácil e econômico realizar isolamento entre os enrolamentos do transformador e, também, fica vantajoso utilizar a resina, material amplamente utilizado nos transformadores a seco, pois a isolamento com resina torna o transformador menos susceptível a manutenções, aumenta resistência contra chamas e explosões e melhora a resistência do transformador contra umidade [6].

Isto posto, as simulações computacionais foram feitas usando o *software* ANSYS® 2021 R1 3D, em suas plataformas *Electronics Desktop* e *Steady-State Thermal*, onde é possível obter soluções eletromagnéticas e térmicas em uma região finita de espaço. Será abordado a metodologia da ferramenta FEM e o *software* ANSYS para a obtenção dos resultados eletromagnéticos, um levantamento de dados essenciais para a simulação do transformador e, assim sendo, será mostrado os principais resultados do transformador, como formas de ondas de tensão e corrente no primário e no secundário, curvas de perdas no núcleo e nos enrolamentos, densidade de campo magnético, em magnitude e vetorial, densidade de perdas totais no núcleo e nos enrolamentos e perfil térmico. Todos estes resultados citados serão obtidos para o transformador sob condições nominais, em situações de distorções harmônicas e, por fim, alimentado com carga desequilibrada, totalizando cinco casos. Finalmente, será feita discussões e comparações dos resultados obtidos para todas as situações.

2 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Nesta seção, será abordada conceitos básicos e essenciais para o estudo de transformadores e definições sobre distorções harmônicas, causas e consequências direta em transformadores elétricos.

2.1 TRANSFORMADORES A SECO

Os transformadores elétricos são máquinas estáticas capazes de aumentar ou reduzir níveis de tensão ou corrente em um sistema elétrico. Definimos o seu lado primário como sendo o lado com a fonte e o lado secundário, com a carga. Os transformadores a seco são aqueles que são construídos em um sistema com gás ou em componentes secos, constituídos por um núcleo de ferro silício laminado a frio e isolado com material inorgânico e com enrolamento primário e secundário [7].

Esses transformadores, quando comparado com aqueles imergidos em óleo isolante, são mais leves e não inflamáveis. Seu comportamento térmico e o desenvolvimento das tecnologias fazem destes transformadores proporcionar mais qualidade e confiabilidade nos sistemas elétricos como um todo, especialmente nos sistemas de distribuição [8]. Normalmente, o material isolante entre as bobinas costuma ser de resina e os enrolamentos costumam ser de alumínio ou cobre. A Fig. 1 ilustra as partes que constituem esse tipo de transformador.

Figura 1 – Detalhes e peças constituintes de um transformador a seco da GEAFOL.

- 1) Núcleo trifásico
- 2) Enrolamento de baixa tensão
- 3) Enrolamentos de alta tensão
- 4) Conexões de baixa tensão
- 5) Conexões de alta tensão
- 6) Taps de alta tensão
- 7) Calços elásticos
- 8) Ferragens e rodas
- 9) Isolação de resina epoxi
- 10) Barras para fechamento das bobinas



Fonte: GEAFOL (2019)

2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS E SEUS EFEITOS

As harmônicas são componentes senoidais na qual suas frequências são múltiplas da frequência fundamental. A rede brasileira possui uma frequência de 60 Hz, logo uma harmônica de 3ª ordem terá 180 Hz (3×60 Hz). É um dos aspectos que ditam a qualidade da energia elétrica.

Os harmônicos inteiros, ou simplesmente harmônicos, referem-se a distorções de frequência múltipla inteira da frequência fundamental do sistema. Vários trabalhos de pesquisa foram realizados acerca destes tipos de harmônicos. A razão para o interesse nessas componentes específicas é que a maior parte das emissões de distorções ocorrem nessas ordens e é também nessas frequências que ocorrem as maiores distorções de corrente. No caso dos Inter harmônicos, essa nomenclatura refere-se às distorções harmônicas de frequência não múltipla da frequência fundamental. Nesse caso, a ordem i dos harmônicos não é um número inteiro e, por esse motivo, essas distorções também são chamadas de harmônicos não-inteiros. A ordem i pode ser inferior a 1, o que dá a nomenclatura de sub-harmônicos [9].

Os supra harmônicos, ou harmônicos de alta frequência, são definidos como distorções harmônicas de qualquer frequência entre 2 e 150 kHz. Existem dois principais emissores desse tipo de distorção: os conversores de potência baseados em comutadores e os transmissores PLC. Os PLCs são emissores de sinais eletromagnéticos que utilizam as estruturas das redes elétricas para o transporte de dados em alta frequência e sua frequência utilizada varia de acordo com a aplicação. Por outro lado, os conversores de potência são tecnologias baseadas em dispositivos comutadores que realizam conversões na forma da potência elétrica de um sistema. Destacam-se, nesse contexto, os conversores que funcionam à base de modulação por largura de pulso (PWM), o que também faz variar a frequência de acordo com a aplicação.

Com o aumento de uso de equipamentos eletrônicos (como retificadores a diodo, conversores, UPS), o sistema elétrico vem apresentando cada vez mais potenciais de fontes harmônicas [10]. Este aumento crescente de conteúdo harmônico pode ocasionar em consequências indesejáveis, como:

- Ressonâncias séries e/ou paralelas;

- Sobrecorrente de neutro;
- Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos;
- Falhas na atuação de proteção;
- Interferências e ruídos eletromagnéticos.

Os efeitos das harmônicas no que tange o transformador trifásico a seco, verifica-se em um aquecimento extra nos enrolamentos do transformador, devido ao efeito peculiar (ou *skin*), ressonâncias séries e paralelas, redução no rendimento do transformador [11]. Outros efeitos importantes é o aparecimento de um fluxo adicional no circuito magnético, conduzindo-o à uma operação de saturação. Isto pode ser observado na Eq. 1, uma vez que as harmônicas aumentam o nível de corrente no sistema. [12]

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

Onde,

e – Força eletromotriz induzida (V)

N – Número de espiras da bobina

φ – Fluxo magnético (Wb)

2.3 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E SEUS EFEITOS EM TRANSFORMADORES

O desequilíbrio de tensão é definido como o fenômeno caracterizado por quaisquer diferenças no módulo da tensão elétrica e/ou na defasagem elétrica de 120°. De acordo com a norma do Módulo 8 – PRODIST, a expressão que calcula o nível de desequilíbrio é mostrada na Eq. 2. Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão, obtidos pela medição e junto com a Eq. 2, estão mostrados na Tabela 1.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (2)$$

Onde,

$FD\%$ – Fator de desequilíbrio de tensão (%)

V_- – Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa (V)

V_+ – Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva (V)

Tabela 1 – Limites de desequilíbrio de tensão pelo PRODIST Módulo 8.

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Quando máquinas elétricas, como transformadores e motores elétricos, são submetidos a este fenômeno, ocorrem problemas severos como aumento da temperatura, alteração do comportamento de fluxo magnético no núcleo e na densidade de perdas, ocasionado na redução da vida útil do equipamento [13]. Nota-se também que existe uma limitação de regularização de dados térmicos para outras partes do transformador, como temperaturas na armadura, no tanque e em outras partes metálicas. Esses problemas existem em normas como IEC e IEEE, no entanto, são regularizados de forma estimada de acordo com o *hot-spot* do transformador em questão, usando uma série de equações com parâmetros empíricos, podendo existir uma divergência entre a realidade. Consequentemente, as análises térmicas ficam comprometidas a apenas em condições normais, especialmente para transformadores a óleo, uma vez que o grau de complexidade térmico é maior [14].

3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) E O SOFTWARE ANSYS

O MEF é uma ferramenta que resolve problemas físicos e de engenharia com métodos numéricos, sendo útil em geometrias complexas onde uma solução analítica não pode ser obtida tão facilmente. Diante disso, o *software* ANSYS® 2021 3D foi adotado nesta pesquisa para realizar análises multifísicas do transformador trifásico. Este *software* resolve problemas de campos eletromagnéticos através da solução das equações de Maxwell em uma região finita do espaço, sendo mostradas nas Eqs. 3 a 6:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (6)$$

Onde,

\mathbf{H} – Vetor da intensidade de campo magnético (A/m)

\mathbf{B} – Vetor da densidade de campo magnético (T)

\mathbf{E} – Vetor do campo elétrico (N/C)

\mathbf{D} – Vetor da densidade de fluxo elétrico (C/m²)

ρ é a densidade de carga total (C/m³).

Diante disso, o *software* ANSYS realizará combinações e substituições das Eqs. 3 a 6 para obter outras equações que proverão soluções aproximadas para o problema eletromagnético, mostradas nas Eqs. 7 e 8, onde a Eq. 7 é resolvida para problemas em 3D e a Eq. 8 em 2D.

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \varphi + \nabla \times \mathbf{H}_c + \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \quad (8)$$

Onde,

σ – Condutividade elétrica (S/m)

μ – Permeabilidade magnética (H/m)

A – Vetor da superfície da área (m)

D – Vetor da densidade de fluxo elétrico (C/m²)

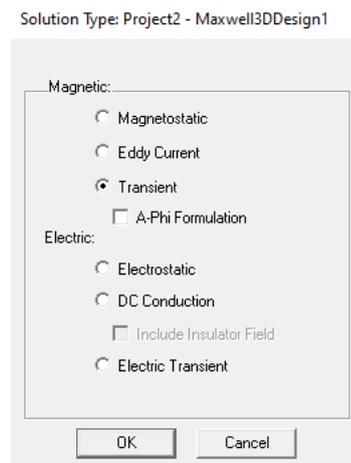
J_s – Vetor da densidade de corrente superficial (A/m²)

φ – Fluxo magnético superficial (Wb)

v – Vetor velocidade com o que as correntes são induzidas em corpos (m/s).

No ANSYS, é necessário escolher qual o melhor *solver* para uma determinada aplicação. Para essa pesquisa, adotou-se o *solver transient* para análises baseadas no domínio do tempo e o *solver eddy current* para análises em regime permanente. Após esta escolha, as equações que o ANSYS *Electronics Desktop* irá utilizar são as 7 e 8. Vale ressaltar que, existem outros tipos de simulações para determinar outras variáveis eletromagnéticas (Fig. 2) e, no entanto, para cada um dos tipos, existem outras combinações das Eqs. 3 a 6 para melhor obter os resultados desejados.

Figura 2 – Tipos de simulação para o ANSYS Electronics.



Fonte: (Autor)

Para todos os tipos de análises e modelagens realizadas no ANSYS, é necessário realizar os seguintes procedimentos:

- I. Definição de objetivos
- II. Identificação do domínio
- III. Criação da geometria
- IV. Geração das malhas
- V. Configuração física
- VI. Obtenção da solução
- VII. Pós-processamento

As etapas I a III (pré-processamento) são as mais cautelosas uma vez que é necessário criar a geometria, definir as propriedades físicas e determinar o domínio de solução. Para este trabalho, foi utilizado o domínio do tempo *transient* e a modelagem da geometria se encontra em 3D. As etapas IV a VI (processamento) são etapas nas quais é essencial definir a qualidade e quantidade de elementos nas malhas, excitações de tensão/corrente do transformador e bem como o intervalo de tempo para solução do problema. Por fim, na última etapa VII, é possível então obter resultados eletromagnéticos em forma de gráficos e resultados visuais de distribuição em 3D e exportar seus dados para obter os resultados térmicos, uma vez que todos os parâmetros estão validados. Nos próximos capítulos, serão abordados todos esses procedimentos para a obtenção dos resultados eletromagnéticos e térmicos.

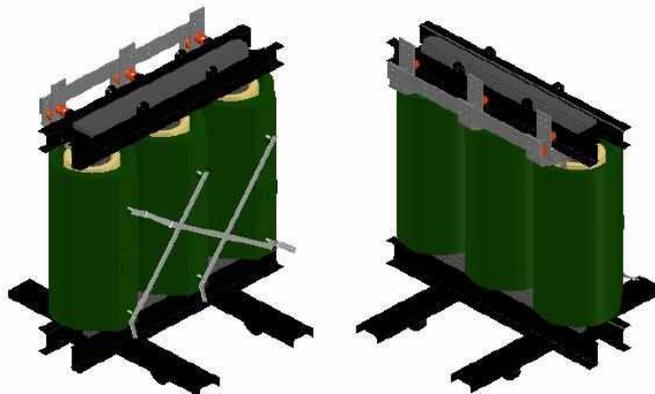
4 DEFINIÇÕES E MODELAGEM DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Inicialmente, é necessário definir as características elétricas e construtivas do transformador. Os dados de fabricante para parte elétrica estão mostrados conforme a Tabela 2. O transformador em questão é da marca TRAEL. Assim sendo, utiliza-se a Fig. 3 como um desenho orientativo do transformador a seco para o começo da modelagem.

Tabela 2 – Valores e parâmetros estimados para o transformador a seco de 1,5 MVA.

Parâmetros	Potência Nominal (MVA)	1,5	
	Frequência (Hz)	60	
	Tensão no lado de alta (kV)	13,8	
	Tensão no lado de baixa (kV)	0,38	
	Grupo de ligações	Dyn1 (30°)	
Núcleo	Material	Aço Silício M4	
	Densidade de Fluxo (T)	1,7	
	Material	Alumínio	
	Espessura da laminação (mm)	0,27	
	Perdas no núcleo Garantido a 120°C (W)	4000	
Enrolamento	Material	Alumínio	
		AT	BT
	Tipo dos enrolamentos	Panq. Lâmina	Lâmina
	Número de espiras	755 esp. (folhas de alumínio)	10 esp. (folhas de alumínio)
	Perdas nos enrolamentos Garantido a 120°C (W)	14000	

Figura 3 – Desenho orientativo do transformador a seco

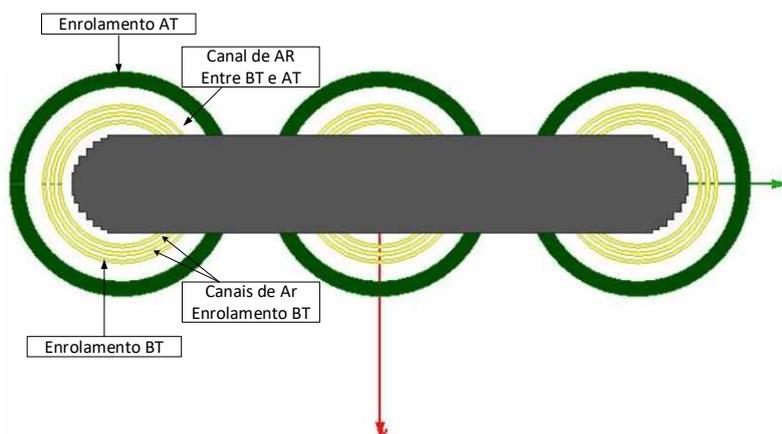


Fonte: (Autor)

A partir dos dados construtivos fornecidos pelo fabricante, a geometria dos principais elementos do transformador como núcleo e enrolamentos, foram desenhadas na ferramenta ANSYS. Vale ressaltar que os enrolamentos foram representados da seguinte forma:

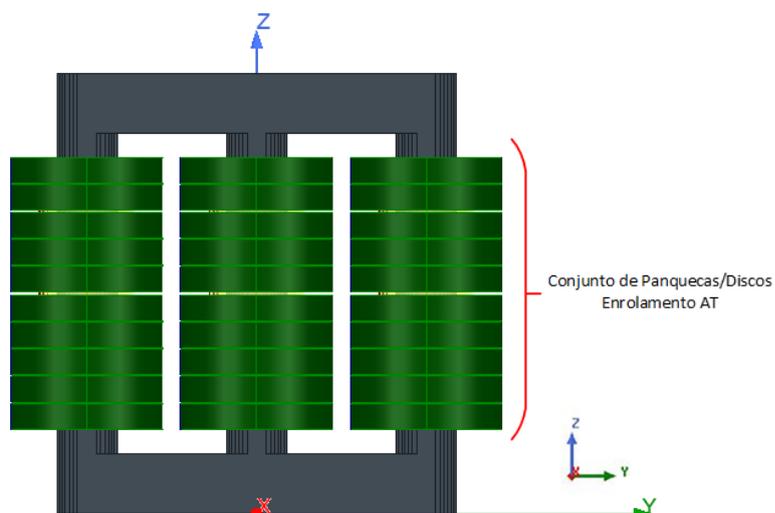
- O enrolamento BT, bobina interna, foi modelado por três camadas, formando dois canais de ar, conforme apresenta a Fig. 4. No conjunto de camadas tem-se um total de 12 espiras. Ou seja, o enrolamento BT não foi desenhado espira por espira.
- O enrolamento AT, bobina externa, foi modelado pelo seu conjunto de 5 camadas com 75 panquecas/discos e mais 5 camadas com 76 panquecas/disco, conforme pode ser visualizado na Fig. 5. No conjunto de panquecas/discos tem-se um total de 755 espiras para o tape de 13,8 kV.

Figura 4 – Vista da geometria implementada no ANSYS destacando o enrolamento AT, o enrolamento BT com suas camadas, e os respectivos canais de ar.



Fonte: (Autor)

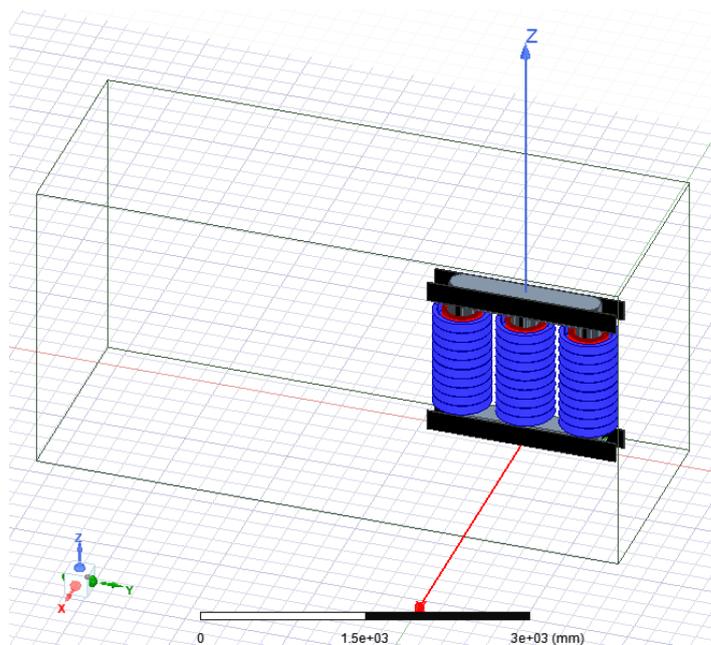
Figura 5 – Vista da geometria implementada no ANSYS destacando o conjunto de panquecas/discos do enrolamento AT.



Fonte: (Autor)

Além disso, é necessário inserir as armaduras do transformador e uma região que envolve o transformador e esta é das mesmas dimensões de um invólucro da subestação subterrânea, conforme o projeto P&D CEB/UFU. O resultado obtido está indicado na Fig. 6.

Figura 6 – Resultado obtido da geometria do problema.



Fonte: (Autor)

Feito isso, o próximo passo é parametrizar as propriedades físicas dos materiais do transformador, quais sejam: Enrolamentos, núcleo e isolamento. A Tabela 3 destaca as características físicas dos enrolamentos, cujo material é o alumínio.

Tabela 3 – Propriedades físicas do enrolamento.

Parâmetro	Valor
Condutividade [S/m] Alumínio	$35,30 \times 10^6$
Condutividade [S/m] considerada	14×10^6
Permeabilidade relativa	1,0
Condutividade térmica [W/m.K]	205
Calor específico [J/Kg.K]	880

Já para a isolamento do transformador, foi feita uma região em formato de paralelepípedo com a atribuição do material Ar já pré-definido no ANSYS. Para o núcleo de aço silício, as principais características são apresentadas pela Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físicas do núcleo.

Parâmetro	Valor
Condutividade [S/m]	2×10^6
Espessura da laminação [mm]	0,27
Densidade volumétrica [Kg//m ³]	7500
Condutividade térmica [W/m.K]	45
Calor específico [J/Kg.K]	400

Além de inserir os dados da Tabela 2, é necessário definir duas importantes curvas para o núcleo:

1. Curva BxH (Densidade de campo magnético *versus* Intensidade de campo magnético).
2. Curva BxP (Densidade de campo magnético *versus* Perdas no Núcleo ou loop de histerese). Esta é a curva que irá ditar o comportamento das perdas no núcleo do transformador que, por predefinição do ANSYS, varia com a densidade de perdas no núcleo p_v e a frequência da rede, que é 60 Hz. Ela é obtida por (9) [15].

$$p_v = k_h f (B_m^2) + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1,5} \quad (9)$$

Onde,

B_m – amplitude da componente de fluxo CA (T)

f – frequência da rede (Hz)

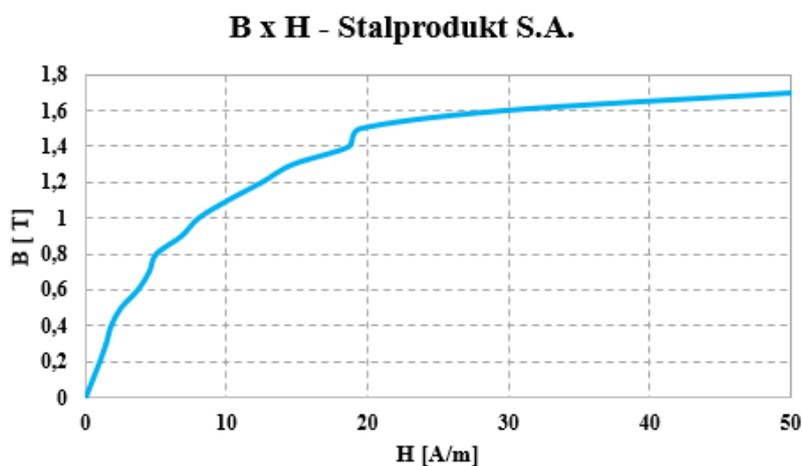
K_h – coeficiente de perda por histerese (W/m³)

K_c – coeficiente de perda por correntes parasitas (W/m³)

K_e – coeficiente de perdas adicionais em (W/m³).

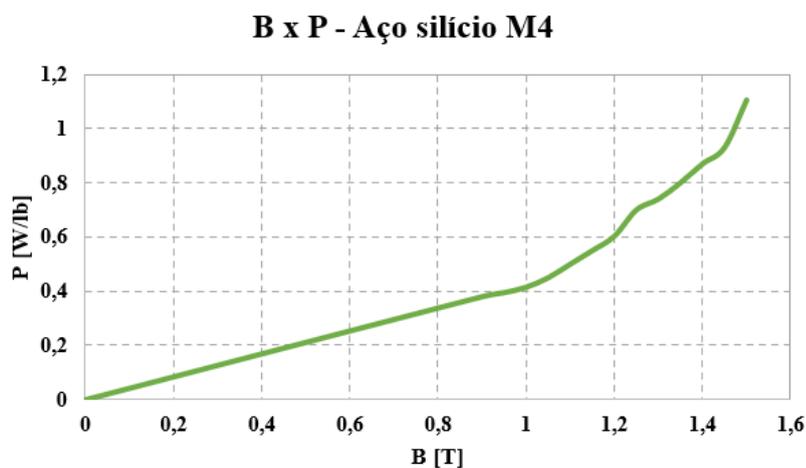
Os coeficientes K em (9) também são conhecidos como coeficientes de Steinmetz. Após inserido os valores da tabela II e as curvas necessárias, o ANSYS é capaz de obter estes coeficientes e assim, obter as perdas no núcleo. Uma vez que não foi possível obter as curvas através do fabricante, foram utilizadas aproximações de curvas de referência. A curva BxH foi obtida de [16], fornecida pela fabricante Stalprodukt S.A, e a curva BxP foi obtida de [17]. As Fig. 7 e Fig. 8 ilustram as curvas supracitadas.

Figura 7 – Curva B versus H aproximada.



Fonte: (Autor)

Figura 8 – Curva B versus P aproximada.



Fonte: (Autor)

5 RESULTADOS ELETROMAGNÉTICOS

Neste capítulo, serão abordados os resultados eletromagnéticos obtidos nos *solvers transient* e *eddy current*, como densidade de perdas, densidade de campo magnético, perdas nos enrolamentos e no núcleo com barramento nominal, pré-distorcido e com carga não-linear. Vale ressaltar que todas as malhas para os casos a seguir são exatamente as mesmas para a condição nominal, que é a referência para a análise de dados.

5.1 PROCEDIMENTOS GERAIS

Depois de definido os materiais utilizados e ter a geometria modelada, é necessário definir qual será o tipo de simulador. Após isso, é necessário inserir as condições de excitação do transformador. Para o *solver transient*, é preciso inserir equações de tensão ou corrente e/ou inserir circuitos externos para a atribuição dos enrolamentos.

Uma vez definido as excitações, o modo *transient* requer a inserção manual de uma malha, atribuída com número ou comprimento de elementos. Por fim, define-se uma constante de tempo que será o passo de integração usado na simulação. Para todas as soluções *transient*, foi utilizado um passo de integração de 0,2 ms, iniciando em 0 até 120 ms.

Agora, para o modo *eddy current*, define-se a frequência em regime permanente e os valores máximos de tensão ou de corrente nos enrolamentos. Após isso, define-se, novamente, comprimentos iniciais das malhas (que serão os mesmos do modo *transient*) e cria-se as condições de contornos necessárias para a obtenção de perdas em superfícies, que, neste presente trabalho, escolhe-se obter perdas em superfícies das armaduras e no invólucro da subestação. O erro percentual dos resultados foi adotado como 1% para os casos 1 a 3 e 0,65% para os casos 4 e 5. Vale ressaltar que as geometrias, as malhas e as condições de contorno são igualmente definidas para todos os casos.

5.2 ESTUDO DE CASO 1: CONDIÇÃO NOMINAL

5.2.1 Solver Transient

Inicialmente, utiliza-se no lado de alta tensão uma excitação com equações de tensão mostradas no conjunto de Eqs. 10. Já no circuito de baixa tensão, usa-se um circuito externo fornecido pela ferramenta *Maxwell Circuit Editor*, onde o circuito estará conectado em estrela com uma carga resistiva de tal forma que circule a corrente nominal no lado BT. O circuito encontra-se indicado na Fig. 9.

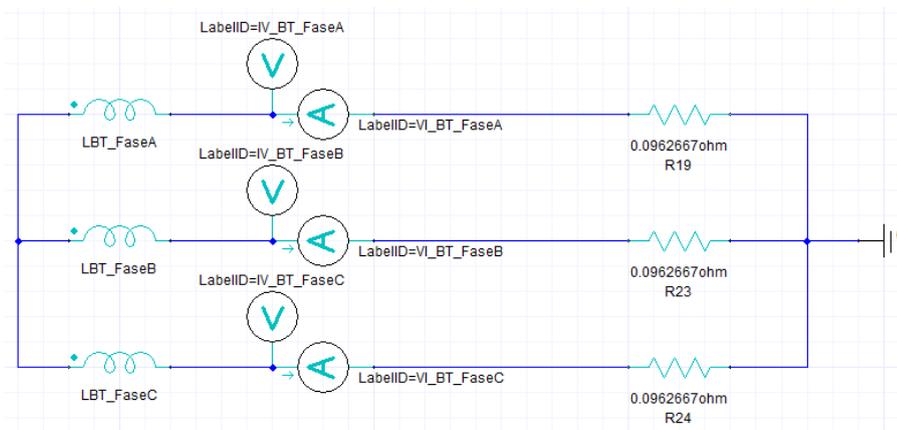
$$\begin{cases} v_a(t) = V_{pi\ co}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos(2\pi \cdot 60) \\ v_b(t) = V_{pi\ co}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos(2\pi \cdot 60 + 120^\circ) \\ v_c(t) = V_{pi\ co}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos(2\pi \cdot 60 - 120^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

Onde,

v – Tensão instantânea em cada bobina (V)

$V_{pi\ co}$ – Valor de pico de tensão em cada bobina (V).

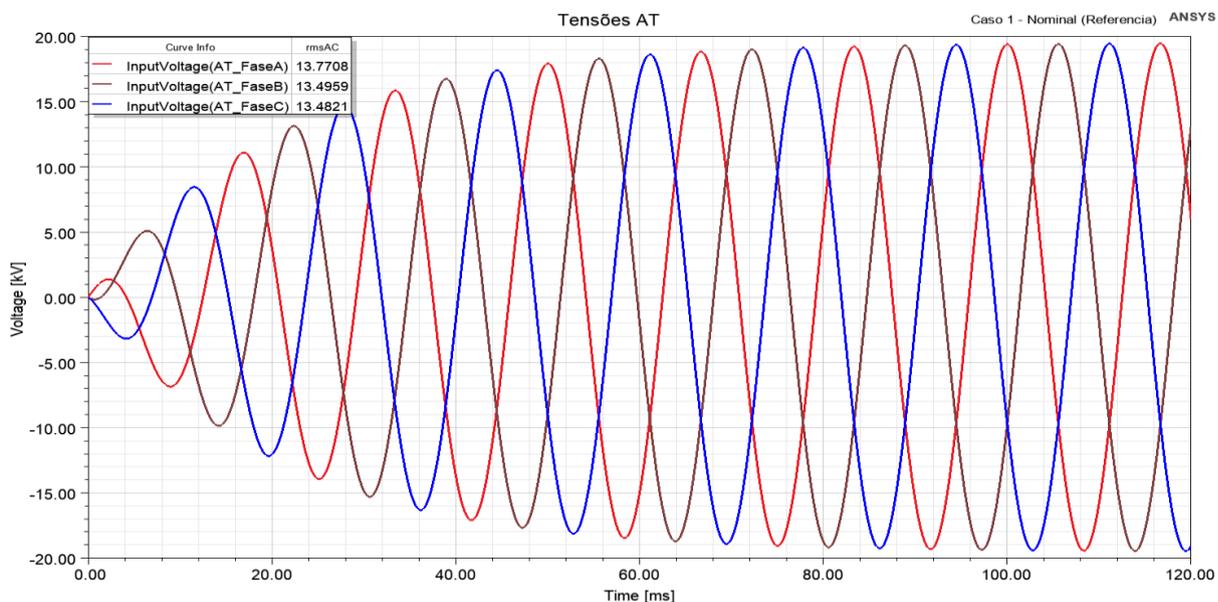
Figura 9 – Circuito externo de excitação para o lado de baixa tensão do transformador a seco.



Fonte: (Autor)

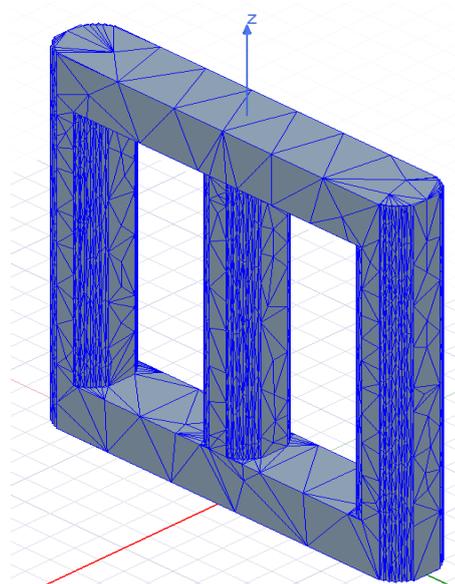
Vale ressaltar que nas Eqs. 10 possuem uma exponencial que adicionará um efeito de subamortecimento nas formas de ondas das tensões de fase, indicado na Fig. 10, que irá ocasionar em uma simulação mais rápida. As malhas do núcleo e das bobinas foram definidas com um comprimento de 350 mm e 200 mm, respectivamente. Na Fig. 11, encontra-se a distribuição de malhas ao longo da geometria do transformador.

Figura 10 – Forma de onda das tensões no lado de alta tensão.



Fonte: (Autor)

Figura 11 – Distribuição das malhas no núcleo.

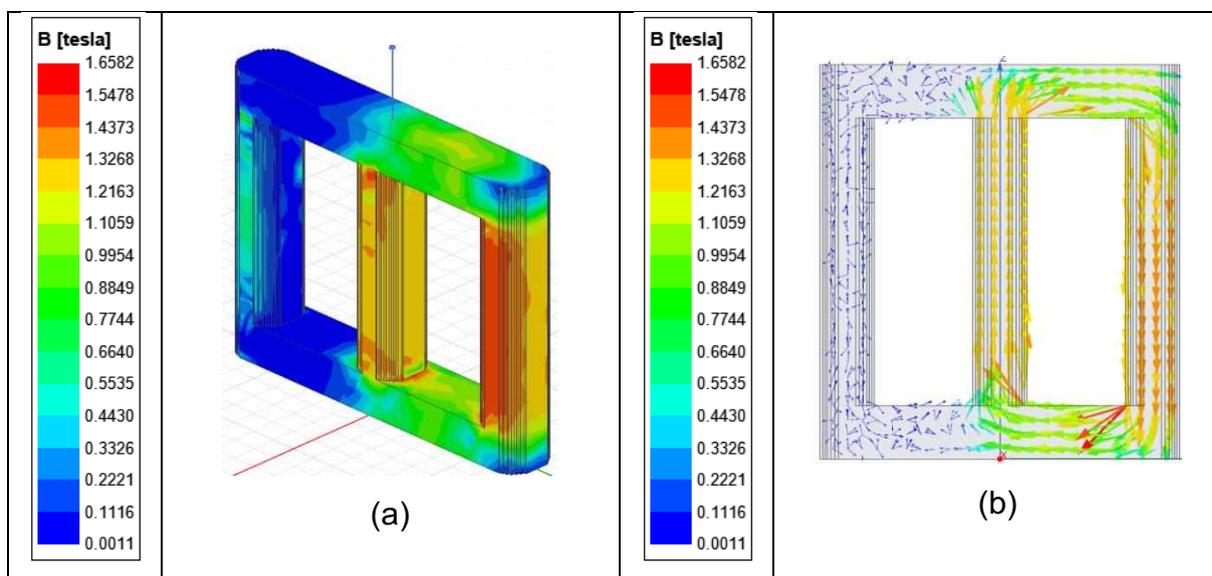


Fonte: (Autor)

Uma vez realizado as duas condições de contorno, a quantidade de malhas e bem como o percentual de erro nas respostas das simulações, o ANSYS permite realizar análise tridimensional e bidimensional de campos. Para a análise de campo de densidade de fluxo magnético, a Fig. 12 mostra a densidade de fluxo magnético no núcleo e as Figs. 13 e 14 mostram como seria a distribuição de perdas no núcleo e

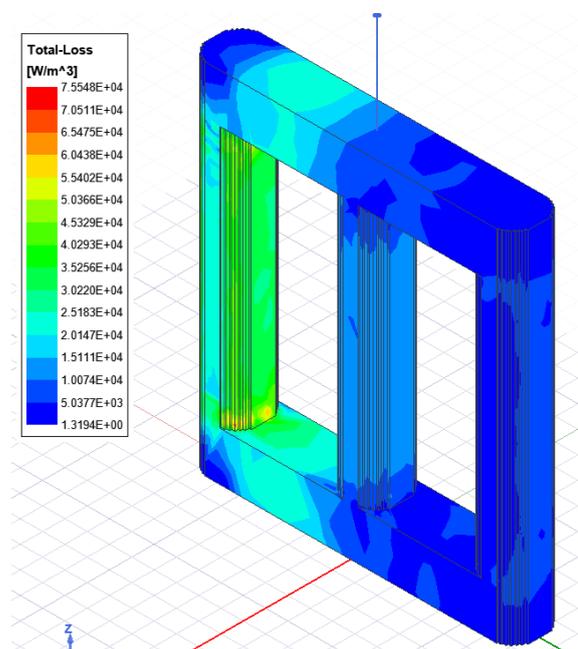
nos enrolamentos (em W/kg) assim como os seus valores máximos para um tempo de 100 ms e, por fim, as Figs. 15 e 16 ilustram a forma de onda das perdas eletromagnéticas do núcleo do transformador e nos enrolamentos, respectivamente. É importante salientar que o formato de onda das perdas no núcleo do transformador do caso nominal (Fig.15) é idêntica com os próximos casos abordados, porém, isto não foi observado ao olhar o formato da curva de perdas no enrolamento do transformador (Fig.16).

Figura 12 – Distribuição da densidade de fluxo magnético B (em Teslas), em condições nominais. (a) Análise da magnitude. (b) Análise vetorial.



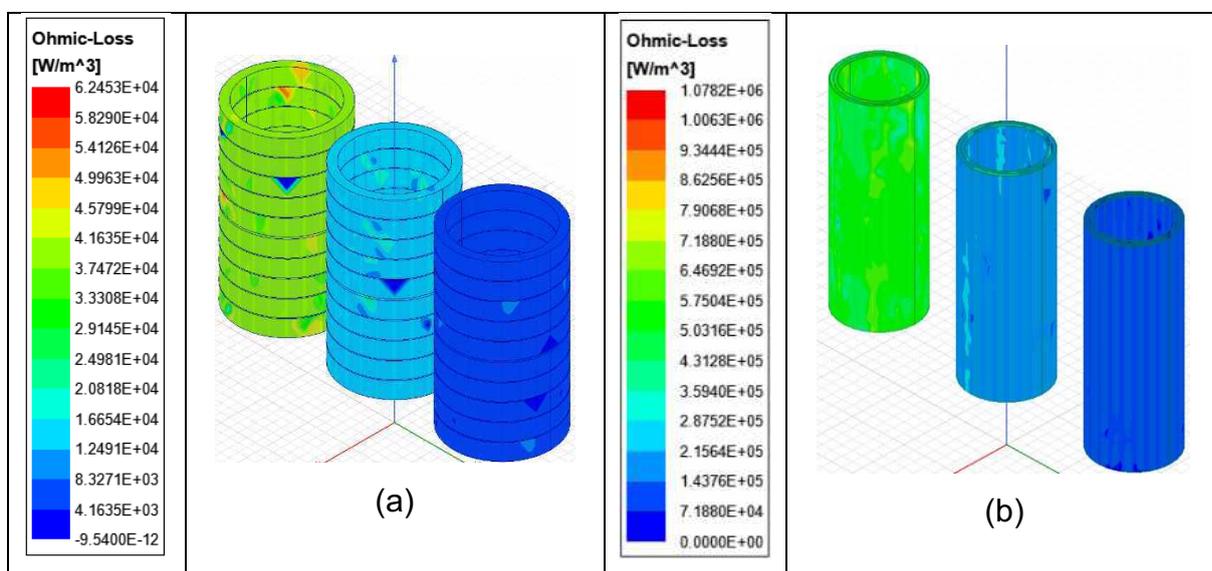
Fonte: (Autor)

Figura 13 - Distribuição da densidade de perdas totais no núcleo (em W/kg), em condições nominais.



Fonte: (Autor)

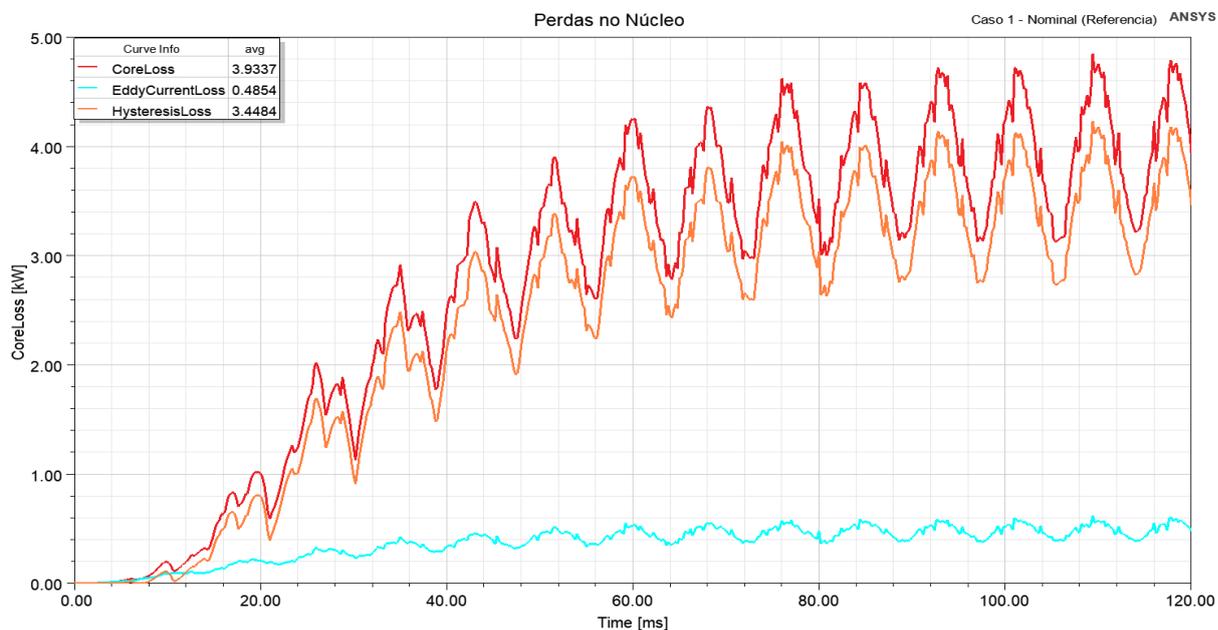
Figura 14 – Distribuição de perdas nos enrolamentos, em condições nominais. (a) nos enrolamentos de AT. (b) nos enrolamentos de BT.



Fonte: (Autor)

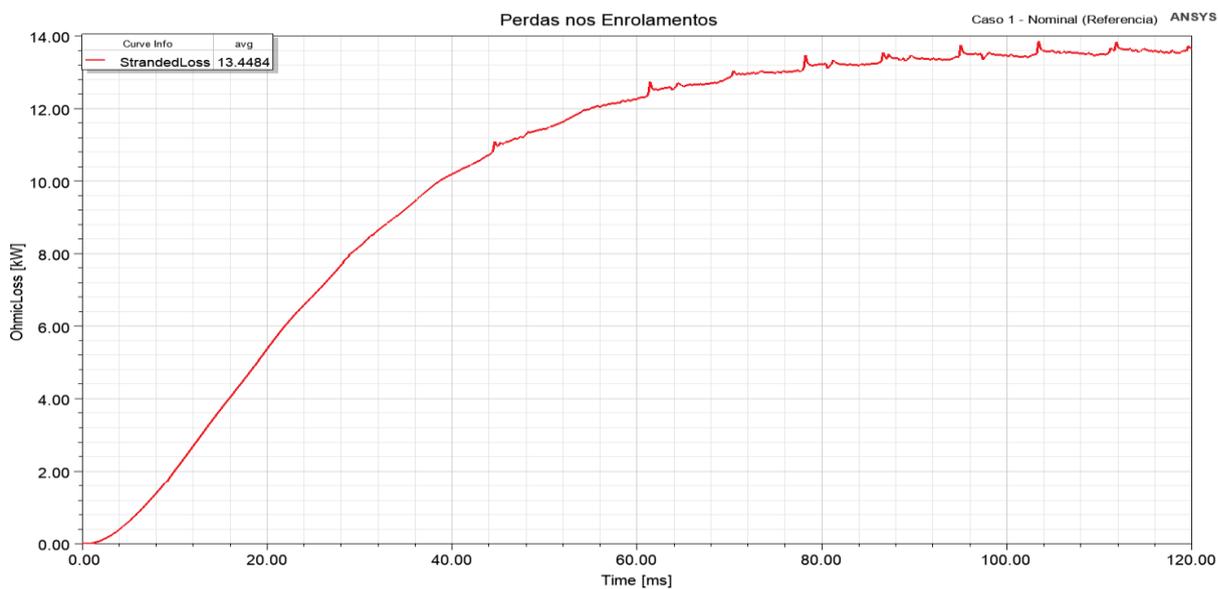
Figura 15 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 1.

Em azul, encontra-se as perdas por correntes parasitas, em laranja as perdas por histerese magnética e, em vermelho, as perdas totais no núcleo.



Fonte: (Autor)

Figura 16 – Forma de onda das perdas totais nos enrolamentos do transformador, para o caso 1.

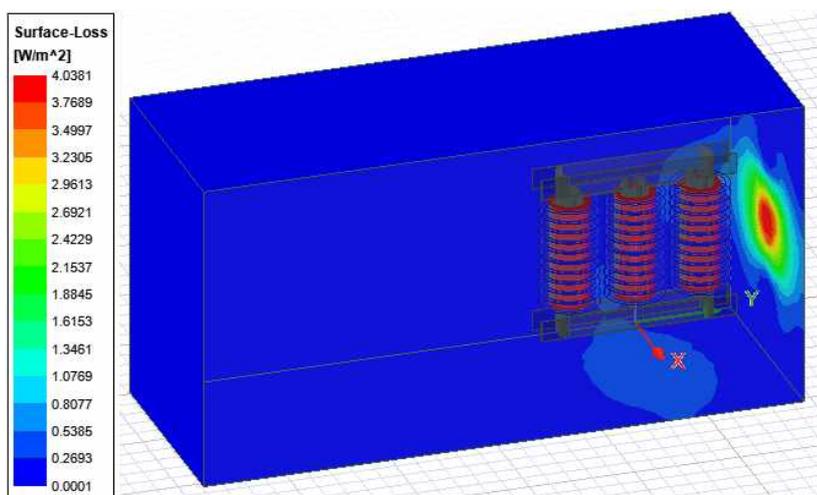


Fonte: (Autor)

5.2.2 Solver Eddy Current

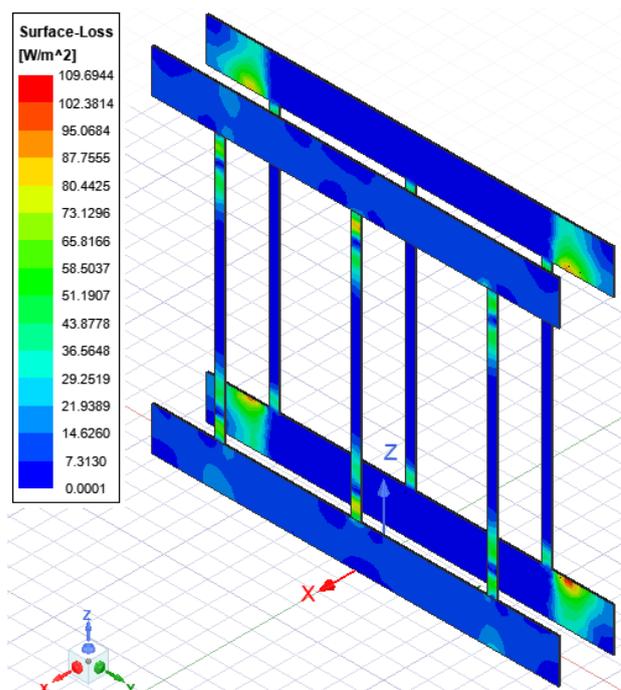
Neste caso, foi escolhido utilizar a corrente máxima nominal no enrolamento AT. Após isso, define-se, novamente, os mesmos comprimentos das malhas e cria-se as condições de contornos para as armaduras e o invólucro da subestação. Após isso, os resultados acerca das perdas nos enrolamentos, perdas nas armaduras e no invólucro e perfil de convergência das simulações são indicadas nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , no invólucro da subestação.



Fonte: (Autor)

Figura 18 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , nas armaduras do transformador.



Fonte: (Autor)

De acordo com os resultados obtidos pela simulação obtidas nos demais *solvers*, pode-se ser feita uma comparação entre alguns dados reais do transformador com os dados computacionais adquiridos, mostrado na Tabela 5. Como os valores ficaram próximos, o modelo utilizado poderá ser aplicado para os demais casos, que serão apresentados a seguir.

Tabela 5 – Valores reais e simulados dos principais parâmetros eletromagnéticos do transformador a seco, em condição nominal.

Parâmetros	Valor Real	Valor Computacional	Erro (%)
Perdas a Vazio (P_0)	4000 W	3933,7 W	1,66 %
Perdas nos Enrolamentos (P_{enr})	14000 W	13448,4 W	3,94 %
Densidade Magnética no Núcleo – Coluna (B)	1,69 T	1,6582 T	1,92 %

5.3 ESTUDO DE CASO 2: BARRAMENTO DISTORCIDO

5.3.1 *Solver Transient*

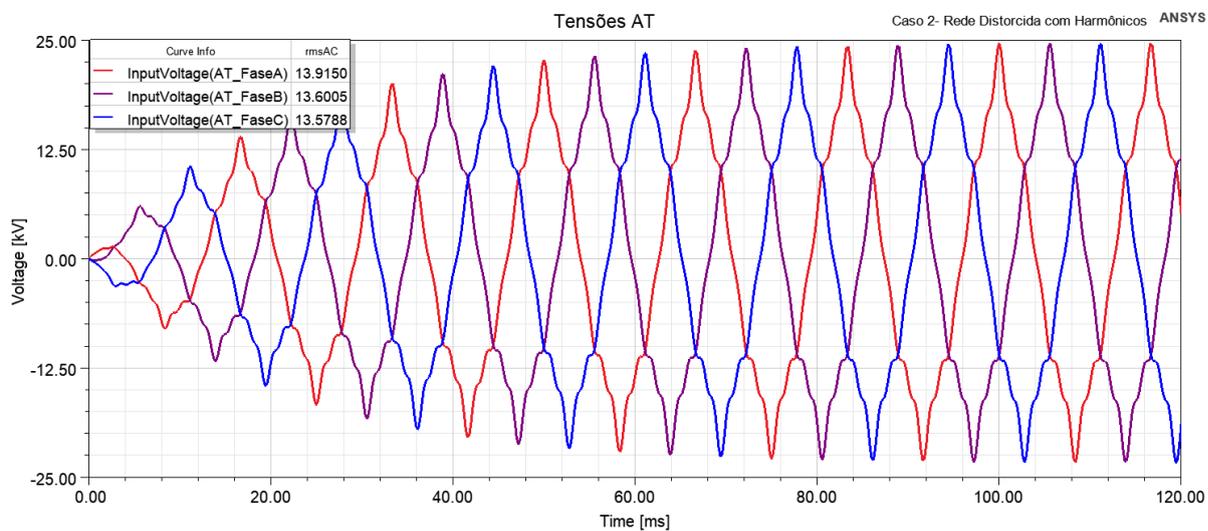
Neste caso, a entrada da excitação no lado AT foi por meio de uma equação de tensão com harmônicos de 2º até 13º harmônico. Os níveis de harmônicos de tensão foram inseridos de acordo com a Tabela 6. As excitações para o lado de BT são as mesmas para o caso 1. Os resultados para baseados essas simulações são mostradas nas Figs 19 a 21. Observa-se um comportamento cíclico e o aumento do valor máximo na forma de onda das perdas nos enrolamentos (Fig. 23), chegando acima de 17,5 kW.

Tabela 6 – Pré-distorção imposta no enrolamento AT.

Componente Harmônica	Valor (%)
2	3,5
3	4,5
5	7,0
7	5,0
11	4,5

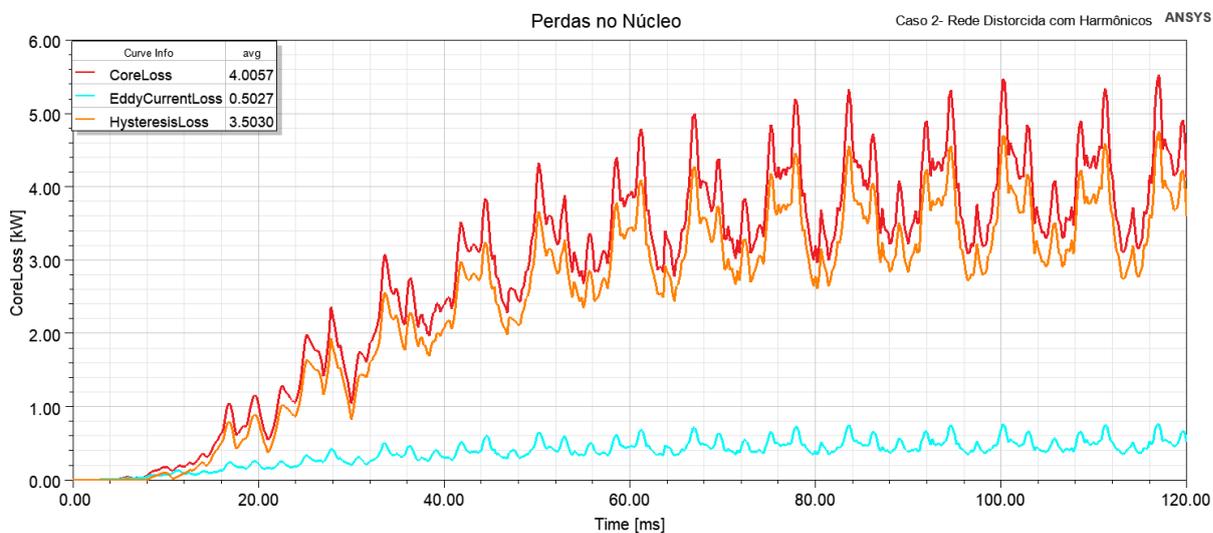
13	2,5
DTT	11,5

Figura 19 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 2.



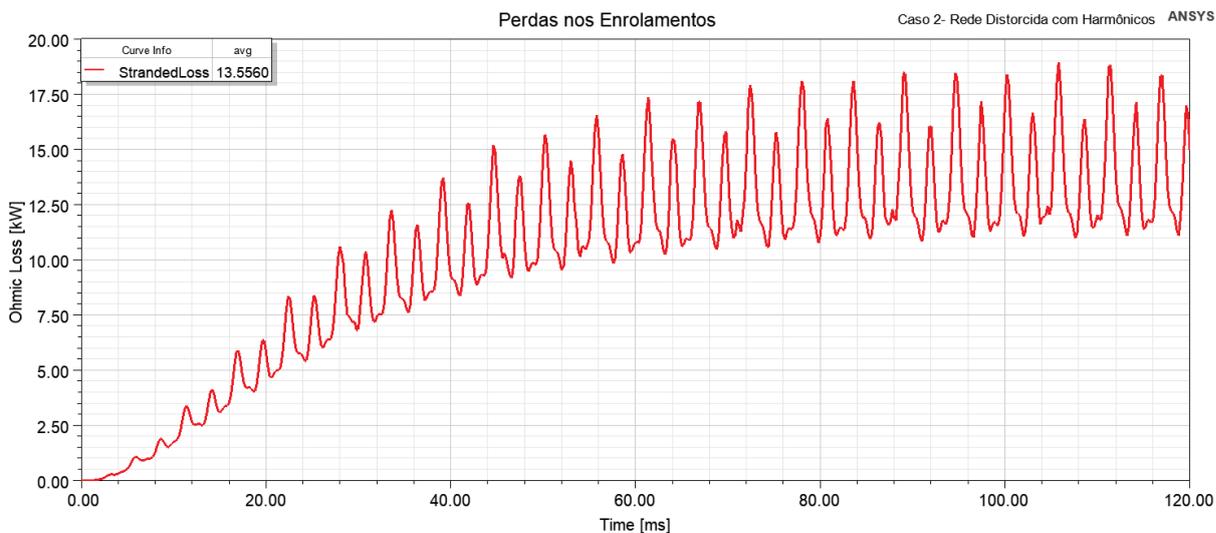
Fonte: (Autor)

Figura 20 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 2.



Fonte: (Autor)

Figura 21 – Forma de onda das perdas totais nos enrolamentos do transformador, para o caso 2.

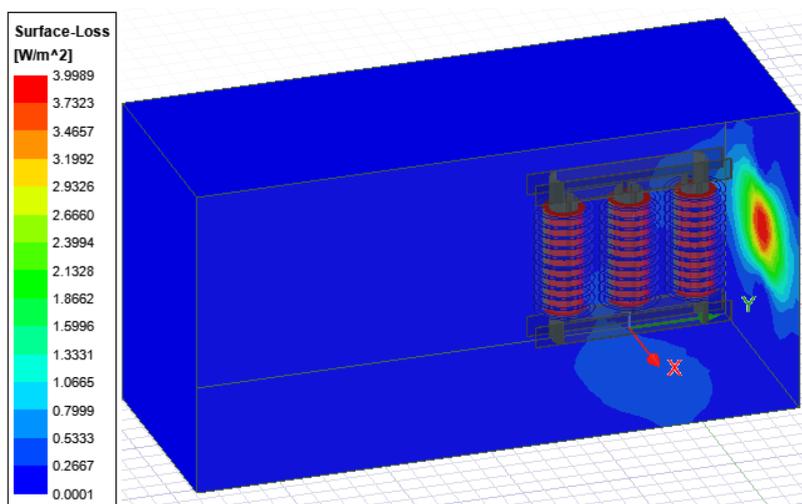


Fonte: (Autor)

5.3.2 Solver Eddy Current

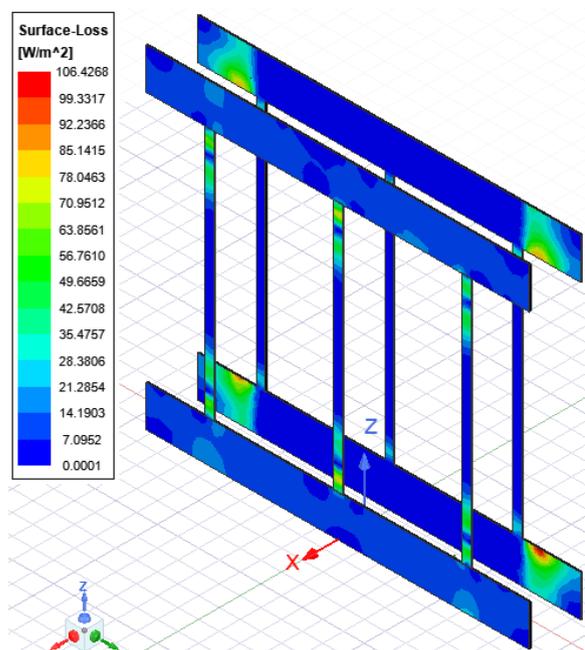
Como a rede é distorcida, foi usado a tensão de pico com relação aos valores de tensão obtidas na simulação *transient*, enquanto no lado BT, foi mantido o circuito externo. Após isso, foi possível obter os resultados das Figs. 22 e 23.

Figura 22 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , no invólucro da subestação, para o caso 2.



Fonte: (Autor)

Figura 23 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , na armadura do transformador, para o caso 2.



Fonte: (Autor)

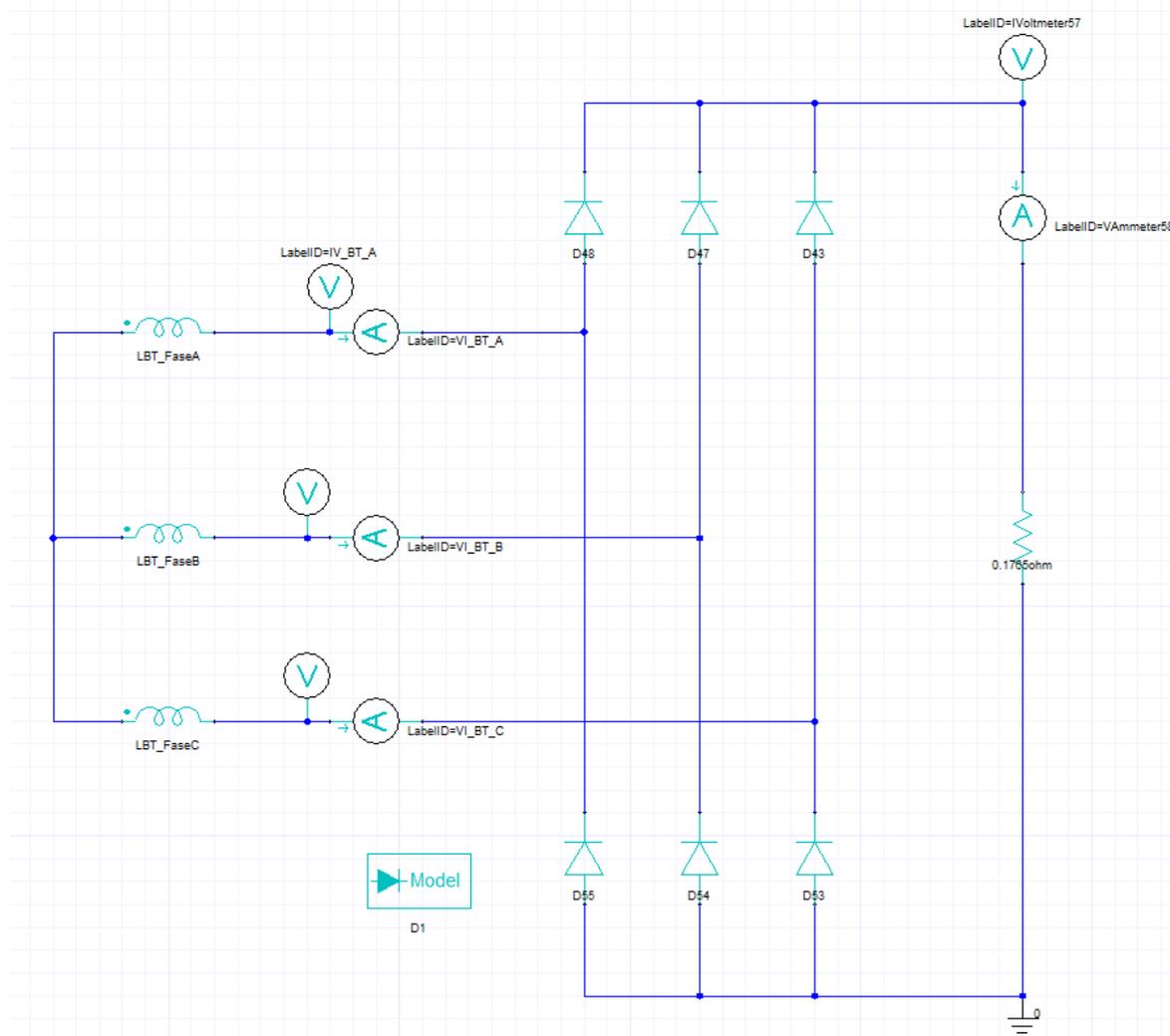
5.4 ESTUDO DE CASO 3: REDE NOMINAL E CARGA NÃO-LINEAR

Neste capítulo, será apresentado como foi modelado a carga não linear no ANSYS utilizando a plataforma *Maxwell Circuit Editor* que, diferentemente dos casos 1 e 2, é inserido um circuito retificador de seis pulsos.

5.4.1 *Solver Transient*

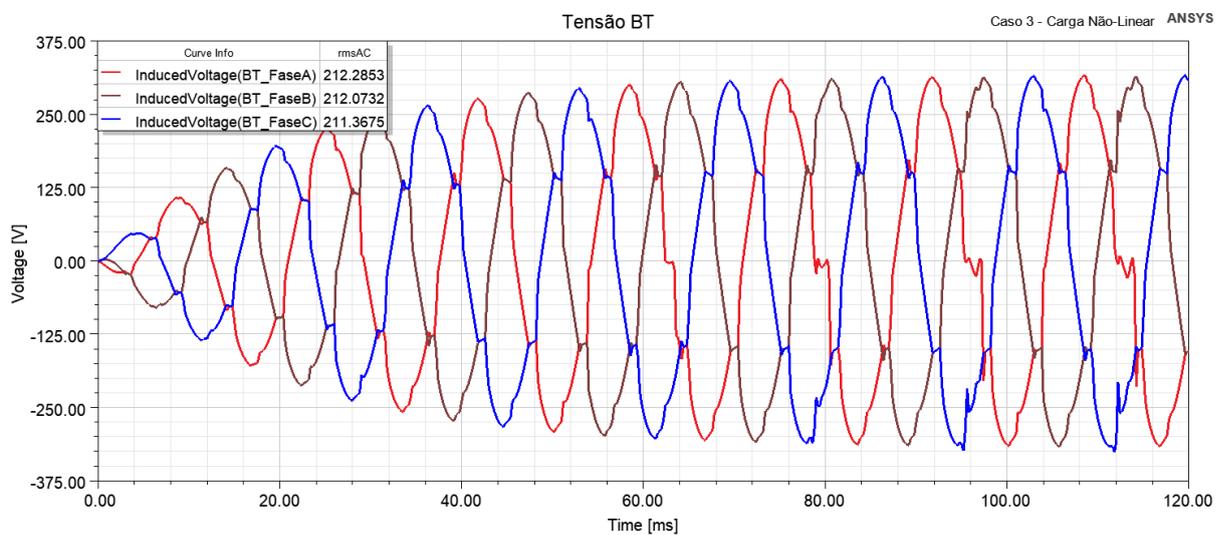
Para este caso, no lado de alta tensão, foi utilizada as condições nominais impostas no caso 1, porém, na carga foi utilizado a inserção de um retificador trifásico de seis pulsos com uma resistência elétrica, de modo a se obter os mesmos comportamentos do transformador nos outros casos anteriores. A Fig. 24 ilustra o circuito inserido na plataforma *Maxwell Circuit Editor*, onde o valor da carga resistiva foi inserido de tal forma que o transformador opere com potência nominal. As Figs. 25 e 27 representam os resultados obtidos neste caso. Novamente, nota-se a mesma diferença no formato de onda das perdas nos enrolamentos do transformador (Fig. 28) e, desta vez, as perdas obtiveram o mesmo comportamento cíclico, porém com valores mínimos ao invés de valores máximos, como no caso 2.

Figura 24 – Circuito externo implementado com fontes de correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem.



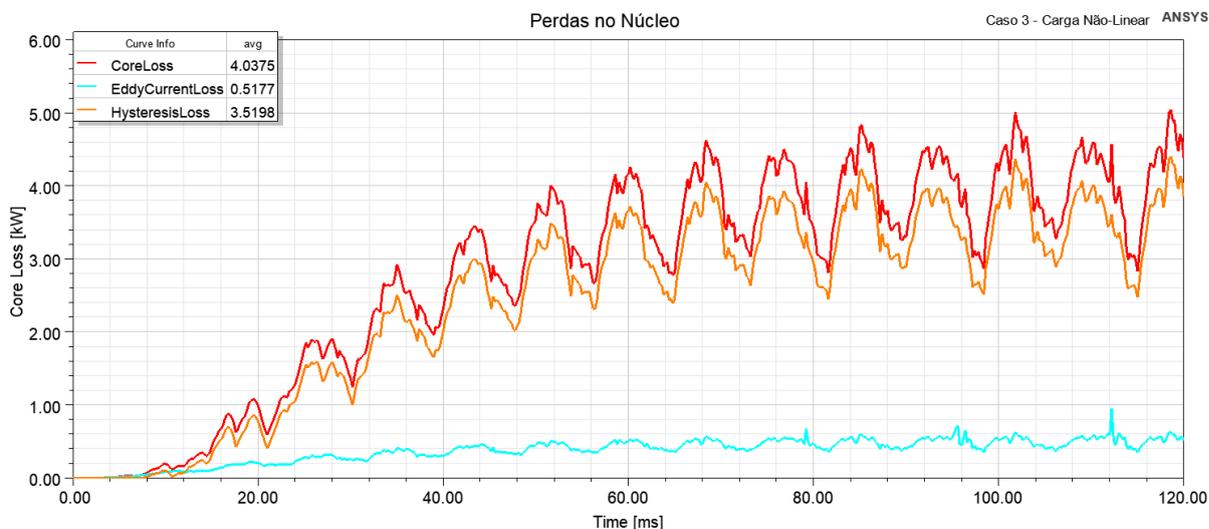
Fonte: (Autor)

Figura 25 – Forma de onda das nas tensões no secundário do transformador, para o caso 3.



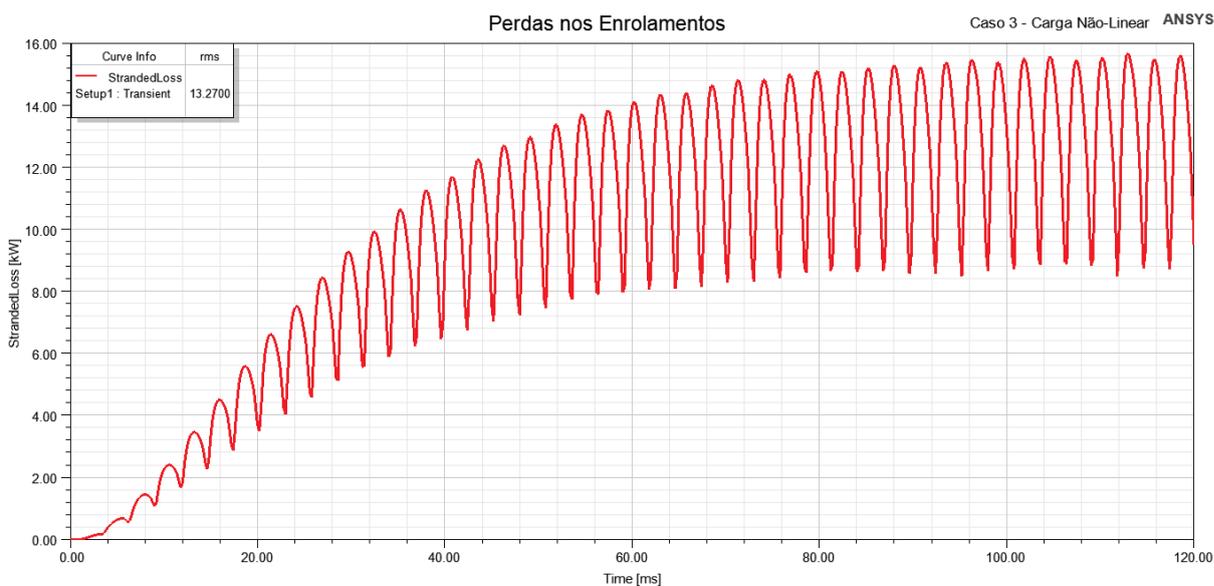
Fonte: (Autor)

Figura 26 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 3.



Fonte: (Autor)

Figura 27 – Forma de onda das perdas totais nos enrolamentos do transformador, para o caso 3.



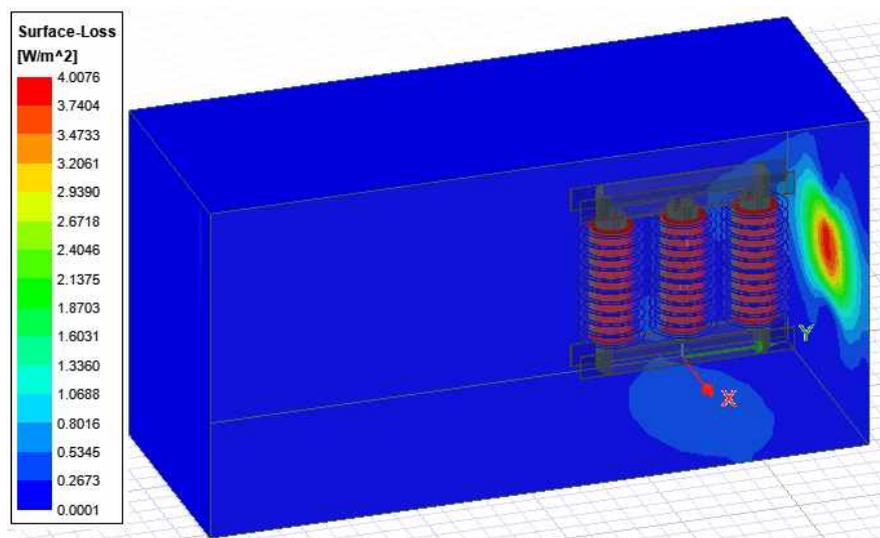
Fonte: (Autor)

5.4.2 Solver Eddy Current

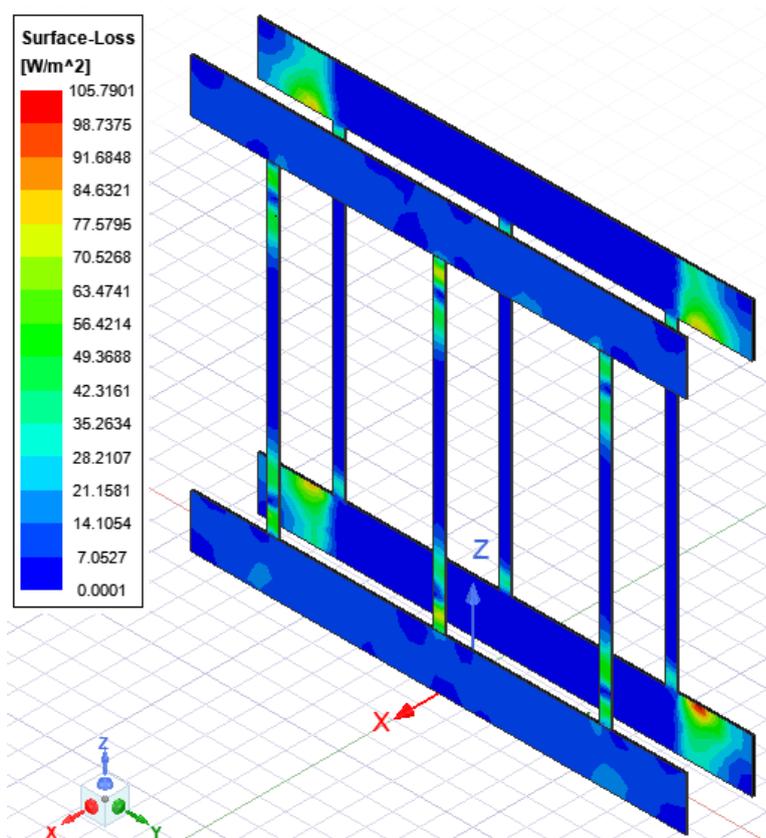
Mantendo o lado de baixa tensão com o circuito externo da Fig. 24 e inserindo os valores de tensão nominal e de pico no lado de alta, é possível então obter os resultados das Figs. 28 e 29.

Figura 28 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , no invólucro da subestação, para o caso

3.



Fonte: (Autor)

Figura 29 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , nas armaduras do transformador, para o caso 3.

Fonte: (Autor)

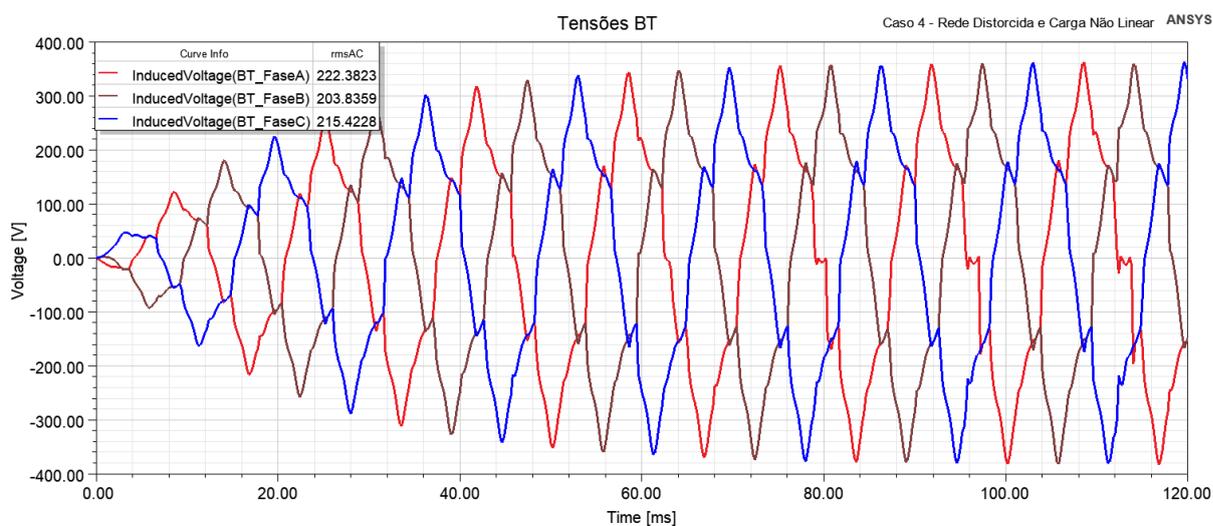
5.5 ESTUDO DE CASO 4: BARRAMENTO DISTORCIDO E CARGA NÃO-LINEAR

Por fim, este último caso é uma combinação dos casos 2 e 3, usando uma excitação no lado de alta tensão com harmônicos da 2ª a 13ª ordem e usando o mesmo circuito externo do retificador de seis pulsos.

5.5.1 Solver Transient

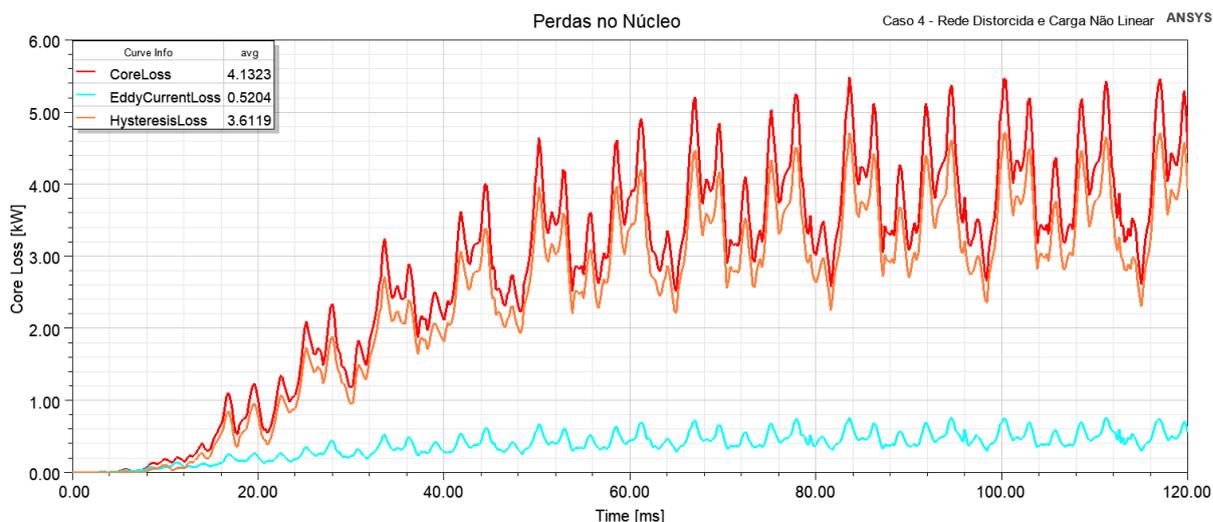
Realizando a combinação dos procedimentos dos casos 2 e 3, é possível obter os resultados eletromagnéticos das Figs. 30 a 32. Ressalta-se novamente a mudança no formato da curva das perdas nos enrolamentos (Fig. 33), mantendo o formato cíclico e com valores máximos e mínimos, em regime permanente.

Figura 300 – Forma de onda das nas tensões no secundário do transformador, para o caso 4.



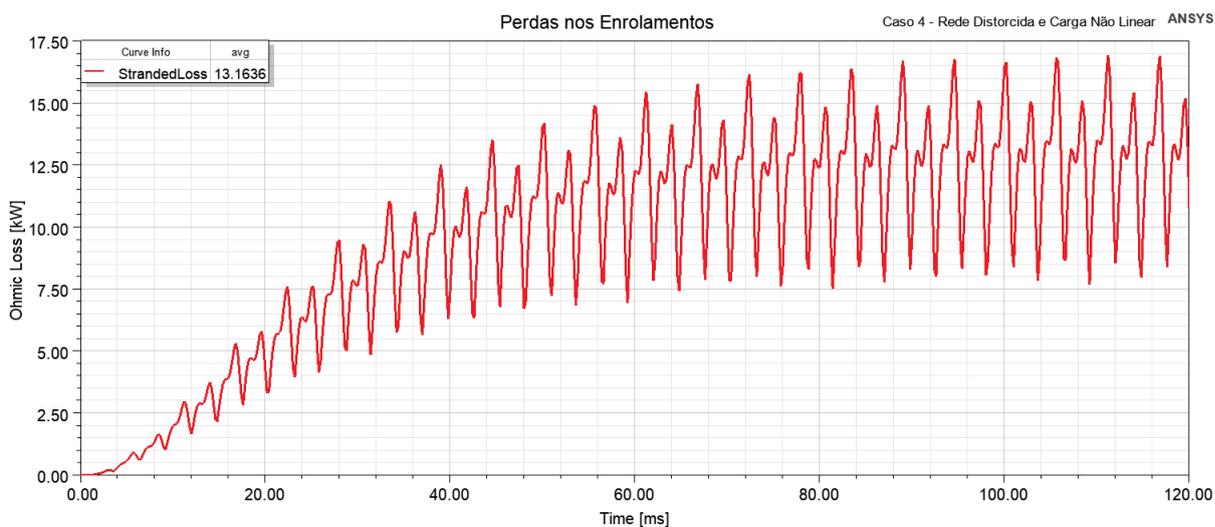
Fonte: (Autor)

Figura 311 – Forma de onda das perdas no núcleo ferro magnético do transformador, para o caso 4.



Fonte: (Autor)

Figura 32 – Forma de onda das perdas totais nos enrolamentos do transformador, para o caso 4.



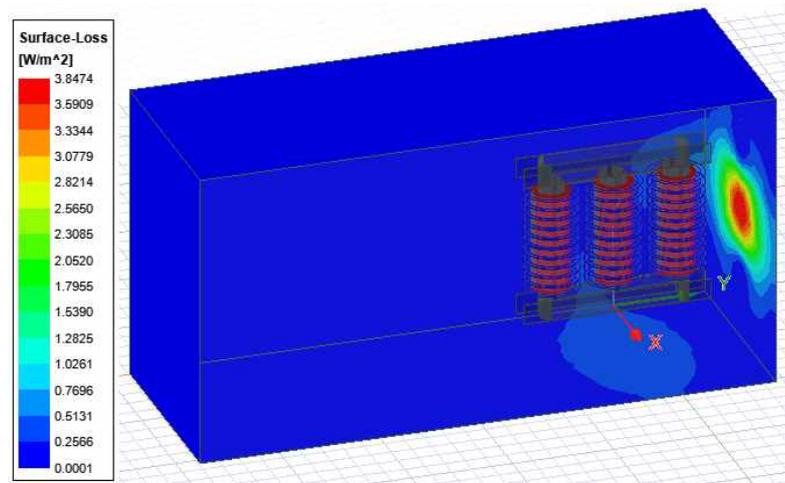
Fonte: (Autor)

5.5.2 Solver Eddy Current

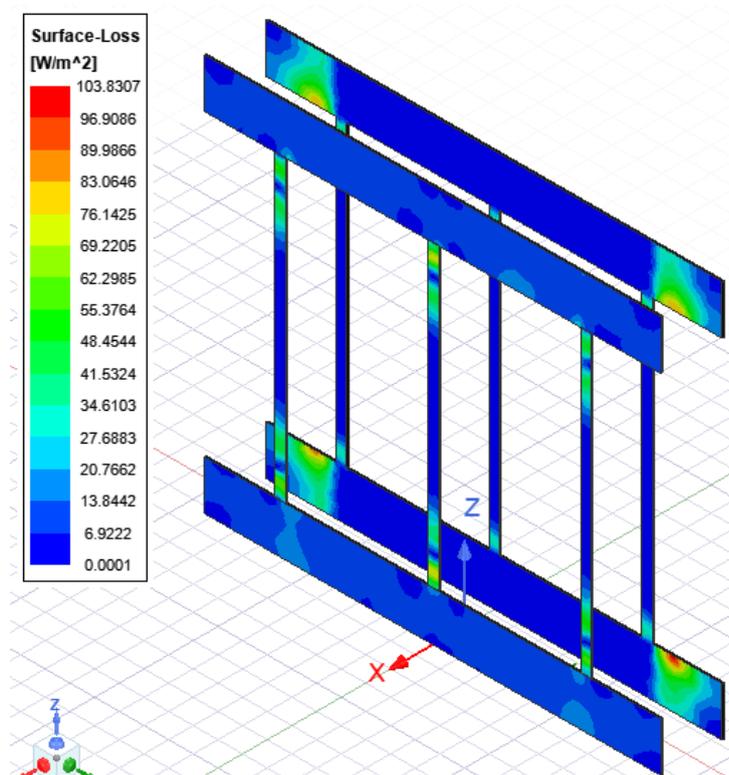
Por fim, manteve-se as configurações dos casos 2 e 4 e foi realizada a simulação no *solver eddy current* e obteve-se os resultados das Figs. 33 e 34.

Figura 33 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , no invólucro da subestação, para o caso

4.



Fonte: (Autor)

Figura 344 – Distribuição de perdas de superfície, em W/m^2 , nas armaduras do transformador, para o caso 4.

Fonte: (Autor)

5.6 ESTUDO DE CASO 5: REDE NOMINAL E CARGA DESEQUILIBRADA

Neste caso, foi inserido um desequilíbrio no lado da carga (Lado de baixa tensão) com os valores indicados pela Tabela 7. Para isso, foi considerado a carga como sendo resistiva e, no primário, manteve-se a excitação nominal, ou seja, a mesma do caso 1. As Figs. 35 a 37 mostram os resultados obtidos e, nota-se que o desequilíbrio no lado de baixa refletiu no lado de alta. Por fim, nota-se também na forma cíclica, em regime permanente, da curva de perdas nos enrolamentos do transformador.

Tabela 7 – Valores de resistências desequilibradas para o circuito externo (Caso 5).

Parâmetro	Valor
R_a	0,080667 Ω
R_b	0,099282 Ω
R_c	0,117330 Ω
Desequilíbrio total	3,00%

Figura 35 – Tensões na carga obtidas na simulação para o caso 5.

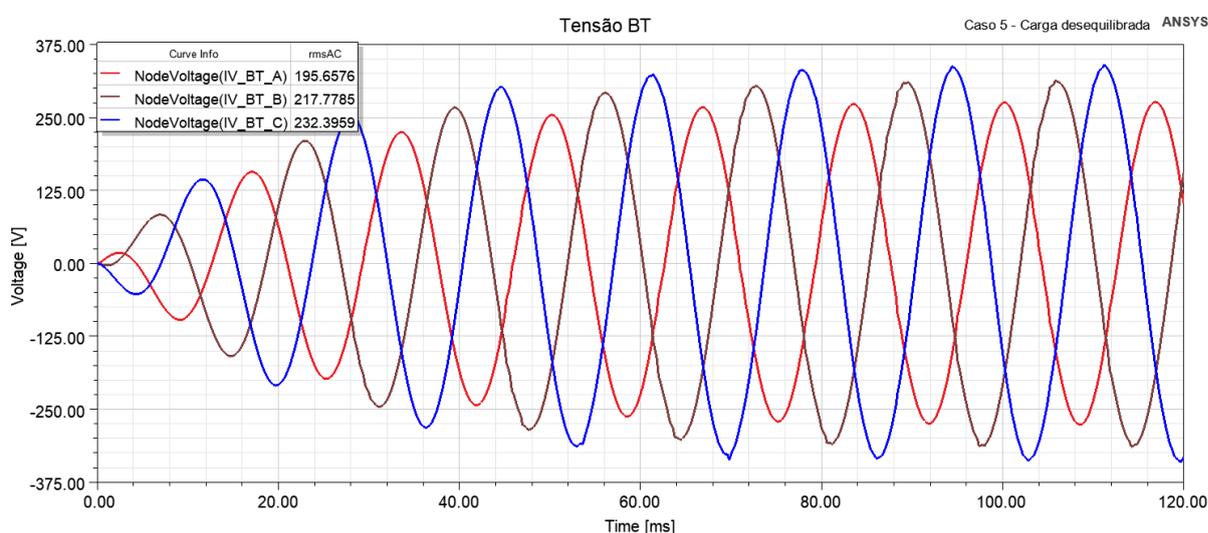


Figura 36 – Perdas no núcleo obtidas na simulação para o caso 5.

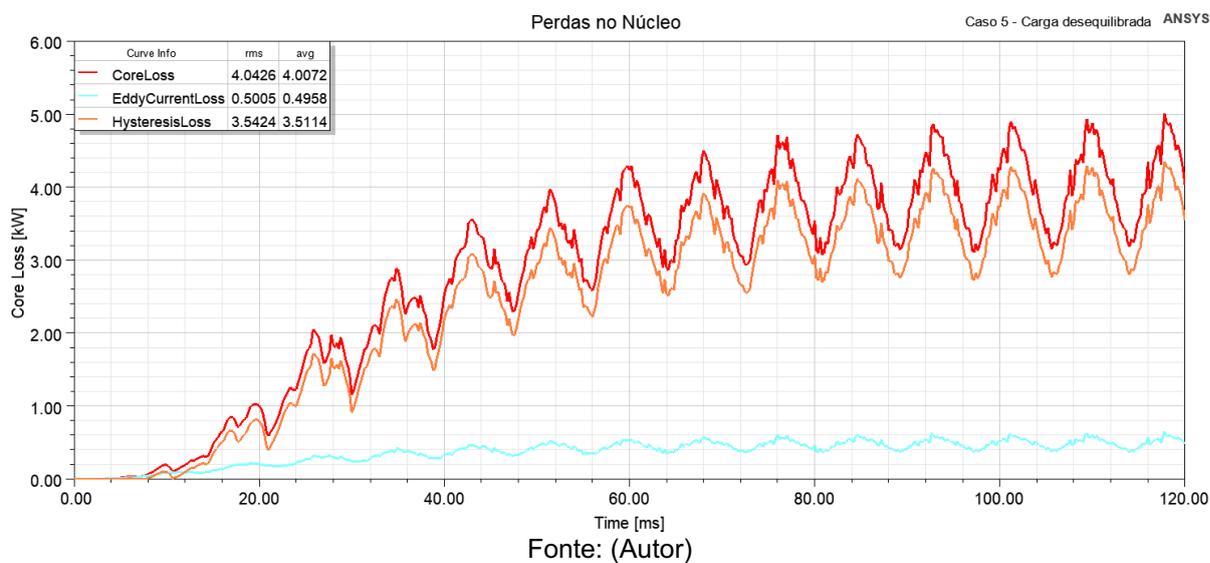
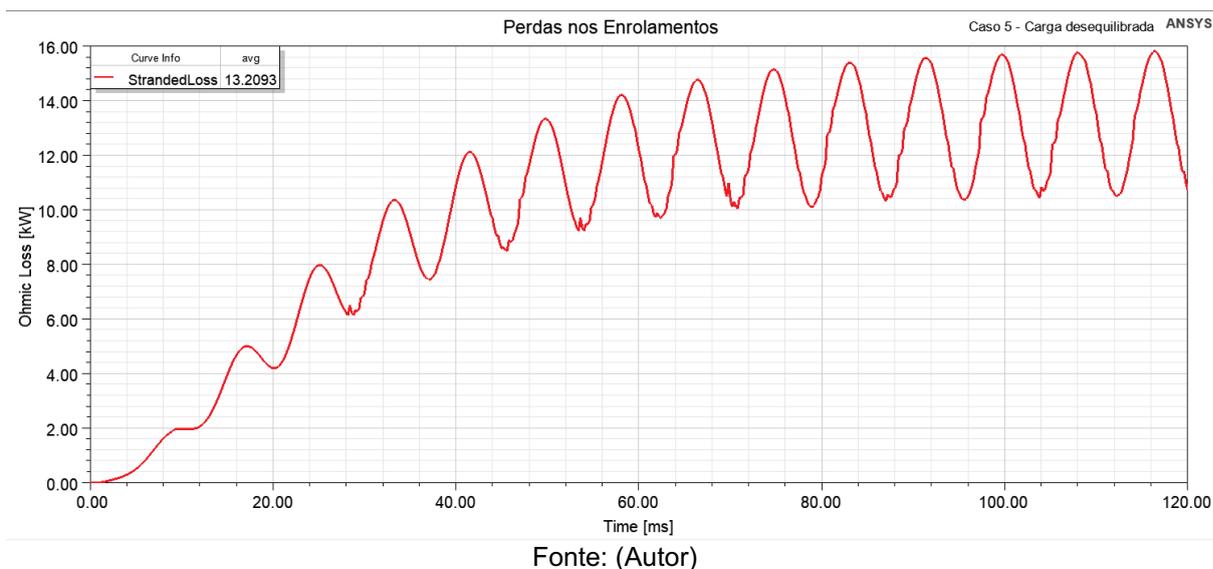


Figura 37 – Perdas nos enrolamentos obtida na simulação para o caso 5.



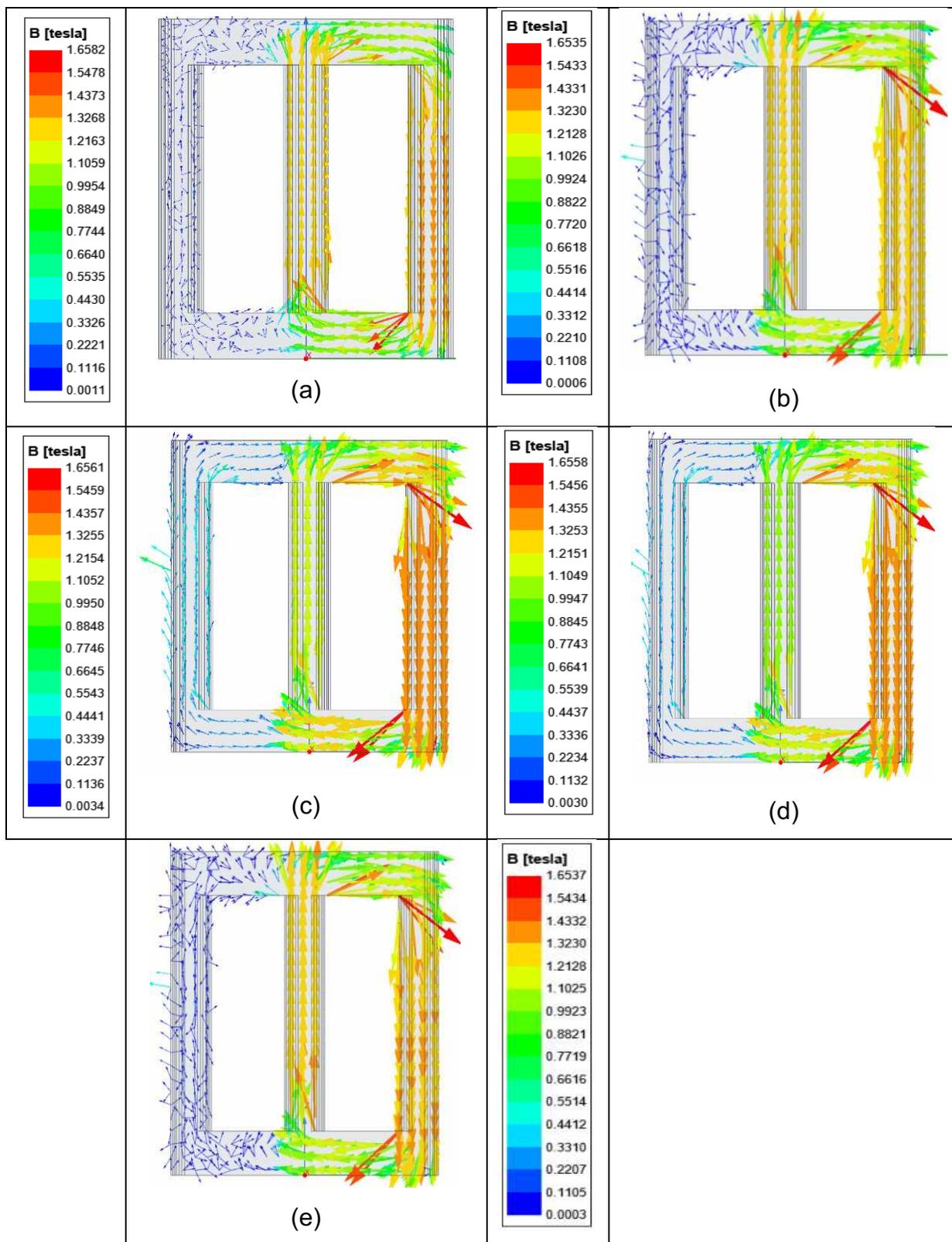
5.7 RESULTADOS ELETROMAGNÉTICOS FINAIS E DISCUSSÕES

Diante de todos esses resultados, pode-se, então, criar as Figs. 38 a 43 e as Tabelas 8 e 9. No geral, os valores ficaram próximos do esperado. Ressalva-se que, para o caso 5, não houve simulações em regime permanente uma vez que o *software* ANSYS não conseguiu convergir a uma resposta para o desequilíbrio adotado. O desequilíbrio de tensão foi inserido apenas no lado secundário (Baixa tensão) uma vez que um intervalo de tempo de 0,2 ms é um tempo bastante alto para simulações

acerca de estudos em qualidade da energia. Caso este passo de integração for reduzido, as simulações computacionais ficam mais demoradas, exigindo mais esforço computacional e tornando inviável as simulações desta pesquisa.

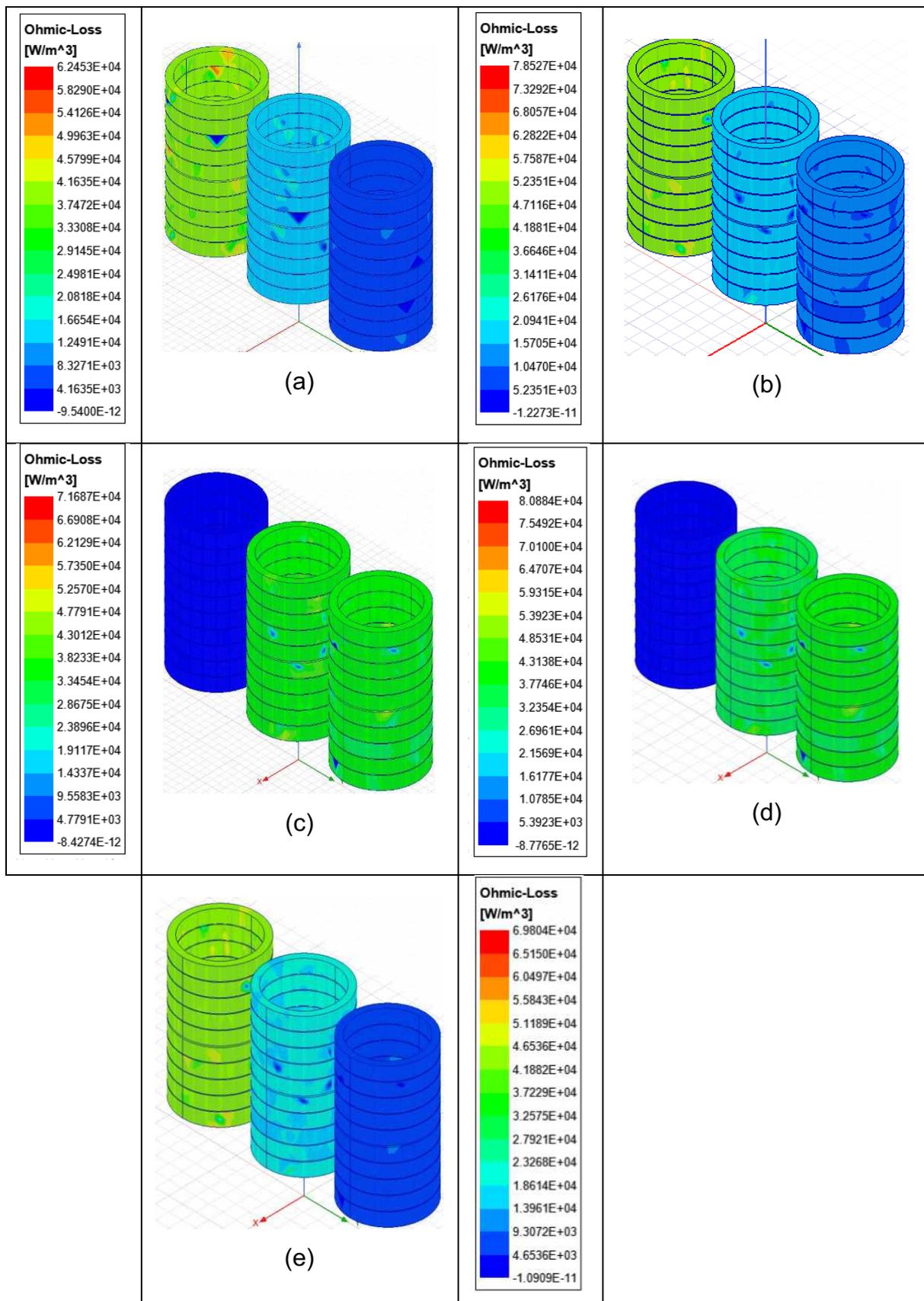
Observa-se o evidente aumento nas perdas, principalmente na distribuição em $[\text{kW}/\text{m}^3]$, mostrando a importância de sempre monitorar e mitigar ao máximo o fenômeno de desequilíbrio, uma vez que seu aumento provoca aumentos de temperaturas de formas desiguais na geometria do transformador e, ademais, sobrecarregando de maneira indiferente as fases do transformador. A densidade de campo magnético B teve uma breve redução, uma vez que a curva $B \times H$ é aproximada e atua próxima da região de saturação. Essa redução também é devida ao fato de que as condições de distorções e de desequilíbrio fazem o núcleo do transformador saturar mais que em suas condições nominais. Com relação ao comportamento vetorial da distribuição do campo B , observa-se que, quando o transformador foi submetido à uma carga não-linear (Caso 3 e 4), houve uma alteração no sentido do fluxo para a coluna oposta da concentração do mesmo, ocasionando em uma breve redução na magnitude do campo B (Fig. 38). Observa-se também que, para o caso 5 e mantendo o instante de tempo selecionado, a concentração de campo magnético se mantém em duas colunas do núcleo do transformador, o que não foi observado nos outros casos. Por fim, as perdas de superfície como um todo teve reduções para os casos 4 e 5. Isto, por sua vez, pode ter ocorrido pelo fato de uma incoerência de cálculos no *solver eddy current* com o circuito externo, uma vez que este *solver* trabalha em regime permanente e o circuito externo é mais adequado para soluções temporais.

Figura 38 – Distribuição da densidade de campo magnético, em Teslas. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4. (e) Caso 5.



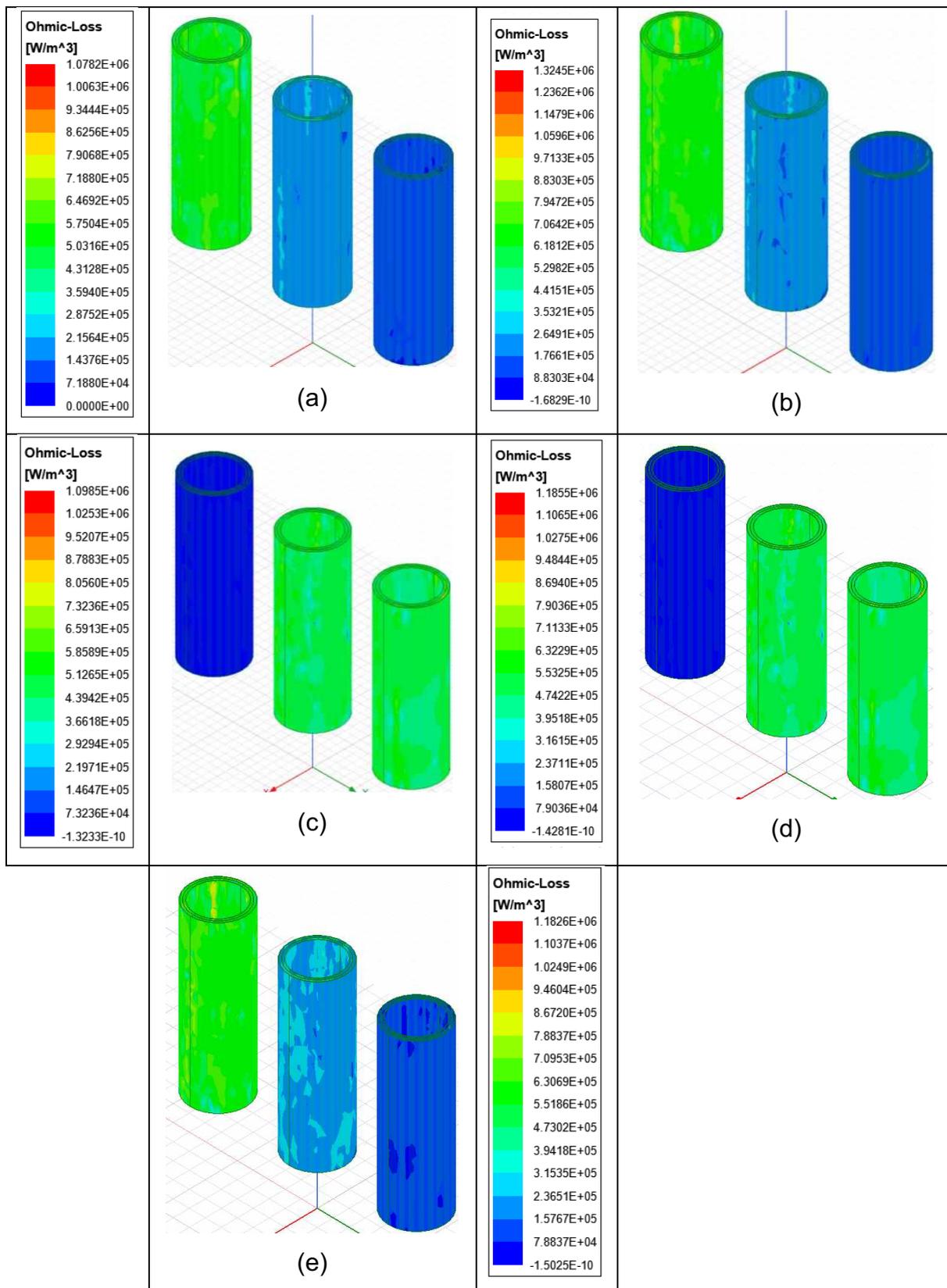
Fonte: (Autor)

Figura 39 – Distribuição de perdas no enrolamento AT, em W/m^3 . (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4. (e) Caso 5.



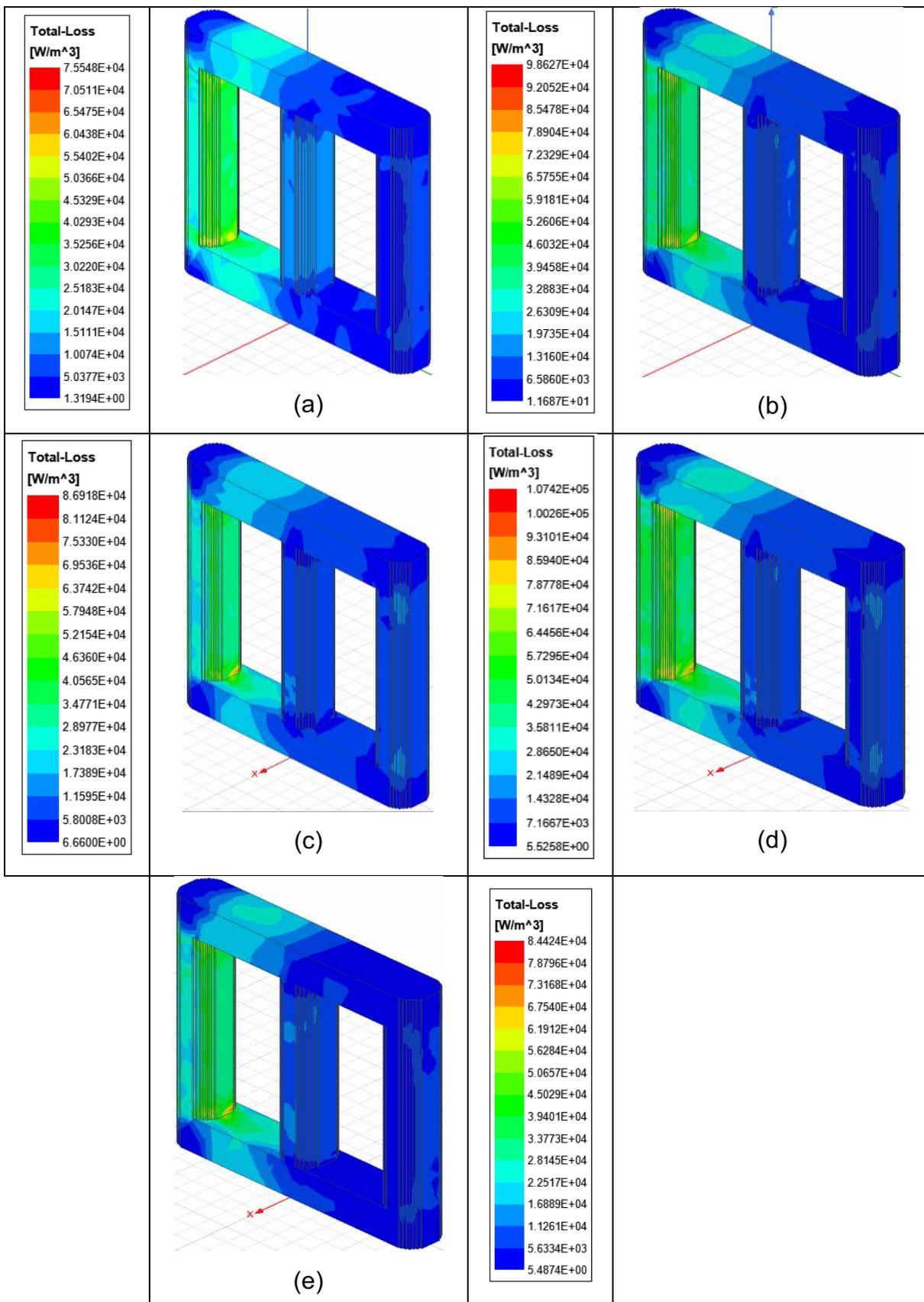
Fonte: (Autor)

Figura 40 – Distribuição de perdas no enrolamento BT, em W/m^3 . (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4. (e) Caso 5.



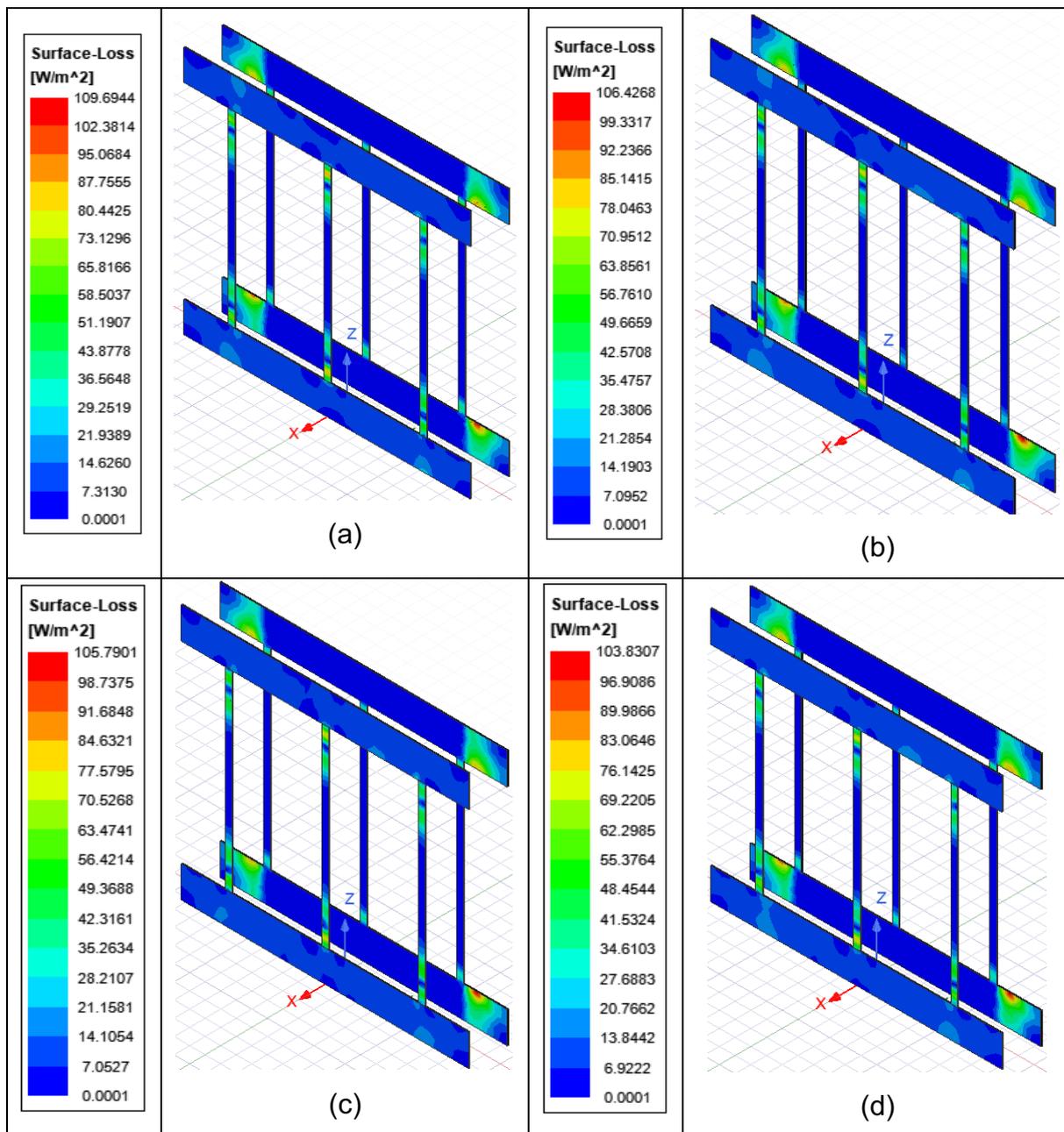
Fonte: (Autor)

Figura 41 – Distribuição de perdas no núcleo, em W/m^3 . (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4. (e) Caso 5.



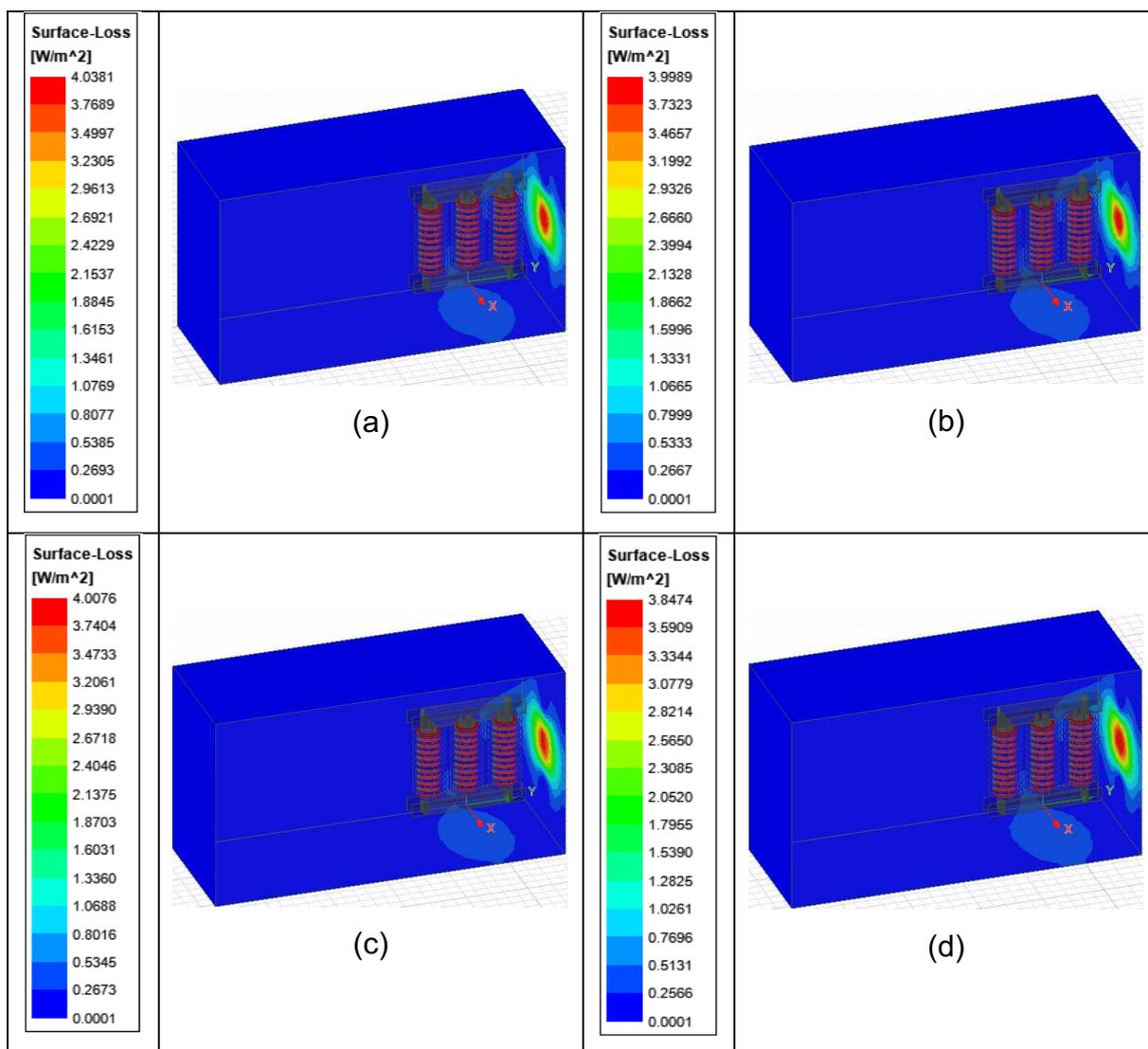
Fonte: (Autor)

Figura 42 – Perdas em superfície, em W/m^2 , nas armaduras do transformador. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.



Fonte: (Autor)

Figura 43 – Perdas em superfície, em W/m^2 , do invólucro da subestação. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.



Fonte: (Autor)

Tabela 8 – Resultados eletromagnéticos gerais obtidos nas simulações em *transient* e *eddy current*.

Resultados Obtidos	Perdas no Núcleo (kW)	Perdas nos Enrolamentos (kW)	Densidade de campo B (T)	Perdas de Superfície máxima no invólucro (W)	Perdas de Superfície máxima nas armaduras (W)
Caso 1	3,9337	13,8484	1,6582	36,8407	8,0100
Caso 2	4,0057	13,5560	1,6535	35,8218	7,9873
Caso 3	4,0375	13,2700	1,6561	36,0061	7,9008
Caso 4	4,1323	13,1636	1,6558	36,3594	8,0800
Caso 5	4,0072	13,2093	1,6537	-	-

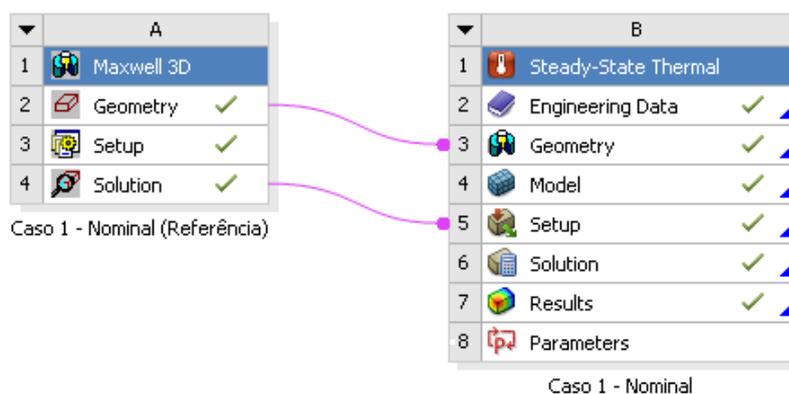
Tabela 9 – Variações dos resultados dos Casos 2 a 5 com referência aos nominais (Caso 1).

Variação (em %)	Perdas no Núcleo	Perdas nos Enrolamentos	Densidade de campo B	Perdas de Superfície máxima no invólucro	Perdas de Superfície máxima nas armaduras
Caso 2	1,83%	-2,1114%	-0,28%	-2,77%	-0,28%
Caso 3	2,64%	-4,1767%	-0,13%	-2,27%	-1,36%
Caso 4	5,05%	-4,9450%	-0,14%	-1,31%	0,87%
Caso 5	1,87%	-4,6150%	-0,27%	-	-

6 RESULTADOS TÉRMICOS E DISCUSSÕES

Neste presente capítulo, os resultados obtidos pela plataforma ANSYS *Electronics Desktop*, no solver *Eddy Current*, são importados pela plataforma *Workbench* de tal maneira a obter a temperatura no núcleo do transformador bem como nos enrolamentos, utilizando a plataforma *Steady-State Thermal*. Não será abordada questões de temperatura no invólucro da subestação e nas armaduras do transformador, uma vez que estes dados dependem de cada aplicação. A Fig. 44 mostra a comunicação multifísica entre as duas plataformas citadas.

Figura 44 – Demonstração de intercomunicação entre as plataformas do ANSYS.



Fonte: (Autor)

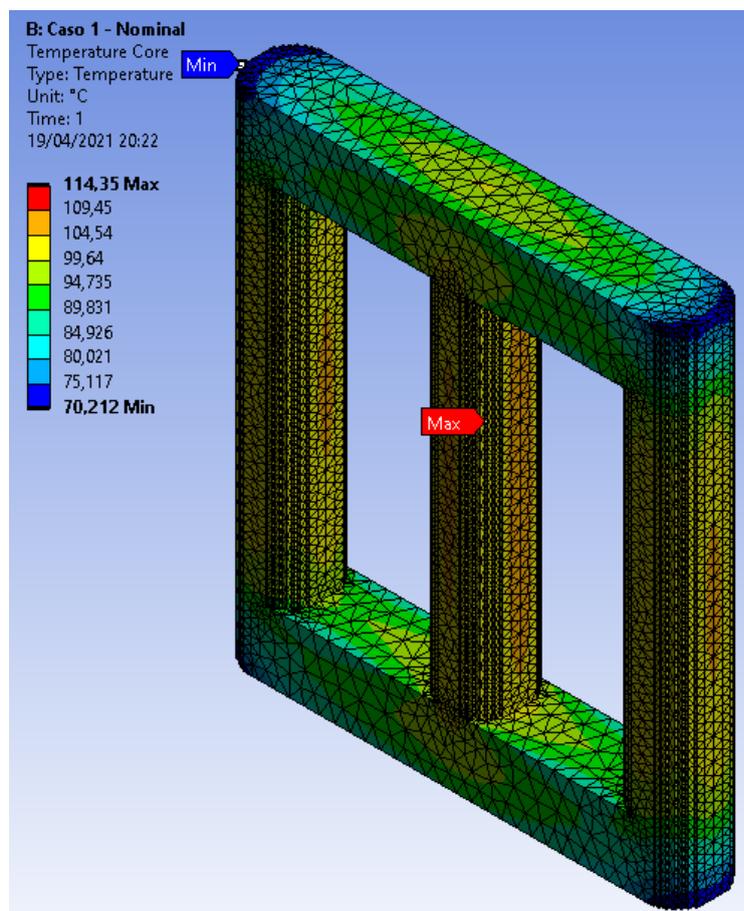
Uma vez estabelecido a comunicação entre as duas plataformas, é necessário parametrizar os materiais a serem utilizados, a saber, o alumínio e o aço silício M4. A Tabela 10 mostra alguns parâmetros utilizados conforme [18] e [19]. Os valores de convecção são usados para ambos os materiais. O valor para a temperatura ambiente foi de 40 °C, uma vez que o equipamento será instalado em uma subestação subterrânea e este valor é bem aceitável.

Tabela 10 – Parâmetros térmicos utilizados para as simulações térmicas.

Convecção Natural p/ Carga nominal	6,49 W/m ² .K
Convecção Natural p/ Carga não-linear	6,83 W/m ² .K
Condutividade Térmica do Núcleo	5W/m ² .°C
Densidade do Núcleo	7650 kg/m ³

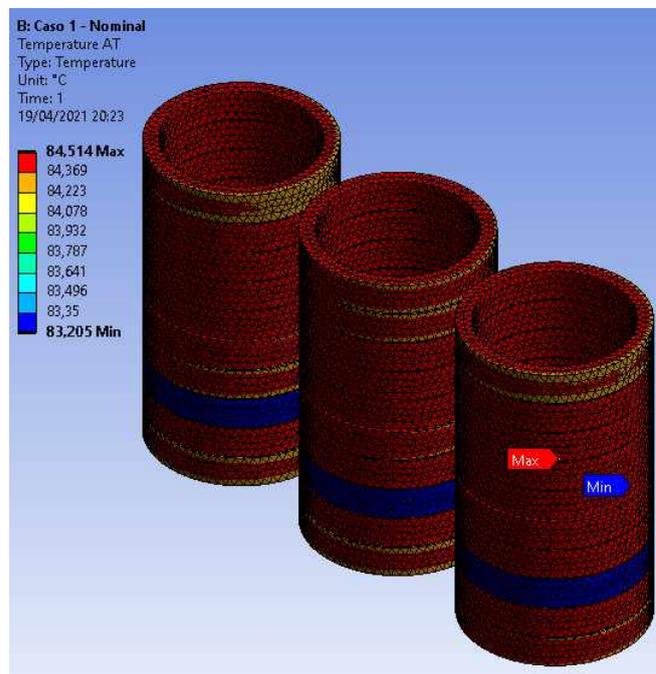
Após isso, é necessário inserir uma malha mais refinada em todos os componentes para que os resultados convirjam. Isto posto, foi inserido uma malha tetraédrica com um refinamento de 50 mm para o núcleo e os enrolamentos de baixa tensão e 25 mm para os enrolamentos de alta tensão. Feito isso, é possível obter os resultados das Figs. 45 a 47 para a condição nominal do transformador.

Figura 45 – Distribuição de temperatura no núcleo do transformador em condições nominais (Caso 1).



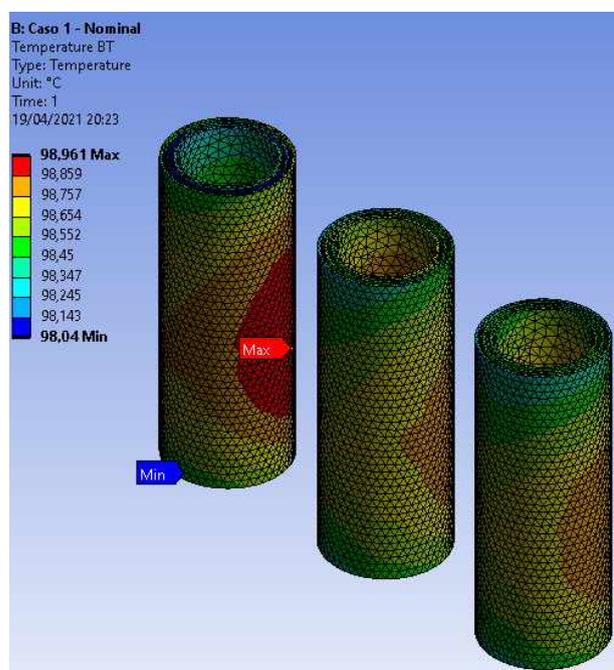
Fonte: (Autor)

Figura 46 – Distribuição de temperatura nos enrolamentos de alta tensão do transformador em condições nominais (Caso 1).



Fonte: (Autor)

Figura 47 – Distribuição de temperatura nos enrolamentos de baixa tensão do transformador em condições nominais (Caso 1).

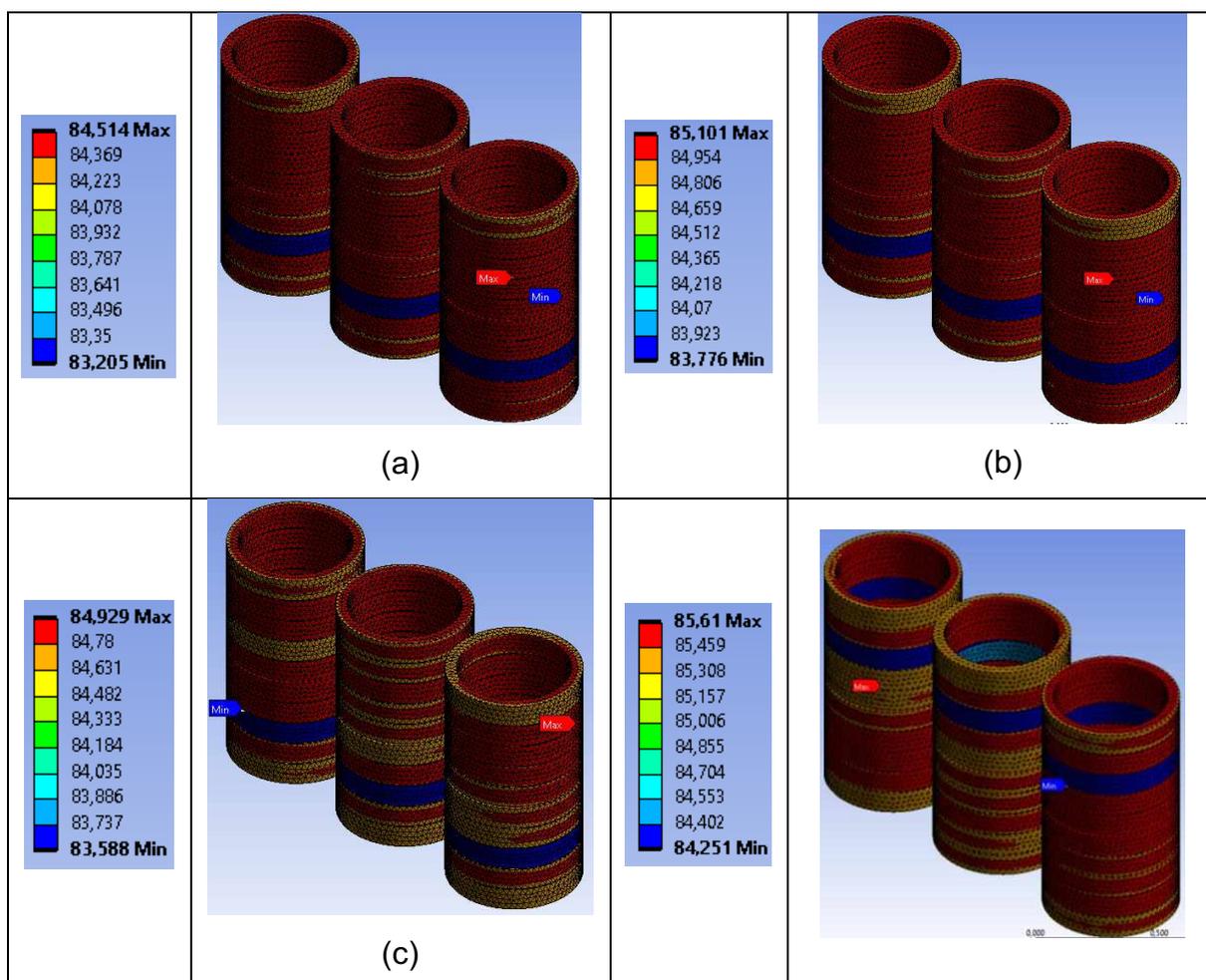


Fonte: (Autor)

Finalmente, basta repetir os mesmos procedimentos com as mesmas parametrizações para os outros casos e assim, obter os resultados térmicos gerais

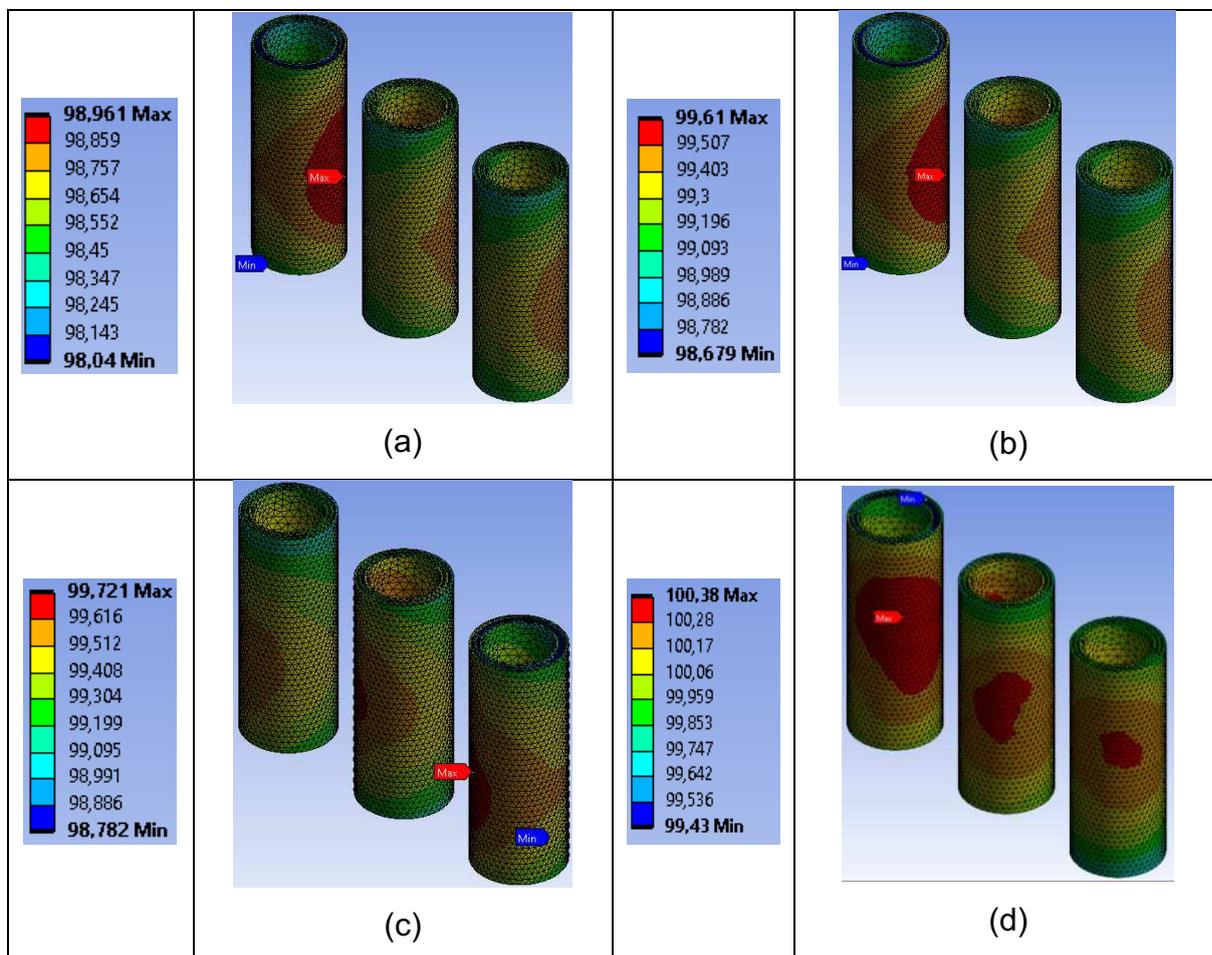
mostras nas Figs. 48 a 50 e nas Tabelas 11 a 15. Observa-se o breve aumento de temperatura geral nos resultados, o que é compreensível uma vez que, nos resultados eletromagnéticos, houve uma elevação na densidade de perdas em cada situação com harmônicos. Também é possível notar a diferença de localidade no ponto mais quente entre os casos com carga não linear (Caso 3 e 4). Isto ocorre pela irregularidade da distribuição de campo magnético no topo das bobinas, onde há presença de campo magnético tanto na direção radial, quanto axial. Já na região mediana, o campo é mais regular, possuindo uma distribuição praticamente constante na direção axial. Logo, sabendo que as perdas são proporcionais a densidade de campo, as perdas, e conseqüentemente as temperaturas, serão maiores nas regiões inferior e superior dos enrolamentos.

Figura 48 – Perfil de temperatura enrolamento AT, em °C. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.



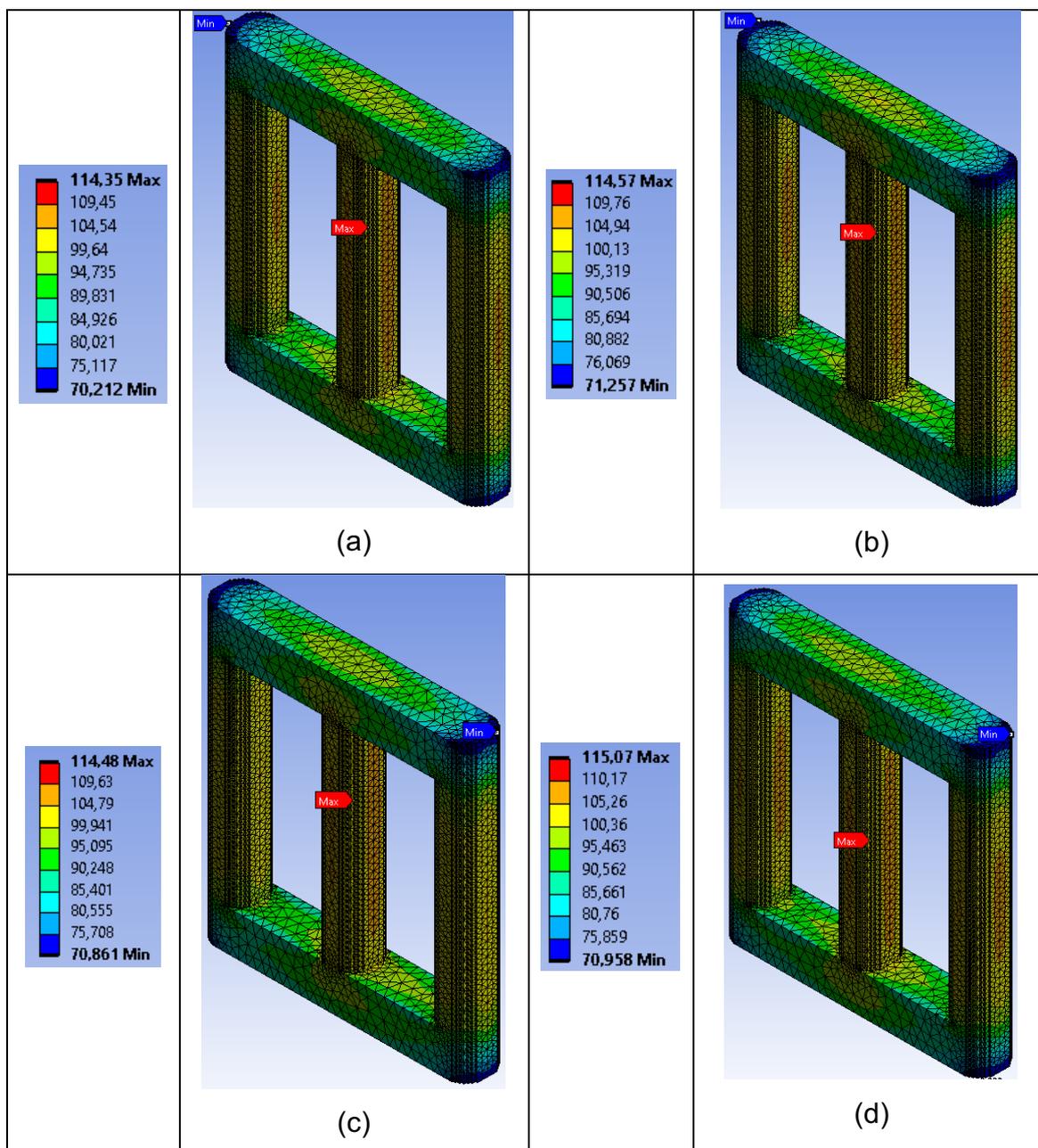
Fonte: (Autor)

Figura 49 – Perfil de temperatura enrolamento BT, em °C. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.



Fonte: (Autor)

Figura 50 – Perfil de temperatura no núcleo, em °C. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.



Fonte: (Autor)

Tabela 11 – Resultados térmicos obtidos no núcleo do transformador.

Temperaturas do Núcleo	Tmáx (°C)	Tmed (°C)	Tmin (°C)
Caso 1	114,35	101,44	70,212
Caso 2	114,57	102,14	71,257
Caso 3	114,48	101,54	70,861
Caso 4	115,07	102,34	70,958

Tabela 12 – Resultados térmicos obtidos nos enrolamentos de alta tensão do transformador.

Temperaturas Enr. AT	Tmáx (°C)	Tmed (°C)	Tmin (°C)
Caso 1	84,514	84,312	83,205
Caso 2	85,101	84,897	83,776
Caso 3	84,929	84,704	83,588
Caso 4	85,610	85,384	84,251

Tabela 13 – Resultados térmicos obtidos nos enrolamentos de baixa tensão do transformador.

Temperaturas Enr. BT	Tmáx (°C)	Tmed (°C)	Tmin (°C)
Caso 1	98,961	98,665	98,040
Caso 2	99,610	99,310	98,679
Caso 3	99,721	99,418	98,782
Caso 4	100,38	100,07	99,430

Tabela 14 – Comparativo com as temperaturas máximas obtidas no núcleo e nos enrolamentos do transformador.

Varição de Temperaturas máximas (em %)	Temperatura no Núcleo	Temperatura nos Enrolamentos AT	Temperatura nos Enrolamentos BT
Caso 2	0,19%	0,69%	1,47%
Caso 3	0,11%	0,10%	0,92%
Caso 4	0,63%	0,88%	1,05%

Tabela 15 – Comparativo de resultados com os dados de fabricantes

Classe de temperatura: 145°C (F)	Fabricante	Obtido	Erro
Elevação Hot-Spot AT (°C)	84	84,514	0,61%
Elevação Hot-Spot BT (°C)	98	96,083	1,95%
Elevação Hot-Spot no Núcleo (°C)	115,8	114,35	1,25%
Fator de Hot-Spot (°C)		1,15	

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve por objetivo obter e validar parâmetros do transformador que são de extrema importância em análises do ponto de vista construtivo, eletromagnéticas e térmicas. As simulações realizadas permitem produzir estudos e compreender melhor, de maneira qualitativa e quantitativa, os fenômenos eletromagnéticos acerca de transformadores operando sob distorções harmônicas e com desequilíbrios, empregando a metodologia dos Elementos Finitos. Ademais, esta ferramenta junto com o software mostra-se uma poderosa estratégia para a obtenção de resultados complexos desde a nível básico quanto a nível industrial, abrindo várias outras possibilidades de aplicações cuja resposta não é simples de se obter. Para as análises harmônicas, evidencia-se que os resultados são condizentes com o que vemos na literatura. Contudo, verifica-se que os resultados apresentaram poucas variações de perdas no núcleo e joulicas em regime permanente, porém, houve aumentos e diferenças de hot-spot ao analisarmos visualmente as distribuições de perdas no volume do transformador e suas respectivas temperaturas, evidenciando que é necessário a atenção para análises térmicas do transformador quando operando em desequilíbrio e com cargas não-lineares. Finalmente, o desequilíbrio e a carga não linear apresentaram um aumento na concentração de densidade de campo magnético no núcleo do transformador na outra coluna, indicando que este pode operar cada vez mais fora da curva de saturação onde foi projetado e, conseqüentemente, aumentando as perdas no núcleo e aumentando o fluxo magnético harmônico do transformador, piorando a eficiência do equipamento. Assim sendo, conclui-se que o método de elementos finitos, empregado em transformadores de distribuição, pode se tornar uma ferramenta robusta e confiável para estudos diversos de qualidade da energia, avaliação de perdas joulicas, investigação de fenômenos da qualidade da energia e análises térmicas e, assim sendo, avaliações e modelagens futuras poderão ser feitas com uma maior complexidade e mais detalhada, como simulações estruturais e CFD, que envolve simulações com fluidos e com um maior grau de complexidade na geometria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] RODRIGUES, G. S. R. et al. Desenvolvimento de cabine de subestação em média tensão. ForScience: revista científica do IFMG. Formiga. v. 5, n. 1. 2017.

[2] Campos, A., Joos, G., Ziogas, P., & Lindsay, J. *Analysis and design of a series voltage compensator for three-phase unbalanced sources. IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 39(2). 159–167. 1992. doi:10.1109/41.166737. 1992.

[3] Guerrero, J.M., Chandokar, M., Lee, T-L, et al.: *Advanced control architectures for intelligent microgrids – part I: decentralized and hierarchical control*. IEEE Trans. Ind. Electron. 2013, pp. 1254–1262.

[4] Análise da perturbação do dia 03/11/2020 às 20h48min com início nos transformadores de 230/69/13,8 kV da SE Macapá com desligamento da UHE Coaracy Nunes e do sistema amapá. Operador Nacional do Sistema elétrico. Relatório de Análise de Perturbação. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/DGL-REL-0016_2020%20-%20RAP%2003.11.2020_20h48min_Amap%C3%A1_VF.pdf>. Acessado em: 14 de mar. 2021.

[5] P. M. Nicolae. 2D Electromagnetic Transient and Thermal Modeling of a Three Phase Power Transformer. IEEE Energetics (IYCE). pp. 1-5. Jun. 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6604148>>. Acessado em 22 de Jul. de 2019.

[6] B. K. Zanini. Análise comparativa entre o uso de transformadores a seco e a óleo em subestações de média tensão. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/157839/001020929.pdf?sequence=1>>. Acessado em 23 de jul. de 2019.

[7] MATTOS, Márcio Moura de. Estudo do fator K em transformadores a seco. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica. Disponível em:

<<http://hdl.handle.net/10183/65619>>. Acessado em 15 de mar. de 2021.

[8] HARLOW, James H. *Electric power transformer engineering*. CRC press, Livro, 2003.

[9] R. Yacamini, "Power system harmonics. Iv. Interharmonics," *Power Eng. J.*, vol. 10, no. 4, pp. 185–193, Ago. 1996.

[10] IEEE, Transformer Committee, Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents. Livro, p. 057/110, 6 de Maio, 1983.

[11] ISONI, Marcos. *Distorções harmônicas: uma revisão de conceitos gerais. A moderna eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas*. São Paulo, 2005.

[12] HAYT, W. H.; BUCK, J.A. *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

[13] MIKHA-BEYRANVAND, Morteza et al. *Thermal analysis of power transformers under unbalanced supply voltage*. *IET Electric Power Applications*, v. 13, n. 4, p. 503-512, 2019.

[14] IEEE Std C57.91: *IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators*. 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6166928>. Acessado em: 29 abril. 2021

[15] D. Lin, P. Zhou, W. N. Fu, Z. Badics and Z. J. Cendes. *A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis*. *IEEE Transactions on Magnetics*. vol. 40, no. 2, pp. 1318-1321. doi: 10.1109/TMAG.2004.825025. 2004.

[16] S.A S. *Grain Oriented Electrical Stee*. 2015. Disponível em: <https://www.stalprodukt.com.pl/offer/cold-rolled-electrical-steel>. Acessado em 21 Dec. 2020

[17] Boyd EL, Borst JD. *Design Concepts for an Amorphous Metal Distribution Transformer*. *IEEE Power Eng Rev* PER-4:43–44. <https://doi.org/10.1109/MPER.1984.5526523>. (1984).

[18] TEIXEIRA, Douglas Ângelo. Análise das distorções harmônicas: estudo de caso de um sistema industrial. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8CJHGU>>.

[19] D. Constantin, P. Nicolae and C. Nitu. *3D Finite element analysis of a three phase power transformer*. *Eurocon 2013*, Zagreb, Croatia, 2013. pp. 1548-1552. doi: 10.1109/EUROCON.2013.6625184.