

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL MARÇAL DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE UM
REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO PELO MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS**

UBERLÂNDIA

2023

GABRIEL MARÇAL DE CARVALHO

**Avaliação das Condições Operacionais de um Regulador
Eletromagnético de Tensão pelo Método dos Elementos Finitos**

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção de título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

UBERLÂNDIA

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C331 2023	<p>Carvalho, Gabriel Marçal de, 1995- Avaliação das Condições Operacionais de um Regulador Eletromagnético de Tensão pelo Método dos Elementos Finitos [recurso eletrônico] / Gabriel Marçal de Carvalho. - 2023.</p> <p>Orientador: José Carlos de Oliveira. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.511</p> <p>Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Oliveira, José Carlos de, 1947-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

GABRIEL MARÇAL DE CARVALHO

**Avaliação das Condições Operacionais de um Regulador
Eletromagnético de Tensão pelo Método dos Elementos Finitos**

Dissertação de mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos necessários para
obtenção de título de Mestre em Ciências.

Uberlândia, 29 de agosto de 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira – UFU

Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende – UFU

Prof. Dr. Fabricio Parra Santilio – UFMT



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 786, PPGEELT				
Data:	Vinte e nove de agosto de dois mil e vinte e três	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	12122EEL005				
Nome do Discente:	Gabriel Marçal de Carvalho				
Título do Trabalho:	Avaliação das Condições Operacionais de um Regulador Eletromagnético de Tensão pelo Método dos Elementos Finitos				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Paulo Henrique de Oliveira Rezende. Título do projeto: Alocação Otimizada de Reatores Saturados Cabeça de Série em Redes de Distribuição Multi-ramais para Regulação da Tensão. Agência financiadora: Neoenergia Coelba. Número do processo na agência financiadora: PD-00047-0095/2023 Vigência do projeto: 2023 - 2025				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Paulo Henrique de Oliveira Rezende - FEELT/UFU; Fabricio Parra Santilio - UFTM e José Carlos de Oliveira - FEELT/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. José Carlos de Oliveira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2023, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2023, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Parra Santilio, Usuário Externo**, em 29/08/2023, às 12:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4672633** e o código CRC **63D615B9**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer minha amada namorada Clara. Sua paciência, compreensão e encorajamento inabaláveis foram a luz que me guiou nos momentos mais desafiadores. Seu amor e apoio constante foram fundamentais para que eu mantivesse o foco e a determinação necessários para alcançar este marco importante em minha vida acadêmica. Agradeço também aos meus pais, Maria Helena e Carlos, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando-me a perseguir meus sonhos e apoiando-me incondicionalmente. Gostaria também de agradecer ao meu irmão Carlos Junior e meu cunhado Thiago, cujas palavras de sabedoria e experiências compartilhadas foram fontes de inspiração ao longo desta jornada, e sou grato por ter esses exemplos de determinação e sucesso em minha vida. Agradeço a minhas avós e tios, cujo amor, carinho e apoio sempre me impulsionaram a alcançar o melhor de mim mesmo.

Ao meu orientador, professor José Carlos de Oliveira, expresso minha profunda gratidão. Sua dedicação em compartilhar conhecimento e sua disponibilidade em me orientar sempre que necessário foram de imensurável valor. Agradeço também a todos os meus professores Ivan, Paulo, Helder, Ernane e Gustavo, cujas aulas e mentorias expandiram minha compreensão e me proporcionaram uma base sólida de conhecimento. Aos meus colegas de laboratório, agradeço pela colaboração e pelo ambiente inspirador de trabalho. Nossa troca de ideias, discussões e apoio mútuo foram essenciais para o progresso do meu trabalho e para o aprimoramento das minhas habilidades de pesquisa. Também não poderia deixar de agradecer aos meus amigos, cujo apoio, compreensão e encorajamento me mantiveram sãos durante os períodos de pressão e estresse. Sua presença e apoio contínuo tornaram essa jornada muito mais leve e significativa.

Por fim, quero expressar minha gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais por conceder-me a bolsa de estudos durante este período. Seu investimento em minha formação acadêmica foi de vital importância para que eu pudesse me dedicar integralmente à pesquisa e ao desenvolvimento deste trabalho.

"No mundo pelo qual viajo, estou me criando incessantemente."

(Frantz Fanon)

RESUMO

No contexto dos distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica, uma das temáticas de maior relevância refere-se às variações de tensão. Diversas soluções são encontradas e utilizadas, sendo um grupo fundamentado na regulação direta e outro na indireta. No cenário dos diretos, foi proposta uma estrutura totalmente eletromagnética, a qual utiliza, para seus fins, a injeção de uma tensão, positiva ou negativa, em série com o alimentador em foco. Esta concepção de compensador foi avaliada de forma computacional e experimental, mostrando-se efetiva aos propósitos aqui estabelecidos. Não obstante as perspectivas promissoras desta filosofia, ainda incipiente, vale destacar que as condições eletromagnéticas presentes em seus componentes revelam desafios associados com estados de magnetização impostos às suas unidades de potência. Merece atenção especial a unidade transformadora responsável pela injeção de tensão de compensação, visto que seu primário opera com base numa tensão imposta e o seu secundário com corrente imposta. Esta condição específica requer conhecimento do estado de magnetização a que fica sujeita esta unidade do dispositivo, visando, sobretudo, medidas orientativas para o projeto de construção do mesmo. Isto posto, o cerne desta dissertação está no estabelecimento de uma estratégia que conduza a análise da funcionabilidade elétrica e magnética do arranjo. Para tanto, modelos são implementados no software ANSYS Maxwell 3D, o qual permite, de forma integrada, avaliações tanto no que diz respeito às condições elétricas e magnéticas a que são submetidos os componentes que perfazem o regulador em pauta. Para fins elucidativos da técnica de análise do compensador, estudos de desempenho são realizados através de um protótipo disponibilizado em ambiente laboratorial. Utilizando informações construtivas e paramétricas deste dispositivo, estudos de desempenho diversos são então realizados objetivando atender as metas estabelecidas para esta dissertação.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos, Regulação de Tensão, Qualidade da Energia, Regulador Eletromagnético de Tensão, ANSYS Maxwell.

ABSTRACT

Voltage variations are one of the most relevant topics when it comes to power quality disturbances. There are several solutions to solve this problem. Devices can be considered into two groups according to their principle of operation. One is based on direct regulation acting directly in the system to regulate voltages. The other is focused on techniques that provide regulation in indirect approaches, like reactive power flow. Focusing on compensators classified as direct voltage regulation, a fully electromagnetic structure was proposed. Its operation is based on a physical structure destined to inject an additive or subtractive level of voltage compensation in series with the feeder that supplies a consumer. The effectiveness of this device has been validated using computer simulation and laboratory experimental arrangements. Despite the promising perspectives of this philosophy, there are still challenges associated with the electromagnetic conditions and magnetization states imposed on its power units. The transformer unit responsible for injecting the compensation voltage deserves special attention, as its primary winding operates with imposed voltage and its secondary winding with imposed current. This specific condition requires knowledge of the state of magnetization to which this unit of the device is subject, aiming to guide measurements for its construction project. The focus of this master's thesis is to establish a strategy that guides the analysis of the electrical and magnetic functionality of the equipment. For this, the models are implemented in the ANSYS Maxwell 3D software, which makes it possible to evaluate, in an integrated way, the electrical and magnetic conditions of the regulator components. For elucidative purposes of the compensator analysis technique, performance studies are carried out through a prototype available in a laboratory environment. Using constructive and parametric information from this device, several performance studies are then carried out aiming to meet the goals established for this dissertation.

Keywords: Finite Element Method, Voltage Regulation, Power Quality, Electromagnetic Voltage Regulator, ANSYS Maxwell.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Classificação das variações de tensão de curta duração - PRODIST.	25
Figura 1.2 - Faixas de classificação da tensão para caracterização das variações de tensão de longa duração - PRODIST.....	26
Figura 2.1 - Ilustração da topologia física do RET inserido em um sistema.....	35
Figura 2.2 - Diagramas fasoriais e formas de onda ilustrativas da ação do compensador RET. (a) Sem variação de tensão; (b) Com subtensão; (c) Com sobretensão.....	36
Figura 2.3 - Diagrama de blocos para o controle do RET.	38
Figura 2.4 - Exemplificação do processo de transição de tape do TE. (a) Operação normal com o tape atual. (b) Fechamento da chave do próximo tape. (c) Fechamento da chave do tape anterior.....	39
Figura 2.5 - Exemplificação do processo de mudança de chave de polaridade do TA. (a) Chave ChP fechada. (b) Fechamento de ChN com ChP ainda fechada. (c) Abertura de ChP.....	40
Figura 2.6 - Circuito equivalente do RET operando no modo: compensação positiva.	42
Figura 2.7 - Circuito equivalente do RET operando no modo: compensação negativa.	44
Figura 3.1 - Estrutura física da seção transversal dos núcleos do TA e do TE do protótipo.	49
Figura 3.2 - Esboço de um transformador de núcleo envolvido.	50
Figura 3.3 - Arranjos para os enrolamentos das bobinas constituintes do TA.	51
Figura 3.4 - Características construtivas para as bobinas do TA. Unidade: milímetros.	53
Figura 3.5 - Aspectos construtivos do secundário do TA; (a) Visão superior; (b) Arranjo elétrico representativo.....	53

Figura 3.6 - Representações da construção do enrolamento primário positivo do TA. (a) Visão superior; (b) Arranjo elétrico representativo.	54
Figura 3.7 - Representações da construção do enrolamento primário negativo do TA. (a) Visão superior; (b) Esquema elétrico.	55
Figura 3.8 - Representação de um dos braços do TA em corte longitudinal. Unidade: milímetro.....	55
Figura 3.9 - Representação de TE com seus tapes.	57
Figura 3.10 - Esboço da seção transversal dos condutores do TE do protótipo.	59
Figura 3.11 - Representações da construção do enrolamento secundário do TE. (a) Visão superior; (b) Esquema elétrico.	60
Figura 3.12 - Representações da construção do enrolamento primário do TE. (a) Visão superior; (b) Esquema elétrico.	60
Figura 3.13 - Representação do braço do TE onde está a bobina, em corte longitudinal. Unidade: milímetros.	61
Figura 4.1 - Discretização de um objeto pelo MEF.	63
Figura 4.2 - Processo de modelagem das chapas de 30mm do núcleo.	70
Figura 4.3 - Processo de modelagem das chapas de 55mm do núcleo.	70
Figura 4.4 - Processo de modelagem das chapas de 70mm do núcleo.	70
Figura 4.5 - Núcleo completo modelado do Maxwell.	71
Figura 4.6 - Atribuição do material que compõe os núcleos.	72
Figura 4.7 - Curva de magnetização do material M-4 em 60Hz - Fabricante AK Steel.	72
Figura 4.8 - Curva de perdas por quilograma do material M-4 em 60Hz - Fabricante AK Steel.	73
Figura 4.9 - Procedimento para a modelagem da metade do enrolamento secundário do TA.	75
Figura 4.10 - Processo de modelagem de metade do enrolamento primário do TA..	75

Figura 4.11 - Transformador de Acoplamento. (a) Modelo no ANSYS. (b) Elemento real.	76
Figura 4.12 - Modelagem das parcelas de bobinas do Transformação de Excitação associadas com os tapes (secundário).....	77
Figura 4.13 - Modelagem do complemento que perfaz o enrolamento completo do Transformação de Excitação (primário).....	78
Figura 4.14 - Transformador de Excitação. (a) Modelo no ANSYS. (b) Elemento real.	79
Figura 4.15 - Transformadores inseridos no ambiente de simulação.....	79
Figura 4.16 - Criação de um “winding” no ANSYS.....	80
Figura 4.17 - Criação de um “coil terminal” no ANSYS.....	81
Figura 4.18 - Circuito externo montado para simular o RET completo inserido num sistema.	82
Figura 5.1 - Diagrama unifilar simplificado do sistema simulado.....	85
Figura 5.2 - Malhas de elementos finitos atribuídas aos núcleos dos dois transformadores.....	88
Figura 5.3 - Tensões obtidas nas simulações do caso 1.	89
Figura 5.4 - Correntes obtidas nas simulações do caso 1.....	90
Figura 5.5 - Caso 1: campo magnético nos núcleos do TA e do TE para compensação positiva e negativa com 27 volts.	91
Figura 5.6 - Caso 1: campo magnético nos núcleos do TA e do TE para compensação positiva e negativa com 20 volts.	92
Figura 5.7 - Caso 1: campo magnético nos núcleos do TA e do TE para compensação positiva e negativa com 14 volts.	92
Figura 5.8 - Caso 1: campo magnético nos núcleos do TA e do TE para compensação positiva e negativa com 7,5 volts.	93

Figura 5.9 - Caso 1 e caso 2: campo magnético no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 27 volts.	95
Figura 5.10 - Caso 1 e caso 2: campo magnético no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 20 volts.	95
Figura 5.11 - Caso 1 e caso 2: campo magnético no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 14 volts.	96
Figura 5.12 - Caso 1 e caso 2: campo magnético no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 7,5 volts.	96
Figura 5.13 - Caso 1 e caso 3: campo magnético no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 27 volts.	98
Figura 5.14 - Caso 1 e caso 3: campo magnético no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 20 volts.	99
Figura 5.15 - Caso 1 e caso 3: campo magnético no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 14 volts.	99
Figura 5.16 - Caso 1 e caso 3: campo magnético no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 7,5 volts.	100

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Correntes e tensões presentes no RET operando em compensação positiva.	43
Tabela 2.2 - Correntes e tensões presentes no RET operando em compensação negativa.....	44
Tabela 3.1 - Parâmetros nominais do TA do protótipo.....	48
Tabela 3.2 - Características físicas e geométricas dos núcleos dos transformadores do protótipo.....	49
Tabela 3.3 - Características estruturais do núcleo do TA.....	50
Tabela 3.4 - Dados técnicos das metades dos enrolamentos do TA.....	52
Tabela 3.5 - Parâmetros construtivos dos condutores dos enrolamentos do TA.	52
Tabela 3.6 - Parâmetros nominais do TE do protótipo.....	56
Tabela 3.7 - Dados do núcleo do TE do protótipo.....	56
Tabela 3.8 - Valores nominais das tensões nos tapes do TE do protótipo.....	58
Tabela 3.9 - Dados técnicos das metades dos enrolamentos do TE do protótipo.	58
Tabela 3.10 - Dados dos condutores dos enrolamentos do TE do protótipo.	59
Tabela 4.1 - Dimensões dos objetos modelados que compõem ambos os núcleos..	71
Tabela 4.2 - Características construtivas da metade do enrolamento secundário do Transformador de Acoplamento.....	74
Tabela 4.3 - Características construtivas da metade do enrolamento primário do Transformador de Acoplamento.....	75
Tabela 4.4 - Características construtivas das parcelas de bobinas do Transformador de Excitação associadas com os tapes (secundário).....	77
Tabela 4.5 - Características construtivas do complemento que perfaz o enrolamento completo do Transformador de Excitação (primário).....	78

Tabela 5.1 - Situações simuladas para o caso 1.....	86
Tabela 5.2 - Parâmetros ajustados para a malha autoadaptativa.....	88
Tabela 5.3 - Resultados do processo de malha autoadaptativa para CP – 27V.	88
Tabela 5.4 - Valores das tensões obtidas nas simulações do caso 1.	89
Tabela 5.5 - Valores das correntes obtidas nas simulações do caso 1.....	90
Tabela 5.6 - Valores de campo e perdas nos núcleos dos transformadores para o caso 1.....	93
Tabela 5.7 - Valores das tensões e corrente obtidas nas simulações do caso 2.....	94
Tabela 5.8 - Valores de campo e perdas no núcleo do TA para os casos 1 e 2.	97
Tabela 5.9 - Valores das tensões e corrente obtidas nas simulações do caso 3.....	98
Tabela 5.10 - Valores de campo e perdas no núcleo do TA para os casos 1 e 3.	100

Lista de Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
ATP	<i>Alternative Transient Program;</i>
CCTs	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica;
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer;</i>
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission System;</i>
fmm	Força magnetomotriz;
MEF	Método dos Elementos Finitos;
ONS	Operador Nacional do Sistema;
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica;
QEE	Qualidade da Energia Elétrica;
RCTs	Reatores Controlados a Tiristores;
RET	Regulador Eletromagnético de Tensão;
SIN	Sistema Interligado Nacional;
SIPCON P	<i>Siemens Power Conditioner – Parallel;</i>
SIPCON S	<i>Siemens Power Conditioner – Series;</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator;</i>
TA	Transformador de Acoplamento;
TE	Transformador de Excitação;
VTCDs	Variações de Tensão de Curta Duração.

Lista de Símbolos

α_{TA}	Relação de transformação do TA;
α_{TE}	Relação de transformação do TE;
B_m	Valor de pico de indução magnética;
Ch0	Chave de neutro, utilizada quando não está sendo realizada compensação de tensão;
Ch1 a Ch4	Chaves que selecionam o nível de tensão com que será realizada a compensação;
ChBP	Chave de By-Pass acionada para remoção do RET sem o desligamento da carga;
ChN	Chave acionada para compensação negativa de tensão (subtração de tensão);
ChP	Chave acionada para compensação positiva de tensão (adição de tensão);
$\Delta\dot{V}_{1TA}$	Queda de tensão no enrolamento primário do TA;
$\Delta\dot{V}_{1TE}$	Queda de tensão no enrolamento primário do TE;
$\Delta\dot{V}_{2TA}$	Queda de tensão no enrolamento secundário do TA;
$\Delta\dot{V}_{2TE}$	Queda de tensão no enrolamento secundário do TE;
$\Delta\dot{V}_{reat}$	Queda de tensão no reator de comutação;
\dot{E}_{1NTA}	Força eletromotriz induzida no enrolamento primário negativo do TA (compensação negativa);
\dot{E}_{1TE}	Força eletromotriz induzida no enrolamento primário do TE (compensação negativa);
\dot{E}_{2TA}	Força eletromotriz induzida no enrolamento secundário do TA (compensação positiva);

\dot{E}_{2TE}	Força eletromotriz induzida no enrolamento secundário do TE (compensação positiva);
\dot{E}_{c1PTA}	Força contra eletromotriz induzida no enrolamento primário positivo do TA (compensação positiva);
\dot{E}_{c1TE}	Força contra eletromotriz induzida no enrolamento primário do TE (compensação positiva);
\dot{E}_{c2TA}	Força contra eletromotriz induzida no enrolamento secundário do TA (compensação negativa);
\dot{E}_{c2TE}	Força contra eletromotriz induzida no enrolamento secundário do TE (compensação negativa);
$\dot{\Phi}_{priPTA}$	Fluxo magnético resultante da corrente \dot{I}_{tap} ao circular o enrolamento primário positivo do TA;
$\dot{\Phi}_{priTE}$	Fluxo magnético resultante da corrente \dot{I}_{at} ao circular o enrolamento primário do TE;
$\dot{\Phi}_{secTA}$	Fluxo magnético resultante da corrente \dot{I}_{ts} ao circular o enrolamento secundário do TA;
$\dot{\Phi}_{secTE}$	Fluxo magnético resultante da corrente \dot{I}_n ao circular o enrolamento secundário do TE;
\dot{I}_{at}	Corrente que circula no primário do autotransformador;
\dot{I}_c	Corrente na carga;
\dot{I}_f	Corrente drenada da fonte controlada utilizada nos testes laboratoriais;
\dot{I}_n	Corrente que circula no secundário do autotrafo, ligado ao neutro;
\dot{I}_{tap}	Corrente que circula entre o tape do TE em operação e o primário do TA;
\dot{I}_{ts}	Corrente que passa pelo secundário do transformador série;

K_c	Coeficiente de perdas por correntes induzidas para o cálculo das perdas magnéticas pelo método de Steinmetz;
K_e	Coeficiente de perdas por excesso para o cálculo das perdas magnéticas pelo método de Steinmetz;
K_h	Coeficiente de perdas por histerese para o cálculo das perdas magnéticas pelo método de Steinmetz;
L1 e L2	Reatores para comutação de tapes do TE sob carga;
N_{1TA}	Número de espiras do enrolamento primário do TA;
N_{1TE}	Número de espiras do enrolamento primário do TE;
N_{2TA}	Número de espiras do enrolamento secundário do TA;
N_{2TE}	Número de espiras do enrolamento secundário do TE;
$PriN_{TA}$	Metade do primário utilizada para a compensação negativa;
$PriP_{TA}$	Metade do primário utilizada para a compensação positiva;
Pri_{TE}	Enrolamento primário do TE;
$Sec1_{TA}$	Metade do secundário alocado do lado da barra 1;
$Sec2_{TA}$	Metade do secundário alocado do lado da barra 2;
Sec_{TE}	Enrolamento secundário do TE;
Tape ₀ a Tape ₄	Tapes do TE;
\dot{V}_c	Tensão que alimenta a carga e o autotransformador;
\dot{V}_f	Tensão da fonte controlada utilizada nos testes laboratoriais com o RET;
\dot{V}_{reg}	Tensão que efetivamente é somada ou subtraída da fonte para regulação da tensão na carga;
\dot{V}_{tap}	Tensão do tape utilizado no respectivo nível de regulação;
\dot{Z}_{1TA}	Impedância do enrolamento primário do TA;
\dot{Z}_{1TE}	Impedância do enrolamento primário do TE;

\dot{Z}_{2TA}	Impedância do enrolamento secundário do TA;
\dot{Z}_{2TE}	Impedância do enrolamento secundário do TE;
\dot{Z}_{reat}	Impedância do reator de comutação.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Considerações iniciais	23
1.2	Contextualização do tema	27
1.3	Metas estabelecidas para esta dissertação	29
1.4	Estrutura da dissertação	31
2	ARRANJO FÍSICO E OPERACIONAL DO RET	33
2.1	Considerações iniciais	33
2.2	Estrutura física do RET	34
2.3	Estratégia de controle	37
2.4	Formulação matemática das condições operativas do regulador para um determinado estado de compensação	41
2.5	Considerações finais	45
3	PROTÓTIPO DO RET EM ESCALA REDUZIDA	47
3.1	Considerações iniciais	47
3.2	Características físicas construtivas do Transformador de Acoplamento	48
3.2.1	Núcleo	48
3.2.2	Enrolamentos	50
3.2.3	Enrolamento série (secundário)	53
3.2.4	Enrolamento primário	54
3.3	Características físicas construtivas do Transformador de Excitação	56
3.3.1	Núcleo	56
3.3.2	Enrolamentos	57
3.3.3	Enrolamento secundário	59
3.3.4	Enrolamento primário	60
3.4	Considerações finais	61
4	IMPLEMENTAÇÃO DAS UNIDADES ELETROMAGNÉTICAS NO SOFTWARE ANSYS MAXWELL	62
4.1	Considerações iniciais	62
4.2	Fundamentos do Método dos Elementos Finitos e do Software ANSYS	63
4.3	Implementação do RET no ANSYS Maxwell e estudos de casos	69
4.3.1	Modelagem dos núcleos magnéticos dos transformadores TA e TE	69

4.3.2	Modelagem dos enrolamentos dos transformadores TA e TE	73
4.3.3	Estratégia para a imposição das excitações no modelo	80
4.4	Considerações finais	82
5	AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES MAGNÉTICAS IMPOSTAS AOS TRANSFORMADORES DO RET	84
5.1	Considerações iniciais.....	84
5.2	Caracterização dos Estudos de Casos	84
5.3	Resultados dos Estudos – Caso 1	87
5.4	Resultados dos Estudos – Caso 2	94
5.5	Resultados dos Estudos – Caso 3	97
5.6	Considerações finais	101
6	CONCLUSÕES	103
	Referências bibliográficas	107

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A energia elétrica, como amplamente conhecida, é uma das principais formas de energia utilizadas no mundo, sendo essencial para o funcionamento, conforto, segurança e produtividade das mais diversas unidades de consumo residenciais, comerciais, industriais, hospitalares, dentre outras. Todavia, quando do suprimento desta energia, este deve ser realizado dentro de padrões de qualidade regulamentados visando, sobretudo a garantia e segurança operacional dos diversos agentes envolvidos no processo, compreendendo a rede elétrica desde a geração, transmissão, distribuição, até os pontos de entrega aos consumidores.

Em vista dos objetivos supra postos segue que a designação Qualidade da Energia Elétrica (QEE) se apresenta como um termo utilizado para descrever a adequação da energia elétrica fornecida à sua finalidade, sem causar impactos negativos no desempenho dos mais distintos componentes que perfazem os complexos elétricos [1]. De fato, são vários os fenômenos encontrados nos suprimentos elétricos que podem resultar em efeitos negativos, compreendendo desde operações impróprias dos processos, danos físicos e, até mesmo, conflitos entre os agentes [2].

Entre os principais problemas relacionados à QEE, destacam-se as distorções harmônicas, os desequilíbrios de tensões, as variações de frequência, as variações de tensão de curta e longa duração, as interrupções de fornecimento, dentre outros [3]. Estes fenômenos se apresentam como constantes desafios para garantir a Qualidade da Energia Elétrica oferecida pelas concessionárias responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia visto que a violação dos padrões de

fornecimento irá ditar investimentos em equipamentos que possam minimizar os impactos causados por esses fenômenos.

No Brasil, a qualidade da energia elétrica é regulada por diferentes órgãos e entidades. No contexto das redes de distribuição, tal tarefa é cumprida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e, no que tange a rede básica do sistema elétrico integrado, tal função cabe ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Esses órgãos são responsáveis por estabelecer padrões e normas técnicas que visam garantir a qualidade e a segurança do fornecimento de energia elétrica para os consumidores.

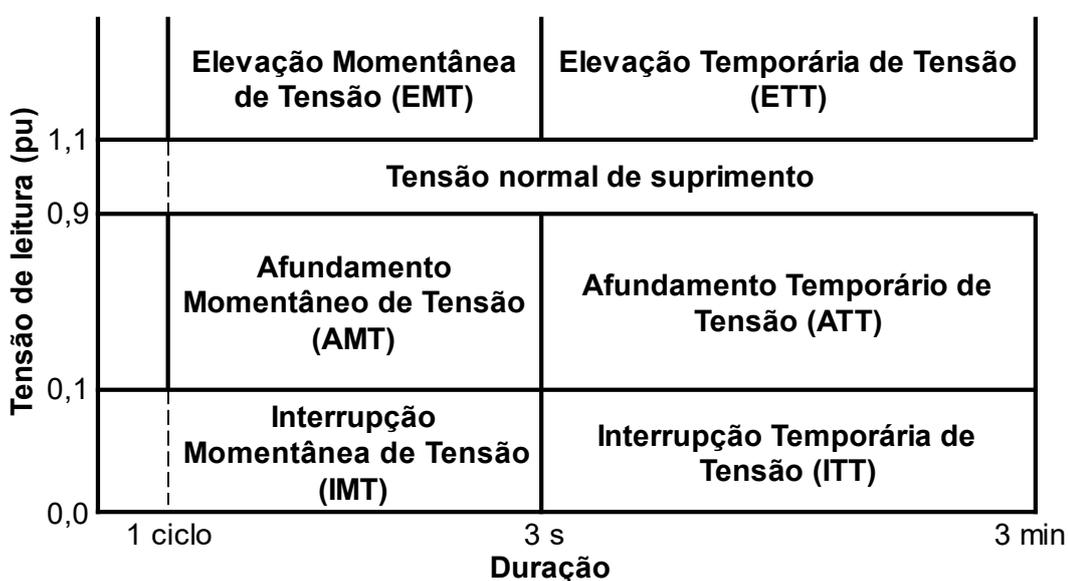
Entre as atribuições da ANEEL está a elaboração de normas e fiscalização dos requisitos que devem ser seguidos pelas concessionárias de distribuição, por meio de documentos normativos contidos no âmbito do documento Procedimentos de Distribuição (PRODIST). O PRODIST [4] se apresenta como um conjunto de processos técnicos e operacionais que define os padrões de qualidade e de atendimento ao cliente que as empresas de distribuição de energia elétrica devem seguir. Esses procedimentos são divididos em módulos que tratam de diferentes temas, sendo o módulo 8 [5] responsável por abordar a Qualidade da Energia Elétrica.

Já o ONS tem sob sua competência a denominada Rede Básica, em nível de tensão igual ou superior a 230kV, e é responsável por operar o Sistema Interligado Nacional (SIN), garantindo o equilíbrio entre a geração e o consumo de energia elétrica em tempo real. Com esse intuito, o ONS também estabelece normas operacionais e técnicas que devem ser seguidas pelos agentes do setor elétrico, por meio dos Procedimentos de Rede [6]. Tais normativas técnicas estabelecem os procedimentos e as diretrizes para a operação e o planejamento do sistema elétrico brasileiro a fim de garantir a segurança e a qualidade do fornecimento de energia. Tais documentos se apresentam balizadores para a garantia do produto comercializado entre os agentes e devem ser atendidas no âmbito da distribuição e transmissão, estabelecendo definições claras sobre os fenômenos que prejudicam a qualidade da energia, indicadores que descrevem de forma quantitativa tais desvios de padrões, os limites para tais indicadores e as penalizações impostas aos agentes que descumprirem estes requisitos [5], [7].

Dentro do cenário apresentado, um dos problemas mais recorrentes de qualidade da energia elétrica se apresenta na forma das variações de tensão [8]. Estas podem ser definidas como alterações do nível de tensão em relação ao padrão pré-definido como nominal, ou de referência. As variações de tensão podem ser classificadas em duas categorias: variações de curta e de longa duração.

As variações de curta duração (VTCDs) se apresentam com duração rápida e transitória, todavia, em níveis que podem causar efeitos sensíveis e danosos para a operação, continuidade, segurança, confiabilidade e mesmo danos físicos para as redes supridas. Para fins de formalização, o PRODIST considera como VTCD a figuração da tensão de alimentação em valores superiores a 1,1pu e inferiores a 0,9pu, com duração máxima no limiar dos três minutos. Além disso, dentro das VTCDs ainda existe a subdivisão entre variações momentâneas, com duração máxima de três segundos, e variações temporárias, com duração entre três segundos até o limiar dos três minutos, conforme se vê na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Classificação das variações de tensão de curta duração - PRODIST.



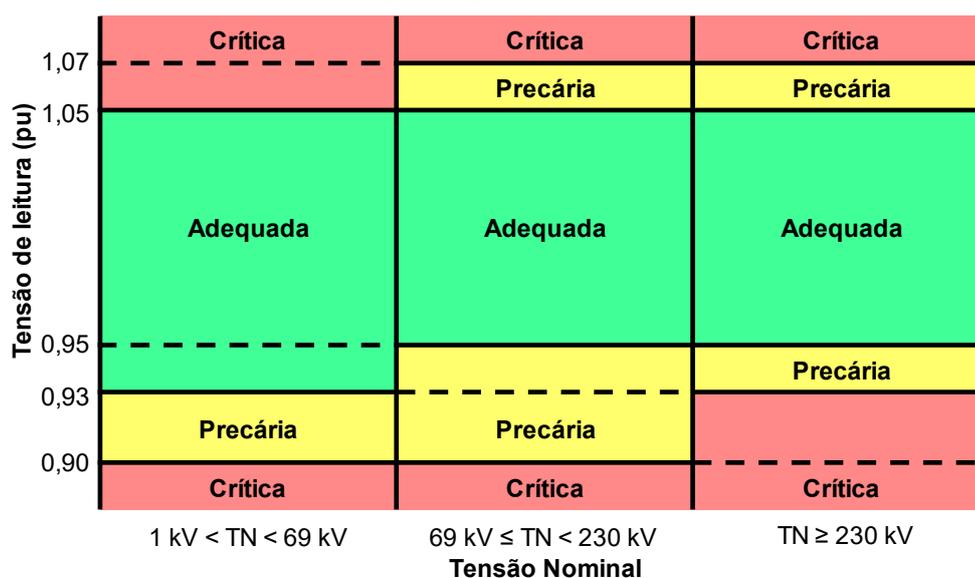
Fonte: [5].

Já as variações de tensão de longa duração (ou de regime permanente) são fenômenos que persistem por períodos mais longos (igual ou superior a três minutos, segundo o PRODIST). Esses eventos incluem tanto as sobretensões (quando a tensão elétrica excede o valor nominal) quanto as subtensões (quando a tensão elétrica fica abaixo do valor nominal) [9].

Nas abordagens desta dissertação, apenas as variações de longa duração serão consideradas, considerando as duas formas com que se manifestam. De fato, ambos fenômenos podem ser impactantes. As subtensões, por exemplo, podem levar a reduções no desempenho de equipamentos elétricos, enquanto as sobretensões podem causar danos permanentes aos mesmos. Além disso, as variações de tensão também podem afetar a eficiência energética, aumentar os custos de operação e afetar a qualidade dos serviços prestados.

Diante dos efeitos acima citados, o PRODIST define limites adequados, precários e críticos para cada nível de tensão em regime permanente. A Figura 1.2 apresenta graficamente estes limiares, que variam de acordo com o nível de tensão estabelecido como nominal ou de referência.

Figura 1.2 - Faixas de classificação da tensão para caracterização das variações de tensão de longa duração - PRODIST.



Fonte: [5].

Portanto, qualquer violação dos padrões estabelecidos como aceitáveis requer soluções mitigatórias para garantir a qualidade do fornecimento da energia elétrica. Tais dispositivos compensadores são bastante difundidos e, na atualidade, reconhece-se uma variedade de equipamentos disponíveis no mercado para cumprir este papel. No entanto, contando com os avanços da tecnologia e recursos do mercado, a busca por alternativas que conciliem atrativos técnicos e econômicos mais apropriados para cada aplicação se apresentam como motivadores para trabalhos investigativos, como o aqui conduzido, com destaque a obtenção de produtos que

apresentam baixo custo de aquisição e manutenção, facilidade operativa, robustez, dentre outras propriedades.

1.2 Contextualização do tema

Os dispositivos destinados ao enquadramento das tensões de suprimento nos termos definidos pela legislação vigente se baseiam, de um modo geral, em dois princípios ou vertentes tecnológicas. Uma primeira, denominada por compensação direta, concentra-se em equipamentos que agem diretamente nas tensões. Uma segunda filosofia, chamada de indireta, está alicerçada no controle do nível de tensão por meio do ajuste da potência reativa em pontos específicos da rede.

Quanto aos recursos para a adequação das tensões através das técnicas da compensação direta, sejam eles com comando mecânico ou eletrônico, enquadram-se diversos reguladores. Há aqueles constituídos por transformadores com mudanças de tap, sob carga ou a vazio, os reguladores eletromagnéticos que operam à base da inserção de tensões controladas, aditivas ou subtrativas, dentre outros. Nesta categoria ressaltam-se tradicionais produtos comerciais, a exemplo dos reguladores eletromagnéticos Toshiba TB-R1000 [10], Eaton's Cooper VR-32 [11], ITB RAV-2 [12] e vários outros. Utilizando recursos via emprego de conversores eletrônicos, há os dispositivos que produzem e injetam tensões complementares à do fornecimento, permitindo incrementos ou decrementos controláveis da tensão, com valores e posições angulares eletronicamente ajustáveis. Estes últimos têm ainda como atrativo a propriedade de proporcionar compensações individuais por fase, mitigando, assim, até mesmo a questão dos desequilíbrios. Este é o caso dos denominados reguladores DVR [13], o SIPCON S [14], entre outros.

No contexto dos equipamentos baseados no princípio da compensação indireta reconhece-se produtos extremamente simples, a exemplo dos bancos de capacitores, e outros, fundamentados nos recursos mais modernos da eletrônica de potência. Os compensadores mais elementares baseados no princípio da compensação indireta, pode-se apontar os bancos de capacitores fixos e variáveis, os bancos de reatores [15], os compensadores síncronos [16] e os reatores a núcleo saturado [17]. Este mesmo princípio também gerou dispositivos mais modernos, que empregam os avanços da tecnologia da eletrônica de potência. Este é o caso das

tecnologias FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), destacando os Reatores Controlados por Tiristores (RCTs), Capacitores Chaveados por Tiristores (CCTs) [18] e compensadores estáticos como os denominados STATCOM [19] e SIPCON P [14].

Fazendo uma correlação entre o uso prático dos produtos à base dos princípios eletromagnéticos e aqueles que utilizam os recursos da eletrônica, aqueles enquadrados na filosofia operativa eletromagnética são os mais empregados devido a fatores técnicos e econômicos. Embora esses equipamentos apresentem tempos de resposta mais lentos em comparação aos baseados em chaveamentos eletrônicos, os mesmos se apresentam com eficácia quando o processo envolve a regulação da tensão em regime permanente.

Não obstante a extensa gama de recursos tecnológicos, objetivando uma alternativa ao processo da compensação aqui tratado, através de trabalhos de pesquisa conduzidos em [20], foi estabelecida uma proposição de equipamento visando meios para o atendimento aos propósitos da regulação de tensão com características distintas no que tange a sua concepção estrutural e operacional. Este foi modelado e experimentalmente avaliado, tendo recebido a designação de “Regulador Eletromagnético de Tensão (RET)”, possuindo um autotransformador conectado em paralelo à rede elétrica, com tapes que alimentam outra unidade eletromagnética em série com o alimentador a ser regulado. Esta estratégia se apresenta dentro dos dispositivos que realizam o processo através da injeção de uma tensão controlada de reforço, positiva ou negativa, para a compensação desejada. Sintetizando, a proposta feita foi materializada numa estratégia de compensação com as seguintes características e propriedades:

- Não utiliza tecnologia eletrônica para fins do processo de comutação;
- Possui uma estratégia de controle simples e eficaz;
- Pode ser usado tanto de forma monofásica quanto trifásica;
- Opera com potência menor que a fornecida à carga;
- Seus dispositivos de comutação mecânica operam em tensões abaixo do nível nominal;
- Promove uma compensação sem qualquer interrupção da corrente da carga;
- É robusto o suficiente para suportar condições ambientais adversas;

- Se apresenta com uma estrutura que se mostra com baixos requisitos de manutenção;
- Pode ser removido sem desligamentos da rede, em caso de manutenção.

Os estudos avaliativos feitos em [20] foram conduzidos através do simulador ATP, seguido da construção de um protótipo monofásico em escala reduzida que ratificou as expectativas do processo de regulação oferecido. Por fim, foi estabelecido um modelo matemático representativo da operacionalidade do equipamento, fato este que se apresenta com relevância para balizar projetos e construção de equipamentos de porte comercial [21].

Avançando, em [22] foram exploradas as potencialidades aplicativas do regulador, todavia, substituindo as chaves mecânicas por recursos baseados na eletrônica para controlar a tensão injetada. Assim procedendo foi obtido um dispositivo que, computacionalmente, se mostrou mais efetivo para um controle mais preciso do valor eficaz da tensão fornecida à rede e o tempo de resposta do equipamento. Nestes termos, as tensões de compensação, antes obtidas de forma discreta, passaram a ser controladas de forma contínua. Por fim, dentro da mesma linha de trabalhos, em [23] foi apresentada uma modificação na estrutura física que conduziram a reduções das correntes circulantes e, por conseguinte, redução da demanda de potência das unidades eletromagnéticas, sem comprometer a eficácia do controle.

1.3 Metas estabelecidas para esta dissertação

Como já foi mencionado, o RET constitui-se por duas unidades eletromagnéticas de potência. Uma das partes se baseia em um autotransformador tradicional, bastante conhecido em termos de suas características operacionais e diretrizes de projeto. A outra unidade se apresenta com um transformador com características diferentes das convencionais visto que, no seu primário há uma tensão imposta derivada do autotransformador, enquanto o seu secundário é conectado em série com a linha de alimentação do sistema e, por conseguinte, possui uma corrente imposta pelo carregamento da rede. Portanto, esta condição específica de funcionamento gerou questionamentos diversos associados com o estado de magnetização imposto ao equipamento, visto a imposição de duas grandezas simultâneas ao componente. A resposta a esta questão, certamente, se apresenta

com grande relevância quando se considera os princípios que devem nortear as bases de projeto físico do transformador em série, com destaque ao dimensionamento físico de seus núcleos magnéticos.

Motivado por tais buscas de conhecimento visando estabelecer futuras diretrizes para o projeto do núcleo magnético da unidade série, visto que seu estado de magnetização determinará as dimensões físicas deste componente quanto a quantidade de material, peso, perdas, fatores econômicos e de operação, ficou evidenciada a necessidade de estudos complementares aos até então conduzidos. Não obstante a aparente simplicidade do problema, o fato é que, as constatações a serem feitas devem, obrigatoriamente, passar por um método de avaliação que venha a contemplar, computacionalmente, as condições operativas conjugadas sob os pontos de vista elétrico e magnético de forma integrada.

Para atender a tais propósitos, a ferramenta de análise que se mostra atrativa a tais objetivos está centrada em técnicas de modelagem por elementos finitos, que permitam, ainda, conciliar as condições elétricas a que as redes de conexão ficam expostas. Tais requisitos orientam para o emprego do software ANSYS Maxwell®. Como conhecido, este recurso computacional emprega o método dos elementos finitos (MEF) para solucionar problemas eletromagnéticos e calcular diversos parâmetros relevantes, incluindo indutâncias, capacitâncias, perdas, fluxo magnético, entre outros [24]. Também, trata-se de uma ferramenta de estudo bastante utilizada pelos fabricantes de transformadores visando uma otimização da especificação de núcleos magnéticos, isolamento, e outros aspectos importantes [25].

Em consonância com o exposto, essa dissertação se apresenta revestida dos seguintes objetivos:

- Desenvolver no software ANSYS Maxwell um modelo em 3D que represente as unidades eletromagnéticas que compõem o protótipo do RET;
- Avaliar as condições magnéticas impostas nas unidades eletromagnéticas componentes do compensador, sob condições normais e anômalas de operação, com ênfase de funcionamento sob a ação das fontes de força magnetomotriz (fmm);

- Estabelecer medidas orientativas para o projeto e construção do transformador de acoplamento constituinte de uma das unidades eletromagnéticas do compensador.

1.4 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório, o presente trabalho encontra-se elaborado da seguinte forma:

- **Capítulo II – Arranjo Físico e Operacional do RET**

Destinado a uma abordagem da estrutura física e o funcionamento do RET, incluindo suas unidades de potência, chaves de manobra e outros aspectos relevantes à operação do compensador. Somado a tais considerações, as condições operacionais do complexo são correlacionadas com uma descrição matemática, conduzindo a uma modelagem analítica contemplando a avaliação do comportamento elétrico do complexo de funcionamento do RET.

- **Capítulo III – Protótipo do RET em Escala Reduzida**

Este tem por objetivo detalhar os aspectos físicos construtivos e paramétricos do protótipo do regulador, levando em consideração as diretrizes e objetivos do software ANSYS Maxwell. Assim, os detalhes do protótipo monofásico do regulador em foco são apresentados quanto a constituição do seu núcleo magnético e enrolamentos empregados na concepção do protótipo.

- **Capítulo IV – Implementação das Unidades Eletromagnéticas no Software ANSYS Maxwell**

Em atenção aos objetivos estabelecidos para esta dissertação, este capítulo tem por meta apresentar os fundamentos que regem o software ANSYS Maxwell, que utiliza algoritmos eficientes para resolução das equações de Maxwell pelo método dos elementos finitos. Somado a tais conceitos, são também estabelecidas as diretrizes para a modelagem

do compensador aqui considerado, quer no que tange a sua estrutura magnética como elétrica.

- **Capítulo V – Avaliação das Condições Magnéticas Impostas aos Transformadores do RET**

Nesta etapa são então conduzidos os estudos investigativos sobre as condições eletromagnéticas das unidades transformadoras do RET, objetivando, sobretudo, situações específicas de regime permanente e condições operacionais impostas aos seus principais componentes eletromagnéticos. Tais estudos, em consonância com as metas estabelecidas, se apresentam imbuídas do propósito principal de avaliar as condições de magnetização impostas para os transformadores que constituem o regulador sob análise.

- **Capítulo VI – Conclusões**

Por fim, são tecidas as considerações e constatações finais dos trabalhos investigativos conduzidos, com destaque às condições magnéticas impostas aos componentes que perfazem o dispositivo compensador.

CAPÍTULO II

2 ARRANJO FÍSICO E OPERACIONAL DO RET

2.1 Considerações iniciais

Não obstante a proposição estrutural e operacional do RET tenha sido contemplada em detalhes em [20], por questões didáticas introdutórias, esta unidade da dissertação se apresenta revestida do objeto de tecer comentários que sintetizam os principais aspectos atrelados com o compensador aqui explorado.

Neste sentido, este capítulo expõe informações sobre a estrutura física e o processo de funcionamento do RET, incluindo as unidades de potência, chaves de manobra e outras características relevantes desse equipamento. Dentre seus principais componentes a nível de potência, destacam-se as unidades eletromagnéticas denominadas por Transformador de Excitação (TE) e Transformador de Acoplamento (TA).

Ainda, são também abordadas questões próprias ao sistema de controle implementado, com destaque a sistemática do processo de comutação de tapes, ação esta que, a exemplo de outros reguladores, representam desafios importantes para o bom termo funcional do equipamento.

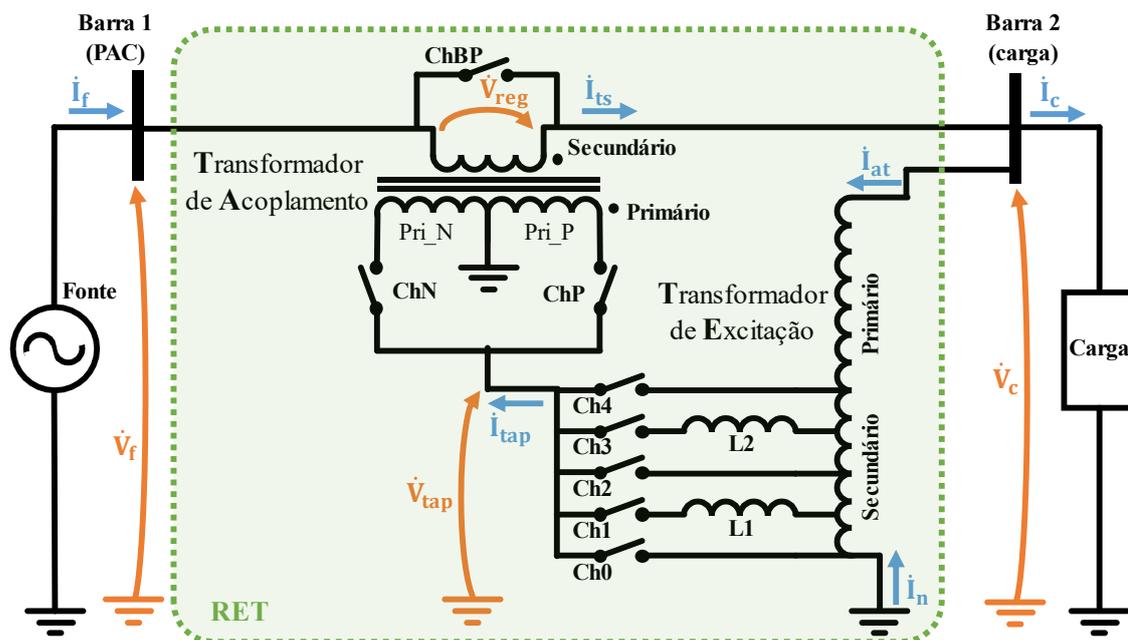
Complementando, são ainda apresentadas as equações que regem o comportamento elétrico do equipamento, as quais, empregando técnicas de modelagem no domínio da frequência, conduzem a um conjunto de expressões que prontamente correlacionam as condições de compensação requeridas pela rede de alimentação da carga e aquelas atreladas com a operação, sob o ponto de vista elétrico.

2.2 Estrutura física do RET

A Figura 2.1 representa o arranjo estrutural do regulador de tensão focado neste trabalho. Neste observa-se a presença de uma unidade denominada por Transformador de Excitação (TE), cujas características são próprias a um autotransformador convencional conectado em paralelo com a carga. Portanto, esta unidade eletromagnética é alimentada pela própria tensão do barramento a ser regulado. Sua função é, a partir da tensão do barramento da rede de conexão, oferecer, através de seus tapes, opções quanto aos valores da tensão a ser utilizada pelo equipamento. Este componente do compensador, não obstante sua clara identificação estrutural com um autotransformador convencional, não se destina ao suprimento de qualquer carga externa senão a parcela da potência requerida para a regulação da tensão. Por tal motivo, o conjunto total de espiras poderia, para fins deste trabalho, ser considerado como uma composição de duas parcelas de bobinas. Uma delas servindo para o processo da divisão da tensão do barramento de conexão (aqui tratada como primário), e outra, de onde serão extraídos os tapes para a ação da compensação (aqui tratada como secundário). Assim, nas discussões subseqüentes, serão utilizadas tais designações, as quais, como já mencionado, no total, compõem o número de espiras integral da bobina do componente.

A Figura 2.1 ainda indica a presença de um outro dispositivo eletromagnético, denominado por Transformador de Acoplamento (TA). Este se apresenta, também, com uma constituição física similar a um transformador convencional, possuindo um enrolamento primário, galvanicamente isolado de seu correspondente enrolamento secundário. Todavia, existe uma particularidade própria à operação deste último, conforme discutido neste capítulo, fato este que lhe confere uma situação de funcionamento distinta dos transformadores comumente empregados. Tal componente se apresenta excitado magneticamente por duas fontes de fims (forças magnetomotrizes) simultaneamente. Seu primário atua com uma tensão imposta pelo já dito TE e, seu secundário, sujeito a uma corrente integralmente definida pelo alimentador alvo do processo de compensação. Os demais componentes, a exemplo das chaves presentes, serão considerados ao longo das discussões.

Figura 2.1 - Ilustração da topologia física do RET inserido em um sistema.



Fonte: adaptado de [20].

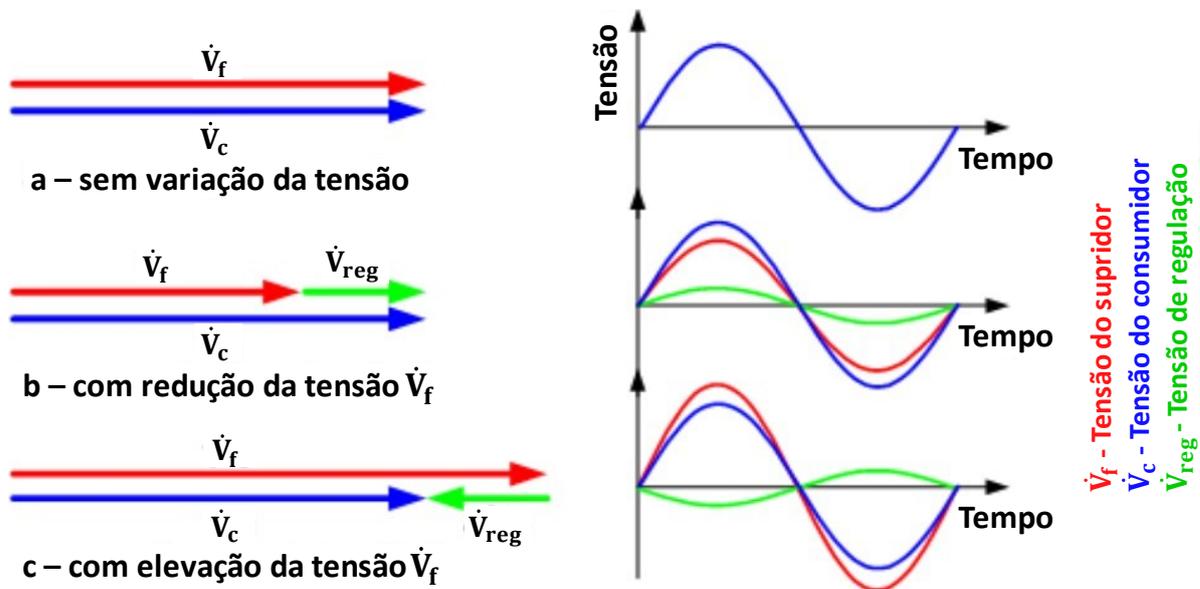
Descritos na figura estão:

- Ch1 a Ch4: Chaves que selecionam o nível de tensão com que será realizada a compensação;
- Ch0: Chave de neutro, utilizada quando não está sendo realizada compensação de tensão;
- ChP: Chave acionada para compensação positiva de tensão (adição de tensão);
- ChN: Chave acionada para compensação negativa de tensão (subtração de tensão);
- ChBP: Chave de By-Pass acionada para remoção do RET sem o desligamento da carga;
- L1 e L2: Reatores para comutação de tapes sob carga;
- \dot{I}_f : Corrente drenada da fonte;
- \dot{I}_{ts} : Corrente que passa pelo secundário do transformador série;
- \dot{I}_c : Corrente na carga;
- \dot{I}_{at} : Corrente que circula no primário do autotransformador;
- \dot{I}_n : Corrente que circula no secundário do autotrafo, ligado ao neutro;
- \dot{I}_{tap} : Corrente que circula entre o tape do TE em operação e o primário do TA;

- \dot{V}_f : Tensão da fonte;
- \dot{V}_c : Tensão que alimenta a carga e o autotransformador;
- \dot{V}_{tap} : Tensão do tape utilizado no respectivo nível de regulação;
- \dot{V}_{reg} : Tensão que efetivamente é somada ou subtraída da fonte.

Complementarmente, a Figura 2.2 ilustra, através de diagramas fasoriais e formas de onda das tensões, a estratégia para o mecanismo de compensação empregado. A exemplificação dada na Figura 2.2(a) é indicativa de uma situação para a qual a tensão do barramento se encontra num nível compatível com os requisitos, a Figura 2.2(b) representa o caso de uma redução de tensão no suprimento e a injeção da tensão de regulação positiva oferecida pelo RET e, por fim, a Figura 2.2(c) evidencia uma situação oposta à anterior, isto é, uma elevação da tensão de suprimento e a ação do compensador na forma da injeção de uma tensão de regulação negativa.

Figura 2.2 - Diagramas fasoriais e formas de onda ilustrativas da ação do compensador RET. (a) Sem variação de tensão; (b) Com subtensão; (c) Com sobretensão.



Fonte: adaptado de [21].

Percebe-se que o enrolamento secundário do Transformador de Acoplamento está conectado em série a linha de alimentação da carga conduzindo, assim, a aplicação da tensão compensatória no sistema. Nestes termos é importante ressaltar que embora esteja impondo uma tensão em fase ou em oposição com a grandeza à montante do enrolamento secundário, sua correspondente corrente (\dot{I}_{ts}) encontra-se inteiramente definida pela carga consumidora. Esse princípio de funcionamento diferencia o TA dos transformadores comumente utilizados em sistemas elétricos,

visto que estes operam com base na alimentação por tensão e têm sua corrente advinda da carga conectada em seus terminais.

Uma outra observação aplicável ao dispositivo é que o enrolamento primário do TA se encontra dividido em duas partes, interligadas num ponto denominado por neutro do arranjo. Conforme a compensação a ser realizada, ora é acionado uma destas metades, de acordo com os requisitos de uma injeção de tensão de regulação positiva ou negativa.

Para a compreensão do sentido da corrente \dot{I}_{tap} e da tensão \dot{V}_{reg} , torna-se necessário analisar os pontos indicativos da polaridade dos enrolamentos dos dois transformadores. Observando o arranjo da Figura 2.1, fica evidente que a imposição da tensão \dot{V}_{tap} no primário do TA pela chave ChP acarretará o surgimento em seu secundário de um reforço de tensão \dot{V}_{reg} em fase com a tensão da fonte \dot{V}_f . Estas tensões se somarão, resultando na tensão \dot{V}_c com magnitude corrigida (elevada) aos padrões estabelecidos. Já aplicando-se a tensão \dot{V}_{tap} no primário TA pela chave ChN, a tensão \dot{V}_{reg} será induzida 180° defasada de \dot{V}_f , subtraindo-se da tensão da fonte.

Seguindo a mesma lógica com relação às correntes, \dot{I}_{ts} (corrente drenada da fonte), que é imposta ao secundário do TA saindo do terminal com o ponto, promoverá uma corrente equivalente \dot{I}_{tap} entrando no terminal indicado pelo ponto. Determinado o sentido de \dot{I}_{tap} , a mesma regra serve para determinação dos sentidos das correntes que percorrem os enrolamentos do TE (\dot{I}_{at} e \dot{I}_{n}).

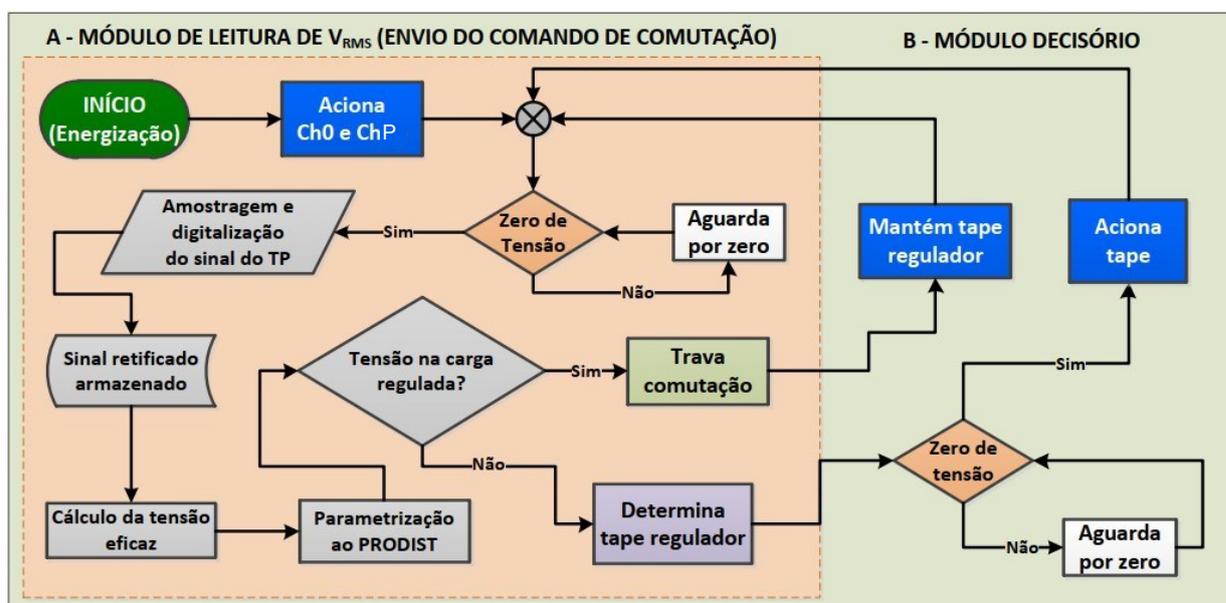
Em síntese, as chaves conectadas aos tapes do TE (Ch1 a Ch4) têm por finalidade determinar a magnitude da tensão que será injetada no sistema, enquanto as chaves ChP e ChN definem o sentido do reforço de tensão, isto é, se positivo ou negativo.

2.3 Estratégia de controle

A lógica operacional do RET é indicada através do diagrama de blocos da Figura 2.3. Este mostra as etapas para selecionar o tape e a polaridade adequada para a tensão de compensação. O diagrama destaca um módulo operacional chamado "A", que está ligado à leitura do valor eficaz da tensão a ser regulada, bem

como a determinação do tape e da polaridade a serem utilizados para essa compensação. O módulo "B", por sua vez, é responsável pelo processo decisório, que efetivamente comanda a comutação entre tapes ou a manutenção do tape atual [20].

Figura 2.3 - Diagrama de blocos para o controle do RET.



Fonte: [20].

Quando o regulador é energizado, a chave de neutro (Ch0) e a chave de compensação positiva (ChP) são acionadas e assim permanecem durante um período apropriado às condições de inicialização do sistema. Em seguida, o controle monitora e espera por um valor instantâneo de zero volts de tensão na carga para iniciar o processo de digitalização desse sinal, armazenando-o em um vetor. Após a conversão, o valor eficaz da tensão é calculado e comparado com os padrões estabelecidos pelo PRODIST para determinar se está dentro da faixa de regulação permitida pela legislação.

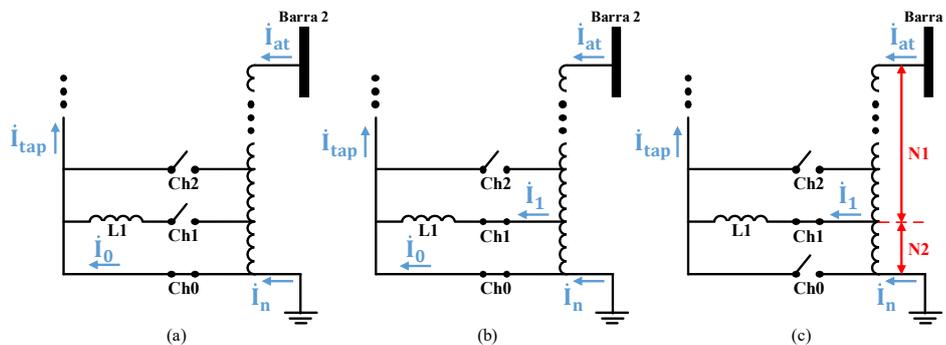
Por meio de mudanças incrementais (sequenciais) nos tapes, procura-se aquele mais apropriado para restaurar a tensão aos padrões exigidos. Quando o controle toma a decisão de regulação (troca de tape acima ou abaixo do atual), o módulo decisório recebe como informação o tape adequado à compensação. Desse modo, o controle espera até o próximo ponto de passagem por zero da tensão instantânea na carga e aciona o próximo tape regulador. Se não houver necessidade de correção, ou seja, se a tensão da carga estiver dentro da faixa permitida, a comutação é bloqueada e a condição anterior é mantida, reiniciando o processo.

2.4 Processo de comutação

Em consonância com exposições anteriores, em se tratando do Transformador de Acoplamento, da mesma forma que a tensão \dot{V}_{tap} é imposta ao seu primário, proporcionando, assim, a tensão de regulação \dot{V}_{reg} no secundário, a corrente \dot{I}_{tap} no primário surge como uma resposta à corrente imposta \dot{I}_{ts} e, assim, é produzida uma fmm (força magnetomotriz) que é composta àquela associada com a tensão aplicada. Assim sendo, o núcleo magnético do Transformador de Acoplamento fica sujeito a duas fmm nos termos supra postos. Esta situação se apresenta como o desafio a ser respondido por esta dissertação, qual seja, a obtenção de informações sobre o nível de saturação manifestado no núcleo magnético desta unidade e, assim, estabelecer as bases para o seu projeto.

É imprescindível que haja um caminho ininterrupto para circulação de \dot{I}_{tap} , sob pena de saturação magnética do núcleo do Transformador de Acoplamento, que pode apresentar um comportamento similar à de um transformador de corrente, quando da abertura de seu secundário. Caso isto venha a se manifestar, haverá o surgimento de tensões elevadas no componente, podendo causar danos físicos a ele. De fato, se não forem tomadas medidas para evitar tal situação, na etapa de alteração de um para outro tape, o Transformador de Excitação irá interromper, momentaneamente, a corrente circulante. Para contornar tal condição anômala de funcionamento fica evidenciada a necessidade de arranjos operacionais envolvendo reatores de comutação, como indicado na Figura 2.4. Nesta é exemplificada a transição entre o tape 0 e o tape 1 em modo de compensação positiva.

Figura 2.4 - Exemplificação do processo de transição de tape do TE. (a) Operação normal com o tape atual. (b) Fechamento da chave do próximo tape. (c) Fechamento da chave do tape anterior.



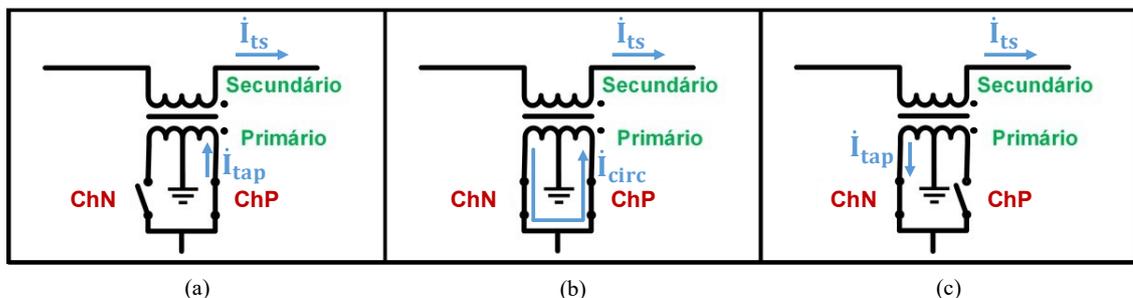
Fonte: Autor.

Na Figura 2.4(a) observa-se uma situação em que não está ocorrendo compensação de tensão. Nessa condição, as correntes \dot{I}_{tap} , \dot{I}_n e \dot{I}_0 (corrente que passa pela chave Ch0) são iguais, enquanto \dot{I}_{at} é nula. Para que ocorra a comutação sem a interrupção de \dot{I}_{tap} , a chave referente ao tape 1 deve ser fechada antes da abertura da chave do tape 0, conforme se vê na Figura 2.4(b). Isso provocaria um curto-circuito entre os dois tapes, não fosse o reator de comutação L1 que serve como limitador de corrente e atenuador de transitórios. Nestas condições, a corrente \dot{I}_{tap} se apresenta como sendo a soma de \dot{I}_0 e \dot{I}_1 (corrente que percorre Ch1 e L1). Por fim, conforme a Figura 2.4(c), abre-se a chave do tape 0 e a corrente \dot{I}_1 assume o valor de \dot{I}_{tap} . Nesse momento, o TE passa a trabalhar com uma relação de transformação igual a $N1/N2$.

Para uma nova transição de tape, o processo se repete. Sendo tais operações sequenciais, fica evidente que a alocação dos reatores de comutação de forma intercalada nos tapes se apresenta como medida eficaz para contornar esta indesejável e perniciososa situação de funcionamento do TA. Todavia, lembra-se que, em regime permanente, estes reatores implicarão numa pequena queda nas tensões disponibilizadas pelos respectivos tapes.

Quando da necessidade da mudança da polaridade da compensação, também deve-se respeitar uma sucessão de passos para que não ocorra a interrupção da corrente que percorre o enrolamento primário do TA. Essa sequência de eventos é indicada na Figura 2.5, a qual mostra a transição da chave de polaridade positiva (ChP) para a negativa (ChN).

Figura 2.5 - Exemplificação do processo de mudança de chave de polaridade do TA. (a) Chave ChP fechada. (b) Fechamento de ChN com ChP ainda fechada. (c) Abertura de ChP.



Fonte: [23].

Para a inversão da polaridade da compensação, o RET deve, primeiramente, ser levado até o tape de zero. Isto é indicado na Figura 2.5(a), em que o tape 0 está conectado ao TA pela chave ChP e a corrente \dot{I}_{tap} circula na metade do seu primário referente à compensação positiva. Posteriormente, como ilustra a Figura 2.5(b), fecha-se a chave ChN, mantendo ChP também fechada. Isso fará com que a corrente \dot{I}_{circ} , correspondente a \dot{I}_{ts} , circule nas duas metades do primário do TA. Por fim, abre-se a chave de polaridade positiva e a corrente \dot{I}_{tap} passa a circular tão apenas pela chave ChN, conforme a Figura 2.5(c). O seguimento destas etapas assegura que sempre haverá um caminho de circulação de corrente no primário do TA.

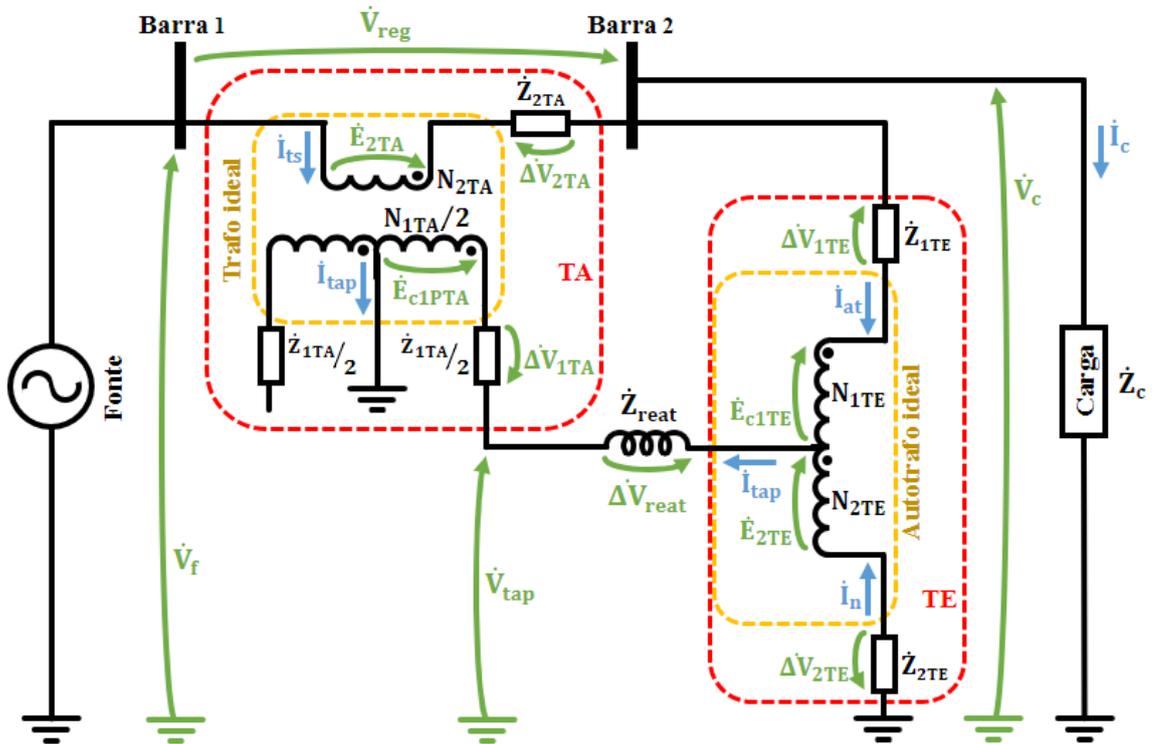
2.4 Formulação matemática das condições operativas do regulador para um determinado estado de compensação

Para correlacionar as situações diversas acima postas, permitindo, assim, uma análise das condições de funcionamento do regulador, com destaque às suas grandezas elétricas associadas com as tensões e corrente, em [20], [21], [23], [26] procedeu-se, através da técnica de modelagem no domínio da frequência, ao desenvolvimento de modelos matemáticos visando a representação do funcionamento do compensador, para uma determinada condições de regulação admitida em seu regime permanente.

As formulações realizadas são fundamentadas na desconsideração dos efeitos dos ramos magnetizantes (*shunt*) de ambos os transformadores, e se deu forma separada para a operação do RET em regulação positiva e negativa de tensão. Isso é necessário porque a polaridade da compensação irá ditar o sentido da corrente no tape e, conseqüentemente, no primário e secundário do TE, fato esse que distingue o equacionamento das correntes no sistema.

Para o atendimento aos objetivos acima delineados, a Figura 2.6 ilustra uma representação do RET operando no modo de regulação positiva de tensão, empregando um tape genérico. Nela também estão expostas as correntes, tensões e impedâncias do sistema de compensação, rede elétrica à montante da carga e, por fim, o consumidor representado pela impedância \dot{Z}_C .

Figura 2.6 - Circuito equivalente do RET operando no modo: compensação positiva.



Fonte: Autor.

Sendo:

- \dot{Z}_{1TE} : Impedância do enrolamento primário do TE;
- $\Delta\dot{V}_{1TE}$: Queda de tensão no enrolamento primário do TE;
- \dot{Z}_{2TE} : Impedância do enrolamento secundário do TE;
- $\Delta\dot{V}_{2TE}$: Queda de tensão no enrolamento secundário do TE;
- N_{1TE} : Número de espiras do enrolamento primário do TE;
- N_{2TE} : Número de espiras do enrolamento secundário do TE;
- \dot{E}_{c1TE} : Força contra eletromotriz induzida no enrolamento primário do TE;
- \dot{E}_{2TE} : Força eletromotriz induzida no enrolamento secundário do TE;
- \dot{Z}_{reat} : Impedância do reator de comutação;
- $\Delta\dot{V}_{reat}$: Queda de tensão no reator de comutação;
- \dot{Z}_{1TA} : Impedância do enrolamento primário do TA;
- $\Delta\dot{V}_{1TA}$: Queda de tensão no enrolamento primário do TA;
- \dot{Z}_{2TA} : Impedância do enrolamento secundário do TA;
- $\Delta\dot{V}_{2TA}$: Queda de tensão no enrolamento secundário do TA;
- N_{1TA} : Número de espiras do enrolamento primário do TA;

- N_{2TA} : Número de espiras do enrolamento secundário do TA;
- \dot{E}_{c1PTA} : Força contra eletromotriz induzida na metade do enrolamento primário do TA referente à compensação positiva;
- \dot{E}_{2TA} : Força eletromotriz induzida no enrolamento secundário do TA.

Embora os detalhes dos desenvolvimentos matemáticos não sejam contemplados nesta seção, visto que os mesmos se encontram expostos nas referências anteriormente mencionadas, a Tabela 2.1 sintetiza as expressões para tensão e corrente no RET atuando no modo da compensação positiva. Nesta, a grandeza representada por α_{TE} se refere à relação de transformação do autotransformador, calculada como $\alpha_{TE} = N_{1TE}/N_{2TE}$, enquanto α_{TA} representa a relação de transformação do transformador série, calculada como $\alpha_{TA} = N_{1TA}/N_{2TA}$. Ainda, o termo $\Delta\dot{V}_{reat}$ só é considerado para o caso do tape ser provido do reator de comutação conectado em série, como anteriormente esclarecido.

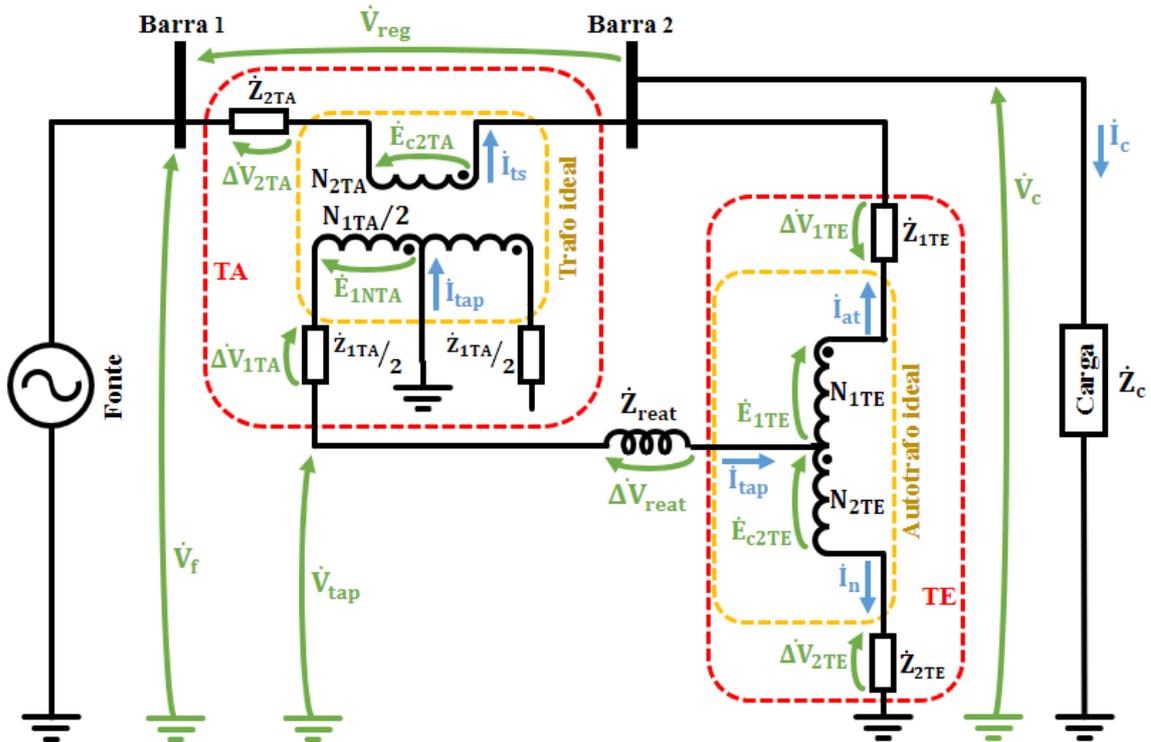
Tabela 2.1 - Correntes e tensões presentes no RET operando em compensação positiva.

\dot{I}_{ts}	$\left(\frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 1 - 2/\alpha_{TA}}\right) * \dot{I}_c$
\dot{I}_{tap}	$\frac{2}{\alpha_{TA}} * \left(\frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 1 - 2/\alpha_{TA}}\right) * \dot{I}_c$
\dot{I}_{at}	$\frac{2}{\alpha_{TA}} * \left(\frac{1}{\alpha_{TE} + 1 - 2/\alpha_{TA}}\right) * \dot{I}_c$
\dot{I}_n	$\frac{2}{\alpha_{TA}} * \left(\frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1 - 2/\alpha_{TA}}\right) * \dot{I}_c$
\dot{V}_{tap}	$\frac{\dot{V}_c - \Delta\dot{V}_{1TE} - \alpha_{TE} * \Delta\dot{V}_{2TE}}{(\alpha_{TE} + 1)} - \Delta\dot{V}_{reat}$
\dot{V}_{reg}	$\frac{2}{\alpha_{TA}} * \left(\frac{\dot{V}_c - \Delta\dot{V}_{1TE} - \alpha_{TE} * \Delta\dot{V}_{2TE}}{(\alpha_{TE} + 1)} - \Delta\dot{V}_{reat} - \Delta\dot{V}_{1TA} - \frac{\alpha_{TA} * \Delta\dot{V}_{2TA}}{2}\right)$

Fonte: Adaptado de [21].

Complementarmente, a Figura 2.7 traz uma ilustração de uma determinada condições de funcionamento do RET, quando o mesmo encontra-se operando no modo de compensação negativa de tensão, para um tape genérico.

Figura 2.7 - Circuito equivalente do RET operando no modo: compensação negativa.



Fonte: Autor.

Sendo:

- \dot{E}_{1TE} : Força eletromotriz induzida no enrolamento primário do TE;
- \dot{E}_{c2TE} : Força contra eletromotriz induzida no enrolamento secundário do TE;
- \dot{E}_{1NTA} : Força eletromotriz induzida na metade do enrolamento primário do TA referente à compensação negativa;
- \dot{E}_{c2TA} : Força contra eletromotriz induzida no enrolamento secundário do TA.

A Tabela 2.2 apresenta as respectivas expressões para as tensões e correntes do RET operando no modo de compensação negativa.

Tabela 2.2 - Correntes e tensões presentes no RET operando em compensação negativa.

\dot{i}_{ts}	$\left(\frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 1 + 2/\alpha_{TA}} \right) * \dot{I}_c$
\dot{I}_{tap}	$\frac{2}{\alpha_{TA}} * \left(\frac{\alpha_{TE} + 1}{\alpha_{TE} + 1 + 2/\alpha_{TA}} \right) * \dot{I}_c$
\dot{I}_{at}	$\frac{2}{\alpha_{TA}} * \left(\frac{1}{\alpha_{TE} + 1 + 2/\alpha_{TA}} \right) * \dot{I}_c$

\dot{I}_n	$\frac{2}{\alpha_{TA}} * \left(\frac{\alpha_{TE}}{\alpha_{TE} + 1 + 2/\alpha_{TA}} \right) * \dot{I}_c$
\dot{V}_{tap}	$\frac{\dot{V}_c + \Delta\dot{V}_{1TE} + \alpha_{TE} * \Delta\dot{V}_{2TE}}{(\alpha_{TE} + 1)} + \Delta\dot{V}_{reat}$
\dot{V}_{reg}	$\frac{2}{\alpha_{TA}} * \left(\frac{\dot{V}_c + \Delta\dot{V}_{1TE} + \alpha_{TE} * \Delta\dot{V}_{2TE}}{(\alpha_{TE} + 1)} + \Delta\dot{V}_{reat} + \Delta\dot{V}_{1TA} + \frac{\alpha_{TA} * \Delta\dot{V}_{2TA}}{2} \right)$

Fonte: Adaptado de [21].

2.5 Considerações finais

O presente capítulo abordou aspectos fundamentais do arranjo físico e operacional do Regulador Eletromagnético de Tensão (RET) com o objetivo de fornecer uma compreensão dos princípios estruturais e funcionais desse compensador, visto tratar-se de uma proposição própria do grupo de trabalhos da UFU.

Inicialmente, foram apresentadas considerações sobre a estrutura física e o funcionamento do RET, destacando as unidades de potência: Transformador de Excitação (TE) e Transformador de Acoplamento (TA). Nesta concepção, o TE foi identificado como uma unidade eletromagnética autotransformadora conectada ao próprio barramento a ser regulado, que oferece diferentes opções de tensão de compensação, em valores discretos, por meio de tapes. Já o TA se mostrou com uma característica distinta dos autotransformadores convencionais, visto que seu enrolamento primário é suprido pelo tape definido no TE e, por outro lado, o seu secundário se apresenta conectado em série com a linha do alimentador que supre a carga a ser regulada. Nestes termos, ficou evidenciado que o TA é um dispositivo excitado magneticamente por duas fontes de forças magnetomotrizes simultaneamente (tensão imposta pelo tape do TE em seu primário e corrente imposta pelo alimentador no seu secundário). Esta dupla excitação se apresenta como cerne das investigações conduzidas nesta dissertação.

A estratégia de controle do RET foi discutida e sintetizada através de um diagrama de blocos que ilustra as etapas seguidas pelo processo até a efetiva compensação da tensão. O processo de comutação entre os tapes do TE foi

detalhado, evidenciando a necessidade de reatores de comutação para evitar interrupções na corrente circulante e possíveis danos ao TA.

Por fim, foram apresentadas as principais expressões matemáticas, estabelecidas com base na técnica de representação no domínio da frequência, desenvolvidas em [21]. Estas permitem determinar os valores das correntes e tensões no equipamento com base nas relações de transformação, das impedâncias do equipamento, e da corrente e tensão na carga.

CAPÍTULO III

3 PROTÓTIPO DO RET EM ESCALA REDUZIDA

3.1 Considerações iniciais

No capítulo precedente foram apresentados os fundamentos associados com a concepção, controle, operação e aspectos associados com a modelagem matemática do regulador eletromagnético considerado nesta dissertação. Feitas tais considerações de caráter introdutório, a partir de informações atreladas com a composição de uma estrutura física em escala reduzida voltada para uma montagem laboratorial, foram então conduzidos esforços para a validação da proposta de compensação aqui feita. Para tanto, foram estabelecidas as bases próprias de operação de um complexo experimental que conduziu ao dispositivo traduzido na forma de um protótipo de baixa potência e tensão, cujas unidades eletromagnéticas foram produzidas pela fabricante TRAEEL – Transformadores Elétricos.

Este produto se apresenta como cerne das discussões conduzidas nesta unidade da dissertação, a qual se encontra imbuída do propósito de detalhar os aspectos construtivos do regulador visando, posteriormente, os estudos à luz das diretrizes e objetivos próprios ao *software ANSYS Maxwell*. Para tanto, de forma consonante com os requisitos deste programa de análise, somado a constituição física dos componentes que perfazem o compensador, são realizados detalhamentos construtivos de suas unidades, considerando, para tanto, um dispositivo monofásico. Somado a tais características, são também consideradas as informações relacionadas com a estrutura ferromagnética (núcleo) e elétrica (enrolamentos e isolamento).

Em atenção aos princípios impostos para a capacidade de regulação oferecida pelo dispositivo, conforme detalhado em [20], seus principais parâmetros elétricos e magnéticos são sintetizados nas subseções adjacentes.

3.2 Características físicas construtivas do Transformador de Acoplamento

Iniciando as especificações básicas pelo Transformador de Acoplamento, apresenta-se, na sequência, descrições contemplando suas unidades principais. Como informado, são apresentadas características magnéticas e elétricas, acompanhadas dos principais parâmetros físicos e geométricos que perfazem o componente. Na Tabela 3.1 encontram-se as suas características nominais, conforme requerido pela instalação experimental estabelecida. Destaca-se que a explicitação “P” e “N” referem-se às grandezas associadas com as unidades positiva e negativa, respectivamente, enquanto que “Pri” e “Sec” abordam o primário e secundário do transformador.

Tabela 3.1 - Parâmetros nominais do TA do protótipo.

	Pri_P	Pri_N	Sec
Tensão nominal (V)	50	50	50
Corrente nominal (A)	40	40	40
Potência nominal (kVA)	2	2	2
Densidade de fluxo magnético nominal (T)	1,057		

Fonte: TRAEL.

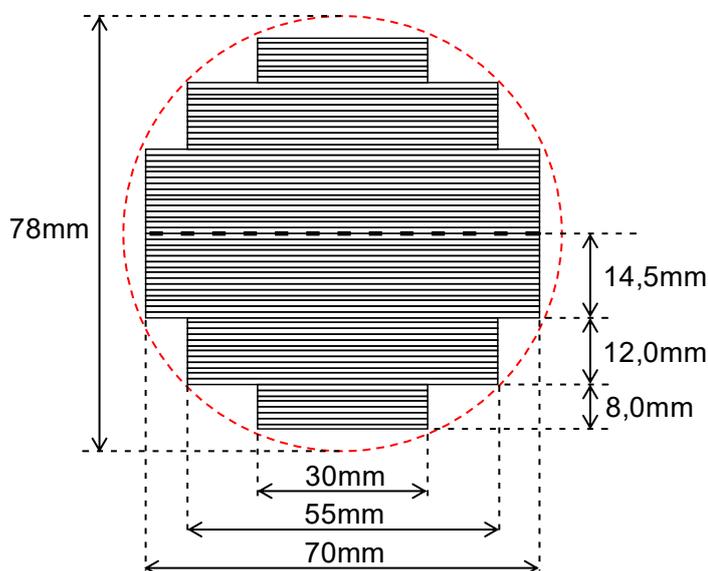
3.2.1 Núcleo

Como é padrão na prática construtiva de transformadores, o núcleo do protótipo se apresenta compostos pelo empilhamento de chapas de material ferromagnético. Esta técnica, como sabido, reduz as perdas devidas às correntes parasitas. No mais, também é prática comum em transformadores de maior potência a variação da largura das chapas empilhadas que compõem os núcleos, a fim de que as seções nominais de seus braços se aproximem de um círculo.

Para o componente em pauta, a estrutura foi estabelecida através da junção de apenas três larguras diferentes de chapas: 70mm, 55mm e 30mm. Assim, os núcleos das unidades eletromagnéticas do protótipo (TA e TE) foram compostos pela mesma lógica de empilhamento de chapas, utilizando o mesmo material ferromagnético. Assim, as seções transversais dos núcleos magnéticos de ambos os transformadores se apresentam com a constituição física mostrada na Figura 3.1, a

qual evidencia uma simetria em relação a linha central tracejada. Nesta são ainda indicadas as dimensões aproximadas, em milímetros.

Figura 3.1 - Estrutura física da seção transversal dos núcleos do TA e do TE do protótipo.



Fonte: Autor.

A Tabela 2.1 complementa as informações vinculadas com a construção dos núcleos tanto do Transformador de Acoplamento, como também, o de Excitação. Não obstante esta seção tratar pontualmente apenas do primeiro, visando evitar repetições desnecessárias, sempre que possível, quando os aspectos construtivos assim o permitirem, os dados serão referenciados às duas unidades transformadoras.

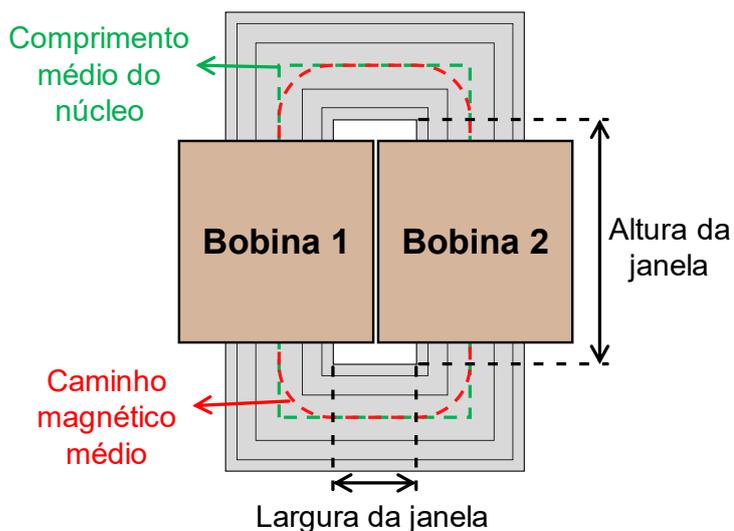
Tabela 3.2 - Características físicas e geométricas dos núcleos dos transformadores do protótipo.

Área da seção dos núcleos (mm²)	3830
Diâmetro aproximado da seção dos núcleos (mm)	78
Material	Aço de grão orientado – M4-T27
Peso específico (kg/m³)	7650
Espessura da chapa (mm)	0,27

Fonte: TRAEI.

O aspecto físico da construção do Transformador de Acoplamento segue a filosofia do núcleo envolvido, como se vê ilustrado na Figura 3.2. Já com relação ao Transformador de Excitação, este possui apenas uma bobina, como será mostrado ao decorrer do capítulo. Na figura também estão indicadas as dimensões relacionadas à largura e à altura da janela, assim como o comprimento médio do núcleo e o caminho magnético médio.

Figura 3.2 - Esboço de um transformador de núcleo envolvido.



Fonte: Autor.

Em relação a estrutura construtiva ilustrada na Figura 3.2, a Tabela 3.3 indica as dimensões físicas do núcleo do TA do protótipo, além de outros dados.

Tabela 3.3 - Características estruturais do núcleo do TA.

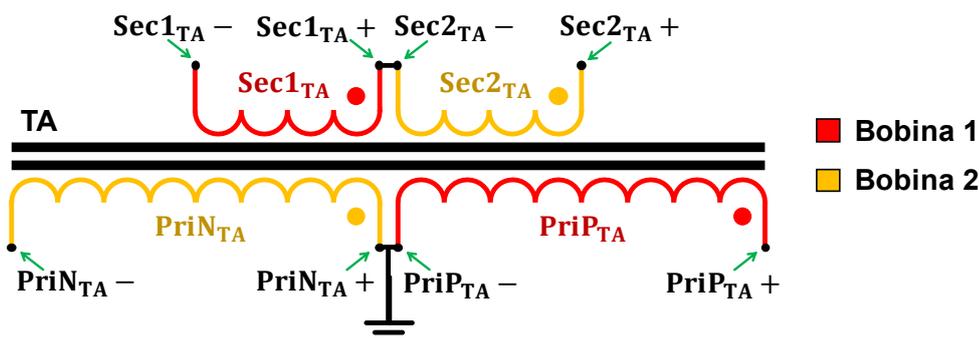
Altura da janela (m)	0,160
Largura da janela (m)	0,054
Caminho magnético médio (m)	0,648
Comprimento médio do núcleo (m)	0,708
Volume (m³)	0,002732880
Peso (kg)	20,9

Fonte: TRAEL.

3.2.2 Enrolamentos

Como medida de otimização do espaço, tanto o primário quanto o secundário do TA foram divididos em duas metades conectadas em série. Assim, metade do primário e do secundário compõem a bobina 1, e as outras metades forma a bobina 2. Esta composição encontra-se representada na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Arranjos para os enrolamentos das bobinas constituintes do TA.



Fonte: Autor.

Sendo:

- **Sec1_{TA}**: Metade do secundário alocado do lado da barra 1;
- **Sec2_{TA}**: Metade do secundário alocado do lado da barra 2;
- **Sec1_{TA} +** e **Sec2_{TA} -**: Terminais conectados de **Sec1_{TA}** e **Sec2_{TA}**;
- **Sec1_{TA} -**: Terminal de **Sec1_{TA}** conectado à barra 1;
- **Sec2_{TA} +**: Terminal de **Sec2_{TA}** conectado à barra 2;
- **PriP_{TA}**: Metade do primário utilizada para a compensação positiva;
- **PriN_{TA}**: Metade do primário utilizada para a compensação negativa;
- **PriP_{TA} -** e **PriN_{TA} +**: Terminais conectados de **PriP_{TA}** e **PriN_{TA}**, conectados também ao neutro do sistema;
- **PriP_{TA} +**: Terminal de **PriP_{TA}** conectado ao tape do TE para compensação positiva;
- **PriN_{TA} -**: Terminal de **PriN_{TA}** conectado ao tape do TE para compensação negativa.

Estando os dois enrolamentos divididos em bobinas separadas, torna-se indispensável realizar uma análise a respeito do sentido em que cada metade deverá ser convoluta em sua respectiva bobina. Ao se observar os pontos que indicam as polaridades de cada metade, indicados na Figura 3.3, fica evidenciado que estas devem estar enroladas de modo aditivo, ou seja, de forma que seus respectivos fluxos magnéticos e, conseqüentemente, suas tensões se somem.

Também, fica entendido que, para a situação da compensação positiva, a tensão do tape em utilização no TE (referenciada ao neutro do sistema) será aplicada ao terminal **PriP_{TA} +**, ficando o terminal **PriN_{TA} -** em aberto. Com isso, só haverá

circulação de corrente no secundário e na metade $PriP_{TA}$ do primário. Já na compensação negativa é o terminal $PriP_{TA} +$ que fica em aberto, sendo a tensão do tape aplicada ao terminal $PriN_{TA}$, tendo agora a circulação de corrente no enrolamento série e em $PriN_{TA}$. Isso mostra, como esperado, que somente uma das metades do primário do TA é utilizada por vez, a depender da polaridade de compensação requerida. Vale ainda ressaltar que, de acordo com a prática na construção de transformadores, os enrolamentos de menor tensão são montados na bobina por dentro (mais internamente) daqueles de maior tensão.

Os principais dados referentes à cada metade dos dois enrolamentos do TA podem ser encontrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados técnicos das metades dos enrolamentos do TA.

	$PriP_{TA}$	$PriN_{TA}$	$Sec1_{TA}$	$Sec2_{TA}$
Número de espiras totais	46	46	23	23
Número de camadas	2	2	1	1
Número de espiras por camada	23	23	23	23
Diâmetro médio (mm)	111,5	111,5	88,0	88,0

Fonte: TRAEL.

Os condutores elétricos que constituem tanto o primário quanto o secundário do TA possuem seção transversal retangular, contando com uma camada externa de papel isolante que acrescenta, aproximadamente, 0,25mm de espessura nas suas quatro faces. A Tabela 3.5 dispõe dos dados supracitados.

Tabela 3.5 - Parâmetros construtivos dos condutores dos enrolamentos do TA.

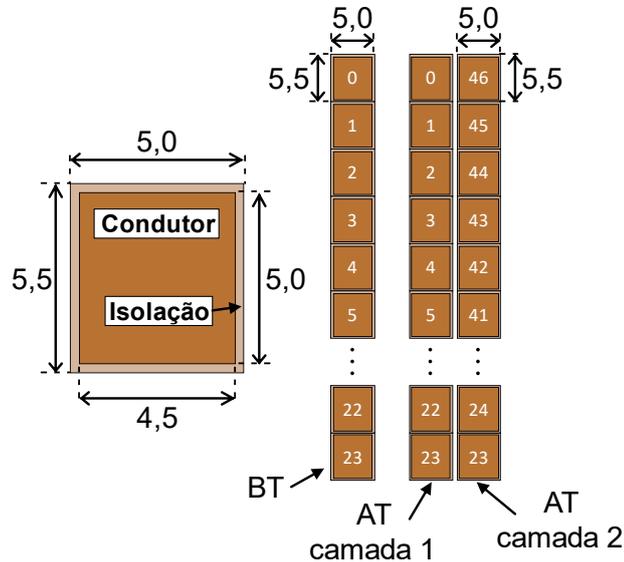
Altura da seção transversal (mm)	5,0
Largura da seção transversal (mm)	4,5
Área da seção transversal (mm²)	22,5
Altura da seção transversal com isolamento (mm)	5,5
Largura da seção transversal com isolamento (mm)	5,0
Material	Cobre
Condutividade (S×m/mm²)	61,7

Fonte: TRAEL.

Na Figura 3.4 pode-se ver a composição estrutural transversal dos condutores que constituem o primário e o secundário do TA, juntamente com a camada de

isolação. Ainda está ilustrada a montagem física dos enrolamentos, destacando que a seção do condutor é igual para o primário e o secundário.

Figura 3.4 - Características construtivas para as bobinas do TA. Unidade: milímetros.

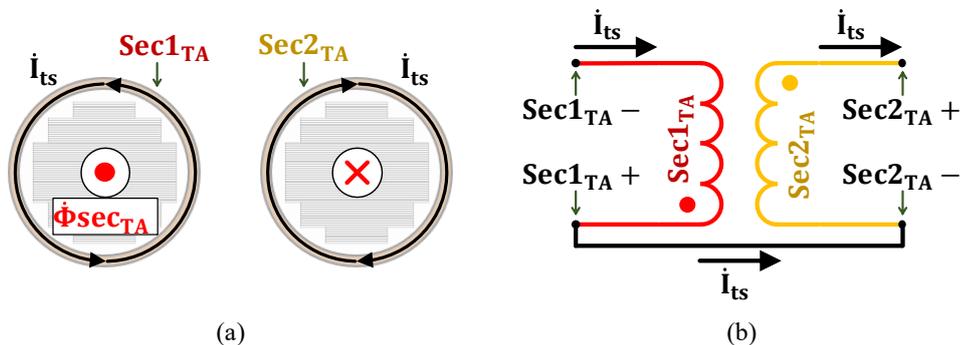


Fonte: Autor.

3.2.3 Enrolamento série (secundário)

A Figura 3.5 mostra as duas partes que perfazem o secundário do TA ($Sec1_{TA}$ e $Sec2_{TA}$). Estas estão envoltas nos dois braços do núcleo, como primeira camada da bobina.

Figura 3.5 - Aspectos construtivos do secundário do TA; (a) Visão superior; (b) Arranjo elétrico representativo.



Fonte: Autor.

Em vista do sentido dos enrolamentos e da corrente \dot{I}_{ts} , há a composição aritmética das tensões induzidas e que são injetadas em série entre o alimentador e a carga suprida. Também, como consequência desta montagem, tem-se que o fluxo

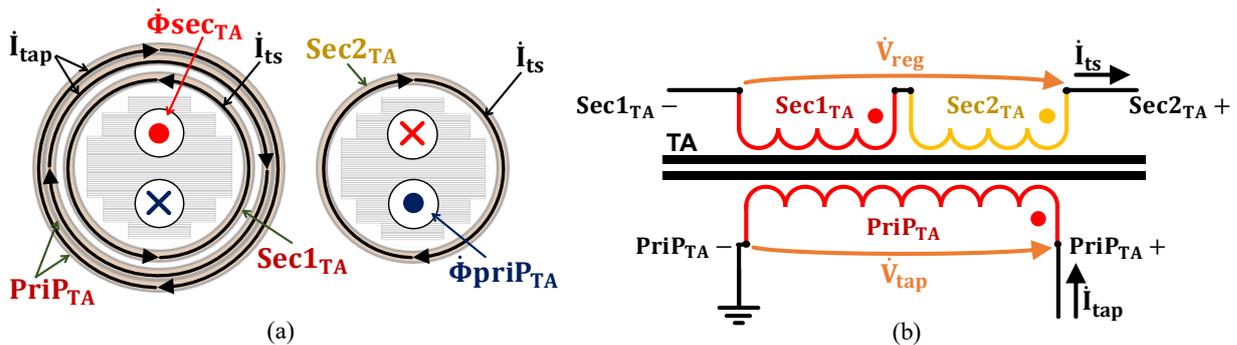
magnético $\dot{\Phi}_{sec_{TA}}$ corresponde à soma dos campos magnéticos produzidos pela corrente \dot{I}_{ts} . Tal figura pode ser utilizada para análise tanto do RET em compensação positiva quanto negativa, visto que a corrente que percorre o enrolamento série não muda de sentido.

3.2.4 Enrolamento primário

O enrolamento primário, também dividido, evidencia que a bobina se apresenta constituída de uma metade com polaridade positiva e a outra negativa. Isto está conforme as condições operativas já consideradas visando uma compensação para elevação ou abaixamento de tensão. O primário positivo ($PriP_{TA}$) faz parte da bobina 1, no braço esquerdo do núcleo, sobre o enrolamento $Sec1_{TA}$, enquanto o primário negativo ($PriN_{TA}$) está sobre $Sec2_{TA}$.

Nos termos acima postos, a Figura 3.6(a) oferece uma visão superior do TA com o enrolamento secundário e a metade $PriP_{TA}$ do primário já devidamente montados. Na Figura 3.6(b) tem-se a composição estrutural do TA quando da ação para a compensação positiva. Observa-se que o fluxo magnético produzido pela corrente \dot{I}_{tap} se opõe àquele produzido pela corrente do alimentador.

Figura 3.6 - Representações da construção do enrolamento primário positivo do TA. (a) Visão superior; (b) Arranjo elétrico representativo.

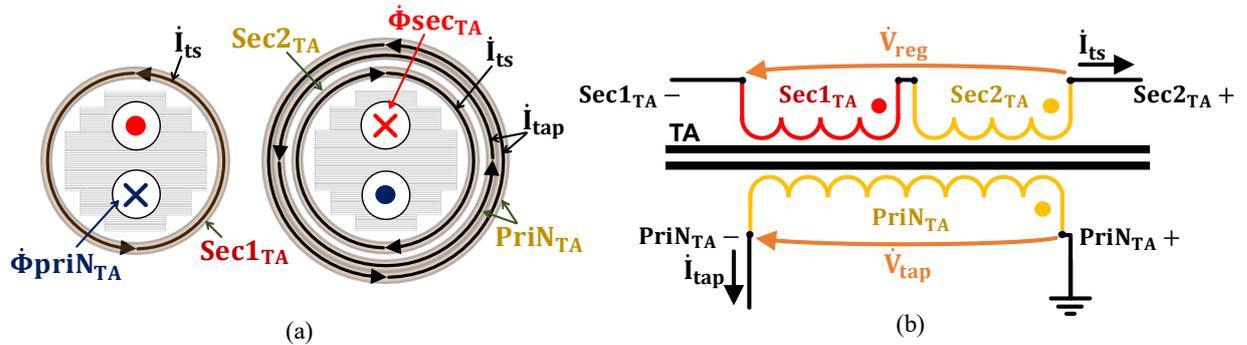


Fonte: Autor.

Já se tratando da montagem voltada para a compensação negativa ($PriN_{TA}$), uma análise similar pode ser feita, observando o sentido que suas espiras são enroladas. A corrente que flui por $PriN_{TA}$ durante a compensação negativa também produz um fluxo magnético $\dot{\Phi}_{priP_{TA}}$ no sentido oposto àquele produzido por \dot{I}_{ts} . Também, nestas circunstâncias, o sentido da corrente \dot{I}_{tap} é invertido quando comparado à situação da compensação positiva. Isso pode ser observado na Figura

3.7(a), onde se vê uma representação da visão superior com o secundário e a metade PriN_{TA} montadas. Já na Figura 3.7(b) pode-se ver o esquema de circuito elétrico do TA quando em compensação negativa.

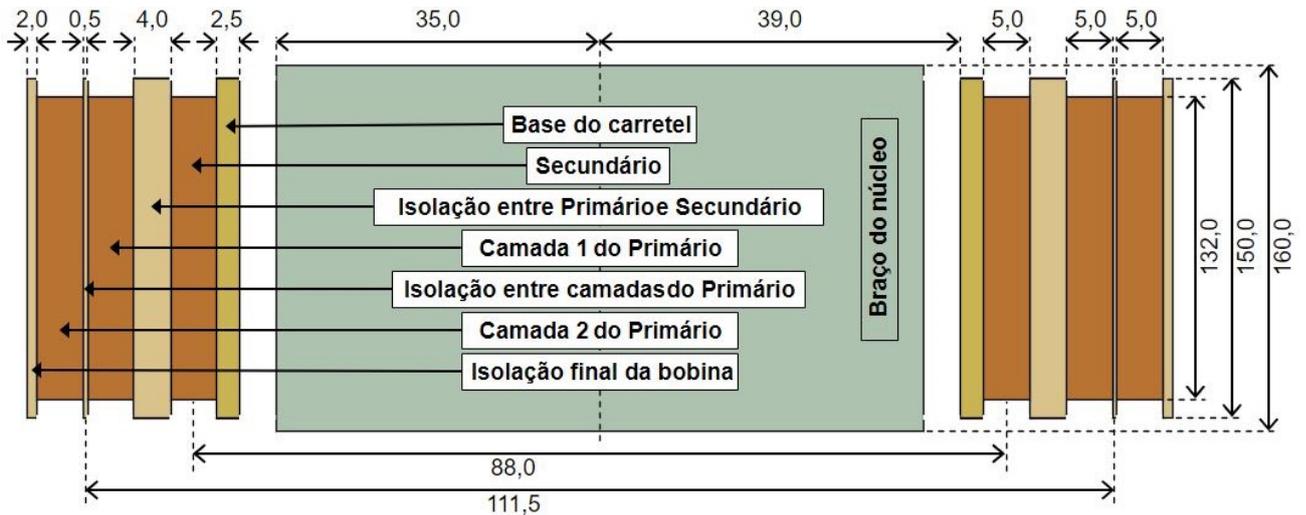
Figura 3.7 - Representações da construção do enrolamento primário negativo do TA. (a) Visão superior; (b) Esquema elétrico.



Fonte: Autor.

A Figura 3.8, por sua vez, traz um esquema mais completo, em perspectiva de corte longitudinal, da configuração de uma das bobinas do TA. Ele já conta com a presença de ambos os enrolamentos montados em suas devidas camadas, assim como os materiais isolantes. Estão expostas também as dimensões aproximadas do conjunto, em milímetros. Ressalta-se que o desenho se encontra fora de escala.

Figura 3.8 - Representação de um dos braços do TA em corte longitudinal. Unidade: milímetros.



Fonte: Autor.

3.3 Características físicas construtivas do Transformador de Excitação

O Transformador de Excitação utilizado no protótipo não difere em nenhum quesito de um autotransformador convencional. Ele é construtivamente definido como uma simples bobina, mas que é dividida em duas porções conectadas em série. Conforme já ficou estabelecido no Capítulo 2, a parcela dessa bobina que proporciona a tensão de compensação é definida aqui como enrolamento secundário, enquanto o complemento dela, conectado à barra 2, é definido como primário. Na Tabela 3.6 estão alguns dados nominais do elemento.

Tabela 3.6 - Parâmetros nominais do TE do protótipo.

	Pri_{TE}	Sec_{TE}
Tensão nominal (V)	93	34
Corrente nominal (A)	16	44
Potência nominal (kVA)	1,5	1,5
Densidade de fluxo magnético nominal (T)	1,272	

Fonte: TRAEL.

3.3.1 Núcleo

Como já foi esclarecido anteriormente, o mesmo modelo de empilhamento de chapas que foi utilizado para o transformador série também foi usado para o autotransformador (Figura 3.1), levando, portanto, ambos os núcleos a terem o mesmo perfil e, conseqüentemente, a mesma área de seção transversal. Todavia, as dimensões da janela do núcleo do TE são ligeiramente diferentes daquelas do TA, e suas dimensões, baseadas na Figura 3.2, podem ser vistas na Tabela 3.7 a seguir.

Tabela 3.7 - Dados do núcleo do TE do protótipo.

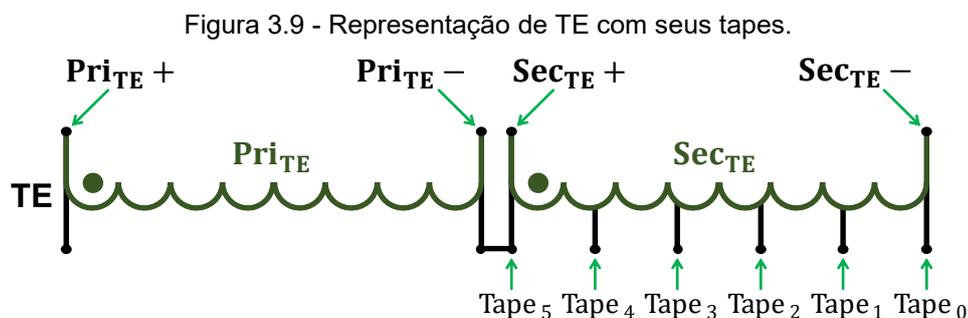
Altura da janela (m)	0,185
Largura da janela (m)	0,060
Caminho magnético médio (m)	0,710
Comprimento médio do núcleo (m)	0,770
Volume (m³)	0,002972200
Peso (kg)	22,7

Fonte: TRAEL.

Sendo a janela do TE maior e mantendo a área de seção do núcleo, o caminho magnético médio e o comprimento médio do núcleo também serão maiores, dando ao núcleo um maior volume. Como ambos os núcleos são feitos do mesmo material ferromagnético, o peso do núcleo do TE também será superior ao do TA.

3.3.2 Enrolamentos

Diferentemente do TA, onde os enrolamentos são divididos ao meio e formam duas bobinas, o “primário” e o “secundário” no Transformador de Excitação constituem uma única bobina, alocada em um dos braços do núcleo, deixando o outro braço livre. O enrolamento secundário, cuja tensão nominal é de 34V, é subdividido em cinco porções, sendo elas acessíveis através dos seus tapes, conforme se vê na Figura 3.9.



Fonte: Autor.

Sendo:

- **Sec_{TE}**: Enrolamento secundário do TE;
- **Sec_{TE} +** e **Sec_{TE} -**: Terminais de **Sec_{TE}**;
- **Tape₀** a **Tape₅**: Tapes do TE;
- **Pri_{TE}**: Enrolamento primário do TE;
- **Pri_{TE} +** e **Pri_{TE} -**: Terminais de **Pri_{TE}**.

Já a Tabela 3.8 traz os valores das tensões nominais de cada um desses tapes, lembrando que estes valores serão aqueles utilizados para serem adicionados ou subtraídos da rede durante o processo de compensação. Vale ressaltar que os pontos indicados como Tape₅ e Tape₀ são os próprios terminais do secundário, sendo que o tape de maior tensão disponível (34V) é originado pelo ponto de conexão série entre os dois enrolamentos, enquanto o tape de 0V é ligado ao neutro do sistema. Ou seja, apenas Tape₄, Tape₃, Tape₂ e Tape₁ são derivações ao longo do enrolamento secundário.

Tabela 3.8 - Valores nominais das tensões nos tapes do TE do protótipo.

Tape₅	34 V
Tape₄	27 V
Tape₃	20 V
Tape₂	14 V
Tape₁	7,5 V
Tape₀	0 V

Fonte: Autor.

No que se refere aos quesitos de projeto do TE, seu primário será considerado como o enrolamento de alta (enrolado na parte mais externa da bobina), enquanto o secundário é o enrolamento de baixa tensão (enrolado na parte interna da bobina). Os principais dados referentes aos dois enrolamentos do TE que constitui o protótipo podem ser conferidos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Dados técnicos das metades dos enrolamentos do TE do protótipo.

	Pri_{TE}	Sec_{TE}
Número de espiras totais	71	26
Números de condutores em paralelo	1	2
Número de camadas	2	2
Número de espiras por camada	35,5	13
Diâmetro médio (mm)	112,5	89,0

Fonte: TRAEI.

Semelhantemente ao transformador série, os condutores elétricos que constituem os enrolamentos do TE também são barras de cobre com uma camada externa de papel isolante. As dimensões da seção transversal dos condutores que compõem os dois enrolamentos são iguais, entretanto elas são distintas daquelas dos condutores do TA. A Tabela 3.10 dispõe dos dados citados, e na Figura 3.10 pode-se ver um esboço da seção transversal dos condutores que constituem o primário e o secundário, juntamente com a camada de isolação.

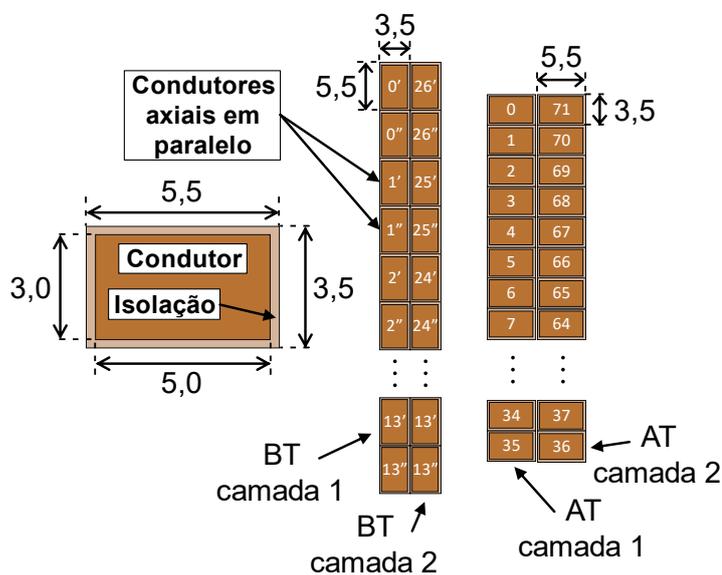
A orientação da seção do condutor para o primário e o secundário são diferentes, sendo 3,5 milímetros na direção radial e 5,5 milímetros na direção axial da bobina para o enrolamento de BT, e 5,5 milímetros na direção radial e 3,5 milímetros na direção axial no enrolamento de AT. Observa-se também a representação dos dois condutores axiais em paralelo que formam o secundário.

Tabela 3.10 - Dados dos condutores dos enrolamentos do TE do protótipo.

Altura da seção transversal (mm)	3,0
Largura da seção transversal (mm)	5,0
Área da seção transversal (mm ²)	15,0
Altura da seção transversal com isolamento (mm)	3,5
Largura da seção transversal com isolamento (mm)	5,5
Material	Cobre
Condutividade (S×m/mm ²)	61,7

Fonte: TRAEI.

Figura 3.10 - Esboço da seção transversal dos condutores do TE do protótipo.



Fonte: Autor.

3.3.3 Enrolamento secundário

Na Figura 3.11(a) se vê a representação da visão superior do TE com o secundário já devidamente montado com suas duas camadas. Já na Figura 3.11(b) tem-se o esquema de circuito elétrico deste enrolamento. Observando a corrente \dot{I}_n , o sentido adotado para a representação se refere à condição de compensação positiva, e o fluxo magnético intitulado $\Phi_{sec_{TE}}$ é produzido por ela.

Figura 3.11 - Representações da construção do enrolamento secundário do TE. (a) Visão superior; (b) Esquema elétrico.



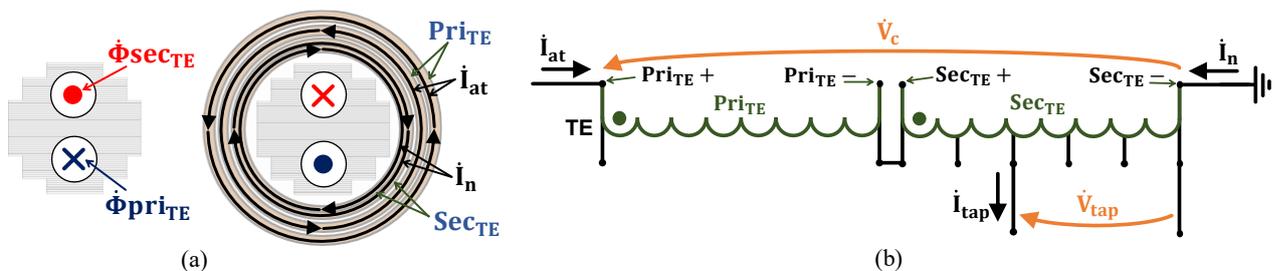
Fonte: Autor.

3.3.4 Enrolamento primário

Para se determinar o sentido com que as espiras do primário são enroladas, deve-se pensar que a corrente que o percorre (I_{at}) produzirá um fluxo magnético Φ_{priTE} no sentido contrário ao daquele produzido pela corrente do secundário.

Na Figura 3.12(a) se vê uma representação da visão superior do TE com os dois enrolamentos mostrados. Já na Figura 3.12(b) tem-se o esquema de circuito elétrico do autotransformador completo, com suas tensões e correntes, lembrando que se trata de uma exemplificação para o caso de uma compensação positiva.

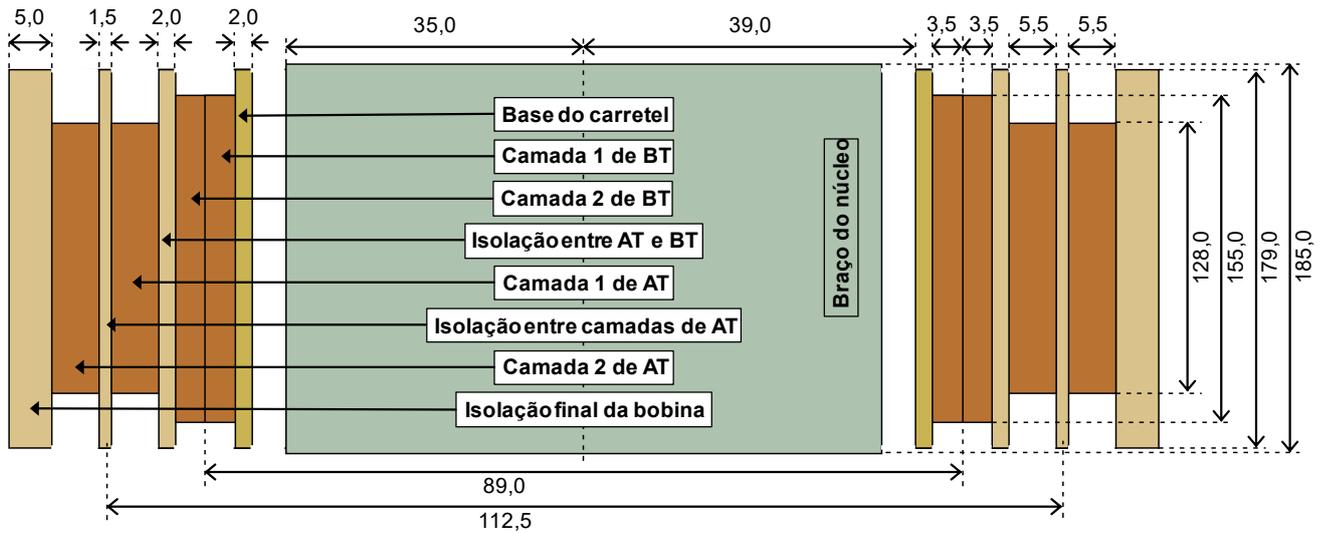
Figura 3.12 - Representações da construção do enrolamento primário do TE. (a) Visão superior; (b) Esquema elétrico.



Fonte: Autor.

A Figura 3.13, por fim, traz um esquema em perspectiva de corte longitudinal da configuração da bobina do TE. Estão presentes ambos os enrolamentos montados em suas devidas camadas, assim como os materiais isolantes. Estão expostas também as dimensões aproximadas do conjunto, em milímetros.

Figura 3.13 - Representação do braço do TE onde está a bobina, em corte longitudinal. Unidade: milímetros.



Fonte: Autor.

Tendo agora a posse de muitos dados físicos de projeto referentes a ambos os transformadores utilizados para a implementação do protótipo do RET, será dado o prosseguimento para a sua modelagem e posterior simulação.

3.4 Considerações finais

Tendo em vista que as investigações do desempenho do regulador de tensão RET, em função dos objetivos postos como meta para esta dissertação, se apresentam focadas nos estudos de desempenho do dispositivo sob o ponto de vista magnético, em consonância com os requisitos necessários ao emprego da ferramenta de análise a ser empregada, qual seja, o software ANSYS Maxwell, este capítulo apresentou as principais informações construtivas de um protótipo do Regulador Eletromagnético de Tensão (RET), em escala reduzida, o qual, no passado, serviu como base para a validação da proposta de compensação.

Dentro deste escopo, os principais parâmetros elétricos e magnéticos do protótipo foram apresentados, destacando as características físicas e geométricas do TA e do TE, suas dimensões de núcleos, janelas e caminhos magnéticos, estabelecendo, assim, as informações essenciais para o entendimento da estrutura construtiva dos transformadores e simulação no software empregado para os estudos, conforme estabelecido no capítulo subsequente.

CAPÍTULO IV

4 IMPLEMENTAÇÃO DAS UNIDADES ELETROMAGNÉTICAS NO SOFTWARE ANSYS MAXWELL

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem por objetivo principal apresentar uma síntese do software ANSYS Maxwell, o qual se apresenta como uma ferramenta de simulação combinando atributos de análise conjunta das condições elétricas e magnéticas para a avaliação do comportamento de dispositivos e sistemas. Tal recurso computacional é baseado nas equações de Maxwell, que descrevem as relações entre os campos elétricos, magnéticos, cargas e correntes elétricas, utilizando o método dos elementos finitos. Contando com a discretização através desta técnica de modelagem, as equações de Maxwell são correlacionadas através de sistemas lineares. Com o uso de algoritmos eficientes, o software Maxwell resolve numericamente esse sistema de equações lineares e fornece as soluções dos campos eletromagnéticos em todo o domínio de análise.

Para fins aplicativos da técnica de análise do compensador focado nesta dissertação, os trabalhos de implementação computacional no mencionado simulador são então conduzidos, de forma pontual, para o protótipo de regulador caracterizado no capítulo anterior.

Assim, utilizando os parâmetros físicos já apresentados e empregando propriedades dos materiais já existentes na própria biblioteca do Maxwell são estabelecidas as representações das duas unidades eletromagnéticas que compõem o regulador investigado, as quais serão consideradas de forma integrada com as

demais partes que formam o protótipo e, ainda, com um sistema experimental estabelecido em ambiente laboratorial.

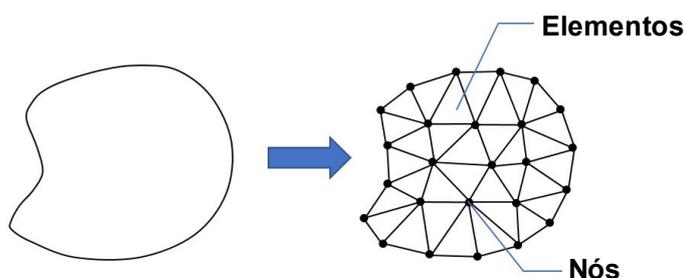
4.2 Fundamentos do Método dos Elementos Finitos e do Software ANSYS

O método dos elementos finitos (MEF), amplamente conhecido nos mais distintos ramos da engenharia, consiste numa técnica numérica utilizada para solucionar problemas gerais que envolvem a análise de estruturas e fenômenos complexos. Este recurso foi desenvolvido com o intuito de simplificar a resolução de equações diferenciais parciais, as quais descrevem muitos problemas físicos, como a transferência de calor, a mecânica dos sólidos e os problemas de fluxo de fluidos.

As origens do método remontam à década de 1940, quando Courant desenvolveu a "Análise de Elementos Finitos" [27]. No entanto, foi somente na década de 1950, com o trabalho seminal de Turner, Clough, Martin e Topp [28], que o método dos elementos finitos ganhou maior reconhecimento e aplicabilidade em problemas mais complexos.

A base do MEF consiste em dividir o domínio de estudo em uma malha discreta de elementos finitos, que são pequenas regiões geométricas, conforme ilustrado na Figura 4.1. Cada elemento é definido por um conjunto de nós ou pontos de interesse e é caracterizado por funções matemáticas que descrevem o comportamento do fenômeno em estudo. O MEF busca determinar uma solução aproximada para o problema, utilizando essas funções e equações constitutivas que governam o comportamento do material ou fenômeno em questão.

Figura 4.1 - Discretização de um objeto pelo MEF.



Fonte: [29].

O método dos elementos finitos possui uma ampla gama de aplicações, sendo uma ferramenta essencial para o projeto e análise de componentes e sistemas complexos, a exemplo de:

- Análise estrutural: O MEF é amplamente utilizado para a análise de estruturas, permitindo a determinação de tensões mecânicas, deformações e comportamentos de falha. Ele é aplicado em projetos de pontes, edifícios, aeronaves e muitos outros sistemas estruturais.
- Engenharia automotiva: Na indústria automotiva, o MEF é usado para a simulação e otimização de componentes e sistemas, como carrocerias, suspensões, sistemas de freios e motores. Ele auxilia no projeto de veículos mais seguros, eficientes e com melhor desempenho.
- Engenharia aeroespacial: Na área aeroespacial, o MEF é aplicado para analisar o comportamento estrutural de aeronaves, satélites e foguetes. Ele contribui para a otimização de desenhos, redução de peso, previsão de vida útil e garantia da segurança dos projetos.
- Indústria naval: No setor naval, o MEF é utilizado na análise estrutural de embarcações, como cascos de navios e plataformas offshore. Ele permite avaliar a resistência dos materiais, a estabilidade e o comportamento em condições extremas, contribuindo para a segurança e eficiência das operações marítimas.
- Engenharia civil: Na engenharia civil, o MEF é aplicado em uma variedade de áreas, como análise de fundações, estruturas de concreto, barragens, túneis e sistemas de distribuição de água. Ele ajuda a prever o comportamento estrutural sob diferentes condições de carga, garantindo a integridade e a durabilidade das construções.

Além das aplicações mencionadas anteriormente, o Método dos Elementos Finitos também é amplamente utilizado na engenharia elétrica. Nesse contexto, algumas das principais aplicações incluem:

- Análise eletromagnética: O MEF é empregado para analisar e simular o comportamento eletromagnético de dispositivos e sistemas. Ele é aplicado no projeto de antenas, motores elétricos, transformadores, cabos e circuitos

eletrônicos, permitindo otimizar o desempenho e a eficiência desses dispositivos.

- Análise térmica: O MEF é utilizado para analisar problemas de transferência de calor em componentes elétricos e eletrônicos. Ele auxilia no projeto de dissipadores de calor, sistemas de resfriamento e na previsão de temperaturas em dispositivos que geram calor, garantindo sua operação dentro de limites seguros.
- Engenharia de potência: O MEF é aplicado na análise e simulação de sistemas elétricos de potência. Ele permite avaliar o fluxo de corrente, a distribuição de tensão, a estabilidade e o desempenho dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.
- Eletrônica de potência: Na eletrônica de potência, o MEF é usado para analisar e projetar dispositivos como retificadores, inversores, conversores e circuitos magnéticos. Ele auxilia na determinação de perdas, eficiência energética e comportamento transitório desses dispositivos, contribuindo para a melhoria do projeto e desempenho.

A técnica em pauta se destaca por apresentar diversos atrativos que o tornam uma ferramenta de grande relevância na análise e projeto de sistemas complexos, dos quais se destacam:

- Versatilidade: O MEF pode ser aplicado em uma ampla gama de problemas físicos e engenharia. Ele permite a modelagem de fenômenos complexos e a análise de diferentes tipos de materiais, geometrias e condições de contorno, tornando-se uma ferramenta versátil para a solução de problemas.
- Precisão e confiabilidade: Quando aplicado corretamente, o MEF fornece resultados precisos e confiáveis. Ele permite a obtenção de soluções aproximadas para problemas que não têm soluções analíticas exatas, fornecendo informações detalhadas sobre o comportamento dos sistemas estudados.
- Otimização de projetos: O MEF é frequentemente utilizado em processos de otimização de projetos. Ele permite a avaliação de diferentes alternativas de design, a análise de sensibilidade e a busca por soluções

que atendam a critérios específicos, como redução de peso, maximização de eficiência ou minimização de custos.

- Redução de custos e tempo: O MEF possibilita a realização de análises virtuais, reduzindo a necessidade de protótipos físicos e testes experimentais. Isso resulta em uma redução de custos e tempo de desenvolvimento, permitindo que projetos sejam mais eficientes e competitivos no mercado.

Não obstante as vantagens destacadas, tal estratégia apresenta algumas limitações que devem ser consideradas, a exemplo de:

- Discretização: O MEF baseia-se na discretização da região de estudo em elementos finitos. A qualidade dessa discretização pode influenciar diretamente na precisão e na convergência dos resultados obtidos. Uma má escolha dos elementos ou malha inadequada pode levar a soluções imprecisas ou instáveis.
- Linearidade: O MEF assume que os materiais e as equações governantes são lineares. Embora seja possível lidar com problemas não lineares usando técnicas avançadas, a linearidade é uma simplificação que pode limitar a precisão em alguns casos.
- Dependência do conhecimento prévio: O MEF requer o conhecimento prévio dos parâmetros e comportamentos do sistema em estudo. Isso inclui informações sobre as propriedades dos materiais, condições de contorno e outras características específicas do problema. A falta de dados precisos ou a variação desses parâmetros podem afetar a confiabilidade dos resultados obtidos.
- Requisitos computacionais: O MEF pode exigir recursos computacionais significativos, especialmente para problemas complexos com um grande número de elementos e nós. A realização de simulações detalhadas e o processamento de grandes volumes de dados podem demandar tempo e poder de processamento computacional.
- Limitações físicas: O MEF é uma técnica de modelagem e simulação, portanto, está sujeito a certas limitações físicas. Por exemplo, em problemas que envolvem fenômenos altamente não lineares, como

grandes deformações ou falhas estruturais, pode ser necessário recorrer a métodos mais avançados que vão além das simplificações do MEF.

Apesar dessas limitações, o MEF continua sendo uma ferramenta valiosa e amplamente utilizada na engenharia e na indústria, contribuindo para o avanço tecnológico, o desenvolvimento de produtos inovadores e a solução de problemas complexos. Vale ainda destacar que o software Maxwell da ANSYS oferece diferentes *solvers*, os quais correspondem a algoritmos e métodos computacionais utilizados para resolver equações complexas relacionadas a campos eletromagnéticos. Cada solver é projetado para abordar diferentes aspectos e solucionar diferentes tipos de problema, cabendo ao usuário escolher o *solver* que melhor se adequa à sua necessidade. No contexto dos *solvers* disponibilizados pelos Maxwell destacam-se:

a. Solver Magnetostático:

Utilizado para resolver problemas envolvendo campos magnéticos estáticos gerados por correntes contínuas em bobinas ou pela presença de ímãs permanentes, possuindo refinamento automático de malha [30].

Ao definir uma excitação, como a densidade de corrente em uma seção, o software Maxwell cria uma malha na geometria relacionada ao condutor e implementa inicialmente um outro solver, chamado "Condução DC". Esse *solver* resolve a distribuição da corrente elétrica em um domínio condutor, sendo essa densidade de corrente o termo fonte para o *solver* magnetostático.

b. Solver Magnético-harmônico (*Eddy Current*):

Este foi o recurso utilizado para fins dos desenvolvimentos desta dissertação. O *solver* magnético harmônico, também conhecido como *Eddy Current*, é capaz de calcular os campos magnéticos senoidais em regime permanente para uma determinada frequência. Nesse tipo de solução, é assumido que os campos magnéticos pulsam com a mesma frequência em todo o domínio analisado. Pode-se usar o sistema de malha autoadaptativa e também um circuito elétrico externo para definição das excitações do modelo [30].

Um dos parâmetros de materiais que o *solver* magnético-harmônico necessita é a permissividade relativa. Este termo afeta principalmente o cálculo das perdas

dielétricas, visto que o solver *Eddy Current*, leva em conta as correntes de deslocamento. Além disso, o solver considera a tangente de perdas dielétricas e a tangente de perdas magnéticas. Esses parâmetros definem as razões entre as partes real e imaginária das permissividades e permeabilidades, respectivamente. Outro aspecto relevante refere-se à viabilidade da determinação das perdas em núcleos de Aço Magnético (Método de Steinmetz) ou Ferrite.

Durante o pós-processamento do solver magnético-harmônico, também é possível definir os parâmetros de força e torque mecânico no objeto, matriz de indutâncias, e outras características, devendo o usuário indicar o interesse na obtenção desses dados antes da realização da simulação.

c. Solver Transiente:

Tal recurso permite calcular os campos magnéticos no domínio do tempo, fornecendo soluções instantâneas para cada etapa temporal. Para isso, diferentes fontes podem ser consideradas para os campos magnéticos variáveis. Por exemplo, podem ser utilizadas fontes arbitrárias de tensão ou corrente que variam ao longo do tempo, podendo ser conectadas a um circuito externo para acoplamento com as grandezas dos campos.

Além disso, fontes móveis, como ímãs permanentes ou enrolamentos, também podem ser incluídas na análise. É importante destacar que o solver transiente magnético não utiliza refinamento adaptativo de malha e não calcula as correntes de deslocamento [31].

d. Solver Eletrostático:

O solver eletrostático é responsável por resolver campos elétricos estáticos que surgem de uma distribuição de cargas ou potenciais elétricos estacionários. Uma característica importante é que todos os campos dentro dos condutores são considerados equipotenciais, em equilíbrio eletrostático [32].

Isso significa que as perdas Joule são nulas em todos os pontos dos condutores, visto que não há fluxo de corrente. Para realizar esses cálculos, este solver também utiliza a técnica de refinamento adaptativo de malha, que permite obter uma malha adequada e precisa para a análise dos campos elétricos estáticos.

4.3 Implementação do RET no ANSYS Maxwell e estudos de casos

Em atenção aos objetivos desta dissertação, os trabalhos associados com a modelagem do RET no mencionado simulador compreenderam as seguintes etapas:

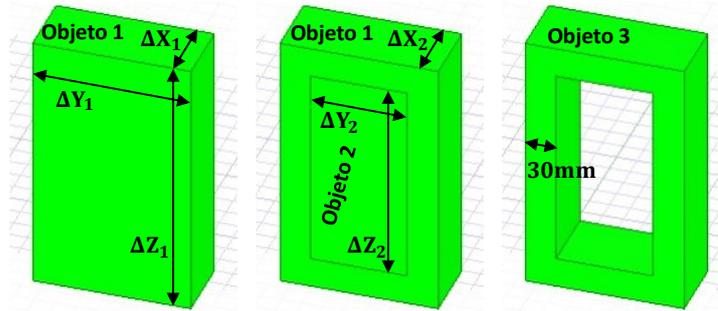
- Modelagem física em 3D do Transformador de Acoplamento e do Transformador de Excitação no ambiente gráfico do Maxwell;
- Atribuição dos materiais aos objetos que representam os núcleos e os enrolamentos de ambos os transformadores;
- Definição das excitações do modelo, conduzida a partir do estabelecimento de um sistema elétrico que é alvo do processo de regulação da tensão;
- Definição e efetivação dos estudos associados com alguns casos de funcionamento, onde, cada qual, se apresenta fundamentado nas condições operativas do RET.

4.3.1 Modelagem dos núcleos magnéticos dos transformadores TA e TE

O Maxwell possui uma ferramenta própria de CAD para a criação de objetos simples e complexos a partir de formas geométricas básicas. Basicamente, a composição de ambos os transformadores contará com seus dois elementos mais relevantes ao processo de análise, a saber: o núcleo e as bobinas.

Como destacado no Capítulo 3, os núcleos dos dois transformadores possuem o mesmo perfil de seção transversal e são compostos por chapas de aço magnético de grão orientado de 0,27mm de espessura. Para que a seção transversal dos núcleos tenda a se aproximar de um círculo de diâmetro 78mm, estas chapas possuem diferentes larguras: 70mm, 55mm e 30mm. Neste contexto, os dois núcleos são montados no ambiente de simulação através de uma série de operações booleanas com paralelepípedos. Para tanto, é criado um paralelepípedo chamado de “objeto 1”, cujas dimensões são ΔX_1 , ΔY_1 e ΔZ_1 nos eixos X, Y e Z, respectivamente. Posteriormente é criado um paralelepípedo menor, denominado “objeto 2”, com dimensões ΔX_2 , ΔY_2 e ΔZ_2 , sendo que ambos os objetos possuem a mesma dimensão em X, ou seja, ΔX_1 é igual a ΔX_2 . Feito isso, o objeto 2 é subtraído do objeto 1, dando origem ao “objeto 3”, conforme se vê na Figura 4.2.

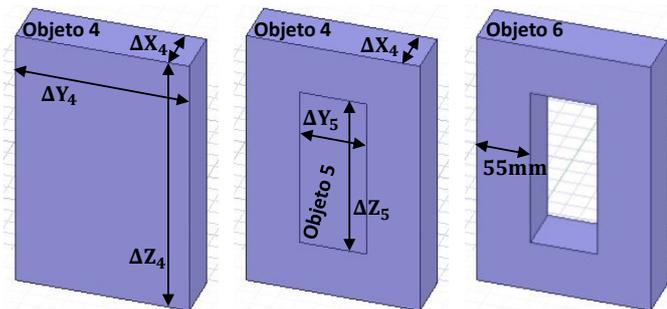
Figura 4.2 - Processo de modelagem das chapas de 30mm do núcleo.



Fonte: Autor.

O processo é repetido por mais duas vezes, criando-se dois paralelepípedos, um denominado “objeto 4”, com dimensões ΔX_4 , ΔY_4 e ΔZ_4 , e outro denominado “objeto 5”, com dimensões ΔX_5 , ΔY_5 e ΔZ_5 , sendo ΔX_4 igual a ΔX_5 . Estes paralelepípedos são então subtraídos, dando origem ao “objeto 6”, conforme ilustrado na Figura 4.3.

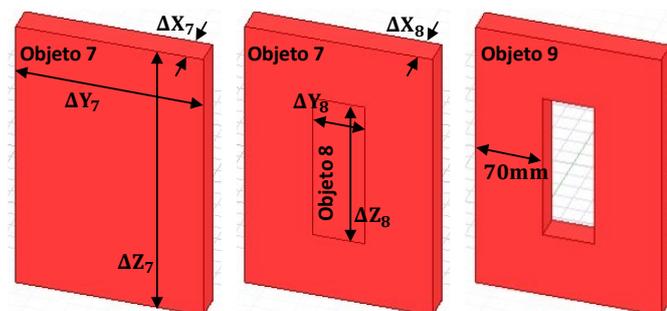
Figura 4.3 - Processo de modelagem das chapas de 55mm do núcleo.



Fonte: Autor.

Posteriormente cria-se o “objeto 7”, de medidas ΔX_7 , ΔY_7 e ΔZ_7 , e o “objeto 8”, com medidas ΔX_8 , ΔY_8 e ΔZ_8 , que são subtraídos e dão origem ao “objeto 9”, conforme a Figura 4.4.

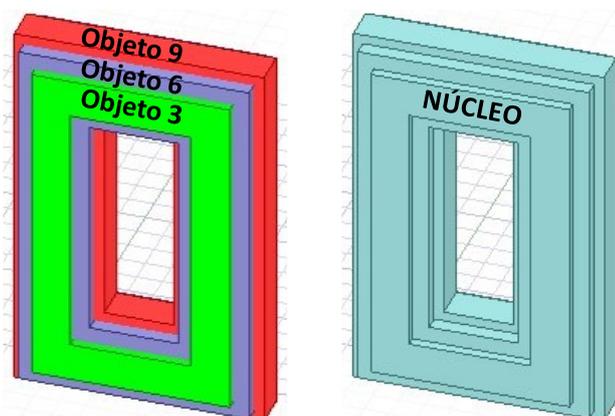
Figura 4.4 - Processo de modelagem das chapas de 70mm do núcleo.



Fonte: Autor.

Por fim, os objetos “objeto 3”, “objeto 6”, e “objeto 9” são sobrepostos e somados para se dar origem a estrutura de montagem do núcleo, como mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Núcleo completo modelado do Maxwell.



Fonte: Autor.

A Tabela 4.1 traz os valores das dimensões dos objetos criados para a composição dos dois núcleos.

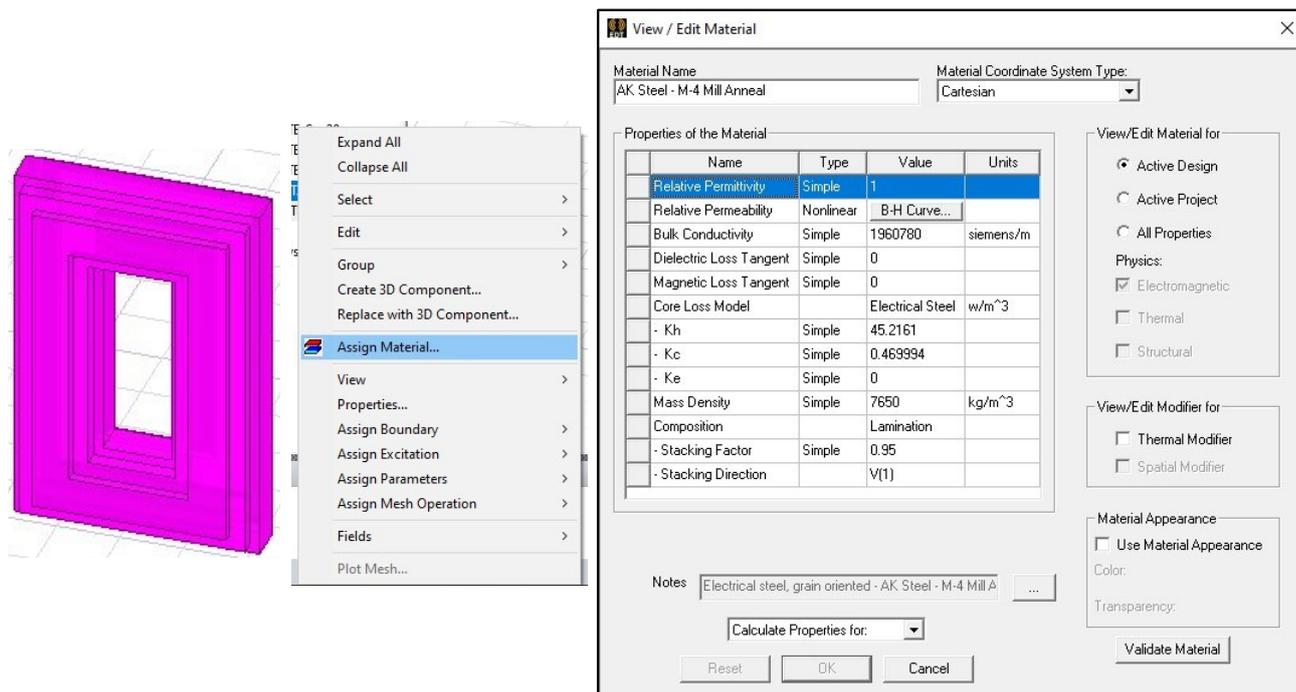
Tabela 4.1 - Dimensões dos objetos modelados que compõem ambos os núcleos.

Núcleo	Dimensão	Objeto 1	Objeto 2	Objeto 4	Objeto 5	Objeto 7	Objeto 8
TA	ΔX (mm)	69	69	53	53	29	29
	ΔY (mm)	154	94	179	69	194	54
	ΔZ (mm)	260	200	285	175	300	160
TE	ΔX (mm)	69	69	53	53	29	29
	ΔY (mm)	160	100	185	75	200	60
	ΔZ (mm)	285	225	310	200	325	185

Fonte: Autor.

Uma vez geometricamente definidos os núcleos, é feita a atribuição do material, o qual encontra-se disponível na biblioteca do próprio Maxwell. Para os estudos em pauta a opção foi pelo “M-4 Mill Anneal”, do fabricante *AK Steel*, cujas chapas laminadas foram montadas ortogonalmente à direção do eixo X, com fator de empilhamento de 0,95, conforme mostrado na Figura 4.6.

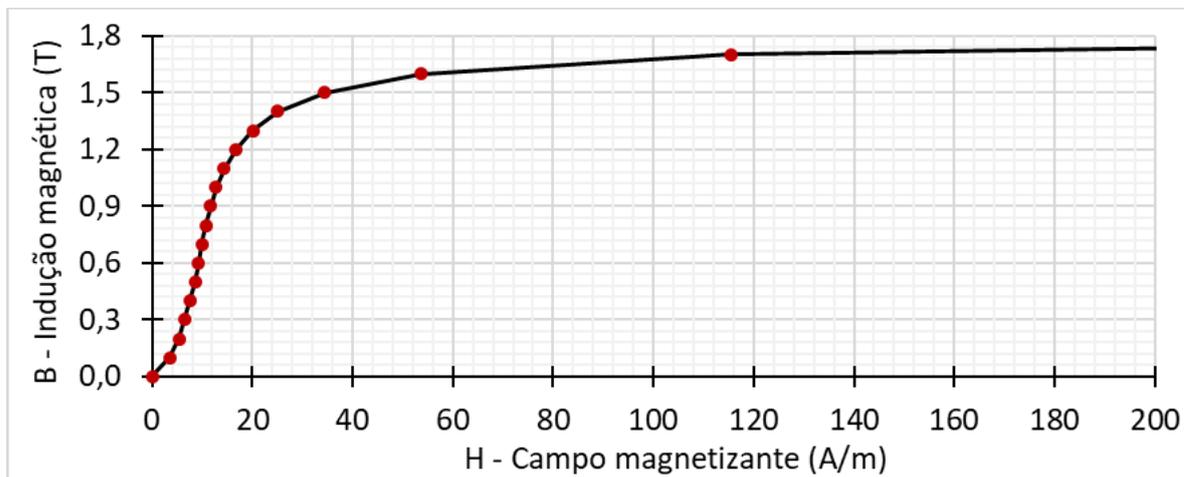
Figura 4.6 - Atribuição do material que compõe os núcleos.



Fonte: Autor.

No que tange a curva de magnetização do material selecionado, esta pode ser visualizada na Figura 4.7 para a frequência de 60Hz.

Figura 4.7 - Curva de magnetização do material M-4 em 60Hz - Fabricante AK Steel.



Fonte: Autor.

A expressão para o cálculo das perdas volumétricas (W/m³) pelo método de Steinmetz é mostrada a seguir.

$$P_{vol} = K_h f B_m^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1,5} \quad (4.1)$$

Sendo:

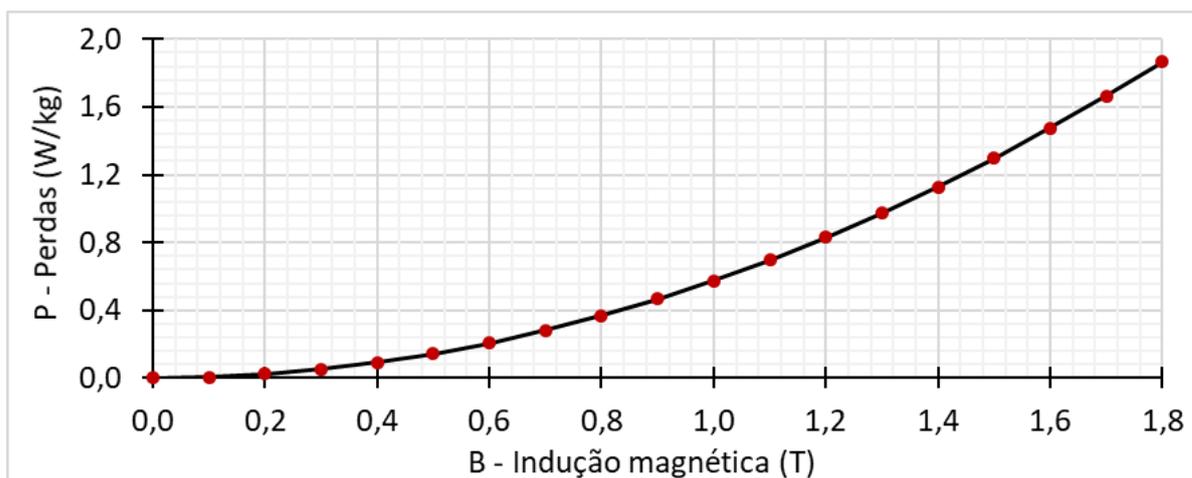
- f : Frequência de operação (Hz);
- B_m : Valor de pico da indução magnética (T).

Os coeficientes K_h , K_c e K_e para o material estabelecido para o núcleo estão listados a seguir, juntamente com o seu valor de peso específico (densidade):

- Coeficiente de perdas por histerese (K_h): 45,2161;
- Coeficiente de perdas por correntes induzidas (K_c): 0,469994;
- Coeficiente de perdas por excesso (K_e): 0;
- Peso específico: 7650 kg/m³.

De posse destes valores, constrói-se a curva de perdas por quilograma de núcleo, em função da indução magnética em 60Hz, que pode ser vista na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Curva de perdas por quilograma do material M-4 em 60Hz - Fabricante AK Steel.



Fonte: Autor.

4.3.2 Modelagem dos enrolamentos dos transformadores TA e TE

Quanto às bobinas constituintes dos transformadores, estas são simplificadaamente consideradas como cascas cilíndricas com seções transversais compatíveis com a soma das áreas de seção de cada espira de cobre, utilizando-se o “Copper” (cobre) a todos os enrolamentos. Isto posto, são apresentadas na sequência a composição e especificação física das unidades constituintes dos dois transformadores e suas partes.

- **Enrolamentos do Transformador de Acoplamento**

De forma consonante com as considerações feitas no Capítulo 3, o TA apresenta em seu secundário duas bobinas iguais, as quais, para o protótipo considerado, se apresentam com as características construtivas indicadas na Tabela 4.2. Esta compreende informações pertinentes a uma das metades do secundário em pauta, destacando que as dimensões apresentadas estão relacionadas ao condutor de cobre, sem a inserção das camadas de isolação.

Tabela 4.2 - Características construtivas da metade do enrolamento secundário do Transformador de Acoplamento.

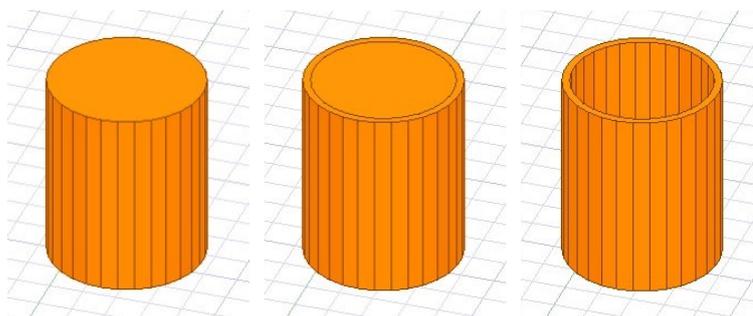
		Metade do secundário do TA
Dados do enrolamento real	Número de camadas	1
	Número de espiras por camada	23
	Altura da seção do condutor (mm)	5,0
	Largura da seção do condutor (mm)	4,5
	Diâmetro médio (mm)	88,0
Dados da casca cilíndrica modelada para representar o enrolamento real	Altura equivalente (mm)	115,0
	Largura equivalente (mm)	4,5
	Diâmetro externo (mm)	92,5
	Diâmetro interno (mm)	83,5

Fonte: Autor.

Assim como foi feito para os núcleos, a modelagem dos enrolamentos compreendeu formas geométricas básicas do Maxwell. Nesse caso, criou-se dois poliedros regulares com os diâmetros externo e interno assinalados na Tabela 4.2. Posteriormente o elemento de menor diâmetro foi subtraído daquele de maior diâmetro, conforme mostrado na Figura 4.9.

Muito embora tenha-se considerado os enrolamentos na forma simplificada de cascas cilíndricas, suas bases não são círculos perfeitos, mas triacontágonos (polígonos com 30 lados) que se aproximam de círculos. Dessa forma, tem-se um segmento em linha reta a cada intervalo de 12°. Esta opção por sólidos formados por linhas retas e não curvas foi feita para uma melhor adequação da malha de elementos finitos, que atribuiria um refinamento desnecessariamente grande nessas regiões curvas e aumentaria o custo computacional.

Figura 4.9 - Procedimento para a modelagem da metade do enrolamento secundário do TA.



Fonte: Autor.

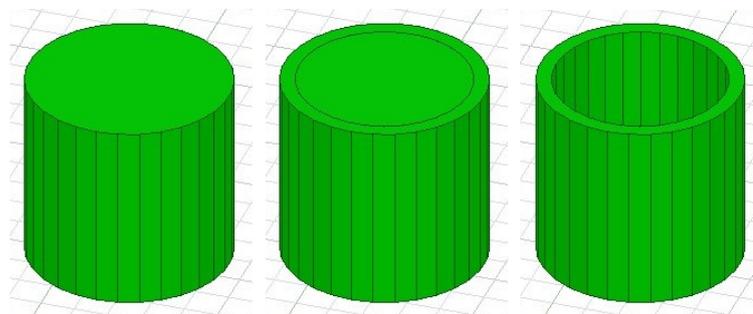
De forma similar à composição dos enrolamentos secundário do TA, a Tabela 4.3 apresenta as características mais significativas de uma das metades da bobina do primário do TA, ilustradas na Figura 4.10.

Tabela 4.3 - Características construtivas da metade do enrolamento primário do Transformador de Acoplamento.

		Metade do primário do TA
Dados do enrolamento real	Número de camadas	2
	Número de espiras por camada	23
	Altura da seção do condutor (mm)	5,0
	Largura da seção do condutor (mm)	4,5
	Diâmetro médio (mm)	111,5
Dados da casca cilíndrica modelada para representar o enrolamento real	Altura equivalente (mm)	115,0
	Largura equivalente (mm)	9,0
	Diâmetro externo (mm)	120,5
	Diâmetro interno (mm)	102,5

Fonte: Autor.

Figura 4.10 - Processo de modelagem de metade do enrolamento primário do TA.

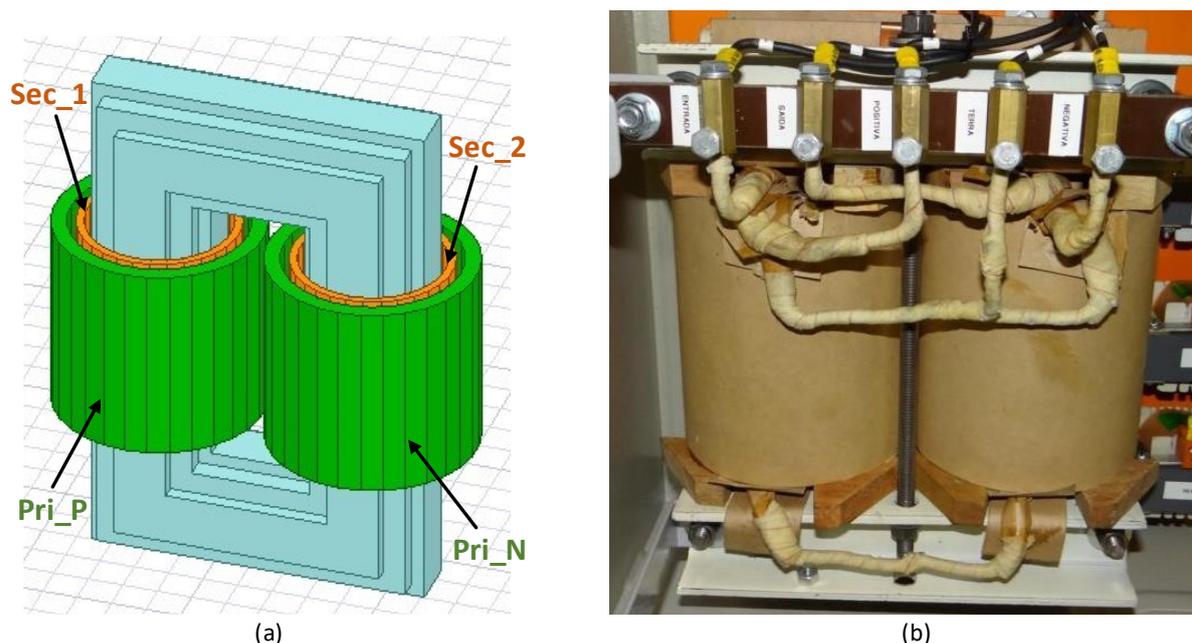


Fonte: Autor.

Criados os modelos representativos das bobinas que compõem o primário e secundário do TA, estes são posicionados concentricamente no mesmo eixo obtendo-se, assim, a representação completa da bobina.

Feita a duplicação dos modelos, estes são alocados aos braços do núcleo do TA, como mostra a Figura 4.11, a qual é também acompanhada do arranjo real do protótipo construído.

Figura 4.11 - Transformador de Acoplamento. (a) Modelo no ANSYS. (b) Elemento real.



Fonte: Autor.

- **Enrolamentos do Transformador de Excitação**

Quanto aos enrolamentos do autotransformador, estes são concentrados em uma única bobina, que fica alocada em um dos braços de seu núcleo, de onde são derivados os taps requeridos para o processo de regulação na forma de cinco posições (enrolamentos parciais do conjunto).

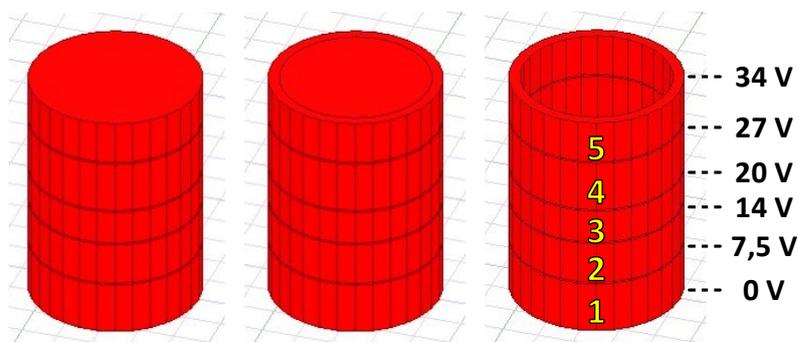
A Tabela 4.4 fornece as características da porção da bobina onde estão os taps do TE (chamado, para fins deste trabalho, de secundário). Já na Figura 4.12 é possível ver empilhadas as cinco porções desse enrolamento, modeladas no ANSYS.

Tabela 4.4 - Características construtivas das parcelas de bobinas do Transformador de Excitação associadas com os tapes (secundário).

		Secundário do TE
Dados do enrolamento real	Tensão nominal (V)	34,0
	Número de espiras total	26
	Número de camadas	2
	Número de espiras por camada	13
	Tensão nominal do tape 1 (V)	7,5
	Número aproximado de espiras do tape 1	6
	Tensão nominal do tape 2 (V)	14,0
	Número aproximado de espiras do tape 2	11
	Tensão nominal do tape 3 (V)	20,0
	Número aproximado de espiras do tape 3	15
	Tensão nominal do tape 4 (V)	27,0
	Número aproximado de espiras do tape 4	21
	Número de condutores em paralelo (axialmente)	2
	Altura da seção do condutor (mm)	5,0
Largura da seção do condutor (mm)	3,0	
Diâmetro médio (mm)	89,0	
Dados das cascas cilíndricas modeladas para representar o enrolamento real	Altura equivalente da porção 1 (mm)	30,0
	Altura equivalente da porção 2 (mm)	25,0
	Altura equivalente da porção 3 (mm)	20,0
	Altura equivalente da porção 4 (mm)	30,0
	Altura equivalente da porção 5 (mm)	25,0
	Largura equivalente (mm)	6,0
	Diâmetro externo (mm)	95,0
Diâmetro interno (mm)	83,0	

Fonte: Autor.

Figura 4.12 - Modelagem das parcelas de bobinas do Transformação de Excitação associadas com os tapes (secundário).



Fonte: Autor.

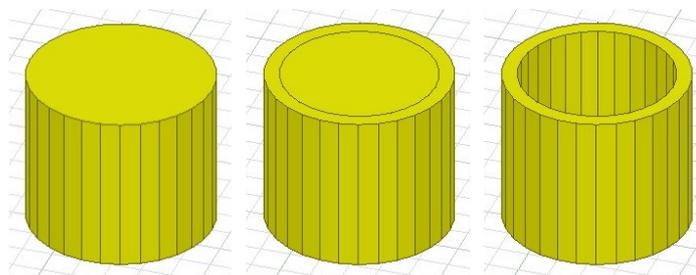
Tendo em vista que os componentes supra considerados são representativos apenas das partes do enrolamento atreladas com a disponibilização dos tapes para regulação, torna-se necessário a consideração do complemento da bobina, de forma a totalizar a composição do TE. Para tanto, somado às bobinas parciais supra referidas, a Tabela 4.5 contempla as informações próprias à estrutura complementar (chamada aqui de primário) da bobina que perfaz o arranjo completo, a qual é ilustrada na Figura 4.13.

Tabela 4.5 - Características construtivas do complemento que perfaz o enrolamento completo do Transformador de Excitação (primário).

		Primário do TE
Dados do enrolamento real	Número de camadas	2
	Número de espiras por camada	35,5
	Altura da seção do condutor (mm)	3,0
	Largura da seção do condutor (mm)	5,0
	Diâmetro médio (mm)	112,5
Dados da casca cilíndrica modelada para representar o enrolamento real	Altura equivalente (mm)	106,5
	Largura equivalente (mm)	10,0
	Diâmetro externo (mm)	122,5
	Diâmetro interno (mm)	102,5

Fonte: Autor.

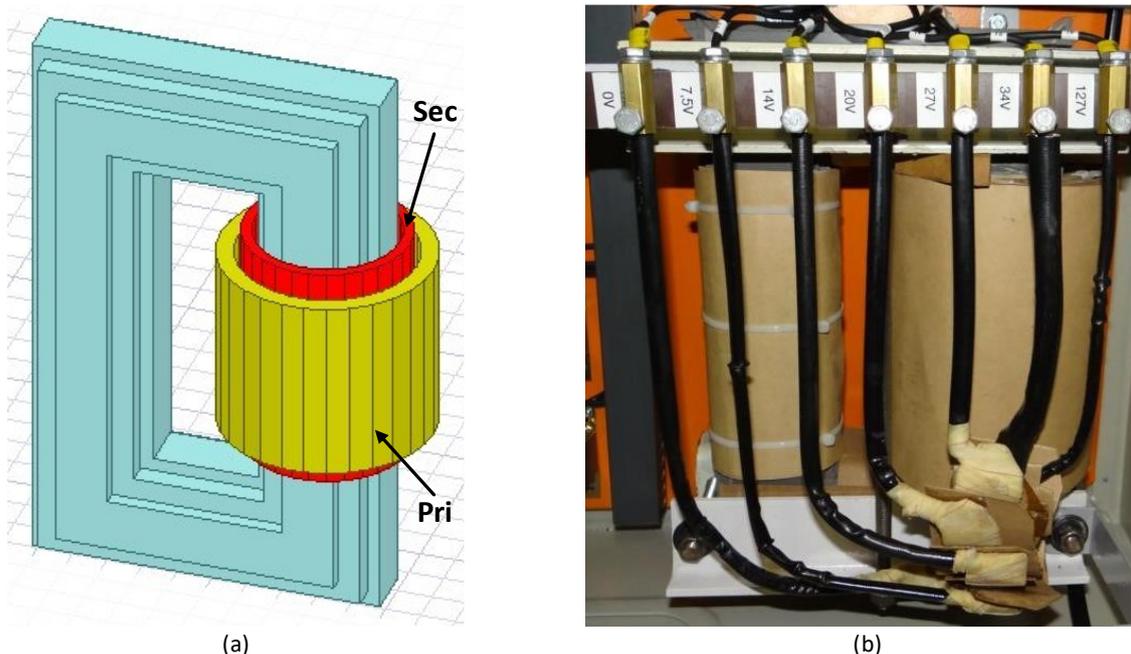
Figura 4.13 - Modelagem do complemento que perfaz o enrolamento completo do Transformação de Excitação (primário).



Fonte: Autor.

Criados os modelos representativos das bobinas que perfazem os tapes e o enrolamento complementar que formam a estrutura completa do TE, ambos são posicionados concentricamente no mesmo eixo e alocados no braço direito do núcleo do Transformador de Excitação. A Figura 4.14 mostra a composição física do TE modelado no ANSYS e seu correspondente real, presente no protótipo.

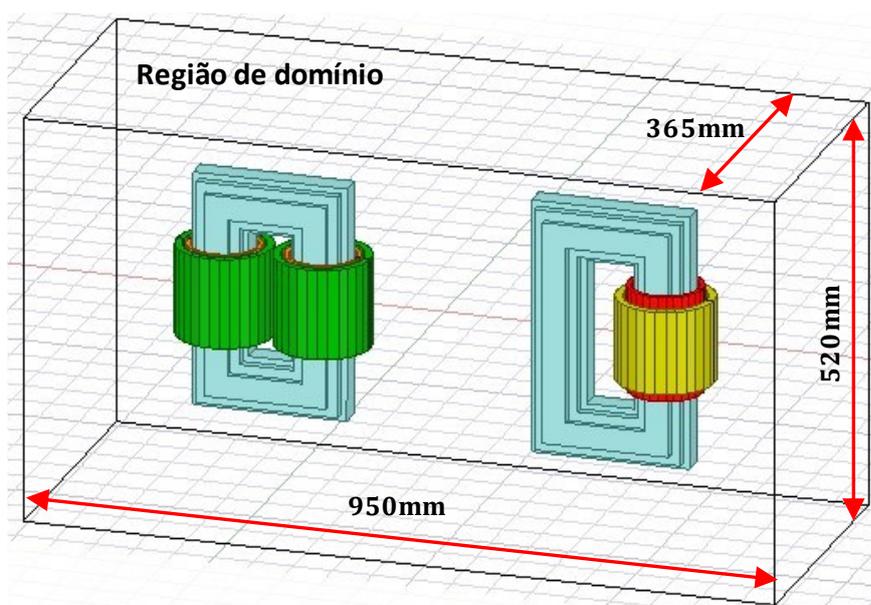
Figura 4.14 - Transformador de Excitação. (a) Modelo no ANSYS. (b) Elemento real.



Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 4.15 é indicativa da estratégia para a modelagem dos dois transformadores inseridos no mesmo ambiente de simulação, a uma distância de cerca de 20cm, como empregado na construção do protótipo. Observa-se também a região que delimita o domínio de simulação.

Figura 4.15 - Transformadores inseridos no ambiente de simulação.



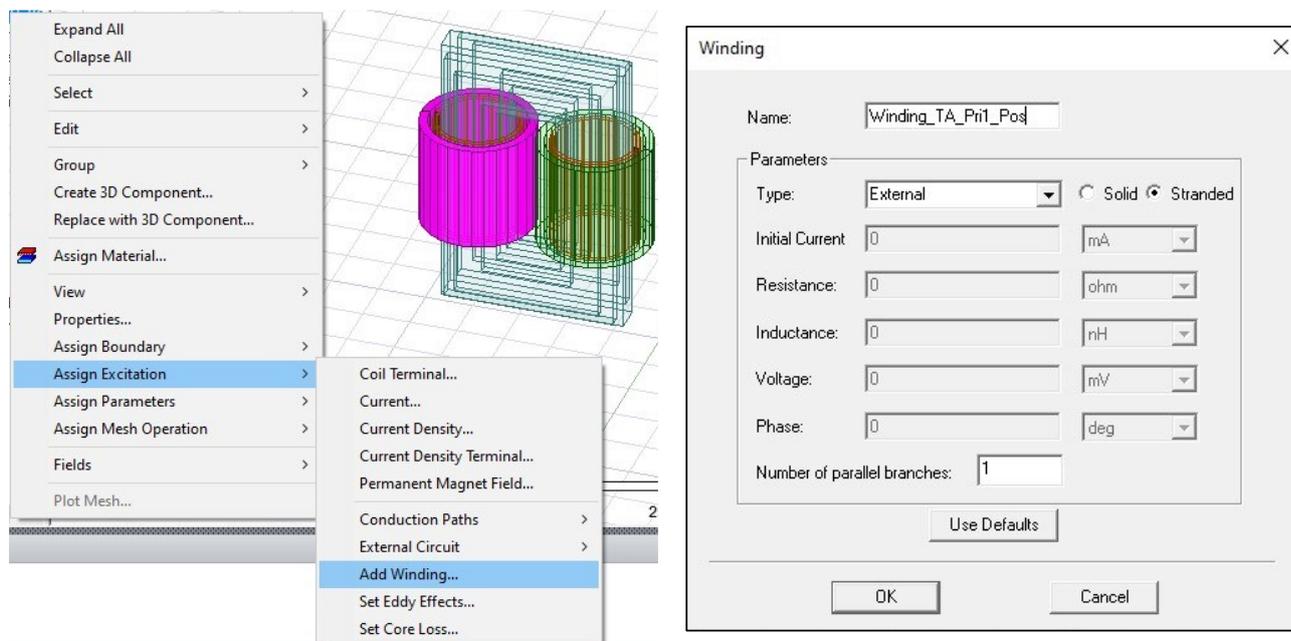
Fonte: Autor.

4.3.3 Estratégia para a imposição das excitações no modelo

Uma vez estabelecidos os modelos no software de análise, os trabalhos avançam no sentido de propiciar as fontes de excitação responsáveis pela produção dos campos magnéticos nestes elementos, ressaltando que o TE disponibiliza, via seus tapes, a tensão aplicada ao primário do TA, enquanto a rede elétrica do alimentador da carga determina a corrente imposta em seu secundário.

Para tanto é feita a seleção de cada objeto representativo de um enrolamento e caracterizá-lo como um “winding”. Isto é feito para que o software entenda que se trata, de fato, de um enrolamento, como ilustrado na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Criação de um “winding” no ANSYS.



Fonte: Autor.

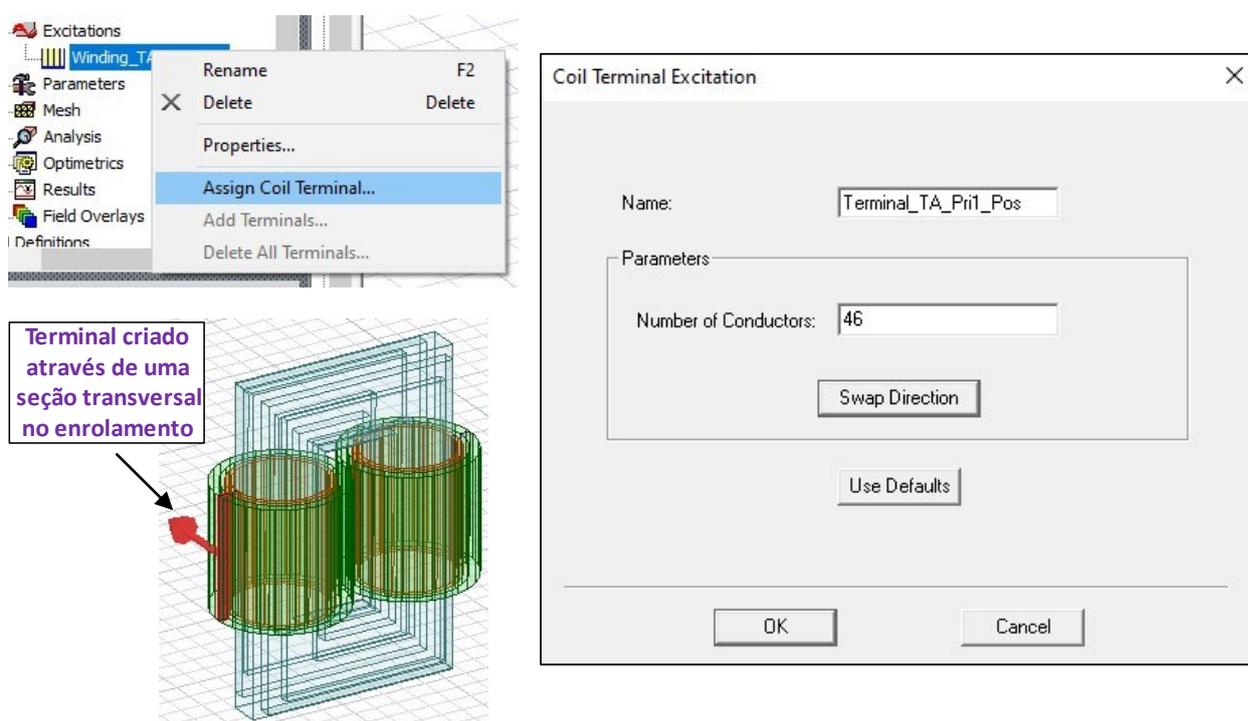
Para a parametrização de um “winding”, deve-se atentar para os seguintes requisitos:

- **Nome:** Atribui-se um nome a este enrolamento;
- **Tipo:** É informado se é desejado aplicar uma excitação de corrente ou tensão (inserindo o valor diretamente), ou por meio de um circuito externo;
- **Composição do enrolamento:** É informado se o enrolamento é composto por um material inteiriço (*Solid*) ou por uma constituição de várias espiras (*Stranded*);

- Condutores em paralelo: Informa-se a quantidade de condutores em paralelo que compõem este enrolamento.

Posteriormente, parametriza-se os terminais destes enrolamentos através de seções, como exemplificado na Figura 4.17. Deve-se atribuir um nome a estes terminais e informar o número de espiras presentes. A seta vermelha indicada no terminal representa o sentido em que o enrolamento é envolto na bobina.

Figura 4.17 - Criação de um “coil terminal” no ANSYS.

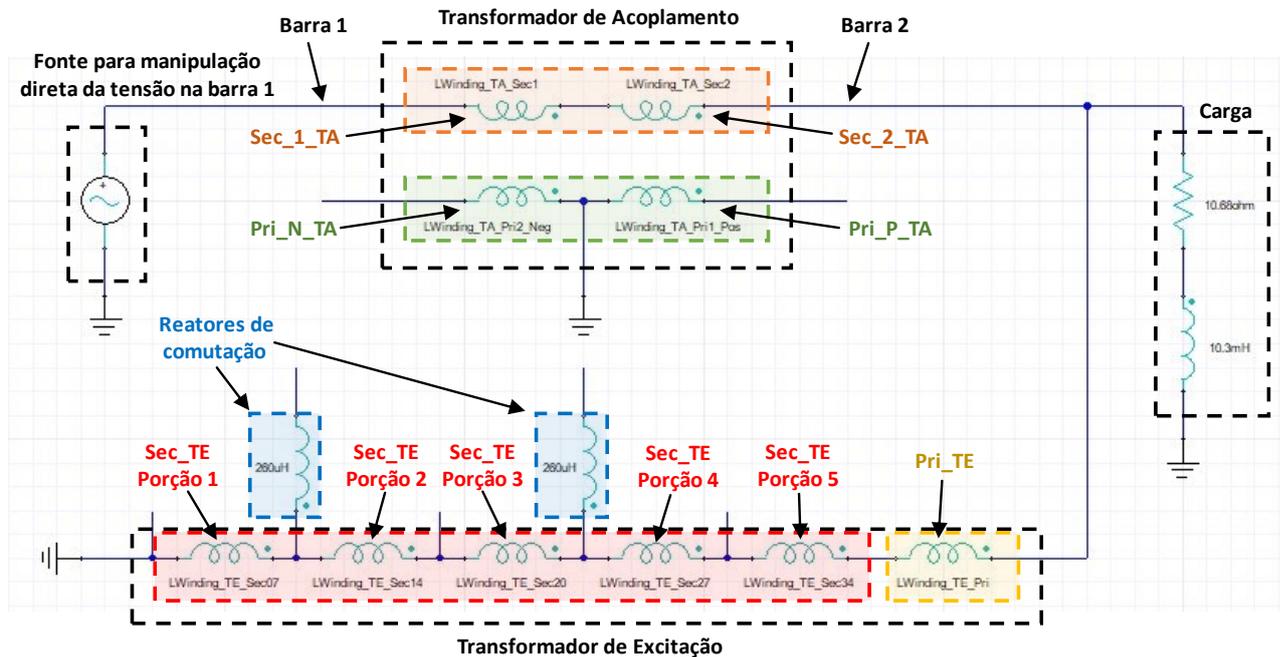


Fonte: Autor.

Uma vez atendido o exposto anteriormente, a estrutura magnética e elétrica do modelo do RET implementado, procede-se com a conexão do compensador de tensão sob investigação com o equivalente de uma rede elétrica, representando o alimentador a ser regulado.

O arranjo completo, compreendendo o alimentador e o dispositivo regulador encontram-se indicados na Figura 4.18. Assim, o Maxwell cria uma janela gráfica adicional onde todos os elementos 3D identificados como “windings” ficam disponíveis como blocos de circuitos elétricos. Ressalta-se que o diagrama omitiu as resistências dos enrolamentos, que devem ser inseridas, assim como os medidores de tensão e corrente.

Figura 4.18 - Circuito externo montado para simular o RET completo inserido num sistema.



Fonte: Autor.

4.4 Considerações finais

O conteúdo deste capítulo, como visto, foi centrado no processo de implementação das unidades eletromagnéticas do RET no software ANSYS Maxwell. Visando fundamentar os princípios físicos que regem tal simulador, foram também apresentados fundamentos associados com a técnica de análise através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Assim, foram destacadas as aplicações e vantagens do recurso em pauta, e ainda, algumas das limitações do MEF. Não obstante este último fato, estas não diminuem a importância e utilidade do MEF como uma ferramenta valiosa na engenharia e indústria.

No que tange a modelagem e implementação do RET no software ANSYS Maxwell, este procedimento, como mostrado, envolveu várias etapas compreendendo a representação em 3D do TA e do TE através da criação dos objetos representativos dos núcleos e das bobinas dos transformadores. Após a configuração geométrica construtiva, procedeu-se a atribuição de seus materiais. No caso dos núcleos, foi utilizado o material "M-4 Mill Anneal" da AK Steel, enquanto para os condutores atribuiu-se o cobre.

Uma vez configurado o equipamento, foram então disponibilizados os recursos necessários para os trabalhos investigativos do desempenho dos componentes eletromagnéticos que perfazem o regulador, conjuntamente com seus demais acessórios e possibilidades operacionais. Isto posto, ficou então estabelecida a estrutura para a análise computacional das condições operativas do compensador, visando, sobretudo, as grandezas magnéticas impostas aos seus componentes, como considerado na sequência dos trabalhos.

CAPÍTULO V

5 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES MAGNÉTICAS IMPOSTAS AOS TRANFORMADORES DO RET

5.1 Considerações iniciais

Em atenção aos objetivos desta dissertação, a qual encontra-se voltada para a realização de estudos investigativos sobre as condições eletromagnéticas impostas às suas unidades transformadoras, procede-se nesta etapa a realização de estudos de caso atrelados com situações específicas, de regime permanente, a que ficam submetidos o TE e TA, do Regulador Eletromagnético de Tensão. Não obstante ambos sejam contemplados na análise, como se verá, devido às condições especiais a que fica submetido a unidade de acoplamento série, ou seja, sua operação sob a imposição simultânea de duas fontes de forças magnetomotrizes, a maioria das discussões terão por foco este componente.

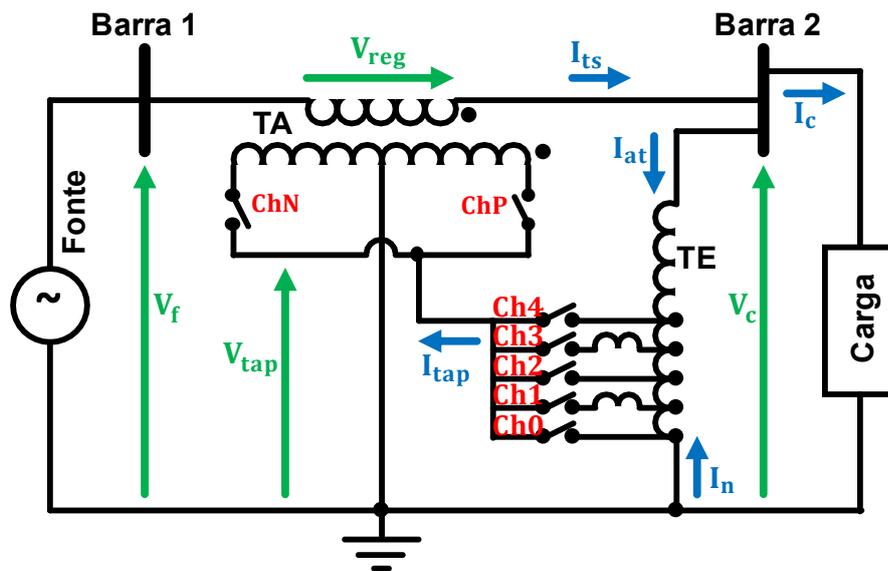
Dentre as possibilidades estabelecidas para as análises, os estudos de caso primam por variações da tensão de suprimento da rede, à montante do TA, em degraus de, aproximadamente, 5% com relação à tensão nominal, compreendendo uma varredura dos tapes disponibilizados pelo regulador sob análise. Nestes termos, a operacionalidade completa do regulador e suas condições funcionais são avaliadas, com destaque aos níveis de magnetização a que ficam sujeitos.

5.2 Caracterização dos Estudos de Casos

Os estudos computacionais de desempenho foram estabelecidos na forma de três conjuntos de avaliações específicas de operação, todos atrelados com um

alimentador bastante simples, como indicado na Figura 5.1. Esta indica uma fonte de suprimento, a qual será submetida a variações da tensão visando a operacionalidade do processo de compensação, o alimentador junto ao qual se encontra inserido o RET e a carga suprida. A tensão de fase nominal da rede é de 127V, enquanto a potência nominal da carga consumidora é de 1420VA com fator de potência 0,94 atrasado. Esta carga é tratada na forma de impedância constante.

Figura 5.1 - Diagrama unifilar simplificado do sistema simulado.



Fonte: Autor.

O primeiro dos estudos compreende o funcionamento do RET em sua estrutura completa, ou seja, diante das alterações da tensão do suprimento, o compensador age como estabelecido previamente. Portanto, esta situação contempla a operação conjunta dos dois transformadores (TE e TA). Assim, este caso representa a condição em que o TA se apresenta sob duas imposições de fontes de *fmm* simultaneamente aplicadas, ou seja, a tensão aplicada ao seu primário, advinda do TE e, também, a corrente estabelecida pela rede no secundário e atrelada com o carregamento definido pela carga.

As demais avaliações, identificadas por casos 2 e 3, por sua vez, destinam-se à avaliação operacional isolada do TA submetido, separadamente, à ação de sua magnetização primária com o secundário em aberto e, na sequência, com a imposição da corrente de carga no seu secundário, com o enrolamento primário em circuito aberto. Por se tratar do TA operando isoladamente, o TE, tanto para o caso 2 como 3, não é considerado nos estudos, visto sua ausência associada com as investigações

de interesse. Assim, ter-se-iam simuladas as condições separadas das solicitações impostas ao núcleo do TA, cujos fluxos magnéticos servem como base para a correlação quando das duas fontes de excitação de forma conjunta.

Do exposto segue que os estudos de caso realizados são:

- **CASO 1:** Simulação do equipamento integrado a um sistema elétrico sob distintas tensões de suprimento da fonte de alimentação, quer no que se refere às variações que requerem uma compensação positiva e negativa. A Tabela 5.1 apresenta os valores de tensão oferecidos pela rede de alimentação à montante do enrolamento série do TA (Barra 1). Para cada situação imposta, são também indicados os tapes (chaves) acionadas para a regulação da tensão nos terminais da carga. As indicações CP e CN correspondem, respectivamente, à compensação positiva e à negativa. O valor do reator de comutação, cuja função foi esclarecida neste trabalho, também é indicado.

Tabela 5.1 - Situações simuladas para o caso 1.

Chave de polaridade	Chave de tape	Modo de compensação	Tensão aplicada na Barra 1 (V _r)	Reator de comutação	Carga
ChP	Ch4	CP – 27V	101,50 V	–	(10,68 + j3,88) Ω
	Ch3	CP – 20V	107,60 V	265 μH	
	Ch2	CP – 14V	113,60 V	–	
	Ch1	CP – 7,5V	120,60 V	265 μH	
	Ch0	CP – 0V	126,60 V	–	
ChN	Ch1	CN – 7,5V	132,60 V	265 μH	
	Ch2	CN – 14V	139,70 V	–	
	Ch3	CN – 20V	145,70 V	265 μH	
	Ch4	CN – 27V	151,70 V	–	

Fonte: Autor.

- **CASO 2:** Simulação do TA isolado, utilizando apenas da tensão no primário como fonte de força magnetomotriz, mantendo o secundário em circuito aberto. Os valores de tensão aplicados no caso 2 serão os mesmos de V_{tap} (ver Figura 5.1), obtidos como resultados das simulações do caso 1. Como já esclarecido, tanto para este, como para o caso subsequente, o TE não é considerado nas avaliações de desempenho.
- **CASO 3:** Simulação do TA isolado novamente, mas dessa vez operando somente com a corrente imposta ao seu secundário como fonte de fmm,

mantendo o primário em circuito aberto. De forma análoga ao caso 2, as correntes impostas no caso 3 terão os mesmos valores de I_{ts} obtidos das simulações do caso 1.

5.3 Resultados dos Estudos – Caso 1

A primeira etapa contemplada no caso 1 foi a simulação do RET na condição de regulação positiva com o tape de 27V (CP – 27V), descrita na Tabela 5.1. Nesse estágio utilizou-se o algoritmo de malha autoadaptativa presente no *solver* Magnético-harmônico. A descrição desse sistema de refinamento de malha está brevemente explicada a seguir:

- i. O Maxwell realiza uma primeira iteração arbitrando uma quantidade e uma distribuição de elementos (tetraedros) no domínio de simulação;
- ii. São calculados os erros de simulação associados com cada um dos tetraedros e, posteriormente, calcula-se o erro global. Como geralmente o número total de tetraedros atribuído na primeira iteração é pequeno, o erro global é consideravelmente grande e insatisfatório;
- iii. O software realiza um *hanking* daqueles elementos que obtiveram os maiores erros e os divide (refina), de forma que, para a próxima iteração, a quantidade total de tetraedros no domínio aumente em uma certa porcentagem com relação à iteração anterior, num percentual de valor definido pelo usuário;
- iv. São feitas novas iterações, repetindo este processo até que um dos critérios de parada seja atendido, sendo eles: o erro global da simulação fique abaixo de um valor estipulado pelo usuário, ou o número máximo de iterações (também definido pelo usuário) seja atingido.

A Tabela 5.2 mostra os parâmetros ajustados para o sistema de malha autoadaptativa, enquanto a Tabela 5.3 apresenta resultados desse processo para a simulação de CP – 27V. Observa-se que a quantidade de interações não atingiu o número máximo parametrizado, pois o critério de erro percentual foi satisfeito primeiro.

Tabela 5.2 - Parâmetros ajustados para a malha autoadaptativa.

Percentual de refinamento a cada nova iteração	30 %
Erro global máximo admitido (critério de parada)	1,5 %
Número máximo de iterações (critério de parada)	10

Fonte: Autor.

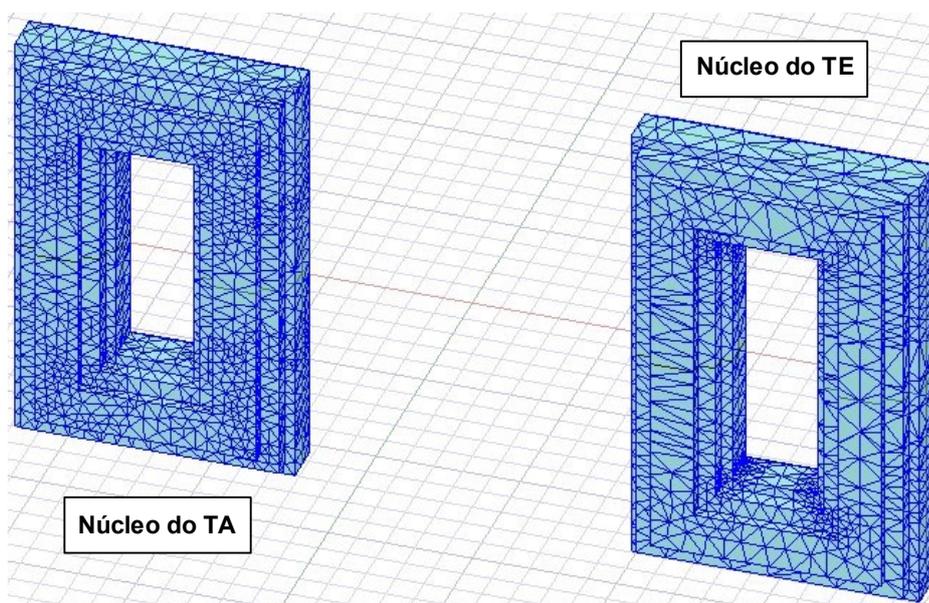
Tabela 5.3 - Resultados do processo de malha autoadaptativa para CP – 27V.

Iteração	Quantidade total de tetraedros no domínio	Erro
1	47318	260,30 %
2	61770	5,0931 %
3	80614	2,3041 %
4	105218	1,8485 %
5	137325	1,4521 %

Fonte: Autor.

Dos 137325 tetraedros atribuídos ao domínio de simulação, 22840 deles são atribuídos ao núcleo do TA e 16532 ao núcleo do TE, ou seja, há um maior refinamento de elementos no núcleo do Transformador de Acoplamento. Isto é ilustrado na Figura 5.2, na qual são mostradas as malhas atribuídas aos dois núcleos.

Figura 5.2 - Malhas de elementos finitos atribuídas aos núcleos dos dois transformadores.



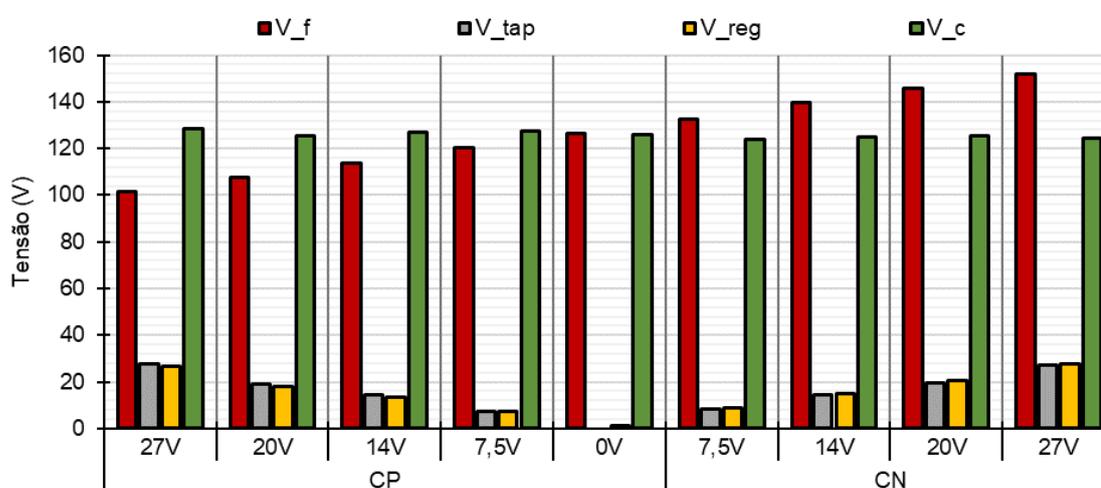
Fonte: Autor.

Os outros 97953 elementos estão distribuídos entre os enrolamentos e região “vazia” do domínio. De modo a reduzir o custo computacional necessário para a realização das outras simulações do caso 1, esta configuração de malha de elementos

finitos obtida para CP – 27V é reutilizada para todos os outros níveis de compensação de tensão, seja positiva ou negativa.

Realizadas todas as simulações estabelecidas para o caso 1, a Figura 5.3 apresenta um gráfico contendo informações de desempenho atreladas com as seguintes grandezas: tensão na fonte (V_f), tensão disponibilizada pelo tape (V_{tap}), tensão aplicada em série com o alimentador (V_{reg}) e tensão na carga (V_c). Tais grandezas são também organizadas na Tabela 5.4.

Figura 5.3 - Tensões obtidas nas simulações do caso 1.



Fonte: Autor.

Tabela 5.4 - Valores das tensões obtidas nas simulações do caso 1.

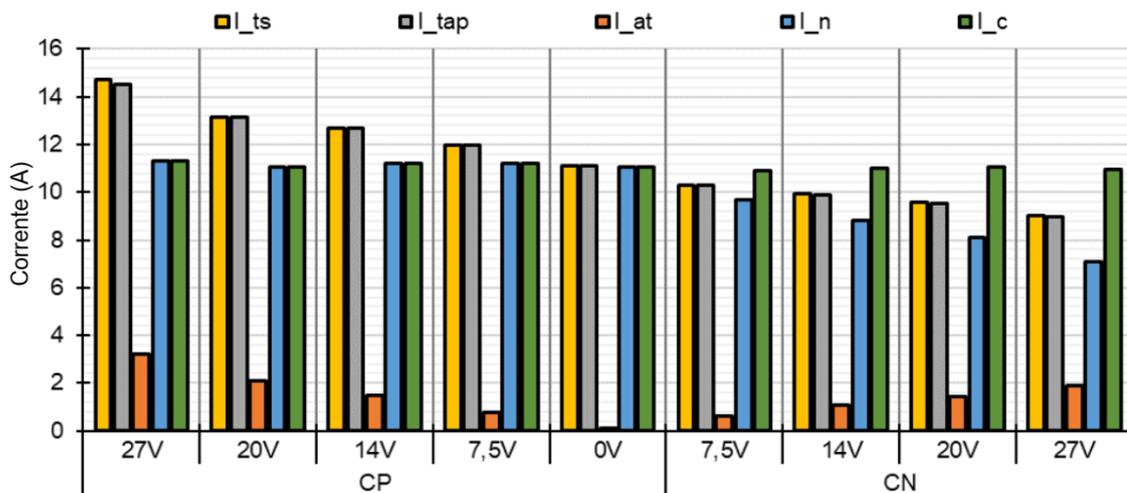
		V_f (V)	V_{tap} (V)	V_{reg} (V)	V_c (V)
CP	27V	101,5	27,69	26,81	128,25
	20V	107,6	18,95	18,25	125,63
	14V	113,6	14,37	13,63	127,15
	7,5V	120,6	7,51	7,08	127,24
	0V	126,6	0,00	1,36	125,89
CN	7,5V	132,6	8,09	8,92	123,90
	14V	139,7	14,20	14,86	124,89
	20V	145,7	19,77	20,44	125,35
	27V	151,7	26,93	27,51	124,21

Fonte: Autor.

Como se constata, os resultados obtidos são indicativos da eficácia do processo de regulação da tensão. As tensões disponibilizadas pelos tapes têm valores bem próximos aos nominais, assim como a tensão na carga. Percebe-se também que

a magnitude da tensão aplicada ao alimentador é praticamente igual à do tape. Já a Figura 5.4, é indicativa das correntes que se estabelecem pelo RET, as quais são também indicadas na Tabela 5.5. Vale ressaltar que: I_{ts} se refere à corrente imposta ao secundário do TA pelo alimentador; I_{tap} é a corrente que flui entre o tape do TE e o primário do TA; I_{at} é a corrente na parcela complementar da bobina do TE; I_n é a corrente na parcela da bobina do TE onde estão os tapes e; por fim, I_c é a corrente na carga.

Figura 5.4 - Correntes obtidas nas simulações do caso 1.



Fonte: Autor.

Tabela 5.5 - Valores das correntes obtidas nas simulações do caso 1.

		I_{ts} (A)	I_{tap} (A)	I_{at} (A)	I_n (A)	I_c (A)
CP	27V	14,70	14,50	3,19	11,32	11,29
	20V	13,13	13,15	2,08	11,07	11,05
	14V	12,67	12,69	1,49	11,21	11,19
	7,5V	11,98	11,98	0,79	11,20	11,20
	0V	11,12	11,11	0,12	11,07	11,08
CN	7,5V	10,31	10,28	0,60	9,68	10,90
	14V	9,91	9,88	1,08	8,80	10,99
	20V	9,59	9,55	1,44	8,12	11,03
	27V	9,03	8,98	1,91	7,08	10,93

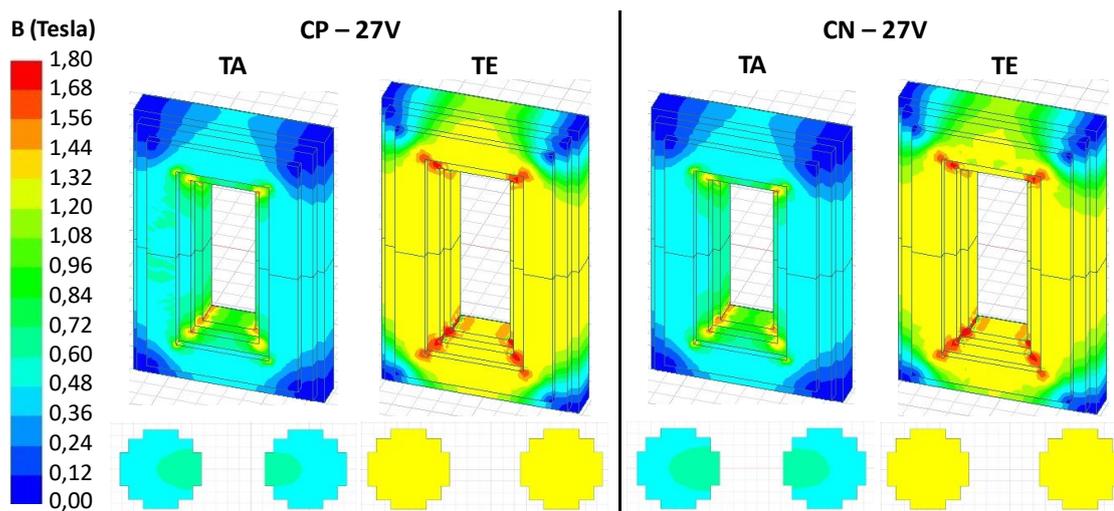
Fonte: Autor.

Assim como as tensões V_{tap} e V_{reg} têm valores praticamente iguais, como mostrado na Tabela 5.4, as correntes I_{tap} e I_{ts} também seguem o mesmo padrão. Isso se dá pelo fato da relação de transformação adotada entre o primário e o secundário

do TA ser de dois para um quando se considera a totalidade das espiras. Todavia, tendo em vista que o enrolamento primário é dividido em duas bobinas iguais, resta que a relação de espiras, por metade do enrolamento total, corresponderia a um valor unitário. Quanto às respectivas correntes, estas irão alterar conforme o modo e o nível de regulação requerido.

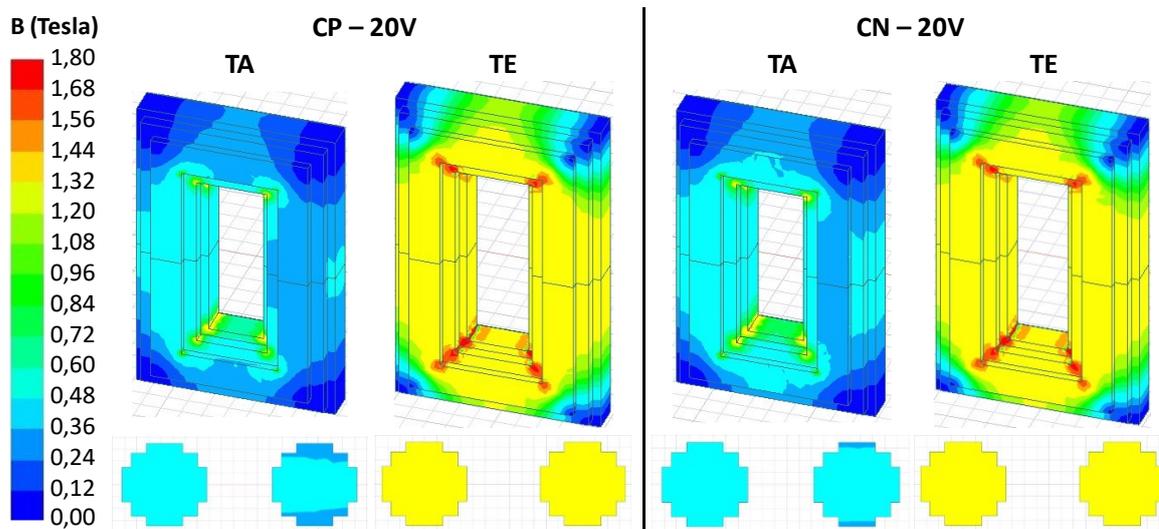
No que se refere às condições magnéticas no RET, a Figura 5.5 é indicativa, via cores distintas, dos diversos níveis de indução magnética a que ficam sujeitos os núcleos, para ambos os transformadores, operando com compensação positiva e negativa em 27 volts. Já a Figura 5.6, a Figura 5.7 e a Figura 5.8 trazem as mesmas informações para os níveis de tensão de compensação de 20V, 14V e 7,5V, respectivamente.

Figura 5.5 - Caso 1: perfil da indução magnética nos núcleos do TA e do TE para compensação positiva e negativa com 27 volts.



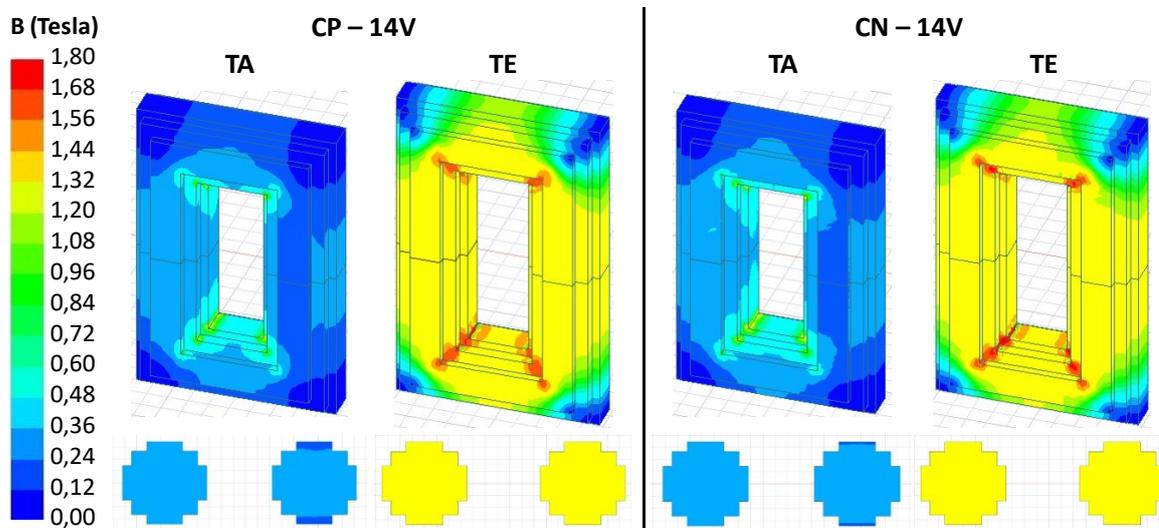
Fonte: Autor.

Figura 5.6 - Caso 1: perfil da indução magnética nos núcleos do TA e do TE para compensação positiva e negativa com 20 volts.



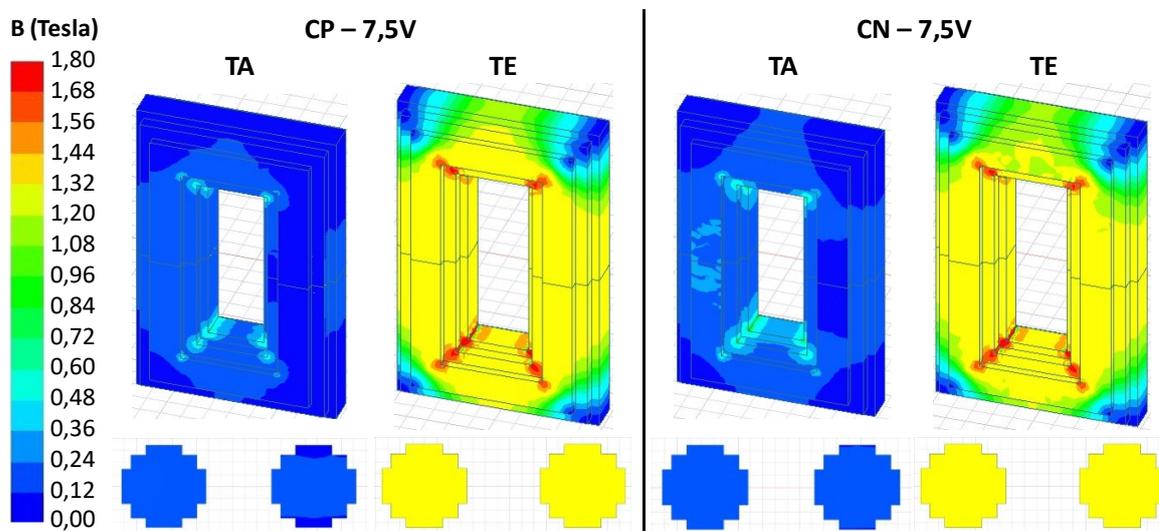
Fonte: Autor.

Figura 5.7 - Caso 1: perfil da indução magnética nos núcleos do TA e do TE para compensação positiva e negativa com 14 volts.



Fonte: Autor.

Figura 5.8 - Caso 1: perfil da indução magnética nos núcleos do TA e do TE para compensação positiva e negativa com 7,5 volts.



Fonte: Autor.

Analisando o perfil da indução magnética presente nos núcleos de ambos os transformadores modelados, observa-se que este permaneceu praticamente constante no TE, independentemente no modo e nível de compensação de tensão. Já para o TA, nota-se que a intensidade da indução magnética tem relação direta com o nível de tensão utilizado para compensação. A Tabela 5.6 traz os valores médios de indução representados graficamente nas figuras anteriores, bem como as perdas elétricas nos respectivos núcleos, obtidos pela simulação do caso 1. Observa-se que as perdas no núcleo do TE, assim como seu nível de indução, também permanecem constantes. Do mesmo modo, as perdas no núcleo do TA mostram certa proporção com seu respectivo campo magnético, como sugere o método de Steinmetz.

Tabela 5.6 - Valores de campo e perdas nos núcleos dos transformadores para o caso 1.

	Compensação Positiva				Compensação Negativa			
	TA		TE		TA		TE	
	B (T)	P (W)	B (T)	P (W)	B (T)	P (W)	B (T)	P (W)
27 V	0,492	3,356	1,173	18,828	0,499	3,455	1,134	17,686
20 V	0,335	1,576	1,146	18,047	0,370	1,914	1,145	18,021
14 V	0,252	0,890	1,162	18,500	0,269	1,015	1,141	17,887
7,5 V	0,135	0,250	1,163	18,530	0,163	0,368	1,131	17,599

Fonte: Autor.

Finalizadas as análises pertinentes ao caso 1, adota-se os valores de tensão aplicados ao TA (V_{tap} , expostos na Tabela 5.4) para os testes do caso 2, e de corrente impostas ao seu secundário (I_{ts} , expostos na Tabela 5.5) para o caso 3. Assim procedendo estar-se-á cumprindo os objetivos delineados como escopo desta dissertação, a qual, como já mencionado, visa a identificação dos impactos da operação sob as duas fontes de fmm sobre o TA e os efeitos isolados destas. Assim, apenas esta unidade é considerada nas análises e discussões.

5.4 Resultados dos Estudos – Caso 2

Ao se implementar uma simulação levando em conta apenas o Transformador de Acoplamento na região de domínio de modelagem, a malha de elementos finitos utilizada no caso 1 não pode mais ser utilizada, visto que a remoção do TE da região do domínio provoca uma alteração na geometria do problema. Diante deste fato, utilizou-se, novamente, do algoritmo de malha autoadaptativa para a nova condição. O algoritmo atribuiu uma malha com um total de 18188 tetraedros, dos quais 4986 foram alocados ao núcleo, obtendo uma simulação com erro de 1,0924%. A Tabela 5.7 traz os valores de tensão aplicados ao primário do TA (primário positivo indicado por CP, e primário negativo por CN). Assim, estes níveis são os mesmos empregados para a tensão V_{tap} indicados na Tabela 5.4. Também, V_{reg} continua se referindo à tensão no secundário do TA, e I_0 representa a corrente a vazio no primário.

Tabela 5.7 - Valores das tensões e corrente obtidas nas simulações do caso 2.

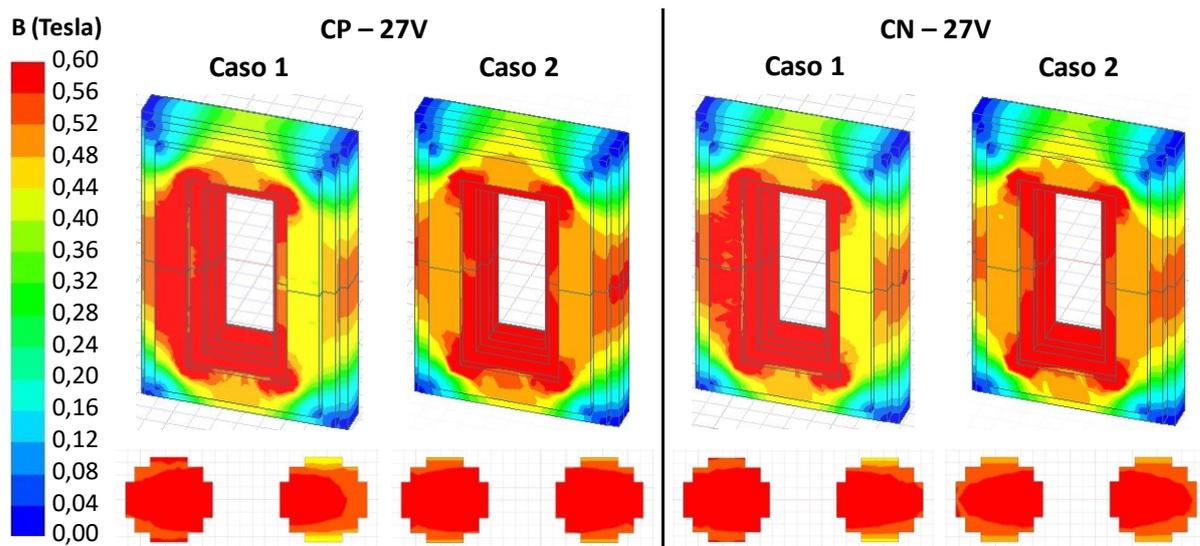
		V_{tap} (V)	V_{reg} (V)	I_0 (mA)
CP	27V	27,70	27,69	120,16
	20V	18,94	18,93	93,69
	14V	14,37	14,36	78,02
	7,5V	7,51	7,50	49,21
CN	7,5V	8,09	8,08	52,10
	14V	14,20	14,19	77,40
	20V	19,77	19,76	96,36
	27V	26,93	26,93	117,98

Fonte: Autor.

No que se refere às condições magnéticas impostas, a Figura 5.9 mostra graficamente a indução magnética distribuída no núcleo do TA para os casos 1 e 2

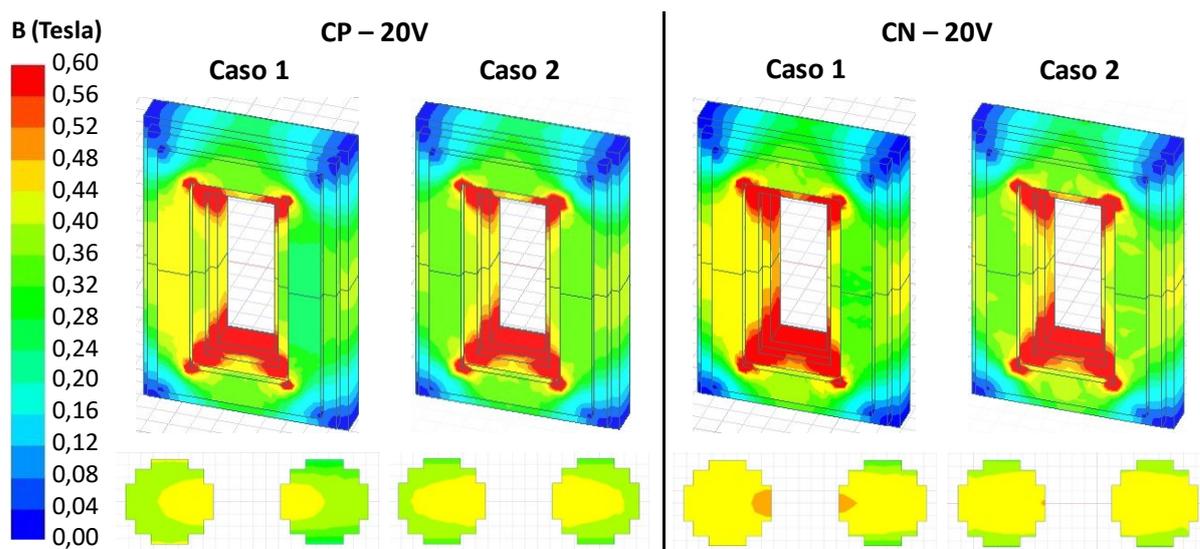
nos modos de compensação positiva e negativa com 27 volts. Já a Figura 5.10, a Figura 5.11 e a Figura 5.12 trazem as mesmas informações, todavia, para os níveis de tensão de compensação de 20V, 14V e 7,5V, respectivamente. Nota-se que os valores que delimitam a escala de cores são diferentes daqueles utilizados nas imagens mostradas para o caso 1.

Figura 5.9 - Caso 1 e caso 2: perfil da indução magnética no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 27 volts.



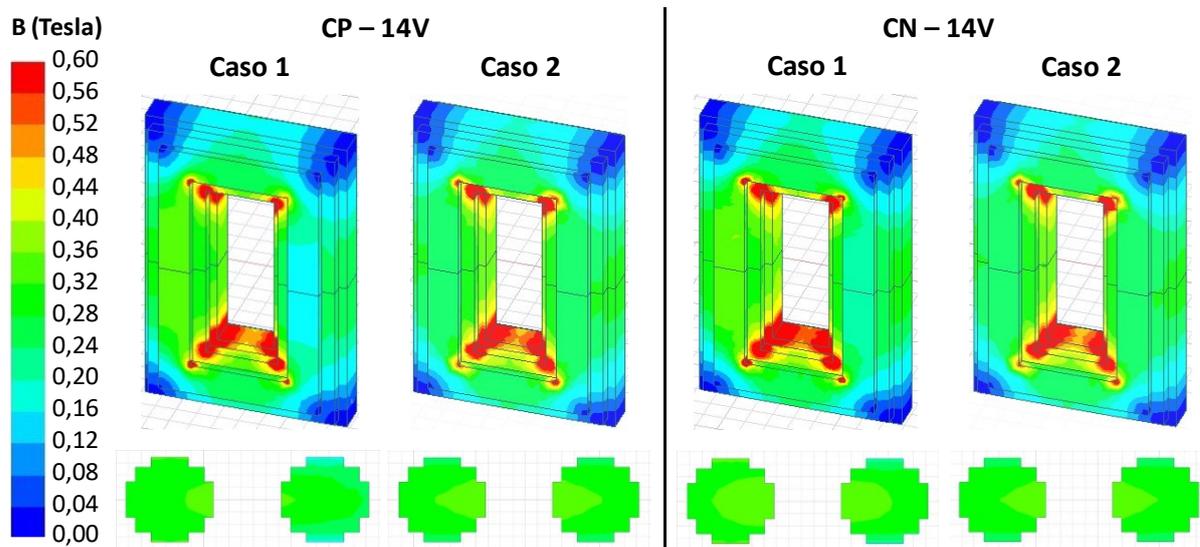
Fonte: Autor.

Figura 5.10 - Caso 1 e caso 2: perfil da indução magnética no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 20 volts.



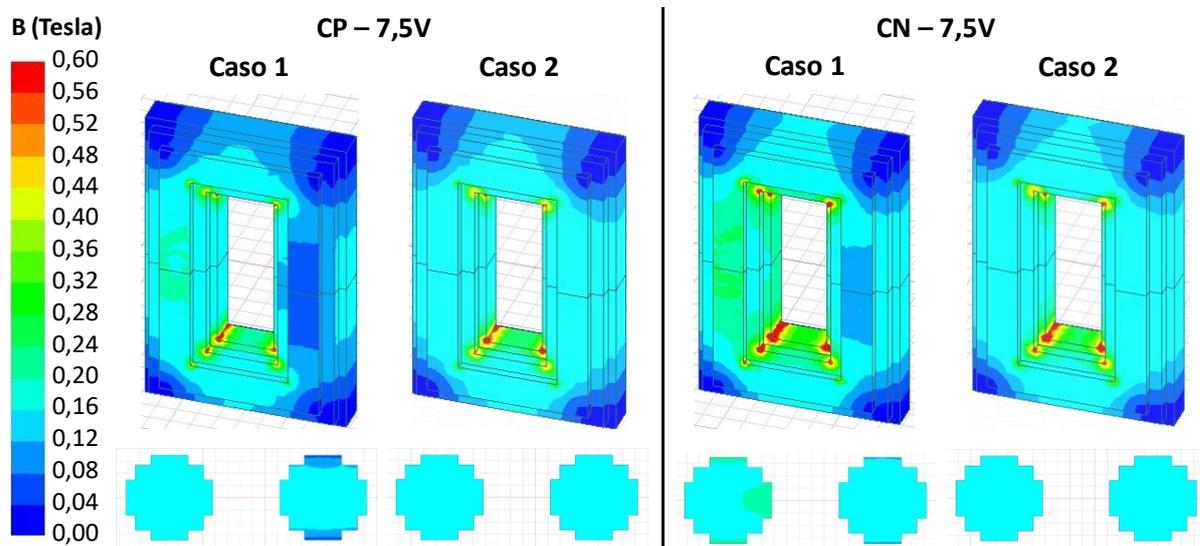
Fonte: Autor.

Figura 5.11 - Caso 1 e caso 2: perfil da indução magnética no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 14 volts.



Fonte: Autor.

Figura 5.12 - Caso 1 e caso 2: perfil da indução magnética no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 7,5 volts.



Fonte: Autor.

Os resultados então obtidos revelam que o padrão de distribuição de indução magnética no núcleo do Transformador de Acoplamento não mostrou alterações significativas ao se comparar os desempenhos obtidos para os casos 1 e 2. Isso implica numa importante constatação que contempla o desafio imposto como objetivo desta dissertação: *os níveis da indução magnética no núcleo do TA não são*

significativamente alterados para a situação da operação normal do RET, quer esteja esta unidade sob dupla excitação ou apenas aquela advinda do TE.

A Tabela 5.8 traz uma comparação entre os valores de indução magnética e perdas no núcleo, obtidos pelas simulações dos casos 1 e 2. O percentual de erro é definido tomando a condição à vazío (caso 2) como referência.

Tabela 5.8 - Valores de campo e perdas no núcleo do TA para os casos 1 e 2.

		B (T)			P (W)		
		Caso		Δ	Caso		Δ
		1	2		1	2	
CP	27 V	0,492	0,503	-2,26%	3,356	3,510	-4,38%
	20 V	0,335	0,343	-2,29%	1,576	1,657	-4,86%
	14 V	0,252	0,261	-3,31%	0,890	0,957	-7,01%
	7,5 V	0,135	0,138	-1,92%	0,250	0,261	-4,28%
CN	7,5 V	0,163	0,148	9,85%	0,368	0,303	21,38%
	14 V	0,269	0,258	4,37%	1,015	0,935	8,57%
	20 V	0,370	0,358	3,18%	1,914	1,803	6,17%
	27 V	0,499	0,489	2,07%	3,455	3,322	4,02%

Fonte: Autor.

Como pode ser verificado na Tabela 5.8, novamente, não há também divergências entre os valores das perdas para as duas condições operativas. Todavia, diante dos pequenos valores associados com as perdas, pequenos desvios numéricos representam grandes percentuais quando da comparação relativa entre as grandezas.

5.5 Resultados dos Estudos – Caso 3

A Tabela 5.9 é indicativa dos valores de corrente aplicadas ao secundário do Transformador de Acoplamento (enrolamento série). Estas correspondem às mesmas obtidas quando da operação normal do RET (I_{ts} indicados na Tabela 5.5). A grandeza V_{reg} representa o nível da tensão induzida no secundário do TA, e V_{pri} é a tensão induzida no primário completo (composição das tensões do primário positivo e negativo).

Quanto às características magnéticas, a Figura 5.13 indica a intensidade da indução nas diferentes partes físicas no núcleo do TA para os casos 1 e 3, para os modos de compensação positiva e negativa com 27 volts. Já a Figura 5.14, a Figura

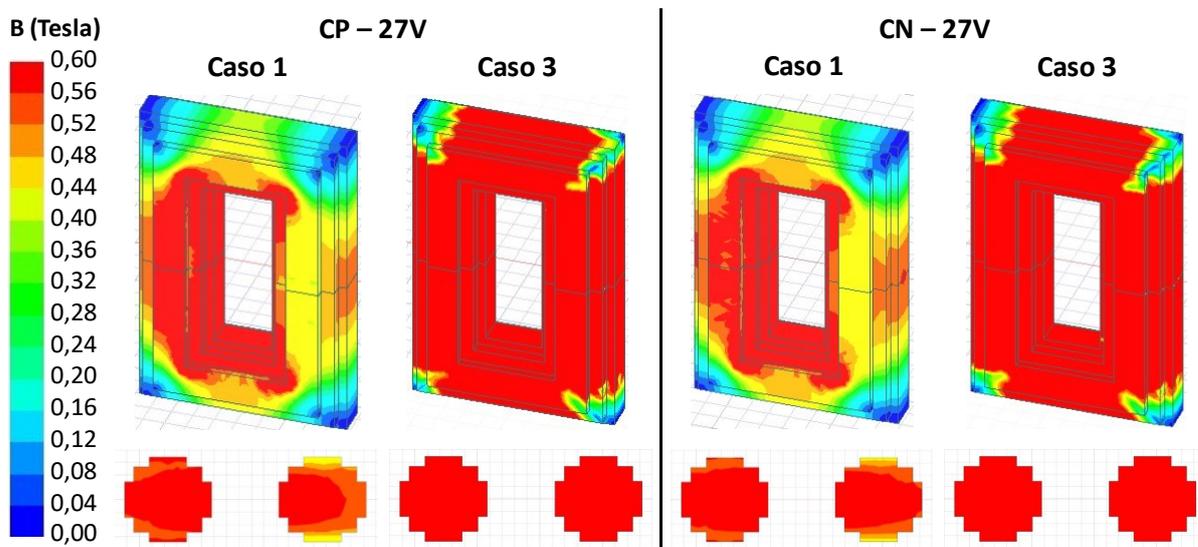
5.15 e a Figura 5.16 trazem informações correspondentes para os níveis de tensão de compensação de 20V, 14V e 7,5V, respectivamente.

Tabela 5.9 - Valores das tensões e corrente obtidas nas simulações do caso 3.

		I_{ts} (A)	V_{reg} (V)	V_{pri} (V)
CP	27V	14,47	90,85	181,61
	20V	13,13	89,69	180,61
	14V	12,67	90,27	180,80
	7,5V	11,98	90,27	180,51
CN	7,5V	10,31	89,69	179,55
	14V	9,91	90,27	179,36
	20V	9,60	89,69	179,16
	27V	9,03	89,42	178,76

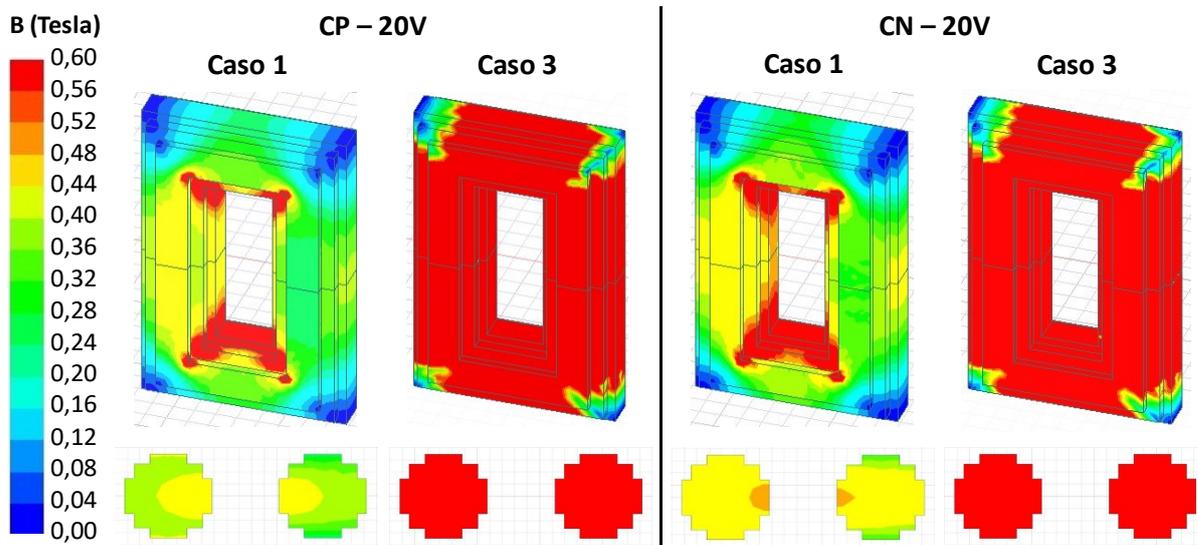
Fonte: Autor.

Figura 5.13 - Caso 1 e caso 3: perfil da indução magnética no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 27 volts.



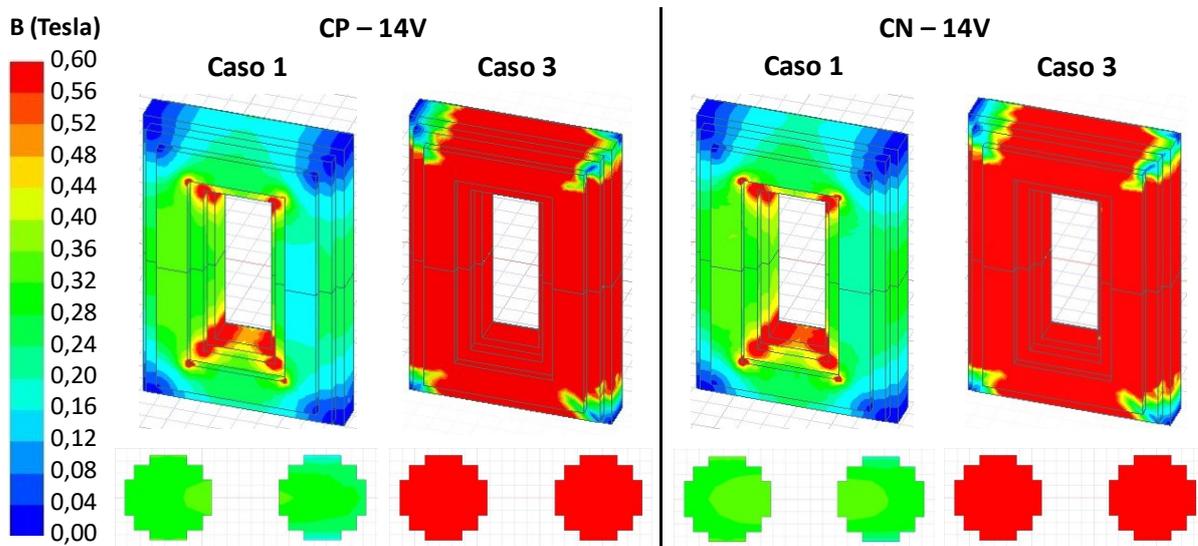
Fonte: Autor.

Figura 5.14 - Caso 1 e caso 3: perfil da indução magnética no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 20 volts.



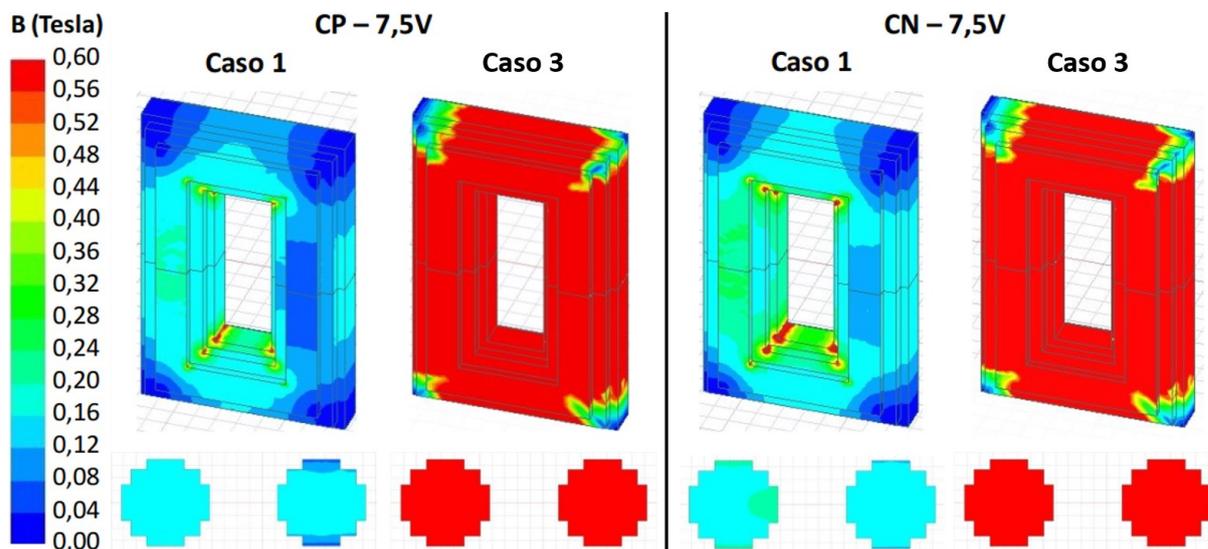
Fonte: Autor.

Figura 5.15 - Caso 1 e caso 3: perfil da indução magnética no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 14 volts.



Fonte: Autor.

Figura 5.16 - Caso 1 e caso 3: perfil da indução magnética no núcleo do TA para compensação positiva e negativa com 7,5 volts.



Fonte: Autor.

Observa-se que o padrão de distribuição da indução magnética no núcleo do Transformador de Acoplamento para o caso 3 é distinto daquele encontrado para o caso 1. A Tabela 5.10 traz uma comparação entre os valores de campo magnético e perdas no núcleo, obtidos pelas simulações dos casos 1 e 3. O percentual de erro é definido tomando o caso 1 como referência.

Tabela 5.10 - Valores de campo e perdas no núcleo do TA para os casos 1 e 3.

		B (T)			P (W)		
		Caso		Δ	Caso		Δ
		1	3		1	3	
CP	27 V	0,492	1,833	273%	3,356	38,033	1033%
	20 V	0,335	1,824	444%	1,576	37,647	2288%
	14 V	0,252	1,822	623%	0,890	37,644	4128%
	7,5 V	0,135	1,821	1248%	0,250	37,696	15008%
CN	7,5 V	0,163	1,807	1010%	0,368	37,140	10002%
	14 V	0,269	1,807	572%	1,015	37,203	3565%
	20 V	0,370	1,804	388%	1,914	37,674	1868%
	27 V	0,499	1,798	260%	3,455	36,857	967%

Fonte: Autor.

No caso 3, a imposição de corrente no secundário do TA enquanto o seu primário fica em circuito aberto leva o núcleo a um estado de saturação magnética conduzindo a uma situação operacional tal que a densidade de fluxo magnético

assume maiores valores. Também, a distribuição de indução magnética no núcleo não mostrou variações significativas à medida que a corrente imposta é alterada.

De posse dos valores numéricos, nota-se que tal efeito de saturação levou o núcleo do TA para um valor de indução de aproximadamente 1,81 tesla para todos os valores de corrente imposta. As perdas no ferro também se mantiverem praticamente constantes em todos os testes, com valor médio de 37,5 watts.

5.6 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos por meio das simulações realizadas para investigar as condições magnéticas de regime permanente do Regulador Eletromagnético de Tensão (RET) e a influência que a presença de duas fontes de fmm simultâneas exercem na indução e nas perdas magnéticas do Transformador de Acoplamento (TA). A metodologia adotada dividiu as simulações em três casos distintos, e os resultados desses casos foram analisados e comentados.

O Caso 1 compreendeu o RET em sua estrutura física e operacional completa, com a imposição simultânea das duas fontes de força magnetomotriz no TA (tensão no primário e corrente no secundário). Para tal situação foram realizadas investigações de desempenho sob diferentes níveis de subtensões e sobretensões. Os resultados obtidos demonstraram que o equipamento modelado no ANSYS obteve resultados satisfatórios para a regulação de tensão, com as tensões disponibilizadas pelos tapes próximas aos valores nominais e a tensão na carga mantendo-se estável. As correntes circulantes no sistema também foram analisadas e, em especial as condições magnéticas de funcionamento do RET. Com relação ao Transformador de Acoplamento, a intensidade de seu campo magnético, como seria esperado, mostrou-se dependente diretamente do nível da tensão de compensação. Todavia, para o nível mais alto de compensação testado (27V), a indução magnética média no núcleo do TA ainda se mostrou bastante inferior àquela do denominado “joelho” de saturação magnética. Isso indica pois que, para o protótipo construído, esta unidade evidencia uma subutilização do material ferromagnético usado. As perdas elétricas no núcleo do TA foram também avaliadas e, como esperado, se mostraram dependentes com a intensidade da indução magnética a que o núcleo fica submetido. Já com relação ao

Transformador de Excitação, o nível da tensão de compensação mostrou que não afeta as respectivas condições magnéticas de operação, nem as perdas.

Através do Caso 2, atrelado com o funcionamento isolado do Transformador de Acoplamento, foram então realizados estudos investigativos de seu desempenho, sob o ponto de vista magnético, sob a ação isolada da fmm advinda apenas da tensão aplicada ao seu primário. Ao comparar os resultados dos casos 1 e 2, observou-se que o padrão da indução magnética no núcleo do TA não apresentou diferenças significativas, quer no que tange aos valores médios de indução, como também, as perdas magnéticas. Com isso, constata-se que embora o TA presente no RET tenha um modo de operação incomum (corrente imposta), as diretrizes de projeto para o seu núcleo podem ser baseadas no seu funcionamento a vazio.

Por fim foram expostos os resultados relacionados ao caso 3, onde simulou-se o TA levando em conta apenas a corrente no secundário como fonte de fmm, mantendo o primário em aberto. Nesse caso ocorreu a saturação magnética do núcleo do TA, cujo comportamento seria similar à de um transformador de corrente presente nas instalações de medição e proteção. Estes, como sabido, devem ser evitados para a operação a vazio, sob pena do surgimento de tensões elevadas em magnitude, causando riscos de vida e materiais. Muito embora tais fatos, as análises feitas evidenciaram que as tensões induzidas em ambos os enrolamentos do TA, para o caso 3, efetivamente se mostraram maiores, porém, não indicando níveis que possam representar maiores perigos como aqueles dos transformadores de corrente. Isso é compreensível diante do fato que as relações de transformação entre os dois equipamentos são completamente distintas. Para os estudos feitos, ficou identificado o surgimento de um estado de saturação que conduziu a uma magnitude da indução magnética no núcleo para um valor próximo a 1,8T com perdas na ordem de 37W, grandezas estas que não variaram muito com a alteração do valor de corrente imposta. Quanto às tensões induzidas no primário do TA, quando da injeção da corrente no seu secundário, estas se mostraram maiores, mas moderadas.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSÕES

Em consonância com os objetivos estabelecidos como cerne desta dissertação, os trabalhos realizados ao longo deste trabalho, foram documentados na forma de cinco capítulos que perfizeram os estudos investigativos e fundamentos para os desenvolvimentos. Dentro deste escopo, foram então conduzidos esforços visando: o desenvolvimento de uma estratégia de modelagem do RET no software ANSYS Maxwell; a análise das condições magnéticas impostas nas unidades eletromagnéticas sob condições normais e anômalas de operação e, a partir destas constatações, oferecer diretrizes técnicas e econômicas para o projeto e construção das unidades de potência que constituem o regulador aqui contemplado.

Assim, no capítulo 1 foram abordados e contextualizados conceitos e problemas associados o tema da regulação da tensão, visando, sobretudo, contextualizar o leitor para uma melhor compreensão dos propósitos do trabalho e do escopo das investigações realizadas. Neste sentido, além de estabelecer os fundamentos gerais sobre a matéria, foi também apresentada a concepção de um compensador concebido no âmbito do Grupo de Qualidade da UFU, o qual se apresenta como um dispositivo inovador, cuja eficácia operacional foi ratificada através de dissertações e publicações anteriores. Não obstante o sucesso computacional e experimental da proposta de compensação em pauta, foram também postos desafios importantes, atrelados com as condições magnéticas impostas aos núcleos dos transformadores, que exercem papel relevante para o projeto e construção destes dispositivos reguladores. Isto posto, foram então estabelecidas as metas dos trabalhos a serem conduzidos nesta dissertação, cujos principais resultados são sintetizados na sequência.

Objetivando consubstanciar os estudos, no capítulo 2 foram contempladas informações sobre a estrutura física e do funcionamento do RET, com destaque para as unidades de potência, o Transformador de Excitação (TE) e o Transformador de Acoplamento (TA). O TE foi identificado como uma unidade eletromagnética autotransformadora, oferecendo opções de tensão de compensação por meio de tapes. Complementarmente, o TA, responsável pela injeção da tensão de regulação em série com o alimentador, mostrou-se um dispositivo transformador com características operacionais atípicas quando correlacionado com uma unidade de transformação de dois enrolamentos convencional, visto se apresentar com uma dupla excitação de fmms. Adicionalmente, foi evidenciado o potencial do equipamento na regulação das tensões abaixo e acima dos valores recomendados, assim como também sintetizadas equações matemáticas que fundamentam o comportamento elétrico do equipamento.

Seguindo, foram então fornecidos detalhes construtivos sobre um protótipo em escala reduzida do Regulador Eletromagnético de Tensão, desenvolvido e utilizado em trabalhos anteriores ao presente. A partir de dados de projeto e fabricação, foram então fornecidas as principais informações fabris, no que tange aos aspectos construtivos das unidades magnéticas e elétricas do TE e TA, como se fazem necessárias para o software de análise empregado.

Avançando, procedeu-se a implementação das unidades eletromagnéticas do RET no software ANSYS Maxwell. Para maior clareza e justificativa da opção feita quanto ao recurso computacional empregado, foram apresentados os princípios físicos que regem o simulador, seu embasamento na técnica de análise através do Método dos Elementos Finitos (MEF), ressaltando suas aplicações, vantagens e limitações. Uma vez configurado o equipamento, os recursos para as investigações sobre o desempenho dos componentes eletromagnéticos do regulador, juntamente com seus acessórios e possibilidades operacionais, foram disponibilizadas para os estudos de caso sintetizados a seguir.

As simulações foram realizadas na forma de três casos distintos. O Caso 1 se apresentou consonante com o funcionamento do RET em sua estrutura completa. Assim, foram aplicadas, de forma simultânea, as duas fontes de fmm sobre o TA. Os resultados mostraram que o compensador se mostrou efetivo aos propósitos postos,

cuja eficácia pode ser constatada através das grandezas monitoradas: tensões e correntes nas mais diversas partes. No que se refere aos níveis da indução magnética encontrados para o TA, esta mostrou-se diretamente dependente do nível de tensão de compensação, como esperado. No entanto, mesmo no nível mais alto de regulação testado, a indução magnética média no núcleo do TA mostrou-se inferior ao valor na região do "joelho" da curva de saturação magnética, indicando uma subutilização do material utilizado. As perdas elétricas no núcleo do TA foram também avaliadas e mostraram-se condizentes com as alterações ocorridas nos níveis da indução magnética. Já, quanto ao Transformador de Excitação, visto sua tensão de suprimento não ter sido alvo de variações, suas condições magnéticas de operação e perdas não evidenciaram alterações, como esperado.

Feitos os estudos acima, procedeu-se as avaliações identificadas para o Caso 2. Este, como esclarecido, visou o desempenho isolado do TA considerando apenas a fmm da tensão aplicada ao seu primário. Os resultados obtidos indicaram a inexistência de diferenças significativas dos níveis de saturação em relação ao Caso 1. Esta constatação responde ao questionamento feito no início da dissertação, isto é, o TA pode ser considerado, para fins de projeto, como um transformador convencional funcionando à base de tensão aplicada. A presença da corrente imposta, como contemplado para o Caso 1, não altera as condições magnéticas impostas ao núcleo do TA.

Por fim, o Caso 3 simulou o TA levando em conta tão apenas a corrente no secundário como fonte de fmm, mantendo o primário em circuito aberto. Nesse caso, ocorreu a saturação magnética do núcleo do TA, o qual evidenciou um comportamento similar de um transformador de corrente utilizado em instalações de medição e proteção. As análises revelaram que as tensões induzidas em ambos os enrolamentos do TA foram maiores do que no Caso 1, mas não atingiram níveis que pudessem oferecer perigos, a exemplo do que ocorre com os transformadores de corrente. As proporções dos valores das tensões induzidas nos enrolamentos se apresentam compatíveis com a relação de transformação do TA.

No geral, os estudos conduzidos por essa dissertação forneceram contribuições valiosas sobre as características construtivas, operacionais e

magnéticas do RET, bem como sua simulação computacional por meio do ANSYS Maxwell.

Não obstante os avanços obtidos, considera-se relevante que, em trabalhos futuros, sejam realizados esforços voltados para alguns pontos. Dentre eles sugere-se:

- Estudos relacionados com os fenômenos transitórios eletromagnéticos quando do processo da comutação dos tapes de compensação;
- Análise da viabilidade de meios eletrônicos para os chaveamentos dos tapes;
- Otimização dos projetos dos transformadores, visando, sobretudo, aspectos relacionados a redução de materiais e custos;
- Avaliar interesses associados com a substituição do núcleo de aço-silício por ligas amorfas;
- Materializar o fruto das pesquisas com o RET num equipamento em escala comercial, sua implementação em campo, análise de desempenho e avaliação financeira quando da comparação com outros recursos.

Referências bibliográficas

- [1] C. Sankaran, *POWER QUALITY*. CRC Press, 2002.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, e H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd edition. McGraw-Hill, 2004.
- [3] M. A. S. Masoum e E. F. Fuchs, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, 2nd edition. Elsevier, 2015.
- [4] ANEEL, “Web page - Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist)”, 2021. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist> (acessado 25 de abril de 2023).
- [5] ANEEL, *PRODIST - Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica*. 2021. Acessado: 25 de abril de 2023. [Online]. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf
- [6] ONS, “Web page - Procedimentos de rede vigentes”, 2020. <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes> (acessado 25 de abril de 2023).
- [7] ONS, *Procedimentos de rede - Submódulo 9.7*. 2020. Acessado: 25 de abril de 2023. [Online]. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%209.7-IN_2020.12.pdf
- [8] J. V. Milanovic *et al.*, “International industry practice on power-quality monitoring”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, nº 2, p. 934–941, 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2283143>
- [9] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions*. John Wiley & Sons, 2000.
- [10] “Regulador de Tensão - TSEA Energia Toshiba TB-1000”, Acessado: 25 de abril de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.tseaenergia.com.br/regulador/>
- [11] “Eaton VR-32 Voltage Regulator”. Acessado: 25 de abril de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/utility-and-grid-solutions/vr32-regulator/vr32-regulator/Eaton-VR-32-Regulator-Brochure-EN-US.PDF>
- [12] “Regulador de Tensão Monofásico ITB RAV-2”. Acessado: 25 de abril de 2023. [Online]. Disponível em: <https://itb.ind.br/download/mi005-manual-do-regulador-rav-2-com-ctr-2-rev-2017-06-portugues/>
- [13] J. G. Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, e F. Blaabjerg, “Control and testing of a dynamic voltage restorer (DVR) at medium voltage level”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 19, nº 3, p. 806–813, maio 2004. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.826504>
- [14] M. Weinhold, R. Zurowski, T. Mangold, e L. Voss, “Power Conditioning Equipment for Improvement of Power Quality in Distribution Systems”.

- [15] S. Haffner, L. Alberto Pereira, L. Varaschin Gasperin, e L. Barreto, “Alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia visando eliminar violações de tensão”, *Revista Controle & Automação*, p. 546–563, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-17592009000400008>
- [16] A. C. Ferreira, L. M. De Souza, e E. H. Watanabe, “Variable speed synchronous condenser using doubly-fed induction machine”, *Revista Controle & Automação*, vol. 15, nº 2, Sociedade Brasileira de Automatica, p. 172–180, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-17592004000200006>
- [17] J. A. F. Barbosa, J. C. Oliveira, A. B. Vasconcellos, e J. M. Pacheco, “A case study of transient and dynamic performance of saturated core reactor static var compensator”, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, nº 7, p. 357–362, abr. 2009. <https://doi.org/10.24084/repqj07.353>
- [18] J. C. Oliveira, A. B. Vasconcellos, R. Apolônio, M. K. Kawaphara, J. E. Carvalho, e E. Raupp Jr, “Compensador Estático de Reativos Controlado a Tiristores: Modelagem e Simulação”, em *VII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia*, Santos - SP, 2007, p. 1–6.
- [19] Z. Xi, B. Parkhideh, e S. Bhattacharya, “Improving Distribution System Performance with Integrated STATCOM and Supercapacitor Energy Storage System”, em *39th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, IEEE, 2008, p. 1390–1395.
- [20] F. P. Santilio, “Proposta, Modelagem e Validação de uma Nova Concepção de Regulador Eletromagnético Através do Reforço Série de Tensão”, Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- [21] L. E. Vasconcelos, “Modelagem no Domínio da Frequência de um Regulador Eletromagnético de Tensão Baseado na Compensação Série”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- [22] T. V. Silva, “Uma Proposta para o Controle Eletrônico de Reguladores Eletromagnéticos Através do Reforço Série de Tensão”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- [23] V. H. F. Brito, “Proposta de uma Topologia Alternativa para um Regulador Eletromagnético de Tensão”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.612>
- [24] D. Constantin, P.-M. Nicolae, e C.-M. Nitu, “3D Finite Element Analysis of a Three Phase Power Transformer”, em *EuroCon*, Zagreb: IEEE, 2013. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6625184>
- [25] V. Darley, “The Use of Finite Element Techniques in the Design and Analysis of Power Transformers”, 2000. <https://doi.org/10.1049/ic:20000058>
- [26] G. M. de Carvalho, “Modelagem trifásica de um Regulador Eletromagnético de Tensão com controle independente por fase”, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.
- [27] R. Courant, “Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations” *Bulletin of the American Mathematical Society*. 49: 1–23. <https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1943-07818-4>

- [28] M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, e L. J. Topp, “Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures”, *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 23, 1956. <https://doi.org/10.2514/8.3664>
- [29] C. Rodrigues Junior, W. Manjud, e M. Filho, “Estudo Matemático dos Elementos Finitos Utilizados em Cálculo Estrutural”, em *IX Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI*, 2019.
- [30] Ansoft, “Lecture 3: Static Magnetic Solvers ANSYS Maxwell V16 Training Manual”, 2013. Acessado: 7 de junho de 2023. [Online]. Disponível em: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L03_Static_Magnetic_Solvers.pdf
- [31] Ansoft, “Lecture 5: Maxwell Transient Solvers ANSYS Maxwell V16 Training Manual A. Magnetic Transient Solver”, 2013. Acessado: 2 de julho de 2023. [Online]. Disponível em: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L05_Transient_Solvers.pdf
- [32] Ansoft, “Lecture 4: Static Electric Solvers ANSYS Maxwell V16 Training Manual”, 2013. Acessado: 2 de julho de 2023. [Online]. Disponível em: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L04_Static_Electric_Solvers.pdf